

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE VUELO DE DRONES APLICADO A
LA FUMIGACIÓN FOLIAR DE FRUTALES**

JORDAN BENJAMÍN GAMBOA GUERRERO

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2025

**USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA EN LA OPTIMIZACIÓN
DE PARÁMETROS DE VUELO DE DRONES PARA LA FUMIGACIÓN
FOLIAR DE FRUTALES**

Aprobado por:

Mario Fernando Lillo Saavedra
Ingeniero Civil Eléctrico, Dr.
Profesor Titular

Profesor Guía

Felipe Alexis De la Hoz Mardones
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Evaluador Externo

Profesor Co-Guía

Eduardo Antonio Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Dr.
Profesor Emérito

Profesor Asesor

Christian Luis Jonnathan Correa Farías
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Director de
Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniera Agrónoma, Dra.
Profesor Asociado

Decana

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
SUMMARY	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. HIPÓTESIS	14
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo general.....	14
3.2 Objetivos específicos.....	14
4. METODOLOGÍA.....	15
4.1. Área de estudio.....	15
4.2. Materiales e implementación	20
4.3. Metodología para Objetivo 1:.....	21
4.4. Metodología objetivo 2:.....	35
4.5. Metodología objetivo 3.....	37
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
6. CONCLUSIÓN.....	80
7. BIBLIOGRAFÍA.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Tipos de sistemas de pulverización según la cantidad de agua utilizada.....	22
Tabla 2	Agroquímicos comunes del cerezo.....	23
Tabla 3	Agroquímicos comunes del kiwi.....	23
Tabla 4	Diseño experimental de los vuelos para cada especie frutal.....	28
Tabla 5	Distribución de los papeles hidrosensibles.....	29
Tabla 6	Resumen de resultados obtenidos para un cerezo del nivel inferior perteneciente al vuelo 4.....	44
Tabla 7	Resultados finales en cerezos.....	45
Tabla 8	Resultados finales en kiwis.....	47
Tabla 9	Registro meteorológico al momento de realizar los vuelos adjuntados en la figura 38.....	61
Tabla 10	Impactos/cm ² recibidos tanto en el nivel superior como inferior del kiwi para cada una de las densidades.....	61
Tabla 11	Impactos/cm ² recibidos tanto en el nivel superior como inferior para cada una de las alturas de vuelo sobre los kiwis.....	63
Tabla 12	Impactos/cm ² recibidos tanto en el nivel superior como inferior para cada una de las velocidades de vuelo sobre los kiwis.....	64
Tabla 13	Flujo de Prompts utilizados para que ChatGPTo4 se entrene y prediga parámetros de vuelo óptimos a partir de condiciones ambientales y variables específicas.....	66
Tabla 14	VARIABLES DE PRUEBA UTILIZADAS PARA LAS PREDICCIONES.....	68
Tabla 15	Resultados de los parámetros de vuelo óptimos obtenidos por cada método o modelo predictivo.....	68
Tabla 16	Parámetros óptimos de vuelo para el dron fumigador en un cultivo de cerezos, los cuales se encuentran ordenados para cada densidad.....	70
Tabla 17	Parámetros óptimos de vuelo para el dron fumigador en un cultivo de kiwis, los cuales se encuentran ordenados para cada densidad.....	71
Tabla 18	Resultados de los mejores vuelos realizados en los cerezos de acuerdo con cada densidad.....	72
Tabla 19	Resultados de los mejores vuelos realizados en los kiwis de acuerdo con cada densidad.....	72

Tabla 20	Cobertura requerida por los agroquímicos de acuerdo con el producto y tipo de acción.....	73
Tabla 21	Cobertura requerida por los distintos agroquímicos.....	73
Tabla 22	Características del vuelo 7 en cerezos.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Ubicación del sitio de estudio dentro del mapa geográfico. Imagen procesada en el software QGIS.....	16
Figura 2	Imagen satelital del lugar donde se realizaron los vuelos experimentales. El polígono azul corresponde a los frutales de cerezos y el polígono amarillo corresponde a los kiwis. El sistema de georeferenciación está dado por el Datum WGS 84 huso 18 sur y fue procesado en el software QGIS.....	17
Figura 3	Tipo de formación en KGB de los cerezos y sus tres niveles (inferior, medio y superior) en el sitio de estudio....	18
Figura 4	Estructura en forma de parrón y los niveles superior e inferior de los kiwis en el sitio de estudio.....	18
Figura 5	Mapeado del área de estudio en cerezos para que el dron realice la aplicación de forma automática.....	19
Figura 6	Imagen donde se muestra el dron fumigador, la antena RTK y la base de despegue del Mavic 3M.....	20
Figura 7	Imagen escalada donde se muestran los 76 mm correspondientes al largo máximo del papel.....	31
Figura 8	Imagen binarizada, donde se observa el fondo blanco y los impactos en color negro. Adicionalmente se identifica el área de estudio de uno de los cuatro papeles presentes en la imagen.....	32
Figura 9	Duplicación de imagen binaria donde se muestra la sección del papel hidrosensible donde se realizarán los cálculos.....	32
Figura 10	Opciones de medidas que se pueden obtener al utilizar ImageJ. Las medidas seleccionadas corresponden a las necesarias para cuantificar los impactos/cm ² y otros cálculos de interés.....	33
Figura 11	Imagen binaria cuantificada en la que se detectaron 2.661 impactos en toda el área de estudio.....	33
Figura 12	Fracción de los resultados entregados por ImageJ. En esta imagen se muestran 24 de los 2.661 impactos cuantificados.....	34
Figura 13	Ubicación de los papeles hidrosensibles en el nivel superior de los cerezos, donde se muestran los papeles que recibe los impactos tanto por el haz como el envés de las hojas.....	38

Figura 14	Ubicación de papeles hidrosensibles en el nivel medio de los cerezos.....	39
Figura 15	Ubicación de los papeles hidrosensibles en el nivel inferior de los cerezos.....	39
Figura 16	Papel hidrosensible ubicado en el nivel superior, posicionado en el haz de las hojas.....	40
Figura 17	Papel hidrosensible ubicado en el nivel inferior, posicionado en el haz de las hojas.....	40
Figura 18	Papel hidrosensible ubicado en el nivel inferior, posicionado en el envés de las hojas.....	41
Figura 19	Resultados post-aplicación del vuelo 4 en cerezos, correspondiente al nivel inferior.....	42
Figura 20	Resultados post-aplicación del vuelo 4 en cerezos, correspondiente al nivel medio.....	42
Figura 21	Resultados post-aplicación del vuelo 4 en cerezos, correspondiente al nivel superior.....	43
Figura 22	Fracción de los resultados ya procesados en Excel, en donde la sección celeste muestra los valores exportados desde ImageJ y la sección verde muestra los resultados de los cálculos realizados.....	44
Figura 23	Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento de los impactos/cm ² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel dentro del frutal utilizando un fluido de alta densidad (1,74 g/cm ³).....	48
Figura 24	Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento de los impactos/cm ² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel dentro del frutal utilizando un fluido de media densidad (1,09 g/cm ³).....	49
Figura 25	Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento de los impactos/cm ² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel dentro del frutal utilizando un fluido de baja densidad (1 g/cm ³).....	49
Figura 26	Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento general de la densidad de la mezcla en cerezos frente a los impactos/cm ² recibidos.....	50
Figura 27	Gráfico de barras donde se muestran los impactos/cm ² recibidos en cada nivel del cerezo a una velocidad de 3 m/s.....	51
Figura 28	Gráfico de barras donde se muestran los impactos/cm ² recibidos en cada nivel del cerezo a una velocidad de 4 m/s.....	51

Figura 29	Gráfico de barras donde se muestra la variabilidad existente entre volar a distintas velocidades.....	52
Figura 30	Gráfico de barras donde se compara el área (mm ²) promedio de los impactos tanto en el haz como envés de las hojas volando a 3 y 4 m/s en cerezos.....	53
Figura 31	Gráfico de barras donde se muestra la distribución de los impactos/cm ² en cada nivel del cerezo volando a 2 metros sobre el cultivo.....	54
Figura 32	Gráfico de barras donde se muestra la distribución de los impactos/cm ² en cada nivel del cerezo volando a 3 metros sobre el cultivo.....	54
Figura 33	Gráfico de barras donde se muestra la distribución de los impactos/cm ² en cada nivel del cerezo volando a 4 metros sobre el cultivo.....	55
Figura 34	Gráfico de barras donde se compara la cantidad de impactos/cm ² que se obtuvieron volando a distintas alturas sobre los cerezos.....	56
Figura 35	Gráfico de barras donde se muestra el tamaño promedio (área) que se obtuvo volando a distintas alturas sobre el cultivo.....	57
Figura 36	Gráfico de barras donde se muestra la influencia que tiene la velocidad del viento frente a los impactos/cm ² que llegan a las hojas.....	58
Figura 37	Gráfico de barras donde se muestra la variación de los impactos/cm ² a medida que cambia el rango de humedad relativa.....	59
Figura 38	Impactos/cm ² de una aplicación con agua en cerezos a distintos volúmenes por hectárea, además se incluyen los impactos/cm ² que llegan a nivel de suelo.....	60
Figura 39	Grafica donde se muestra el efecto que tiene la densidad del fluido en los impactos/cm ² recibidos en los kiwis.....	62
Figura 40	Gráfico donde se muestra el efecto que tiene la altura de vuelo en los impactos/cm ² recibidos en los kiwis.....	63
Figura 41	Grafica donde se muestra el efecto que tiene la velocidad de vuelo en los impactos/cm ² recibidos en los kiwis.....	64
Figura 42	Cultivo de pimientos en Vietnam donde se realizó el estudio.....	79

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Densidad final de la mezcla	25
Ecuación 2. Masa de azúcar	27

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA EN LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE VUELO DE DRONES PARA LA FUMIGACIÓN FOLIAR DE FRUTALES

USE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR OPTIMIZING
DRONE FLIGHT PARAMETERS IN FOLIAR SPRAYING OF FRUIT

Palabras clave: Dron fumigador, inteligencia artificial generativa, cobertura.

RESUMEN

La aplicación foliar en frutales mediante el uso de drones fumigadores es una tecnología que se encuentra en constante crecimiento, de hecho, en los últimos años se han realizado numerosos estudios, principalmente en Asia con la finalidad de demostrar la eficiencia de los drones fumigadores en la agricultura, ya sea combatiendo plagas o enfermedades en específico, por lo que encontrar los parámetros óptimos de vuelo de estos equipos, estrecharía la brecha existente sobre el uso correcto de los plaguicidas, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y a la eficiencia en el uso de los agroquímicos en cultivos frutales. Esta investigación tiene como objetivo determinar los parámetros óptimos de vuelo para un dron DJI Agras T20 en frutales de cerezos y kiwis, por lo que se realizaron 18 vuelos por cada especie frutal en las que se combinó la altura, velocidad y densidad del fluido. Luego se cuantificaron los impactos/cm² y el tamaño de los impactos que registraron los papeles hidrosensibles. Posteriormente se entrenó un modelo de lenguaje extenso (LLM) para predecir parámetros de vuelo utilizando los resultados de

esta investigación como aprendizaje para futuras aplicaciones. Esto demostró que estos modelos pertenecientes a la Inteligencia Artificial Generativa si sirven para optimizar vuelos de fumigaciones y son capaces de predecir parámetros de vuelo dándoles condiciones específicas. Se determino que para frutales hilerados la altura optima de vuelo es de 3 metros sobre el cultivo y para parrones es de 4 metros, además, que la velocidad dependía del objetivo de la fumigación, ya que velocidades más lentas favorecen la cobertura por el envés de las hojas. Además, se demostró que la variable mas influyente es la densidad de la mezcla, ya que, a mayor densidad disminuye drásticamente la cobertura, tanto en el haz como envés de las hojas.

USE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR OPTIMIZING DRONE FLIGHT PARAMETERS IN FOLIAR SPRAYING OF FRUIT

Keywords: Spraying drone, generative artificial intelligence, coverage.

SUMMARY

The foliar application of nutrients in fruit trees using spraying drones is an emerging technology experiencing rapid growth. In recent years, numerous studies, primarily conducted in Asia, have explored the efficiency of spraying drones in agriculture, particularly in controlling specific pests and diseases. Optimizing the flight parameters of these devices could help bridge the existing gap in the proper use of pesticides, thereby reducing environmental impact and enhancing the efficiency of agrochemical applications in fruit crops."

This study aims to determine the optimal flight parameters for a DJI Agras T20 drone in cherry and kiwi orchards. A total of 18 flights were conducted for each fruit species, varying altitude, speed, and fluid density. The number of impacts per cm² and the impact size recorded on hydrosensitive paper were then quantified. Subsequently, a large language model (LLM) was trained to predict flight parameters, using the study results as training data for future applications. The findings demonstrate that generative artificial intelligence models can effectively optimize spraying flights and predict flight parameters under specific conditions. The study determined that for row-planted fruit trees, the optimal flight altitude is 3 meters above the crop, while for trellis systems, it is 4 meters. Additionally, flight speed varies depending on the spraying objective, as lower

speeds enhance coverage on the underside of leaves. Furthermore, the results indicate that the most influential factor is the mixture density, as higher density significantly reduces coverage on both the upper and lower leaf surfaces.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión es aquella que se basa en el uso de tecnologías avanzadas con la finalidad de optimizar la gestión de los cultivos mediante el uso de datos detallados (*¿Qué Es la Agricultura de Precisión?*, 2024). De esta forma permite al agricultor recopilar información específica para tomar decisiones precisas, eficientes y acorde a la etapa de producción en que se encuentre el cultivo. A partir de esta información es posible, entre otras tareas segmentar el predio agrícola con la finalidad de atender sus necesidades de acuerdo con sus requerimientos específicos; lo que permite un aumento de la productividad de los cultivos y la disminución del impacto ambiental (*7 Aplicaciones de la Agricultura de Precisión | BASF Chile*, s. f.).

La agricultura de precisión ha tenido el potencial de transformar significativamente las prácticas agrícolas, lo que ha permitido un uso más eficiente de los recursos naturales y una mejora en la rentabilidad de las explotaciones agrícolas (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017).

Una de las herramientas clave en este ámbito ha sido el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT), ampliamente conocido como drones. Estos equipos mejoraron la forma en que se recopilan datos sobre los cultivos y la realización de tareas agrícolas. En general, estos equipos pueden llevar a bordo cámaras y sensores avanzados, que permiten monitorear la salud de las plantas, evaluar el estado del suelo, realizar fumigaciones precisas, realizar

conteo de plantas, medir la clorofila del cultivo, evaluar estrés hídrico, entre otras tareas (Pino, 2019).

Los drones pueden volar sobre grandes áreas capturando datos detallados, lo que proporciona a los agricultores una visión precisa del estado de sus cultivos. Esta capacidad es esencial para implementar prácticas de agricultura de precisión, ya que permite detectar problemas sitio-específicos y responder de manera oportuna y eficiente frente a las necesidades requeridas por el cultivo. En particular, para tareas de aplicación de productos agroquímicos, los drones pueden ser equipados con sistemas de pulverización para una aplicación uniforme y precisa, ajustando la cantidad de producto según las necesidades específicas de cada área del campo (Zhang & Kovacs, 2012).

Una de las principales ventajas que presenta la fumigación utilizando drones con sistemas de pulverización es la posibilidad de realizar aplicaciones de bajo volumen, con alta precisión y de forma muy uniforme dentro del campo, lo que permite lograr una cobertura mayor a 70 impactos por cm^2 , medida a una tasa de 15 L/Ha (FAO, 1988, citado por AGROSMART, s.f.).

Comparativamente, los métodos tradicionales de fumigación, como el uso de pulverizadores manuales (bombas de espalda) o acoplados a tractores, a menudo resultan en una cobertura desigual del follaje, lo que afectaba la eficiencia de la aplicación debido a la mala distribución del plaguicida. Esto redundaba en una sobreaplicación o subaplicación de algunas áreas del predio, lo que no solo reduce la eficacia del tratamiento, sino que también aumenta el

desperdicio de productos químicos y el riesgo de provocar contaminación ambiental (Zhang et al., 2016).

Por otra parte, la aplicación manual o mediante equipos terrestres es costosa, tanto en tiempo como en mano de obra, especialmente en campos grandes o de difícil acceso. Además, este tipo de tareas agrícolas exponer a los trabajadores a riesgos debido a la manipulación de productos químicos. (Gil et al., 2013).

Con los avances en el desarrollo tecnológico en la planificación de los vuelos de dron, algunos equipos (e.g., el DJI serie Agras, Yamaha Rmax y XAG serie P), incorporan una función que permite leer mapas de prescripción y fumigar solamente áreas específicas (i.e aplicación sitio-específico)

Estos dispositivos pueden volar sobre los cultivos aplicando productos químicos de manera precisa y uniforme, ajustando así la cantidad de producto en función de las necesidades específicas de cada sector dentro del campo (Sankaran et al., 2015).

Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el dron DJI Agras T20, diseñado específicamente para aplicaciones agrícolas. Este dron puede transportar hasta 20 litros de líquido y está equipado con boquillas de alta precisión que garantizan una distribución uniforme del producto. Además, el DJI Agras T20 cuenta con tecnología de radar omnidireccional que permitía detectar

obstáculos de forma precisa, mejorando la seguridad y la eficiencia de las aplicaciones (DJI, 2021).

