



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**Sistema automático de fumigación de cultivos mediante dron, basado en
textura y color dentro de la agricultura 5.0 en un entorno controlado a
escala 1:5**

**Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

Autores:

Acán Carpintero Jeison Wilmer
Asadobay Paca Rosana Yadira

Tutor:

Msc. José Luis Jínez Tapia

Riobamba, Ecuador. 2025

DERECHOS DE AUTORÍA

Nosotros, Jeison Wilmer Acán Carpintero, con cédula de ciudadanía 060483858-1 y Rosana Yadira Asadobay Paca con cédula de ciudadanía 060427144-5, autores del trabajo de investigación titulado: **“Sistema Automático de fumigación de cultivos mediante Dron, basado en textura y color dentro de la Agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 23 de enero de 2025.



Jeison Wilmer Acán Carpintero

C.I: 060483858-1



Rosana Yadira Asadobay Paca

C.I: 060427144-5

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

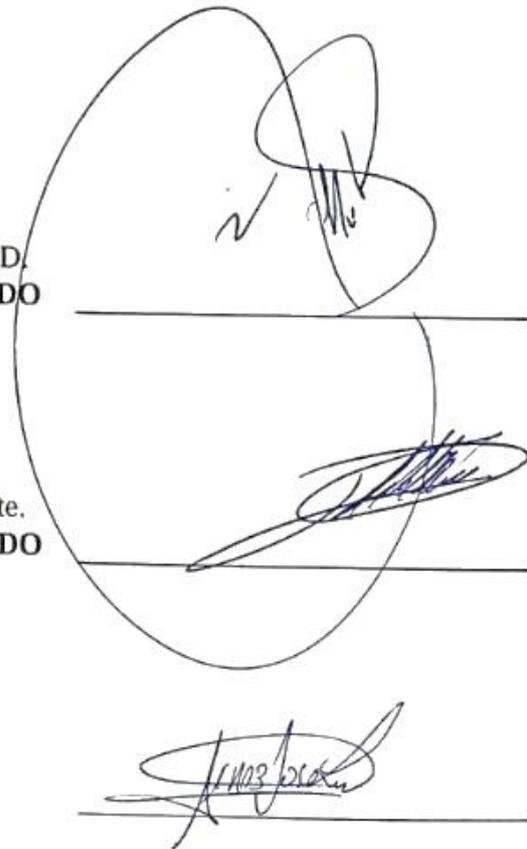
Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado del trabajo de investigación "**Sistema Automático de fumigación de cultivos mediante Dron, basado en textura y color dentro de la Agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5**", presentado por Jelson Wilmer Acán Carpintero, con cédula de identidad número 060483858-1, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la APROBACIÓN de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 23 de enero de 2025.

Dr. Marlon Danilo Basantes Valverde, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Leonardo Fabián Rentería Bustamante.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

José Luis Jínez Tapia, Msc.
TUTOR

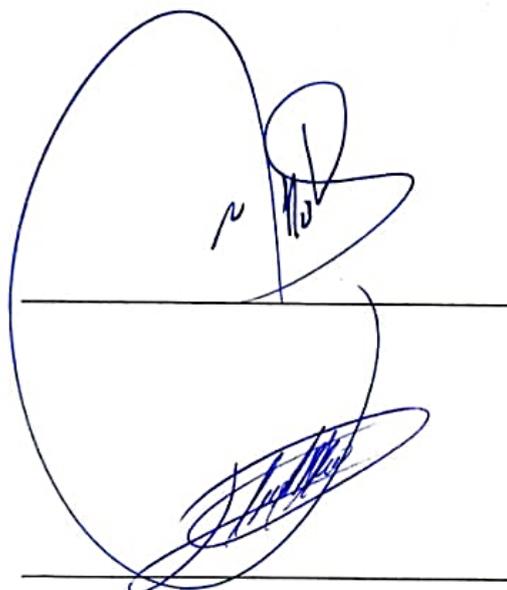


DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Sistema Automático de fumigación de cultivos mediante Dron, basado en textura y color dentro de la Agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5**, presentado por Rosana Yadira Asadobay Paca con cédula de identidad número 060427144-5, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la APROBACIÓN de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 23 de enero de 2025

Dr. Marlon Basantes, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

A large, stylized handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the bottom, positioned above a horizontal line.

Ing. Leonardo Rentería, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Ing. José Jinez, Msc.
TUTOR

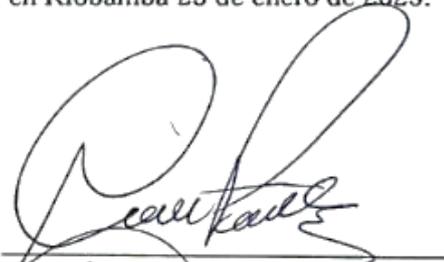
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jinez', with a long horizontal stroke at the bottom, positioned above a horizontal line.

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Sistema Automático de fumigación de cultivos mediante Dron, basado en textura y color dentro de la Agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5**”, presentado por Jelson Wilmer Acán Carpintero, con cédula de identidad número 060483858-1, bajo la tutoría de Msc. José Luis Jínez Tapia; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 23 de enero de 2025.

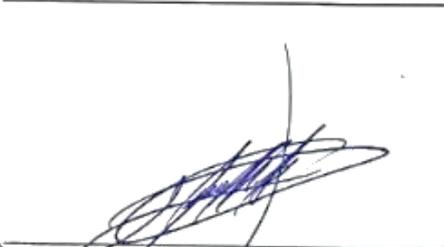
Ing. Carlos Ramiro Peñafiel Ojeda, PhD.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Dr. Marlon Danilo Basantes Valverde, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Leonardo Fabián Rentería Bustamante.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Sistema Automático de fumigación de cultivos mediante Dron, basado en textura y color dentro de la Agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5**, presentado por Rosana Yadira Asadobay Paca con cédula de identidad número 060427144-5, bajo la tutoría de Msc. José Luis Jínez Tapia; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 23 de enero de 2025.

Presidente del Tribunal de Grado
Ing. Carlos Peñafiel Ojeda, PhD.

Miembro del Tribunal de Grado
Dr. Marlon Basantes Valverde, PhD.

Miembro del Tribunal de Grado
Ing. Leonardo Rentería Bustamante, PhD





CERTIFICACIÓN

Que, **ACÁN CARPINTERO JEISON WILMER** con CC: **0604838581**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**SISTEMA AUTOMÁTICO DE FUMIGACIÓN DE CULTIVOS MEDIANTE DRON, BASADO EN TEXTURA Y COLOR DENTRO DE LA AGRICULTURA 5.0 EN UN ENTORNO CONTROLADO A ESCALA 1:5**", cumple con el **0%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de diciembre de 2024



Firmado electrónicamente por:
JOSE LUIS JINEZ
TAPIA

Ing. José Luis Jínez Tapia MsC.
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICACIÓN

Que, **ASADOBAY PACA ROSANA YADIRA** con CC: **0604271445**, estudiante de la Carrera **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **SISTEMA AUTOMÁTICO DE FUMIGACIÓN DE CULTIVOS MEDIANTE DRON, BASADO EN TEXTURA Y COLOR DENTRO DE LA AGRICULTURA 5.0 EN UN ENTORNO CONTROLADO A ESCALA 1:5**", cumple con el **0%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 20 de diciembre de 2024



Ing. José Luis Jínez Tapia MsC.
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y los sacrificios que han sido esenciales para cada logro en este proyecto. A mi sobrina y hermanos, por ser una fuente constante de motivación, que me impulsan a seguir adelante sin rendirme. Y a todos aquellos que, de alguna manera, han sumado su esfuerzo y su presencia para hacer posible este proyecto.

Jeison W. Acán

Con todo mi corazón, dedico este logro a mi Padre Celestial, un Dios de amor y benevolencia que me guio por los caminos más desafiantes y jamás me soltó. A mis amados padres, Martha y Juan, quienes son mi ejemplo de motivación e inspiración. Su esfuerzo incansable y amor incondicional me han enseñado a nunca rendirme y a luchar por mis sueños. Y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a que este proyecto se hiciera realidad, ya sea con palabras de aliento, consejos o acciones desinteresadas, les dedico este trabajo con todo mi cariño y eterna gratitud.

Rosana Y. Asadobay

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, cuya incondicional fortaleza han sido el motor que me impulsó a alcanzar este objetivo. A los docentes y a nuestro tutor, les extiendo mi gratitud por compartir su conocimiento, orientarme con sabiduría y brindarme la motivación necesaria para superar cada desafío académico, especialmente en los momentos más desafiantes. Su comprensión y aliento han sido pilares fundamentales en este recorrido. Este logro es el fruto de un esfuerzo colectivo y del invaluable respaldo de cada uno de ustedes.

Jeison W. Acán

Mi eterno agradecimiento a Dios por permitirme culminar con éxito mi tan anhelada carrera. A mis padres, fuente inagotable de amor y apoyo incondicional. a mi Ángel en la Tierra Alexis, F. cuya presencia ha hecho este camino más llevadero y significativo. Su compañía transformó cada desafío en aprendizaje y cada día difícil en un motivo para seguir adelante. A mis hermanas por brindarme su tiempo y por ser siempre ese hombro en el que pude descansar.

Este logro es también de ustedes. Gracias, de todo corazón.

Rosana Y. Asadobay

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	22
1. INTRODUCCIÓN.....	22
1.1. Antecedentes.....	22
1.2. Planteamiento del Problema	23
1.3. Justificación.....	24
1.4. Objetivos.....	25
1.4.1. General.....	25
1.4.2. Específicos.....	25
CAPÍTULO II.....	26
2. MARCO TEÓRICO	26
2.1. Estado del Arte	26
2.2. Marco Teórico	27
2.2.1. Agricultura 5.0.....	27
2.2.1.1. Ventajas	27
2.2.1.2. Desventajas.....	27
2.2.1.3. Evolución.....	28
2.2.1.4. Fundamentos de la Agricultura 5.0.....	29
2.2.2. Automatización y robótica en la Agricultura 5.0	30
2.2.2.1. Robótica en la agricultura.....	30

2.2.2.2.	Tipos de Agrobot's.....	30
2.2.2.3.	Drones en la Agricultura.....	31
2.2.2.3.1.	Ventajas del monitoreo con drones	31
2.2.2.3.2.	Clasificación - Tipos de drone para la agricultura	31
2.2.2.3.3.	Componentes de un drone.....	32
2.2.2.3.4.	Características de un drone	32
2.2.2.3.5.	Normativa de vuelo en el país.....	32
2.2.2.3.6.	Aplicaciones de los Drones en la Agricultura.....	33
2.2.2.4.	Fumigación en la Agricultura	33
2.2.2.4.1.	Métodos de fumigación en cultivos	33
2.2.2.4.2.	Pulverización.....	33
2.2.2.4.3.	Productos Fitosanitarios Comúnmente Utilizados en Cultivos:	34
2.2.2.5.	Textura y Color en Suelos y Cultivos:.....	34
2.2.2.5.1.	Textura del Suelo:	34
2.2.2.5.2.	Color del Suelo:	35
2.2.2.5.3.	Cultivos y su Relación con la Textura y el Color del Suelo:	35
2.2.3.	Inteligencia artificial (Machine Learning).....	35
2.2.3.1.	Finalidades o usos de la IA.....	36
2.2.3.2.	IA en la Agricultura.....	36
2.2.3.3.	Clasificación o tipos de IA	37
2.2.3.4.	Aplicabilidad	37
CAPÍTULO III	39
3.	METODOLOGÍA	39
3.1.	Tipo de Investigación	39
3.2.	Población y muestra.....	39
3.2.1.	Población	39
3.2.2.	Muestra	39
3.3.	Operacionalización de Variables.....	39
3.3.1.	Variable Independiente.....	39
3.3.2.	Variable Dependiente	40
3.4.	Diseño de Investigación.....	41
3.5.	Procedimiento.....	43
3.5.1.	Tecnología empleada (hardware y software).....	44

3.5.1.1.	Hardware	44
3.5.1.2.	Software.....	44
3.5.2.	Ensamblaje de Dron Cuadricóptero.....	44
3.5.3.	Ajuste y configuración del controlador de vuelo <i>MatekSys F405-STD</i>	49
3.5.4.	Sistema de aspersión de líquidos	57
3.5.5.	Sistema de aspersión de semillas.....	58
3.5.6.	Prueba de vuelo	59
3.5.7.	Plan de vuelo	60
3.5.7.1.	Plan de vuelo con Mission Planer.....	60
3.5.7.2.	Ejecución del plan de vuelo en campo.	62
3.5.8.	Procesamiento de imágenes.....	62
3.5.8.1.	Configuración de proyecto	65
3.5.8.2.	Recolección y etiqueta de datos.....	66
3.5.8.3.	Creación del modelo IA.....	69
3.5.8.4.	Validación y optimización del modelo.....	72
CAPÍTULO IV		73
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		73
4.1.	Adquisición de datos	73
4.2.	Sistema de fumigación con IA para la detección de colores	75
4.2.1.	Detección del sistema	75
4.2.2.	Eficiencia del uso de líquidos o productos fitosanitarios	77
4.2.3.	Eficiencia del tiempo de ejecución.....	78
4.3.	Sistema de fumigación con IA para la identificación de texturas	80
4.3.1.	Detección del sistema	80
4.3.2.	Eficiencia del uso de semillas.....	83
4.3.3.	Eficiencia del tiempo de ejecución.....	84
4.4.	Sistema de fumigación con IA para la identificación de enfermedades.....	85
4.4.1.	Detección del sistema	85
4.4.2.	Eficiencia en el uso de líquidos o productos fitosanitarios.	87
4.4.3.	Eficiencia del tiempo de ejecución.....	88
4.5.	Resumen de resultados	90
4.5.1.	Eficiencia de detección.....	90

4.5.2. Eficiencia en el Uso de Productos en los Sistemas de Detección con Inteligencia Artificial.....	91
4.5.3. Eficiencia en los Tiempos de Ejecución de los Sistemas de Detección	92
CAPÍTULO V	94
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
5.1. Conclusiones.....	94
5.2. Recomendaciones	95
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Tecnologías para cada etapa de la agricultura [2].	27
Tabla 2.- Tipo de Pulverizadores [35].	34
Tabla 3.- Clasificación básica de productos Fitosanitarios [41].	34
Tabla 4.- Variable Independiente	39
Tabla 5.- Variable Dependiente	40
Tabla 6.- Modos de vuelo	54
Tabla 7.- Parámetros de vuelo automático	61
Tabla 8.- Datos de referencia del entorno controlado.	73
Tabla 9.- Porcentaje de detección de altura optima de trabajo.	73
Tabla 10.- Evaluación del sistema de detección de colores.	77
Tabla 11.- Evaluación del sistema de detección de texturas.	82
Tabla 12.- Evaluación del sistema de detección de enfermedades.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1.- La arquitectura de flujo operativo para el proceso de cultivo hacia la agricultura 5.0 [16].	29
Ilustración 2.- Dron DJI AGRAS T30 para la agricultura de precisión [34].	33
Ilustración 3.- Tipos de pulverizadores [38], [39], [40].	34
Ilustración 4.- Drone agrícola con Inteligencia Artificial [51].	38
Ilustración 5.- Diagrama de Desarrollo del proyecto	42
Ilustración 6.- Sistema automático de fumigación de cultivos mediante dron, basado en textura y color dentro de la agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5.	43
Ilustración 7.- Componentes del Dron.	45
Ilustración 8.- Componentes de la estructura Frame 680.....	46
Ilustración 9.- Chasis Frame 680 ensamblado.	46
Ilustración 10.- Ensamblaje de motores y brazos del hexacóptero.	46
Ilustración 11.- Conexiones entre motores y ESC.	47
Ilustración 12.- Conexión entre los motores brushless y ESC [52].	47
Ilustración 13.- Incorporación de los motores y ESC 40A al Frame.	47
Ilustración 14.- Acople del gimbal y la cámara.	48
Ilustración 15.- Ubicación del controlador de vuelo.....	48
Ilustración 16.- Acoplamiento del GPS	48
Ilustración 17.- Esquema de conexión del GPS.	49
<i>Ilustración 18.- Acoplamiento de la batería en el dron.</i>	49
Ilustración 19.- Colocación de las hélices en el dron.....	49
Ilustración 20.- Instalación y Configuración del nuevo Firmware en el controlador de vuelo.	50
Ilustración 21.- Página oficial del software ArduPilot [53].	50
Ilustración 22.- (a) Pantalla inicial del software Misión Planner, (b) Interfaz gráfica del Software Misión Planner.	51
Ilustración 23.- Conexión exitosa entre la tarjeta MatekSys F405-STD mediante cable USB y el software Mission Planner.	51
Ilustración 24.- Interfaz del software Mission Planner, configuraciones iniciales.	51
Ilustración 25.- Configuración de los parámetros de sintonización inicial.....	52
Ilustración 26.- Parámetros de aceleración y compas.	52
Ilustración 27.- Calibración del GPS eje vertical del Dron.....	52
Ilustración 28.- (a) Calibración del radio control FlySky utilizado en nuestro proyecto, (b) Calibración completa.....	53
Ilustración 29.- Configuración de salida de motores y actuadores en el dron.	53
Ilustración 30.- Configuración de los puertos seriales.....	54
Ilustración 31.- Calibración y parámetros de ESC utilizada en el dron.	54
Ilustración 32.- Definición del protocolo Fail-Safe.	55
Ilustración 33.- (a) Diagrama de orden de motores para un Hexacóptero Hexa CW X [54]. (b) Calibración de Motores con el software Mission Planner.	55

Ilustración 34.- Prueba de giros de motores implementados en el dron.	56
Ilustración 35.- Movimientos principales del drone [55].....	56
Ilustración 36.- Parámetros PID y ajustes de control para los ejes Roll, Pitch y Yaw.	57
Ilustración 37.- Proceso detallado del sistema de aspersión de líquidos y sus componentes.	58
Ilustración 38.- Proceso detallado del sistema de aspersión de semillas y sus componentes.	59
Ilustración 39.- Dron Ensamblado con todos sus sistemas.	59
Ilustración 40.- Prueba de vuelo del dron.	60
Ilustración 41.- Plan de vuelo elaborado con Mission Planer.....	61
Ilustración 42.- Ubicación de la misión de vuelo y límite del área.....	61
Ilustración 43.- a) Área de la misión de vuelo, b) Reconocimiento aéreo de la misión vista por el Dron.....	61
Ilustración 44.- Flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes y despliegue de modelos de Machine Learning.	62
Ilustración 45.- Colores seleccionados para la implementación del entorno controlado a escala 1:5.	63
Ilustración 46.- Texturas de los suelos seleccionados para la implementación del sistema de aspersión de semillas en el entorno controlado a escala 1:5.....	64
Ilustración 47.- <i>Análisis de la maqueta para la detección de enfermedades.</i>	64
Ilustración 48.- Creación de proyecto “Detección de colores”.....	65
Ilustración 49.- Creación de proyecto “Detección de texturas”.....	66
Ilustración 50.- Creación de proyecto “Detección de enfermedades”.	66
Ilustración 51.- Procedimiento para la recolección de datos “Detección de colores”.....	67
Ilustración 52.- Etiquetado manual de datos para el entrenamiento de la IA en el sistema “Detección de colores”.	67
Ilustración 53.- Procedimiento para la recolección de datos “Detección de texturas”.	67
Ilustración 54.- Etiquetado manual de datos para el entrenamiento de la IA en el sistema “Detección de texturas”.	68
Ilustración 55.- Procedimiento para la recolección de datos “Detección de enfermedades”.	68
Ilustración 56.- Etiquetado manual de datos para el entrenamiento de la IA en el sistema “Detección de enfermedades”.	68
Ilustración 57.- Creación del modelo, configuración de parámetros en la sección de Impulse Design.....	69
Ilustración 58.- Ajuste del parámetro en el Bloque de Imagen.....	70
Ilustración 59.- Ajuste y configuración del Bloque de Detección de Objetos.	70
Ilustración 60.- Ajuste del parámetro en el Bloque de Imagen.....	70
Ilustración 61.- Ajuste y configuración del bloque de Detección de Objetos.....	71
Ilustración 62.- Ajuste del parámetro en el Bloque de Imagen.....	71
Ilustración 63.- Ajuste y configuración del Bloque de Detección de Objetos.	71
Ilustración 64.- Validación y resultados del modelo “Detección de Colores”.....	72
Ilustración 65.- Validación y resultados del modelo “Detección de texturas”.	72

Ilustración 66.- Validación y resultados del modelo “Detección de enfermedades”.....	72
Ilustración 67.- Datos de referencia del entorno controlado.....	73
Ilustración 68.- Porcentaje de detección de altura optima de trabajo.	74
Ilustración 69.- a) Prueba de vuelo, altura de 1m. b) Prueba de vuelo, altura 2m.	74
Ilustración 70.- a) Prueba de vuelo, altura 4m. b) Pruebas de vuelo altura 6m.	75
Ilustración 71.- Entorno controlado a escala 1:5, maqueta diseñada para la detección por colores.....	75
Ilustración 72.- Ejecución del sistema de detección por colores.	75
Ilustración 73.- Imágenes capturadas por el dron durante la ejecución de la misión de vuelo. Estas imágenes presentan los resultados obtenidos mediante el sistema de detección de colores, evidenciando la capacidad del sistema para diferenciar con precisión diversas tonalidades en el entorno observado y reflejando así su efectividad.....	76
Ilustración 74.- Vista aérea desde la cámara del dron de la ejecución del sistema de detección por colores.	76
Ilustración 75.- Evaluación del sistema de detección de colores.	77
Ilustración 76.- Evaluación de la eficiencia del sistema automático para el uso de líquidos.	78
Ilustración 77.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución del sistema automático.	79
Ilustración 78.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución.	79
Ilustración 79.- a)Entorno controlado a escala 1:5, maqueta diseñada para la detección de texturas. b) Vista aérea del sistema.	80
Ilustración 80.- Ejecución del sistema de detección por texturas.	80
Ilustración 81.- Resultados obtenidos del sistema de detección de texturas.....	81
Ilustración 82.- Vista Aérea de la ejecución del sistema detección de texturas.....	81
Ilustración 83.- Evaluación del sistema de detección de texturas.....	82
Ilustración 84.- Evaluación de la eficiencia del sistema automático para el uso de productos.	83
Ilustración 85.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución del sistema automático.	84
Ilustración 86.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución.	84
Ilustración 87.- Entorno controlado a escala 1:5, maqueta diseñada para la detección de Enfermedades en cada sector.....	85
Ilustración 88.- Resultados obtenidos de las pruebas del sistema de detección de enfermedades, con un enfoque en las patologías identificadas.	85
Ilustración 89.- Vista Aérea de la ejecución del sistema detección de Enfermedades por sector.....	86
Ilustración 90.- Evaluación de sistema de detección por enfermedad.....	86
Ilustración 91.- Evaluación de la eficiencia del sistema automático para el uso de líquidos.	88
Ilustración 92.- Evaluación de la eficiencia en tiempo de ejecución del sistema automático.	89
Ilustración 93.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución.	89

Ilustración 94.- Diagrama de cajas eficiencia promedio del IA de detección.....	90
Ilustración 95.- Eficiencia en el Uso de Productos en los Sistemas de Detección (Manual VS Automático).....	91
Ilustración 96.- Eficiencia en los Tiempos de Ejecución de los Sistemas de Detección (Manual VS Automático).	92

RESUMEN

La fumigación en la agricultura mediante métodos tradicionales es una actividad compleja y laboriosa, especialmente al manejar grandes extensiones de terreno. Esto conlleva a una operación lenta y costosa en términos de mano de obra. Por ello, al explorar alternativas que optimicen estos procesos utilizando tecnología moderna, se identifica la agricultura 5.0 y la automatización mediante drones como soluciones viables. En este contexto, surge la idea de desarrollar el presente proyecto de investigación.

Esta investigación presenta el diseño y evaluación de un prototipo basado en los principios de la agricultura 5.0: un sistema automático de fumigación de cultivos mediante dron, enfocado en la detección de texturas y colores en un entorno controlado a escala 1:5. Antes de iniciar el desarrollo del proyecto, se realizó un análisis de factibilidad basado en una revisión exhaustiva del estado del arte. Además, el marco teórico recoge conceptos fundamentales que sustentan el diseño y construcción del prototipo. Este tiene como objetivo principal el ensamblaje de un dron cuadricóptero con las características necesarias para llevar a cabo fumigaciones de manera autónoma, integrando tecnologías como la inteligencia artificial y la robótica en el marco de la agricultura 5.0.

El sistema desarrollado utiliza un vuelo automático programado a través de la plataforma Mission Planner. Durante las pruebas en el entorno controlado (a escala 1:5), el dron recorre el área de estudio y, mediante un sistema de detección configurado, identifica colores, texturas o posibles enfermedades en los cultivos. La inteligencia artificial, implementada mediante Edge Impulse, permite el procesamiento de imágenes en tiempo real. Esta IA utiliza una ESP32-CAM programada en la plataforma Arduino, detectando colores mediante parámetros RGB, texturas mediante escala de grises y enfermedades también a partir de parámetros RGB.

Con base en las detecciones realizadas, el sistema activa de forma automática los mecanismos de aspersión, aplicando líquidos o sólidos según las necesidades del cultivo. Esto permite optimizar el uso de insumos fitosanitarios con alta precisión y eficiencia, minimizando el desperdicio y reduciendo costos. Finalmente, el documento detalla las conclusiones obtenidas y ofrece recomendaciones para el desarrollo de futuras investigaciones en este campo.

Palabras claves: agricultura 5.0, Dron, Inteligencia Artificial, Machine Learning, sistema de comunicación, sistema autónomo, precisión, análisis.

Abstract

Pesticide application in agriculture through traditional methods is complex and labor-intensive, especially when managing large land areas. This leads to slow operations and high labor costs. Therefore, exploring alternatives to optimize these processes using modern technology highlights Agriculture 5.0 and drone automation as viable solutions. In this context, the idea of developing this research project arises.

This study presents the design and evaluation of a prototype based on the principles of Agriculture 5.0: an automatic crop spraying system using a drone focused on detecting textures and colors in a controlled environment at a 1:5 scale. Before initiating the project development, a feasibility analysis was conducted through an exhaustive review of the state of the art. Additionally, the theoretical framework outlines key concepts that support the design and construction of the prototype. The main goal of this project is to assemble a quadcopter drone with the necessary features to perform autonomous spraying, integrating technologies such as artificial intelligence and robotics within the framework of Agriculture 5.0.

The developed system utilizes automatic flight programmed through the Mission Planner platform. During tests in the controlled environment (at a 1:5 scale), the drone traverses the study area and identifies colors, textures, or potential crop diseases through a configured detection system. Artificial intelligence, implemented via Edge Impulse, enables real-time image processing. This AI uses an ESP32-CAM programmed on the Arduino platform, detecting colors through RGB parameters, textures via grayscale, and diseases using RGB parameters.

Based on the detections, the system automatically activates the spraying mechanisms, applying liquids or solids as the crop requires. This allows for optimizing the use of phytosanitary products with high precision and efficiency, minimizing waste and reducing costs. Finally, the document details the conclusions obtained and offers recommendations for future research.

Keywords: Agriculture 5.0, Drone, Artificial Intelligence, Machine Learning, Communication System, Autonomous System, Precision, Analysis.



Reviewed by:
Mgs. Vanessa Palacios
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603247487

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El avance tecnológico y las innovaciones promovidas por grandes empresas e instituciones han dado lugar a la aparición de la Agricultura 5.0, la cual se centra en optimizar, mejorar y rentabilizar la productividad en el campo. Con la creciente demanda de mayor productividad manteniendo la misma área de siembra, la tecnología es fundamental para este proceso. Por lo tanto, se ha logrado inmiscuir aspectos electrónicos, sistemas informáticos, modelamientos matemáticos - estadísticos y detalles relacionados conjuntamente a la agronomía [1].

La Agricultura 5.0 es un enfoque moderno de la agricultura que utiliza tecnologías avanzadas, como el Internet de las cosas (IoT), la analítica de datos, la robótica y la automatización. Esta nueva forma de agricultura integra diferentes tecnologías y procesos para la gestión de recursos y la toma de decisiones en tiempo real.

La inteligencia artificial aporta capacidades de análisis avanzadas, permitiendo el reconocimiento de patrones, la predicción de rendimientos y la optimización de los procesos agrícolas. Los algoritmos de aprendizaje automático y la visión por computadora se utilizan para clasificar enfermedades en las plantas, identificar malezas y determinar el momento apropiado de la cosecha. En el contexto de la Agricultura 5.0, se aprovecha la información proporcionada por la naturaleza y se convierte en datos para su gestión; además, se utilizan análisis de Metadatos para identificar tendencias y comportamientos mediante comparaciones constantes con mediciones reales [2].

El presente proyecto de investigación cumplirá con aspectos innovadores dentro del área de la agricultura. Una de ellas, la fumigación de diversos cultivos mediante Dron y su programación en Machine Learning, cumplirá un rol fundamental para un control idóneo de enfermedades y plagas que día a día dificultan un desarrollo correcto de los sembríos, para lo cual se diseñará un prototipo y se detallará un sistema de fumigación automático. Dicho sistema permitirá obtener mayores beneficios en comparación a otras herramientas tradicionales ya existentes [2]. Un sistema automático como este, tomará en cuenta aspectos fundamentales como: tiempos de fumigación, áreas de cultivos, distancias, etapas y productividad claramente, para tener control total sobre un área determinada de cultivo, y así obtener resultados positivos en la reducción de costos y aumento de la rentabilidad [3].

1.2. Planteamiento del Problema

Dada la preocupación por los efectos negativos en la salud humana y el ambiente, así como las nuevas regulaciones relacionadas con el control de plagas y enfermedades en la agricultura ecuatoriana, ha surgido la idea de brindar a los pequeños productores un servicio de aplicación de agroquímicos utilizando un Dron. Esto permitiría reducir de manera significativa el impacto en la salud de aquellos que aplican los productos fitosanitarios manualmente mediante bombas, así como la disminución de la contaminación del suelo y las fuentes de agua por exceso en las cantidades aplicadas [4].

En el desarrollo de la Agricultura 5.0, el uso de drones en la fumigación de cultivos ha surgido como una solución prometedora para mejorar la eficiencia y la precisión de las operaciones agrícolas. Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos, existe un desafío significativo en la detección y el reconocimiento preciso de las áreas que requieren fumigación, lo que limita la efectividad y la optimización de este proceso automatizado [5]. Actualmente, los sistemas automáticos de fumigación de cultivos enfocados en drones se basan principalmente en la detección de áreas afectadas por enfermedades o plagas utilizando sensores, video e imágenes para el análisis de vegetación. Sin embargo, estas técnicas se centran, principalmente, en la detección de anomalías en el crecimiento o la reflectancia de las plantas, lo que puede llevar a falsos positivos o a la falta de detección de áreas problemáticas [6].

Además, la detección y clasificación de áreas afectadas basadas únicamente en la información de vegetación no siempre es suficiente, puesto que algunos problemas de cultivo pueden estar relacionados con la textura y el color de las hojas y/o los frutos, por ejemplo, ciertas enfermedades pueden manifestarse a través de cambios sutiles en la textura de las hojas o la aparición de manchas específicas en los cultivos.

El problema, así descrito, radica claramente en la falta de un sistema automatizado de fumigación de cultivos basado en Dron. Entonces la necesidad de desarrollar dicho sistema, en el marco de la Agricultura 5.0, plantea la incorporación de técnicas avanzadas de detección y reconocimiento con un enfoque en textura y color para detectar y clasificar áreas problemáticas en los cultivos y, de esta manera, reducir el uso innecesario de los recursos que muchas veces son limitados y costosos. La solución a este problema no solo mejoraría la eficiencia de la fumigación, sino que también permitiría una gestión más precisa y sostenible de los recursos agrícolas, optimizando el uso de productos químicos [6].

1.3. Justificación

La fumigación es parte fundamental de procesos de mantenimiento de la mayoría de los cultivos, pues mediante esta técnica se realizan controles de plagas y enfermedades que llegan a afectar de forma significativa la calidad de los cultivos [7]

Según la problemática analizada, se puede describir la justificación del desarrollo de este Sistema Automático de Fumigación fundamentado en los siguientes aspectos:

- Mejora de la precisión y eficiencia: La detección de áreas afectadas por enfermedades o plagas en los cultivos basada únicamente en la información de vegetación puede llevar a resultados imprecisos o falsos. Al incorporar la detección de textura y color, se logra una mayor precisión en la identificación de áreas problemáticas, lo que permite una aplicación más precisa de los productos fitosanitarios.
- Reducción del impacto ambiental: La utilización de Drones para la fumigación de cultivos automatizada y basada en la detección de textura y color permite una aplicación más focalizada y dirigida de los agroquímicos. Esto evita la fumigación indiscriminada de áreas no afectadas, reduciendo así la cantidad del producto utilizado y disminuyendo además la contaminación del suelo, del aire y del agua.
- Protección de la salud humana: La exposición directa a los agroquímicos puede representar un riesgo para la salud de los trabajadores agrícolas encargados de la fumigación manual. Al implementar un sistema automatizado de fumigación mediante Dron, se evita la exposición directa de los seres humanos a los productos fitosanitarios, como herbicidas y pesticidas, reduciendo de esta manera los riesgos asociados a su manipulación y aplicación. Esto mejora las condiciones de trabajo de los agricultores y protege su salud.
- Los gastos y costos financieros innecesarios: se producen por la no planificación y, por lo tanto, por el desperdicio de las sustancias de fumigación y en ciertos casos por mala manipulación o procesos errados. Es importante, también, la mano de obra y personal altamente calificado, pero en muchas ocasiones esto no es alcanzable. Además, hay circunstancias en las que la fumigación llega a ser un trabajo tedioso, cansado y muchas veces peligroso lo que puede afectar y generar pérdidas económicas; por ejemplo, cuando las áreas son extensas, cuando los cultivos son variados, y cuando los terrenos son claramente irregulares [8].

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Desarrollar un sistema automático de fumigación para la aplicación de productos fitosanitarios sobre cultivos mediante la utilización de un Dron, basado en la detección de textura y color, dentro del desarrollo de la Agricultura 5.0.

1.4.2. Específicos

- Investigar los métodos de fumigación en cultivos con el uso de Drones a través de recursos tecnológicos y entornos científicos para gestionar soluciones tecnológicas que se adapten a sus necesidades.
- Analizar las características de textura y color de cultivos para determinar los indicadores más relevantes en la detección de áreas afectadas por enfermedades o plagas utilizando algoritmos de inteligencia artificial (Machine Learning).
- Diseñar e implementar técnicas de procesamiento de imágenes que permitan la detección precisa de áreas problemáticas en los cultivos, utilizando la información de textura y color recopilada por el Dron, para mitigar los riesgos asociados a la manipulación y aplicación de productos fitosanitarios en el proceso de fumigación.
- Efectuar pruebas de campo del prototipo desarrollado para evaluar el rendimiento en contextos reales de fumigación. Mediante el Diseño Experimental en un entorno controlado a escala 1:5.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

Este trabajo de investigación se fundamentó en artículos e investigaciones académicas que fueron encontradas a través de las Bases de Datos Científicas como PubMed, IEEE Xplore, Google Scholar, o ScienceDirect para buscar artículos científicos relacionados con la fumigación de cultivos con drones. Seguido a esto se filtró la búsqueda de diferentes formas para obtener distintos resultados con palabras clave relevantes como productividad agroindustrial, fumigación y monitoreo de cultivos, eficiencia agrícola a través de la fumigación, Aplicación de pesticidas con UAV" (Vehículo Aéreo no Tripulado), entre otros.

Según Alejandro Rendón, ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, “la fumigación es la base de un cultivo productivo, pues esta comprende desde la preparación del terreno para eliminar malezas hasta la aspersión de agroquímicos para el control de plagas y hongos” [9]. La utilización de drones en la fumigación agrícola representa actualmente una realidad y un progreso tecnológico que proporciona un mayor control sobre el estado del cultivo, así como sobre sus procesos de riego y fumigación, contribuyendo a una mejora significativa en la eficiencia del proceso productivo.

Pino E. en su publicación “Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología” La integración de sistemas basados en textura y color con drones en agricultura, abre nuevas posibilidades para la detección y fumigación automatizada de cultivos. Mediante el análisis de imágenes capturadas por drones equipados con cámaras RGB, es posible evaluar el estado de salud de las plantas y detectar anomalías como plagas o enfermedades de manera rápida y precisa [10].

