



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas

**Evaluación de la eficiencia de la aplicación de un regulador
de crecimiento en arroz (*Oryza sativa*) para diferentes
volúmenes de aplicación de dron y “spray boom”.**

Esteban Alberto Arroyo Mejías

Isaac Joel Venegas Méndez

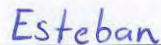
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

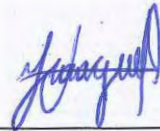
2023

Hoja de aprobación

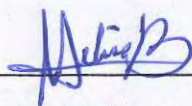
Este Trabajo Final de Graduación fue sometido a revisión por la comisión de trabajos finales de graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas.



Esteban Arroyo Mejías
Candidato



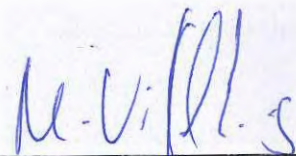
Isaac Venegas Méndez
Candidato



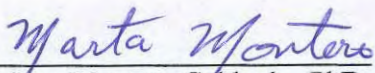
Ing, M. Melissa Rojas Downing, PhD
Directora



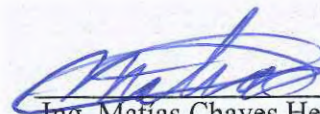
Ing, Alejandra Rojas González, PhD
Asesor del proyecto



Ing, Max Villalobos Acuña, PhD
Asesor del proyecto



Ing, Marta Montero Calderón, PhD
Directora de la Escuela de
Ingeniería y de Biosistemas
y miembro del tribunal examinador



Ing, Matías Chaves Herrera, M.Sc
Lector adicional

DEDICATORIA

Esteban Alberto Arroyo Mejías

A mi padre Eddy Arroyo Trejos y a mi madre Cecilia Mejías Mora por apoyarme siempre durante toda mi etapa educativa.

Isaac Joel Venegas Méndez

A Jesús, por estar siempre conmigo y ayudarme, por ser mi fuerza, mi refugio y fuente de sabiduría en todo tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Esteban Alberto Arroyo Mejías

A la profesora Melissa Rojas Downing, PhD por las revisiones del trabajo final de graduación, así como sus consejos, paciencia y apoyo. Además, por el claro interés y profesionalismo mostrado con lo cual me motivó a dar lo mejor de mí durante esta investigación y los cursos finales de licenciatura.

A la profesora y asesora Alejandra Rojas González, PhD y al asesor Max Villalobos Acuña, PhD por las sugerencias y participación en la realización de este proyecto.

Al Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) por facilitarnos las pruebas de calidad molinera del arroz y permitirnos participar en estas, mientras nos enseñaban procesos de interés en el laboratorio.

Al productor Oscar Venegas por proporcionar el campo donde se realizó la investigación, además de transporte, alimentación y materiales necesarios para las pruebas. Y a Xiomara Méndez por recibirme en su casa durante los días de las pruebas en campo.

A Ronny Acón, Iván Valverde, Rodolfo Valverde y Ernesto Solera que brindaron los equipos de aspersión necesarios, sugerencias y la ayuda con la que pudimos completar las pruebas de campo.

A mis padres Eddy Arroyo y Cecilia Mejías por todo el esfuerzo, apoyo e impulso que me permitieron llegar a este punto.

A mi pareja Lesly Cordero Lobo por acompañarme y apoyarme durante la ejecución de este proyecto y durante toda mi etapa universitaria.

A mis familiares Greivin Arroyo, Gloriana Arrieta, Iván Méndez y Lucía Arroyo por apoyarme de diversas formas en toda mi etapa universitaria.

A la Universidad de Costa Rica, la escuela de ingeniería de Biosistemas y profesores por permitirme estudiar y por todo el conocimiento y desarrollo como profesional brindado.

Isaac Joel Venegas Méndez

A la profesora Melissa Rojas Downing, PhD por su apoyo de excelencia en el proyecto de graduación. Por su claro interés en que se realizara todo de la mejor manera posible.

A la profesora y asesora Alejandra Rojas González, PhD y al asesor Max Villalobos Acuña, PhD por sus comentarios, sugerencias y apoyo en el proyecto de graduación.

A mi mamá, Xiomara Méndez Ovarés, por su apoyo en todas las áreas de mi vida, por su amor y admiración.

A mi papá, Oscar Venegas Guerrero por velar siempre por mi bienestar, y por su generosidad conmigo.

A mi hermana Tamara Venegas Méndez, por su cariño y sus constantes ánimos para que siguiera adelante.

Al amor de mi vida, María Angélica Prado Mora, por estar siempre conmigo, apoyarme en mis tiempos de estudio y fuera de estudio con tanto amor, por enseñarme e impulsarme a ser mejor.

A mi pastora Clotilde Mora Mora, por darme palabras de sabiduría de parte del Señor y orar por mí.

A Ronny Acón, Iván Valverde, Rodolfo Valverde y Ernesto Solera, quienes brindaron apoyo técnico con altruismo y de buena fe.

Al Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) por facilitar sus instalaciones y personal para llevar a cabo las pruebas de calidad molinera.

A la Universidad de Costa Rica y la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por todo el proceso de enseñanza para formarme como profesional.

Índice

ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
Resumen.....	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo general.....	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Marco conceptual	5
2.1.1. Métodos de aplicaciones de agroquímicos en arroz	5
2.1.2. Regulador de crecimiento	7
2.1.3. Pruebas de homogeneidad de aplicación y software de análisis de imágenes.....	7
2.1.4. Pruebas de calidad molinera en arroz	8
2.1.5. Pruebas estadísticas en diseño experimental.....	10
2.2. Antecedentes	11
2.2.1. Parámetros críticos para aplicaciones líquidas	11
2.2.2. Rendimiento productivo en el país y la región Chorotega.....	12
2.2.3. Análisis de calidad molinera.....	14
2.2.4. Homogeneidad de aplicaciones líquidas.....	15
2.2.5. Evaluación de costos.....	16
2.3. Marco legal.....	16
3. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Descripción general.....	17
3.2. Sitio de estudio	19
3.3. Diseño experimental.....	20
3.3.1. Descripción del equipo y características para aplicación con spray boom.....	21
3.3.2. Descripción del equipo y características para aplicación con dron	22
3.3.3. Determinación de momento óptimo para aplicación del regulador de crecimiento	23
3.3.4. Cantidad de regulador de crecimiento aplicada por tratamiento	23
3.3.5. Cosecha de arroz.....	24
3.4. Análisis de rendimiento productivo	24
3.5. Determinación de calidad molinera de arroz.....	25

3.6.	Determinación de la homogeneidad de la aplicación.....	25
3.7.	Análisis de costos asociados	27
3.7.1.	Costos fijos en tractor y spray boom.....	28
3.7.2.	Costos variables en tractor y spray boom	28
3.7.3.	Costos fijos en dron	30
3.7.4.	Costos variables en dron	30
3.8.	Identificación del método de aplicación óptimo	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1.	Determinación del volumen de aplicación óptimo con spray boom	31
4.1.1.	Rendimiento productivo.....	31
4.1.2.	Calidad molinera.....	33
4.1.3.	Homogeneidad de aplicación con spray boom	36
4.1.4.	Costos asociados	37
4.1.5.	Tratamiento más eficiente en aplicaciones líquidas con el uso de spray boom.....	39
4.2.	Determinación del volumen de aplicación óptimo con dron.....	41
4.2.1.	Rendimiento productivo.....	41
4.2.2.	Calidad molinera.....	43
4.2.3.	Homogeneidad de aplicación con dron.....	45
4.2.4.	Costos asociados	46
4.2.5.	Tratamiento más eficiente en aplicaciones líquidas con el uso de dron.	48
4.3.	Identificación del método de aplicación más eficiente	48
5.	CONCLUSIONES	54
6.	RECOMENDACIONES.....	56
	REFERENCIAS.....	58
	APÉNDICES.....	67

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AP: Arroz pilado.