Los drones de aspersión, como el DJI Agras T20, también juega un papel crucial en la distribución del producto. Esto se debe a que, durante el vuelo, estos rotores producen un efecto de vórtice, lo cual puede ayudar a mejorar la penetración del producto. Sin embargo, este efecto también puede causar una dispersión no deseada del agroquímico si no se controla adecuadamente. Por este motivo es fundamental ajustar la altura y la velocidad de vuelo de los drones para minimizar la deriva del producto y maximizar la eficacia de la aplicación (Huang et al., 2015).

En lo que concierne a los sensores de observación a bordo de los drones, lo que tienen un uso más extendido en el contexto agrícola son las cámaras ópticas RGB, multiespectral y cámaras termográficas.

Las cámaras RGB (rojo, verde y azul) capturan información en el espectro visibles de la luz (380 - 780 nm), proporcionando imágenes para análisis digital y visual. Sus principales usos en la agricultura son la topografía, la generación del modelo 3D del campo y el monitoreo general del mismo.

La cámara multiespectral es un dispositivo de captura de imágenes diseñado para registrar información en diferentes bandas del espectro electromagnético. Estas bandas no solo incluyen el espectro visible (lo que el ojo humano puede

ver), sino también otras longitudes de onda, como el infrarrojo cercano (NIR) o ultravioleta, dependiendo de la aplicación.

La cámara multispectral es un dispositivo de captura de imágenes diseñado para registrar información en diferentes bandas del espectro electromagnético. Estas bandas no solo incluyen el espectro visible (lo que el ojo humano puede ver), sino también otras longitudes de onda, como el infrarrojo cercano (NIR) o ultravioleta, dependiendo de la aplicación. Las cámaras multispectrales que permiten detectar plagas, enfermedades, deficiencias nutricionales y otras condiciones que pueden afectar la salud de las plantas. Además, pueden proporcionar información precisa del desarrollo fenológico de los cultivos, lo que permite ajustar las aplicaciones de fertilizantes y pesticidas de manera precisa. Adicionalmente se pueden identificar áreas con estrés hídrico, por lo que se pueden tomar decisiones referentes al riego de forma oportuna (Javi, 2023).

Respecto al aspecto legal del uso de los drones en Chile, se deben cumplir ciertos requisitos frente a dos instituciones:

A) Dirección general de aeronáutica civil (DGAC)

La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) es el organismo que regula la actividad aérea en el país y, por ende, la operación de drones o RPAS, por lo cual desde abril del año 2015 cuenta con dos normativas aeronáuticas, el DAN 151 y DAN 91.

En ellas se establece, entre otras cosas, que el operador debe contar con la credencial de piloto a distancia de RPAS, con la tarjeta de registro del Dron y la autorización de operación otorgada por la DGAC. (¿Cómo Operar un Dron En Chile?, s. f.)

En el caso de una empresa que realizara trabajos aéreos, se aplica la normativa aeronáutica DAN 119, que establece que todos los operadores que realicen trabajos aéreos con RPA/Drones, tales como fotografía, fumigación u otros señalados Trabajos Aéreos, deben conformarse como empresa aérea y, por lo tanto, contar con un Certificado de Operador Aéreo (AOC).

Para lo anterior, deben atenerse a lo que especifica la DAN 119, que se relaciona con la certificación de empresas que optan al AOC, y que aplica, además, para todo operador, nacional o extranjero, que deseara realizar servicios con aeronaves pilotadas a distancia RPA/Drones (Academia de Drones de Chile, 2023).

B) Servicio agrícola y ganadero (SAG).

Puesto que en el área de las fumigaciones agrícolas se trabaja con plaguicidas, era necesario capacitarse como Aplicadores de Plaguicidas Capacitados.

Para superar las deficiencias en el uso y manejo de plaguicidas, el SAG ofrece un curso de capacitación sobre el manejo y uso de plaguicidas agrícolas.

A las personas que aprueban dicho entrenamiento, se les entrega una credencial que los reconoce como Aplicadores de Plaguicidas Capacitados.

El 17 de diciembre de 2017, entró en vigencia la resolución exenta N.º 2029/2017 (Diario Oficial 20/06/2017), que establece los requisitos y contenidos del nuevo Curso General de Capacitación sobre Manejo y Uso de Plaguicidas Agrícolas. Este nuevo marco referencial identifica los aspectos generales asociados al manejo y uso de plaguicidas, como también la normativa legal vigente, situaciones de riesgo para la salud, los distintos grupos de plaguicidas, las condiciones de manipulación y formas de aplicación, concepto de manejo integrado de plagas y enfermedades y Buenas Prácticas Agrícolas en relación con esta materia. (Aplicadores de Plaguicidas | SAG, s. f.)

En la actualidad existen pocos estudios sobre el correcto uso de drones agrícolas. En julio del 2022 la empresa DJI, que es líder de mercado en la industria de los aviones no tripulados civiles, realizó un estudio de la eficacia de las aplicaciones de plaguicidas utilizando un drone DJI Agras T30, en distintos países tanto de Europa como de Asia. El primer ensayo se realizó sobre el control de la araña roja de los cítricos, en la que, dentro de todos los objetivos de esa prueba, se determinó que el tamaño de la gota óptima producida por el rociado del drone debía estar entre los 40 y 100 μm (micrón). Este tamaño óptimo de gotas se obtuvo mediante la fumigación con insecticida

+ agente naranja (acarazol SC). Un segundo ensayo consistió en una prueba de control de *Spodoptera litura* en un campo de maíz, en la que se concluyó que la cantidad de depósito de la solución aplicada con el DJI Agras T30 fue solo el 4,6% de la del pulverizador de mochila, pero el efecto de control podría alcanzar el mismo nivel que el del pulverizador de mochila.

Una segunda investigación realizada por la Universidad Estatal de Ohio, en 2024, en la que se analizaron las limitaciones de los drones de fumigación y los obstáculos para su adopción, concluyó que el uso de drones para pulverizar pesticidas es relativamente nuevo, la cantidad de datos de investigación publicados y creíbles que evalúan el rendimiento de los drones pulverizadores y lo comparan (por ejemplo, eficacia y deriva de la pulverización) con los pulverizadores terrestres y las aeronaves convencionales es muy limitada (Li et al., 2020; Li et al., 2021; Biglia, et al., 2022; Dubuis et al., 2023; Herbst et al., 2023; Huang et al, 2022). Algunos de los datos publicados sobre el rendimiento de los drones pulverizadores pueden no ser utilizables y pueden ser contradictorios debido a la amplia variación de los parámetros de diseño entre los drones que se prueban. Se necesitan investigaciones adicionales y datos publicados para hacer declaraciones concluyentes sobre el rendimiento de los pulverizadores con drones en comparación con los pulverizadores aéreos y terrestres convencionales (parr. 29).

Determinar parámetros óptimos de vuelo para ciertos tipos de cultivos frutales (hilerados o en forma de parrón) en un determinado periodo fenológico del cultivo, resulta de interés desde el punto de vista de la eficiencia de la fumigación. Sin embargo, del análisis bibliográfico que se realizó, respecto de la fumigación agrícola con sistemas de pulverización a bordo de drones, no se encontró una metodología que permitiera determinar los parámetros de vuelo adecuados para realizar estas labores, y que tuviera en consideración características tanto del UAV como del fluido o plaguicida.

Este trabajo buscó abordar la problemática existente sobre cuáles eran los parámetros óptimos de vuelo dadas una serie de condiciones tanto ambientales como operacionales para frutales del tipo hilerados como en forma de parrón. Adicionalmente, se aplicó un modelo de lenguaje de gran tamaño (LLM) que utilizara los resultados de esta investigación como aprendizaje para futuras aplicaciones foliares sobre frutales. De esta forma se intentó contribuir a un mejor uso y aprovechamiento de los agroquímicos, resultado de la correcta aplicación de plaguicidas y la disminución del impacto ambiental.

2. HIPÓTESIS

La densidad del fluido, mojamiento, altura y velocidad de vuelo del dron afectan significativamente la distribución y eficacia de la fumigación foliar en frutales, siendo posible optimizar estos parámetros para maximizar los impactos tanto en el haz como el envés de las hojas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar los parámetros óptimos de vuelo (altura y velocidad) de un dron DJI Agras T20, evaluar su cobertura y cuantificar los impactos por cm² que son distribuidos mediante la fumigación foliar tanto en cultivos hilerados como parrones.

3.2 Objetivos específicos

- Implementar una metodología que permita analizar los parámetros óptimos de vuelo del dron fumigador para cada tipo de frutal (hilerados y parrones).
- Utilizar un LLM para determinar los parámetros de vuelo (altura y velocidad) de un dron para realizar aplicaciones de agroquímicos.
- Comparar los resultados obtenidos con recomendaciones de fabricantes de plaguicidas y estudios similares sobre aplicación foliar en frutales.

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

En la Figura 1, se observa donde se desarrolló esta investigación, la cual fue en el Liceo Agrícola El Carmen, ubicado en el kilómetro 140 de la carretera longitudinal sur, a dos kilómetros de la ciudad de San Fernando, Sexta Región de Chile. En la Figura 2 se observa una imagen satelital del Liceo Agrícola, el cual cuenta con aproximadamente 56 hectáreas agrícolas útiles, además, posee una estación meteorológica a escasos metros de donde se realizaron los vuelos experimentales. Las variedades de cultivos frutales en producción existentes dentro del campo son: cerezos, arándanos, kiwis, viña y nogales.

La razón por la que se llevó a cabo el estudio en este lugar fue por las prestaciones que ofrecen, ya que los frutales de nuestro interés están bien formados, no presentan enfermedades y tampoco estrés hídrico, por lo que los resultados son más representativos de acuerdo con la especie frutal.



Figura 1. Ubicación del sitio de estudio dentro del mapa geográfico. Imagen procesada en el software QGIS.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Imagen satelital del lugar donde se realizaron los vuelos experimentales. El polígono azul corresponde a los frutales de cerezos y el polígono amarillo corresponde a los kiwis. El sistema de georeferenciación está dado por el Datum WGS 84 huso 18 sur y fue procesado en el software QGIS.

Fuente: Elaboración propia

La parcela de cerezos tiene un área de 3,3 hectáreas, son de la variedad Santina en patrón Colt, su sistema de formación es en KGB (Redagrícola, 2023), la edad del cultivo es de 4 años y su altura es de 2,3 metros. El marco de plantación es de 4 metros entre hilera y 2 metros sobre hilera, obteniéndose así un total de 1.250 plantas/há. En la Figura 3 se observa que los cerezos fueron plantados en camellones y su sistema de riego es por goteo.



Figura 3. Tipo de formación en KGB de los cerezos y sus tres niveles (inferior, medio y superior) en el sitio de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los kiwis, es una parcela de 6,8 hectáreas en etapa adulta, su marco de plantación es de 4,5 metros entre hilera y 3 metros sobre hilera. La altura del alambrado es de 2,3 metros, pero los polinizantes tienen una altura mayor a la de la estructura, la cual alcanza los 2,5 metros, siendo esta la altura máxima del cultivo, tal como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Estructura en forma de parrón y los niveles superior e inferior de los kiwis en el sitio de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Para que el dron fumigador realice los vuelos de forma totalmente automática, es necesario crear un mapa donde se identifica el área de vuelo y los parámetros asociados. El área de vuelo se obtiene recorriendo con el control del dron el perímetro del área de estudio; y los parámetros que se solicitan al momento de crear el mapa son la distancia entre pasada del dron, la cual se determinó en 5 metros; el margen de seguridad, el cual se determinó en 2 metros y la distancia al borde de los obstáculos, la cual en este caso al no existir obstáculo se le asignaron los 5 metros (predeterminado). En la Figura 5 se muestra uno de los mapas creados en la parcela de cerezos.



Figura 5. Mapeado del área de estudio en cerezos para que el dron realice la aplicación de forma automática.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se observa el dron fumigador DJI Agras T20 en condiciones óptimas para el despegue, es decir, su estanque está a su máxima capacidad con agua y el mapa de vuelo se encuentra cargado.



Figura 6. Imagen donde se muestra el dron fumigador, la antena RTK y la base de despegue del Mavic 3M.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Materiales e implementación

1. DJI Agras T20: Este equipo es un dron que se utiliza en la agricultura para fumigar una gran variedad de cultivos agrícolas. Su estanque tiene una capacidad de 20 litros, un tiempo de vuelo de 10 minutos con su estanque a máxima capacidad y de 15 minutos con el estanque vacío. Su velocidad máxima de vuelo es de 10 m/s y fumigando es de 7 m/s con un ángulo de inclinación máximo de 15°. Su control remoto está equipado con una doble batería (interna y externa), la cual permite

realizar fumigaciones a campos de gran extensión de forma continua y tiene la particularidad de que se pueden cambiar sus boquillas para así poder generar gotas de distintos tamaños.

Este dron se utilizó para realizar la totalidad de los vuelos de prueba tanto en los cerezos como en los kiwis, rociando sobre los cultivos una mezcla de agua y azúcar.

2. Papeles Hidrosensibles: Este tipo de papel tiene la particularidad de que cambia de color al entrar en contacto con el agua, lo que permite registrar de forma exacta las zonas que reciben los impactos (gotas de color azul). Esto permite analizar la calidad y uniformidad de las fumigaciones agrícolas tanto aéreas como terrestres.

Estos papeles se utilizaron para evaluar la cobertura del DJI Agras T20, para diferentes parámetros y condiciones de vuelo.

4.3. Metodología para Objetivo 1:

Para poder implementar una metodología que permita analizar los parámetros óptimos de vuelo del dron fumigador DJI Agras T20 tanto para los cerezos como los kiwis, fue necesario definir las condiciones del diseño experimental.

Una de las principales corresponde al volumen de mojamiento (L/há), la cual es la cantidad de agua rociada en una superficie de una hectárea.

Tradicionalmente los drones se caracterizaban por fumigar con bajos volúmenes de mojamiento. Sin embargo, y dado lo reciente del desarrollo de

la aplicación de agroquímicos con drones, no existen dosis o indicaciones de mojado específico para este tipo de plataformas. Sí existen casos en los que la etiqueta del producto incluye un cuadro para aplicaciones aéreas (referidas a aviones o helicópteros), donde en la mayoría de los casos los volúmenes de mojado estaban entre 50 y 80 litros por hectárea.

Considerando la tecnología de pulverización conocida como ultra bajo volumen (ULV) (Tabla 1) se fijó el volumen de mojado en 40 L/ha para ambos cultivos (*Drones Pulverizadores*, s. f.).

Tabla 1. Tipos de sistemas de pulverización según la cantidad de agua utilizada

Pulverización		Cultivos	
		Herbáceos	Arbóreos
HV	Volumen normal	>800	>1.500
MV	Volumen medio	250-800	600-1.500
LV	Bajo volumen	75-250	250-600
VLV	Muy bajo volumen	7,5-75	50-250
ULV	Ultrabajo volumen	<7,5	<50

Fuente: (*Drones Pulverizadores*, s. f.)

Una vez determinado el mojado que se utilizó tanto para los cerezos como los kiwis (40 L/há), se consideró la variable densidad del producto a aplicar. En la Tabla 2 y 3, se presentan tablas que muestran los agroquímicos más utilizados tanto en cerezos como en kiwi y las densidades del producto junto con el mojado que recomendaba el fabricante.

Tabla 2. Agroquímicos comunes del cerezo

Producto Químico	Tipo	Densidad (g/cm ³)	Mojamiento Óptimo (L/ha)
Imidan 70-W (Phosmet)	Insecticida	0,24	1.500
Movento 100 SC (Spirotetramat)	Insecticida	1,08	1.500
Actara 25 WG (Thiamethoxam)	Insecticida	0,52	2.000
Captan 80 WG (Captan)	Fungicida	0,63	1.500
Ultrasoluble 20-20-20	Fertilizante Foliar	1,4	300
Wuxal Calcio	Fertilizante Foliar	1,48	n/e
YaraVita FRUTREL	Fertilizante Foliar	1,59	200
Dormex	Fitorregulador	1,06	1.500
Cuprobordoles	Fungicida	2,5	1.500

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Agroquímicos comunes del kiwi

Producto Químico	Tipo	Densidad (g/cm ³)	Mojamiento Óptimo (L/ha)
Serenade ASO (Bacillus subtilis)	Fungicida	1,05	2.000
Wuxal Aminocal	Fertilizante Foliar	1,3	2.000
Movento 100 SC (Spirotetramat)	Insecticida	1,08	2.000
Switch 62.5 WG	Fungicida	0,54	1.500
Selecron 730 EC	Insecticida	1,2	1.500
MIMIC 2F	Insecticida	1,06	2.000

Fuente: elaboración propia

En cuanto a las variables que se controlaron en esta investigación, fueron la altura de vuelo sobre el cultivo, la velocidad del dron y la densidad del producto.

Las alturas de vuelo se fijaron en 3 niveles: bajo (2 metros sobre el cultivo), medio (3 metros sobre el cultivo) y alto (4 metros sobre el cultivo). Las razones

de por qué el dron no voló en su nivel bajo más cerca del cultivo, fueron que en alturas de un metro sobre el cultivo muchas veces detectaba la parte más alta del frutal como un obstáculo; adicionalmente, era riesgoso ya que alguna rama que quedara desde la poda y que fuera muy fina como para verla a simple vista podía impactar con el dron.