Como menciona Ríos Hernández en su trabajo “Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión” de la revista Ingeniería Agrícola, en el año 2021, los drones han demostrado ser una herramienta eficaz para la aplicación precisa de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas, además de su capacidad para volar a baja altura y ejecutar rutas específicas les permite realizar tratamientos focalizados y reducir el desperdicio de productos químicos, minimizando así el impacto ambiental y mejorando la salud de los cultivos [11].

El trabajo "Principios de integración de los agro-drones en entornos de producción agrícola", desarrollado por varios autores, subraya el papel fundamental de los drones en la agricultura de precisión o agricultura 5.0, donde se requiere una gestión meticulosa de los insumos agrícolas. Los drones son reconocidos como herramientas valiosas para la toma de decisiones, ya que pueden proporcionar información esencial, incluida la detección temprana de estrés hídrico, la estimación del contenido de humedad del suelo y la vigilancia de plagas y enfermedades. En este contexto, la recopilación de datos detallados sobre el estado de los cultivos y el terreno circundante se vuelve crucial [12].

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Agricultura 5.0

La Agricultura 5.0 encapsula la noción de que las explotaciones agrícolas están adoptando los principios de la agricultura de precisión y están incorporando equipos que operan de manera autónoma, respaldados por sistemas de toma de decisiones automatizados [13].

Es la nueva era en la detección de enfermedades combinando robots aéreos, terrestres y sensores. La Agricultura 5.0 es la quinta revolución en el campo de la agricultura, que busca introducir la robótica y la Inteligencia Artificial (IA) en los esfuerzos productivos para la nutrición de las personas. Su surgimiento, como toda transformación, se basó en grandes desafíos de ingeniería, escenarios que ahora comienzan a mostrarse como realidades posibles a corto y mediano plazo [14].

Tabla 1.- Tecnologías para cada etapa de la agricultura [2].

Agricultura 1.0 Antes de 1950	Agricultura 2.0 1950	Agricultura 3.0 1990	Agricultura 4.0 2010	Agricultura 5.0 2025
-Nitrógeno sintético -Maquinaria agrícola	-Llamada la revolución verde -Mejoramiento genético -Fertilizantes y pesticidas sintéticos -Maquinaria agrícola especializada	-Sistemas de Posicionamiento Global, GPS -Sistemas de Información Geográfica, GIS -Agricultura de Precisión -Agricultura Específica por Sitio -Biotecnología	-Redes de sensores -Sensores en maquinaria -Naves no tripuladas -Procesamiento de imágenes satelitales -Computación en la nube -Análisis de Big Data -Aplicaciones móviles -Tractores autónomos	-Robótica -Inteligencia artificial -Impresión 3D y 4D -Biología sintética -Diseño de alimentos (carne artificial, proteínas) -Agricultura vertical para las “Smart city” -Modificación del clima.

2.2.1.1. Ventajas

La Agricultura 5.0 no solo se centra en maximizar la cantidad de productos, sino en la agricultura de precisión, basada en datos y tecnología para una producción diversificada [14]:

- Optimización de la productividad: Uso de tecnologías para mejorar el control y la planificación de las cosechas, aumentando la eficiencia y el rendimiento agrícola.
- Reducción del desperdicio: Implementación de robots y tecnología de IA para minimizar errores y pérdidas innecesarias en la producción agrícola.
- Seguridad alimentaria: Contribución a una mayor disponibilidad y distribución de alimentos mediante una producción agrícola más eficiente y sostenible.

2.2.1.2. Desventajas

Algunas desventajas de la agricultura 5.0 incluyen [14]:

- Falta de acceso a Internet en algunas áreas rurales.

- Falta de formación técnica de los agricultores para hacer frente a nuevas herramientas, soluciones y recursos.
- Alto costo para obtener herramientas y capacitar a la mano de obra.
- Dependencia tecnológica.

2.2.1.3. Evolución

La evolución se detalla a continuación [15]:

- **Agricultura 0.0:** La agricultura tradicional, desde el Neolítico hasta la Edad Moderna, se basó en el trabajo humano y animal. Esta forma de agricultura precedió a la mecanización y la "revolución verde" de la década de 1960. Aunque aún persiste en algunas regiones.
- **Agricultura 1.0:** Es industrial y mecanizada, con el uso extendido de maquinaria como tractores y cosechadoras. Aunque ha aumentado la productividad superficial, se pierde la autosuficiencia y el conocimiento detallado de cada finca. La externalización de insumos y la aplicación homogénea de medios de producción sin considerar el impacto ambiental son características de esta etapa.
- **Agricultura 2.0:** representa una evolución hacia la mecanización avanzada, donde las máquinas incorporan elementos electrónicos y permiten un control preciso del trabajo en el campo. Surge la Agricultura de Precisión (AP) con el uso generalizado de tecnologías como el GPS, el control electrónico mediante ISOBUS (Sistema de Bus de Datos en Agricultura) y la dosificación variable de insumos. Además, se utilizan satélites, drones y redes de sensores inalámbricos para recopilar información detallada de las parcelas y aplicar tratamientos diferenciados.
- **Agricultura 3.0:** o Agricultura Digital, hace un uso masivo de tecnologías de comunicación y transferencia de datos para capturar información agrícola a gran escala. Emplea herramientas como cuadernos digitales de explotación y plataformas de gestión de flotas, permitiendo la aplicación de análisis avanzados de datos para optimizar el uso de insumos agrícolas.
- **Agricultura 4.0:** Se vislumbra como una red permanente de intercambio de información, donde todos los procesos y actores agrarios están en contacto continuo a través de redes, similar a la hiperconectividad de la Internet de las Cosas (IoT). En este entorno, el tractor no solo será una máquina conectada a internet, sino parte de un complejo ecosistema digital coordinado con múltiples sistemas interconectados.
- **Agricultura 5.0:** Es la última etapa en la evolución agrícola, que se centra en la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el Internet de las cosas (IoT), la robótica y la biotecnología. Esta fase busca maximizar la eficiencia y la sostenibilidad mediante el uso de sistemas autónomos, drones, análisis de Big Data y cultivos genéticamente modificados para adaptarse a los desafíos ambientales y demográficos del siglo XXI.

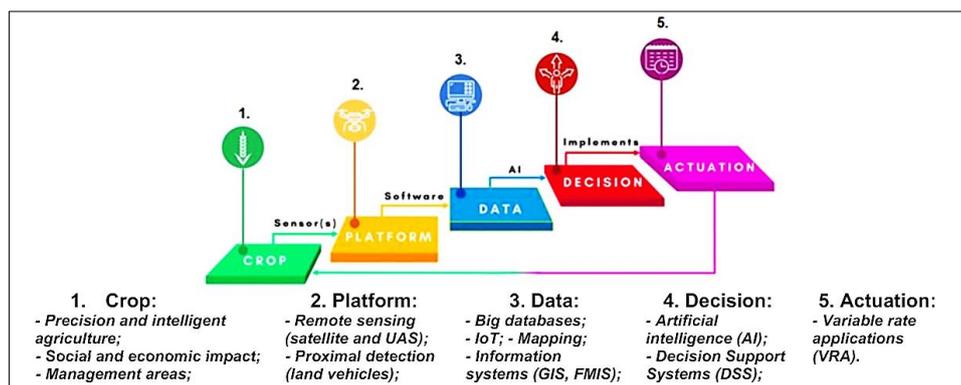


Ilustración 1.- La arquitectura de flujo operativo para el proceso de cultivo hacia la agricultura 5.0 [16].

2.2.1.4. Fundamentos de la Agricultura 5.0

La agricultura inteligente fue el nacimiento de lo que se conoce como Agricultura de Precisión, basada en el uso de datos recolectados a través de herramientas esenciales para los negocios modernos. La Agricultura 5.0 representa una evolución significativa en el campo agrícola, impulsada por avances tecnológicos y conceptuales que buscan abordar los desafíos contemporáneos de la agricultura, como la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en la producción [17]. Para elaborar un marco teórico sobre los fundamentos de la Agricultura 5.0, es necesario considerar varios aspectos clave:

- **Tecnología de la Información y Comunicación (TIC):** La Agricultura 5.0 se fundamenta en la integración de TIC avanzadas, como la Internet de las Cosas (IoT), la Inteligencia Artificial (IA), el análisis de Big Data, la robótica y la automatización [18]. Estas tecnologías permiten la recopilación, procesamiento y análisis de datos en tiempo real.
- **Digitalización y Agricultura de Precisión:** La digitalización de la agricultura implica la recopilación y análisis de datos agrícolas a nivel de parcela o incluso de plantas individuales [19]. Esto permite una gestión más precisa de los recursos agrícolas, como el agua, los fertilizantes y los pesticidas.
- **Sostenibilidad:** La Agricultura 5.0 promueve prácticas agrícolas sostenibles que minimizan el impacto ambiental y conservan los recursos naturales [20].
- **Automatización y Robótica:** Los sistemas autónomos y robots agrícolas desempeñan un papel crucial en la Agricultura 5.0, realizando tareas como siembra, cosecha, mantenimiento de cultivos y monitoreo de condiciones ambientales [21].
- **Interconexión y Colaboración:** La Agricultura 5.0 fomenta la interconexión y colaboración entre diversos actores del sector agrícola, incluyendo agricultores, investigadores, empresas de tecnología, gobiernos y organizaciones internacionales [22, p. 2].

La Agricultura 5.0 se basa en la convergencia de tecnologías avanzadas, principios de sostenibilidad y colaboración intersectorial para transformar la forma en que se produce, gestiona y consume los alimentos [14].

2.2.2. Automatización y robótica en la Agricultura 5.0

2.2.2.1. Robótica en la agricultura

En el contexto de la Agricultura 5.0, la automatización y la robótica juegan un papel fundamental en la evolución de las prácticas agrícolas hacia sistemas más eficientes y sostenibles. La robótica agrícola, en particular, implica la aplicación de robots y drones en diversas tareas agrícolas, abarcando desde la preparación del suelo hasta la cosecha y el mantenimiento de los cultivos.

Dentro de estas aplicaciones, los drones son componentes destacados. Estos dispositivos aéreos no tripulados se utilizan para el monitoreo de cultivos, permitiendo una evaluación detallada de la salud de las plantas, la detección temprana de enfermedades. Además, los drones pueden emplearse en la aplicación de productos fitosanitarios de manera precisa y selectiva.

El principio fundamental de funcionamiento de los drones en la agricultura se basa en la captura de imágenes aéreas, las cuales son procesadas mediante algoritmos de análisis de datos para identificar patrones y anomalías en los cultivos. Posteriormente, esta información se utiliza para tomar decisiones informadas sobre el manejo agronómico, como la aplicación de insumos agrícolas o la implementación de medidas correctivas [23].

2.2.2.2. Tipos de Agrobot's

Los tipos de Agrobot's o Robots de Agricultura se detallan a continuación [24] [25] [26]:

- **Robots terrestres:**
 - ✓ *Robots de siembra:* Diseñados para sembrar semillas de manera precisa y eficiente en el suelo.
 - ✓ *Robots de recolección:* Equipados con brazos robóticos para recolectar frutas, verduras u otros cultivos maduros de manera autónoma.
 - ✓ *Robots de monitoreo de cultivos:* Equipados con sensores para monitorear el crecimiento de los cultivos, detectar enfermedades o estrés hídrico, y recopilar datos sobre la salud de las plantas.
- **Drones aéreos:**
 - ✓ *Drones de mapeo:* Utilizados para capturar imágenes aéreas de alta resolución de los campos agrícolas para crear mapas detallados de cultivos.
 - ✓ *Drones de monitoreo de salud de las plantas:* Equipados con cámaras multispectrales para detectar problemas de salud en las plantas, como deficiencias nutricionales o enfermedades.
 - ✓ *Drones de pulverización:* Equipados con pulverizadores para aplicar pesticidas, fertilizantes u otros productos químicos de manera precisa y eficiente en los campos agrícolas.
 - ✓ *Drones de detección de plagas:* Utilizados para detectar la presencia de plagas agrícolas y mapear su distribución en los campos.
- **Robots aéreos híbridos:**
 - ✓ *Robots terrestres con capacidad de vuelo:* Equipados con ruedas para desplazarse por tierra y alas o rotores para despegar y volar en el aire,

permitiendo la cobertura de terrenos variados y la realización de tareas tanto terrestres como aéreas.

2.2.2.3. Drones en la Agricultura

Un dron, también conocido como vehículo aéreo no tripulado (VANT) o UAV por sus siglas en inglés (Unmanned Aerial Vehicles), es una aeronave que no requiere de piloto a bordo y es controlada de forma remota o autónoma [27].

Los drones han experimentado una evolución significativa en su aplicación en la agricultura. Inicialmente utilizados principalmente con fines militares y de investigación, su uso en la agricultura ha crecido rápidamente en las últimas décadas debido a su capacidad para realizar diversas tareas de monitoreo y gestión de cultivos de manera eficiente y precisa [28].

2.2.2.3.1. Ventajas del monitoreo con drones

- *Economía y accesibilidad:* El monitoreo con drones es más económico que métodos tradicionales como aviones tripulados o servicios de satélites, lo que lo hace accesible para investigadores y empresas comerciales[29].
- *Flexibilidad y disponibilidad:* Pueden operar en cualquier momento y lugar.
- *Menor dependencia del clima:* Funcionan bien en condiciones climáticas adversas.
- *Precisión en la captura de imágenes:* Vuelan a baja altura con gran precisión.
- *Información actualizada y precisa:* Proporcionan datos detallados y actualizados del terreno.
- *Variedad de sensores y análisis:* Pueden equiparse con diferentes sensores para análisis específicos.

2.2.2.3.2. Clasificación - Tipos de dron para la agricultura

En la agricultura moderna, los drones han surgido como una herramienta invaluable para el monitoreo y la gestión de cultivos. Su capacidad para recopilar datos detallados y su versatilidad los hacen ideales para una variedad de aplicaciones agrícolas. Una clasificación efectiva de los drones utilizados en agricultura puede basarse en dos criterios principales: el tipo de ala y el método de control.

Tipo de Ala:

- *Tricópteros:* Drones con tres motores, proporcionan agilidad y maniobrabilidad en espacios reducidos.
- *Cuadricópteros:* Equipados con cuatro motores, ofrecen estabilidad y versatilidad en diversas condiciones de vuelo.
- *Hexacópteros:* Con seis motores, brindan capacidad de carga y resistencia al viento.
- *Octacópteros:* Con ocho motores, ofrecen una mayor estabilidad y capacidad de carga para aplicaciones especializadas.

Método de Control:

- *Dron Autónomo:* Estos drones pueden planificar y ejecutar vuelos de manera autónoma gracias a sistemas avanzados como el GPS y la planificación de ruta preprogramada. No requiere intervención humana durante el vuelo [30].

- *Dron controlado remotamente:* Los drones controlados remotamente son dirigidos por un piloto a través de un control remoto, lo que permite una interacción directa y en tiempo real con el vehículo aéreo no tripulado (VANT) [31].
- *Dron Supervisado o Monitorizado:* realizar ciertas tareas de manera autónoma, pero están bajo la supervisión y control de un operador humano [32].

2.2.2.3.3. Componentes de un dron

Los drones utilizados en la agricultura están compuestos por varios componentes clave, que incluyen:

- *Estructura:* el marco o cuerpo del dron.
- *Sistema de propulsión:* motores, hélices y baterías.
- *Sistema de navegación:* GPS y sensores de posición,
- *Carga útil:* cámaras, sensores y equipos de monitoreo.
- *Sistema de control:* control remoto o autopiloto, controladora de vuelo.
- *Comunicaciones:* sistemas de transmisión de datos y telemetría [28].

2.2.2.3.4. Características de un dron

Las características de un dron pueden variar según el modelo y el fabricante, pero algunas características comunes incluyen:

- Autonomía de vuelo.
- Capacidad de carga.
- Velocidad máxima y alcance operativo.
- Resistencia a condiciones climáticas adversas.
- Precisión de navegación y estabilidad en vuelo.
- Calidad y resolución de la cámara y otros sensores [28].

2.2.2.3.5. Normativa de vuelo en el país

La operación de drones en la agricultura está sujeta a regulaciones y normativas establecidas por las autoridades aeronáuticas de cada país. Estas regulaciones pueden abordar aspectos como la obtención de licencias y permisos, restricciones de vuelo, altitudes máximas permitidas, y requisitos de seguridad y privacidad [33].

En Ecuador, la operación de aeronaves pilotadas a distancia, comúnmente conocidas como drones, está regida por un marco normativo establecido por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAs), con Resolución Nro. DGAC-DGAC-2020-0110-R suscrita en Quito, D.M., 04 de noviembre de 2020. Este reglamento se aplica a las aeronaves cuyo peso máximo de despegue oscila entre 0,25 y 150 kilogramos, abarcando así una amplia gama de dispositivos utilizados en diversas actividades, incluida la agricultura.

Esta normativa proporciona un marco regulatorio importante para la operación segura y responsable, su cumplimiento garantiza no solo la seguridad de las operaciones aéreas, sino también la protección de terceros y del entorno agrícola en nuestro país.

2.2.2.3.6. Aplicaciones de los Drones en la Agricultura

En el ámbito de la agricultura convencional, los drones emergen como herramientas innovadoras que presentan una variedad de usos con el potencial de mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las prácticas agrícolas. Algunas de estas aplicaciones abarcan [29].

- **Fumigación:** Los drones desempeñan una función fundamental en la aplicación precisa y eficaz de productos químicos o biológicos sobre los cultivos. Esta capacidad permite reducir el consumo de agua y energía, así como mitigar el riesgo de contaminación ambiental y la exposición humana a sustancias tóxicas. La capacidad de los drones para adaptarse a la forma y tamaño del terreno, y ajustarse a las condiciones meteorológicas, ayuda a evitar el desperdicio y minimizar el daño a los cultivos.
- **Siembra:** Los drones facilitan la distribución uniforme y rápida de semillas o plántulas sobre el suelo, lo que resulta en un significativo ahorro de tiempo y mano de obra. Además, estos dispositivos pueden seleccionar las áreas más adecuadas para la siembra en función de las características del suelo y el clima, optimizando el uso del espacio y los recursos disponibles.



Ilustración 2.- Dron DJI AGRAS T30 para la agricultura de precisión [34].

2.2.2.4. Fumigación en la Agricultura

La fumigación en agricultura es un proceso fundamental que implica la aplicación controlada de productos químicos o biológicos sobre los cultivos para combatir plagas, enfermedades o malezas, y promover su crecimiento y rendimiento [35].

2.2.2.4.1. Métodos de fumigación en cultivos

Los métodos de fumigación en cultivos son diversas técnicas empleadas para la dispersión de agentes fitosanitarios [36]. Estos métodos pueden incluir:

- Pulverización
- Nebulización
- Aspersión

2.2.2.4.2. Pulverización

Las tecnologías asociadas a la fumigación incluyen una variedad de equipos de aplicación, como pulverizadores de mochila, pulverizadores de arrastre y pulverizadores de drones. Estos dispositivos permiten una distribución uniforme y controlada de los productos fitosanitarios sobre los cultivos, minimizando el desperdicio y maximizando la eficacia de la aplicación [35], [37].

2.2.2.4.2.1. Tipo de Pulverizadores

Tabla 2.- Tipo de Pulverizadores [35].

Tipo Pulverizador	Características
Mochila	Portátil, adecuado para áreas pequeñas o de difícil acceso
Arrastre	Montado en vehículos agrícolas, mayor capacidad de cubrimiento
Drones	Vuelo controlado y preciso, minimiza el impacto ambiental



Ilustración 3.-Tipos de pulverizadores [38], [39], [40].

2.2.2.4.3. Productos Fitosanitarios Comúnmente Utilizados en Cultivos:

Los productos fitosanitarios, como insecticidas, fungicidas y herbicidas, son esenciales en el control de plagas, enfermedades y malezas en la agricultura. Estos productos se clasifican según su función y el tipo de organismo que controlan, y se aplican selectivamente según las necesidades específicas de cada cultivo y la naturaleza de la amenaza que enfrentan [36].

2.2.2.4.3.1. Clasificación de Productos Fitosanitarios:

Tabla 3.- Clasificación básica de productos Fitosanitarios [41].

Tipo de producto	Función	Ejemplos
Insecticidas	Control de insectos	Clorpirifos, Imidacloprid
Fungicidas	Control de hongos	Mancozeb, Tebuconazol
Herbicidas	Control de amenazas	Glifosato, Atrazina

2.2.2.5. Textura y Color en Suelos y Cultivos:

2.2.2.5.1. Textura del Suelo:

La textura del suelo es una característica importante que influye en su capacidad para retener agua y nutrientes, así como en su capacidad de drenaje. Se clasifica en función del tamaño de las partículas minerales predominantes [42]:

- **Suelos Arenosos:** Están compuestos principalmente por partículas de arena y tienen una textura gruesa. Son suelos ligeros que permiten un buen drenaje, pero retienen poca agua y nutrientes, lo que puede requerir una mayor frecuencia de riego y fertilización.

- **Suelos Arcillosos:** Son suelos pesados compuestos principalmente por partículas de arcilla. Tienen una textura fina y pegajosa que retiene bien el agua y los nutrientes, pero pueden volverse compactos y propensos al encharcamiento en condiciones de lluvia intensa.

2.2.2.5.2. Color del Suelo:

El color del suelo puede variar significativamente según su composición mineral, contenido de materia orgánica y condiciones ambientales [43]. Algunas categorías comunes de color incluyen:

- **Suelos Negros o Marrones Oscuros:** Indican un alto contenido de materia orgánica, lo que los hace muy fértiles y adecuados para el cultivo de una amplia gama de plantas.
- **Suelos Rojizos o Anaranjados:** Esto puede ser el resultado de la oxidación del hierro en condiciones de drenaje deficiente o suelos ácidos. Pueden necesitar modificaciones para corregir el pH y mejorar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos.
- **Suelos Blancos o Grises:** Pueden indicar altos niveles de sales solubles o alcalinidad, lo que puede afectar la disponibilidad de nutrientes para las plantas y requerir prácticas de manejo específicas para evitar la acumulación de sales.

2.2.2.5.3. Cultivos y su Relación con la Textura y el Color del Suelo:

Los cultivos exhiben una variedad de características visuales que pueden proporcionar pistas sobre su salud y desarrollo [44]:

- **Coloración de Hojas y Frutos:** Los cultivos con un color verde oscuro intenso en las hojas y frutos suelen indicar un buen contenido de clorofila y un crecimiento saludable, mientras que los tonos amarillos o pálidos pueden indicar deficiencias nutricionales o estrés.
- **Textura y Aspecto de las Plantas:** Las plantas pueden mostrar signos visuales de estrés hídrico, deficiencias nutricionales o daños por plagas y enfermedades a través de cambios en la textura y el aspecto de las hojas, tallos y frutos.
- **Desarrollo de Raíces:** La observación de la distribución y el desarrollo de las raíces puede proporcionar información sobre la estructura y la textura del suelo, así como sobre la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas.

La comprensión de la textura y el color del suelo, junto con las características visuales de los cultivos, es fundamental para el manejo agrícola efectivo y la toma de decisiones sobre prácticas de cultivo adecuadas para maximizar la productividad y la salud de los cultivos.

2.2.3. Inteligencia artificial (Machine Learning)

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo de la informática dedicado a replicar el conocimiento humano mediante el uso de computadoras. Surgió de la necesidad de abordar actividades cognitivas complejas para las cuales no existían algoritmos bien definidos. A través del tiempo, la IA ha desarrollado diversas técnicas para resolver problemas

específicos, como la estructura de control, la generación de planos y el aprendizaje inductivo y deductivo [45].

El Machine Learning es una subdisciplina de la IA, se centra en desarrollar algoritmos y técnicas que permiten a las computadoras aprender de los datos y mejorar su desempeño en tareas específicas a medida que ganan experiencia. Esta tecnología es fundamental para el análisis de grandes conjuntos de datos y la toma de decisiones automatizada [46] [47].

2.2.3.1. Finalidades o usos de la IA

La inteligencia artificial (IA) ha encontrado aplicaciones en una variedad de ámbitos, desde la robótica hasta la salud y la agricultura. En estos contextos, las máquinas pueden procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y tomar decisiones de manera autónoma. Algunos ejemplos de cómo se utiliza la IA en diferentes sectores incluyen [48]:

- **Personal:** Asistencia proporcionada por dispositivos como teléfonos inteligentes, tabletas y computadoras, facilitando las tareas diarias y mejorando la experiencia del usuario.
- **Informático:** Mejora de la seguridad cibernética al detectar amenazas y vulnerabilidades en sistemas informáticos y redes.
- **Productivo:** Automatización y optimización de procesos en entornos de fabricación y laboratorios, lo que resulta en una mayor eficiencia y reducción de costos.
- **De transporte:** Desarrollo de vehículos autónomos e inteligentes para mejorar la seguridad y eficiencia en el transporte de personas y bienes.
- **Agrícola:** Mejora de la producción agrícola mediante el monitoreo de cultivos, la detección de plagas y enfermedades, y la optimización de los métodos de cultivo.

2.2.3.2. IA en la Agricultura

La IA ha revolucionado la agricultura al ofrecer soluciones innovadoras para aumentar la eficiencia y la productividad en este sector. Algunas de sus aplicaciones más destacadas abarcan [49], [50]:

- **Monitorización y Gestión de Cultivos:** Mediante el uso de dispositivos como drones y sensores, la IA permite monitorear de forma precisa las condiciones del suelo, el crecimiento de los cultivos y la presencia de plagas y enfermedades. Esto ayuda a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre el riego, la fertilización y el control de plagas.
- **Optimización de Recursos:** La IA analiza datos históricos y en tiempo real para optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas.
- **Pronóstico de Rendimientos:** Utilizando modelos de Machine Learning, la IA puede predecir los rendimientos de los cultivos basándose en factores como el clima, el suelo y las prácticas agrícolas.
- **Detección y Diagnóstico de Enfermedades:** Los algoritmos de IA pueden analizar imágenes de plantas para detectar signos tempranos de enfermedades o deficiencias nutricionales.

2.2.3.3. Clasificación o tipos de IA

La clasificación de la Inteligencia Artificial (IA) se puede realizar de varias maneras, dependiendo de los criterios utilizados. Una clasificación común se basa en la capacidad de la IA para imitar las funciones cognitivas humanas. Según este enfoque, la IA se puede dividir en tres categorías principales:

- **IA Débil o Estrecha:** También conocida como inteligencia artificial especializada, esta forma de IA se centra en realizar tareas específicas de manera limitada. Su capacidad está restringida al ámbito para el que fue diseñado y no puede generalizar conocimientos o adaptarse a situaciones nuevas fuera de su contexto definido. Ejemplos de IA débil incluyen los sistemas de recomendación de películas en plataformas de streaming y los asistentes virtuales como Siri o Alexa.
- **IA Fuerte o General:** En contraste con la IA débil, la IA fuerte tiene la capacidad de comprender, aprender y razonar de manera similar a los seres humanos. Este tipo de IA puede realizar una amplia variedad de tareas cognitivas de forma autónoma y adaptarse a diferentes contextos y situaciones. Sin embargo, la IA fuerte aún no ha alcanzado un nivel de inteligencia comparable al humano en todos los aspectos.
- **IA Superinteligente:** Esta categoría se refiere a una forma hipotética de inteligencia artificial que superaría ampliamente la capacidad cognitiva humana. Tendría la capacidad de resolver problemas complejos de manera rápida y eficiente. Sin embargo, los riesgos asociados con la creación de una IA superinteligente son temas de debate activo en la comunidad científica y filosófica [48].

2.2.3.4. Aplicabilidad

La aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) en la agricultura representa una revolución en la forma en que se gestionan los cultivos, se monitorean las condiciones del campo y se toman decisiones para mejorar la productividad agrícola. Esta sección del marco teórico proporcionará una visión general de las principales áreas de aplicación de la IA en la agricultura.

- **Monitoreo y Gestión de Cultivos:** La IA se utiliza para analizar datos recopilados de diversas fuentes, como imágenes satelitales, drones y sensores terrestres, para monitorear el crecimiento de los cultivos, detectar enfermedades y plagas.
- **Optimización de Recursos:** La IA se utiliza para optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas. Los sistemas de IA pueden analizar datos ambientales y del suelo en tiempo real para determinar la cantidad óptima de recursos que deben aplicarse en cada área del campo.
- **Automatización de Tareas Agrícolas:** Los robots y drones equipados con tecnología de IA se utilizan para automatizar tareas agrícolas como siembra, fumigación y cosecha. Estos sistemas pueden operar de manera autónoma o bajo la supervisión de un operador humano.
- **Análisis de Textura y Color en Fumigación de Cultivos:** En el contexto del proyecto "Sistema Automático de Fumigación de Cultivos mediante Dron", la IA se utiliza para analizar la textura y el color de los cultivos a través de imágenes capturadas por el dron. Esto permite identificar áreas específicas que requieren fumigación y ajustar

la aplicación de pesticidas de manera precisa y eficiente optimizando el uso de productos químicos.

- **Gestión del Riego y Nutrición de Plantas:** La IA se emplea para desarrollar sistemas de gestión del riego y la nutrición de plantas basados en el análisis de datos de sensores y modelos de crecimiento de cultivos. Estos sistemas pueden determinar las necesidades hídricas y nutricionales de los cultivos en tiempo real, permitiendo una irrigación y fertilización precisa y adaptativa.

Estas aplicaciones de la IA son fundamentales para el desarrollo y la implementación del proyecto de "Sistema Automático de fumigación de cultivos mediante Dron, basado en textura y color dentro de la Agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5", que busca mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la agricultura mediante el uso de tecnologías avanzadas de inteligencia artificial.



Ilustración 4.- Drone agrícola con Inteligencia Artificial [51].

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

▪ Experimental

Por el control de variables, el diseño de investigación para este proyecto es experimental, debido a que el estudio de la variable se manipulará a través de factores como: eficiencia del sistema de fumigación, volumen de aplicación y tiempo de ejecución del prototipo en un ambiente controlado.

▪ Exploratoria

Por el alcance de este estudio, este proyecto es exploratorio, porque se busca una propuesta innovadora que pretende construir un prototipo aplicado a un sistema de fumigación automatizado con Agricultura 5.0, buscando obtener ventajas considerables con respecto al método de fumigación tradicional.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de este estudio está compuesta por todas las simulaciones y experimentos realizados en un entorno controlado a escala 1:5, enfocados en evaluar la eficacia del sistema automático de fumigación de cultivos mediante dron, basado en textura y color, dentro del marco de la agricultura 5.0. Estos experimentos consideran diversas combinaciones de variables, tales como el tipo de cultivo, las condiciones ambientales (humedad y temperatura), y diferentes patrones de textura y color de los cultivos, con el fin de determinar la efectividad del sistema de fumigación en distintos escenarios simulados.

3.2.2. Muestra

Dado que la población es cuantitativa y de tamaño manejable, se analizarán un total de 150 muestras, distribuidas en 50 muestras para cada uno de los tres sistemas elaborados en la tesis. Esta distribución permite una evaluación completa del sistema sin restricciones significativas en términos de costo o tiempo. Esto garantiza que se contemplen todas las variaciones posibles dentro del entorno controlado, brindando una visión integral del rendimiento del sistema automático de fumigación en diversas condiciones y escenarios.

3.3. Operacionalización de Variables

3.3.1. Variable Independiente

Tabla 4.- Variable Independiente

Variable	Concepto	Indicadores	Técnicas e Instrumentación
	El tiempo de vuelo del dron se refiere a la duración que el dron puede mantenerse en el	- Tiempo de vuelo del dron (minutos): La duración específica durante la cual el dron	- Cronómetro manual: Para medir y registrar el tiempo de vuelo del dron.

<p>Tiempo de Vuelo del Dron.</p>	<p>aire con una sola carga de batería durante una operación de fumigación automatizada. Esta variable es fundamental en el diseño y la operación del sistema, ya que afecta la cantidad de producto químico que se puede dispersar sobre el cultivo y la uniformidad de la cobertura de fumigación.</p>	<p>puede volar antes de necesitar recarga.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cobertura de fumigación en diferentes tiempos de vuelo: La extensión del área tratada en relación con la duración del vuelo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Observación visual directa: Para evaluar de manera básica la cobertura del producto químico aplicado sobre el cultivo. - Cintas métricas y cuerdas: Para delimitar áreas específicas del cultivo y medir la extensión de la cobertura lograda. - Bitácora de campo: Para anotar observaciones sobre la uniformidad de la aplicación, basándose en la inspección visual y la comparación entre diferentes áreas del cultivo.
----------------------------------	---	---	---

3.3.2. Variable Dependiente

Tabla 5.- Variable Dependiente

Variable	Concepto	Indicadores	Técnicas e Instrumentación
<p>Eficacia del Sistema Automático de Fumigación.</p>	<p>La eficiencia del sistema de riego automático con inteligencia artificial evalúa cómo un sistema controlado por un dron, potenciado por IA, optimiza la distribución de productos fitosanitarios en un cultivo en comparación con el riego manual. Se enfoca en el ahorro de recursos, la precisión en la aplicación, y el impacto en la productividad agrícola.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del consumo del producto fitosanitario: Comparar la cantidad de producto utilizado por el sistema automatizado con IA con la del riego manual. - Precisión en la sectorización y aplicación del producto fitosanitario: Medir la capacidad del sistema de IA para aplicar la cantidad exacta de producto según las necesidades específicas de diferentes áreas del cultivo. - Ahorro de tiempo y esfuerzo: Evaluar el tiempo y la mano de obra requeridos para realizar el riego con el sistema automatizado con IA en 	<ul style="list-style-type: none"> - Garrafa o contenedor graduado: Medir manualmente la cantidad de litros de agua utilizada en el riego automático y manual. - Registro manual y comparación del uso del producto fitosanitario: Anotar y comparar la cantidad de producto medido con la garrafa o contenedor graduado en ambos métodos. - Observación visual directa: Evaluar la uniformidad y precisión en la distribución del agua mediante inspección visual y fotografías de las áreas regadas. - Cronómetro y diario de campo: Registrar el tiempo empleado en el riego automático con IA y en el

		comparación con el riego manual.	riego manual para comparar la eficiencia en términos de tiempo y esfuerzo.
--	--	----------------------------------	--

3.4. Diseño de Investigación

A continuación, se detalla el diseño de la elaboración del proyecto, el cual se distribuye por etapas:

- **Etapa I (Investigación):** Esta etapa inició a través de la recopilación de información y análisis de investigaciones publicadas en repositorios digitales como: SciELO, IEEE, PubMed, Google Scholar, Scopus, Dialnet, base de datos nacionales como internacionales y revistas científicas sobre temáticas relacionadas a la Agricultura 5.0, los cuales incluyen el desarrollo de prototipos de drones de fumigación en la agricultura, para de esta manera ampliar la visión del proyecto.
- **Etapa II (Selección):** En base a la etapa que antecede se realiza el análisis y desarrollo de los sistemas que componen al prototipo a implementarse. Se selecciona los componentes electrónicos tales como: motores, controlador de vuelo, GPS, VTx y otras tarjetas de control que finalmente serán acoplados al dron.
- **Etapa III (Diseño y ensamblaje):** De acuerdo con el análisis realizado en la etapa II se efectúa el diseño de los sistemas que integran el dron, estos son: sistema de aspersión de líquidos, aspersión de sólidos, vuelo autónomo y de transmisión/recepción de datos. Una vez culminados el proceso de diseño, se realiza el acoplamiento y ensamblaje final del prototipo.
- **Etapa IV (Implementación):** Esta etapa implementa los algoritmos de Inteligencia Artificial (Machine Learning) al prototipo, se optó como software de desarrollo de IA a Edge Impulse el cual es compatible con las tarjetas de desarrollo ensambladas en el dron. Además de la comunicación entre el dron y su emisor de radio FlySky, la cual se configura a través del paquete de programas de código abierto ArduPilot.
- **Etapa V (Pruebas y resultados):** Finalmente se realiza las pruebas de funcionamiento y corrección de errores. Para posterior elaboración de la documentación de los resultados obtenidos.