CC: Consumo de combustible de una bomba en L/h.

CIGRAS: Centro para Investigaciones en Granos y Semillas.

CV: Coeficiente de variación.

D10: Tratamiento dron con volumen de 10 L/ha.

D20: Tratamiento dron con volumen de 20 L/ha.

D30: Tratamiento dron con volumen de 30 L/ha.

FB: Flujo de agua obtenido de una bomba en L/h.

FE_{dieselCO2}: Factor de emisión de dióxido de carbono en la combustión.

GD: Grano dañado.

GDC: Grano dañado por calor.

GE: Grano entero.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GM: Grano manchado.

GQ: Grano quebrado.

GQG: Grano quebrado grueso.

GR: Grano rojo.

GY: Grano yesoso.

fc: Factor de combustible.

fr: Factor de reparación de equipos.

fs: Factor de salvamento que depende del equipo.

IA: Costos de impuestos y almacenamiento en dron.

ISA: Costos de impuestos, seguros y almacenamiento en spray boom.

L_{diesel}: Cantidad de diésel consumida por el tractor.

Pu: Puntilla.

RAC: Rendimiento de arroz comercial.

RGE: Rendimiento de grano entero.

RPAS: Aeronaves Pilotadas a Distancia.

RPi: Rendimiento de pilada.

RPu: Rendimiento de puntilla.

RQ: Rendimiento de grano quebrado.

RQG: Rendimiento de grano quebrado grueso.

RS: Rendimiento de semolina.

S: Semolina.

SB100: Tratamiento spray boom con volumen de 100 L/ha.

SB150: Tratamiento spray boom con volumen de 150 L/ha.

SB200: Tratamiento spray boom con volumen de 200 L/ha.

T_{CO2}: Emisión total de dióxido de carbono del tractor.

Ua: Horas de uso del equipo por hectárea aproximadas.

UAV: Vehículos aéreos no tripulados.

UCR: Universidad de Costa Rica.

Va: Volumen de aplicación en L/ha

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Peso de arroz cosechado en Costa Rica y en la región Chorotega. Datos recolectados por Consejo Nacional de Arroz.....	13
Figura 2. Rendimiento productivo en Costa Rica y en la Región Chorotega. Datos recolectados por Consejo Nacional de Arroz.....	13
Figura 3. Diagrama metodológico	18
Figura 4. Mapa zonal de finca donde se llevó a cabo la investigación.....	19
Figura 5. Tractor y spray boom utilizados durante aplicaciones líquidas.....	21
Figura 6. Dron utilizado durante las aplicaciones líquidas.....	22
Figura 7. Muestra de grano lechoso.....	23
Figura 8. “Machina” utilizada durante la cosecha	24
Figura 9. Muestras llevadas al CIGRAS para pruebas de calidad molinera.....	25
Figura 10. (a) fotografía de lámina de papel hidrosensible, (b) rectángulo de referencia, (c) recorte de la imagen, (d) ráster de la clasificación no supervisada y (e) capa de polígonos con la información de cobertura.....	26
Figura 11. Comparación de rendimientos promedio nacional y de la región Chorotega con el rendimiento de aplicaciones con spray boom.....	33
Figura 12. Distribución porcentual de los costos asociados al uso del spray boom.....	39
Figura 13 . Comparación de rendimientos promedio nacional y de la región Chorotega con el rendimiento de aplicaciones con dron.....	42
Figura 14. Gráfico de cajas para la cobertura según el tratamiento.....	45
Figura 15. Distribución porcentual de los costos variable asociados al uso del dron del tratamiento D10.....	47
Figura 16. Gráfico de cajas del rendimiento de D20, SB100 y SB200.....	50
Figura B. 1. Distribución de unidades experimentales.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. División de trabajo de los investigadores por objetivos	4
Tabla 2. Abreviaturas de términos referentes a calidad molinera en arroz según norma “RTCR 406-2007” (MAG, 2008).	8
Tabla 3. Medidas de resumen estadístico del rendimiento productivo de las parcelas de arroz con tres tratamientos de spray boom y un control.	32
Tabla 4. Prueba de normalidad y ANOVA aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de spray boom y un control.....	32
Tabla 5. Prueba de normalidad y ANOVA, aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de spray boom y un control.....	34
Tabla 6. Medidas de resumen estadístico del RAC de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de spray boom y un control.....	34
Tabla 7. Comparación de parámetros de calidad molinera obtenidos de las parcelas tratadas con spray boom contra reportados por otros estudios	35
Tabla 8. Prueba de normalidad Shapiro Wilks aplicada a los tres tratamientos de spray boom. .	36
Tabla 9 . Cobertura promedio y CV de los tres tratamientos de spray boom.	36
Tabla 10 . Costos variables asociados a aplicaciones líquidas con el uso del spray boom.	38
Tabla 11. Resumen de parámetros evaluados en los tratamientos con spray boom.	39
Tabla 12. Medidas de resumen estadístico del rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con dron y control.....	41
Tabla 13. Prueba de normalidad y ANOVA aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con dron y control.	42
Tabla 14 . Prueba de normalidad, ANOVA y prueba de Kruskal-Wallis, aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz con tres tratamientos de dron y un control.	43
Tabla 15 . Medidas de resumen estadístico del RAC de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de dron y un control.	43
Tabla 16 . Comparación de parámetros de calidad molinera obtenidos de las parcelas tratadas con dron contra reportados por otros estudios.	44
Tabla 17. Cobertura promedio y coeficiente de variación según tratamiento.	45
Tabla 18. Promedio de cobertura en gotas/cm ² para los tratamientos aplicados con dron.	46
Tabla 19. Prueba de normalidad Shapiro Wilks aplicada a los tratamientos de dron.....	46
Tabla 20. Costos variables asociados a aplicaciones líquidas con el uso del dron.	47
Tabla 21. Resumen de parámetros evaluados en los tratamientos con dron.....	48
Tabla 22. Principales comparaciones entre métodos de aplicación.	48
Tabla 23. Prueba de normalidad y ANOVA para comparación de rendimiento productivo y calidad molinera en D20, SB100 y SB200.....	49

Tabla 24 . Resumen de parámetros estudiados en aplicaciones líquidas con tratamiento SB100, SB200 y D20..... 50

Tabla 25. Prueba de normalidad aplicada a los datos de cobertura de los tratamientos D20 y SB200. 51

Tabla 26. Resumen comparativo de los métodos evaluados..... 53

APÉNDICE A

Tabla A.1. Rendimiento productivo de arroz en Costa Rica. 69

Tabla A.2. Rendimiento productivo de arroz en Región Chorotega..... 69

Tabla A.3. Datos meteorológicos de días cercanos a las aplicaciones realizadas el 20/21 de octubre, 2022..... 70

APÉNDICE C

Tabla C. 1. Rendimiento productivo medido de cada unidad experimental. 74

Tabla C. 2. Recolección de datos en laboratorio y resultados para impurezas y humedad. 75

Tabla C. 3. Datos recolectados en laboratorio para cálculo de factores de mesa. 76

Tabla C. 4. Resultados de factores de mesa..... 77

Tabla C. 5. Datos recolectados en laboratorio para cálculo de rendimientos de calidad molinera. 78