En cuanto a las velocidades de vuelo se consideró una velocidad lenta (3 m/s) y una velocidad media (4 m/s). Estas velocidades permitieron analizar el efecto vórtice que producía el dron frente a la cantidad de impactos por cm^2 presentes en los papeles hidrosensibles. Las razones de por qué no se realizaron vuelos a mayor velocidad fueron las limitaciones del dron, ya que, con un volumen por hectárea de 40 litros, una distancia entre pasada del dron de 5 metros y las boquillas utilizadas para la aplicación (SX110015VS), se tenía una restricción técnica de velocidad máxima de vuelo (4 m/s).

En términos de la densidad, a partir de la información recogida en las Tablas 2 y 3 de densidad de productos químico, se realizó un análisis de los percentiles, que entregó 3 niveles de densidad: baja densidad ($0,48 \text{ g/cm}^3$), media densidad ($1,09 \text{ g/cm}^3$) y alta densidad ($1,74 \text{ g/cm}^3$).

Estos 3 niveles de densidad se determinaron con el propósito de utilizar agua con densidad modificada y asimilarla a la densidad representativa de los productos químicos.

Para la modificación de la densidad del agua, se utilizó azúcar común para aumentar la densidad del agua. En el caso de la densidad baja ($0,48 \text{ g/cm}^3$), se reemplazó por agua sin modificar (densidad de 1 g/cm^3).

Para determinar la densidad final de la mezcla (agua + azúcar) se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Densidad final de la mezcla

$$\rho_f = \frac{(\rho_1 * V_1 + \rho_2 * V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad [1]$$

Donde:

ρ_f : densidad final de la mezcla (g/cm^3)

ρ_1 : densidad del agua (g/cm^3)

V_1 : volumen del agua (cm^3)

ρ_2 : densidad obtenida en los percentiles (g/cm^3)

V_2 : volumen del plaguicida (cm^3)

Considerando un volumen de mojado de 40 L/ha , una densidad del agua de 1 g/cm^3 y que se utilizó un promedio de 2 L de producto (supuesto volumen de plaguicida), se calculó la densidad final de la mezcla de agua con producto ($1,09 \text{ g/cm}^3$ y $1,74 \text{ g/cm}^3$).

$$\rho_{f2} = \frac{(1 \text{ g/cm}^3 * 40.000 \text{ cm}^3 + 1,09 \text{ g/cm}^3 * 2.000 \text{ cm}^3)}{(40.000 \text{ cm}^3 + 2.000 \text{ cm}^3)}$$

$$\rho_{f2} = 1,0043 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{f3} = \frac{(1 \text{ g/cm}^3 * 40.000 \text{ cm}^3 + 1,74 \text{ g/cm}^3 * 2.000 \text{ cm}^3)}{(40.000 \text{ cm}^3 + 2.000 \text{ cm}^3)}$$

$$\rho_{f2} = 1,035 \text{ g/cm}^3$$

Cabe destacar que la densidad final 1 (ρ_{f1}) no se calculó, puesto que correspondía a una aplicación con agua. Una vez obtenidas las densidades finales de la mezcla (agua + plaguicida), se pudo determinar el volumen de azúcar que se necesitaba para igualar esas densidades, por lo que se consideró una densidad del azúcar de $1,6 \text{ g/cm}^3$, (Azúcar lansa, s. f.) y de esta forma se obtuvo lo siguiente:

$$1,0043 \text{ g/cm}^3 = \frac{(1 \text{ g/cm}^3 * 40.000 \text{ cm}^3 + 1,6 \text{ g/cm}^3 * V_2 \text{ cm}^3)}{(40.000 \text{ cm}^3 + V_2 \text{ cm}^3)}$$

$$V_2 = 288,7 \text{ cm}^3$$

$$1,035 \text{ g/cm}^3 = \frac{(1 \text{ g/cm}^3 * 40.000 \text{ cm}^3 + 1,6 \text{ g/cm}^3 * V_3 \text{ cm}^3)}{(40.000 \text{ cm}^3 + V_3 \text{ cm}^3)}$$

$$V_3 = 2.477,9 \text{ cm}^3$$

Puesto que el azúcar se encontraba en estado sólido, se utilizó la siguiente ecuación para obtener la masa:

Ecuación 2. Masa de azúcar

$$m = d * v \quad [2]$$

Donde:

m: masa de azúcar (g)

d: densidad del azúcar (g/cm³)

v: volumen de azúcar (cm³)

Reemplazando los valores de volumen 2 y volumen 3 obtenidos anteriormente (V_2 y V_3 respectivamente), se obtuvo lo siguiente:

$$m_2 = 1,6 \frac{g}{cm^3} * 288,7 cm^3 = 461,9 g$$

$$m_3 = 1,6 \frac{g}{cm^3} * 2.477,9 cm^3 = 3.964,6 g$$

Una vez obtenidos los valores de las masas de azúcar utilizando la ecuación 3, se pudo observar que, para igualar las densidades en un volumen de 40 litros de agua, en el caso de los vuelos con densidad de 1,09 g/cm³ se necesitaron 461,9 gramos de azúcar; mientras que en el caso de los vuelos con densidad de 1,74 g/cm³, se necesitaron 3.963,6 gramos de azúcar. Estas masas de azúcar fueron calculadas con el supuesto de que el volumen del plaguicida es de 2 litros (este valor no se pudo fijar de forma exacta debido a que tanto los foliares, insecticidas y funguicidas tenían distintas dosificaciones).

Una vez establecidas las variables, se realizó la planificación de vuelo, la cual se representa en la Tabla 4.

Tabla 4. Diseño experimental de los vuelos para cada especie frutal.

Vuelo	Altura (m)	Velocidad (m/s)	Densidad (g/cm ³)
1	2	3	1
2	2	3	1,09
3	2	3	1,74
4	2	4	1
5	2	4	1,09
6	2	4	1,74
7	3	3	1
8	3	3	1,09
9	3	3	1,74
10	3	4	1
11	3	4	1,09
12	3	4	1,74
13	4	3	1
14	4	3	1,09
15	4	3	1,74
16	4	4	1
17	4	4	1,09
18	4	4	1,74

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que en cada vuelo se recopiló información sobre los parámetros meteorológicos, en donde se incluían variables como la velocidad del viento a 2 metros de altura, la humedad relativa y la temperatura.

Una vez finalizado un vuelo, se recolectaron los papeles hidrosensibles de los frutales, se fotografiaron y fueron analizados en el software de código abierto ImageJ (*ImageJ*, s. f.).

La medida de los papeles hidrosensibles que se utilizaron es la denominada medida estándar, de 26 x 76 (mm). En el caso de los cerezos, se utilizaron 6 papeles hidrosensibles por árbol, distribuidos en 3 niveles. En la parte superior se ubicaron 2 papeles hidrosensibles, uno orientado hacia arriba (haz), y otro orientado hacia abajo (envés). Esto se repitió tanto en la parte media como en la baja del árbol (nivel medio e inferior respectivamente), de esta forma se logró analizar con mayor exactitud los impactos/cm² y el área de estos impactos que llegaban a las dos caras de las hojas.

Para los kiwis, se utilizaron 4 papeles hidrosensibles distribuidos equitativamente en 2 niveles. El primer nivel correspondía a la parte superior del parrón, donde la estructura sostenía las hojas y frutos; mientras que el segundo nivel correspondía a la parte inferior más cercana al suelo y al tronco del parrón. Al igual que en los cerezos, se ubicaron tanto en el haz como en el envés de las hojas para evaluar la cobertura en las dos caras de las hojas.

Tabla 5. Distribución de los papeles hidrosensibles.

Frutal	Nivel de copa	Cantidad de papeles por nivel	Total de papeles por árbol/parrón	Número de árboles/parrones	Total de papeles
Cerezo	Superior	2			
Cerezo	Medio	2	6	2	12
Cerezo	Inferior	2			
Kiwi	Superior	2	4	2	8
Kiwi	Inferior	2			

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la selección de los árboles para colocar los papeles hidrosensibles, se seleccionaron árboles de distintas hileras y que a su vez, estén lejos de los extremos de la hilera, esto con el objetivo de garantizar de que el dron fumigador vuele a una velocidad constante y con un caudal fijo, ya que en las cabeceras de las hileras el dron disminuye su velocidad y también su caudal, afectando la trayectoria del efecto vórtice.

Una vez terminado el vuelo, se recogieron los papeles cuidadosamente sin tocar la parte superior, luego se fotografiaron y almacenaron en bolsas identificadas para cada vuelo. Este procedimiento se realizó para los 18 vuelos en cada frutal, por lo que se necesitaron un total de 360 papeles hidrosensibles.

Una vez obtenida la totalidad de los papeles hidrosensibles, se procedió a analizarlos para evaluar la cobertura foliar, cuantificar los impactos por cm^2 y determinar el tamaño de gotas promedio. Para esto se utilizó el software ImageJ, el cual es un software de código abierto escrito en Java, por lo cual es compatible con múltiples plataformas como Windows, macOS y Linux. Fue desarrollado en 1987 por el Instituto Nacional de Salud (NIH) (Schroeder et al., 2020).

El flujo de trabajo implementado en ImageJ fue el siguiente:

1. Cargar la imagen y Escalar: Se cargó la imagen desde la carpeta previamente identificada, luego se trazó una línea recta por el lado más

largo del papel hidrosensible y se escaló la imagen identificando esa línea como los 76 mm de largo que tiene el papel.

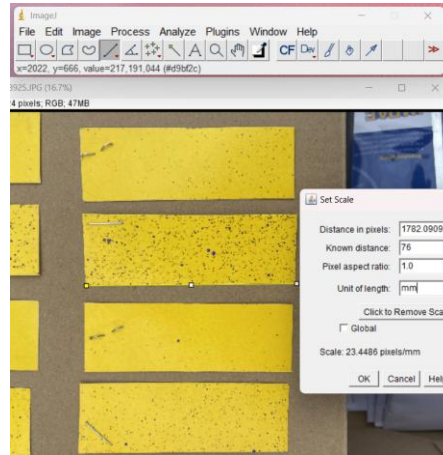


Figura 7. Imagen escalada donde se muestran los 76 mm correspondientes al largo máximo del papel.

Fuente: Elaboración propia.

2. Área de estudio y binarización de imagen: Una vez escalada la imagen, se procede a convertirla en una imagen binaria (en colores blanco y negro). Luego para determinar el área de estudio dentro del papel hidrosensible se utilizó la función de rectángulo, la cual debía abarcar la mayor área posible descontando el corchete para no interrumpir el análisis. Finalmente se duplicó este rectángulo o fracción de la imagen original para ser analizado de forma libre (sin corchetes o sus orificios).

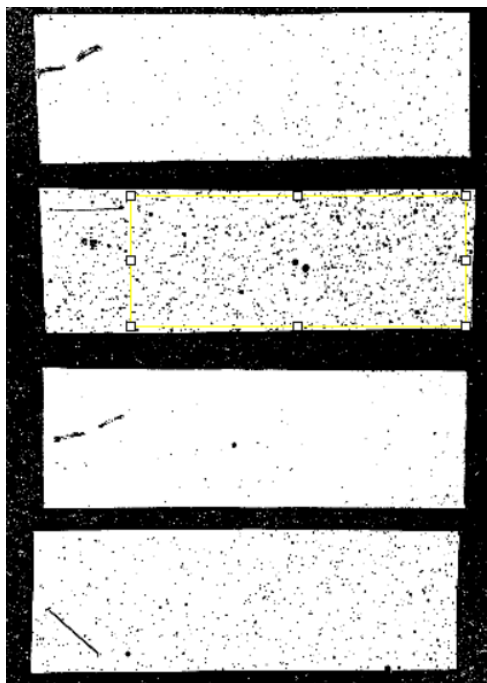


Figura 8. Imagen binarizada, donde se observa el fondo blanco y los impactos en color negro. Adicionalmente se identifica el área de estudio de uno de los cuatro papeles presentes en la imagen.

Fuente: Elaboración propia.

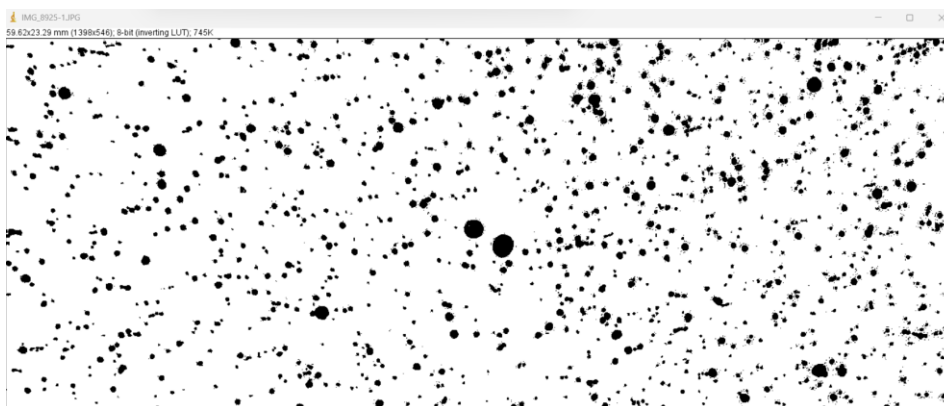


Figura 9. Duplicación de imagen binaria donde se muestra la sección del papel hidrosensible donde se realizarán los cálculos.

Fuente: Elaboración propia.

3. Cuantificación: Se establecieron las medidas de cálculos como la cuantificación e identificación de cada impacto dentro del área de estudio en la imagen binaria, además se seleccionaron otras medidas como diámetro y perímetro para luego ser analizadas.
- 4.

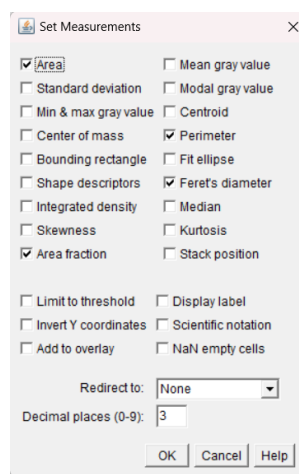


Figura 10. Opciones de medidas que se pueden obtener al utilizar ImageJ. Las medidas seleccionadas corresponden a las necesarias para cuantificar los impactos/cm² y otros cálculos de interés.

Fuente: Elaboración propia.

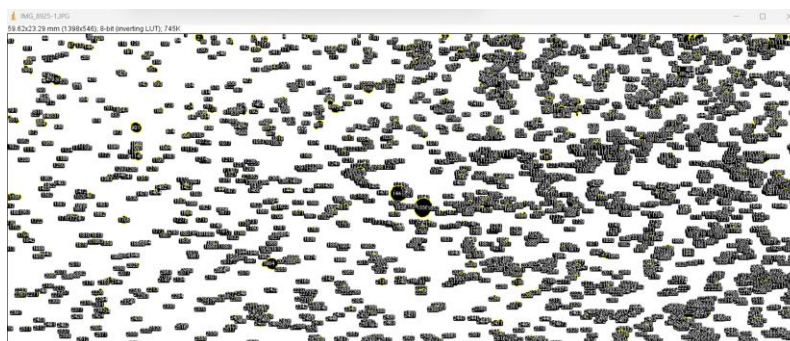


Figura 11. Imagen binaria cuantificada, en la que se detectaron 2.661 impactos en toda el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Results								
File	Edit	Font	Results					
	Area	Perim.	Feret	%Area	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret
1	0.007	0.352	0.176	100	312	0	165.964	0.043
2	0.295	2.074	0.726	100	331	1	139.764	0.554
3	0.091	1.161	0.459	100	428	2	158.199	0.324
4	0.025	0.703	0.302	100	488	0	98.130	0.128
5	0.164	1.672	0.689	100	528	6	21.801	0.341
6	0.009	0.387	0.176	100	618	0	165.964	0.085
7	0.036	0.763	0.325	100	639	0	156.801	0.171
8	0.160	1.577	0.621	100	765	0	164.055	0.341
9	0.004	0.181	0.095	100	811	0	153.435	0.043
10	0.004	0.181	0.095	100	814	0	153.435	0.043
11	0.053	1.161	0.381	100	843	0	116.565	0.256
12	0.246	2.290	0.801	100	887	2	154.799	0.469
13	0.007	0.241	0.121	100	1022	0	135.000	0.085
14	0.005	0.327	0.154	100	1059	3	56.310	0.076
15	0.002	0.121	0.060	100	1088	0	135.000	0.043
16	0.002	0.121	0.060	100	1100	0	135.000	0.043
17	0.060	1.512	0.420	100	1102	5	23.962	0.256
18	0.016	0.653	0.249	100	1112	0	120.964	0.128
19	0.078	1.235	0.514	100	1116	8	41.634	0.305
20	0.009	0.302	0.154	100	1178	2	33.690	0.085
21	0.002	0.121	0.060	100	1188	0	135.000	0.043
22	0.677	5.780	1.632	100	1191	13	19.855	0.760
23	0.002	0.121	0.060	100	1268	0	135.000	0.043
24	0.098	1.864	0.666	100	1294	10	39.806	0.386

Figura 12. Fracción de los resultados entregados por ImageJ. En esta imagen se muestran 24 de los 2.661 impactos cuantificados.

Fuente: Elaboración propia.

5. Cálculos en Excel: Una vez analizadas las partículas, se exportaron a una planilla de Excel para luego calcular los impactos/cm², área promedio (mm²) y diámetro (micras).

Este procedimiento se realizó para cada papel hidrosensible utilizado en los vuelos, por lo que el análisis completo de todos los vuelos tarda bastante. Por esta razón, se creó una plantilla de Excel en la que se utilizaron varias funciones que permitieron disminuir el tiempo de análisis en cada imagen.