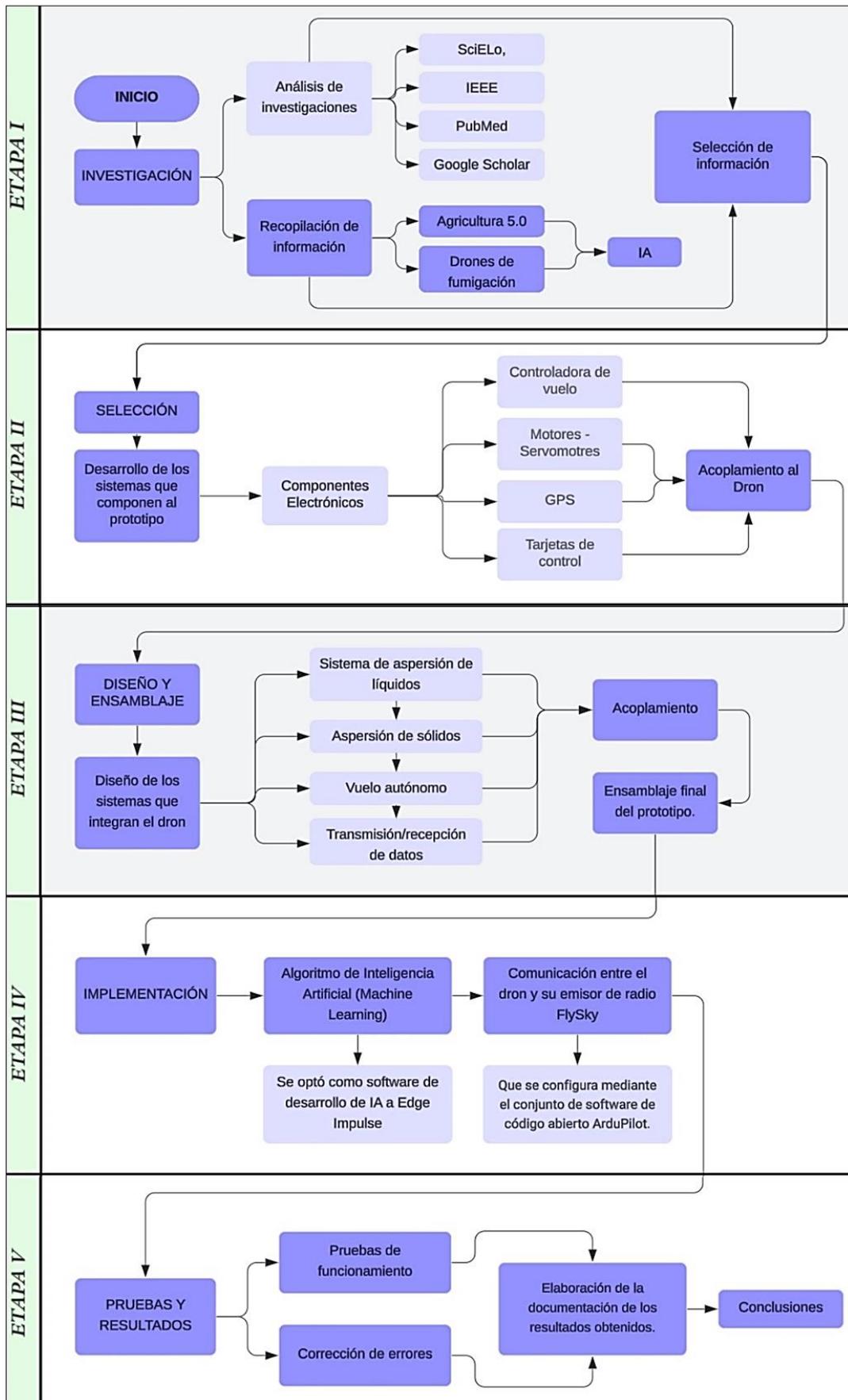


Ilustración 5.- Diagrama de Desarrollo del proyecto

3.5. Procedimiento

En la ilustración 6, se muestra el diagrama de bloques de cómo se encuentra estructurado el proyecto, capaz de cumplir con los objetivos que tiene este trabajo de investigación.

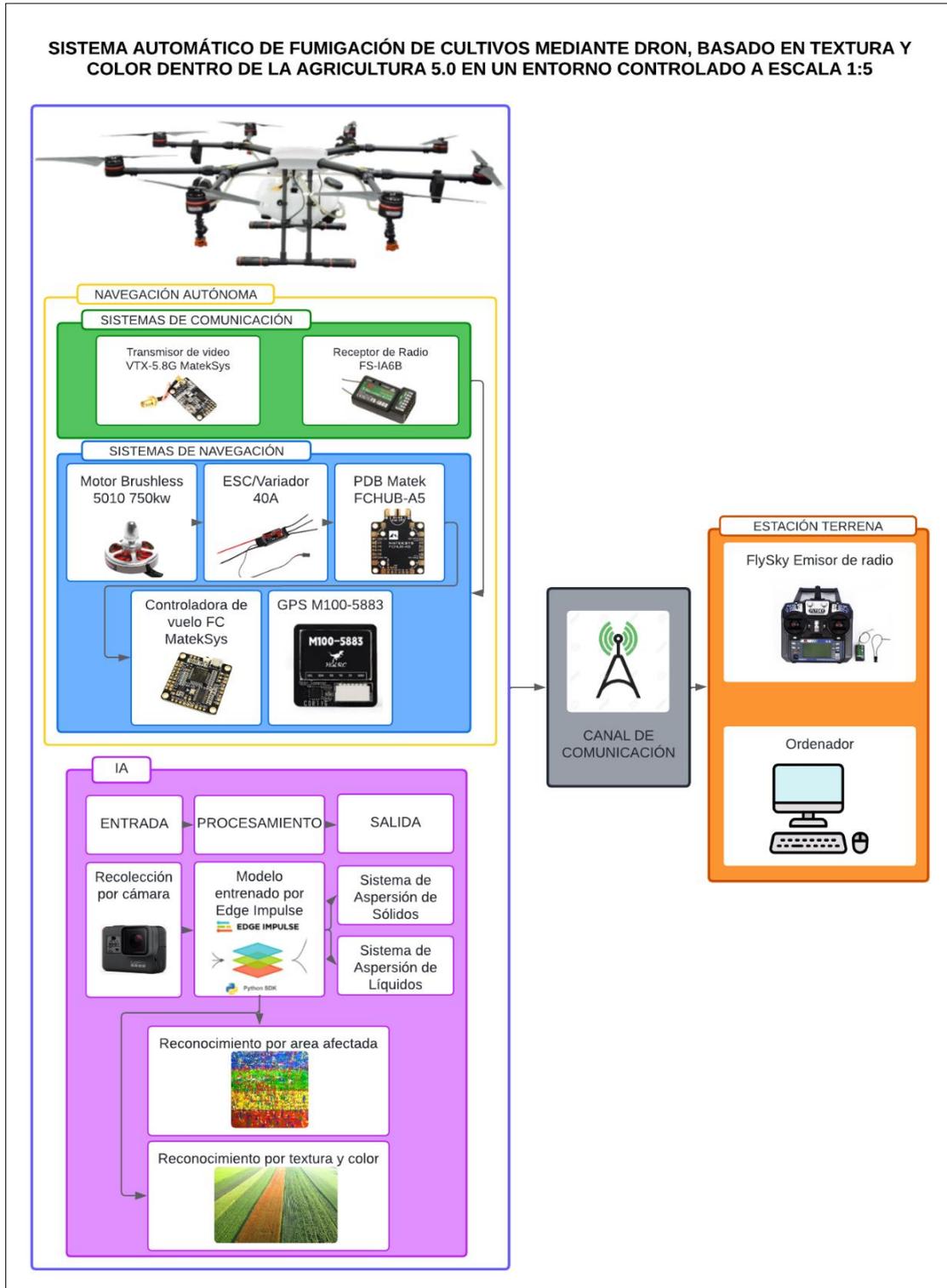


Ilustración 6.- Sistema automático de fumigación de cultivos mediante dron, basado en textura y color dentro de la agricultura 5.0 en un entorno controlado a escala 1:5.

3.5.1. Tecnología empleada (hardware y software)

3.5.1.1. Hardware

Para el proyecto, se ocupa dos ordenadores con las siguientes especificaciones:

Ordenador

- CPU: Intel(R) Core (TM) i7-7500H @ 2.70GHz-2.90Hz
- Memoria: 8,0 GB RAM
- Disco Duro: 1TB SSD
- Tipo de Sistema: x64 bit

3.5.1.2. Software

Durante el desarrollo de este proyecto se han empleado los siguientes software's, los cuales han ayudado con tareas de planificación de vuelo, análisis de datos y procesamiento de datos:

- **ArduPilot:** Esta es una plataforma utilizada para vehículos no tripulados, el cual se basa en la programación de puntos de referencia (waitpoints) en un mapa, mediante esta plataforma se realizó la programación de los puntos de vuelo autónomo que el dron debe seguir para poder cumplir con la misión de vuelo planificada para esta tesis.
- **Edge Impulse:** Esta es una plataforma integral para el desarrollo y despliegue de IA en dispositivos de borde, mediante esta plataforma se realizó la adquisición, preprocesado y etiquetado de datos censados.
- **Arduino:** Es una plataforma de hardware de código abierto ampliamente utilizada que proporciona una variedad de microcontroladores y placas para prototipado rápido, se ha utilizado esta plataforma en este proyecto para la implementación del modelo de IA entrenado en Edge Impulse en el equipo de borde o microcontrolador seleccionado para este proyecto el cual es un ESP32-CAM
- **SPSS:** Es un software estadístico utilizado para el análisis de datos. Fue empleado en el desarrollo de esta investigación para estudiar los datos estadísticos obtenidos.

3.5.2. Ensamblaje de Dron Cuadricóptero

A continuación, se detallan los componentes utilizados en el ensamblaje del dron tipo Exacóptero desarrollado para este proyecto de investigación:

- **Frame 680:** Es la estructura o marco del dron, fabricado con fibra de carbono, consta con diseño de 6 ejes, cuenta con una alta capacidad de carga de 5k.
- **Hélices:** 3 pares de hélices de 14 y 16 pulgadas compatibles con los motores seleccionados.
- **Motores bushelles 5010 750kv:** Juego de 6 motores de 750kv sin escobilla, con alto torque, compatible con baterías LIPO de 2s a 6s.
- **ESC 40A:** Son controladores electrónicos de velocidad de 40A, soportan voltajes de hasta 6s.
- **MatekSys FCHUB-A5:** Placa de distribución de energía, compatibles con Lipo 2s a 6s, con salidas de 6 a 26v, soporta 2A.
- **MatekSys F405-std:** Controlador de vuelo compatible con ArduPilot, 16 pines, voltajes de trabajo de hasta 30v.

- **VTX MatekSys 5.8G:** Trasmisor de video de 5.8Ghz compatible con sistemas MatekSys.
- **GPS HGL-RC M100-5883:** Sistema de Posicionamiento Global de 10ma generación con brújula incorporada, canal de recepción de 72 canales, con velocidades de transmisión de 115 200 bps.
- **Gimbal:** Estabilizador de 3 ejes, con controlador Ligero FPV para cámaras Go-Pro-Hero 6,7, 10 u 11, y frames F450, F550 y S500 para fotografía aérea.
- **Batería Lipo 6s – 6A:** Batería Lipo de 22.2v de 6 celdas con 6000mA, compatible con cuadricópteros, con una tasa de descarga de 100c.
- **Cámara FPV CADDX:** Cámara analógica compatible con voltajes de 4.5v- 27v. con resolución de 1080p.
- **Tanques plásticos 500mL:** Tanque de líquido para dron, con capacidad de 0,5 L, con peso de 92.5g.
- **Bombas de agua 2L/min:** mini bomba de agua, con voltaje de operación de 6v–12v, capacidad de 2L por minuto.
- **Motor Reductor:** Motor reductor DC, voltajes de trabajo de 6v-12v, el cual es acoplado para un diseño modelado en TinkerCad para un aspersor de sólidos.
- **Aspersores Micro:** Microaspersor de Banariego.



Ilustración 7.- Componentes del Dron.

Paso 1. Ensamblaje del Frame 680:

Como se puede apreciar en la figura 8, todos los elementos de la estructura Tarot, tales como los brazos, tren de aterrizaje, trípode, entre otros, se van a acoplar de forma apropiada a las placas superior e inferior del chasis que se puede observar en la ilustración 9.



Ilustración 8.- Componentes de la estructura Frame 680



Ilustración 9.- Chasis Frame 680 ensamblado.

Paso 2. Acoplamiento de los motores a los brazos de la estructura del Frame.

Como se puede observar en la ilustración 10. Se lleva a cabo el acoplamiento de los 6 motores con los brazos del hexacóptero.



Ilustración 10.- Ensamblaje de motores y brazos del hexacóptero.

Paso 3. Acoplamiento de los controladores electrónicos de velocidad (ESC) con los motores.

Se efectúa las conexiones del ESC con los motores. De tal forma que las conexiones adecuadas se establecen de la siguiente manera: los motores 1 y 3 se conectan de manera estándar para que giren en sentido horario, mientras que los motores 2 y 4 se conectan de forma inversa para girar en sentido antihorario. Es importante considerar la codificación de colores de los cables. El mencionado proceso se observa en la ilustración 11 y 12.



Ilustración 11.- Conexiones entre motores y ESC.

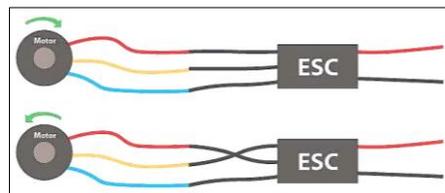


Ilustración 12.- Conexión entre los motores brushless y ESC [52].

Paso 4. Ubicación de los motores en el Frame.

El montaje de los motores en el Frame se muestra en la Ilustración 13, donde cada motor está fijado mediante pernos y los ESC están asegurados con abrazaderas de plástico.



Ilustración 13.- Incorporación de los motores y ESC 40A al Frame.

Paso 5. Montaje del Gimbal y cámara.

Según el Frame utilizado, se dispone de un área designada para ubicar el gimbal junto con su cámara, cuyas características han sido previamente especificadas. Esto se puede observar en la Ilustración 14.



Ilustración 14.- Acople del gimbal y la cámara.

Paso 6. Montaje del controlador de vuelo en el Frame.

Al colocar el controlador de vuelo, se considera su parte inferior para no interferir con el funcionamiento adecuado de otros componentes internos. Esto se puede apreciar en la Ilustración 15.

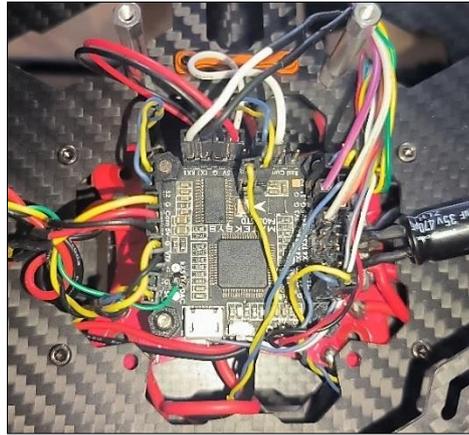


Ilustración 15.- Ubicación del controlador de vuelo.

Paso 7. Integración del GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

En la Figura 16 se muestra el posicionamiento del GPS en la parte superior del Controlador de Vuelo, lo que requiere una consideración meticulosa de su ubicación y orientación para garantizar una recepción de señal óptima y una precisión en la navegación del dron.

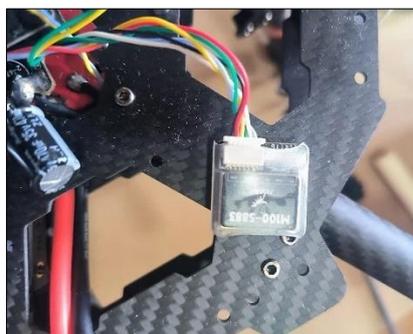


Ilustración 16.- Acoplamiento del GPS

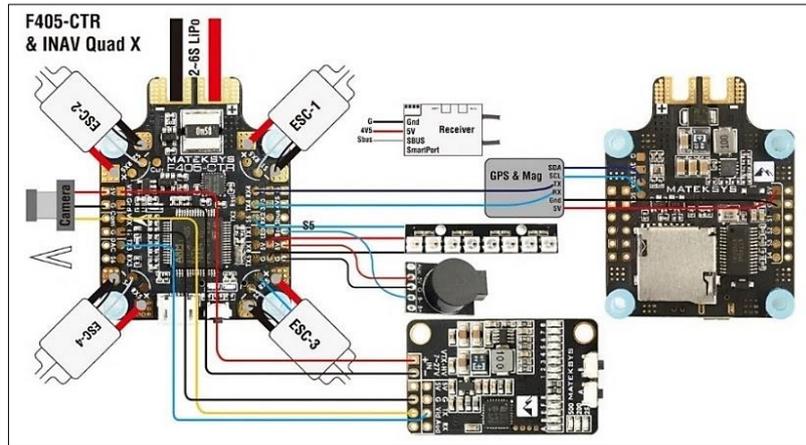


Ilustración 17.- Esquema de conexión del GPS.

Paso 8. Instalación de la batería y las hélices.

La batería se coloca en la parte superior de los componentes utilizando correas de sujeción, ya que no cuenta con un lugar específico designado. Esto se ilustra en la Figura 18. En cuanto a las hélices, se instala una en cada motor según los requisitos específicos del dron como se ve en la figura 19.



Ilustración 18.- Acoplamiento de la batería en el dron.



Ilustración 19.- Colocación de las hélices en el dron.

3.5.3. Ajuste y configuración del controlador de vuelo MatekSys F405-STD.

Como punto precedente a la configuración de la tarjeta controladora de vuelo, se identifica el software que se implementó para configurar dicho controlador del dron:

- **ArduPilot:** Para el control y la navegación del dron.

- **Mission Planner:** Para la planificación de misiones y la configuración avanzada del dron.
- **BetaFlight:** Para la configuración, calibración y control del dron.

Antes de comenzar con la configuración del controlador de vuelo, se realizó un cambio de firmware de la tarjeta de vuelo MatekSys F405-STD. Esto se hizo por motivos de compatibilidad con ArduPilot, software utilizado para realizar tanto la configuración inicial del controlador, los parámetros, y la planificación de misiones automáticas. Para esto, se usó el software BetaFlight, ya que el controlador viene por defecto con el firmware de esta marca. El cambio se realizó a través de la opción "instalar firmware," y después "cargar firmware" como se muestra a continuación:

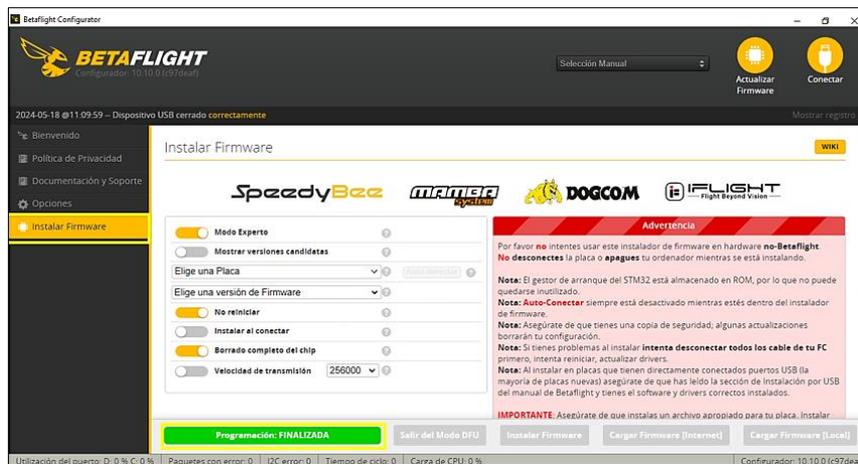


Ilustración 20.- Instalación y Configuración del nuevo Firmware en el controlador de vuelo.

Paso 1. Instalación del software ArduPilot. En la página oficial de ArduPilot, descargamos el software Mission Planner y realizamos la instalación por defecto sin cambiar ningún parámetro.



Ilustración 21.- Página oficial del software ArduPilot [53].

- Una vez realizada la instalación, el software se muestra como en la siguiente ilustración:



Ilustración 22.- (a) Pantalla inicial del software Misión Planner, (b) Interfaz gráfica del Software Misión Planner.

Paso 2. Una vez instalado y abierto Mission Planner, se enlaza mediante el COM disponible con la placa de piloto automático a una velocidad de transmisión de 115.200 baudios, dicha velocidad de trabajo comúnmente es utilizada por la tarjeta MatekSys F405-STD. Una vez realizada la conexión con la tarjeta del Dron como se observa en la Ilustración 23. Accedemos al menú “Setup”, seleccionamos las opciones iniciales, como el tipo de Frame, que en nuestro caso será un hexacóptero. Esta configuración se puede observar en la Ilustración 24.



Ilustración 23.- Conexión exitosa entre la tarjeta MatekSys F405-STD mediante cable USB y el software Mission Planner.

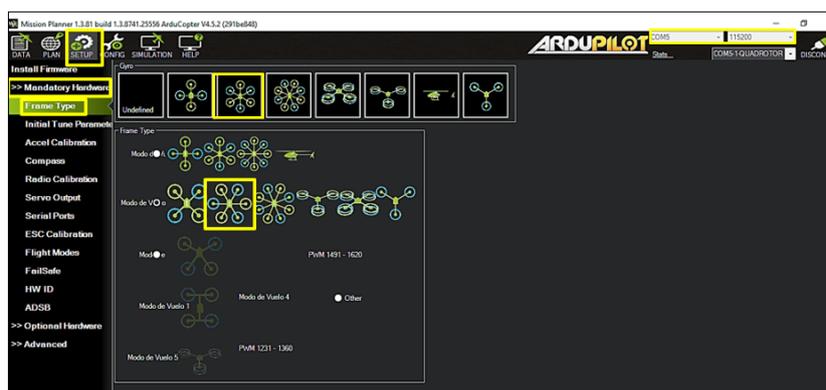


Ilustración 24.- Interfaz del software Mission Planner, configuraciones iniciales.

Paso 3. Configuramos los parámetros de sintonización inicial mediante la opción “Initial Tune Parameter”, como se muestra en la Ilustración 25. Estos parámetros incluyen el tamaño de las hélices en pulgadas, que en nuestro caso son de 12 pulgadas, y el número de celdas de la batería que vamos a utilizar. En nuestro caso, es una batería LiPo 6S – 6^a, resaltados por un recuadro de color amarillo. Calculamos los parámetros iniciales como se observa en la Ilustración 25, en el recuadro de color rojo.

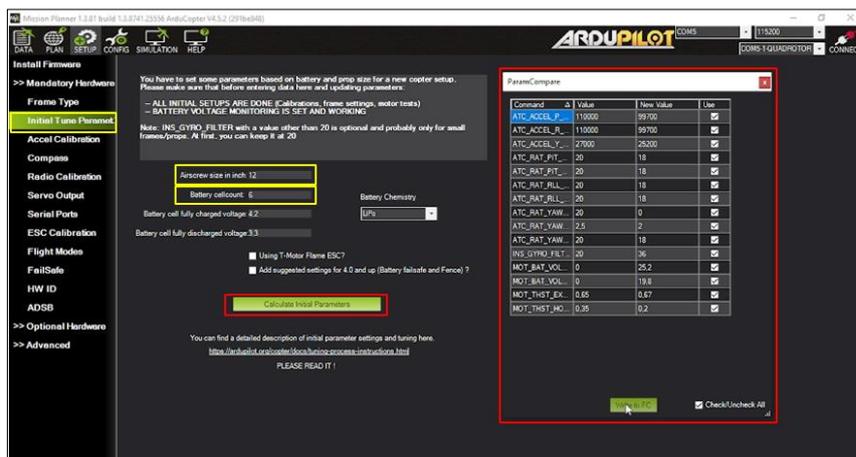


Ilustración 25.- Configuración de los parámetros de sintonización inicial.

Paso 4. Establecemos la calibración de aceleración mediante la opción “Accel Calibration”, como se observa en la Ilustración 26. A continuación, procedemos a la configuración de la brújula. Para ello, seleccionamos la opción “Compass” y calibramos el compás moviendo el dron en varias direcciones. Esto permitirá que el compás se calibra correctamente. Una vez completados los parámetros de configuración, la barra de estado se llenará y el compás estará completamente calibrado, como se muestra en la siguiente ilustración.

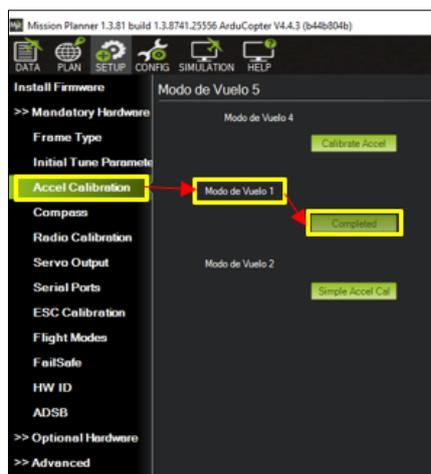
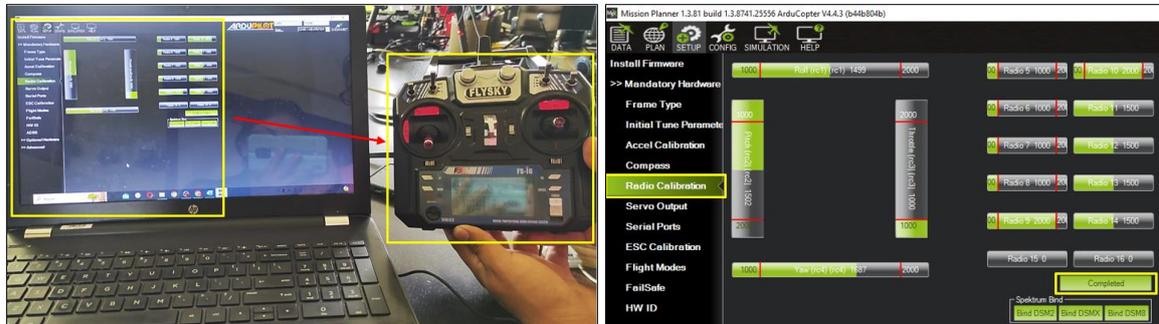


Ilustración 26.- Parámetros de aceleración y compas.



Ilustración 27.- Calibración del GPS eje vertical del Dron.

Paso 5. Definimos los ajustes para la calibración de la radio mediante la opción “Radio Calibration”. Es importante asegurarse de que el control remoto FlySky utilizado en el proyecto esté encendido durante este proceso para poder realizar las configuraciones necesarias. tal como se observa en la Ilustración siguiente.



(a)

(b)

Ilustración 28.- (a) Calibración del radio control FlySky utilizado en nuestro proyecto, (b) Calibración completa.

Paso 6. Configuración de salida o servomotores, este paso es crucial, ya que se integran todos los componentes electrónicos que utilizará el dron. Para nuestro prototipo, configuraremos los 6 motores que se acoplan al dron, así como dos actuadores utilizados para el proceso de fumigación de líquidos y aspersión de sólidos.



Ilustración 29.- Configuración de salida de motores y actuadores en el dron.

Paso 7. En la configuración de los puertos seriales, los puertos 1 y 2 suelen destinarse a la telemetría, mientras que el puerto 3 se reserva exclusivamente para el GPS. En el caso de las placas MatekSys F405-STD, el puerto 4, que está disponible, puede destinarse a otro dispositivo GPS, y finalmente, el puerto 5 se utiliza como entrada de control. Véase en la siguiente Ilustración.



Ilustración 30.- Configuración de los puertos seriales.

Paso 8. Calibración de los ESC (Electronic Speed Controller): Es importante ya que controla la velocidad y dirección de los motores del dron. Actuando como intermediario entre la batería y el motor, ajustando la cantidad de energía eléctrica que fluye hacia el motor según las señales recibidas desde el controlador de vuelo. Estos valores de configuración se calibran ya con el dron completo es decir con todos los pesos de elementos y componentes electrónicos en el dron, a continuación, se muestran en la ilustración siguiente la calibración final que se utilizó para este proyecto.



Ilustración 31.- Calibración y parámetros de ESC utilizada en el dron.

Paso 9. Determinar los modos de vuelo que implementaremos según la posición de la palanca seleccionada en el control remoto. En nuestro caso, contamos con tres posiciones, las cuales se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6.- Modos de vuelo

Modo de vuelo	Descripción	
Flight Mode 1	Stabilize	Estabilizado
Flight Mode 4	Position Hold	Automático
Flight Mode 6	Auto	Generador de Misiones

Paso 10. Configuración del protocolo Fail-Safe o modo de seguridad. La función es esencial, ya que se activa automáticamente en caso de anomalías o pérdida de señal entre el control remoto y el dron. Cuando se activa, el dron ejecuta acciones predefinidas para un aterrizaje seguro, como retornar al punto de despegue, descender lentamente o mantener una posición estable en el aire.



Ilustración 32.- Definición del protocolo Fail-Safe.

Paso 11. Prueba del funcionamiento de los motores del dron de manera individual y en tiempo real. Con la herramienta "Motor Test", se puede evaluar cada motor, haciéndolos girar a diferentes velocidades para confirmar su correcto desempeño y dirección. Tomando en cuenta que "CCW" significa Contrarreloj y "CW" en el sentido de las agujas del reloj para los giros de los motores. Esta función se visualiza en las imágenes 32(a)(b) y 33.

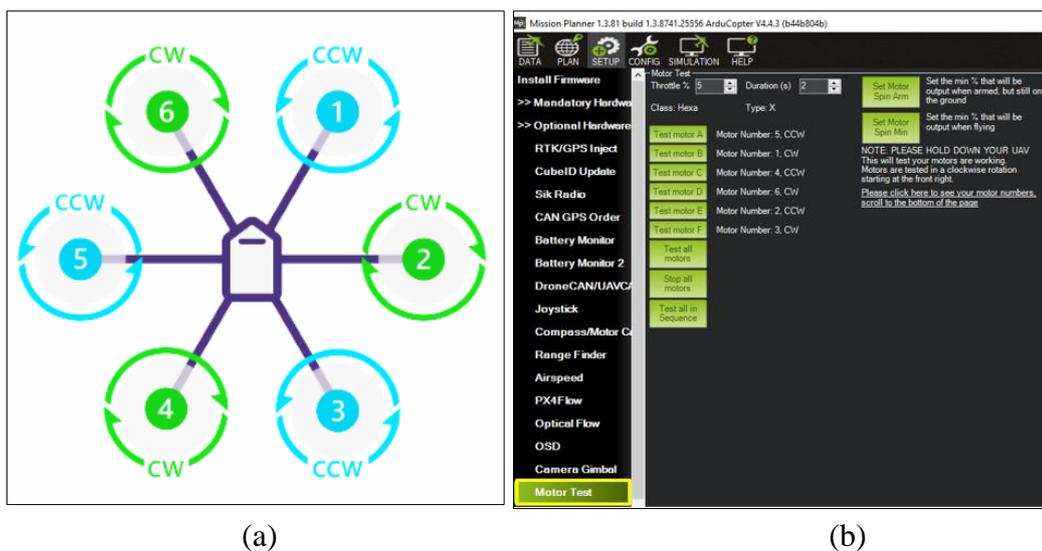


Ilustración 33.- (a) Diagrama de orden de motores para un Hexacóptero Hexa CW X [54]. (b) Calibración de Motores con el software Mission Planner.

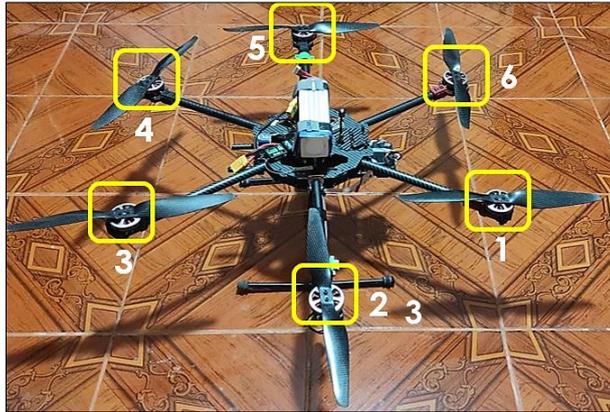


Ilustración 34.- Prueba de giros de motores implementados en el dron.

Paso 12. Descripción de los movimientos principales que el dron puede realizar.

- **Roll:** Movimiento de inclinación lateral del dron.
- **Pitch:** Movimiento de inclinación hacia adelante o hacia atrás del dron.
- **Yaw:** Movimiento de giro del dron alrededor de su eje vertical.

Estos movimientos son controlados por los diferentes ajustes en los motores del dron, permitiendo maniobrar en el aire en diferentes direcciones. Consulte la Ilustración 35.

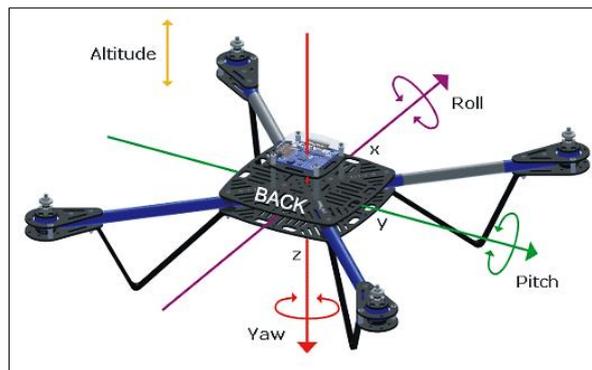


Ilustración 35.- Movimientos principales del dron [55].

Paso 13. Configuración de PID: En la pestaña "Extended Tuning" del software Mission Planner, se pueden ajustar los parámetros de control del hexacóptero según sus características específicas y el entorno de vuelo. Estos ajustes incluyen el control de la velocidad de rotación en los ejes mediante Rate Roll/Pitch/Yaw, el ajuste de la estabilidad con Stabilize Roll/Pitch/Yaw, y la configuración de la aceleración del motor y la velocidad de ascenso/descenso con Throttle Accel y VSpd.

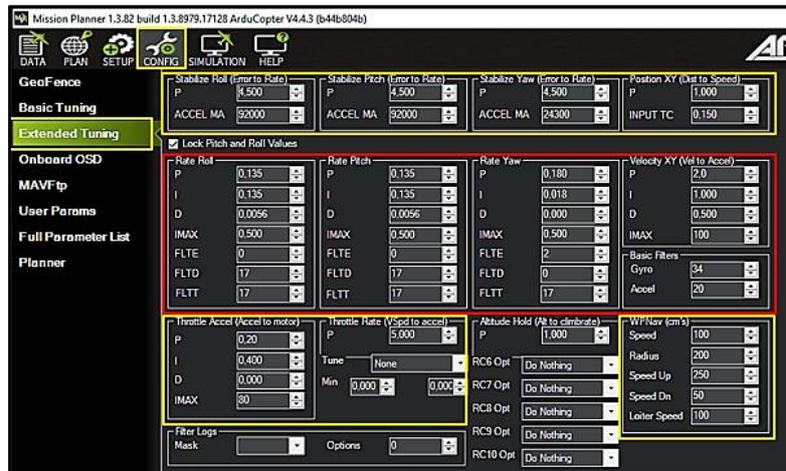


Ilustración 36.- Parámetros PID y ajustes de control para los ejes Roll, Pitch y Yaw.

3.5.4. Sistema de aspersión de líquidos

El sistema de aspersión de líquidos fue diseñado para distribuir los líquidos de manera controlada y uniforme sobre el ambiente controlado a escala 1:5. Este sistema está compuesto por los siguientes componentes como se puede observar en la ilustración 37:

- *Tanque de Líquido*: almacena el líquido a ser pulverizado.
- *Bomba*: Impulsa el líquido desde el tanque hacia los aspersores.
- *Tuberías*: Conducen el líquido desde la bomba hasta los aspersores.
- *Aspersores*: Dispersan el líquido en forma de gotas finas sobre el área deseada.

El sistema de aspersión funciona automáticamente una vez que la cámara del dron, equipada con IA entrenada por Edge Impulse y ESP32CAM, identifica el color asignado para la fumigación y activa la bomba en tiempo real. El líquido se impulsa desde el tanque a través de tuberías hacia los aspersores, que liberan el líquido en gotas finas según el color asignado: amarillo, azul, rojo, verde o café.