Tabla C. 6. Resultados de rendimientos de calidad molinera. 79

Tabla C. 7. Cobertura según tratamientos aplicados con dron. 80

Tabla C. 8. Cobertura según tratamientos aplicados con spray boom 81

Resumen

El arroz es uno de los alimentos más importantes a nivel mundial. El uso de reguladores de crecimiento podría ayudar a mejorar algunas características como la calidad molinera y el llenado de grano. Estos agroquímicos se aplican sobre el campo cultivado, tradicionalmente, con el uso de un spray boom, bomba de mano o incluso avionetas. Sin embargo, recientemente ha aumentado el uso de drones para esta labor. Aun así, existe una falta de estándares en este método de aplicación y una ausencia de comparación con los métodos tradicionales mencionados. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar diferencias en la eficiencia de la aplicación de un regulador de crecimiento de arroz (*Oryza sativa*) mediante aplicaciones de dron y “spray boom”, considerando como parámetros el rendimiento productivo, la calidad molinera, la homogeneidad de la aplicación y los costos asociados. Para alcanzar este objetivo, tres tratamientos de spray boom (SB100=100 L/ha, SB150=150 L/ha and SB200=200 L/ha), tres tratamientos con dron (D10=10 L/ha, D20=20 L/ha and D30=30 L/ha) y un tratamiento control, fueron llevados a cabo en una plantación de arroz en Pavones, Guanacaste, Costa Rica. En ambos métodos, dron y spray boom, no se encontraron diferencias significativas en los parámetros de rendimiento productivo y calidad molinera. En el caso del spray boom, el tratamiento SB100 es el que posee menores costos asociados siendo 7,50 % menos que SB200 mientras que SB200 es el que posee mayor homogeneidad de aplicación al presentar un coeficiente de variación (CV) de 30,92 % siendo el menor de los tres tratamientos. Para el caso de los tratamientos aplicados con dron, D20 presenta mayores costos asociados en 18,76% con respecto a D10, y D30 es 43,37% mayor en costos que D10. Además, D20 posee mayor cobertura y un CV menor 48,49 % que indica mayor homogeneidad en comparación con los otros dos tratamientos. Se concluyó que el tratamiento más eficiente para la aplicación de un regulador de crecimiento, en las condiciones del estudio realizado, es el SB100, el cual es el tratamiento de spray boom con menores costos y que cumple con más de 20 gotas/cm² de cobertura según se recomienda para agroquímicos sistémicos, aventajando en este aspecto a los tratamientos con dron.

Palabras clave: dron, spray boom, regulador de crecimiento, calidad molinera, rendimiento productivo, homogeneidad, costos.

1. INTRODUCCIÓN

El arroz se ha posicionado como uno de los alimentos más importantes a nivel mundial. En cuanto a consumo y producción, es el segundo producto agrícola después del trigo. Para el año 2020 su producción anual en el mundo fue de 508,7 millones de toneladas y se estima que el 88 % se produjo en Asia, principalmente en China y la India (Food and agriculture organization [FAO], 2020b). El arroz es el alimento principal en la dieta de aproximadamente 2 500 millones de personas en el mundo (Pinciroli et al., 2015). Sin embargo, se valora que para el año 2050 se deberá producir un 70 % más de alimentos, lo que equivale a una producción de cereales cercana a 3 000 millones de toneladas (FAO, 2009).

A pesar de su notable importancia, en el desarrollo del arroz se generan altas emisiones de metano, que junto al gasto de agua y las pérdidas y desperdicios, catalogan al arroz como un producto con gran huella ambiental (FAO, 2019). De igual forma, con respecto al consumo de agua, todos los productos agrícolas están involucrados en este sentido. De hecho, el 70 % (95 % en países en vías de desarrollo) de las extracciones de agua se utilizan en agricultura, definiéndola como una de las principales causas de la escasez del recurso hídrico, pero que al mismo tiempo se ve afectada por esta situación (FAO, 2019).

En Costa Rica, en la temporada 2021-2022 se produjeron 153 173 toneladas de arroz con más de 35 mil hectáreas sembradas y 33 mil hectáreas cosechadas (Instituto Nacional de Estadística y Censo [INEC], 2023), y se indica que en el 2021 el arroz representó el 91,5 % de la producción de granos básicos en el país (INEC, 2022). La importancia de este producto y la modernización en los métodos de trabajo es tal, que la Corporación Arroceras Nacional (CONARROZ) junto con la Universidad Técnica Nacional (UTN) crearon la Escuela Nacional del Arroz (ENA). El objetivo es capacitar y actualizar conocimientos de los productores locales en temas que van desde el mejoramiento genético e innovaciones en fertilización hasta agricultura de precisión (Cruz, 2020).

El arroz posee tres etapas de crecimiento: fase vegetativa, fase reproductiva y fase de maduración (Garcés y Medina, 2018). En estas etapas las plantas liberan hormonas en pequeñas concentraciones que participan en procesos fisiológicos a nivel celular, cambiando o controlando el crecimiento vegetal principalmente (Alcántara et al., 2019). Debido a que la liberación de estas hormonas es dependiente de condiciones climáticas como las altas temperaturas (Orozco et al., 2012) y con el fin de mejorar el crecimiento vegetal, fue necesario crear los reguladores de crecimiento. Los reguladores son agroquímicos sistémicos que permiten el control de este proceso específico, por lo general, son más efectivos que las hormonas naturales (Alcántara et al., 2019) y es justamente en la etapa de maduración donde estos productos podrían optimizar las características de crecimiento del grano. La aplicación de estos productos químicos en el arroz se da de forma común mediante el uso de “spray boom”, sin embargo, este método conlleva algunas afectaciones medioambientales, en eficiencia de la labor y en la producción del grano en general.

El aprovechamiento y eficiencia de las aplicaciones por medio de métodos comunes (tractores, avionetas, bombas de espalda, entre otros), se ve afectado por diversos factores. Entre ellos está la deriva que crea variaciones en homogeneidad y cobertura de la aplicación y es provocada por condiciones climáticas como el viento, las herramientas utilizadas en la labor, la composición de las preparaciones líquidas, habilidades del operador e incluso por la morfología de la planta tratada (Wang et al., 2018). Otro factor para considerar es el daño que reciben los cultivos por los

neumáticos de la maquinaria ya que cualquier planta que se encuentre donde pasará la maquinaria será destruida y además en el suelo se produce compactación (García Rodríguez, 2020). Estos aspectos del equipo agrícola común llevan a los productores a crear caminos para el paso de estos y se da una consecuente disminución del área disponible para producción.

Junto a estos factores, el uso de maquinaria agrícola tradicional tiene implicaciones en el tiempo de trabajo, el cual se ve ampliado con respecto a tecnologías de precisión y depende de las maniobras que se deben realizar con el equipo, la velocidad de avance e incluso la experiencia o manejo por parte del operario (Martínez et al., 2019). Además, el spray boom, a pesar de presentar desventajas, ha sido utilizado por muchos años y los estudios actuales sobre este equipo se enfocan principalmente en el análisis estructural (variación de boquillas (Matilde et al., 2018) o generadores de viento (Lamare et al., 2022)) y su efecto en la distribución del líquido (Foque et al., 2013), mientras que estudios sobre variaciones en rendimiento, calidad o costos según el volumen utilizado son escasos. Por lo tanto, se considera necesaria la búsqueda de opciones tecnológicas e innovadoras que permitan realizar las labores en el cultivo con mayor eficiencia.

Dicho esto, gracias a los avances tecnológicos en este sector, se ha presentado una reciente alternativa en el campo agrícola para la aplicación de agroquímicos; los drones que pueden ser utilizados para muchas actividades. Entre estas destacan el monitoreo de áreas en riesgo por desastres naturales (FAO, 2018), monitoreo de tierras degradadas, mapeo y planeamiento de uso (FAO, 2020a), recolección de imágenes multiespectrales para su procesamiento y aplicación de productos químicos. En el país, el interés por el uso de drones ha aumentado en los últimos años y existen compañías que ofrecen drones con capacidades de tanque que van desde 10 L hasta 40 L (Indigodrones, 2023a). Sin embargo, su uso es tan reciente que hasta la mitad del año 2021 se inscribió el primer dron para uso totalmente agrícola en Costa Rica que cuenta con la aprobación del Consejo Técnico de Aviación Civil, el Servicio Fitosanitario del Estado y la Dirección General de Aviación Civil (Camarillo, 2021).