4.4. Metodología objetivo 2:

En una planilla Excel se consolidaron todos los resultados obtenidos del objetivo 1. Estos resultados corresponden al análisis de todas las imágenes obtenidas de los papeles hidrosensibles (impactos/cm², área y diámetro de los impactos), para cada especie frutal.

El LLM (Large Language Model) que se utilizó es el de ChatGPT-4o, el cual se basa en la arquitectura de GPT-4, un modelo de lenguaje de gran escala, las cuales presenta las siguientes características: Utiliza arquitectura de redes neuronales tipo Transformer; es un modelo de lenguaje autorregresivo; su entrenamiento es mediante aprendizaje profundo, es decir, se entrena con billones de tokens de texto provenientes de múltiples fuentes.

Los LLM permiten analizar datos y evaluar modelos de predicción como Random Forest, Gradient Boosting y SVR (Support Vector Regression) (Brandbits & Brandbits, 2024).

Adicionalmente, es capaz de realizar un análisis y razonamiento tanto matemático como estadísticos de los datos ingresados. Para este caso de estudio, se ingreso el consolidado de los resultados en una planilla, en la que además se adjuntaron los parámetros ambientales que medidos desde la estación meteorológica al momento de realizar cada vuelo (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa).

Para facilitar la lectura, y evitar ambigüedades en la IA, en el archivo de Excel se omitieron las celdas combinadas y celdas en blanco, se ordenó la tabla de forma vertical y se especificaron las unidades de medida de cada variable en la misma celda de la columna asociada y entre paréntesis.

Una vez cargado el archivo Excel en el LLM, se solicitó analizar los resultados con la finalidad de maximizar tanto los impactos/cm² y el área de los impactos. Posteriormente, se procedió a cruzar los resultados entre sí, por ejemplo, generando análisis y gráficos que evaluaran la densidad del fluido con los impactos/cm², el comportamiento que tiene tanto la altura como la velocidad de vuelo frente a los impactos/cm², como influyen los parámetros ambientales en la calidad y distribución de la fumigación.

Tras entregar la información a la IA, y mediante el uso de los prompts (Pepinosa, 2023), se le solicitó a la IA predecir los parámetros de vuelo óptimos, considerando condiciones específicas de densidad del fluido, temperatura, viento, humedad relativa, tipo de frutal y altura máxima del frutal. De esta forma, ChatGPTo4 recomendó un método que permitiera pronosticar los mejores parámetros de vuelo para esas condiciones futuras.

4.5. Metodología objetivo 3.

Se realizó una comparación tanto estadística como bibliográfica en la que se consideran los resultados obtenidos en esta investigación con estudios similares. Esto se realizó con la finalidad de validar los parámetros de vuelo óptimos que se le asignaron al dron DJI Agras T20 para ciertas condiciones tanto ambientales como operacionales, y que, además, cumplen con los estándares solicitados por los fabricantes de agroquímicos.

Este análisis comparativo demostró la eficiencia del DJI Agras T20 en frutales hilerados como es el caso de los cerezos, pero también demostró una deficiencia en la cobertura para productos de acción de contacto en el caso de frutales tipo parrón como sucedió en los kiwis. Se analizó la cobertura por cada densidad de la mezcla, en donde se utilizaron tablas estandarizadas en las que se especifica la cobertura mínima requerida por cada tipo de agroquímico y de acuerdo con su tipo de acción, además, se analizó brevemente el efecto vórtice y cómo éste influye en la distribución del agroquímico rociado, siendo así un efecto de suma importancia en la fumigación con dron.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 13, 14 y 15 se muestra la ubicación de los papeles hidrosensibles en los cerezos. En estas figuras se destaca específicamente la ubicación y posicionamiento de los papeles en cada nivel del frutal (superior, medio e inferior).



Figura 13. Ubicación de los papeles hidrosensibles en el nivel superior de los cerezos, donde se muestran los papeles que recibe los impactos tanto por el haz como el envés de las hojas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 14. Ubicación de los papeles hidrosensibles en el nivel medio de los cerezos.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 15. Ubicación de los papeles hidrosensibles en el nivel inferior de los cerezos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se muestra un papel hidrosensible ubicado en el nivel superior de los kiwis. Además, se muestran los impactos recibidos en el papel y la forma en que fue sujetado al haz de la hoja.



Figura 16. Papel hidrosensible ubicado en el nivel superior, posicionado en el haz de las hojas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Papel hidrosensible ubicado en el nivel inferior, posicionado en el haz de las hojas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Papel hidrosensible ubicado en el nivel inferior, posicionado en el envés de las hojas.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 19, 20 y 21, se observan los papeles hidrosensibles del vuelo 4, y están ordenados de la siguiente manera: En cada imagen se muestran 4 papeles hidrosensibles, en donde los dos primeros pertenecen al árbol 1 y los otros dos al árbol 2; tanto en el árbol 1 como en el árbol 2 están ordenados por haz y envés de las hojas. Se ordenó de esta forma para facilitar el procesamiento en el ImageJ.



Figura 19. Resultados post-aplicación del vuelo 4 en cerezos, correspondiente al nivel inferior.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Resultados post-aplicación del vuelo 4 en cerezos, correspondiente al nivel medio.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 21. Resultados post-aplicación del vuelo 4 en cerezos, correspondiente al nivel superior.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez procesada una imagen en el ImageJ, los resultados se muestran en una tabla, la cual es exportada a una planilla de Excel para realizar los cálculos correspondientes. Esto se verá reflejado en la Figura 22.

Gota	Area mm ²	Perim mm	Feret mm	%Area	FeretX	FeretY	FeretAngle	MinFeret mm	Diametro mm	Diámetro micras	Volúmen mm ³	Vol. Acumulado mm ³	Vol. Acumulado %
15	0.002	0.121	0.06	100	1088	0	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.000	0.000
16	0.002	0.121	0.06	100	1100	0	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.000	0.000
21	0.002	0.121	0.060	100	1188	0	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.000	0.000
23	0.002	0.121	0.06	100	1268	0	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.000	0.001
25	0.002	0.121	0.06	100	1308	0	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.000	0.001
28	0.002	0.121	0.06	100	144	1	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.000	0.001
29	0.002	0.121	0.06	100	1191	1	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.001
42	0.002	0.121	0.060	100	1057	3	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.001
43	0.002	0.121	0.06	100	1303	3	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.001
45	0.002	0.121	0.06	100	541	4	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.001
47	0.002	0.121	0.06	100	875	4	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.002
48	0.002	0.121	0.06	100	878	4	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.002
49	0.002	0.121	0.06	100	884	4	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.002
51	0.002	0.121	0.06	100	643	5	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.002
53	0.002	0.121	0.06	100	872	5	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.002
57	0.002	0.121	0.06	100	1146	5	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.002
59	0.002	0.121	0.06	100	155	6	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.003
69	0.002	0.121	0.060	100	1276	7	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.003
72	0.002	0.121	0.06	100	540	8	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.003
73	0.002	0.121	0.06	100	684	8	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.001	0.003
75	0.002	0.121	0.06	100	907	8	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.002	0.003
78	0.002	0.121	0.060	100	1188	8	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.002	0.003
80	0.002	0.121	0.06	100	1359	8	135	0.043	0.052	51.500	0.000	0.002	0.003

Figura 22. Fracción de los resultados ya procesados en Excel, en donde la sección celeste muestra los valores exportados desde ImageJ y la sección verde muestra los resultados de los cálculos realizados.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se muestran los resultados finales extraídos para una imagen, como lo son los impactos totales en el área de estudio (área analizada del papel hidrosensible).

Tabla 6. Resumen de resultados obtenidos para un cerezo del nivel inferior perteneciente al vuelo 4.

Medida	Valor	Unidad
Impactos totales	1.729	
Área de estudio	13,89	cm ²
Impactos	124,47	Impactos/cm ²
Área (promedio)	0,043	mm ²
Diámetro (promedio)	213,56	micras

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se procesaron los niveles inferior, medio y superior, tanto por el haz como el envés de las hojas en cada uno de los 18 vuelos por especie frutal, se procedió a promediar los resultados, ya que, si bien recordamos, se utilizaron 2 frutales por cada vuelo. Este resumen final de los resultados se presenta en la Tabla 7 y en la Tabla 8.

Tabla 7. Resultados finales en cerezos

Vuelo	Nivel	Impactos/cm ²	Diámetro	Área	Impactos/cm ²	Diámetro	Área
		Haz	(micras) Haz	(mm ²) Haz	Envés	(micras) Envés	(mm ²) Envés
1	Inferior	28,50	289,70	0,070	7,59	298,75	0,072
	Medio	20,54	282,64	0,071	3,26	268,30	0,060
	Superior	73,86	304,80	0,088	10,89	242,39	0,049
2	Inferior	12,79	276,86	0,056	1,74	187,11	0,026
	Medio	25,83	260,83	0,055	3,71	207,79	0,034
	Superior	44,55	278,95	0,063	5,36	226,20	0,039
3	Inferior	27,62	257,00	0,056	7,50	328,90	0,094
	Medio	23,46	267,21	0,056	1,43	273,00	0,053
	Superior	30,73	242,39	0,049	6,67	223,85	0,038
4	Inferior	124,47	213,56	0,043	27,85	150,17	0,024
	Medio	116,58	218,87	0,051	11,69	132,18	0,023
	Superior	107,92	283,00	0,081	9,64	260,07	0,061
5	Inferior	45,79	266,13	0,056	5,29	295,46	0,066
	Medio	60,98	307,72	0,078	12,00	283,51	0,064
	Superior	38,47	280,47	0,067	13,65	270,68	0,060
6	Inferior	6,80	232,12	0,052	4,76	273,53	0,074
	Medio	17,10	295,30	0,073	8,38	167,10	0,025
	Superior	18,05	343,72	0,104	14,83	255,44	0,055
7	Inferior	79,86	225,65	0,050	44,77	198,61	0,037
	Medio	40,97	311,59	0,078	20,15	290,55	0,069
	Superior	117,93	338,38	0,098	76,35	273,79	0,065
8	Inferior	146,76	172,26	0,033	103,45	124,57	0,015
	Medio	35,07	321,86	0,086	36,62	260,67	0,053
	Superior	35,57	273,48	0,062	5,37	237,78	0,049
9	Inferior	10,60	264,82	0,080	7,13	327,20	0,095
	Medio	20,86	306,31	0,081	12,59	223,27	0,042

	Superior	37,20	225,06	0,045	17,96	279,05	0,063
	Inferior	66,64	292,32	0,068	76,57	289,62	0,070
10	Medio	28,66	293,90	0,081	42,89	308,26	0,077
	Superior	64,84	303,97	0,080	67,61	271,66	0,060
	Inferior	19,47	300,20	0,077	8,06	238,73	0,044
11	Medio	30,58	253,03	0,053	3,52	349,34	0,114
	Superior	42,80	281,80	0,063	5,92	303,58	0,074
	Inferior	8,36	368,95	0,104	2,08	301,33	0,072
12	Medio	11,00	354,68	0,097	1,80	343,25	0,096
	Superior	65,90	368,85	0,110	9,75	329,54	0,083
	Inferior	47,37	294,60	0,072	10,48	233,18	0,042
13	Medio	28,30	372,77	0,121	14,41	308,91	0,083
	Superior	48,33	317,46	0,091	14,57	308,41	0,089
	Inferior	8,01	371,05	0,126	3,93	331,28	0,103
14	Medio	9,80	294,34	0,072	4,33	308,46	0,078
	Superior	17,46	382,41	0,132	6,25	279,93	0,062
	Inferior	11,14	341,03	0,094	3,51	307,76	0,073
15	Medio	10,05	340,36	0,095	4,49	313,04	0,084
	Superior	22,40	325,45	0,086	13,92	329,79	0,088
	Inferior	15,10	329,00	0,094	4,78	288,15	0,066
16	Medio	42,79	343,18	0,099	12,39	259,74	0,052
	Superior	53,65	356,55	0,105	11,15	204,93	0,041
	Inferior	12,51	243,10	0,045	0,28	451,00	0,144
17	Medio	42,58	355,25	0,105	9,51	282,73	0,063
	Superior	30,21	277,11	0,062	10,56	267,30	0,059
	Inferior	34,07	292,14	0,070	30,50	282,51	0,060
18	Medio	4,19	301,44	0,073	1,09	194,46	0,026
	Superior	15,34	349,35	0,101	8,51	350,66	0,100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Resultados finales en kiwis.

Vuelo	Nivel	Impactos/cm ²	Diámetro	Área	Impactos/cm ²	Diámetro	Área
		Haz	(micras) Haz	(mm ²) Haz	Envés	(micras) Envés	(mm ²) Envés
1	Inferior	21,01	293,63	0,075	20,02	297,34	0,071
	Superior	72,49	326,96	0,086	10,06	341,81	0,130
2	Inferior	13,95	281,96	0,063	11,81	254,60	0,051
	Superior	36,18	274,86	0,062	12,77	253,88	0,051
3	Inferior	5,57	255,18	0,060	1,84	350,26	0,123
	Superior	18,80	330,48	0,091	7,41	248,97	0,047
4	Inferior	22,28	343,48	0,106	11,49	224,14	0,047
	Superior	64,17	353,51	0,109	8,86	290,54	0,075
5	Inferior	35,82	287,03	0,067	2,58	248,43	0,050
	Superior	72,40	313,39	0,077	12,62	272,73	0,056
6	Inferior	9,92	396,16	0,124	0,75	318,44	0,078
	Superior	74,81	331,90	0,082	1,74	261,91	0,052
7	Inferior	56,48	340,83	0,097	11,36	292,13	0,069
	Superior	47,46	309,24	0,081	7,73	290,85	0,067
8	Inferior	31,37	314,41	0,088	7,39	241,27	0,047
	Superior	48,17	307,62	0,078	12,65	284,76	0,340
9	Inferior	8,42	301,85	0,075	2,75	212,36	0,033
	Superior	27,06	288,13	0,068	9,22	255,00	0,047
10	Inferior	18,81	392,69	0,132	10,41	335,20	0,094
	Superior	59,27	361,40	0,100	15,66	294,37	0,062
11	Inferior	26,56	364,16	0,121	8,74	213,63	0,033
	Superior	64,85	329,06	0,086	10,10	303,35	0,069
12	Inferior	11,53	334,17	0,099	2,12	245,25	0,055
	Superior	14,82	312,85	0,083	3,75	229,00	0,036
13	Inferior	27,66	308,44	0,083	41,67	263,90	0,050
	Superior	35,82	409,88	0,143	22,34	417,64	0,145
14	Inferior	33,21	357,14	0,111	8,18	306,24	0,075
	Superior	61,58	420,52	0,142	7,59	274,81	0,056
15	Inferior	34,74	306,30	0,075	2,02	254,58	0,049
	Superior	48,40	333,70	0,085	40,26	332,63	0,088
16	Inferior	11,00	234,91	0,051	0,82	228,85	0,039
	Superior	41,82	274,63	0,058	12,87	320,06	0,086
17	Inferior	73,83	319,34	0,084	5,85	247,88	0,050
	Superior	116,60	368,61	0,110	23,13	270,16	0,055
18	Inferior	17,69	308,97	0,078	3,48	252,99	0,045
	Superior	28,33	305,51	0,074	4,69	242,26	0,046

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos por el análisis propio para los cerezos. En la Figura 23, 24 y 25 se muestra la distribución de impactos/cm² en los distintos niveles del cerezo utilizando las tres densidades en estudio.

A partir de estas gráficas, se observa que la densidad de la mezcla en los distintos niveles del cerezo tiene la misma tendencia de distribución, es decir, en las tres densidades se obtuvo que el nivel medio del cerezo presenta menores impactos/cm² que en el nivel superior e inferior. Otro factor muy influyente en la distribución es la formación en KGB del cerezo, ya que este tipo de formación asimila a una copa, haciendo más difícil el ingreso de los impactos de producto al nivel medio del frutal.

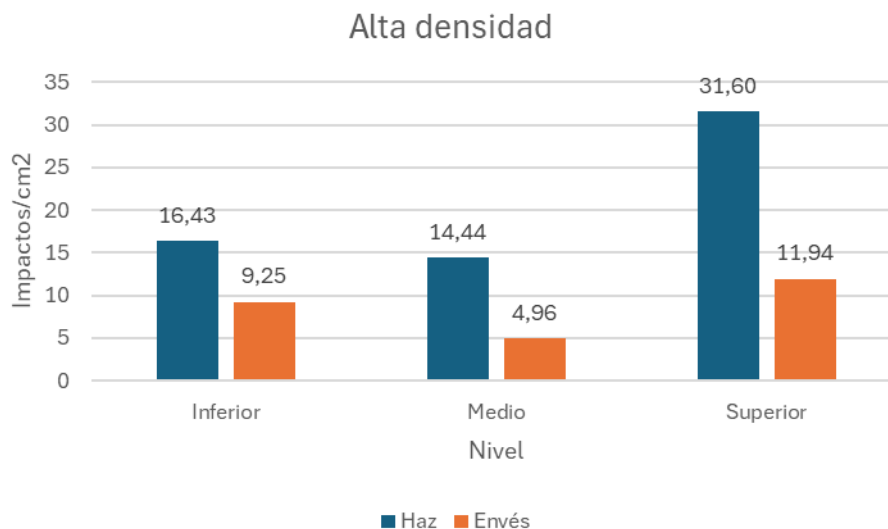


Figura 23. Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento de los impactos/cm² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel dentro del frutal utilizando un fluido de alta densidad (1,74 g/cm³).

Fuente: Elaboración propia.