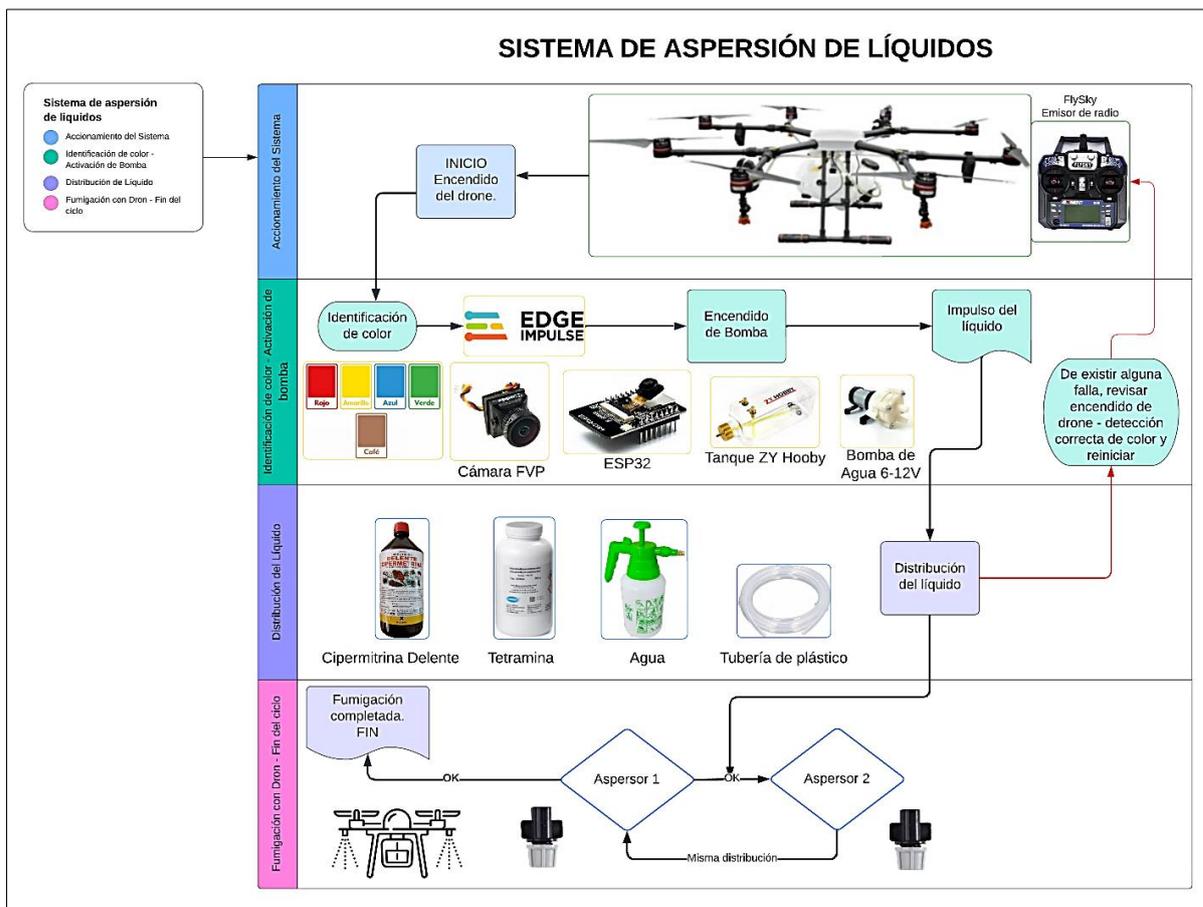


Ilustración 37.- Proceso detallado del sistema de aspersión de líquidos y sus componentes.

3.5.5. Sistema de aspersión de semillas

Este sistema se diseñó para esparcir semillas en suelos detectados por el dron como arenosos, mixtos, calizos, ácidos o supresivos, que se encuentran en un ambiente controlado a escala 1:5. El cual se activará en suelos aptos para cultivos, descartando los no adecuados, lo que permite una distribución más eficiente y rápida. El sistema de aspersión de semillas se encuentra compuesto por los siguientes elementos.

- *Tanque de Almacenamiento:* Contiene las semillas que servirán para la aspersión.
- *Micro Servo motor MG90S:* Presuriza la mezcla de semillas para que pueda ser distribuida a través del sistema.
- *Fuente de alimentación:* Para el accionamiento del servomotor, es importante utilizar un voltaje entre 4.8v a 6v.
- *Sistema de Control:* Permite regular el flujo, y el área de cobertura del sistema de aspersión.

Las semillas se almacenan en el tanque y se dispersan según las características del suelo. Al encenderse, el dron vuela sobre el área detectada y siembra automáticamente. La cámara del dron, con IA entrenada por Edge Impulse y ESP32CAM, identifica en tiempo real el tipo de suelo y activa la aspersión solo en aquellos que son aptos para ser sembrados. Se enciende el micro servomotor MG90S, que impulsa el rotor y hace que las semillas caigan desde el tanque como se muestra en la ilustración 38.

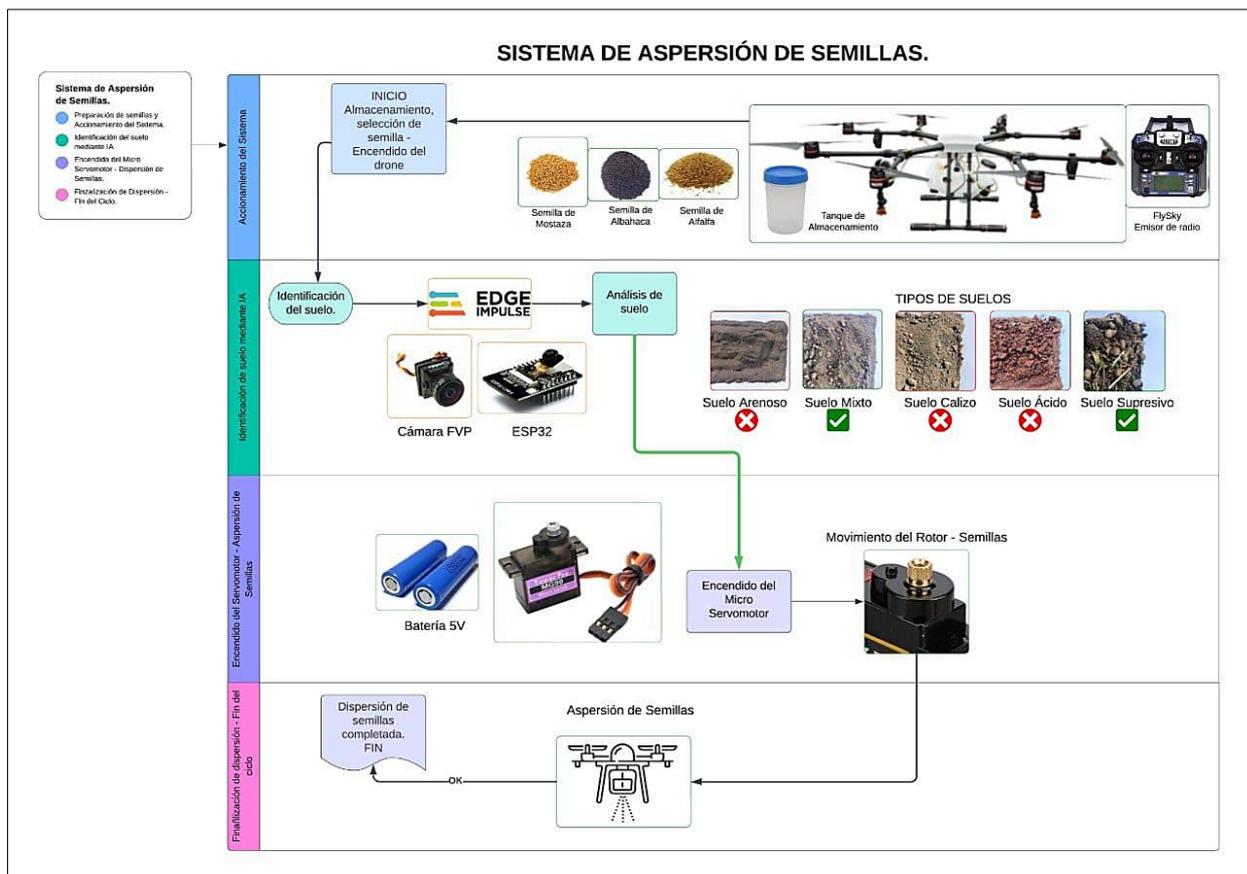


Ilustración 38.- Proceso detallado del sistema de aspersión de semillas y sus componentes.



Ilustración 39.- Dron Ensamblado con todos sus sistemas.

3.5.6. Prueba de vuelo

Para llevar a cabo la prueba de vuelo, se inicia conectando la batería del dron. A continuación, se aseguran de que todos los parámetros de vuelo se hayan configurado correctamente en el sistema de control del dron. Se verifica también que los satélites necesarios para la navegación estén conectados y funcionando adecuadamente, garantizando así una recepción precisa de las señales de GPS. Una vez completadas estas verificaciones y ajustes, el dron está listo para realizar la prueba de vuelo, asegurando su correcto funcionamiento durante el vuelo.



Ilustración 40.- Prueba de vuelo del dron.

3.5.7. Plan de vuelo

El plan de vuelo es una parte esencial del proceso de fumigación automatizada mediante drones, ya que asegura que el dron cubra todas las áreas requeridas de manera eficiente y segura. Esta sección detalla la planificación del vuelo utilizando el software Mission Planner, la ejecución del plan en campo.

3.5.7.1. Plan de vuelo con Mission Planer

La planificación del vuelo se realiza utilizando Mission Planner como se puede observar en la ilustración 41. Este software permite configurar y supervisar las rutas de vuelo, garantizando que el dron siga la trayectoria óptima para la recolección de datos y la fumigación; los pasos para la planificación de vuelo se muestran a continuación:

- **Definición del Área de Vuelo:** Se selecciona el área de interés en los mapas disponibles en Mission Planner, estableciendo los límites geográficos dentro de los cuales el dron operará.
- **Configuración de Waypoints:** Se colocan waypoints estratégicamente para asegurar la cobertura completa del área. Cada waypoint incluye instrucciones específicas, como activar el sistema de aspersión de líquidos y sistema de aspersión de semillas, como se puede apreciar en la ilustración 42.
- **Ajuste de Parámetros de Vuelo:** Se configuran los parámetros clave, como la altitud de vuelo, para garantizar que el dron mantenga una distancia segura del terreno mientras maximiza la eficiencia de la misión.

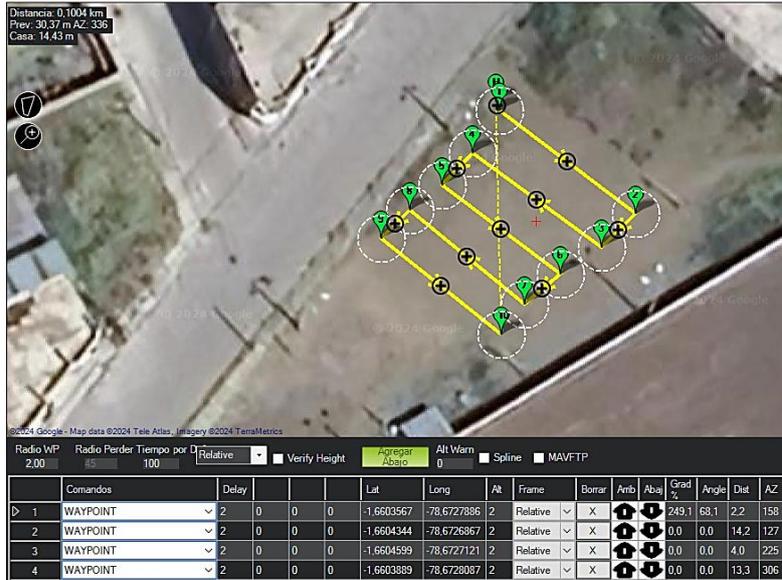


Ilustración 41.- Plan de vuelo elaborado con Mission Planner.

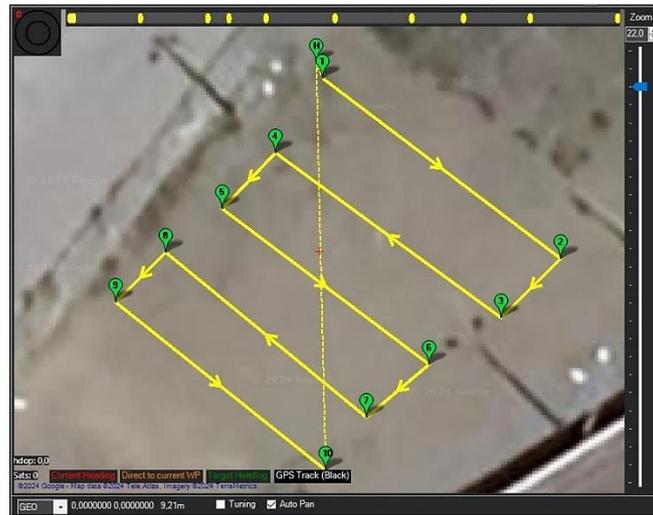


Ilustración 42.- Ubicación de la misión de vuelo y límite del área.



a)

b)

Ilustración 43.- a) Área de la misión de vuelo, b) Reconocimiento aéreo de la misión vista por el Dron.

Tabla 7.- Parámetros de vuelo automático

Parámetro	Valor	Descripción
Altitud de Vuelo	2 metros	Altura constante para evitar obstáculos.
Waypoints	10 puntos	Puntos de interés definidos en el área.

3.5.7.2. Ejecución del plan de vuelo en campo.

Antes de la ejecución en campo, se realizan varias verificaciones para asegurar que el dron esté listo para la misión:

- *Revisión de la Batería y Carga Útil:* Verificación del nivel de batería y la funcionalidad del sistema de fumigación.
- *Calibración de Sensores:* Asegurarse de que los sensores (brújula, GPS) estén correctamente calibrados para evitar desviaciones durante el vuelo.

Una vez completados los preparativos, se procede a la ejecución del plan de vuelo o ejecución de campo, como se puede apreciar en la ilustración 43 (b):

- *Despegue Automático:* El dron despegue automáticamente y se dirige al primer waypoint según lo programado en el plan de vuelo.
- *Navegación y Recolección de Datos:* Durante el vuelo, el dron sigue la ruta establecida, capturando imágenes y activando el sistema de fumigación en los puntos designados.
- *Monitorización en Tiempo Real:* Se supervisa el vuelo en tiempo real mediante Mission Planner, permitiendo realizar ajustes si es necesario.

3.5.8. Procesamiento de imágenes

Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó inteligencia artificial (IA) a través de la plataforma Edge Impulse, que permite crear, entrenar y desplegar modelos de IA optimizados para dispositivos embebidos.

A través del esquema se muestra a continuación, se proporciona una visión general del flujo de trabajo en el procesamiento de imágenes para la obtención de las variables, asegurando un análisis preciso y efectivo de los resultados.

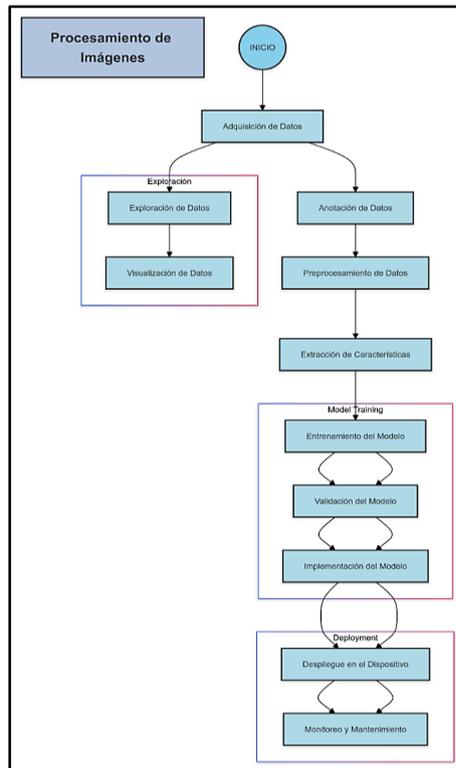


Ilustración 44.- Flujo de trabajo para el procesamiento de imágenes y despliegue de modelos de Machine Learning.

Dentro del procesamiento de imágenes, se han desarrollado tres sistemas de detección con inteligencia artificial: detección de colores, detección de texturas y detección de enfermedades.

En el desarrollo del modelo de inteligencia artificial para la detección de colores, se seleccionaron y analizaron previamente cinco colores: amarillo, azul, rojo, verde y café. Estos colores fueron escogidos por sus características particulares que los hacen ideales para su detección y análisis en diversas condiciones de iluminación y contraste véase la ilustración 45. A continuación, se describen las razones para la selección de cada color:

- **Amarillo:** Elegido por su alta visibilidad y capacidad de mantener contraste y estabilidad bajo diversas condiciones de iluminación.
- **Azul:** Seleccionado por su nítido contraste con colores cálidos y su estabilidad en diferentes iluminaciones, facilitando una detección precisa.
- **Rojo:** Incluido por su alta visibilidad y fuerte contraste con colores fríos, siendo detectado con precisión incluso en iluminación adversa.
- **Verde:** Escogido por su claro contraste, estabilidad en diversas iluminaciones, y amplia gama en el espectro RGB, ideal para aplicaciones agrícolas.
- **Café:** Elegido por su sutil contraste con colores brillantes y su estabilidad en distintas condiciones de iluminación, especialmente en tonos tierra.

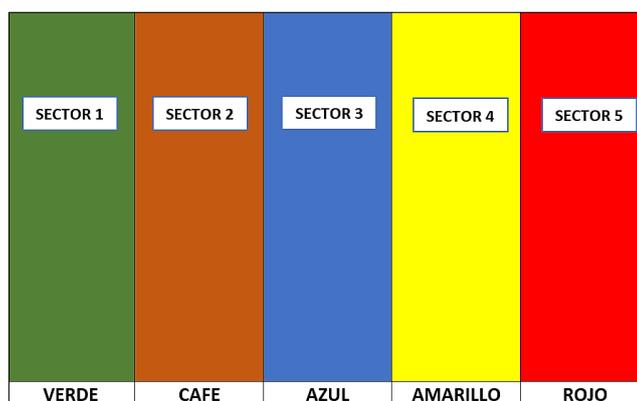


Ilustración 45.- Colores seleccionados para la implementación del entorno controlado a escala 1:5.

Para la detección de texturas, se seleccionaron y analizaron cinco tipos de texturas en suelos: arenoso, mixto, calizo, ácido y supresivo, Como se aprecia en la ilustración 46. Estas texturas fueron escogidas por sus características específicas que permiten su identificación y análisis en diferentes condiciones. A continuación, se describen las razones para la selección de cada textura:

- **Suelo Supresivo:** Apto para la agricultura; se realizará aspersión de semillas. Este suelo es idóneo para cultivos debido a su capacidad para favorecer la inmunidad de algunas plantas frente a determinadas enfermedades.
- **Suelo Mixto:** Apto para la agricultura; se realizará aspersión de semillas. Aunque contiene un alto contenido de arena, retiene mejor la humedad que otros suelos.

- **Suelo Calizo:** No apto para la agricultura; no se realizará aspersión de semillas. Este tipo de suelo es árido, seco, duro y fácil de erosionar, haciéndolo poco adecuado para los cultivos.
- **Suelo Arenoso:** No apto para la agricultura; no se realizará aspersión de semillas. Este suelo está compuesto por partículas de piedra de 0.05 a 2 milímetros de diámetro y tiene una textura rasposa. Es ligero, propenso a la erosión por agua y viento, y apenas retiene nutrientes y humedad.
- **Suelo Ácido:** No apto para la agricultura; no se realizará aspersión de semillas. Tiene un pH muy bajo y se considera de baja calidad debido a sus toxicidades y deficiencias para las plantas.



Ilustración 46.- Texturas de los suelos seleccionados para la implementación del sistema de aspersión de semillas en el entorno controlado a escala 1:5.

En la detección de pseudoenfermedades, se optó por representar las enfermedades utilizando una única forma circular. Esta simplificación permite identificar de manera eficiente las áreas afectadas en las imágenes, centrándose en la presencia de formas circulares que simbolizan las enfermedades en los cultivos, Tal y como se evidencia en la ilustración 47.

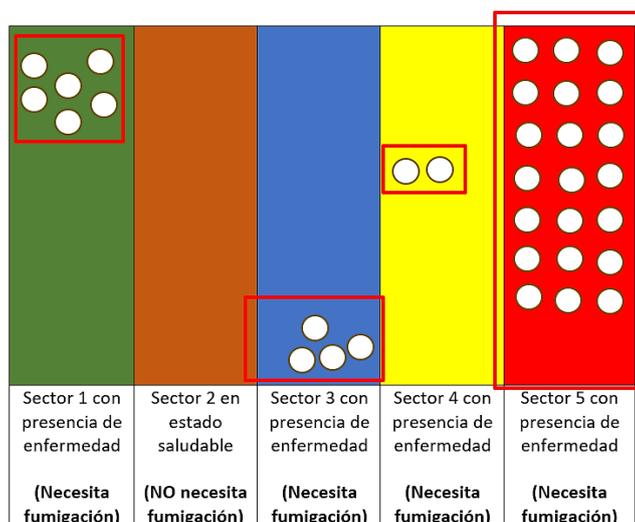


Ilustración 47.- Análisis de la maqueta para la detección de enfermedades.

Como se puede observar en la ilustración 47 la maqueta está dividida en cinco sectores, cada uno representado con un color diferente y clasificado según la presencia o ausencia de enfermedad en las áreas demarcadas.

- **Sector 1** (verde): Presenta signos de enfermedad en ciertas áreas, por lo que requiere fumigación.
- **Sector 2** (café): Se encuentra en estado saludable, sin necesidad de fumigación.
- **Sector 3** (azul): Muestra áreas con presencia de enfermedad, indicando que requiere fumigación.
- **Sector 4** (amarillo): También tiene zonas con enfermedad y necesita fumigación.
- **Sector 5** (rojo): Presenta una gran cantidad de áreas afectadas y requiere fumigación.

El dron analiza cada sector para determinar si es necesario aplicar fumigación. En caso de necesitarla, el dron solo fumigará las áreas afectadas, sin intervenir en las zonas sanas del mismo sector.

El primer paso en la detección en los sistemas es la configuración de un proyecto en Edge Impulse llamado "Detección de Colores", "Detección de Texturas" y "Detección de enfermedades". A continuación, se describen los pasos realizados:

3.5.8.1. Configuración de proyecto

Se configura un nuevo proyecto en Edge Impulse utilizando el dispositivo ESP32CAM para la captura de imágenes. El enfoque del proyecto varía según el tipo de procesamiento requerido:

- **Detección de Colores:** Se crea un proyecto específico para la identificación de colores en las imágenes capturadas por el dron.

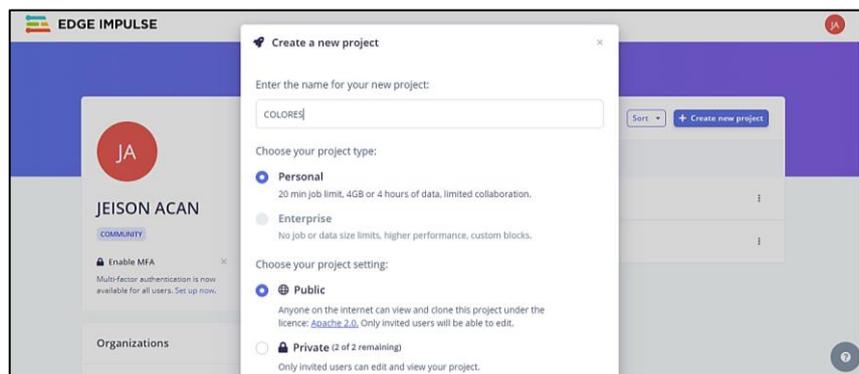


Ilustración 48.- Creación de proyecto "Detección de colores".

- **Detección de Texturas:** Se configura el proyecto para identificar diferentes texturas en las imágenes del entorno controlado.

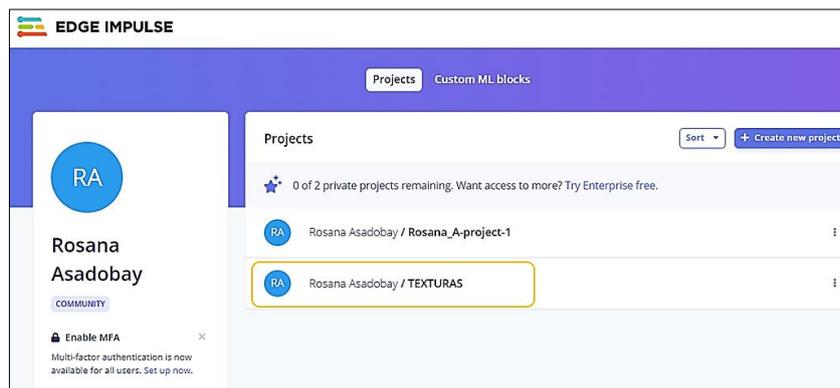


Ilustración 49.- Creación de proyecto “Detección de texturas”.

- **Detector de Enfermedades:** Se establece un proyecto para detectar síntomas de enfermedades en las imágenes de cultivos.



Ilustración 50.- Creación de proyecto “Detección de enfermedades”.

3.5.8.2. Recolección y etiqueta de datos

Se capturaron 750 imágenes representativas de los distintos colores presentes en los cultivos dentro del entorno controlado. Estas imágenes se subieron a la plataforma Edge Impulse y se etiquetaron manualmente en categorías específicas. La captura y etiquetado de las imágenes se realizaron de acuerdo con el tipo de detección deseada.

- **Detección de Colores:** Se obtienen 750 imágenes de colores como amarillo, azul, rojo, verde y café. Las imágenes se etiquetan en categorías correspondientes.

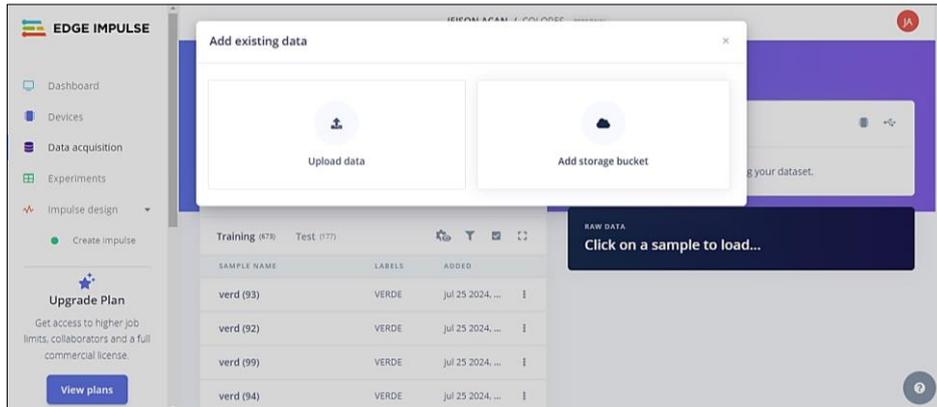


Ilustración 51.- Procedimiento para la recolección de datos “Detección de colores”.

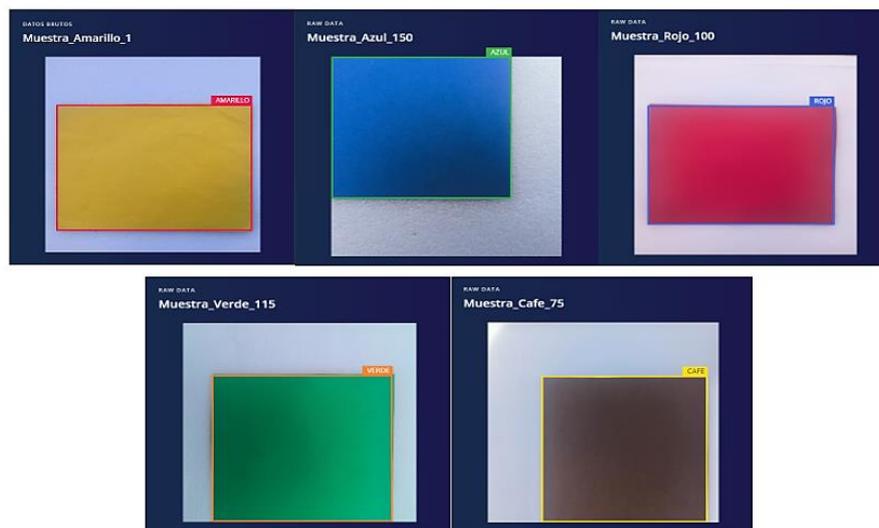


Ilustración 52.- Etiquetado manual de datos para el entrenamiento de la IA en el sistema “Detección de colores”.

- **Detección de Texturas:** Se capturan 750 imágenes de diferentes texturas, como arenoso, calizo, ácido, supresivo y mixto; y se etiquetan según las texturas observadas.

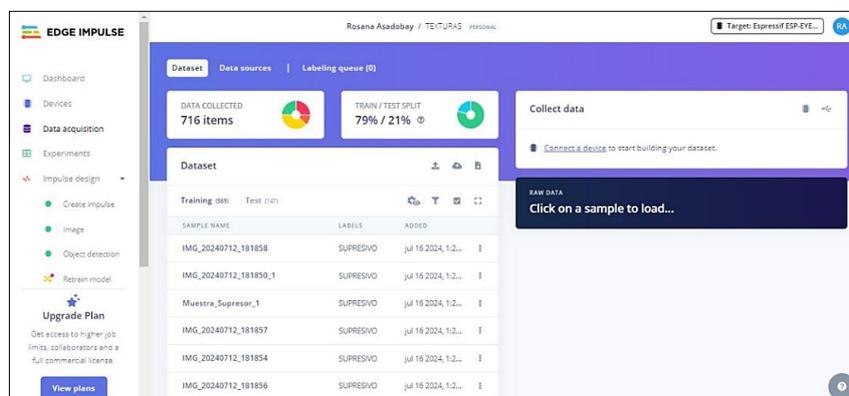


Ilustración 53.- Procedimiento para la recolección de datos “Detección de texturas”.



Ilustración 54.- Etiquetado manual de datos para el entrenamiento de la IA en el sistema “Detección de texturas”.

- **Detector de enfermedades:** Se toman imágenes de síntomas de enfermedades y se etiquetan según los síntomas específicos.

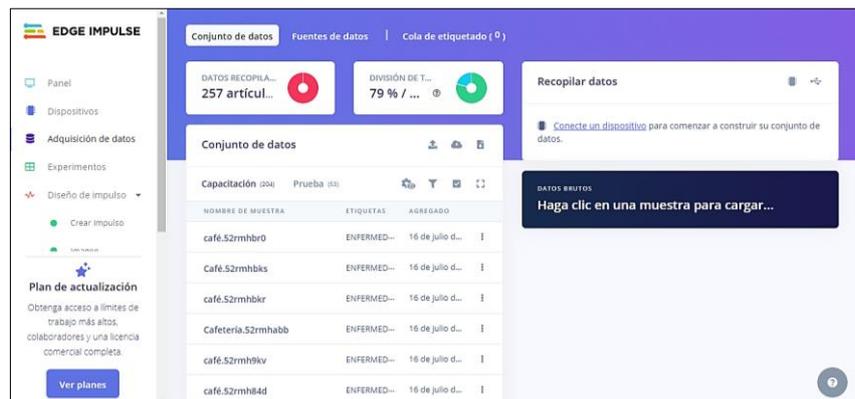


Ilustración 55.- Procedimiento para la recolección de datos “Detección de enfermedades”.



Ilustración 56.- Etiquetado manual de datos para el entrenamiento de la IA en el sistema “Detección de enfermedades”.

3.5.8.3. Creación del modelo IA

Con las imágenes etiquetadas, se procedió a la creación de un modelo de clasificación para la detección de colores. El modelo fue entrenado utilizando el software de Edge Impulse, ajustando los parámetros en la sección de "Diseño de Impulso". En esta etapa, se añadieron un bloque de procesamiento y un bloque de aprendizaje específicos para la inteligencia artificial. Se utilizó un bloque de "Imagen" para procesar las imágenes capturadas y un bloque de "Detección de Objetos" para la identificación precisa de los colores. Además, las imágenes fueron configuradas con un tamaño de 48x48 píxeles para optimizar el rendimiento del modelo. Este procedimiento se aplicó a los tres sistemas: detección de colores, textura y enfermedades.

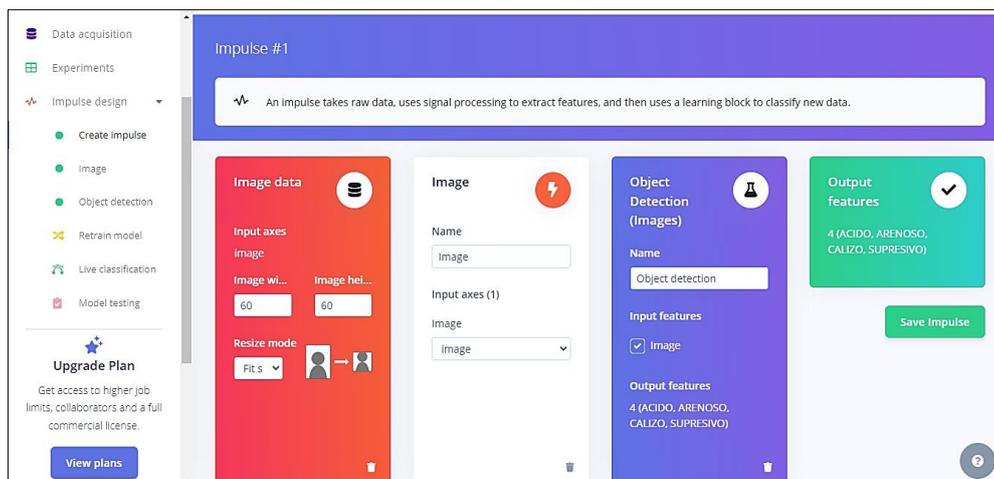


Ilustración 57.- Creación del modelo, configuración de parámetros en la sección de Impulse Design.

Una vez creado el diseño y configurados los parámetros, se procede a ajustar cada uno de los bloques seleccionados: el Bloque de Imagen y el Bloque de Detección de Objetos.

- **Detección de Colores:** En el Bloque de Imagen, se configura el parámetro en formato RGB para la detección de colores. Para el Bloque de Detección de Objetos, se ajustan los parámetros de la red neuronal, configurando el entrenamiento con 60 ciclos y una tasa de aprendizaje de 0.001, utilizando un procesador UPC. Se selecciona la arquitectura FOMO MobileNetV2 0.1, optimizada para el ESP32CAM. Este modelo alcanza una puntuación F1 del 100%, como se muestra en la siguiente ilustración.

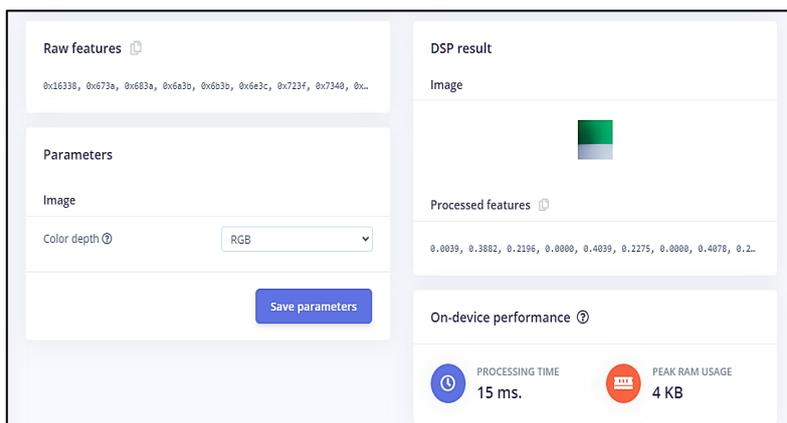


Ilustración 58.- Ajuste del parámetro en el Bloque de Imagen.

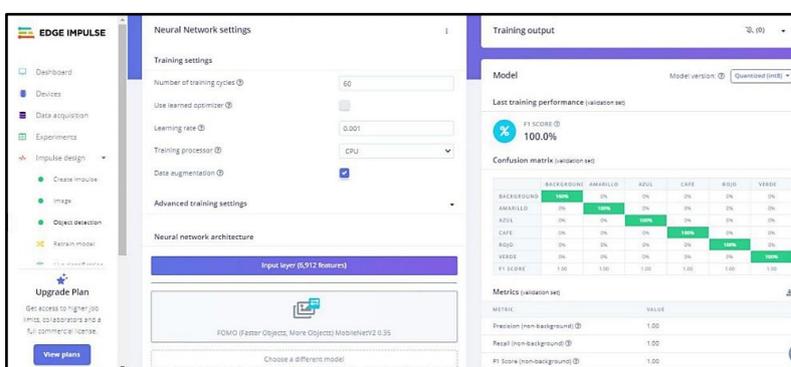


Ilustración 59.- Ajuste y configuración del Bloque de Detección de Objetos.