La investigación de eficiencias en el uso de drones agrícolas trasciende a muchos sectores de la sociedad. Dentro de estos, se puede recalcar que estudios como el presentado en esta investigación, impulsan el desarrollo sostenible del país, ya que, se interesa por la posibilidad de hacer reducciones importantes en uso del agua para fines agrícolas y fomenta la innovación tecnológica. El estudio permitió generar una línea base de experimentación para comparar los dos métodos de aplicaciones mencionado. Dicha línea base considera la reducción del consumo de agua y aumento en los rendimientos productivos. En este caso, la innovación tecnológica haciendo uso de drones para efectuar la labor de aplicaciones agrícolas, podría significar un aumento de la eficiencia en esta labor primordial para cualquier sistema de producción agrícola.

El proyecto presentado contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Específicamente incurre, de manera directa en el objetivo número doce de producción y consumo responsables, puesto que la línea base de investigación facilita responder cuál es el método más eficiente para efectuar aplicaciones agrícolas en diversas condiciones. De forma indirecta, contribuye con el objetivo dos de hambre cero, al desarrollar investigación en búsqueda de mejoras en rendimiento productivo, importantes para la seguridad alimentaria. También aporta al objetivo seis de agua limpia y saneamiento, al buscar el ahorro de dicho recurso comprobando si es factible hacer uso de menores volúmenes de aplicación. Otro objetivo apoyado es el número ocho de trabajo decente y crecimiento económico,

impulsando nuevas tecnologías y su desarrollo comercial. Finalmente, se contribuye con el objetivo diez de reducción de desigualdades, al identificar el método de aplicación más rentable en cuanto a costos, permitiendo hacer un uso responsable de los recursos a los pequeños y medianos productores.

El uso de drones está incurriendo cada vez más en la producción de arroz, sin embargo, aún hay muchos vacíos en las estandarizaciones metodológicas. La mayoría de los estudios se han enfocado en la evaluación de la altura óptima del dron para la aplicación y sus efectos en la deriva (Wang et al., 2018; Woldt et al., 2018; Yallappa et al., 2017; Zhang et al., 2020). Otros estudios recientes han evaluado la influencia de diferentes condiciones meteorológicas en factores que definen la homogeneidad de una aplicación por medio de dron (Wang et al., 2018).

Se han desarrollado artículos sobre evaluaciones en campo de drones para aplicaciones agrícolas y recientes recopilaciones respecto a las mejores prácticas de gestión avaladas por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE por sus siglas en inglés). Los mismos han sugerido investigar esta área y resaltan que a pesar de las investigaciones, aún hay muchos vacíos que llenar. Estos también sugieren que existe una necesidad real del desarrollo de estándares para el manejo de drones agrícolas (Li et al., 2019; Woldt et al., 2018).

Al conversar con algunos de los productores de la zona donde se llevó a cabo el experimento, se observó que varios de ellos hacen uso de drones con bajos volúmenes para realizar aplicaciones. Según su experiencia en campo, opinan que dicho método presenta algunas ventajas frente a las aplicaciones con alto volumen, como por ejemplo reducción de costos por operarios y combustible de la maquinaria. Con este proyecto se encontró la existencia de variaciones en la eficiencia de ambos métodos mencionados, y según diferentes volúmenes (10, 20 y 30 L/ha para el dron y 150, 200 y 250 L/ha para aplicación con spray boom). Esto pretende brindar estándares de uso de drones para aplicaciones agrícolas a los productores de la zona, y presentará los análisis necesarios para la escogencia del mejor método de aplicación de un regulador de crecimiento.

Los experimentos se realizaron con dron y spray boom aplicando tres distintos niveles de volumen. Se utilizó un cultivo de arroz de 1,5 hectáreas en Pavones, Guanacaste, entre los meses de septiembre y noviembre de 2022, puesto que en estas fechas el arroz se encontraba en la etapa idónea para hacer la aplicación del regulador de crecimiento. Mediante el estudio de rendimiento productivo, calidad molinera, homogeneidad de aplicación y costos asociados; se evaluó la eficiencia de un regulador de crecimiento (Ingrain®, SUMITOMO Chemicals) para arroz (*Oryza sativa*), patrocinado por la empresa SUMITOMO Chemicals. Además, como datos auxiliares, se recolectó la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento de los días cercanos a la aplicación, por medio de la estación meteorológica más cercana del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Finalmente, se identificó cuál de los dos métodos y el volumen de aplicación fue el que presentó mayores ventajas con respecto a los parámetros en estudio.

No se encontraron artículos que muestren comparaciones de volumen, rendimientos productivos, calidad del cultivo, homogeneidad de aplicación y costos asociados entre métodos tradicionales, como el spray boom y modernos como el uso de drones. Además, es usual que estos estudios no se enfoquen en la evaluación de productos químicos específicos como los reguladores de crecimiento. Es por esta razón que el proyecto a desarrollar posee un enfoque más específico, al hacer uso de un regulador de crecimiento para su aplicación. Estos experimentos son de valor para

productores de arroz y cultivos en general ya que les da más información acerca de la eficiencia de equipos utilizados, también se fomenta en la agricultura nacional el implemento de nuevas tecnologías.

Se seleccionaron como parámetros para evaluar la eficiencia: el rendimiento productivo del arroz en la zona aplicada, la calidad molinera del arroz cosechado, la homogeneidad de dicha aplicación y los costos asociados a realizar la labor. Estos parámetros son importantes puesto que representan, de forma general, los aspectos a considerar al desarrollar una actividad agrícola arrocera con fines comerciales. El rendimiento describe la cantidad de alimento disponible y por ende las ventas. La calidad molinera es una medida de valor comercial del arroz cosechado, según sus características físicas. La homogeneidad de aplicación busca el mayor aprovechamiento del producto aplicado y los costos asociados se relacionan con las ganancias del desarrollo de la actividad productiva.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar diferencias en la eficiencia de la aplicación de un regulador de crecimiento de arroz (*Oryza sativa*) mediante aplicaciones de dron y “spray boom”, considerando como parámetros el rendimiento productivo, la calidad molinera, la homogeneidad de la aplicación y los costos asociados.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar el volumen de aplicación óptimo de un regulador de crecimiento en arroz haciendo uso de un spray boom y tomando como parámetros el rendimiento productivo, la calidad molinera, la homogeneidad de la aplicación y los costos asociados.
- Determinar el volumen de aplicación óptimo de un regulador de crecimiento en arroz haciendo uso de un dron y tomando como parámetros el rendimiento productivo, la calidad molinera, la homogeneidad de la aplicación y los costos asociados.
- Identificar el método y volumen de aplicación más eficiente, considerando como parámetros el rendimiento productivo, la calidad molinera, la homogeneidad de la aplicación y los costos asociados.

Tabla 1. División de trabajo de los investigadores por objetivos

Objetivos específicos	Actividades	
	Isaac Venegas	Esteban Arroyo
1		Determinación de volumen óptimo de aplicación con spray boom.
2	Determinación de volumen óptimo de aplicación con dron.	

Tabla 1 (continuación). División de trabajo de los investigadores por objetivos

Objetivos específicos	Actividades	
	Isaac Venegas	Esteban Arroyo
3	Determinación de método de aplicación óptimo según parámetro de rendimiento productivo.	Determinación de método de aplicación óptimo según parámetro de homogeneidad de aplicación.
	Determinación de método de aplicación óptimo según el parámetro de calidad molinera.	Determinación de método de aplicación óptimo según el parámetro de costos asociados.
Justificación del proyecto de graduación en conjunto	La investigación fue complementaria, pero no dependiente. Ambos investigadores trabajaron en encontrar si existen diferencias significativas en diferentes volúmenes de aplicación, pero con distintos métodos de trabajo. Fue valioso unir los resultados, recolectados por cada uno de los investigadores, para realizar una comparación aún más amplia y responder a la pregunta de cuál es el método más eficiente entre las aplicaciones óptimas de spray boom y las de dron. Además, se trabajó en un mismo sitio de estudio para que los resultados fueran comparables en cuestión de condiciones tiempo-espaciales.	