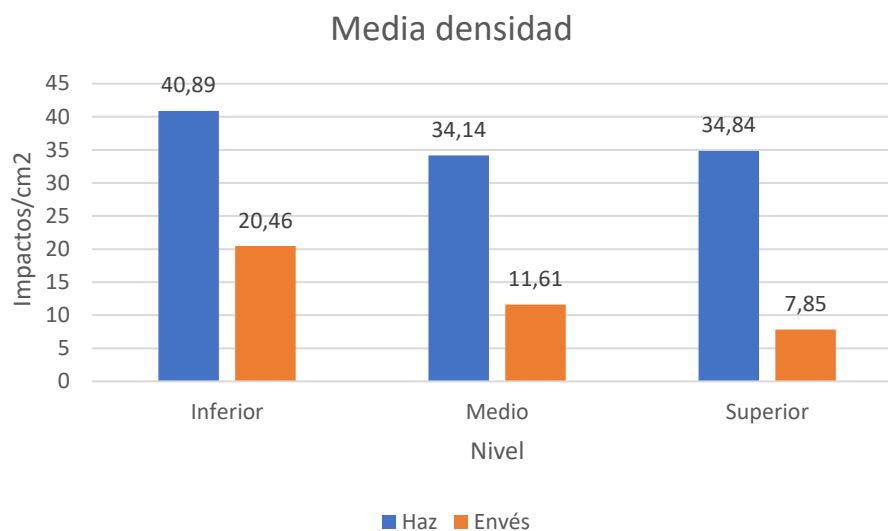


Figura 24. Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento de los impactos/cm² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel dentro del frutal utilizando un fluido de media densidad (1,09 g/cm³).

Fuente: Elaboración propia.

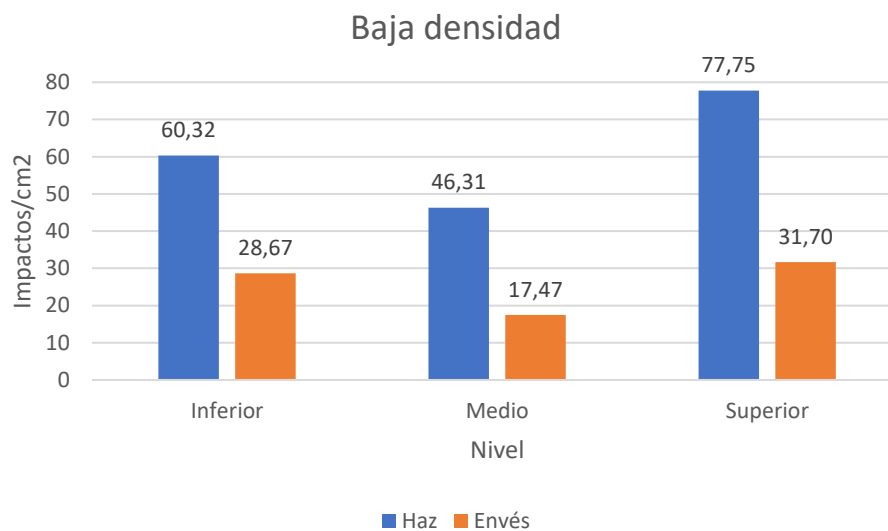


Figura 25. Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento de los impactos/cm² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel dentro del frutal utilizando un fluido de baja densidad (1 g/cm³).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26, se muestra con bastante claridad la influencia que tiene la densidad de la mezcla en la cantidad de impactos/cm² que llegan a las hojas del cerezo. A menor densidad, se logran mejores resultados, esto ocurre tanto en el haz como envés de las hojas.

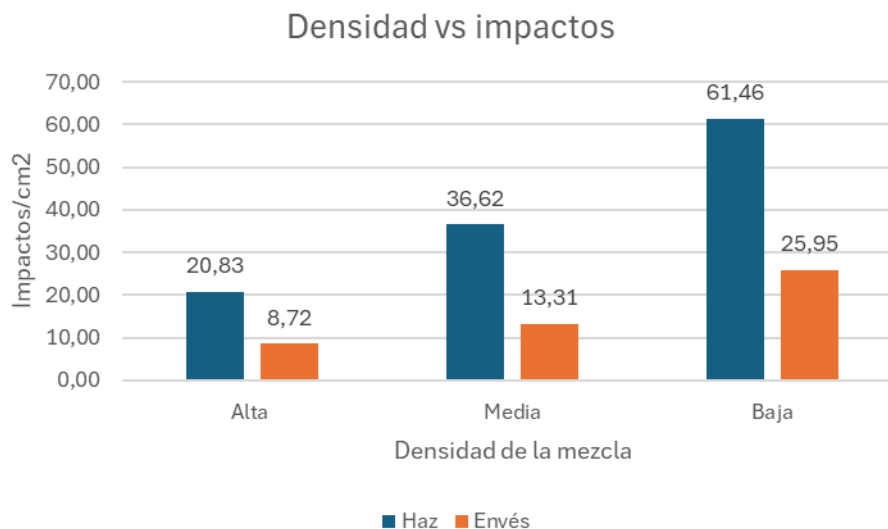


Figura 26. Gráfico de barras donde se muestra el comportamiento general de la densidad de la mezcla en cerezos frente a los impactos/cm² recibidos.

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de vuelo del dron, la cual es una variable controlable desde el punto de vista del operador, pero también es una variable limitada por el dron fumigador, ya que, a mayor tasa de aplicación, la velocidad máxima de vuelo se limitará.

En las Figuras 27 y 28, se muestra la distribución de los impactos/cm² resultantes a la variación de velocidades; al volar lento (3 m/s) se obtuvieron

menores impactos en el nivel medio del cerezo, mientras que aumentar la velocidad de vuelo a 4 m/s, se logró una distribución más homogénea.

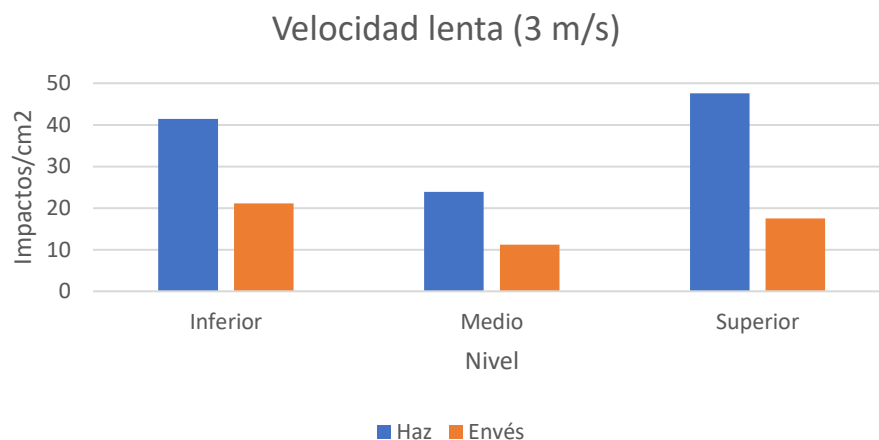


Figura 27. Gráfico de barras donde se muestran los impactos/cm² recibidos en cada nivel del cerezo a una velocidad de 3 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

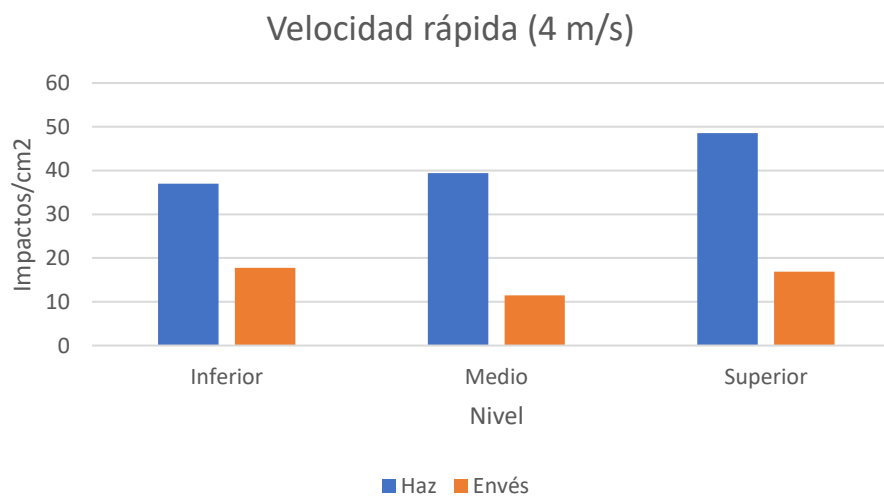


Figura 28. Gráfico de barras donde se muestran los impactos/cm² recibidos en cada nivel del cerezo a una velocidad de 4 m/s.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 29 muestra una clara mejoría en el haz de las hojas al volar a mayor velocidad, pero disminuyen levemente los impactos en el envés de las hojas, por lo que, si se quiere combatir alguna plaga en el cerezo, en la que su población se concentre en el envés de la hoja, sería recomendable volar a menor velocidad.

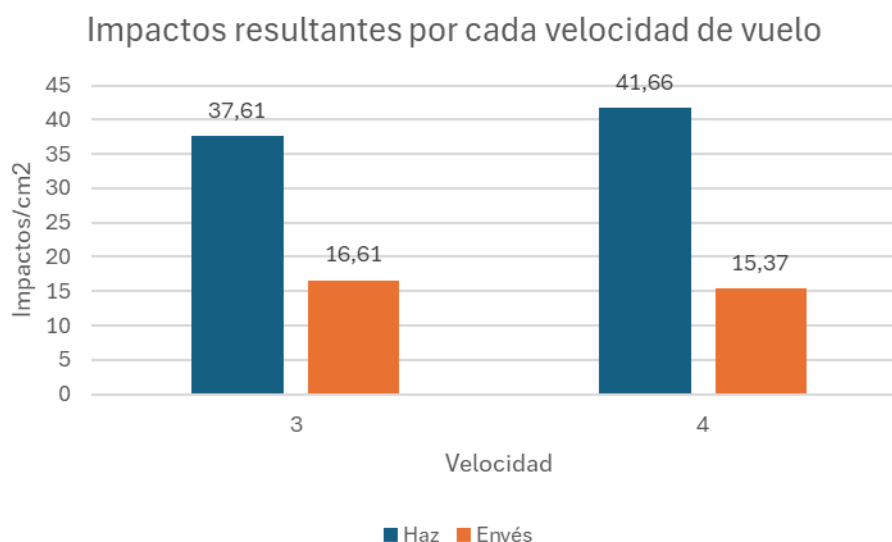


Figura 29. Gráfico de barras donde se muestra la variabilidad existente entre volar a distintas velocidades.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la velocidad de vuelo del dron también afecta levemente el tamaño de los impactos, en la Figura 30 se observa que a mayor velocidad de vuelo el área de los impactos aumenta, esto ocurre tanto en el haz como envés de las hojas. Si bien, la diferencia numérica observada en el gráfico de la Figura 30 no es alta, al realizar una acumulación de estas pequeñas diferencias y considerando que por ejemplo en un papel hidrosensible de 26 x

76 mm se obtienen en algunos vuelos más de 1.500 impactos, esta pequeña diferencia tomaría gran importancia.

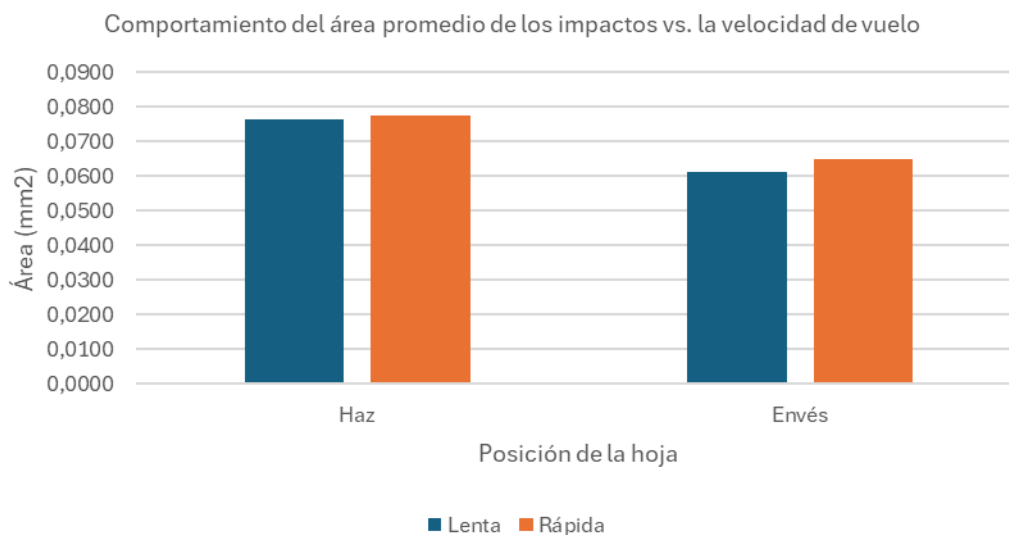


Figura 30. Gráfico de barras donde se compara el área (mm²) promedio de los impactos tanto en el haz como envés de las hojas volando a 3 y 4 m/s en cerezos.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 31, 32 y 33 se observa la distribución de los impactos/cm² en los distintos niveles del cerezo para cada altura de vuelo. A partir de estos gráficos, se concluye que volar muy cerca del cultivo, pero también muy lejos (2 y 4 metros sobre el cultivo) afecta bastante a la distribución del producto, ya que en el envés de las hojas se obtuvieron muy pocos impactos. Al volar a 3 metros sobre el cultivo (Figura 32), se aprecia una clara mejoría en términos de la distribución de los impactos, logrando así un mejor rendimiento tanto en el haz como el envés de las hojas.

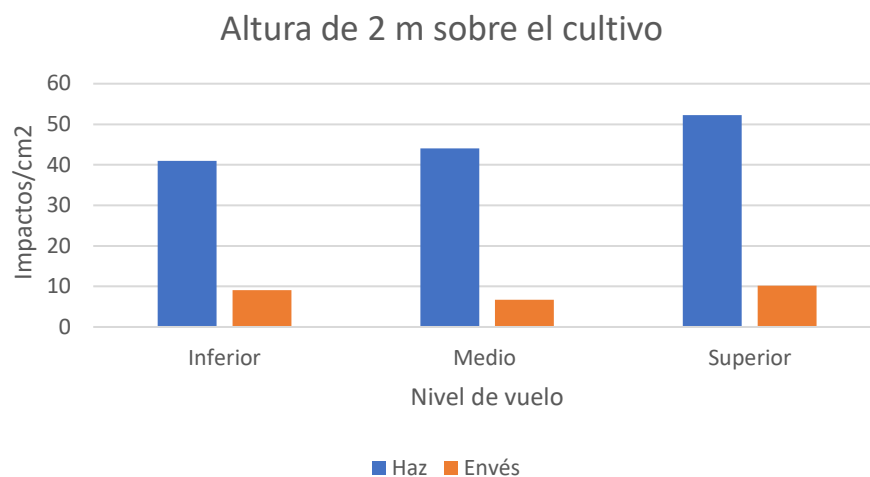


Figura 31. Gráfico de barras donde se muestra la distribución de los impactos/cm² en cada nivel del cerezo volando a 2 metros sobre el cultivo.

Fuente: Elaboración propia.

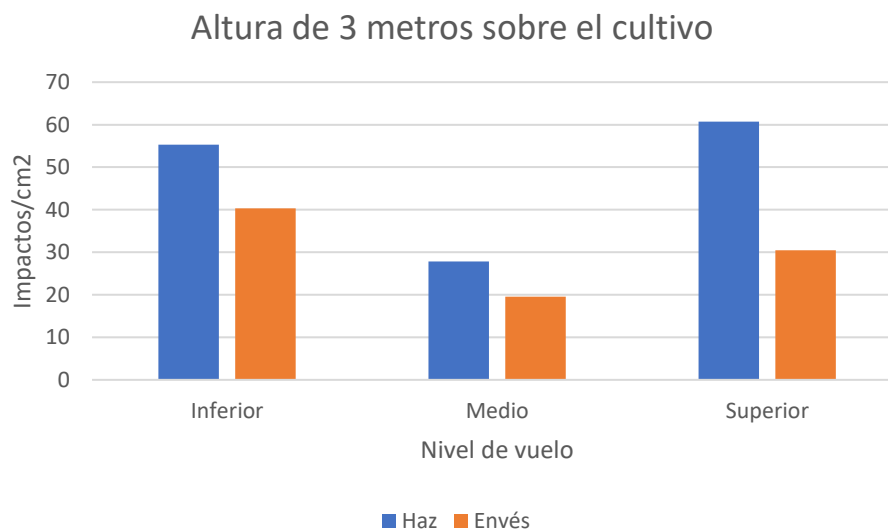


Figura 32. Gráfico de barras donde se muestra la distribución de los impactos/cm² en cada nivel del cerezo volando a 3 metros sobre el cultivo.

Fuente: Elaboración propia.