- Detección de Texturas:** En el Bloque de Imagen, se configura el parámetro en formato de escala de grises para la detección de texturas. Para el Bloque de Detección de Objetos, se ajustan los parámetros de la red neuronal, configurando el entrenamiento con 60 ciclos y una tasa de aprendizaje de 0.001, utilizando un procesador UPC. Se selecciona la arquitectura FOMO MobileNetV2 0.1, optimizada para el ESP32CAM. Este modelo alcanza una puntuación F1 del 90,9%, como se muestra en la siguiente ilustración.

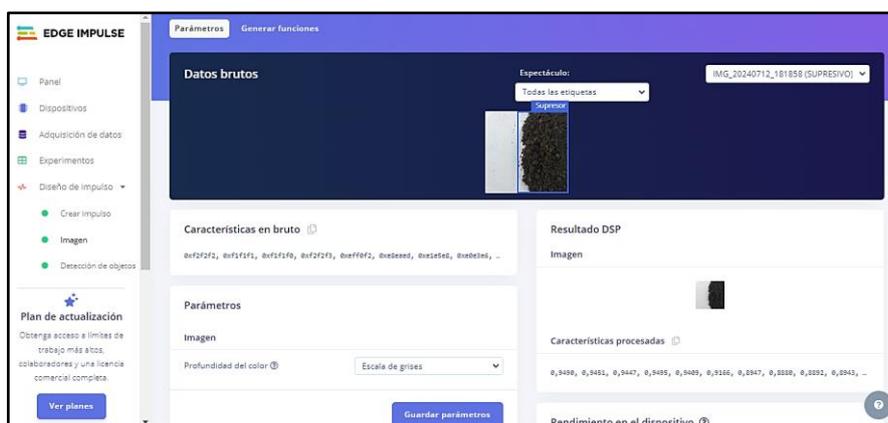


Ilustración 60.- Ajuste del parámetro en el Bloque de Imagen.

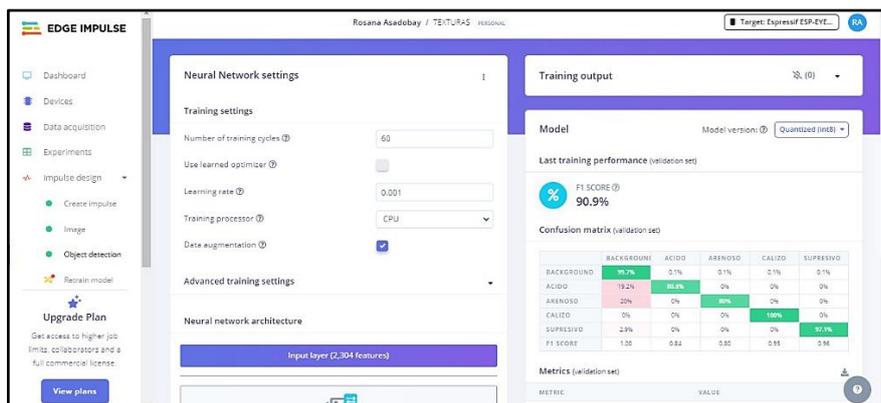


Ilustración 61.- Ajuste y configuración del bloque de Detección de Objetos.

- Detección de Enfermedades:** En el Bloque de Imagen, se configura el parámetro en formato RGB para la detección de enfermedades. Para el Bloque de Detección de Objetos, se ajustan los parámetros de la red neuronal, configurando el entrenamiento con 60 ciclos y una tasa de aprendizaje de 0.001, utilizando un procesador UPC. Se selecciona la arquitectura FOMO MobileNetV2 0.1, optimizada para el ESP32CAM. Este modelo alcanza una puntuación F1 del 100%, como se muestra en la siguiente ilustración

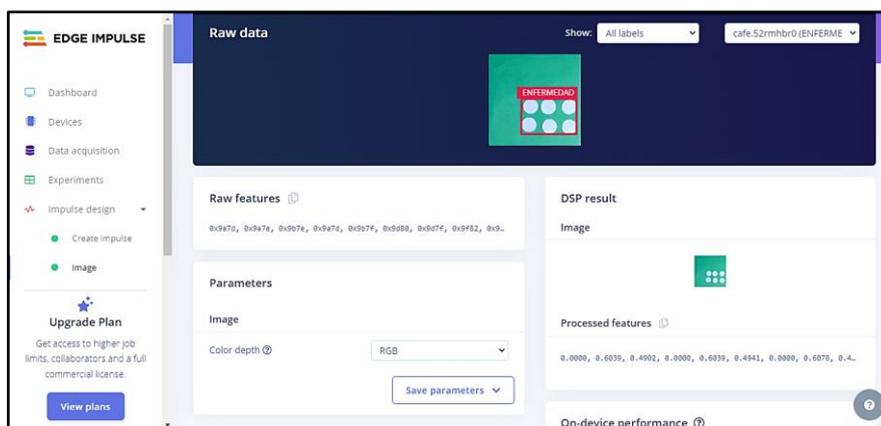


Ilustración 62.- Ajuste del parámetro en el Bloque de Imagen.

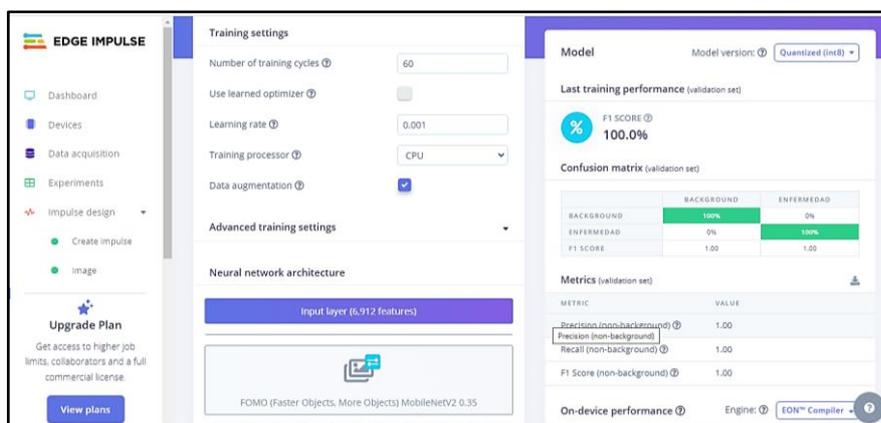


Ilustración 63.- Ajuste y configuración del Bloque de Detección de Objetos.

3.5.8.4. Validación y optimización del modelo

Los modelos se validaron con un conjunto de datos independiente para asegurar su capacidad de detectar correctamente los colores en las imágenes. Se optimizó para funcionar de manera eficiente en el ESP32CAM, lo que permitió su despliegue en el dron.

- **Detección de Colores:** Se obtiene un resultado de 84,75%.

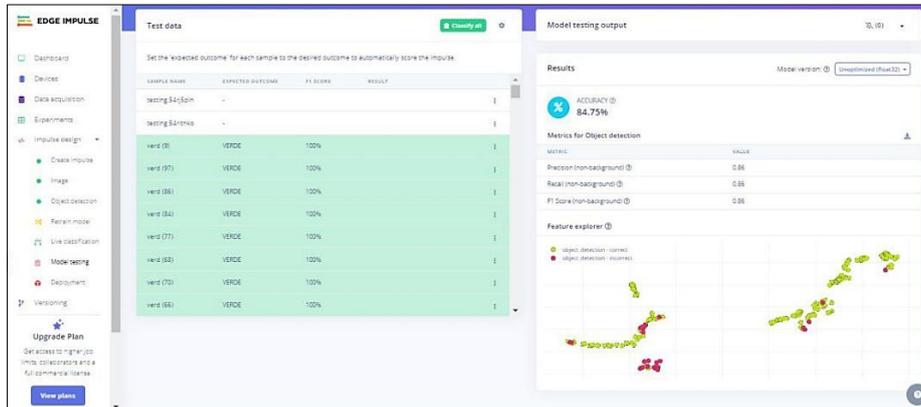


Ilustración 64.- Validación y resultados del modelo "Detección de Colores".

- **Detección de Texturas:** Se logra una exactitud del 100%.

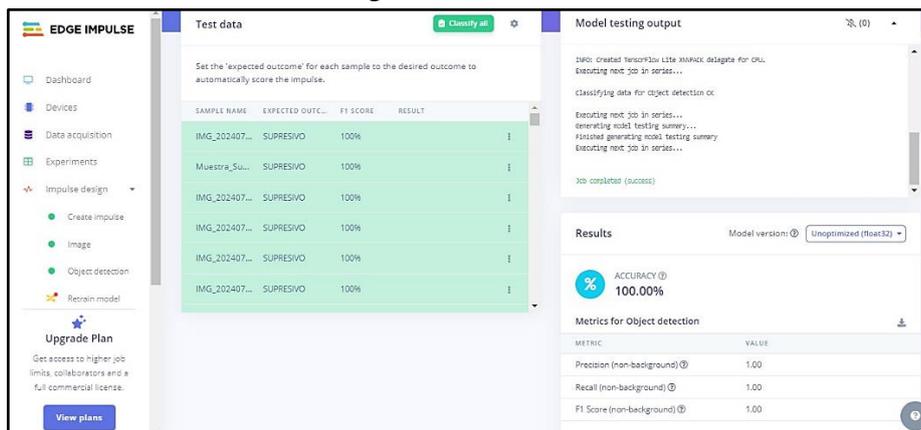


Ilustración 65.- Validación y resultados del modelo "Detección de texturas".

- **Detector de Enfermedades:** Se alcanza una exactitud del 100%.

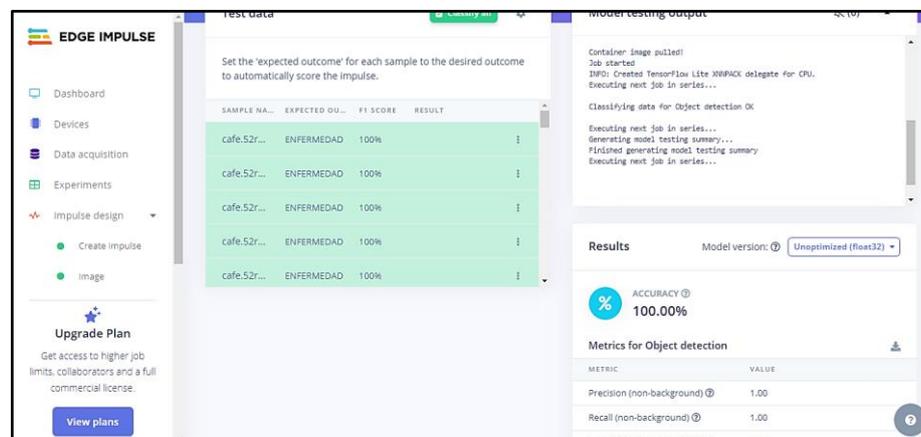


Ilustración 66.- Validación y resultados del modelo "Detección de enfermedades".

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la tesis, enfocándose en la eficiencia del prototipo “sistema de fumigación automático mediante un dron basado en detección de color y textura”. Los resultados se han obtenido bajo condiciones controladas y utilizando diferentes parámetros de funcionamiento del dron para evaluar su desempeño y precisión en la aplicación de productos fitosanitarios.

4.1. Adquisición de datos

Para evaluar la efectividad del sistema automático, se realizaron pruebas en un entorno controlado a escala 1:5. Estas pruebas incluyeron la adquisición de imágenes, realizando 10 pruebas de vuelo a diferentes alturas: 1, 2, 4 y 6 metros, obteniendo un total de 40 resultados. Se seleccionaron estas alturas con el fin de obtener perspectivas variadas de la adquisición de imágenes, para determinar la altura óptima en la que los sistemas de inteligencia artificial implementados para la detección de colores, texturas y enfermedades puedan operar de manera efectiva.

Tabla 8.- Datos de referencia del entorno controlado.

Área y perímetro de evaluación	
Área	300,16 m ²
Perímetro	69,87 m

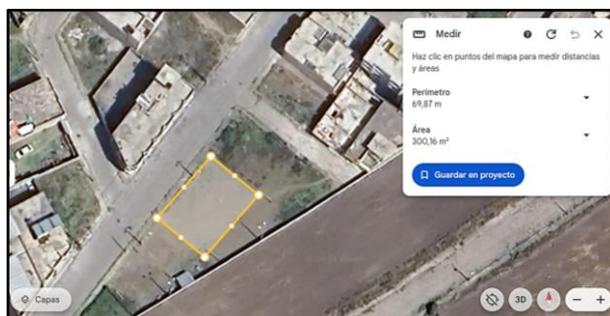


Ilustración 67.- Datos de referencia del entorno controlado.

El área de estudio total fue de 300,16 m², con un perímetro de 69,87 m. A partir de esta área, se realizaron pruebas a las diferentes alturas mencionadas, registrando si el sistema de la ESP32CAM utilizada en el proyecto, lograba o no la detección adecuada debido a limitaciones técnicas (Anexo 1).

Tabla 9.- Porcentaje de detección de altura óptima de trabajo.

Altura (m)	Pruebas de vuelo										Porcentaje
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	90%
2	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	100%
4	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	No	Si	70%
6	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	Si	No	50%

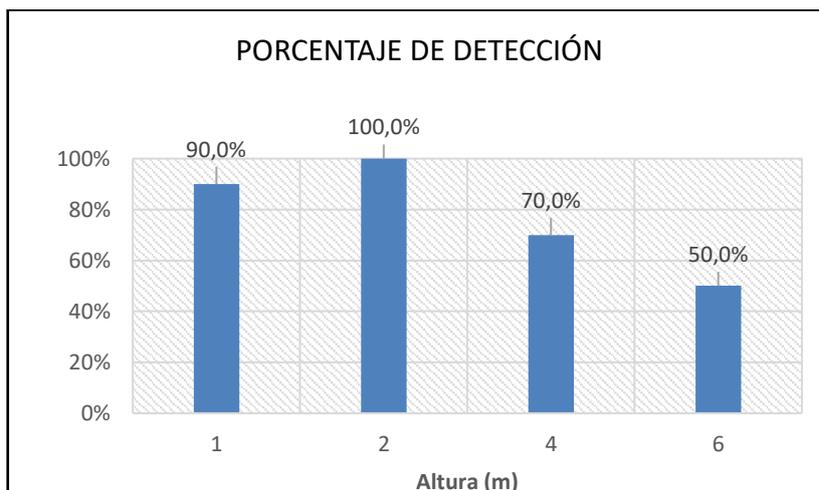


Ilustración 68.- Porcentaje de detección de altura óptima de trabajo.

A partir de la información recolectada, se obtuvieron los siguientes resultados:

- A 1 metro de altura, el sistema logró una detección del 90%. Aunque la mayoría de las veces detecta correctamente, hubo ocasiones en las que no logró captar la imagen debido a problemas de enfoque o resolución.
- A 2 metros de altura, se alcanzó una detección del 100%, lo que indica que esta es la altura óptima para la operación, logrando un balance adecuado entre el campo de visión de la cámara y la resolución de imagen necesaria.
- A 4 metros de altura, la tasa de detección disminuyó al 70%, lo que sugiere que a esta altura la ESP32CAM comienza a tener problemas significativos para captar detalles esenciales para la detección.
- A 6 metros de altura, la detección cayó al 50%, evidenciando que esta altura no es ideal para la operación del sistema, ya que la mayoría de los intentos de detección fallaron.

Se determinó que la altura óptima para el vuelo del dron es de 2 metros, ya que en esta altura se logró una detección del 100%, optimizando tanto el área como el perímetro capturado.



Ilustración 69.- a) Prueba de vuelo, altura de 1m. b) Prueba de vuelo, altura 2m.



a)

b)

Ilustración 70.- a) Prueba de vuelo, altura 4m. b) Pruebas de vuelo altura 6m.

4.2. Sistema de fumigación con IA para la detección de colores

4.2.1. Detección del sistema

Con la altura óptima determinada, se realizaron pruebas del sistema de fumigación automatizado utilizando inteligencia artificial (IA) para la identificación de colores específicos. Se evaluaron cinco colores: amarillo, azul, rojo, verde y café, seleccionados por sus características de contraste y visibilidad, De acuerdo con la ilustración 71.



Ilustración 71.- Entorno controlado a escala 1:5, maqueta diseñada para la detección por colores.



Ilustración 72.- Ejecución del sistema de detección por colores.

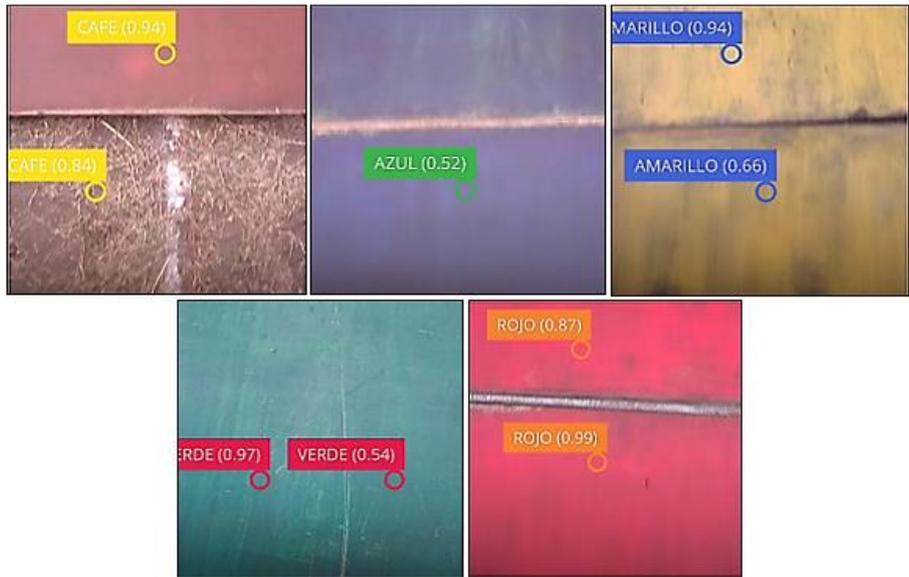


Ilustración 73.- Imágenes capturadas por el dron durante la ejecución de la misión de vuelo. Estas imágenes presentan los resultados obtenidos mediante el sistema de detección de colores, evidenciando la capacidad del sistema para diferenciar con precisión diversas tonalidades en el entorno observado y reflejando así su efectividad.

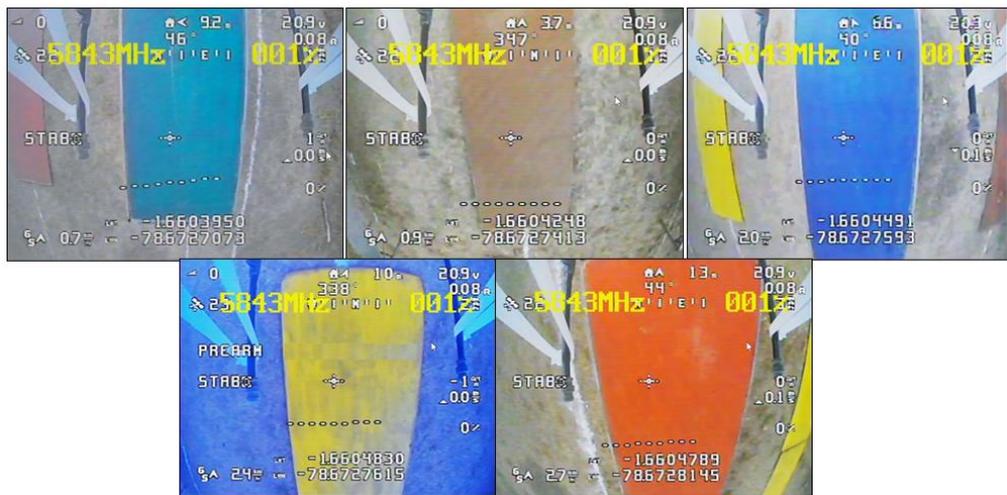
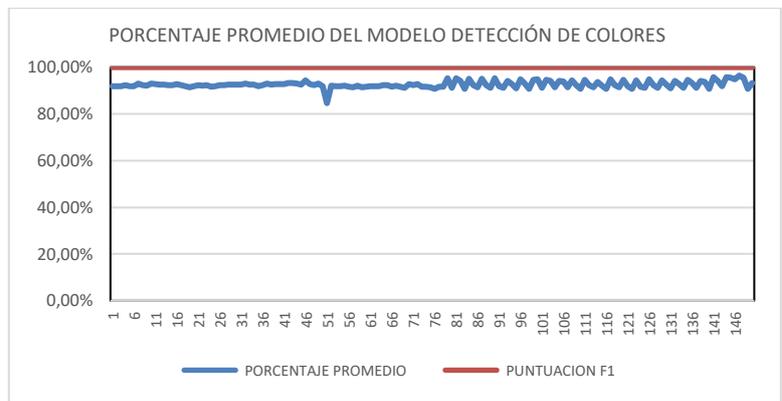


Ilustración 74.- Vista aérea desde la cámara del dron de la ejecución del sistema de detección por colores.

El modelo de IA alcanzó una puntuación F1 del 100%. Se llevaron a cabo 150 pruebas de funcionamiento del sistema con el dron en vuelo. Los resultados se presentan y contrastan a continuación.



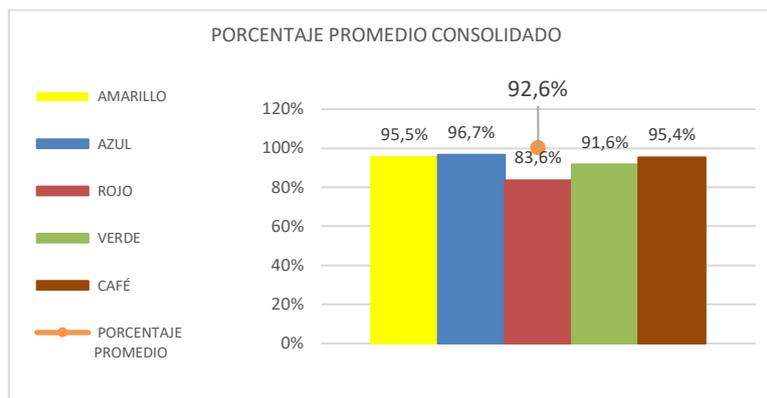


Ilustración 75.- Evaluación del sistema de detección de colores.

En base a las gráficas presentadas, se puede concluir que, de las 150 pruebas ejecutadas del sistema de detección de colores con el dron en vuelo, cuyos datos se encuentran en el Anexo 1, el porcentaje de detección en todas las pruebas osciló entre un mínimo de 84.60% y un máximo de 96.4%. El promedio total de detección para el sistema fue de 92.6% considerando todos los datos recolectados.

Además, se calcularon los porcentajes de efectividad para cada uno de los colores evaluados: el color amarillo alcanzó una eficiencia de detección del 95.5%, el azul un 96.7%, el rojo un 83.6%, el verde un 91.6% y el café un 95.4%. Con base en estos resultados, se puede determinar que el sistema es altamente efectivo en la identificación basada en color, con un rango de precisión entre el 84.6% y el 96.4%.

Al comparar el modelo teórico con el modelo práctico, se observa que, aunque el modelo teórico indicaba un 100% de eficiencia de detección según el indicador F1, en campo se obtuvo una eficiencia promedio del 92.6%, lo que sigue siendo un resultado muy positivo y se determina que el sistema es altamente efectivo en la identificación basada en color.

Tabla 10.- Evaluación del sistema de detección de colores.

Nro. Pruebas	Promedio de detección Amarillo	Promedio de detección Azul	Promedio de detección Rojo	Promedio de detección Verde	Promedio de detección Café	Promedio del sistema
150	95.5%	96,7%	83,6%	91,6%	95,4%	92,6%

4.2.2. Eficiencia del uso de líquidos o productos fitosanitarios

Para evaluar la eficiencia del sistema automatizado en comparación con métodos tradicionales, se realizaron pruebas de fumigación manual utilizando bombas de mochila. Se emplearon 4 litros de líquido fitosanitario para cubrir el área de estudio de 300,16 m². Las pruebas permitieron comparar la cantidad de líquido utilizado y la efectividad en la cobertura con la fumigación automatizada realizada por el dron.

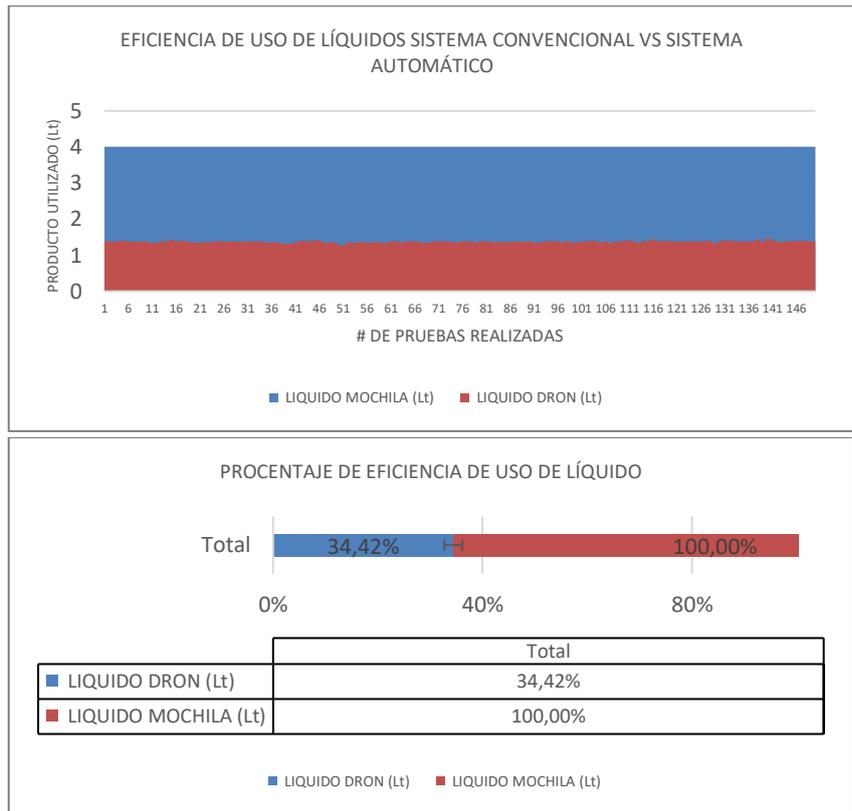


Ilustración 76.- Evaluación de la eficiencia del sistema automático para el uso de líquidos.

El análisis del gráfico inferior, que muestra el porcentaje de eficiencia en el uso de líquido entre un dron y un sistema convencional de mochila, resalta la notable eficiencia del dron en la aplicación de líquidos. Específicamente, se observa que el dron utiliza solo el 34,42% del líquido necesario en comparación con el 100% que utiliza el sistema convencional de mochila. Esto implica que, de los 4 litros utilizados por el sistema de mochila en cada prueba, el dron empleó un promedio de 1,38 litros para realizar la misma tarea.

Durante las pruebas realizadas, se determinó que el uso de un sistema automático con dron para la fumigación es significativamente más eficiente en comparación con el método tradicional de mochila. El dron utilizó solamente el 34.42% del líquido necesario, lo que representa un ahorro del 65.58% en comparación con el sistema convencional. Esto equivale a un ahorro aproximado de 2.62 litros por prueba de vuelo. Este resultado destaca no solo la precisión en la aplicación del líquido por parte del sistema automático, sino también una notable reducción en el uso de recursos. Utilizando casi un tercio del líquido que se requeriría con el método de mochila, el dron demuestra beneficios tanto ambientales como económicos, reafirmando la efectividad de la tecnología automatizada en procesos de fumigación.

4.2.3. Eficiencia del tiempo de ejecución

Para evaluar la eficiencia en el tiempo de ejecución del sistema automático en comparación con los métodos tradicionales, se realizaron cronometrajes tanto de la ejecución manual como del sistema autónomo, cubriendo un área de estudio de 300,16 m². Las pruebas

permitieron comparar el tiempo empleado y la efectividad del sistema automático realizada por el dron. Para el análisis de los tiempos, se utilizaron las siguientes fórmulas estadísticas:

$$\text{Promedio de tiempos} = \frac{\sum \text{Tiempo de todas las pruebas}}{\text{Nro de todas las pruebas}}$$

$$\text{Porcentaje de mejora} = \frac{\text{Tiempo manual} - \text{Tiempo automatico}}{\text{Tiempo manual}} \times 100\%$$

Ecuación 1.- Formulas para análisis estadístico de tiempos de ejecución.

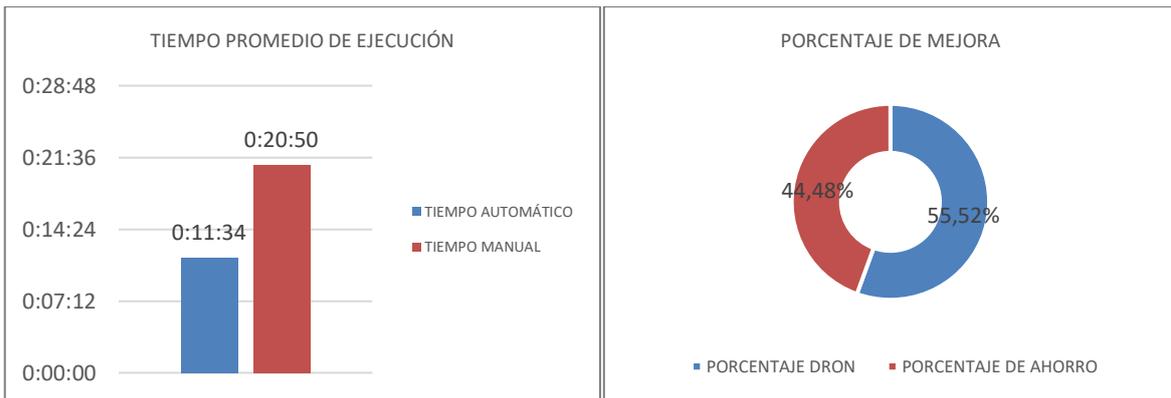


Ilustración 77.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución del sistema automático.

De los datos obtenidos, se determinó que el tiempo promedio de ejecución con el sistema automático fue de 11 minutos y 34 segundos, mientras que el método manual requirió 20 minutos y 50 segundos. Esto indicó que el dron redujo el tiempo de fumigación en 9 minutos y 16 segundos con respecto al método convencional. La diferencia de tiempos representó una disminución del 44,48% en el tiempo necesario para completar la tarea con el dron. Asimismo, el análisis de los porcentajes de mejora mostró que el sistema automático logró un 55,52% de eficiencia en términos de tiempo ahorrado. Estos datos reflejaron que la implementación del sistema automático permitió optimizar el tiempo de ejecución en comparación con el método manual.

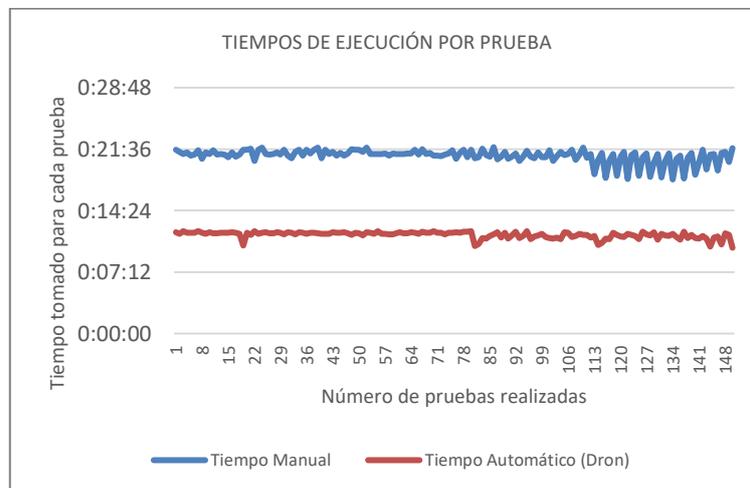


Ilustración 78.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución.

El análisis de los tiempos por prueba indicó la eficiencia del sistema automático. A lo largo de las pruebas, se pudo observar que los tiempos de ejecución del dron se mantuvieron de manera estable y consistente por debajo de los 12 minutos, con un tiempo mínimo registrado de 8 minutos y 25 segundos y un tiempo máximo de 11 minutos y 42 segundos, lo que indicó que el sistema automático es estable. En contraste, el método manual mostró una menor variabilidad, pero se mantuvo constantemente por encima de los 20 minutos en todas las pruebas. Esta diferencia demostró que, independientemente de las condiciones, el sistema automático ofreció un rendimiento más uniforme y eficiente.

4.3. Sistema de fumigación con IA para la identificación de texturas

4.3.1. Detección del sistema

Se realizaron pruebas del sistema de fumigación automático, empleando Inteligencia Artificial (IA) para la identificación de texturas del suelo. Se evaluaron cinco escenarios correspondientes a diferentes tipos de suelo: arenoso, arcilloso, mixto, calizo y supresivo. Cada muestra fue seleccionada de acuerdo con sus características particulares, con el objetivo de identificar correctamente el tipo de suelo mediante el sistema de IA.

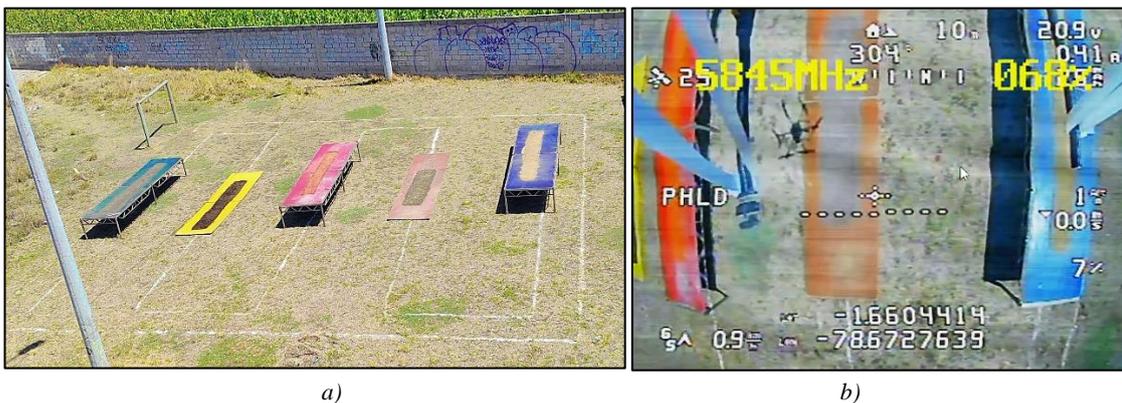


Ilustración 79.- a)Entorno controlado a escala 1:5, maqueta diseñada para la detección de texturas. b) Vista aérea del sistema.



Ilustración 80.- Ejecución del sistema de detección por texturas.

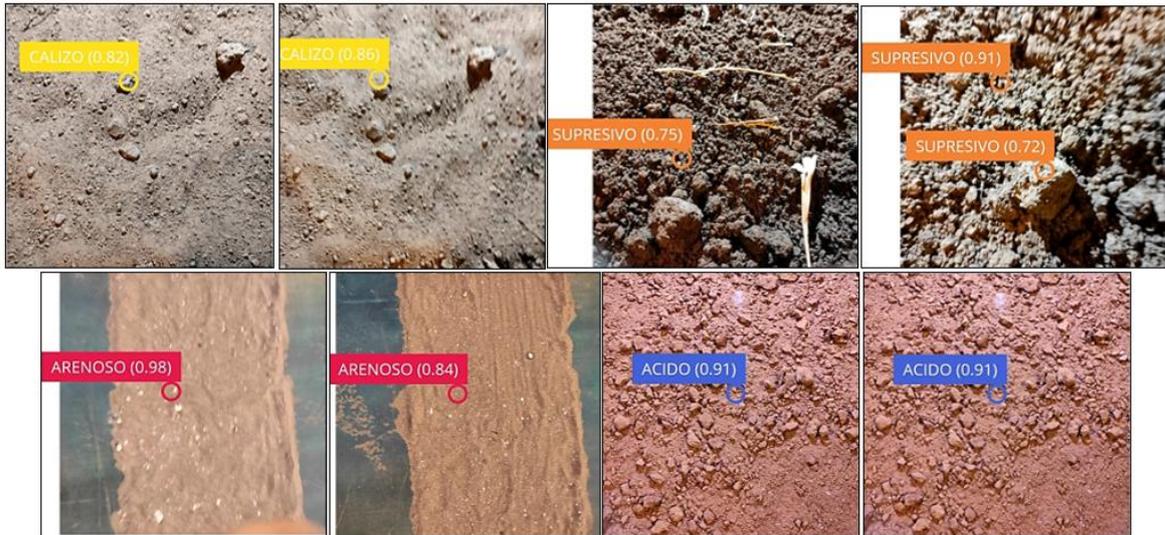


Ilustración 81.- Resultados obtenidos del sistema de detección de texturas.