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Métodos de aplicaciones de agroquímicos en arroz

Al momento de aplicar agroquímicos en el arroz, existen diferentes métodos que varían según el área de trabajo. Para áreas cortas es usual el uso de bombas de espalda que pueden ser manuales o motorizadas y con capacidades desde 13 hasta 25 L. Para áreas extensas y con dificultad de maniobrabilidad (por presencia de árboles o irregularidades de terreno), se encuentran equipos de aplicación como avionetas o helicópteros para fumigaciones y aplicación de fertilizante. A nivel de suelo se emplean tractores con implementos. El llamado cañón posee un pulverizador que se utiliza en fumigación antes del rastreo de la tierra y no se recomienda si hace mucho viento ya que posee escasa cobertura vertical y deja zonas sin aplicación. Para el caso específico de investigación, se estudia uno de los métodos más comunes para aplicar altos volúmenes en arroz en Costa Rica como lo es el spray boom (Jiménez Salas, 2015) el cual es un turbo atomizador tractorizado y es el de los equipos más empleados por su excelente cobertura y aunque el más usado es el de 600 L de capacidad, existen variedades de tamaños (Jiménez Salas, 2015).

La aplicación de agroquímicos de forma aérea se ha empleado por mucho tiempo en el sector agrícola con el uso de avionetas principalmente (Jiménez Salas, 2015), sin embargo, en los últimos años este método se ha modernizado para facilitar estas tareas. Aparte de avionetas, también se han utilizado helicópteros los cuales se les agrega el pulverizador (Yallappa et al., 2017). Esta técnica, junto a la inmersión de los drones y la agricultura de precisión en el sector propició la aparición de prototipos de drones a los cuales se les agregaba el equipo dosificador, principalmente

para aplicación de fertilizantes y pesticidas (Yallappa et al., 2017). Finalmente, con el avance tecnológico, los drones forman parte de la agricultura y se comercializan junto con implementos necesarios para realizar estas tareas específicas del sector (DJI, 2016).

2.1.1.1. Características del implemento spray boom

El spray boom funciona con el uso de boquillas que dosifican la disolución y se utiliza un recipiente que la contiene, mecanismo hidráulico para subir o bajar la estructura y barras que poseen las boquillas (Salazar Navarro, 2018). A la hora de trabajar con este equipo se deben considerar cuatro factores: 1) La velocidad del tractor, 2) el volumen de agua que se requiere depositar por hectárea, 3) la presión de las boquillas y 4) el caudal permitido por la boquilla (Salazar Navarro, 2018). Como en cualquier método de aplicaciones, un factor importante a considerar es la homogeneidad de la aplicación y la propensión a la deriva del líquido aplicado. En el caso de aplicaciones por tierra con tractor se considera que la deriva se da en una mediana medida, en comparación con otros métodos (Li, X. et al., 2019). Además, los volúmenes de aplicación para este método varían entre 25 y 200 L/ha para cultivos arables (Foqué et al, 2013).

Entre las ventajas de utilizar altos volúmenes en aplicaciones líquidas se presenta principalmente aumentos en cobertura y en eficiencia de acción del agroquímico. Borger et al. (2013) analizó la eficiencia de algunos herbicidas a diferentes volúmenes y la variación en el porcentaje de cobertura. Señala que el área cubierta aumenta de 5 % a 32 % al incrementar el volumen de 30 L/ha a 150 L/ha, mientras que la eficiencia de los herbicidas mejoró entre un 53 % y 78 % al aumentar el volumen. Sperry et al. (2021) coinciden en sus resultados con que, a menor volumen de aplicación, menor porcentaje de cobertura se observó en sus experimentos. De la misma manera se redujo el rendimiento productivo conforme se disminuyó el volumen de aplicación.

En contraste, algunos estudios comprueban que al aumentar el volumen también aumenta el área cubierta pero no necesariamente cambia la eficiencia de acción de los herbicidas. Creech et al. (2015) evaluaron la reducción de biomasa de hierbas provocada por “glyphosate”, “glufosinate”, “2,4-D” y “Lactofen” con volúmenes desde los 70 L/ha hasta los 281 L/ha, concluyendo que la eficiencia del herbicida “glyphosate” era máxima con volúmenes entre 70 L/ha y 94 L/ha, “glufosinate” actuaba mejor con 140 L/ha, “2,4-D” con volúmenes iguales o mayores a 94 L/ha, mientras que “Lactofen” mostraba mayores eficiencias con volúmenes altos de alrededor de 187 L/ha. Un estudio de Bueno et al. (2014) concluye que el porcentaje de cobertura sobre la maleza y la eficiencia de acción del glifosato no varía según las pruebas realizadas con volúmenes de 100-150 L/ha en contraste con aplicaciones de 30-50 L/h.

Las diferencias encontradas en estudios similares podrían indicar que la eficiencia de acción se maximiza en volúmenes específicos para cada agroquímico, por lo tanto, volúmenes altos podrían no ser necesarios en todos los casos, además de tener algunas desventajas como lo son los mayores tiempos de aplicación y mayores gastos energéticos, debido a que se requiere colocar un mayor volumen de producto en el campo. También, sobresale el uso del agua, puesto que para métodos de alto volumen se debe hacer uso de grandes cantidades del recurso hídrico (Creech et al., 2015).

2.1.1.2. Características de los drones

Cuando se desea evaluar los desempeños de los vehículos aéreos no tripulados, los autores evalúan las acciones que se toman con estos equipos y qué efectos tendrán en el trabajo a realizar. De esta forma, un aspecto importante a evaluar es la altura a la que debe volar el dron. Este parámetro

afecta principalmente al área o franja total de terreno que será sometido a las descargas (Yallappa, et al., 2017). Otro aspecto que considerar es la velocidad de vuelo que alcanzan estos equipos, las cuales pueden llegar a una velocidad de trabajo de 8 m/s, y alcanzan hasta velocidades de 22 m/s. Conforme aumenta la velocidad, se dan disminuciones en la densidad de las gotas descargadas y en la cobertura de aplicación (Woldt, W. et al., 2018). Finalmente, los rangos de volúmenes de aplicación típicos se encuentran entre los 10 y los 40 L/ha (Li et al., 2019), debido al tipo de tecnología, puesto que los drones poseen un tamaño relativamente pequeño.

Entre las ventajas de utilizar drones para aplicaciones de agroquímicos están: mayor maniobrabilidad, pueden efectuar patrones de vuelo complejos, no requieren de mucho terreno para despegar y permiten la reducción de tiempo en el que los trabajadores se exponen a productos químicos (Martínez et al., 2019). Sin embargo, las desventajas son: necesidad de un operario experimentado y limitaciones de carga que obligan a realizar cambios de batería constante (Núñez, 2016).

2.1.2. Regulador de crecimiento

El componente activo de algunos reguladores de crecimiento es el ácido abscísico el cual es una hormona capaz de participar en el crecimiento y desarrollo de plantas y sus frutos, acelerando la maduración (Ramírez et al., 2019). Esta hormona también se ve involucrada en las respuestas de las plantas al estrés hídrico, provocando, entre otras cosas, cierre de estomas en las hojas (Gómez y García, 2006). Además, Chen et al. (2019) demostraron que el ácido abscísico junto con la sacarosa promueve en la planta de arroz el rendimiento y calidad del grano.