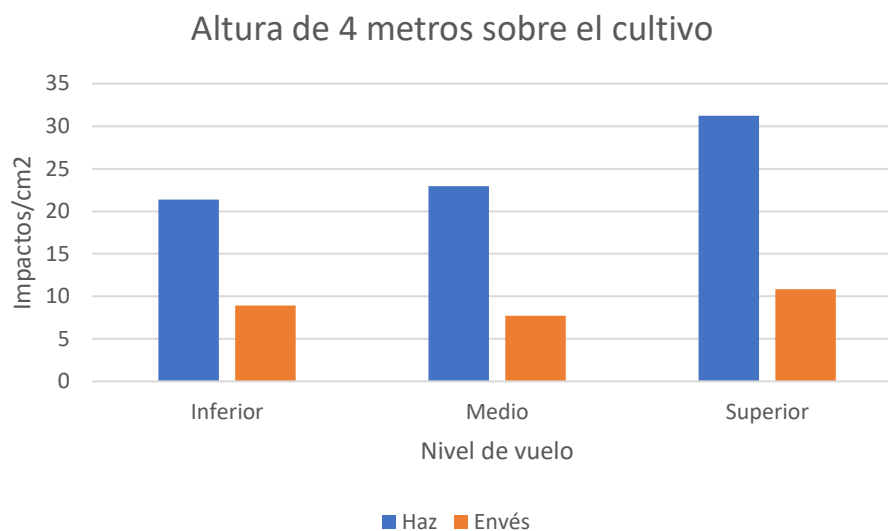


Figura 33. Gráfico de barras donde se muestra la distribución de los impactos/cm² en cada nivel del cerezo volando a 4 metros sobre el cultivo.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 34 se compara gráficamente los impactos/cm² que se obtuvieron al volar a distintas alturas. Se observa que los mejores resultados se obtuvieron al volar a 3 metros sobre el cultivo, además, a esa altura se logró una buena relación haz – envés.

Adicionalmente, una altura de vuelo de 4 metros sobre el cultivo resulta ser muy susceptible a las ráfagas de viento (deriva), lo cual se ve reflejado en la Figura 34 y, además, se observó este fenómeno mientras se realizaron los vuelos de prueba.

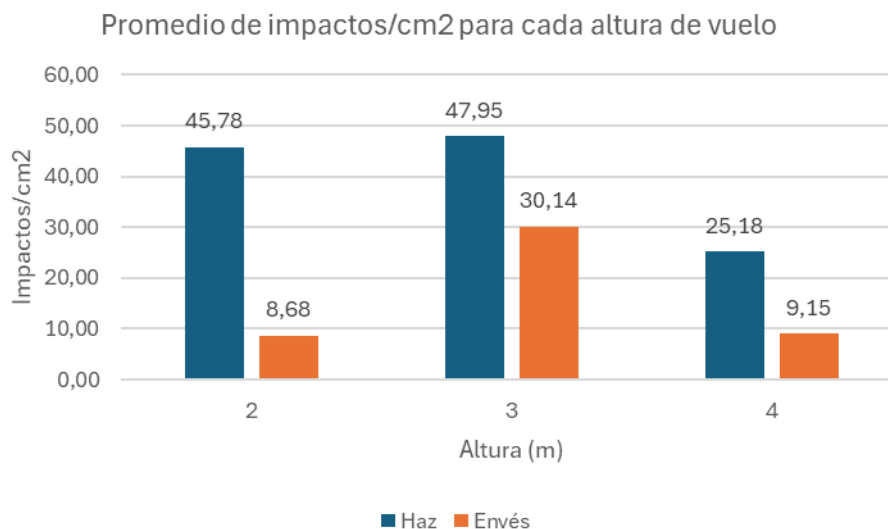


Figura 34. Gráfico de barras donde se compara la cantidad de impactos/cm² que se obtuvieron volando a distintas alturas sobre los cerezos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35 se observa un claro aumento del área de los impactos a medida que aumenta la altura de vuelo del dron. Si bien el caudal del dron a distintas alturas de vuelo será el mismo siempre y cuando no varíe la velocidad de vuelo y la tasa de aplicación. Este factor explicaría que a mayor altura, las gotas de menor tamaño no logran impactar en la superficie de las hojas, por esta razón solamente impactarían las de mayor tamaño.

Si se analiza en conjunto la Figura 34 y la Figura 35, se observa que a mayor altura de vuelo (4 metros sobre el cultivo), se obtuvieron menores impactos/cm² pero de un tamaño mayor, mientras que a una altura de vuelo de 2 metros sobre el cultivo, se obtuvo casi el doble de impactos/cm² pero de un área menor.

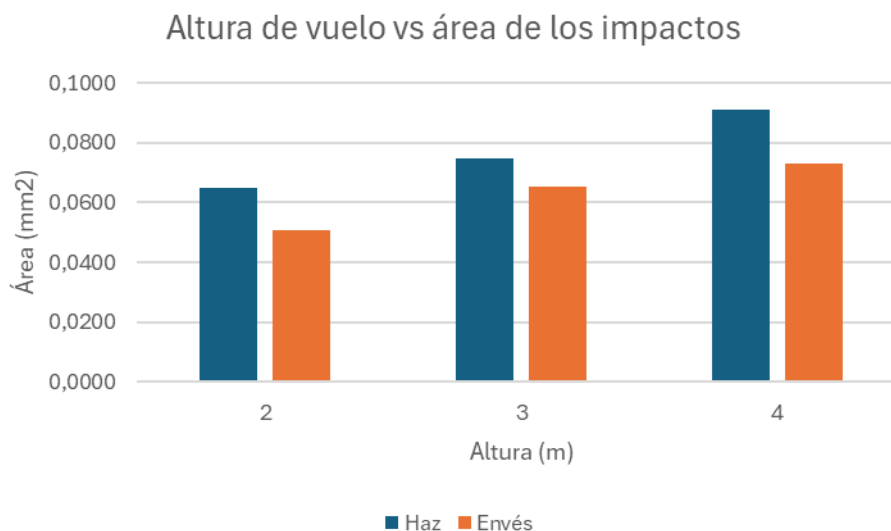


Figura 35. Gráfico de barras donde se muestra el tamaño promedio (área) que se obtuvo volando a distintas alturas sobre el cultivo.

Fuente: Elaboración propia.

Tras analizar las variables meteorológicas, se determinó que la temperatura tiene una influencia casi despreciable en la cantidad de impactos/cm². Por otra parte, hay que tener en consideración que cuando se realizaron los vuelos en los cerezos, la temperatura máxima fue de 22,33°C. Esta temperatura máxima es bastante representativa ya que la mayoría de los productos químicos indican que para ser aplicados debe haber temperaturas menores a 28°C, hasta 25°C en algunos casos.

En la Figura 36 se observa el comportamiento que tienen los impactos/cm² frente a la variación de viento. Con velocidades de viento menores a 7 km/h se obtuvieron buenos resultados; ahora bien, hay que considerar la dirección del viento, ya que los cerezos se encuentran orientados en una dirección de

305°, y en general, las direcciones del viento son SW (225° – 247,5°) y SSW (202,5° - 225°), por lo que las velocidades de viento fluyen de forma semi perpendicular a la dirección de plantación en que se encuentran los cerezos.

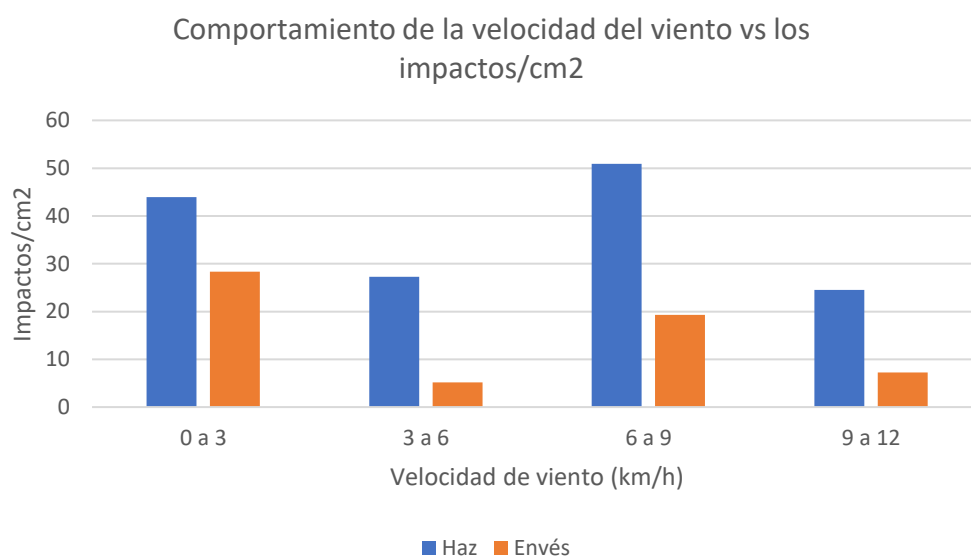


Figura 36. Gráfico de barras donde se muestra la influencia que tiene la velocidad del viento frente a los impactos/cm² que llegan a las hojas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 37 se observa la importancia que tiene el factor climático de la humedad relativa, destacándose por sobre los demás el rango de 70 a 79% de humedad relativa. Hay que destacar que los rangos de humedad relativa alta se obtienen generalmente durante las mañanas, por lo que si lo asociamos a la variable de la temperatura, éstas son inversamente proporcionales, por lo que desde este punto de vista, la temperatura tendría bastante influencia en la fumigación.

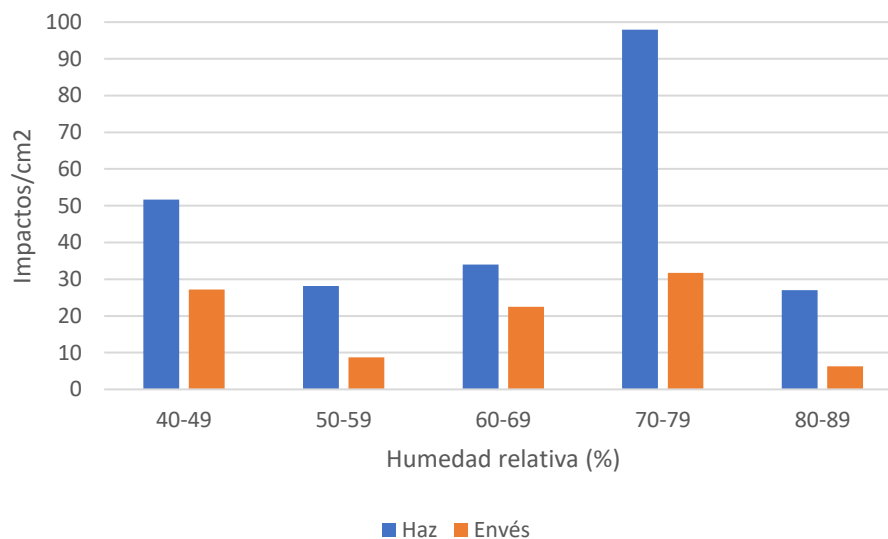


Figura 37. Gráfico de barras donde se muestra la variación de los impactos/cm² a medida que cambia el rango de humedad relativa

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 38 se observan los resultados de una serie de vuelos experimentales con agua (densidad de 1 g/cm³) en donde se evalúan los impactos/cm² recibidos tanto en el haz como el envés de las hojas, además se incluyen los impactos/cm² recibidos a nivel de suelo (5 centímetros del suelo). Esta evaluación se realizó a distintas tasas de aplicación con la finalidad de observar la mejoría existente al aumentar la tasa de aplicación. En la tabla 8 se adjunta el registro meteorológico al momento de realizar los vuelos con variación de tasa.

En los vuelos con tasa de aplicación de 30 y 40 L/há se observa una clara similitud con la tasa de 20 L/há, siendo que se está aumentando al doble la cantidad de agua repartida en una misma superficie. En el caso de la

aplicación con tasa de 50 L/há, se obtuvieron excelentes resultados, tanto en el haz como el envés. Además, comparando la tasa de 20 L/há con la de 50 L/há, se observa que tienen gran relación proporcional, por lo que el factor clave sería la dirección del viento. En el caso de la aplicación con tasa de 30 y 40 L/há, la dirección del viento es WSW (Oeste – Suroeste), la cual tiene un rango de $247,5^\circ - 270^\circ$, la cual fluye completamente perpendicular a la orientación de los cerezos.

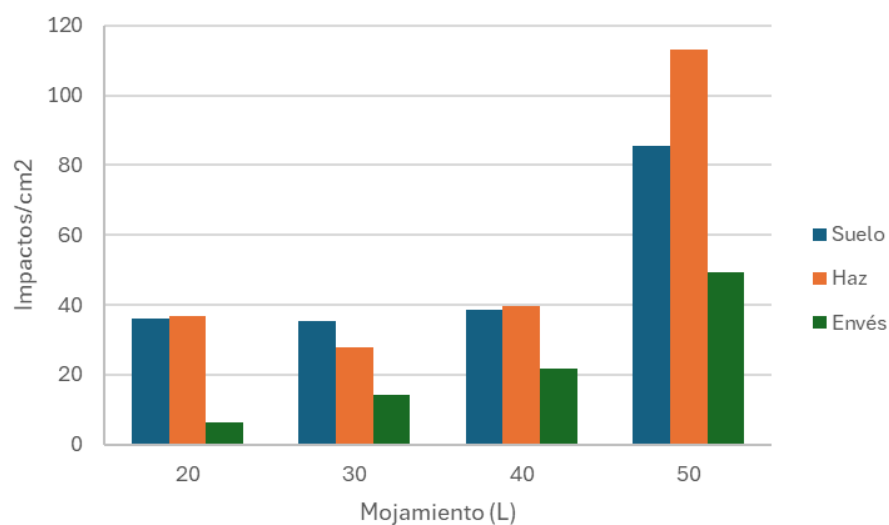


Figura 38. Impactos/cm² de una aplicación con agua en cerezos a distintos volúmenes por hectárea, además se incluyen los impactos/cm² que llegan a nivel de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Registro meteorológico al momento de realizar los vuelos adjuntados en la figura 38.

Mojamiento (Litros)	Viento (km/h)	Dirección del viento	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
20	8,59	SW	21,49	64,53
30	11,97	WSW	23,17	60,78
40	11,97	WSW	23,17	60,78
50	11,1	SW	24,79	54,45

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos mediante el análisis propio para los kiwis:

En la Tabla 10 se aprecia una notable disminución de impactos/cm² en comparación con los resultados que se obtuvieron en los cerezos. En términos de la distribución, en el nivel superior se logró el doble de impactos/cm² que en el nivel inferior.

En el envés de las hojas los impactos/cm² que se obtuvieron son bastante deficientes tanto en el nivel superior como inferior del kiwi, esto ocurre para todas las densidades.

Tabla 10. Impactos/cm² recibidos tanto en el nivel superior como inferior del kiwi para cada una de las densidades.

Densidad (g/cm ³)	Posición	Impactos/cm ²	
		Superior	Inferior
1	Haz	53,50	26,20
	Envés	12,92	15,96
1,09	Haz	66,63	35,79
	Envés	13,14	7,42
1,74	Haz	35,37	14,64
	Envés	11,18	2,16

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 39 se muestra gráficamente el efecto que tiene la densidad de la mezcla hacia los impactos/cm² recibidos tanto en el haz como el envés de las hojas. Los vuelos con densidad de la mezcla modificada resultaron ser mejores que los vuelos con agua pura, esto es válido tanto para el haz como el envés de las hojas.

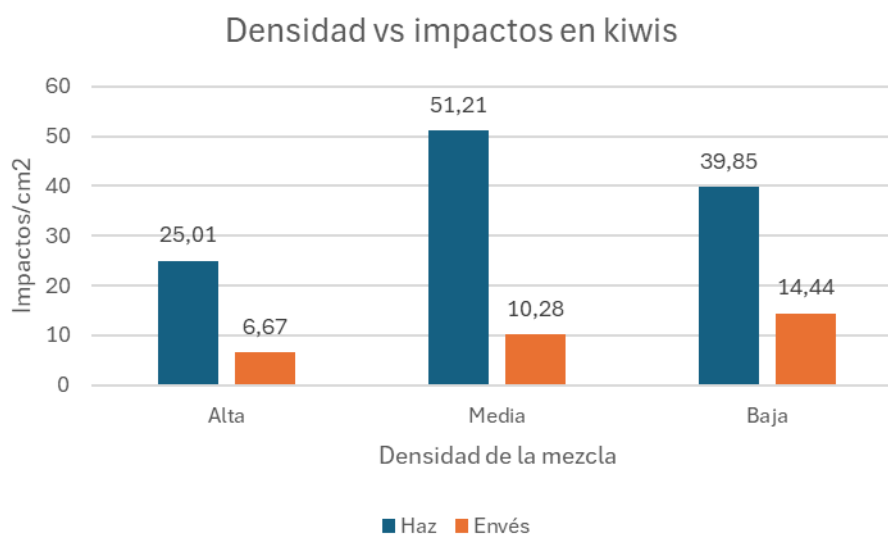


Figura 39. Grafica donde se muestra el efecto que tiene la densidad del fluido en los impactos/cm² recibidos en los kiwis.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 11 muestra el comportamiento que tuvieron los impactos/cm² frente a la variación de altura. Además, se especifican los impactos/cm² tanto en el haz como envés de las hojas para cada nivel del kiwi.

Tabla 11. Impactos/cm² recibidos tanto en el nivel superior como inferior para cada una de las alturas de vuelo sobre los kiwis.

Altura (metros)	Posición	Impactos/cm ²	
		Superior	Inferior
2	Haz	56,47	18,09
	Envés	8,91	8,08
3	Haz	43,6	25,53
	Envés	9,85	7,13
4	Haz	55,42	33,02
	Envés	18,48	10,34

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 40 se muestran los resultados obtenidos para los vuelos a distintas alturas, en donde se observa que volar alto aumenta considerablemente la cobertura en la aplicación.