Ilustración 82.- Vista Aérea de la ejecución del sistema de detección de texturas.

El modelo de IA implementado alcanzó una puntuación F1 del 90,90%, lo que permitió la realización de 150 pruebas de funcionamiento del sistema, en las que el dron operó en vuelo sobre el área controlada. Según las gráficas presentadas y con base en los datos consignados en el Anexo 2, se observó que el porcentaje promedio de detección del sistema en la identificación de texturas osciló entre un mínimo de 81,60% y un máximo de 87% a lo largo de las 150 pruebas.

El promedio general de detección del sistema fue de 85,86%, lo que refleja un desempeño satisfactorio en términos de precisión en la detección de texturas. Estos resultados indican que el sistema de fumigación automático con IA, si bien presenta un margen de mejora en la identificación de algunos tipos de suelo, ha mostrado un rendimiento eficiente en la mayoría de los escenarios evaluados, proporcionando un nivel considerable de confiabilidad durante las pruebas realizadas. Los datos obtenidos se detallan en las tablas y gráficas adjuntas.

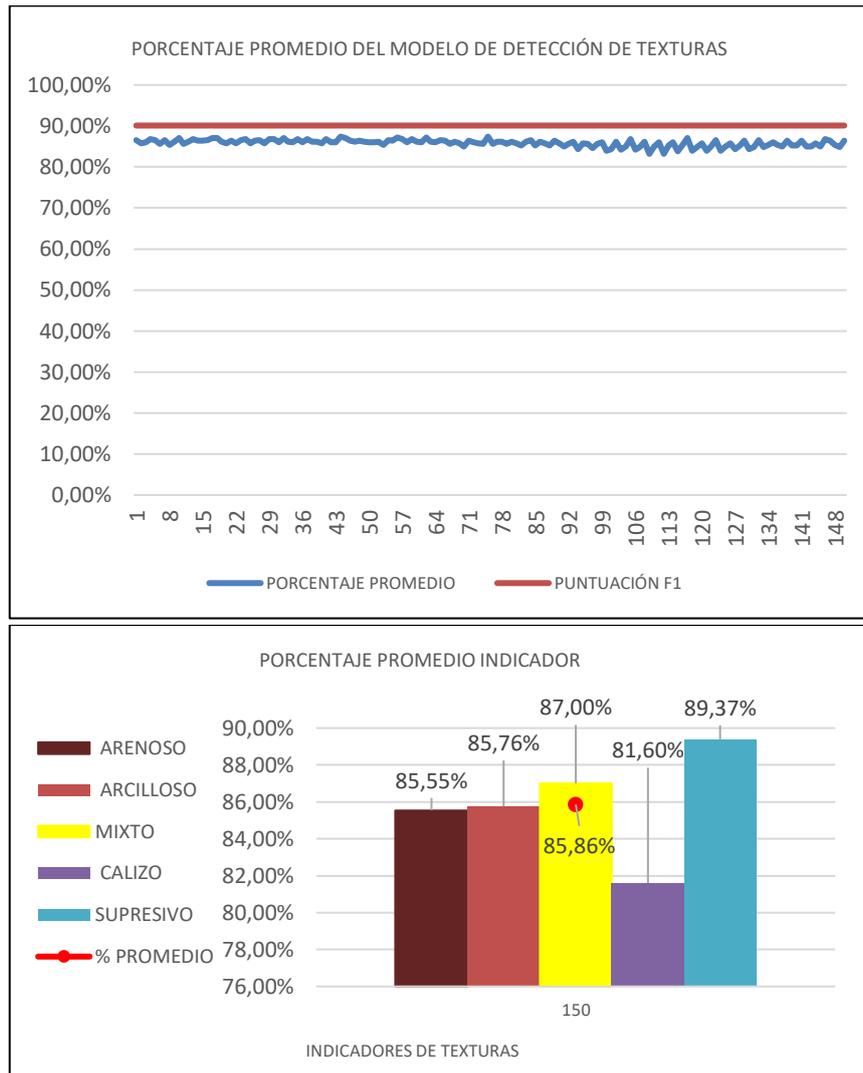


Ilustración 83.- Evaluación del sistema de detección de texturas.

Por otro lado, se calcularon los porcentajes de efectividad para cada una de las texturas evaluadas: el suelo arenoso alcanzó una eficiencia de detección del 85.55%, el arcilloso un 85.76%, el suelo mixto un 87.00%, calizo un 81.60% y el suelo supresivo un 89.37%. Con base en estos resultados, se puede concluir que el sistema es efectivo en la identificación de texturas, con un rango de precisión que oscila entre el 81.6% y el 89.37%.

Al comparar el modelo teórico con el modelo práctico, se observa que, aunque el modelo teórico predice una eficiencia de detección del 90.90% según el indicador F1, en pruebas de campo se obtuvo un promedio de 85.86%. A pesar de la diferencia, este resultado sigue siendo muy positivo, confirmando que el sistema es altamente eficaz en la identificación de texturas.

Tabla 11.- Evaluación del sistema de detección de texturas.

Nro. Pruebas	Promedio de detección Arenoso	Promedio de detección Arcilloso	Promedio de detección Mixto	Promedio de detección Calizo	Promedio de detección Supresivo	Promedio del sistema
150	85.55%	85,76%	87%	81,6%	89,37%	85,86%

4.3.2. Eficiencia del uso de semillas

Con el objetivo de comparar la eficiencia del sistema automatizado respecto a los métodos tradicionales, se realizaron pruebas manuales. Para ello, se utilizaron semillas en los cinco tipos de suelo, con un área total de 300,16 m². Estas pruebas facilitaron la comparación entre la cantidad de producto empleada y la efectividad de la cobertura lograda mediante la automatización del dron.

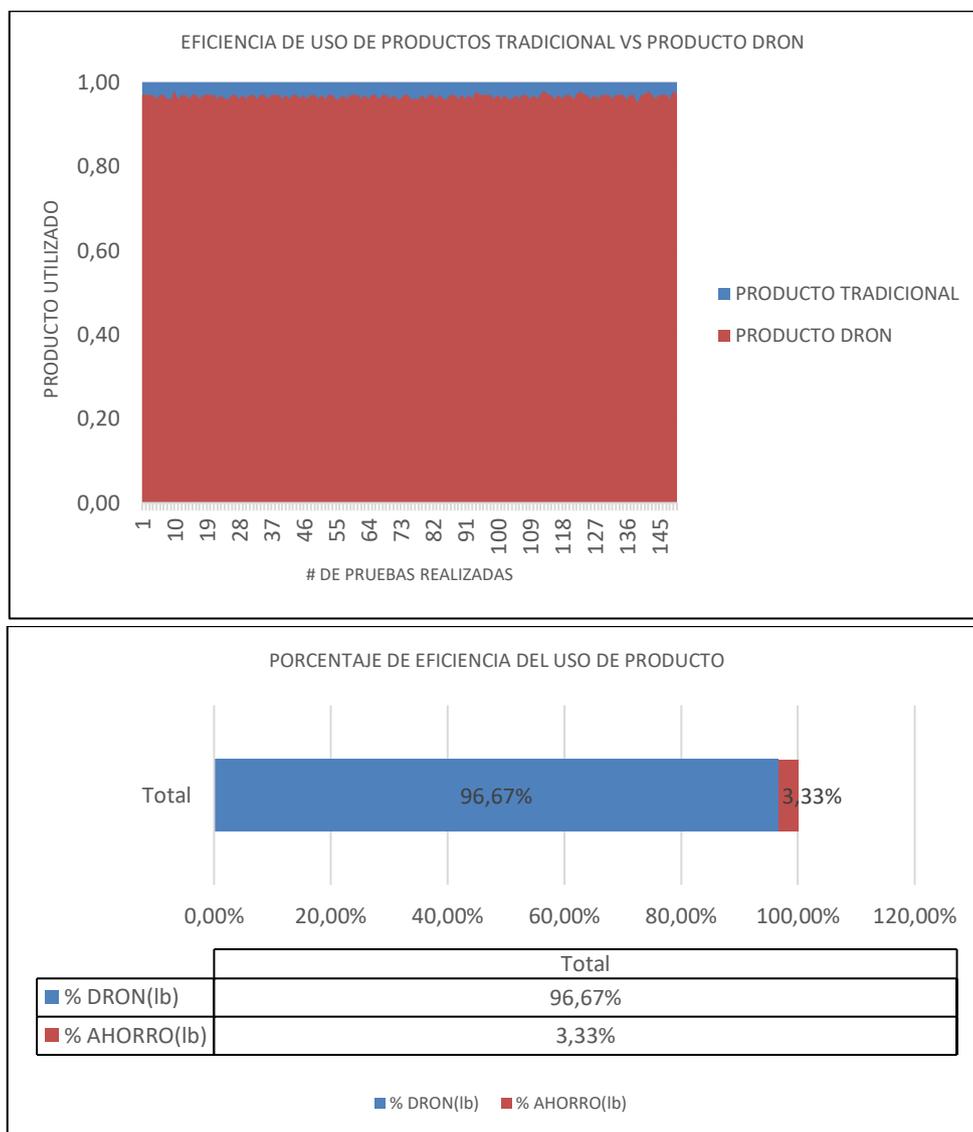


Ilustración 84.- Evaluación de la eficiencia del sistema automático para el uso de productos.

Las pruebas realizadas corroboraron que el sistema automatizado con dron es más eficiente que su contraparte manual. Mientras que el método manual utiliza el 100% del producto, equivalente a 1 libra de semillas por prueba, el dron emplea el 96.67%, logrando un ahorro del 3.33%. Esto se traduce en aproximadamente 0.033 libras menos por cada vuelo, lo que, en el total de pruebas realizadas, representó una reducción significativa en el consumo de insumos. Estos resultados no solo evidencian la precisión del sistema automatizado en la aplicación de insumos, sino que también destacan su capacidad para optimizar el uso de recursos.

4.3.3. Eficiencia del tiempo de ejecución

Con el fin de evaluar la eficiencia del sistema automatizado en comparación con los métodos tradicionales, se realizaron cronometrajes del proceso manual y del sistema autónomo, abarcando un área total de 300,16 m². Estas pruebas facilitaron la comparación del tiempo utilizado y la efectividad del sistema automatizado controlado por el dron. Para el análisis de los tiempos, se emplearon las siguientes fórmulas estadísticas:

$$\text{Promedio de tiempos} = \frac{\sum \text{Tiempo de todas las pruebas}}{\text{Nro de todas las pruebas}}$$

$$\text{Porcentaje de mejora} = \frac{\text{Tiempo manual} - \text{Tiempo automatico}}{\text{Tiempo manual}} \times 100\%$$

Ecuación 2.- Fórmulas para análisis estadístico de tiempos de ejecución.

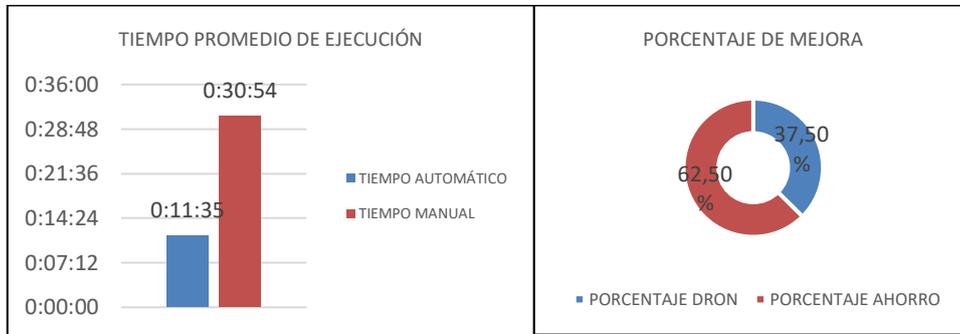


Ilustración 85.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución del sistema automático.

A partir de los datos recopilados, se estableció que el tiempo promedio de ejecución del sistema manual fue de 30 minutos y 54 segundos (100%), mientras que el sistema automático con dron presentó un tiempo de 11 minutos y 35 segundos, lo que representó un 37.50% del tiempo total comparado con el método manual. Esto significa que el dron logró reducir el tiempo de fumigación en 19 minutos y 19 segundos en relación con el método convencional. Esta diferencia refleja una disminución del 62.40% en el tiempo necesario para completar la tarea utilizando el sistema automático, lo que evidencia su mayor eficiencia operativa.

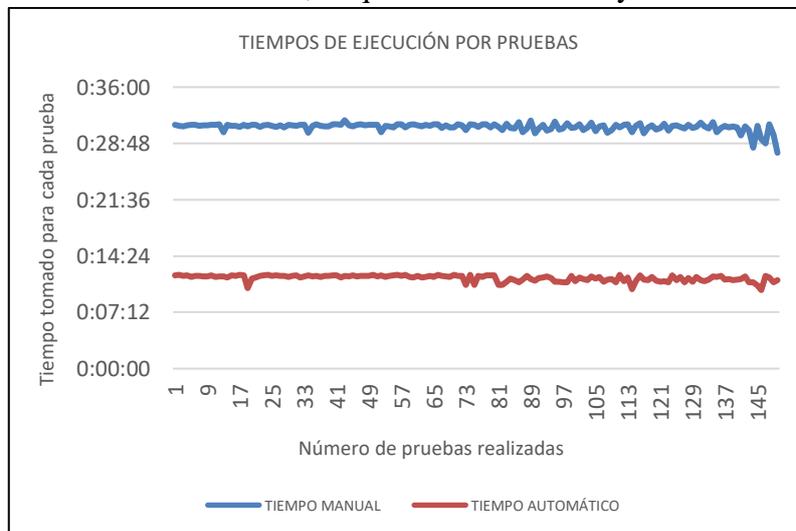


Ilustración 86.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución.

El análisis de los tiempos de las pruebas reveló la eficiencia del sistema automático. A lo largo de las mediciones, se observó que los tiempos de ejecución del dron se mantuvieron de forma estable y consistente por debajo de los 12 minutos, con un mínimo de 10 minutos y 03 segundos y un máximo de 11 minutos y 59 segundos, lo que demuestra la estabilidad del sistema. En contraste, el método manual presentó menor variabilidad, pero sus tiempos superaron consistentemente los 30 minutos en todas las pruebas.

Esta diferencia demostró que, bajo cualquier condición, el sistema automático ofreció un rendimiento más eficiente y uniforme.

4.4. Sistema de fumigación con IA para la identificación de enfermedades.

4.4.1. Detección del sistema

Se llevaron a cabo las pruebas del sistema de fumigación automatizado, el cual utiliza Inteligencia Artificial (IA) para detectar zonas afectadas por enfermedades en cada parcela dentro del ambiente controlado. Se logró segmentar las áreas en sectores, definiendo variables clasificadas como tipo 1, 2, 3, 4 y 5.



Ilustración 87.- Entorno controlado a escala 1:5, maqueta diseñada para la detección de Enfermedades en cada sector.



Ilustración 88.- Resultados obtenidos de las pruebas del sistema de detección de enfermedades, con un enfoque en las patologías identificadas.

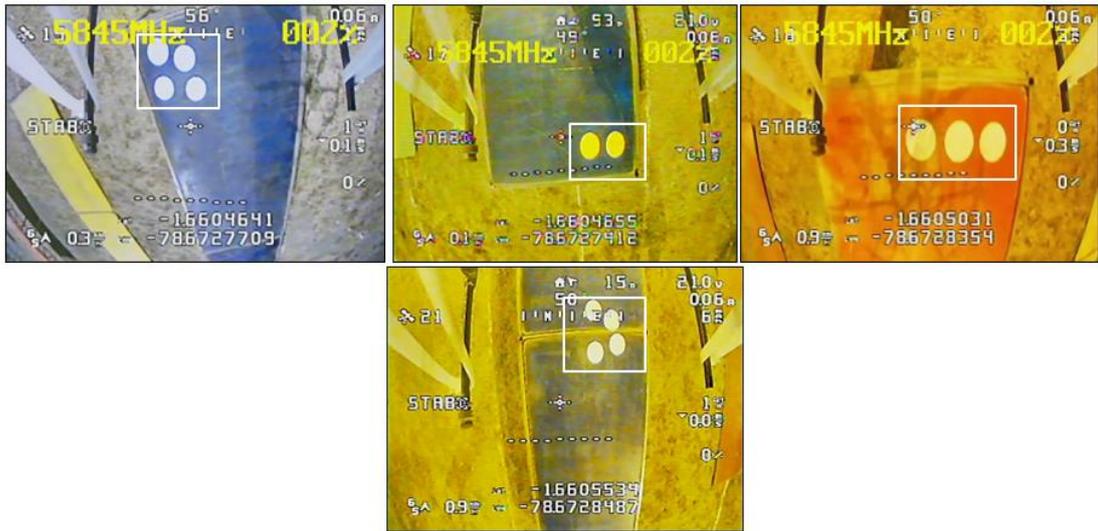


Ilustración 89.- Vista Aérea de la ejecución del sistema detección de Enfermedades por sector.

El modelo procesó 150 pruebas para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema durante el vuelo del dron. Los resultados obtenidos se muestran en la ilustración siguiente.

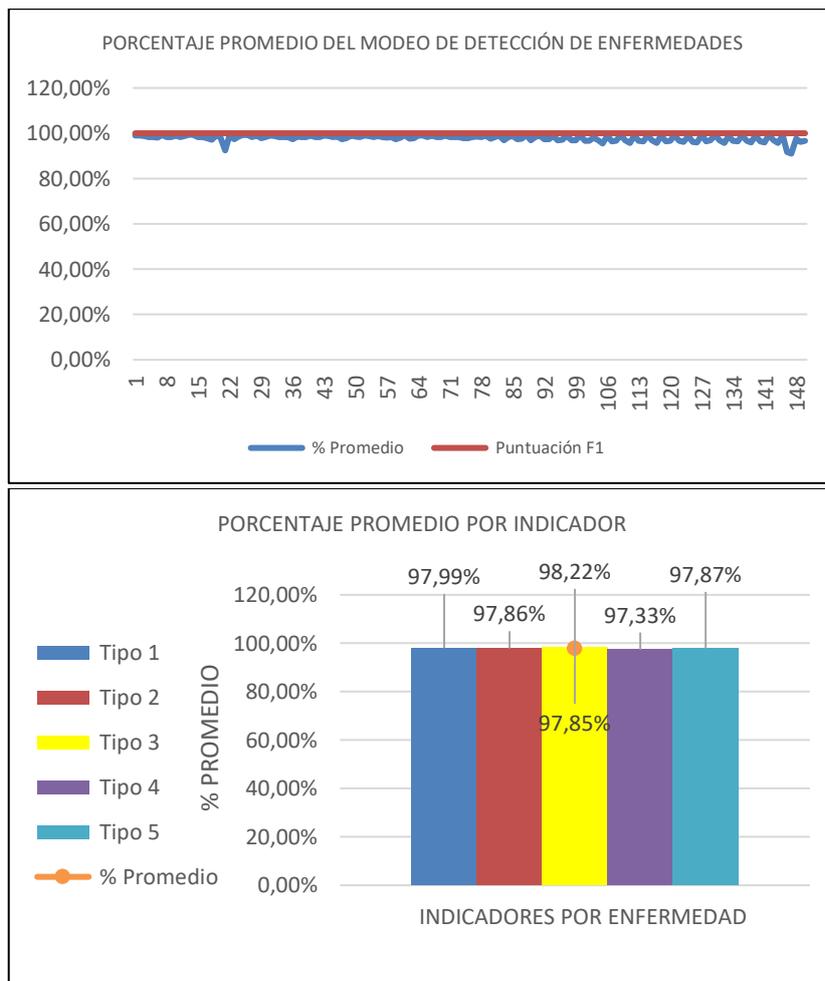


Ilustración 90.- Evaluación de sistema de detección por enfermedad.

A partir de las ilustraciones presentadas, se puede determinar que, de las 150 pruebas del sistema de detección de enfermedades con el dron en vuelo, cuyos resultados se detallan en el Anexo 3, el porcentaje de detección varió entre un mínimo del 91% y un máximo del 99,40%. El promedio general de detección del sistema, considerando todos los datos recopilados, fue del 97,85%.

Además, se calcula los porcentajes de efectividad para cada una de las variables evaluadas: el tipo 1 alcanzo una eficiencia de detección del 97,99%, el tipo 2 un 97,86%, el tipo 3 un 98,22%, el tipo 4 de un 97,33% y el tipo 5 con un 97,87%. En base a estos resultados se puede determinar que el sistema es altamente efectivo en la identificación basada en el sector afectado por la enfermedad. Con un rango de precisión entre 91% y el 99,40%.

Al comparar el modelo teórico con el modelo práctico, se observa que, aunque el modelo teórico proyectaba una eficiencia del 100% según el indicador F1, en las pruebas de campo se obtuvo una eficiencia promedio del 97,85%. Este resultado es altamente positivo, confirmando que el sistema es eficaz en la identificación de las zonas afectadas por enfermedades.

Tabla 12.- Evaluación del sistema de detección de enfermedades.

Nro. Pruebas	Promedio de detección Tipo 1	Promedio de detección Tipo 2	Promedio de detección Tipo 3	Promedio de detección Tipo 4	Promedio de detección Tipo 5	Promedio del sistema
150	97,99%	97,86%	98,22%	97,33%	97,87%	97,85%

4.4.2. Eficiencia en el uso de líquidos o productos fitosanitarios.

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema automatizado frente a los métodos tradicionales, se llevaron a cabo pruebas de fumigación manual empleando mochilas de pulverización. En estas pruebas, se utilizaron 2 litros de producto fitosanitario para cubrir un área de estudio de 300,16 m². Esto permitió comparar tanto la cantidad de líquido utilizado como la efectividad en la cobertura frente a la fumigación automatizada realizada mediante el dron.

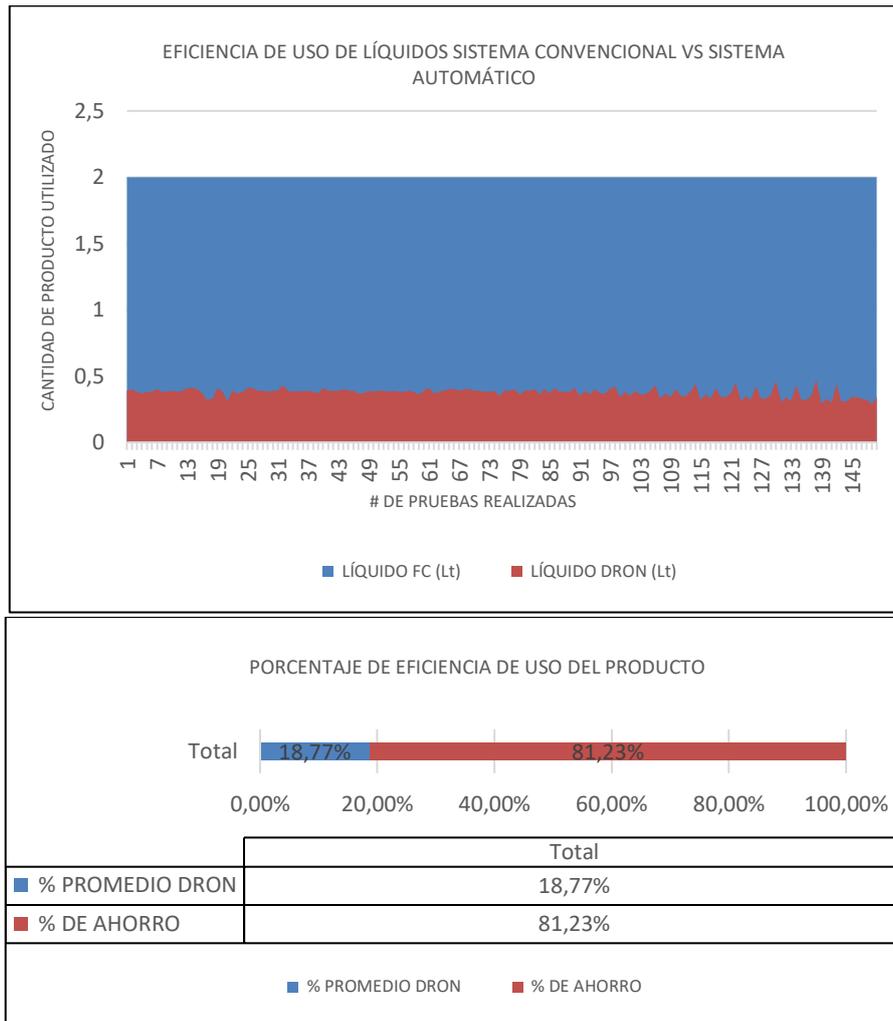


Ilustración 91.- Evaluación de la eficiencia del sistema automático para el uso de líquidos.

El análisis de la ilustración 67 muestra el porcentaje de eficiencia en el uso de líquido entre un dron y un sistema convencional de mochila, destacando la notable superioridad del dron en la aplicación. Específicamente, se observa que el dron utiliza solo el 18,77% del líquido necesario, en comparación con el 100% empleado por el sistema convencional de mochila. Esto significa que, de los 2 litros utilizados por el sistema de mochila en cada prueba, el dron empleó un promedio de 0,8 litros para realizar la misma tarea.

Las pruebas realizadas confirmaron que el uso de un sistema automatizado con dron para la fumigación es considerablemente más eficiente en comparación con el método tradicional de mochila. El dron empleó solo el 18,77% del líquido requerido, lo que equivale a un ahorro del 81,23% frente al sistema convencional. Este ahorro corresponde aproximadamente a 3,25 litros por prueba de vuelo. Los resultados destacan no solo la precisión del sistema automático en la aplicación del líquido, sino también una significativa reducción en el uso de recursos.

4.4.3. Eficiencia del tiempo de ejecución

Para evaluar la eficiencia en el tiempo de ejecución del sistema automático es comparación con los métodos tradicionales, se realizaron cronometrajes tanto de ejecución manual como

del sistema autónomo, cubriendo un área de estudio de 300,16 m². las pruebas permitieron comparar el tiempo empleado y la efectividad del sistema automático realizada por el dron. Para el análisis de los tiempos, se utilizó Ecuación 1 detallada anteriormente.

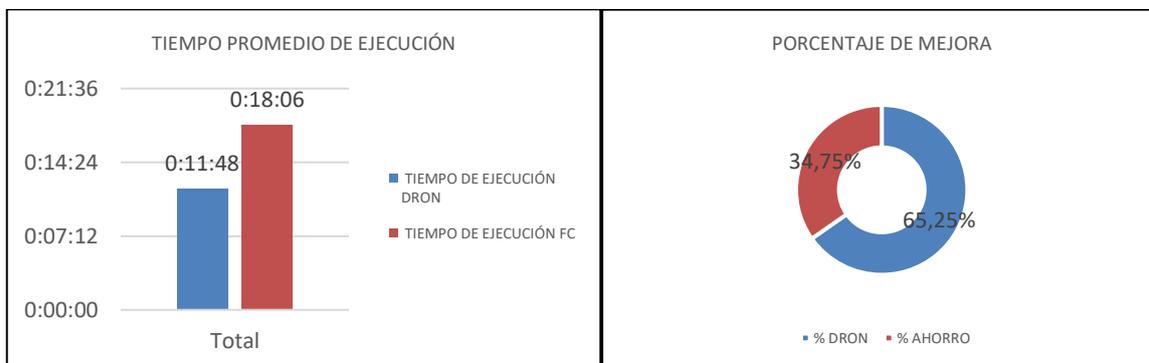


Ilustración 92.- Evaluación de la eficiencia en tiempo de ejecución del sistema automático.

Los datos obtenidos demostraron que el tiempo promedio de ejecución con el sistema automatizado fue de 11 minutos y 48 segundos, mientras que el método manual requirió 18 minutos y 6 segundos. Esto muestra que el dron redujo el tiempo de fumigación en 6 minutos y 58 segundos en comparación con el método convencional. Esta diferencia representó una disminución del 34,75% en el tiempo necesario para completar la tarea utilizando el dron. Asimismo, el análisis de los porcentajes de mejora indicó que el sistema automatizado alcanzó un 65,25% de eficiencia en términos de tiempo ahorrado. Estos resultados reflejan que la implementación del sistema automatizado optimizó significativamente el tiempo de ejecución en comparación con el método manual.

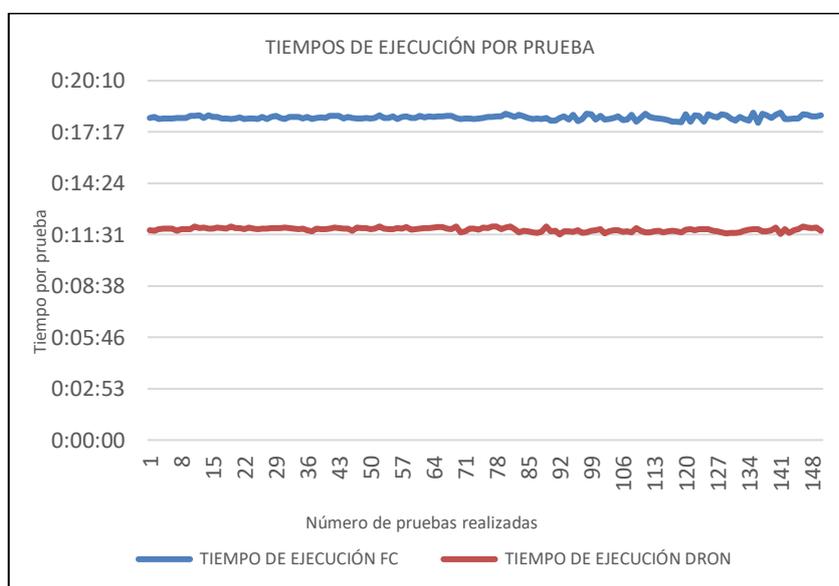


Ilustración 93.- Evaluación de la eficiencia en tiempos de ejecución.

El análisis de los tiempos por prueba reveló la eficiencia del sistema automatizado. A lo largo de las pruebas, se observó que los tiempos de ejecución del dron se mantuvieron estables y consistentes, siempre por debajo de los 12 minutos, con un tiempo mínimo de 11 minutos y 32 segundos y un máximo de 11 minutos y 59 segundos, lo que demuestra la estabilidad del sistema automatizado. En contraste, el método manual mostró una menor

variabilidad, pero en todas las pruebas se mantuvo constantemente por encima de los 19 minutos. Esta diferencia evidenció que, independientemente de las condiciones, el sistema automatizado ofreció un rendimiento más uniforme y eficiente.

4.5. Resumen de resultados

4.5.1. Eficiencia de detección

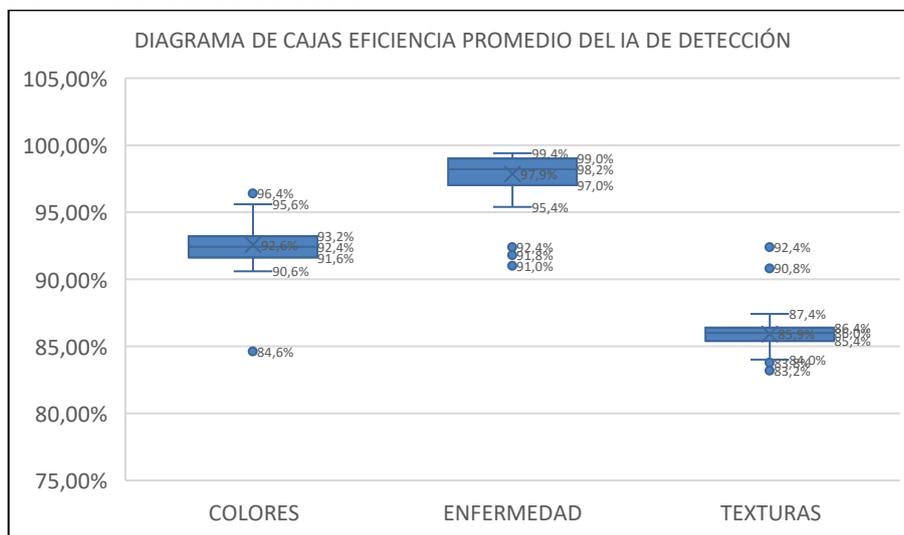


Ilustración 94.- Diagrama de cajas eficiencia promedio del IA de detección.

El análisis del gráfico de cajas muestra los resultados de la eficiencia promedio del sistema de detección basado en Inteligencia Artificial (IA) en tres categorías: colores, enfermedades y texturas. Los valores obtenidos en cada categoría reflejan el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, evaluando su capacidad para identificar correctamente los patrones establecidos.

En la detección de colores, el promedio de eficiencia se situó en un 92.6%, con una variación mínima entre los resultados. Los valores extremos oscilaron entre un mínimo de 84.6% y un máximo de 96.4%, alcanzando en algunos casos puntajes del 95.6%. Esta dispersión relativamente pequeña sugiere que el sistema mostró un rendimiento consistente en esta categoría, con una detección adecuada en la mayoría de las pruebas realizadas.

Para la detección de enfermedades, el sistema de IA mostró el mayor nivel de eficiencia con un promedio del 97.9%. Los valores registrados estuvieron en un rango entre el 95.4% y el 99.4%, destacando la alta precisión del sistema en este tipo de detección. La variación en los resultados fue mínima, lo que indica una estabilidad considerable en la identificación de enfermedades en los ensayos realizados. Sin embargo, se observó un valor aislado cercano al 91.0%, que podría ser una anomalía en las pruebas, pero no afectó significativamente el comportamiento global del sistema en esta categoría.

En cuanto a la detección de texturas, el sistema presentó una eficiencia promedio del 85.9%, siendo esta la categoría con mayor variabilidad. Los valores fluctuaron entre un mínimo de 83.2% y un máximo de 92.4%. Esta mayor dispersión sugiere que la IA tuvo un rendimiento menos consistente en la detección de texturas en comparación con los otros dos escenarios,

lo que podría deberse a la complejidad de los patrones de texturas o la necesidad de un mayor ajuste en los parámetros del modelo.

Los resultados reflejan que la IA fue más precisa en la detección de enfermedades, seguida por la detección de colores, mientras que la detección de texturas presentó mayores variaciones. Esto sugiere que el sistema es altamente efectivo en la identificación de enfermedades y colores, aunque se podrían realizar mejoras adicionales para optimizar la detección de texturas.

4.5.2. Eficiencia en el Uso de Productos en los Sistemas de Detección con Inteligencia Artificial

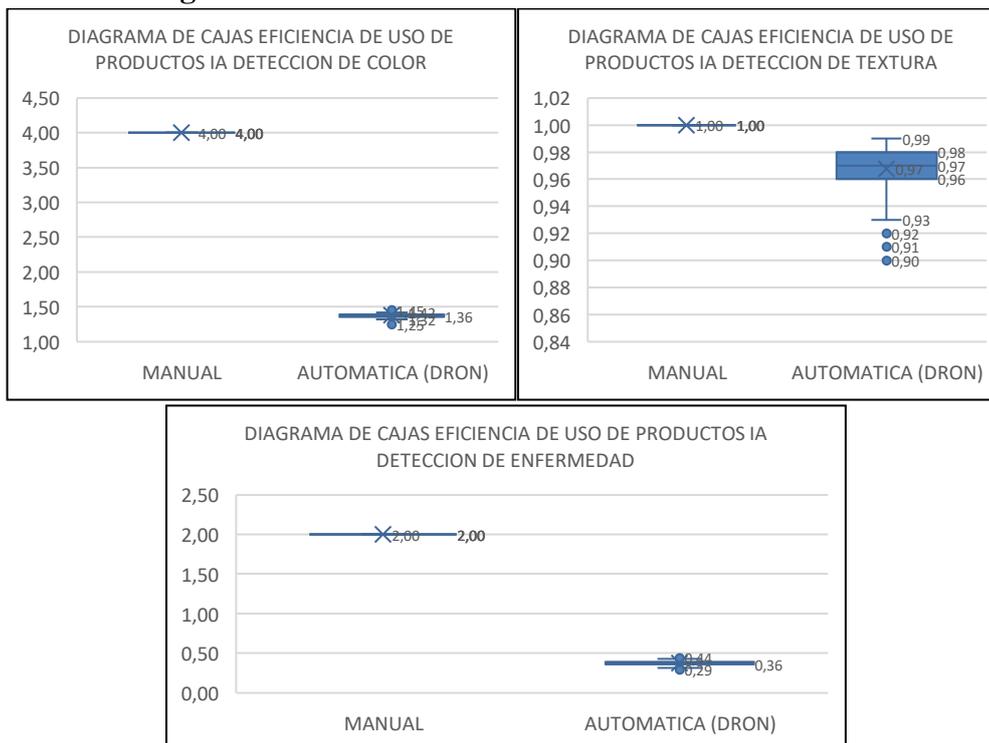


Ilustración 95.- Eficiencia en el Uso de Productos en los Sistemas de Detección (Manual VS Automático).