El estudio de Qin et al. (2021) demostró que las plantas de arroz utilizan un mecanismo de transporte de ácido abscísico entre las hojas y la carióspside para mantener y asegurar el desarrollo del grano mediante la síntesis de almidón durante temperaturas altas. Por otro lado, Solera, (2019) confirmó que el uso de ácido abscísico aumentó el llenado de grano como conclusión de los resultados que obtuvo donde se incrementó la cosecha de arroz, aumentó el peso del grano y se redujo la proporción de grano vano en las parcelas donde experimentaron. Cabe mencionar que sus resultados también indicaron una reducción en la calidad del arroz con dosis mayores a 60 g/ha. Por lo anterior, se considera que la aplicación de un regulador de crecimiento puede ser funcional en ambientes propensos a la sequía. Además, tiene el potencial de prevenir pérdidas en una de las etapas más críticas de la producción de arroz, el llenado del grano.

2.1.3. Pruebas de homogeneidad de aplicación y software de análisis de imágenes

La calidad de aplicación en este estudio se presenta en base a la cobertura de la aplicación y a la homogeneidad obtenida, siendo que ambos factores están relacionados. La cobertura de aplicaciones líquidas se estudia usualmente con el uso de láminas de papel hidrosensible. A la lámina se le toma una fotografía que será analizada con un software que indique la distribución de agua en el papel hidrosensible.

Este software puede ser especializado para este objetivo como Deposit scan (Zhang et al., 2020) o DropletScanTM (Woldt et al., 2018), softwares que requieren de un escáner dirigido hacia las imágenes. Si no se cuenta con un escáner, es posible el uso de softwares que realicen clasificación de imágenes tales como ArcGIS 10.8. Una clasificación de imágenes es la acción de obtener clases de información a partir de una imagen ráster multibanda y existen dos tipos: clasificación supervisada y no supervisada. Como las deposiciones de líquido son fáciles de detectar en el papel

hidrosensible es posible utilizar la clasificación no supervisada que consiste en la búsqueda de clases espectrales o clústeres en el ráster multibanda sin que se identifiquen manualmente por el analista (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2021).

2.1.4. Pruebas de calidad molinera en arroz

La calidad es el nivel en que un grupo de características de un producto cumplen con necesidades o expectativas establecidas, que incluso podrían ser obligatorias según el uso que se le dará (Ávila, 2017). En el arroz la calidad se relaciona con las características fisicoquímicas de tamaño, forma, peso, pigmentación, dureza, temperatura de gelatinización y contenido de amilosa (Reyes et al., 2020). Estas características se ven afectadas por el ambiente donde se desarrolla el cultivo, la disponibilidad de nutrientes en el suelo, el manejo agronómico, el proceso de cosecha y condiciones de secado y almacenamiento del grano (Ávila, 2017).

En Costa Rica se utiliza el Reglamento Técnico “*RTCR 406-2007: Arroz en Granza. Especificaciones y Métodos de Análisis para la Comercialización e Industrialización*”. Se describen en la Tabla 2 los conceptos técnicos requeridos para comprender el Reglamento Técnico y los parámetros de calidad molinera resultantes de aplicar las pruebas descritas en dicho documento (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2008).

Tabla 2. Abreviaturas de términos referentes a calidad molinera en arroz según norma “RTCR 406-2007” (MAG, 2008).

Parámetro de calidad	Abreviatura	Definición
Arroz pilado	AP	Granos de arroz entero y quebrado, a los cuales se les ha removido la cáscara, la mayor parte de las capas exteriores del endosperma (pericarpio, tegumento y aleurona) y el embrión.
Grano entero	GE	Grano de arroz pilado, cuya longitud es igual o mayor a tres cuartos de la longitud del grano sin quebraduras, en la muestra.
Grano quebrado grueso	GQG	Fracción de grano de arroz pilado, cuya longitud es menor a tres cuartos, pero mayor a un cuarto de la longitud del grano sin quebraduras, en la muestra.
Grano quebrado	GQ	Fracción de grano de arroz pilado, cuya longitud es menor a tres cuartos de la longitud del grano sin quebraduras, en la muestra.
Grano dañado por calor	GDC	Grano de arroz pilado, entero y quebrado grueso, que tiene un color café oscuro o rojizo en parte o en su totalidad, provocado por sobrecalentamiento.
Semolina	S	Subproducto del proceso agroindustrial, que se obtiene al someter al arroz integral al proceso de pulido y que está constituida en su mayor parte por las capas exteriores del endospermo y el embrión.

Nota: Todos los rendimientos se expresan en porcentaje. Fuente: Adaptado de RTCR 406-2007, secciones 3 y 8. ME: Muestra de ensayo de arroz en granza, sin impurezas (<1,5%) y seco (<13% humedad).

Tabla 2 (continuación). Abreviaturas de términos referentes a calidad molinera en arroz según norma “RTCR 406-2007” (MAG, 2008).

Parámetro de calidad	Abreviatura	Definición
Puntilla	Pu	Fracción de grano de arroz pilado cuya longitud es de una cuarta parte o menos, de la longitud promedio del grano sin quebraduras, en la muestra.
Grano manchado	GM	Grano de arroz pilado, entero y quebrado grueso, que tiene una coloración amarillenta visible en parte o en su totalidad, que contrasta con el color característico del arroz
Grano rojo	GR	Grano de arroz pilado, entero y quebrado grueso, que presenta una estría de color rojo en toda su longitud o estrías parciales que sumadas sean igual o superior a la longitud del grano.
Grano yesoso	GY	Grano de arroz pilado, entero y quebrado grueso, que tiene al menos la mitad de su volumen de una apariencia similar al yeso o tiza. También se considera al que tiene un cincuenta por ciento o más de su superficie con esta apariencia.
Grano dañado	GD	Grano de arroz pilado, entero y quebrado grueso, que presenta deterioro por acción de insectos, microorganismos, humedad o causas mecánicas. En esta definición no se incluyen los granos manchados y dañados por calor.
Rendimiento de pilada	RPi	Es la cantidad de arroz pilado entero y quebrado, que se obtiene a partir de una ME.
Rendimiento de semolina	RS	Es la cantidad de semolina que se obtiene a partir de una ME.
Rendimiento de puntilla	RPu	Es la cantidad de puntilla que se obtiene a partir de una ME.
Rendimiento de grano quebrado grueso	RQG	Es la cantidad de grano quebrado grueso que se obtiene a partir de una ME.
Rendimiento de grano entero	RGE	Es la cantidad de arroz pilado entero que se obtiene a partir de una ME. También se conoce como índice de pilada.

Nota: Todos los rendimientos se expresan en porcentaje. **Fuente:** Adaptado de RTCR 406-2007, secciones 3 y 8. ME: Muestra de ensayo de arroz en granza, sin impurezas (<1,5%) y seco (<13% humedad).

Tabla 2 (continuación). Abreviaturas de términos referentes a calidad molinera en arroz según norma “RTCR 406-2007” (MAG, 2008).

Parámetro de calidad	Abreviatura	Definición
Rendimiento de grano quebrado	RQ	Es la cantidad de grano quebrado que se obtiene a partir de una ME.
Rendimiento de arroz comercial	RAC	Es la cantidad de arroz pilado entero y quebrado grueso, que se obtiene a partir de una ME.

Nota: Todos los rendimientos se expresan en porcentaje. **Fuente:** Adaptado de RTCR 406-2007, secciones 3 y 8. ME: Muestra de ensayo de arroz en granza, sin impurezas (<1,5%) y seco (<13% humedad).

2.1.5. Pruebas estadísticas en diseño experimental

Para comprobar que un set de datos es normal o no se utilizan pruebas como Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov que varían de acuerdo con el número de datos al que se evalúa la normalidad. Shapiro Wilks es para muestras de datos menores a 50 y Kolmogórov-Smirnov para muestras mayores a 50 (Tapia et al., 2021). En caso de presentarse la normalidad se usa el análisis de varianza (ANOVA) que consiste en descomponer la variación total en causas de variación y se compone principalmente de dos parámetros: valor p y nivel de significancia (α). Estos parámetros se comparan para rechazar o no las hipótesis (si $p > \alpha$ las diferencias de las medias no son estadísticamente significativas). El tipo de ANOVA a utilizar depende de cuantas variables independientes se tenga en el diseño (López Bautista y Gonzales Ramírez., 2016).