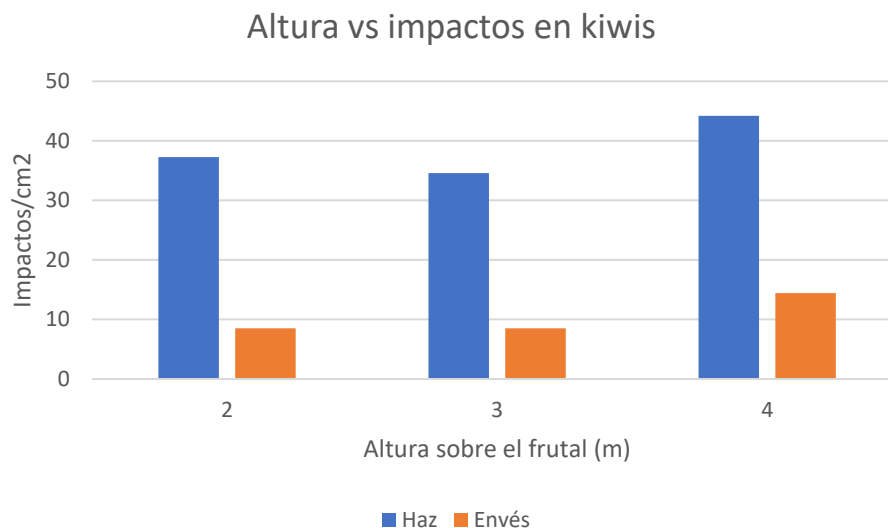


Figura 40. Gráfico donde se muestra el efecto que tiene la altura de vuelo en los impactos/cm² recibidos en los kiwis.

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de vuelo del dron en los frutales tipo parrón tiene bastante relevancia, esto se ve reflejado en la Tabla 12 y en la Figura 41, donde se observa que, a mayor velocidad (4 m/s), los impactos por el haz de las hojas son bastante alto, pero en el envés disminuyen considerablemente en comparación con vuelos de velocidad más lenta (3 m/s).

Tabla 12. Impactos/cm² recibidos tanto en el nivel superior como inferior para cada una de las velocidades de vuelo sobre los kiwis.

Velocidad (m/s)	Posición	Impactos/cm ²	
		Superior	Inferior
3	Haz	43,99	25,82
	Envés	14,45	11,89
4	Haz	59,67	25,27
	Envés	10,38	5,14

Fuente: Elaboración propia.

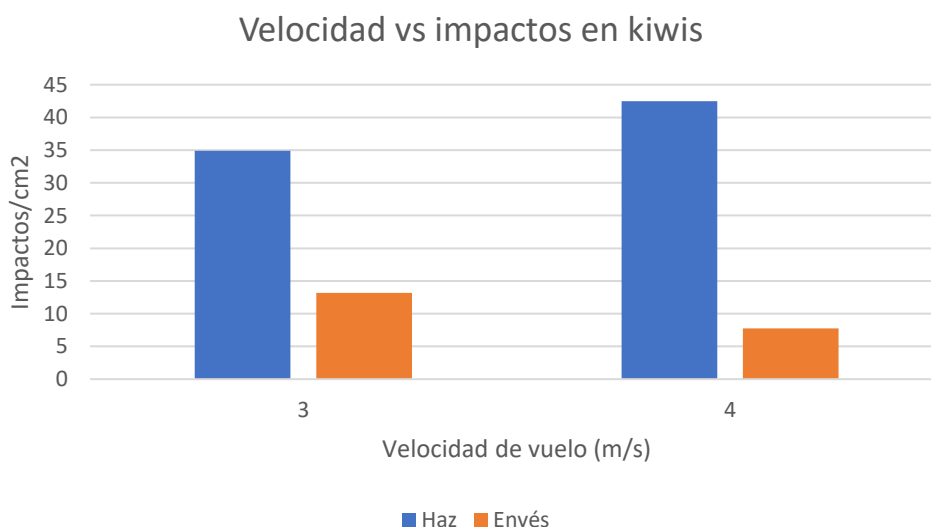


Figura 41. Grafica donde se muestra el efecto que tiene la velocidad de vuelo en los impactos/cm² recibidos en los kiwis.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el análisis de resultados tanto en los cerezos como en los kiwis, es momento de evaluar los resultados que entrega la inteligencia artificial generativa.

A continuación, en la Tabla 13 se mostrarán los prompts diseñados para que ChatGPTo4 realice los análisis de parámetros de vuelo y cruce las variables en estudio. Esto lo realiza a modo de aprendizaje y entrenamiento para así poder predecir los parámetros óptimos de vuelo para aplicaciones futuras con variables ambientales específicas.

El paso 1 consiste en cargar el archivo de Excel y explicar de forma general a qué corresponden los resultados presentes en la planilla. Entre los pasos 2 y 8 básicamente corresponden a entrenamiento, es decir, el modelo de ChatGPTo4 aprende mediante el dialogo que uno establezca con la IA. No necesariamente para el entrenamiento deben ser precisamente los prompts mencionados en la Tabla 13, ya que la extensión de este proceso puede ser variable.

En el proceso predictivo, el cual corresponde el paso 9, se solicita a la IA determinar los parámetros óptimos de vuelo a partir del aprendizaje antes realizado. Posteriormente en el paso 10, se asignan las condiciones ambientales futuras al momento de realizar la aplicación, además, se incluye la densidad de la mezcla (agroquímico + agua).

Finalmente, en el paso 11 se visualiza mediante un gráfico los resultados esperados a partir de los parámetros de vuelo que la IA designó de forma óptima para las condiciones ambientales específicas.

Tabla 13. Flujo de Prompts utilizados para que ChatGPTo4 se entrene y prediga parámetros de vuelo óptimos a partir de condiciones ambientales y variables específicas.

#	Objetivo	Prompts
1	Explicar la situación	En este Excel se muestran los resultados de una fumigación con dron, necesito que la analices.
2	Entrenamiento	Genera un gráfico donde compares la densidad del fluido con los impactos/cm2 tanto en el haz como envés de las hojas.
3	Entrenamiento	Analiza detalladamente el gráfico, ¿Qué sucede con el aumento de la densidad del fluido?.
4	Entrenamiento	Genera un gráfico donde compares la velocidad de vuelo con los impactos/cm2 tanto en el haz como envés de las hojas.
5	Entrenamiento	Analiza detalladamente el gráfico. ¿Como afecta la velocidad del dron a los impactos/cm2 recibidos en cada nivel?.
6	Entrenamiento	Genera un gráfico donde compares la altura de vuelo con los impactos/cm2 tanto en el haz como envés de las hojas.
7	Entrenamiento	Analiza detalladamente el gráfico. ¿Qué sucede si el dron vuela muy cerca del cerezo?.
8	Entrenamiento	Cuáles son las variables ambientales más influyentes en los resultados de la aplicación. Analiza de forma individual cada variable
9	Predicción	A partir de los resultados y análisis que has hecho, necesito que me digas los parámetros óptimos de vuelo (altura y velocidad).
10	Asignación de variables	Densidad, temperatura, humedad relativa, viento
11	Resultados esperados	Genera un gráfico donde muestres los resultados que se obtendrían utilizando los parámetros de vuelo que asignaste.

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando los prompts mencionados en la Tabla 13, para las variables de altura de vuelo, velocidad de vuelo y densidad, ChatGPT fue capaz de crear exactamente los mismos gráficos realizados en Excel, lo cual da un muy buen indicio de la comprensión de los resultados.

Utilizando los prompts de la Tabla 13, ChatGPTo4 utiliza para realizar las predicciones de parámetros óptimos de vuelo un análisis basado en datos experimentales combinando estadística descriptiva y correlacional. De esta manera, asignó parámetros de vuelo bastante lógicos, además incluye un análisis explicando por qué decidió esos parámetros de vuelo.

Adicionalmente, se realizó un análisis modificando los prompts, de igual forma los resultados son bastante lógicos y similares entre sí, pero utiliza otros métodos para generar las respuestas, como lo son el modelo predictivo Random Forest Regressor, el cual es un algoritmo que trabaja con un conjunto de árboles de decisión. Este modelo se entrenó únicamente con los datos disponibles en la planilla de Excel, el cual utilizó un 80% para entrenamiento y un 20% de validación y prueba.

De igual forma, se pusieron a prueba otros modelos, los cuales se adjuntan sus resultados en la Tabla 15.

Tabla 14: Variables de prueba utilizadas para las predicciones.

Variable	Valor	Unidad
Densidad	1,15	g/cm ³
Temperatura	18	°C
Humedad relativa	81	%
Viento	11	km/h

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Resultados de los parámetros de vuelo óptimos obtenidos por cada método o modelo predictivo.

Parámetro	Altura (m)	Velocidad (m/s)
Análisis basado en datos experimentales combinando estadística descriptiva y correlacional	2,5	3
Random Forest	3,1	3,6
Gradient Boosting	3,1	3,6
Support Vector Regression	3,1	3,6

Fuente: Elaboración propia.

Si bien, las diferencias existentes entre el método basado en datos experimentales con los modelos predictivos no son muy amplios (diferencia de 60 centímetros de altura y 0,6 m/s de velocidad), resultaría bastante interesante poner a prueba ambos caminos predictivos para evaluar su confiabilidad, la cual es una tarea que se sale de los objetivos de esta investigación.

Hay que considerar que la diferencia de altura de 60 centímetros existentes entre ambos caminos predictivos puede resultar “normal”, y esto se debe a que

por ejemplo en una fumigación real con dron, se producen variaciones de altura debido a las pendientes del predio agrícola, ráfagas de viento, volar sin una antena RTK, variaciones en la altura del cultivo, entre otros factores. De hecho, volar sin una antena RTK, otorga una precisión de 60 centímetros si es que existe una buena cobertura satelital, por lo que el rango de alturas de vuelo asignados por IA resulta bastante aceptable.

Finalmente, para determinar los parámetros óptimos de vuelo de acuerdo con los cálculos realizados en Excel para cada especie frutal, es necesario tener en cuenta que la densidad de una mezcla (plaguicida + agua) es conocida por las etiquetas del plaguicida y por las propiedades del agua. Este factor de densidad tiene la particularidad de que se puede modificar agregando más agua a la mezcla, es decir, aumentando el mojamiento por hectárea, lo que provocaría una mejor cobertura debido al aumento de los impactos/cm² en respuesta al aumento de agua en una misma superficie y a la disminución de la densidad.

En la Tabla 16 y en la Tabla 17 se muestran los parámetros óptimos de vuelo de acuerdo con cada densidad de mezcla, además, se incluye el vuelo que obtuvo los mejores resultados y las respectivas variables meteorológicas asociadas.

En la Tabla 16, se observa que para mezclas con densidades de 1,09 y 1,74 g/cm³ los mejores resultados (cantidad de impactos/cm²) se obtuvieron a una altura de 3 metros sobre el cultivo y una velocidad de vuelo de 3 m/s; mientras

que en fluidos con densidades de 1 g/cm³, la altura de vuelo óptima es de 2 metros sobre el cultivo y una velocidad de 4 m/s. En otras palabras, si se quiere realizar una fumigación en la que la mezcla de agua y plaguicida tenga una densidad baja (cercana a 1 g/cm³), el dron fumigador debe volar mas cerca del cultivo y a mayor velocidad, lo que implicaría que el tiempo de vuelo del dron sea menor, ya que tardaría menos en fumigar la misma superficie que si se configurasen los parámetros óptimos de vuelo para mezclas con densidades mayores (velocidad de 3 m/s y altura de 3 metros sobre el cultivo).

Tabla 16. Parámetros óptimos de vuelo para el dron fumigador en un cultivo de cerezos, los cuales se encuentran ordenados para cada densidad.

Densidad g/cm ³	Vuelo	Velocidad m/s	Altura m	Viento km/h	Temperatura °C	Humedad relativa %
1	4	4	2	7,22	15,22	74,35
1,09	8	3	3	8,66	22,01	48,75
1,74	9	3	3	10,76	19,96	59,1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 17 se observa que los mejores resultados se obtuvieron con vuelos a mayor altura (4 metros sobre el cultivo), mientras que en las velocidades, no se notó una tendencia clara, ya que en ambos extremos de la densidad, la mejor velocidad de vuelo fue de 3 m/s, lo cual, si dejamos de lado la diferencia numérica que es casi despreciable en términos de los impactos/cm² totales, resulta mejor volar a 3 m/s para aumentar la cobertura en el envés de las hojas,

ya que como se mencionó anteriormente, volar a 4 m/s genera demasiados impactos en el haz y muy pocos en el envés, mientras que volar a 3 m/s empareja bastante la cobertura.

Tabla 17. Parámetros óptimos de vuelo para el dron fumigador en un cultivo de kiwis, los cuales se encuentran ordenados para cada densidad.

Densidad g/cm ³	Vuelo	Velocidad m/s	Altura m	Viento km/h	Temperatura °C	Humedad relativa %
1	13	3	4	5,44	19,28	60,33
1,09	17	4	4	3,04	14,19	72,9
1,74	15	3	4	0,75	25,85	40,92

Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocidos los mejores parámetros de vuelo relacionados a cada densidad, y además, conociendo su respectivo vuelo, se adjuntará en la Tabla 18 y 19 tanto para los cerezos como los kiwis respectivamente los resultados que se obtuvieron para los vuelos descritos anteriormente en las Tablas 16 y 17 para luego compararlas con estudios similares.

En las Tablas 18 y 19 se muestran los impactos/cm², el diámetro y el área promedio de los impactos que recibieron las hojas tanto por el haz como el envés de éstas, además, se muestra de forma detallada, ya que se muestran los resultados por cada nivel (inferior, medio y superior en el caso de los cerezos e inferior y superior en el caso de los kiwis).

Tabla 18. Resultados de los mejores vuelos realizados en los cerezos de acuerdo con cada densidad.

Frutal: Cerezos			Haz de la hoja			Envés de la hoja		
Vuelo	Densidad g/cm ³	Nivel	Impactos/cm ²	Diámetro micras	Área mm ²	Impactos/cm ²	Diámetro micras	Área mm ²
4	1	Inferior	124,47	213,56	0,043	27,85	150,17	0,024
		Medio	116,58	218,87	0,051	11,69	132,18	0,023
		Superior	107,92	283,00	0,081	9,64	260,07	0,061
8	1,09	Inferior	146,76	172,26	0,033	103,45	124,57	0,015
		Medio	35,07	321,86	0,086	36,62	260,67	0,053
		Superior	35,57	273,48	0,062	5,37	237,78	0,049
9	1,74	Inferior	10,60	264,82	0,080	7,13	327,20	0,095
		Medio	20,86	306,31	0,081	12,59	223,27	0,042
		Superior	37,20	225,06	0,045	17,96	279,05	0,063

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Resultados de los mejores vuelos realizados en los kiwis de acuerdo con cada densidad.

Frutal: Kiwis			Haz de la hoja			Envés de la hoja		
Vuelo	Densidad g/cm ³	Nivel	Impactos/cm ²	Diámetro micras	Área mm ²	Impactos/cm ²	Diámetro micras	Área mm ²
13	1	Inferior	27,66	308,44	0,083	41,67	263,90	0,050
		Superior	35,82	409,88	0,143	22,34	417,64	0,145
17	1,09	Inferior	73,83	319,34	0,084	5,85	247,88	0,050
		Superior	116,60	368,61	0,110	23,13	270,16	0,055
15	1,74	Inferior	34,74	306,30	0,08	2,02	254,58	0,05
		Superior	48,40	333,70	0,09	40,26	332,63	0,09

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra una tabla extraída del manual de capacitación “Uso y manejo seguro de fitosanitarios en el sector frutihortícola”, en donde muestra la cobertura mínima que necesitan los distintos tipos de plaguicidas para garantizar la efectividad de éstos frente a los distintos tipos de plagas, enfermedades y malezas que afectan a los cultivos.

Tabla 20. Cobertura requerida por los agroquímicos de acuerdo con el producto y tipo de acción.

Producto	Acción	N° gotas/cm ²
Herbicidas	Contacto	30-40
	Sistémico	20-30
Insecticidas y fungicidas	Contacto	50-70
	Sistémico	20-30

Fuente: Manual de capacitación de Uruguay "Uso y manejo seguro de fitosanitarios en el sector frutihortícola"

Tabla 21. Cobertura requerida por los distintos agroquímicos.

Agroquímico	Cobertura (impactos por cm ²)	CV (%)
Herbicidas		
Sistémico o traslocables	20-30	30
De contacto	30-40	30
Fungicidas e insecticidas		
Sistémico o traslocables	20-30	70
De contacto	50-70	70

Fuente: Boletín INIA n°225

Se observa que tanto en la Tabla 20 como en la Tabla 21, se establece exactamente la misma cobertura para cada tipo de agroquímico, especificando la acción y el tipo de producto.

Comparando los resultados obtenidos en los cerezos con los requerimientos mostrados en la Tabla 20, se observa que para densidades bajas (1g/cm³), se produjo un mojamiento excesivo en el haz de las hojas, ya que el promedio entre los 3 niveles del cerezo fue de 116,3 impactos/cm², mientras que en el

envés fue solamente de 16,4 impactos/cm², por lo que se vuelve a demostrar que volar más rápido solo genera mejores resultados en el haz de las hojas, limitando la cobertura en el envés.

Por esta razón, es que recomendaría como parámetro óptimo (mirado desde el punto de vista de obtener resultados más homogéneos) al vuelo 7, ya que emparejó los impactos en el haz y el envés de las hojas, repitiéndose el patrón general de volar a 3 metros sobre el cultivo y a una velocidad de 3 m/s.