En este apartado se exponen los resultados relacionados con la eficiencia en el uso de productos en tres sistemas de detección con inteligencia artificial: detección de color, detección de textura y detección de enfermedades. Se realizó una comparación entre el método manual (convencional) y el método automático realizado a través del dron.

En la detección de color, el método automático (dron) demostró ser más eficiente en el uso de productos en comparación con el método manual. Mientras que el sistema manual mantuvo una eficiencia fija en 4.00 litros de producto, el sistema automático mostró valores inferiores, en el rango de 1.25 a 1.45 litros de producto. Esto indica que el método automático utiliza significativamente menos productos, lo que sugiere una mejor optimización y eficiencia en cuanto al uso de recursos. A pesar de una menor precisión comparativa, la ventaja clave del sistema automático es que reduce el consumo de productos.

En la detección de textura, el método automático (dron) también mostró una notable ventaja en la eficiencia del uso de productos. El método manual mantuvo una eficiencia cercana a

1.00 libras, mientras que el sistema automático operó en un rango entre 0.90 y 0.99 libras de producto, con un consumo de productos menor en los casos de mayor optimización. Esto destaca el potencial de los sistemas automáticos para minimizar el uso de insumos sin comprometer demasiado la precisión en la tarea, lo que resulta en un ahorro sustancial de recursos.

En la detección de enfermedades, el método manual registró una eficiencia fija en 2.00 litros, mientras que el método automático (dron) operó en un rango entre 0.29 y 0.43 litros, mostrando nuevamente un uso significativamente menor de productos. Aunque esto sugiere una menor precisión en la detección automática, la gran reducción en el consumo de productos lo convierte en una opción eficiente desde el punto de vista económico y sostenible, especialmente en situaciones que requieren monitoreos constantes y extensivos.

Los resultados demuestran que el método automático (dron) es notablemente más eficiente en términos de uso de productos en comparación con el método manual. Si bien el método manual presenta una precisión mayor en algunas áreas, el ahorro de productos en los sistemas automáticos es significativo, lo que los convierte en la opción preferible en términos de optimización de recursos, reducción de costos y sustentabilidad.

4.5.3. Eficiencia en los Tiempos de Ejecución de los Sistemas de Detección

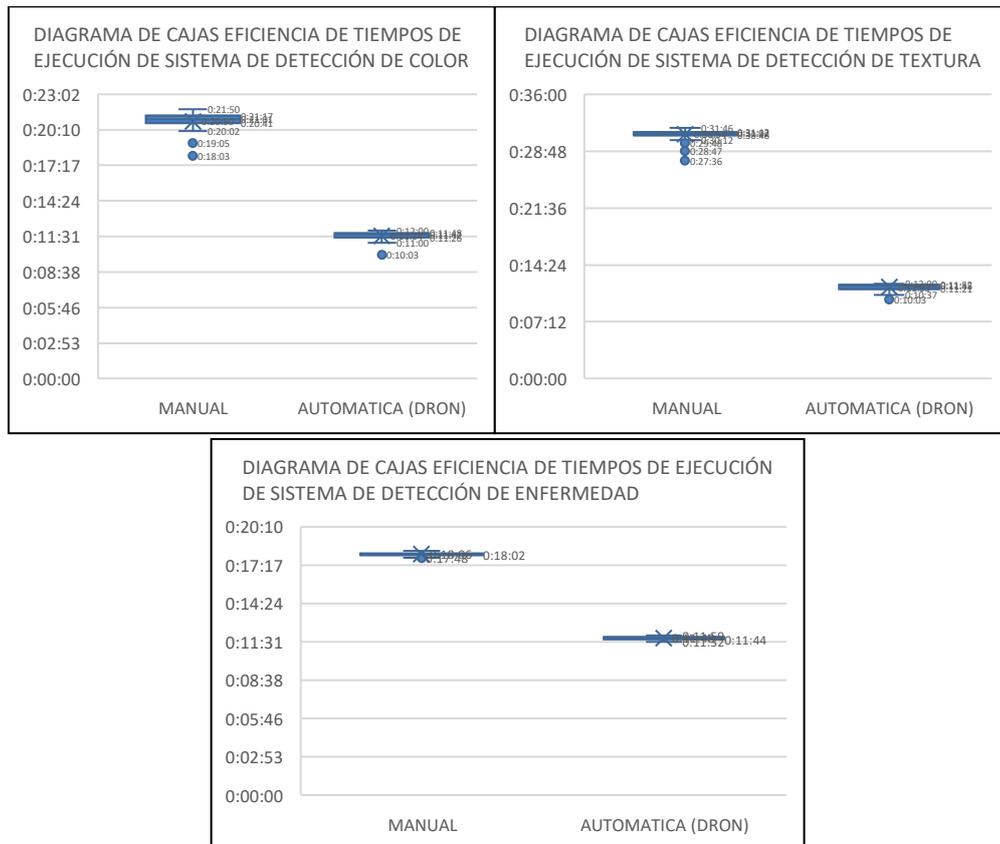


Ilustración 96.- Eficiencia en los Tiempos de Ejecución de los Sistemas de Detección (Manual VS Automático).

Además de la eficiencia en el uso de productos, se evaluaron los tiempos de ejecución de ambos métodos, mostrando una clara superioridad del método automático (dron) en la reducción de tiempos en los tres sistemas de detección.

En el sistema de colores, el método manual presentó un tiempo de ejecución promedio de 20 minutos y 50 segundos, con algunas variaciones entre 17 y 23 minutos. En comparación, el método automático (dron) completó la detección en un promedio de 11 minutos, reduciendo el tiempo de ejecución en un 44,48%. Esto implica que el sistema automático no solo reduce el uso de productos, sino que también optimiza el tiempo necesario para completar la tarea, lo que lo hace más eficiente en términos generales.

En el sistema de detección de texturas con el método manual presentó el tiempo de ejecución más prolongado, con un promedio de 30 minutos y 54 segundos, mientras que el método automático (dron) completó la tarea en solo 11 minutos y 35 segundos, lo que representa una reducción del 62,40% en el tiempo de ejecución. Esta diferencia drástica en los tiempos, combinada con el menor uso de productos, refuerza la superioridad del método automático, especialmente en tareas que requieren gran agilidad y cobertura de áreas extensas.

En la detección de enfermedades, el método manual tuvo un tiempo promedio de 18 minutos y 6 segundos, mientras que el método automático (dron) redujo este tiempo a 11 minutos y 48 segundos minutos, lo que implica una mejora del 62.25% en los tiempos de ejecución. Este resultado evidencia que, además de utilizar menos productos, el método automático es sustancialmente más rápido, mejorando la eficiencia operativa de manera integral.

El método automático (dron) logró tiempos de ejecución significativamente menores en comparación con el método manual. Además, presentó un menor consumo de productos, por lo que en este capítulo se señalan los resultados que destacan la eficiencia de los sistemas.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El desarrollo del prototipo de un sistema automático de fumigación, basado en la detección de texturas y colores mediante el uso de un dron, cumplió con los objetivos propuestos y fue validado a través de pruebas en un entorno controlado a escala 1:5. Estas pruebas demostraron que el sistema es funcional y eficiente dentro del contexto de la Agricultura 5.0. Se logró una aplicación precisa de productos fitosanitarios, reduciendo el consumo de insumos y el tiempo de operación en comparación con métodos manuales.
- En relación con el primer objetivo específico, la investigación sobre los métodos de fumigación con drones permitió identificar los recursos tecnológicos más adecuados para diseñar el prototipo. El uso de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y tecnologías de procesamiento de imágenes resultó ser la mejor solución para las necesidades del proyecto, confirmando el potencial de los drones en tareas de fumigación, con un enfoque preciso y eficiente que minimiza el impacto ambiental.
- El análisis de las características de textura y color de los cultivos, como parte del segundo objetivo específico, fue fundamental para el éxito del sistema. Los indicadores seleccionados para la identificación de áreas afectadas por enfermedades o plagas mostraron una alta precisión, alcanzando una eficiencia promedio del 97% en la detección de enfermedades. Estos resultados, obtenidos en un ambiente controlado, evidencian el valor de la IA en la agricultura de precisión, permitiendo intervenciones más focalizadas.
- Respecto al tercer objetivo específico, las técnicas de procesamiento de imágenes implementadas permitieron una detección precisa de las áreas problemáticas en los cultivos en este caso en la maqueta de escala 1:5. El sistema recopiló y procesó información de textura y color en tiempo real, logrando una reducción del uso innecesario de insumos o productos, lo que evidencia el impacto positivo de la tecnología automatizada en términos de sostenibilidad y seguridad.
- Finalmente, con relación al último objetivo específico, las pruebas de campo realizadas en un entorno controlado a escala 1:5 evidenciaron que el prototipo es viable y eficiente en condiciones reales. El sistema logró reducir los tiempos de fumigación en comparación con el método manual, y el ahorro en la cantidad de insumos utilizados, validando así la eficacia del sistema en su fase experimental y destacando su potencial para ser aplicado a mayor escala.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda continuar el perfeccionamiento del prototipo, con especial atención a los algoritmos de detección de texturas, que mostraron una mayor variabilidad en los resultados. Una optimización de esta funcionalidad podría incrementar aún más la precisión y eficiencia del sistema.
- Aunque las pruebas en un ambiente controlado a escala 1:5 fueron exitosas, sería beneficioso extender las pruebas a condiciones reales de campo y en diferentes tipos de cultivos. Esto permitiría evaluar la adaptabilidad del sistema en distintos entornos agrícolas y su rendimiento en situaciones más complejas.
- Se recomienda mejorar las cámaras del sistema para aumentar su resolución y capacidad de detección en pruebas a gran escala. La implementación de tecnologías de cámaras de alta resolución permitirá una identificación más precisa de áreas afectadas por enfermedades o plagas, incrementando la efectividad del sistema en aplicaciones reales y mejorando su rendimiento en escenarios agrícolas más amplios.
- Se sugiere mejorar el procesamiento de imágenes para reducir aún más el tiempo de respuesta y aumentar la capacidad del sistema para integrar nuevas variables de análisis, como las condiciones climáticas y otros factores de campo, lo que podría ampliar su aplicabilidad en un rango más amplio de situaciones agrícolas.
- Finalmente, se recomienda implementar proyectos piloto que incluyan el uso del prototipo por parte de pequeños y medianos productores agrícolas, proporcionando la capacitación necesaria para su uso. De esta forma, se podría promover la adopción de tecnologías automatizadas que impulsen una agricultura más eficiente, sostenible y tecnológicamente avanzada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Ciencias Aplicadas | Texto completo gratuito | Garantizar la sostenibilidad agrícola mediante la teledetección en la era de la agricultura 5.0». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/5911>
- [2] D. M. Melgar, «AGRICULTURA DIGITAL O AGRICULTURA 4.0», 2017.
- [3] «EL MELLOCO Características, técnicas de cultivo y potencial en Ecuador».
- [4] A. J. Morocho Quisay, «Sistema de fumigación para la aplicación de productos fitosanitarios sobre cultivos de tomate de carne utilizando conceptos de agricultura 4.0», bachelorThesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2023. Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10908>
- [5] R. T. Osorio, F. O. Flores, A. M. A. Lassman, y O. B. Senties, «Fumigación aérea con una nave ultraligera», 2008.
- [6] «Diseño de un sistema autónomo para fumigación aérea». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/handle/11059/5597>
- [7] E. C. Palomeque Siguenza, D. N. Villamar Cabello, y P. Soriano Idrovo, «Proyecto de gestión estratégica y financiera para implementación de fumigación con dron en una asociación arroceras del cantón Santa Lucía», Thesis, ESPOL. FCSH., 2020. Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53121>
- [8] C. Barrera Barrera y J. Vallejo Delgado, «Servicio de fumigación con drones para plantaciones bananeras en la provincia del Guayas», masterThesis, ESPAE - ESPOL, 2018. Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/45661>
- [9] Semana, «Si es fumigación, que sea mecanizada», Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo. Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.semana.com/especiales-comerciales/articulo/si-es-fumigacion-que-sea-mecanizada/433250-3/>
- [10] «SciELO Bolivia- Scientific Electronic Library Online». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S0040-29151993000100008&scri>
- [11] E. Pino V., «Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología», *Idesia Arica*, vol. 37, n.º 1, pp. 75-84, mar. 2019, doi: 10.4067/S0718-34292019005000402.
- [12] D. C. R. Ríos-Hernández, «Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión», vol. 11, n.º 4, 2021.
- [13] «Agronomía | Texto completo gratuito | De la agricultura inteligente a la agricultura 5.0: una revisión sobre la gestión de datos de cultivos». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/207>
- [14] «Agricultura 5.0: Los impactos de la tecnología aplicada en el sector», TOTVS. Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.totvs.com/blog/cat-agroindustria/agricultura-5-0-los-impactos-de-la-tecnologia-aplicada-en-el-sector/>

- [15] C. Valero Ubierna, «La evolución de la agricultura de precisión», *Rev. Frutic.*, vol. 68, pp. 30-39, mar. 2019.
- [16] INMA, Bucharest, Romania *et al.*, «PRINCIPLES OF INTEGRATION THE AGRI-DRONES IN AGRICULTURAL PRODUCTION ENVIRONMENTS. NEW CONCEPTS TOWARDS AGRICULTURE-5.0», *Ann. Univ. Craiova - Agric. Montanology Cadastre Ser.*, vol. 51, n.º 2, pp. 604-614, dic. 2020, doi: 10.52846/AAMC.2021.02.70.
- [17] C. Godfray *et al.*, «Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People», *Science*, vol. 327, pp. 812-8, feb. 2010, doi: 10.1126/science.1185383.
- [18] A. Tiwari y R. Beed, «Applications of Internet of Things in Smart Agriculture», 2023, pp. 103-115. doi: 10.1007/978-981-99-4677-8_6.
- [19] M. Sadiku, T. J. Ashaolu, y S. Musa, «Big Data in Agriculture», vol. 1, jul. 2020, doi: 10.51542/ijscia.v1i1.9.
- [20] J. Glover, C. Cox, y J. Reganold, «Future Farming: A Return to Roots?», *Sci. Am.*, vol. 297, pp. 82-9, sep. 2007, doi: 10.1038/scientificamerican0807-82.
- [21] J. Zhang, N. Kang, Q. Qu, L. Zhou, y H. Zhang, «Automatic fruit picking technology: a comprehensive review of research advances», *Artif. Intell. Rev.*, vol. 57, feb. 2024, doi: 10.1007/s10462-023-10674-2.
- [22] P. H. A. Moura y V. D. F. C. Monteiro, *Ciências agrárias, indicadores e sistemas de produção sustentáveis 2*, 1.ª ed. Atena Editora, 2021. doi: 10.22533/at.ed.014212911.
- [23] «Robótica en agricultura: perspectivas y avances | La Huerta Digital». Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://lahuertadigital.es/robotica-agricultura-perspectivas/>
- [24] G. V. T. V. Weerasooriya, «Smart Agriculture for Developing Nations», 2023, pp. 119-133.
- [25] A. Yilmaz y S. Soysal, «The Necessity of Autonomous Systems in Agriculture», 2021, pp. 301-322.
- [26] A. Barrientos *et al.*, «Robots in Agriculture: State of Art and Practical Experiences», 2018. doi: 10.5772/intechopen.69874.
- [27] F. Veroustraete, «The Rise of the Drones in Agriculture», *EC Agridulture*, vol. 2, sep. 2015.
- [28] J. Torres-Sánchez, F. López-Granados, y J. M. Peña, «An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 114, pp. 43-52, jun. 2015, doi: 10.1016/j.compag.2015.03.019.
- [29] U. S. S. Blog, «Cómo los drones revolucionan la agricultura con monitoreo aéreo -», USS. Accedido: 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://uss.com.ar/tecnologia-y-equipamiento/drones-revolucionan-la-agricultura/>
- [30] A. Méndez y J. P. Vélez, «Los drones como herramienta para el monitoreo de cultivos».
- [31] J. G. L. Sánchez y M. G. R. López, «Tecnologías emergentes en la agricultura: Aplicación informática para el cultivo bajo cubierta», *Kill. Soc.*, vol. 7, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2023, doi: 10.26871/killkanasocial.v7i3.1410.

- [32] Valero Claudio, «Tipos de drones: Clasificación según su uso y características», ADSLZone. Accedido: 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.adslzone.net/reportajes/drones/tipos-drones/>
- [33] Federal Aviation Administration, «Preguntas frecuentes sobre sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) | Administración Federal de Aviación». Accedido: 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.faa.gov/uas/faqs>
- [34] acre_admin, «Tecnología dron en agricultura de precisión. DJI AGRICULTURE», Grupo Acre Colombia. Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://grupoacre.co/tecnologia-dron-en-agricultura-de-precision-dji-agriculture/>
- [35] admin, «¿Cuáles son los beneficios de fumigar?», <https://agrosensemexico.com>. Accedido: 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://agrosensemexico.com/cuales-son-los-beneficios-de-fumigar/>
- [36] MÁRQUEZ JAVIER, «MÉTODOS DE APLICACIÓN DE PLAGUICIDAS QUE TODA FUMIGADORA DEBE CONOCER | Tetengo». Accedido: 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tetengo.com.mx/blog/nueve-metodos-de-aplicacion-de-plaguicidas-que-toda-fumigadora-debe-conocer>
- [37] K. V. Cedeño Sabando, G. A. Mero Mera, A. A. Vera Esmeraldas, y M. Reyna Bowen, «Evaluación de la distribución de gotas en la pulverización de plaguicida en maíz por el método tradicional y por dron», *La Técnica*, n.º Extra 0 (Edición Especial), pp. 65-78, 2020.
- [38] Jacto, «Tipos de pulverizador: ¿cuáles son los principales y cómo elegir el ideal?», Blog | Tecnología para la Agricultura. Accedido: 30 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bloglatam.jacto.com/tipos-de-pulverizador/>
- [39] E. Sousa, «Pulverizador agrícola: o que você deve saber sobre ele», TerraMagna. Accedido: 30 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://terramagna.com.br/blog/pulverizador/>
- [40] almarural, «Fumigación con drones: los usos más efectivos | ALMARURAL», Alma Rural. Accedido: 30 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://almarural.com.ar/maquinas-y-herramientas/que-se-puede-fumigar-con-drones/>
- [41] D. M. Salazar Hernández, «Clasificación y consideraciones básicas sobre los productos fitosanitarios: plagas producidas por insectos que afectan a la vid y a sus producciones», *Sem. Vitivinícola*, n.º 2551, pp. 2141-2147, 1995.
- [42] A. Rossi, «Soil Texture and Structure».
- [43] W. Chesworth, Ed., *Encyclopedia of soil science*. en *Encyclopedia of earth sciences series*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2008.
- [44] N. F. Chaves-Barrantes y M. V. Gutiérrez-Soto, «Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos.», *Agron. Mesoam.*, vol. 28, n.º 1, p. 237, dic. 2016, doi: 10.15517/am.v28i1.21903.
- [45] «(PDF) La inteligencia artificial en la agricultura: perspectivas de los sistemas expertos». Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/28143951_La_inteligencia_artificial_en_la_agricultura_perspectivas_de_los_sistemas_expertos

- [46] D. Hinestroza Ramírez, «El Machine Learning a través de los tiempos, y los aportes a la humanidad», jun. 2018, Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17289>
- [47] N. A. Cayllahua Aquino y J. C. Suárez Macedo, «Redes neuronales de aprendizaje profundo para el reconocimiento facial y control de acceso de estudiantes a un laboratorio», *Repos. Inst. - URP*, 2019, Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3320>
- [48] «Qué es y para qué sirve la inteligencia artificial (IA)», Ferrovial. Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ferrovial.com/es/recursos/inteligencia-artificial/>
- [49] gestorweb, «¿Qué es la inteligencia artificial en el sector agrícola?», Redelplast. Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://redelplast.es/2022/04/04/que-es-la-inteligencia-artificial-en-la-agricultura/>
- [50] «Christian Madera», prezi.com. Accedido: 24 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://prezi.com/p/out-il-4zbyu/christian-madera/>
- [51] «Cinco ejemplos concretos del uso de la Inteligencia Artificial en el agro», Más BCR. Accedido: 20 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://masbcr.com.ar/cinco-ejemplos-concretos-del-uso-de-la-inteligencia-artificial-en-el-agro/>
- [52] A. Mohammed y S. Hasan, «Adaptive PID controller for the angular attitude of the UAV and the desired attitude», 2020.
- [53] ArduPilot, «ArduPilot», ArduPilot.org. Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ardupilot.org>
- [54] «Conecte ESC y motores — Documentación de Copter». Accedido: 20 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html>
- [55] «Figure 2: Drone's pitch, roll, and yaw», ResearchGate. Accedido: 20 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Drones-pitch-roll-and-yaw_fig2_329521700

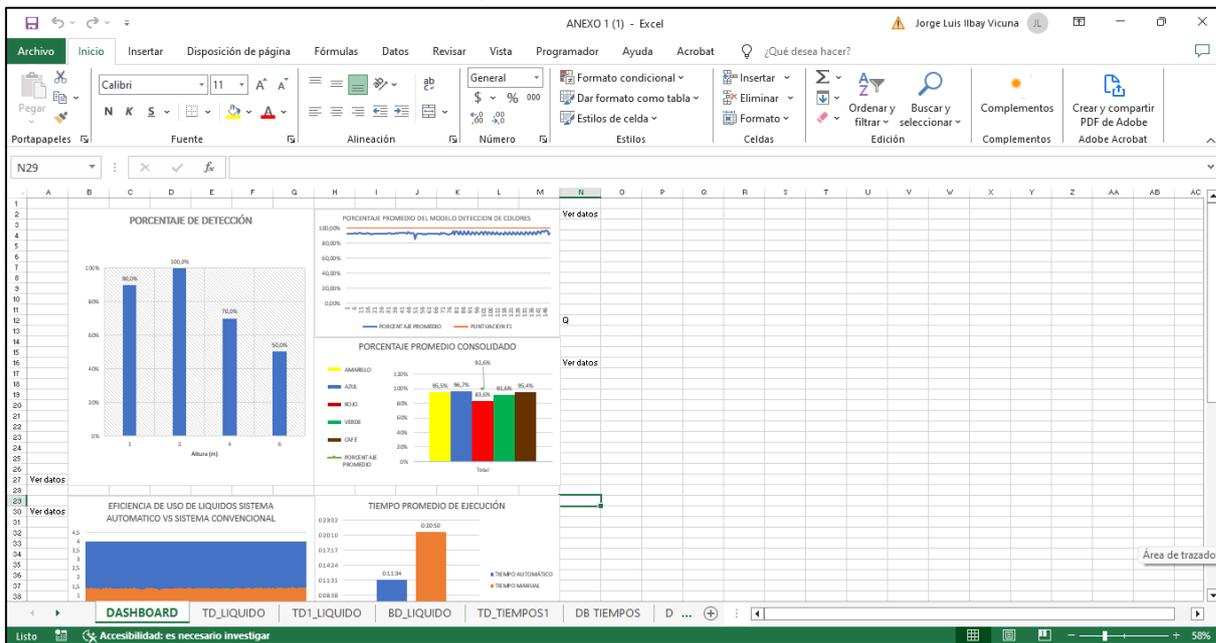
ANEXOS

Anexo 1

Base de datos recolectada por el sistema de colores

Nro	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	PORCENTAJE PROMEDIO	PUNTUACION F1
1	95,00%	95,00%	81,00%	92,00%	96,00%	91,80%	100,0%
2	95,00%	95,00%	80,00%	93,00%	96,00%	91,80%	100,0%
3	94,00%	95,00%	80,00%	94,00%	96,00%	91,80%	100,0%
4	95,00%	96,00%	80,00%	95,00%	96,00%	92,40%	100,0%
5	95,00%	95,00%	80,00%	94,00%	95,00%	91,80%	100,0%
6	95,00%	95,00%	81,00%	93,00%	95,00%	91,80%	100,0%
7	96,00%	96,00%	82,00%	91,00%	100,00%	93,00%	100,0%
8	96,00%	96,00%	81,00%	93,00%	96,00%	92,40%	100,0%
9	95,00%	96,00%	81,00%	93,00%	95,00%	92,00%	100,0%
10	95,00%	97,00%	81,00%	93,00%	99,00%	93,00%	100,0%
11	95,00%	96,00%	81,00%	95,00%	97,00%	92,80%	100,0%
12	96,00%	96,00%	81,00%	93,00%	97,00%	92,60%	100,0%
13	96,00%	97,00%	82,00%	90,00%	98,00%	92,60%	100,0%
14	95,00%	97,00%	82,00%	92,00%	96,00%	92,40%	100,0%
15	95,00%	97,00%	83,00%	90,00%	96,00%	92,20%	100,0%
16	96,00%	97,00%	83,00%	89,00%	99,00%	92,80%	100,0%
17	96,00%	96,00%	82,00%	90,00%	97,00%	92,20%	100,0%
18	96,00%	96,00%	82,00%	90,00%	95,00%	91,80%	100,0%
19	95,00%	97,00%	81,00%	89,00%	95,00%	91,40%	100,0%
20	96,00%	96,00%	82,00%	90,00%	95,00%	91,80%	100,0%
21	97,00%	96,00%	81,00%	89,00%	98,00%	92,20%	100,0%
22							

Dashboard de los datos recolectados y analizados

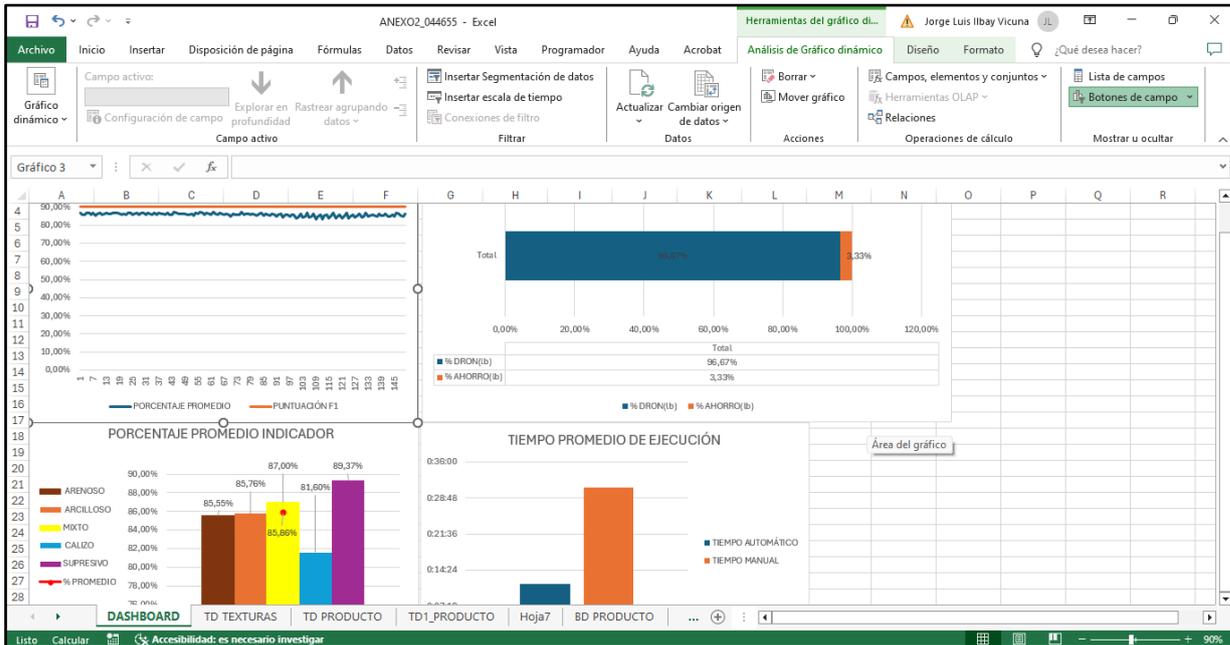


Anexo 2

Base de datos recolectada por el sistema de texturas

No	ARENOSO	ARCILLOSO	MIXTO	CALIZO	SUPRESIVO	PORCENTAJE PROMEDIO	PUNTAJACION F1
1	87,00%	87,00%	88,00%	82,00%	89,00%	86,60%	90,10%
2	87,00%	86,00%	86,00%	81,00%	89,00%	85,80%	90,10%
3	87,00%	85,00%	86,00%	82,00%	89,00%	86,00%	90,10%
4	88,00%	87,00%	88,00%	82,00%	89,00%	86,80%	90,10%
5	87,00%	89,00%	87,00%	81,00%	89,00%	86,60%	90,10%
6	86,00%	86,00%	86,00%	82,00%	88,00%	85,60%	90,10%
7	87,00%	87,00%	88,00%	82,00%	89,00%	86,60%	90,10%
8	85,00%	88,00%	85,00%	81,00%	88,00%	85,40%	90,10%
9	88,00%	87,00%	86,00%	81,00%	89,00%	86,20%	90,10%
10	88,00%	88,00%	88,00%	82,00%	89,00%	87,00%	90,10%
11	86,00%	86,00%	87,00%	81,00%	88,00%	85,60%	90,10%
12	87,00%	85,00%	89,00%	81,00%	89,00%	86,20%	90,10%
13	88,00%	88,00%	88,00%	81,00%	89,00%	86,80%	90,10%
14	85,00%	89,00%	88,00%	82,00%	88,00%	86,40%	90,10%
15	88,00%	87,00%	86,00%	82,00%	89,00%	86,40%	90,10%
16	89,00%	87,00%	87,00%	81,00%	89,00%	86,60%	90,10%
17	89,00%	88,00%	87,00%	82,00%	89,00%	87,00%	90,10%
18	88,00%	88,00%	88,00%	82,00%	89,00%	87,00%	90,10%
19	87,00%	87,00%	87,00%	81,00%	89,00%	86,20%	90,10%
20	86,00%	85,00%	88,00%	82,00%	88,00%	85,80%	90,10%
21	85,00%	87,00%	89,00%	82,00%	89,00%	86,40%	90,10%
22							

Dashboard de los datos recolectados y analizados

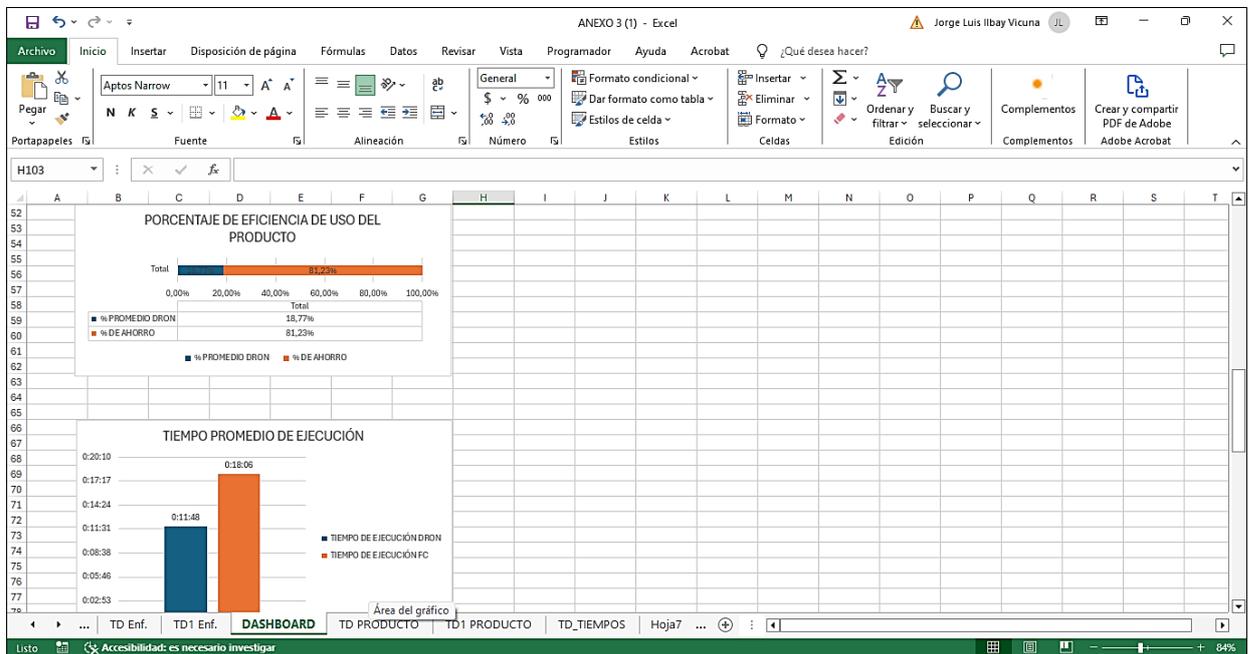


Anexo 3

Base de datos recolectada por el sistema de reconocimiento de enfermedades

	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	% Promedio	Puntuación F	No	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	% Prmedio	MAX	MIN
1	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	100%	150	97,99%	97,86%	98,22%	97,33%	97,87%	97,85%	99,40%	91,0
2	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	100%									
3	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	100%									
4	99,00%	98,00%	99,00%	100,00%	98,80%	100%									
5	98,00%	99,00%	98,00%	99,00%	98,40%	100%									
6	98,00%	98,00%	98,00%	99,00%	98,20%	100%									
7	97,00%	98,00%	98,00%	99,00%	98,00%	100%									
8	100,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,20%	100%									
9	99,00%	98,00%	99,00%	98,00%	98,40%	100%									
10	99,00%	99,00%	98,00%	98,00%	98,40%	100%									
11	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	100%									
12	98,00%	98,00%	98,00%	98,00%	98,20%	100%									
13	98,00%	99,00%	99,00%	99,00%	98,80%	100%									
14	99,00%	99,00%	99,00%	100,00%	99,40%	100%									
15	99,00%	100,00%	99,00%	100,00%	99,20%	100%									
16	99,00%	98,00%	97,00%	99,00%	98,20%	100%									
17	98,00%	98,00%	98,00%	99,00%	98,20%	100%									
18	99,00%	98,00%	97,00%	98,00%	97,80%	100%									
19	98,00%	97,00%	96,00%	98,00%	97,20%	100%									
20	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	99,00%	100%									
21	98,00%	98,00%	99,00%	99,00%	98,40%	100%									
22	94,00%	90,00%	91,00%	92,00%	92,40%	100%									