Cuando se tienen tres o más tratamientos y una sola variable se utiliza el ANOVA unifactorial que es complementado con pruebas estadísticas como la prueba de Tukey. La prueba de Tukey se encarga de comparar y denotar las diferencias entre las medias de los tratamientos, de esta forma se logra clasificar los tratamientos que poseen diferencias significativas para su posterior análisis. Además, si se desea ver las diferencias de dos o menos grupos el ANOVA no es de utilidad y se puede reemplazar por métodos como la prueba t que cumplen el mismo propósito de forma similar como el ANOVA (López y Gonzales, 2016).

En el caso que la prueba de normalidad indique que los datos no son paramétricos es necesario el uso de pruebas como Wilcoxon o Kruskal Wallis, precisamente para análisis de varianza de este tipo de datos (Fernández et al., 2010). Si el valor de p es menor al nivel de significancia las diferencias de las medias son estadísticamente significativas, en cuyo caso, se requiere de una prueba más para la búsqueda de las medias específicas que presentan diferencias. La prueba no paramétrica de Dunn es apropiada después de realizar Kruskal Wallis y permite encontrar estas diferencias (Dinno, 2015).

Otra medida estadística de interés para realizar comparación de resultados es el coeficiente de variación (CV). Este se define como la desviación estándar dividida entre el promedio de los datos (Bechar, 2021) e indica la variación de la información con respecto al promedio, es decir, tratamientos con valores pequeños de CV presentan pequeña variabilidad. En el caso de deposiciones líquidas, según Zhang et al. (2020), mientras más pequeño es el CV mejor es la homogeneidad de las gotas y es mayor la penetración del líquido.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Parámetros críticos para aplicaciones líquidas

La creación de los aplicadores tipo spray inició en 1947 dándose a partir de ese momento un gran desarrollo según la demanda de la industria (Sidek, 2019) y debido a su antigüedad, algunos parámetros de importancia se definían en las décadas posteriores a su aplicación. Dodd y Grace, (1989) en esos tiempos indicaban la deriva y la dificultad de utilizar volúmenes pequeños como los puntos débiles de este equipo.

Estudios recientes se enfocan en parámetros de eficiencia de aplicaciones con la distribución como el punto más relevante. Foqué et al. (2013) combinaron dicho equipo junto con un sistema de apoyo aéreo para testear ángulos y volúmenes de aplicación que produzcan la mayor eficiencia en la distribución de aplicación. La distribución fue medida utilizando colectores de papel de filtro y un software para análisis de imágenes del papel. Finalmente, después de probar 3 volúmenes (2000 L/ha, 1000 L/ha y 500 L/ha), encontraron menores derivas en las aplicaciones con 500 L/ha y concluyen que a menor volumen menor deriva.

Lamare et al. (2022) evaluaron la deposición, pérdidas en suelo y deriva de un prototipo de spray boom que utiliza aire asistido en las aplicaciones según la altura y espacio entre boquillas. La metodología se basaba en formar configuraciones de altura y separación de boquillas con dimensiones de 0,40 m, 0,45 m, 0,50 m y 0,60 m. Como resultados, encontraron que tratamientos con aire asistido no tenía diferencias significativas con los otros métodos y que mayores deposiciones y menor deriva se lograba con alturas y distancias entre boquillas de 0,45 m y 0,60 m en etapas tempranas y etapas avanzadas del cultivo, respectivamente.

Uno de los primeros estudios enfocados en el área de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés), fue publicado por Huang et al. (2008). En su estudio se describe el proceso de desarrollo de un UAV para aplicaciones líquidas de alta precisión, concluyendo que si es posible desarrollar un sistema de atomización para un dron. Otros autores, como Zhang et al. (2015) han continuado las investigaciones para la creación y mejora de los mismos equipos mediante el uso de modelos matemáticos con el fin de estudiar la deriva en función de la velocidad de vuelo, altura de vuelo y velocidad del viento.

También han enfocado sus investigaciones en evaluar parámetros de trabajo para el desarrollo de estándares en el uso de los drones (área segura de deriva, altura, velocidad, entre otros). Dichos estudios han permitido estandarizar algunos de estos parámetros, como rangos de velocidad de vuelo recomendadas, alturas de aplicación y velocidades máximas de viento para una buena aplicación. Aun así, estas estandarizaciones aplican para condiciones específicas y no para todas las circunstancias.

Diversos autores han evaluado parámetros importantes a la hora de utilizar un dron en agricultura, entre estos parámetros destacan la velocidad del equipo, la altura de vuelo y homogeneidad de la aplicación. Yallappa et al. (2017) propusieron la incorporación de un pulverizador en un dron con el fin de evaluar su desempeño mediante la capacidad de campo en la granja de investigación de la Universidad de Ciencias Agrícolas, Raichur, Karnataka de la India. Dichas evaluaciones se efectuaron a diferentes alturas (0,50 m, 0,75 m, 1,00 m, 1,25 m y 1,50 m) y se tomó en cuenta la velocidad y homogeneidad de aplicación usando y analizando papel fotográfico cada 25,0 m. Concluyeron un desempeño óptimo del dron en arroz a 1,00 metro de altura con velocidad de 3,60

km/h produciendo una capacidad de campo de 1,08 ha/h y un incremento en homogeneidad conforme incrementa la presión de aplicación.

Woldt et al. (2018), utilizaron, en un área sin pavimentar con grava en Burleson County, dos drones comerciales para medir el efecto de la altura y la velocidad en homogeneidad de aplicación. Evaluaron tres alturas (2, 3 y 4 metros) y cuatro velocidades (1, 3, 5 y 7 m/s). Encontraron que la homogeneidad fue más alta al emplear una velocidad de 1 m/s y una altura de 2 m, datos concluidos utilizando papel hidrosensible escaneado y analizado mediante un software que indicaba el porcentaje de área cubierta.

Un artículo similar, pero con el uso de un solo dron, fue realizado por Zhang et al. (2020). Este último se llevó a cabo en la base de prueba de la caña de azúcar del Instituto de Investigación de la Caña de Azúcar de la Academia de Ciencias Agrícolas de Guangxi, China, donde, además de altura y velocidad, evaluaron el volumen de aplicación óptimo en caña de azúcar y sus implicaciones en la homogeneidad de la aplicación. Para medir esto, al igual que el artículo anterior, usaron papeles sensibles al agua que se escanearon y de donde obtuvieron el volumen depositado y densidad de cobertura mediante un software de análisis de imagen. Concluyendo así una operación óptima con alturas entre 3 y 4 metros, velocidades entre 4 y 5 m/s y volúmenes de aplicación entre 12 y 15 L/ha.

Entre los estudios se pueden observar variaciones de los parámetros evaluados debido a condiciones climáticas de diferentes zonas de estudio y del cultivo utilizado en el proceso. Wang et al. (2018) realizaron vuelos con un dron a una velocidad fija, variando únicamente su altura de vuelo, el objetivo era evaluar distintas condiciones climáticas (humedad, temperatura y dirección del viento) y sus efectos en la deriva de la aplicación líquida. Sus resultados indicaron que con el aumento de la altura de vuelo y la velocidad del viento el porcentaje de deriva en la deposición aumentaba rápidamente. También demostraron que cuando la velocidad promedio del viento es menor a 3 m/s, la altura del dron es preferible que se encuentre a menos de 2,5 m para controlar la deriva.