Tabla 22. Características del vuelo 7 en cerezos.

Frutal: Cerezos	Haz de la hoja			Envés de la hoja			
	Nivel	Impactos/cm ²	Diámetro micras	Área mm ²	Impactos/cm ²	Diámetro micras	Área mm ²
	Inferior	79,86	225,65	0,05	44,77	198,61	0,037
	Medio	40,97	311,59	0,078	20,15	290,55	0,069
	Superior	117,93	338,38	0,098	76,35	273,79	0,065

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar el vuelo 4 con el vuelo 7, el cual ambos tienen exactamente la misma densidad (1 g/cm³), pero diferente altura y velocidad de vuelo, se observa que al aumentar en un metro la altura de vuelo sobre el cultivo, cambia notablemente la distribución de los impactos en los niveles del cerezo, ya que volar a 2 metros sobre el cultivo (vuelo 4) se obtuvo una mayor concentración en el nivel inferior, mientras que aumentar la altura a 3 metros sobre el cultivo, la concentración de impactos ocurrió en el nivel superior. Además, con este cambio, se obtuvieron impactos de mayor diámetro, aumentando en un 22%

en el haz y un 40% en el envés de las hojas, lo cual es bastante favorable puesto que se cubre una mayor área con agroquímico en las hojas.

Combinando este cambio de la altura de vuelo con la disminución de la velocidad de vuelo a 3 m/s, se obtuvo una cobertura más homogénea, y que además, cumple con los requerimientos necesarios de una fumigación eficiente para cualquier tipo de agroquímico. Adicionalmente, en esta comparación se puede observar el comportamiento que tiene el efecto vórtice que produce el dron mediante sus 6 rotores, ya que, al volar más lento, este efecto tiende a ser más vertical, logrando así que el producto (plaguicida) impacte de mejor forma en el cerezo.

De acuerdo con los resultados obtenidos para la densidad media del cerezo (1,09 g/cm³), el vuelo 8 cumple con los requerimientos necesarios para lograr una aplicación eficiente, ya que el promedio entre los 3 niveles del cerezo fue de 73 impactos/cm² en el haz y 49 impactos/cm² en el envés, por lo que realizar una fumigación futura con las características y parámetros del vuelo 8 se obtendrían resultados de bastante buena calidad y con una cobertura adecuada, superando los requerimientos establecidos en la Tabla 20.

En el caso de un vuelo con densidad de la mezcla alta (1,74 g/cm³), a pesar de que se seleccionó el vuelo con los mejores resultados (vuelo 9), resultó que no cumple del todo con los requisitos mínimos de cobertura establecidos en la Tabla 20, ya que en promedio se obtuvieron 23 impactos/cm² en el haz y 13 impactos/cm² en el envés, por lo que solamente sería útil para agroquímicos

de acción sistémica. Una solución a este problema sería aumentar el mojado por hectárea, ya que, de esta manera al agregar más agua a la mezcla, disminuiría su densidad aumentando así la eficiencia de la aplicación.

En el caso de los kiwis, analizando el promedio de los impactos/cm² en el nivel superior como inferior tanto en el haz como el envés de las hojas, la cobertura que se obtuvo en general fue bastante deficiente en el envés de las hojas, ya que según lo establecido en la Tabla 20, para productos de acción sistémica es necesaria una cobertura de 20 a 30 impactos/cm² como mínimo, y de 50 a 70 impactos/cm² para insecticidas y fungicidas de acción de contacto. En el caso de mezclas de baja y alta densidad (1 g/cm³ y 1,74 g/cm³ respectivamente) superaron los requerimientos establecidos en la Tabla 20, mientras que para mezclas de media densidad (1,09 g/cm³) apenas se obtuvieron 15 impactos/cm².

Si se analiza el haz de las hojas, se observa que en el vuelo 17, correspondiente a una mezcla de densidad media, se obtuvo la mejor cobertura, logrando un promedio de 95 impactos/cm², lo cual, dependiendo de los objetivos de la fumigación, emparejaría la situación con el envés de las hojas, en donde se obtuvieron apenas 15 impactos/cm². Ahora bien, si se analiza el vuelo 14, en el cual se utiliza la misma densidad de mezcla y la misma altura (1,09 g/cm³ y 4 metros respectivamente) pero con una velocidad menor (3 m/s), no se obtuvieron mejores resultados en el envés, por lo que no se repite la situación de los cerezos. Cabe destacar que en ambos vuelos (14

y 17) el dron fumigador realizo la trayectoria exactamente sobre la hilera, además, no se observa una tendencia clara para poder determinar la trayectoria óptima del dron fumigador en este tipo de frutales.

En los vuelos de baja y alta densidad (1 g/cm³ y 1,74 g/cm³), solamente se cumple con la cobertura para productos de acción sistémica, ya que los insecticidas y fungicidas de contacto requieren entre 50 y 70 impactos/cm², y en los kiwis solamente se lograron en promedio 32 impactos/cm² para mezclas de baja densidad y 42 impactos/cm² para mezclas de alta densidad.

Ahora que se conoce la efectividad de los vuelos realizados junto con los parámetros óptimos de vuelo asociados a cada densidad de mezcla y a cada requerimiento u objetivo de la fumigación, se puede comparar con investigaciones similares.

Para abordar esta comparación, se buscaron estudios en los que el dron fumigador sea exactamente el mismo, es decir, el DJI Agras T20. Por ejemplo, el 3 de junio del 2020 se llevo a cabo una investigación a cargo del profesor Wu Zhiming de la Universidad Agrícola de Shanxi para combatir la plaga de pulgones en duraznos, los cuales se encontraban altamente infectados, de hecho, se encontraron entre 800 a 1.000 pulgones en el envés de una sola hoja, por lo que decidieron realizar la fumigación con un alto volumen de mojamiento (75 litros por hectárea) y a una velocidad súper lenta de 2 m/s. Esta velocidad garantiza en frutales hilerados una excelente cobertura en el envés de las hojas, de hecho, los resultados que se obtuvieron tras 72 horas

posteriores a la fumigación fue de una tasa de mortalidad de los pulgones del 99% en el envés y de un 95% en el haz, además, la eliminación de los pulgones en el tronco fue superior al 99%, lo que refleja la correcta selección de los agroquímicos y parámetros de vuelo. En cuanto a las condiciones ambientales, fue una fumigación sin viento, con temperaturas de 30°C y humedad relativa del 80%, siendo así condiciones ambientales fuera del rango que se presentaron en esta investigación, lo cual demuestra la eficiencia de un dron fumigador ante condiciones de temperaturas altas. (Wu Zhiming, 2021).

Otro estudio realizado el 12 de mayo del 2021 por la empresa prestadora de servicios Tay Nguyen Iflight perteneciente a AgriDrone Vietnam, en la que se utiliza un DJI Agras T20 para erradicar una plaga de trips en un campo montañoso de 28 hectáreas con un cultivo de pimientos, utilizó exactamente los mismos parámetros de vuelo y características técnicas para realizar la fumigación con los parámetros probados en esta investigación, es decir, utilizaron el mismo dron con las mismas boquillas (RX110015VS), misma altura de vuelo sobre el cultivo (2,5 a 3 metros), velocidad de vuelo de 4 m/s, interlineado de 5 metros (distancia entre pasadas) y mojamiento de 40 l/há.



Figura 42. Cultivo de pimientos en Vietnam donde se realizó el estudio.

Fuente: (AgriDrone Vietnam, 2021)

Las condiciones ambientales que se registraron al momento de realizar la fumigación fue una temperatura de 28°C y velocidad del viento entre los 3 y 7 km/h. Con estos parámetros y condiciones ambientales, los resultados que se obtuvieron tras 15 días de seguimiento post fumigación fue la erradicación de la plaga, permitiendo la floración del cultivo de forma simultánea y regular. Esto demuestra la efectividad del DJI Agras T20 al utilizar los parámetros de vuelo correctos, los cuales coinciden con los parámetros de vuelo determinados en esta investigación.

6. CONCLUSIÓN

Para validar la hipótesis planteada en esta hipótesis, se realizaron 18 vuelos para cada especie frutal, en donde se utilizaron 3 densidades distintas de la mezcla (1 g/cm³, 1,09 g/cm³ y 1,74 g/cm³), 3 alturas de vuelo (2 m, 3 m y 4 metros sobre el frutal) y 2 velocidades (3 y 4 m/s).

Los resultados obtenidos en esta tesis permitieron validar la hipótesis planteada, dado que la densidad del fluido, mojamiento, altura y velocidad de vuelo del dron fumigador afectaron la distribución y eficacia de la fumigación foliar en frutales. De este modo, se encontraron los parámetros óptimos de vuelo para el dron DJI Agras T20 al momento de fumigar las especies frutales cerezo (KGB) y kiwi (parrón). Además, se demostró la potencialidad de la Inteligencia Artificial Generativa (LLM) en el rubro agrícola, y más específicamente en el área de la agricultura de precisión, un mundo que esta en crecimiento constante y que al usar las herramientas adecuadas como la IA se puede optimizar el uso de los recursos y labores agrícolas.

En particular, se demostró que la variable más influyente en la calidad de la aplicación fue la variable densidad de mezcla (agua + agroquímico). Así, cuando la densidad de la mezcla es alta (1,74 g/cm³) la eficiencia de la aplicación disminuye considerablemente, principalmente en los kiwis, ya que con un mojamiento de 40 L/há, solamente es efectivo para productos de acción sistémica, mientras que para productos de acción de contacto resulto ser ineficiente.

La altura de vuelo en los frutales tipo parrón también tuvo efecto en la aplicación de la mezcla, ya que se demostró que los mejores resultados se obtuvieron con alturas de vuelo altas (4 metros sobre el cultivo).

En el caso de los cerezos, se determinó que con un mojamiento de 40 litros por hectárea y una altura de vuelo de 3 metros sobre el cultivo es suficiente para lograr los impactos/cm² mínimos que necesita una fumigación eficiente. Esto es válido para mezclas (agua + agroquímico) de baja y media densidad, ya que, en el caso de mezclas de alta densidad, resultó ser deficiente para productos de insecticidas y fungicidas de contacto.

Se demostró que la velocidad de vuelo del dron, tanto para los cerezos como para los kiwis, influye principalmente en la ubicación donde se deposita el rociado del dron, ya que al realizar vuelos más lentos (3 m/s) se logra aumentar la cobertura en el envés de las hojas, mientras que volar a velocidades más altas (4m/s), favorece la cobertura por el haz de la hoja.

Durante el desarrollo de esta investigación, se analizaron las variables ambientales gracias a una estación meteorológica ubicada en el campo de estudio, y se determinó que el factor ambiental más influyente es el viento, sobre todo la dirección de éste, ya que vientos perpendiculares a la trayectoria de vuelo del dron son desfavorables. Cuantitativamente, vientos de hasta 7 km/h no afectaron considerablemente la distribución de los impactos/cm² en los papeles hidrosensibles, pero al aumentar la velocidad del viento por sobre los 7 km/h, se observó visualmente el desplazamiento del efecto vórtice, lo que

genera zonas del frutal en las que el rociado del dron no impacte correctamente.

Uno de los aspectos más innovadores en esta investigación fue el uso de la Inteligencia Artificial Generativa, la cual se utilizó para analizar datos y predecir parámetros óptimos de vuelo.

Mediante el análisis de datos, la IA evaluó patrones de distribución del agroquímico para sugerir configuraciones de vuelo basadas en condiciones tanto ambientales como operacionales específicas, demostrando que los modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM) son herramientas muy poderosas y que sirven como apoyo en la toma de decisiones agrícolas.

El LLM utilizado para desarrollar esta investigación cumplió en su totalidad con el objetivo específico, ya que mediante el correcto uso de la IA se logró predecir los parámetros óptimos de vuelo. Para llevar a cabo esta predicción se utilizaron prompts que permitieron el aprendizaje y entrenamiento de la IA (ChatGPT), posteriormente, se utilizaron modelos predictivos en los que se compararon entre si y se relacionaron con estudios similares.

7. BIBLIOGRAFÍA

(S/f). Gub.uy. Recuperado el 21 de febrero de 2025, de https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/MANUAL%20DE%20FITOSANITARIOS.pdf?utm_source=chatgpt.com

(S/f-b). Inia.cl. Recuperado el 24 de febrero de 2025, de <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/766a61f0-d1ed-4020-9fba-17ca1ba78ea8/content>

¿Cómo operar un dron en Chile? (s. f.). dgac.gob.cl. Recuperado 15 de junio de 2024, de <https://www.dgac.gob.cl/como-operar-un-dron-en-chile/#:~:text=En%20ellas%20se%20establece%2C%20entre,operaci%C3%B3n%20otorgada%20por%20la%20DGAC.&text=La%20persona%20debe%20contar%20con,para%20operar%20en%20zonas%20populadas.>

¿Qué es la agricultura de precisión? (2024, 31 julio). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/agricultura-de-precision/index.cshhtml>

7 aplicaciones de la agricultura de precisión | BASF Chile. (s. f.). <https://agriculture.basf.com/cl/es/contenidos-de-agricultura/digitalizacion-agricultura-precision>

Academia de Drones de Chile. (2023, 31 enero). Asesoría en Certificación empresa AOC para Drones uso Fumigación - Academia de Drones de Chile. <https://www.academiadronchile.cl/producto/asesoria-en-certificacion-empresa-aoc-para-drones-uso-fumigacion/>

Aplicadores de plaguicidas | SAG. (s. f.). <https://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/aplicadores-de-plaguicidas>

Azúcar Iansa. (s. f.). Proceso archivos | Azúcar Iansa. https://empresasiansa.cl/azucar-iansa/question_category/proceso/

BENEFICIOS DE LA FUMIGACIÓN AGRÍCOLA y FORESTAL POR MEDIO DE DRONES. (s. f.). <https://www.agrosmartchile.cl/> . Recuperado 3 de junio de 2024, de <https://www.agrosmartchile.cl/beneficios/>

- Besides pest and disease management, the flowering pepper stage is also an important step in the process of caring for pepper plants. In order to have a high yield, pepper must be healthy and disease-free. (s. f.). DJI. <https://ag.dji.com/case-studies/dji-ag-case-en-pepper>
- Brandbits, & Brandbits. (2024, 15 noviembre). Random Forest vs Gradient Boosting: ¿Cuál es la mejor opción para tu empresa? - DataQu. DataQu -. <https://dataqu.ai/random-forest-vs-gradient-boosting-cual-es-la-mejor-opcion-para-tu-empresa/>
- DJI. (2021). DJI Agras T20. Retrieved from <https://www.dji.com/agras-t20>
- Drones for Spraying Pesticides—Opportunities and Challenges. (s. f.). Ohionline. <https://ohionline.osu.edu/factsheet/fabe-540>
- Drones pulverizadores. (s. f.). ViLab. <https://www.vilab.cl/p/drones-pulverizadores>
- FAO. (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>
- Gil, J. A., Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., & Planas, S. (2013). Advances in pesticide application in tree fruit crops. In Pesticide dose: Effects on the environment and target and non-target organisms (pp. 239-268). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5340-3_13
- Huang, Y., Reddy, K. N., Fletcher, R. S., & Thomson, S. J. (2015). Airborne remote sensing assessment of the damage to cotton caused by spray drift from aerially applied glyphosate. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 8(3), 19-26. <https://doi.org/10.3965/ijabe.20150803.2277>
- ImageJ. (s. f.). <https://imagej.net/ij/>
- Javi. (2023, 19 junio). ¿Qué es y cómo funciona una Cámara Multiespectral? UMILES. <https://umilesgroup.com/camara-multiespectral/>
- June. (s/f). A peach orchard in Jingshen Village, Taigu District, Shanxi province suffered devastating aphid swarms this year due to insufficient pest control and unfavorable weather. DJI. Recuperado el 26 de febrero de 2025, de <https://ag.dji.com/case-studies/dji-ag-case-en-peach>
- June. (s/f). A peach orchard in Jingshen Village, Taigu District, Shanxi province suffered devastating aphid swarms this year due to insufficient pest control and unfavorable weather. DJI. Recuperado el 26 de febrero de 2025, de <https://ag.dji.com/case-studies/dji-ag-case-en-peach>

- Pepinosa, J. (2023, 24 octubre). Qué es un prompt y por qué es un el elemento clave para utilizar la inteligencia artificial. Infobae. <https://www.infobae.com/tecno/2023/10/24/que-es-un-prompt-y-por-que-es-un-el-elemento-clave-para-utilizar-la-inteligencia-artificial/>
- Pino, E., V. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia, ahead*, 0. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292019005000402>
- Redagrícola. (2023, 20 abril). Huertos de cerezos peatonales y semipeatonales en la zona central de Chile. Redagrícola. <https://redagricola.com/sistema-de-conduccion-para-cerezos/>
- Sankaran, S., Khot, L. R., Espinoza, C. Z., & Jarolmasjed, S. (2015). Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *European Journal of Agronomy*, 70, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.07.004>
- Schroeder, A. B., Dobson, E. T. A., Rueden, C. T., Tomancak, P., Jug, F., & Eliceiri, K. W. (2020). The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis. *Protein Science*, 30(1), 234-249. <https://doi.org/10.1002/pro.3993>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, P., Huang, Y., Pu, R., Gonzalez, P. J., & Niu, Z. (2016). An automated method for estimating leaf area index from canopy gap fraction data using digital hemispherical photography. *Remote Sensing*, 8(8), 657. <https://doi.org/10.3390/rs8080657>