Dashboard de los datos recolectados y analizados

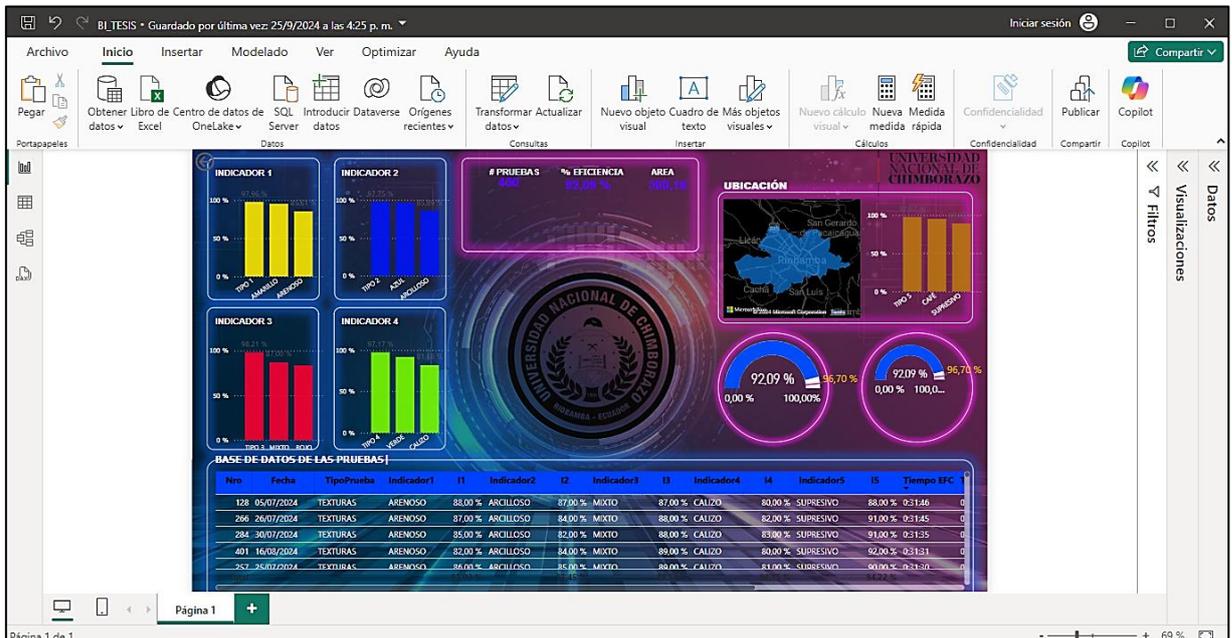


Anexo 4

Base de datos general

Nro	Fecha	Ubicacion	Area	Tipo de Prueba	Tiempo Ejecucion FC	Tiempo ejecucion Dron	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3	Indicador 4	Indicador 5	I1	I2	I3
1	17/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:32	0:11:52	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	95,00%	
2	17/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:18	0:11:42	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	95,00%	
3	17/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:02	0:11:58	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	94,00%	95,00%	
4	18/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:12	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	96,00%	
5	18/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:52	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	95,00%	
6	18/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:59	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	95,00%	
7	19/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:27	0:12:00	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	96,00%	
8	19/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:27	0:11:48	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	96,00%	
9	19/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:12	0:11:42	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	96,00%	
10	20/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:03	0:11:51	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	97,00%	
11	20/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:27	0:11:43	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	96,00%	
12	20/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:59	0:11:44	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	96,00%	
13	21/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:02	0:11:48	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	97,00%	
14	21/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:59	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	97,00%	
15	21/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:41	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	97,00%	
16	24/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:13	0:11:51	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	97,00%	
17	24/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:43	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	96,00%	
18	24/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:59	0:11:42	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	96,00%	
19	25/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:32	0:10:19	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	95,00%	97,00%	
20	25/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:32	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	96,00%	96,00%	
21	25/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:38	0:11:32	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	97,00%	96,00%	
22	26/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:12	0:11:59	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	98,00%	97,00%	
23	26/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:32	0:11:40	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	98,00%	96,00%	
24	26/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:48	0:11:48	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	97,00%	97,00%	
25	27/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:01	0:11:52	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	98,00%	98,00%	
26	27/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:59	0:11:43	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	98,00%	97,00%	
27	27/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:00	0:11:44	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	98,00%	97,00%	
28	28/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:21:12	0:11:51	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	98,00%	97,00%	
29	28/6/2024	Riobamba	300,16	COLORES	0:20:59	0:11:47	AMARILLO	AZUL	ROJO	VERDE	CAFÉ	97,00%	98,00%	

Aplicación de monitorización de los resultados obtenidos



Las bases de datos y aplicación se pueden descargar en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1aEck_CBeeJbteo9n_2c16ojxA5hCKeOM?usp=sharing

Anexo 5

Armado de maqueta a escala 1:5



Anexo 6

Código de los sistemas del dron

- Código para el sistema de detección de Color

```
/* Includes ----- */
#include <Rosana_A-project-1_inferencing.h>
#include "edge-impulse-sdk/dsp/image/image.hpp"
#include "esp_camera.h"

// Select camera model - find more camera models in camera_pins.h file here
// https://github.com/espressif/arduino-
esp32/blob/master/libraries/ESP32/examples/Camera/CameraWebServer/camera_pins.h
//#define CAMERA_MODEL_ESP_EYE // Has PSRAM
#define CAMERA_MODEL_AI_THINKER // Has PSRAM
#if defined(CAMERA_MODEL_ESP_EYE)
#define PWDN_GPIO_NUM -1
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM 4
#define SIOD_GPIO_NUM 18
#define SIOC_GPIO_NUM 23
#define Y9_GPIO_NUM 36
#define Y8_GPIO_NUM 37
#define Y7_GPIO_NUM 38
```

```

#define Y6_GPIO_NUM    39
#define Y5_GPIO_NUM    35
#define Y4_GPIO_NUM    14
#define Y3_GPIO_NUM    13
#define Y2_GPIO_NUM    34
#define VSYNC_GPIO_NUM 5
#define HREF_GPIO_NUM  27
#define PCLK_GPIO_NUM  25
#elif defined(CAMERA_MODEL_AI_THINKER)
#define PWDN_GPIO_NUM  32
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM   0
#define SIOD_GPIO_NUM  26
#define SIOC_GPIO_NUM  27
#define Y9_GPIO_NUM    35
#define Y8_GPIO_NUM    34
#define Y7_GPIO_NUM    39
#define Y6_GPIO_NUM    36
#define Y5_GPIO_NUM    21
#define Y4_GPIO_NUM    19
#define Y3_GPIO_NUM    18
#define Y2_GPIO_NUM     5
#define VSYNC_GPIO_NUM 25
#define HREF_GPIO_NUM  23
#define PCLK_GPIO_NUM  22
// Definición de otros pines disponibles
#define MOT_GPIO        4 // GPIO para controlar el MOTOR
#define AZUL_GPIO       15 // GPIO para controlar el LED AZUL
#define ROJO_GPIO       12 // GPIO para controlar el LED ROJO
#define VERDE_GPIO      13 // GPIO para controlar el LED VERDE
#else
#error "Camera model not selected"
#endif

/* Constant defines ----- */
#define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS    320
#define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS    240
#define EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE         3
/* Private variables ----- */
static bool debug_nn = false; // Set this to true to see e.g. features generated from the raw signal
static bool is_initialised = false;
uint8_t *snapshot_buf; //points to the output of the capture
static camera_config_t camera_config = {
    .pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM,
    .pin_reset = RESET_GPIO_NUM,
    .pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM,
    .pin_d7 = Y9_GPIO_NUM,

```

```

.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM,
.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM,
.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM,
.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM,
.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM,
.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM,
.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM,
.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM,
.pin_href = HREF_GPIO_NUM,
.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM,
//XCLK 20MHz or 10MHz for OV2640 double FPS (Experimental)
.xclk_freq_hz = 20000000,
.ledc_timer = LEDC_TIMER_0,
.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0,
.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG, //YUV422,GRAYSCALE,RGB565,JPEG
.frame_size = FRAMESIZE_QVGA, //QQVGA-UXGA Do not use sizes above QVGA when not JPEG
.jpeg_quality = 12, //0-63 lower number means higher quality
.fb_count = 1, //if more than one, i2s runs in continuous mode. Use only with JPEG
.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM,
.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY,
};
/* Function definitions ----- */
bool ei_camera_init(void);
void ei_camera_deinit(void);
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) ;
/**
 * @brief Arduino setup function
 */
void setup()
{
  pinMode(MOT_GPIO, OUTPUT); // Configurar el pin del MOT como salida
  pinMode(AZUL_GPIO, OUTPUT); // Configurar el pin del LED AZUL como salida
  pinMode(ROJO_GPIO, OUTPUT); // Configurar el pin del LED AZUL como salida
  pinMode(VERDE_GPIO, OUTPUT); // Configurar el pin del LED AZUL como salida
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
  //comment out the below line to start inference immediately after upload
  while (!Serial);
  Serial.println("Edge Impulse Inferencing Demo");
  if (ei_camera_init() == false) {
    ei_printf("Failed to initialize Camera!\r\n");
  }
  else {
    ei_printf("Camera initialized\r\n");
  }
  ei_printf("\nStarting continious inference in 2 seconds...\n");
  ei_sleep(2000); }
 * @brief Get data and run inferencing

```

```

* @param[in] debug Get debug info if true
*/
void loop()
{
    // instead of wait_ms, we'll wait on the signal, this allows threads to cancel us...
    if (ei_sleep(5) != EI_IMPULSE_OK) {
        return;
    }
    snapshot_buf = (uint8_t*)malloc(EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS * EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS *
EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE);
    // check if allocation was successful
    if(snapshot_buf == nullptr) {
        ei_printf("ERR: Failed to allocate snapshot buffer!\n");
        return;
    }
    ei::signal_t signal;
    signal.total_length = EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH * EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT;
    signal.get_data = &ei_camera_get_data;
    if (ei_camera_capture((size_t)EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH, (size_t)EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT, snapshot_buf) ==
false) {
        ei_printf("Failed to capture image\r\n");
        free(snapshot_buf);
        return;
    }
    // Run the classifier
    ei_impulse_result_t result = { 0 };
    EI_IMPULSE_ERROR err = run_classifier(&signal, &result, debug_nn);
    if (err != EI_IMPULSE_OK) {
        ei_printf("ERR: Failed to run classifier (%d)\n", err);
        return;
    }
    // print the predictions
    ei_printf("Predictions (DSP: %d ms., Classification: %d ms., Anomaly: %d ms.): \n",
        result.timing.dsp, result.timing.classification, result.timing.anomaly);
#ifdef EI_CLASSIFIER_OBJECT_DETECTION == 1
    ei_printf("Object detection bounding boxes:\r\n");
    for (uint32_t i = 0; i < result.bounding_boxes_count; i++) {
        ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.bounding_boxes[i];
        if (bb.value == 0) {
            continue;
        }
        ei_printf(" %s (%f) [ x: %u, y: %u, width: %u, height: %u ]\r\n",
            bb.label,
            bb.value,
            bb.x,
            bb.y,
            bb.width,
            bb.height);
#endif
}

```

```

    if(bb.label == "VERDE"){
        digitalWrite(MOT_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(VERDE_GPIO, LOW);
        digitalWrite(AZUL_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(ROJO_GPIO, HIGH);
    }
    if(bb.label == "AZUL"){
        digitalWrite(MOT_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(VERDE_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(AZUL_GPIO, LOW);
        digitalWrite(ROJO_GPIO, HIGH);
    }
    if(bb.label == "ROJO"){
        digitalWrite(MOT_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(VERDE_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(AZUL_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(ROJO_GPIO, LOW);
    }
    if(bb.label == "CAFE"){
        digitalWrite(MOT_GPIO, LOW);
        digitalWrite(VERDE_GPIO, LOW);
        digitalWrite(AZUL_GPIO, LOW);
        digitalWrite(ROJO_GPIO, LOW);
    }
    if(bb.label == "AMARILLO"){
        digitalWrite(MOT_GPIO, LOW);
        digitalWrite(VERDE_GPIO, LOW);
        digitalWrite(AZUL_GPIO, HIGH);
        digitalWrite(ROJO_GPIO, LOW);
    }
} // Print the prediction results (classification)
#else
ei_printf("Predictions:\r\n");
for (uint16_t i = 0; i < EI_CLASSIFIER_LABEL_COUNT; i++) {
    ei_printf(" %s: ", ei_classifier_inferencing_categories[i]);
    ei_printf("%.5f\r\n", result.classification[i].value);
}
#endif // Print anomaly result (if it exists)
#if EI_CLASSIFIER_HAS_ANOMALY
    ei_printf("Anomaly prediction: %.3f\r\n", result.anomaly);
#endif
#if EI_CLASSIFIER_HAS_VISUAL_ANOMALY
    ei_printf("Visual anomalies:\r\n");
    for (uint32_t i = 0; i < result.visual_ad_count; i++) {
        ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.visual_ad_grid_cells[i];
        if (bb.value == 0) {
            continue;
        }
    }
}

```

```

        ei_printf(" %s (%f) [ x: %u, y: %u, width: %u, height: %u ]\r\n",
                bb.label,
                bb.value,
                bb.x,
                bb.y,
                bb.width,
                bb.height);
    }
#endif
    free(snapshot_buf);
}
/**
 * @brief Setup image sensor & start streaming
 *
 * @retval false if initialisation failed
 */
bool ei_camera_init(void) {
    if (is_initialised) return true;
#ifdef CAMERA_MODEL_ESP_EYE
    pinMode(13, INPUT_PULLUP);
    pinMode(14, INPUT_PULLUP);
#endif
    //initialize the camera
    esp_err_t err = esp_camera_init(&camera_config);
    if (err != ESP_OK) {
        Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x\n", err);
        return false;
    }
    sensor_t * s = esp_camera_sensor_get();
    // initial sensors are flipped vertically and colors are a bit saturated
    if (s->id.PID == OV3660_PID) {
        s->set_vflip(s, 1); // flip it back
        s->set_brightness(s, 1); // up the brightness just a bit
        s->set_saturation(s, 0); // lower the saturation
    }
#ifdef CAMERA_MODEL_M5STACK_WIDE
    s->set_vflip(s, 1);
    s->set_hmirror(s, 1);
#elif defined(CAMERA_MODEL_ESP_EYE)
    s->set_vflip(s, 1);
    s->set_hmirror(s, 1);
    s->set_awb_gain(s, 1);
#endif
    is_initialised = true;
    return true;
}
/**
 * @brief Stop streaming of sensor data

```

```

*/
void ei_camera_deinit(void) {
    //deinitialize the camera
    esp_err_t err = esp_camera_deinit();
    if (err != ESP_OK)
    {
        ei_printf("Camera deinit failed\n");
        return;
    }
    is_initialised = false;
    return;
}
/**
 * @brief      Capture, rescale and crop image
 * @param[in]  img_width    width of output image
 * @param[in]  img_height   height of output image
 * @param[in]  out_buf      pointer to store output image, NULL may be used
 *                  if ei_camera_frame_buffer is to be used for capture and resize/cropping.
 * @retval     false if not initialised, image captured, rescaled or cropped failed
 */
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) {
    bool do_resize = false;
    if (!is_initialised) {
        ei_printf("ERR: Camera is not initialized\r\n");
        return false;
    }
    camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get();
    if (!fb) {
        ei_printf("Camera capture failed\n");
        return false;
    }
    bool converted = fmt2rgb888(fb->buf, fb->len, PIXFORMAT_JPEG, snapshot_buf);
    esp_camera_fb_return(fb);
    if(!converted){
        ei_printf("Conversion failed\n");
        return false;
    }
    if ((img_width != EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS)
        || (img_height != EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS)) {
        do_resize = true;
    }
    if (do_resize) {
        ei::image::processing::crop_and_interpolate_rgb888(
            out_buf,
            EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS,
            EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS,
            out_buf,
            img_width,

```

```

    img_height);
}
return true;
}
static int ei_camera_get_data(size_t offset, size_t length, float *out_ptr)
{ // we already have a RGB888 buffer, so recalculate offset into pixel index
    size_t pixel_ix = offset * 3;
    size_t pixels_left = length;
    size_t out_ptr_ix = 0;
    while (pixels_left != 0) {
        // Swap BGR to RGB here
        // due to https://github.com/espressif/esp32-camera/issues/379
        out_ptr[out_ptr_ix] = (snapshot_buf[pixel_ix + 2] << 16) + (snapshot_buf[pixel_ix + 1] << 8) +
snapshot_buf[pixel_ix];
        // go to the next pixel
        out_ptr_ix++;
        pixel_ix+=3;
        pixels_left--; } // and done!
    return 0; }
#endif
#error "Invalid model for current sensor"
#endif

```

- Código para el sistema de detección de Textura

```

/* Includes ----- */
#include <RECONOCIMIENTO_DE_SUELO_inferencing.h>
#include "edge-impulse-sdk/dsp/image/image.hpp"
#include "esp_camera.h"
// Select camera model - find more camera models in camera_pins.h file here
// https://github.com/espressif/arduino-
esp32/blob/master/libraries/ESP32/examples/Camera/CameraWebServer/camera_pins.h
#define CAMERA_MODEL_ESP_EYE // Has PSRAM
//#define CAMERA_MODEL_AI_THINKER // Has PSRAM
#if defined(CAMERA_MODEL_ESP_EYE)
#define PWDN_GPIO_NUM    -1
#define RESET_GPIO_NUM  -1
#define XCLK_GPIO_NUM    4
#define SIOD_GPIO_NUM    18
#define SIOC_GPIO_NUM    23
#define Y9_GPIO_NUM      36
#define Y8_GPIO_NUM      37
#define Y7_GPIO_NUM      38
#define Y6_GPIO_NUM      39
#define Y5_GPIO_NUM      35
#define Y4_GPIO_NUM      14
#define Y3_GPIO_NUM      13
#define Y2_GPIO_NUM      34

```

```

#define VSYNC_GPIO_NUM 5
#define HREF_GPIO_NUM 27
#define PCLK_GPIO_NUM 25
#elif defined(CAMERA_MODEL_AI_THINKER)
#define PWDN_GPIO_NUM 32
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM 0
#define SIOD_GPIO_NUM 26
#define SIOC_GPIO_NUM 27
#define Y9_GPIO_NUM 35
#define Y8_GPIO_NUM 34
#define Y7_GPIO_NUM 39
#define Y6_GPIO_NUM 36
#define Y5_GPIO_NUM 21
#define Y4_GPIO_NUM 19
#define Y3_GPIO_NUM 18
#define Y2_GPIO_NUM 5
#define VSYNC_GPIO_NUM 25
#define HREF_GPIO_NUM 23
#define PCLK_GPIO_NUM 22
#else
#error "Camera model not selected"
#endif

/* Constant defines ----- */
#define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS 320
#define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS 240
#define EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE 3

/* Private variables ----- */
static bool debug_nn = false; // Set this to true to see e.g. features generated from the raw signal
static bool is_initialised = false;
uint8_t *snapshot_buf; //points to the output of the capture
static camera_config_t camera_config = {
    .pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM,
    .pin_reset = RESET_GPIO_NUM,
    .pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM,
    .pin_d7 = Y9_GPIO_NUM,
    .pin_d6 = Y8_GPIO_NUM,
    .pin_d5 = Y7_GPIO_NUM,
    .pin_d4 = Y6_GPIO_NUM,
    .pin_d3 = Y5_GPIO_NUM,
    .pin_d2 = Y4_GPIO_NUM,
    .pin_d1 = Y3_GPIO_NUM,
    .pin_d0 = Y2_GPIO_NUM,
    .pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM,
    .pin_href = HREF_GPIO_NUM,
    .pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM,

```

```

//XCLK 20MHz or 10MHz for OV2640 double FPS (Experimental)
.xclk_freq_hz = 20000000,
.ledc_timer = LEDC_TIMER_0,
.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0,
.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG, //YUV422,GRAYSCALE,RGB565,JPEG
.frame_size = FRAMESIZE_QVGA, //QQVGA-UXGA Do not use sizes above QVGA when not JPEG
.jpeg_quality = 12, //0-63 lower number means higher quality
.fb_count = 1, //if more than one, i2s runs in continuous mode. Use only with JPEG
.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM,
.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY,
};
/* Function definitions ----- */
bool ei_camera_init(void);
void ei_camera_deinit(void);
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) ;
/**
 * @brief Arduino setup function
 */
void setup()
{
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(115200);
    //comment out the below line to start inference immediately after upload
    while (!Serial);
    Serial.println("Edge Impulse Inferencing Demo");
    if (ei_camera_init() == false) {
        ei_printf("Failed to initialize Camera!\r\n");
    }
    else {
        ei_printf("Camera initialized\r\n");
    }
    ei_printf("\nStarting continious inference in 2 seconds...\n");
    ei_sleep(2000);
}
/**
 * @brief Get data and run inferencing
 *
 * @param[in] debug Get debug info if true
 */
void loop()
{
    // instead of wait_ms, we'll wait on the signal, this allows threads to cancel us...
    if (ei_sleep(5) != EI_IMPULSE_OK) {
        return;
    }
    snapshot_buf = (uint8_t*)malloc(EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS * EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS *
EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE);
    // check if allocation was successful

```

```

if(snapshot_buf == nullptr) {
    ei_printf("ERR: Failed to allocate snapshot buffer!\n");
    return;
}
ei::signal_t signal;
signal.total_length = EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH * EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT;
signal.get_data = &ei_camera_get_data;
if (ei_camera_capture((size_t)EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH, (size_t)EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT, snapshot_buf) ==
false) {
    ei_printf("Failed to capture image\r\n");
    free(snapshot_buf);
    return;
} // Run the classifier
ei_impulse_result_t result = { 0 };
EI_IMPULSE_ERROR err = run_classifier(&signal, &result, debug_nn);
if (err != EI_IMPULSE_OK) {
    ei_printf("ERR: Failed to run classifier (%d)\n", err);
    return;
} // print the predictions
ei_printf("Predictions (DSP: %d ms., Classification: %d ms., Anomaly: %d ms.): \n",
        result.timing.dsp, result.timing.classification, result.timing.anomaly);
#if EI_CLASSIFIER_OBJECT_DETECTION == 1
ei_printf("Object detection bounding boxes:\r\n");
for (uint32_t i = 0; i < result.bounding_boxes_count; i++) {
    ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.bounding_boxes[i];
    if (bb.value == 0) {
        continue;
    }
    ei_printf(" %s (%f) [ x: %u, y: %u, width: %u, height: %u ]\r\n",
        bb.label,
        bb.value,
        bb.x,
        bb.y,
        bb.width,
        bb.height);
} // Print the prediction results (classification)
#else
ei_printf("Predictions:\r\n");
for (uint16_t i = 0; i < EI_CLASSIFIER_LABEL_COUNT; i++) {
    ei_printf(" %s: ", ei_classifier_inferencing_categories[i]);
    ei_printf("%.5f\r\n", result.classification[i].value);
}
#endif
// Print anomaly result (if it exists)
#if EI_CLASSIFIER_HAS_ANOMALY
ei_printf("Anomaly prediction: %.3f\r\n", result.anomaly);
#endif
#if EI_CLASSIFIER_HAS_VISUAL_ANOMALY

```

```

ei_printf("Visual anomalies:\r\n");
for (uint32_t i = 0; i < result.visual_ad_count; i++) {
    ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.visual_ad_grid_cells[i];
    if (bb.value == 0) {
        continue;
    }
    ei_printf(" %s (%f) [ x: %u, y: %u, width: %u, height: %u ]\r\n",
        bb.label,
        bb.value,
        bb.x,
        bb.y,
        bb.width,
        bb.height);
}
#endif
    free(snapshot_buf);
}
/**
 * @brief Setup image sensor & start streaming
 * @retval false if initialisation failed
 */
bool ei_camera_init(void) {
    if (is_initialised) return true;
#ifdef CAMERA_MODEL_ESP_EYE
    pinMode(13, INPUT_PULLUP);
    pinMode(14, INPUT_PULLUP);
#endif
    //initialize the camera
    esp_err_t err = esp_camera_init(&camera_config);
    if (err != ESP_OK) {
        Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x\n", err);
        return false;
    }
    sensor_t * s = esp_camera_sensor_get();
    // initial sensors are flipped vertically and colors are a bit saturated
    if (s->id.PID == OV3660_PID) {
        s->set_vflip(s, 1); // flip it back
        s->set_brightness(s, 1); // up the brightness just a bit
        s->set_saturation(s, 0); // lower the saturation
    }
#ifdef CAMERA_MODEL_M5STACK_WIDE
    s->set_vflip(s, 1);
    s->set_hmirror(s, 1);
#elif defined(CAMERA_MODEL_ESP_EYE)
    s->set_vflip(s, 1);
    s->set_hmirror(s, 1);
    s->set_awb_gain(s, 1);
#endif
}

```

```

    is_initialised = true;
    return true;
}
/**
 * @brief    Stop streaming of sensor data
 */
void ei_camera_deinit(void) {
    //deinitialize the camera
    esp_err_t err = esp_camera_deinit();
    if (err != ESP_OK)
    {
        ei_printf("Camera deinit failed\n");
        return;
    }
    is_initialised = false;
    return; }
/**
 * @brief    Capture, rescale and crop image
 * @param[in] img_width    width of output image
 * @param[in] img_height   height of output image
 * @param[in] out_buf      pointer to store output image, NULL may be used
 *                          if ei_camera_frame_buffer is to be used for capture and resize/cropping.
 * @retval    false if not initialised, image captured, rescaled or cropped failed
 */
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) {
    bool do_resize = false;
    if (!is_initialised) {
        ei_printf("ERR: Camera is not initialized\n");
        return false;
    }
    camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get();

    if (!fb) {
        ei_printf("Camera capture failed\n");
        return false;
    }
    bool converted = fmt2rgb888(fb->buf, fb->len, PIXFORMAT_JPEG, snapshot_buf);
    esp_camera_fb_return(fb);
    if(!converted){
        ei_printf("Conversion failed\n");
        return false;
    }
    if ((img_width != EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS)
        || (img_height != EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS)) {
        do_resize = true;
    }
    if (do_resize) {
        ei::image::processing::crop_and_interpolate_rgb888(

```

```

    out_buf,
    EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS,
    EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS,
    out_buf,
    img_width,
    img_height);
}
return true; }
static int ei_camera_get_data(size_t offset, size_t length, float *out_ptr)
{ // we already have a RGB888 buffer, so recalculate offset into pixel index
    size_t pixel_ix = offset * 3;
    size_t pixels_left = length;
    size_t out_ptr_ix = 0;
    while (pixels_left != 0) {
        // Swap BGR to RGB here
        // due to https://github.com/espressif/esp32-camera/issues/379
        out_ptr[out_ptr_ix] = (snapshot_buf[pixel_ix + 2] << 16) + (snapshot_buf[pixel_ix + 1] << 8) +
snapshot_buf[pixel_ix];
        // go to the next pixel
        out_ptr_ix++;
        pixel_ix+=3;
        pixels_left--;
    } // and done!
    return 0; }
#endif
#endif

```

- Código para el sistema de detección de Enfermedad

```

// These sketches are tested with 2.0.4 ESP32 Arduino Core
// https://github.com/espressif/arduino-esp32/releases/tag/2.0.4
/* Includes ----- */
#include <Reconocimiento_enfermedad_inferencing.h>
#include "edge-impulse-sdk/dsp/image/image.hpp"
#include "esp_camera.h"
// Select camera model - find more camera models in camera_pins.h file here
// https://github.com/espressif/arduino-
esp32/blob/master/libraries/ESP32/examples/Camera/CameraWebServer/camera_pins.h
//#define CAMERA_MODEL_ESP_EYE // Has PSRAM
#define CAMERA_MODEL_AI_THINKER // Has PSRAM
#if defined(CAMERA_MODEL_ESP_EYE)
#define PWDN_GPIO_NUM -1
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM 4
#define SIOD_GPIO_NUM 18
#define SIOC_GPIO_NUM 23
#define Y9_GPIO_NUM 36
#define Y8_GPIO_NUM 37
#define Y7_GPIO_NUM 38

```

```

#define Y6_GPIO_NUM    39
#define Y5_GPIO_NUM    35
#define Y4_GPIO_NUM    14
#define Y3_GPIO_NUM    13
#define Y2_GPIO_NUM    34
#define VSYNC_GPIO_NUM 5
#define HREF_GPIO_NUM  27
#define PCLK_GPIO_NUM  25
#elif defined(CAMERA_MODEL_AI_THINKER)
#define PWDN_GPIO_NUM  32
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM   0
#define SIOD_GPIO_NUM  26
#define SIOC_GPIO_NUM   27
#define Y9_GPIO_NUM    35
#define Y8_GPIO_NUM    34
#define Y7_GPIO_NUM    39
#define Y6_GPIO_NUM    36
#define Y5_GPIO_NUM    21
#define Y4_GPIO_NUM    19
#define Y3_GPIO_NUM    18
#define Y2_GPIO_NUM     5
#define VSYNC_GPIO_NUM 25
#define HREF_GPIO_NUM  23
#define PCLK_GPIO_NUM  22
#define MOT_2          4
#else
#error "Camera model not selected"
#endif

/* Constant defines ----- */
#define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS    320
#define EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS    240
#define EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE         3

/* Private variables ----- */
static bool debug_nn = false; // Set this to true to see e.g. features generated from the raw signal
static bool is_initialised = false;
uint8_t *snapshot_buf; //points to the output of the capture
static camera_config_t camera_config = {
    .pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM,
    .pin_reset = RESET_GPIO_NUM,
    .pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM,
    .pin_d7 = Y9_GPIO_NUM,
    .pin_d6 = Y8_GPIO_NUM,
    .pin_d5 = Y7_GPIO_NUM,
    .pin_d4 = Y6_GPIO_NUM,
    .pin_d3 = Y5_GPIO_NUM,

```

```

.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM,
.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM,
.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM,
.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM,
.pin_href = HREF_GPIO_NUM,
.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM,
//XCLK 20MHz or 10MHz for OV2640 double FPS (Experimental)
.xclk_freq_hz = 20000000,
.ledc_timer = LEDC_TIMER_0,
.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0,
.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG, //YUV422,GRAYSCALE,RGB565,JPEG
.frame_size = FRAMESIZE_QVGA, //QQVGA-UXGA Do not use sizes above QVGA when not JPEG
.jpeg_quality = 12, //0-63 lower number means higher quality
.fb_count = 1, //if more than one, i2s runs in continuous mode. Use only with JPEG
.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM,
.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY,
};
/* Function definitions ----- */
bool ei_camera_init(void);
void ei_camera_deinit(void);
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) ;
* @brief Arduino setup function
void setup()
{
    pinMode(MOT_2, OUTPUT); // Configurar el pin del MOT como salida
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(115200);
    //comment out the below line to start inference immediately after upload
    while (!Serial);
    Serial.println("Edge Impulse Inferencing Demo");
    if (ei_camera_init() == false) {
        ei_printf("Failed to initialize Camera!\r\n");
    }
    else {
        ei_printf("Camera initialized\r\n");
    }
    ei_printf("\nStarting continious inference in 2 seconds...\n");
    ei_sleep(2000); }
* @brief Get data and run inferencing
* @param[in] debug Get debug info if true
void loop()
{
    // instead of wait_ms, we'll wait on the signal, this allows threads to cancel us...
    if (ei_sleep(5) != EI_IMPULSE_OK) {
        return;
    }
    snapshot_buf = (uint8_t*)malloc(EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS * EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS *
EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE);

```

```

// check if allocation was successful
if(snapshot_buf == nullptr) {
    ei_printf("ERR: Failed to allocate snapshot buffer!\n");
    return; }
ei::signal_t signal;
signal.total_length = EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH * EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT;
signal.get_data = &ei_camera_get_data;
if (ei_camera_capture((size_t)EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH, (size_t)EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT, snapshot_buf) ==
false) {
    ei_printf("Failed to capture image\r\n");
    free(snapshot_buf);
    return;
} // Run the classifier
ei_impulse_result_t result = { 0 };
EI_IMPULSE_ERROR err = run_classifier(&signal, &result, debug_nn);
if (err != EI_IMPULSE_OK) {
    ei_printf("ERR: Failed to run classifier (%d)\n", err);
    return; }
// print the predictions
ei_printf("Predictions (DSP: %d ms., Classification: %d ms., Anomaly: %d ms.): \n",
        result.timing.dsp, result.timing.classification, result.timing.anomaly);
#if EI_CLASSIFIER_OBJECT_DETECTION == 1
ei_printf("Object detection bounding boxes:\r\n");
for (uint32_t i = 0; i < result.bounding_boxes_count; i++) {
    ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.bounding_boxes[i];
    if (bb.value == 0) {
        continue;
    }
    ei_printf(" %s (%f) [ x: %u, y: %u, width: %u, height: %u ]\r\n",
        bb.label,
        bb.value,
        bb.x,
        bb.y,
        bb.width,
        bb.height);
    if(bb.label == "ENFERMEDAD"){
        digitalWrite(MOT_2, HIGH);
        delay(1500);
        digitalWrite(MOT_2, LOW);
    }
} // Print the prediction results (classification)
#else
ei_printf("Predictions:\r\n");
for (uint16_t i = 0; i < EI_CLASSIFIER_LABEL_COUNT; i++) {
    ei_printf(" %s: ", ei_classifier_inferencing_categories[i]);
    ei_printf("%.5f\r\n", result.classification[i].value);
}
#endif

```

```

// Print anomaly result (if it exists)
#ifdef EI_CLASSIFIER_HAS_ANOMALY
    ei_printf("Anomaly prediction: %.3f\r\n", result.anomaly);
#endif
#ifdef EI_CLASSIFIER_HAS_VISUAL_ANOMALY
    ei_printf("Visual anomalies:\r\n");
    for (uint32_t i = 0; i < result.visual_ad_count; i++) {
        ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.visual_ad_grid_cells[i];
        if (bb.value == 0) {
            continue;
        }
        ei_printf(" %s (%f) [ x: %u, y: %u, width: %u, height: %u ]\r\n",
            bb.label,
            bb.value,
            bb.x,
            bb.y,
            bb.width,
            bb.height);
    }
#endif
    free(snapshot_buf);
}
* @brief Setup image sensor & start streaming
* @retval false if initialisation failed
bool ei_camera_init(void) {
    if (is_initialised) return true;
#ifdef CAMERA_MODEL_ESP_EYE
    pinMode(13, INPUT_PULLUP);
    pinMode(14, INPUT_PULLUP);
#endif
    //initialize the camera
    esp_err_t err = esp_camera_init(&camera_config);
    if (err != ESP_OK) {
        Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x\n", err);
        return false;
    }
    sensor_t * s = esp_camera_sensor_get();
    // initial sensors are flipped vertically and colors are a bit saturated
    if (s->id.PID == OV3660_PID) {
        s->set_vflip(s, 1); // flip it back
        s->set_brightness(s, 1); // up the brightness just a bit
        s->set_saturation(s, 0); // lower the saturation
    }
#ifdef CAMERA_MODEL_M5STACK_WIDE
    s->set_vflip(s, 1);
    s->set_hmirror(s, 1);
#elif defined(CAMERA_MODEL_ESP_EYE)
    s->set_vflip(s, 1);

```

```

s->set_hmirror(s, 1);
s->set_awb_gain(s, 1);
#endif

is_initialised = true;
return true; }

* @brief      Stop streaming of sensor data
void ei_camera_deinit(void) {
    //deinitialize the camera
    esp_err_t err = esp_camera_deinit();
    if (err != ESP_OK)
    {
        ei_printf("Camera deinit failed\n");
        return;
    } is_initialised = false;
    return; }

* @brief      Capture, rescale and crop image
* @param[in]  img_width    width of output image
* @param[in]  img_height   height of output image
* @param[in]  out_buf      pointer to store output image, NULL may be used
*
*              if ei_camera_frame_buffer is to be used for capture and resize/cropping.
* @retval     false if not initialised, image captured, rescaled or cropped failed
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) {
    bool do_resize = false;
    if (!is_initialised) {
        ei_printf("ERR: Camera is not initialized\n");
        return false;
    }
    camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get();
    if (!fb) {
        ei_printf("Camera capture failed\n");
        return false; }
    bool converted = fmt2rgb888(fb->buf, fb->len, PIXFORMAT_JPEG, snapshot_buf);
    esp_camera_fb_return(fb);
    if(!converted){
        ei_printf("Conversion failed\n");
        return false;
    } if ((img_width != EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS)
        || (img_height != EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS)) {
        do_resize = true;
    } if (do_resize) {
        ei::image::processing::crop_and_interpolate_rgb888(
            out_buf,
            EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_COLS,
            EI_CAMERA_RAW_FRAME_BUFFER_ROWS,
            out_buf,
            img_width,
            img_height);
    } return true; }

```

```

static int ei_camera_get_data(size_t offset, size_t length, float *out_ptr)
{ // we already have a RGB888 buffer, so recalculate offset into pixel index
    size_t pixel_ix = offset * 3;
    size_t pixels_left = length;
    size_t out_ptr_ix = 0;
    while (pixels_left != 0) {
        // Swap BGR to RGB here
        // due to https://github.com/espressif/esp32-camera/issues/379
        out_ptr[out_ptr_ix] = (snapshot_buf[pixel_ix + 2] << 16) + (snapshot_buf[pixel_ix + 1] << 8) +
snapshot_buf[pixel_ix];
        // go to the next pixel
        out_ptr_ix++;
        pixel_ix+=3;
        pixels_left--; } // and done!
    return 0; }
#if !defined(EI_CLASSIFIER_SENSOR) || EI_CLASSIFIER_SENSOR != EI_CLASSIFIER_SENSOR_CAMERA
#error "Invalid model for current sensor"
#endif

```