Si bien, hace más de una década se ha comenzado a registrar investigaciones referentes a aplicaciones de agroquímicos con UAV, son escasos los estudios comparativos con los métodos convencionales, o se limitan a evaluar parámetros en singular. Un experimento llevado a cabo entre 2006 y 2007 en Brasil, para un cultivo de maíz, concluyó que las aplicaciones de un fungicida realizadas vía aérea (con un UAV), fue más eficiente que la aplicación vía suelo con tractor (Da Costa y Boller, 2008). Los criterios para dicha eficiencia fueron el efecto del fungicida en el control de *Puccinia Sorghi* y la helmintosporiosis común del maíz (*Exserohilum turcicum*); y el rendimiento productivo del grano.

2.2.2. Rendimiento productivo en el país y la región Chorotega

En la Tabla A.1. se muestran los rendimientos de arroz seco y limpio obtenidos en el país desde la temporada 2011-2012 con datos del informe anual estadístico de la corporación arrocera nacional (CONARROZ) de los períodos 2021-2022 (CONARROZ, 2023), 2020-2021 (CONARROZ, 2022), 2017-2018 (CONARROZ, 2019) y datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2017). Esta información permite ver la tendencia y magnitud de los pesos del producto en los últimos años, con lo cual es posible realizar una comparación con los resultados de la presente investigación y así notarse una continuación de la tendencia o en su defecto detectarse un patrón contrario a esta.

La información de la Tabla A.1. se observa graficada en la Figura 1 y se muestra el rendimiento en términos de peso absoluto obtenido en cada temporada. Si bien se disminuye el peso obtenido con el pasar de las temporadas es explicado mediante la disminución de área de siembra de este grano en el país. En la Figura 2 también se muestra el rendimiento, pero en términos de peso obtenido por área específica (kg/ha) donde se observa una tendencia en el aumento en los rendimientos, con un valor máximo de aproximadamente 4536,00 kg/ha en la temporada 2020-2021 y un rendimiento promedio de 4011,25 kg/Ha. Adicionalmente, se obtuvo la información referente a la región Chorotega en donde se ubica la zona de estudio y cuyos resultados se muestran en la Tabla A.2. y se graficaron en la Figura 2. Los datos muestran una tendencia clara hacia el aumento de los rendimientos, con un valor máximo de aproximadamente 5210,00 kg/Ha en la temporada 2019-2020 y un rendimiento promedio de 4210,75 kg/Ha.

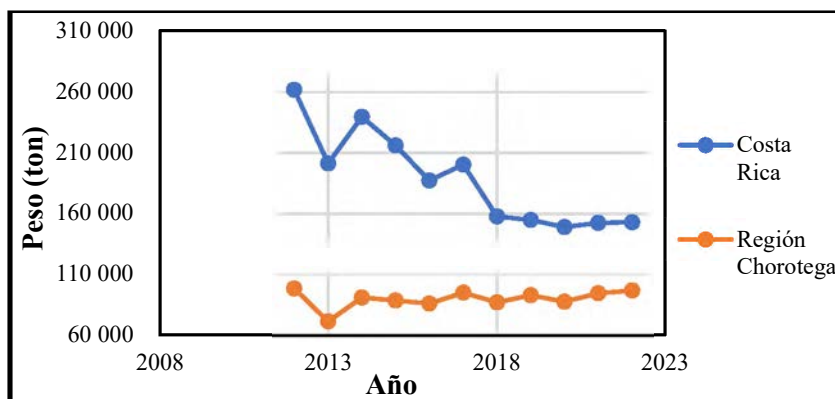


Figura 1. Peso de arroz cosechado en Costa Rica y en la región Chorotega. Datos recolectados por Consejo Nacional de Arroz (CONARROZ, 2019; CONARROZ, 2022; CONARROZ, 2023; INEC, 2017).

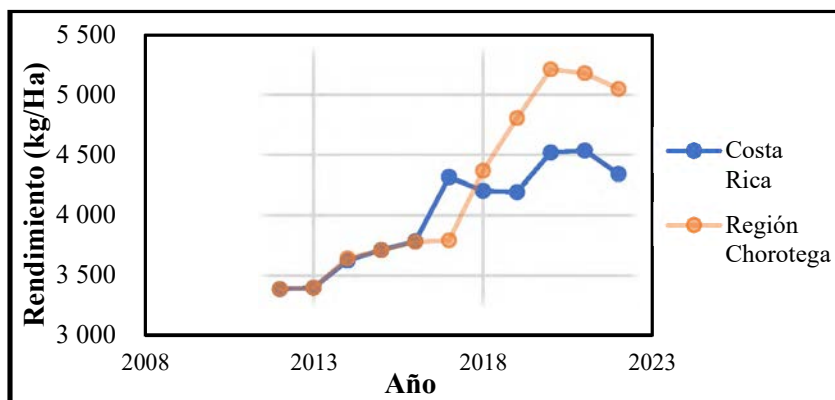


Figura 2. Rendimiento productivo en Costa Rica y en la Región Chorotega. Datos recolectados por Consejo Nacional de Arroz (CONARROZ, 2019; CONARROZ, 2022; CONARROZ, 2023; INEC, 2017).

Entre los factores que pueden causar efectos negativos en el rendimiento del arroz se puede citar la acción de insectos y microorganismos en el cultivo (Pérez y Cuevas, 2018), así como la presencia de eventos climáticos adversos o poco favorables que lo afecten directamente o le produzca enfermedades (Pérez et al., 2018). Por ejemplo, la enfermedad quemazón o brusone se presenta

con incrementos de lluvia por largos periodos que favorecen la aparición de los hongos *Pyricularia grisea* Sacc y *Pyricularia oryzae* Cav. Estos incurren en afectaciones negativas en rendimiento y calidad del cultivo (Pérez et al., 2018). Por otro lado, la falta de lluvias, sequías y alta temperatura provocan, durante la floración y maduración, bajo desarrollo fisiológico de la planta, vaneamiento o disminución de las panículas y mal desarrollo del grano con el consecuente bajo rendimiento de la producción (Vignola et al., 2018).

También, la falta de aplicación de fósforo durante el periodo de crecimiento o por la deficiencia de este en el suelo puede provocar una baja en rendimientos. Según Solera, (2019), el 85 % del fósforo absorbido por el arroz es traslocado en los granos produciendo así un grano más lleno y de mejor calidad. Sin embargo, en Costa Rica la mayoría de los suelos donde se realiza la actividad arrocera carecen de la cantidad necesaria de elementos como el fósforo, potasio, azufre y microelementos como zinc y manganeso. Es por esta razón que, aunque se indique entre 30 y 60 kg/ha de P₂O₅ como dosis de fertilizantes altos en fósforo (Molina y Rodríguez, 2012), es recomendable aplicar dosis de acuerdo con un análisis de suelo hecho previo a la siembra, pues el periodo de aplicación es durante esta etapa precisamente (Molina y Rodríguez, 2012).

2.2.3. Análisis de calidad molinera

La calidad molinera tiene diversas funciones en estudios referentes a experimentación en arroz. Entre estas, el caso del estudio de Hernández et al. (2021) realizado en Borriqueros, Colombia, donde analiza los efectos en la calidad molinera del arroz de los elementos menores (Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Cl, B, Mo) debido a la aplicación de fertilizantes. Como tratamientos utilizó fertilizante de NPK tradicional, fertilizante con aplicación edáfica de elementos menores, fertilizante con aplicación edáfica de elementos menores y aplicación edáfica de silicio, fertilizante con aplicación edáfica de elementos menores y aplicación foliar de silicio y fertilizante con aplicación foliar de elementos menores y aplicación foliar de silicio. Las pruebas de calidad que realizó fueron porcentaje de vaneamiento, masa blanca, grano entero, cristal, harina, cáscara y grano yesado. Como principal resultado obtuvo una mejor calidad en las variables de molinería con el tratamiento de fertilizante con aplicación foliar de elementos menores y aplicación foliar de silicio.

También se utiliza la calidad molinera para analizar el arroz resultado de cruce de especies. El estudio de Reyes et al. (2020) analizó la calidad molinera de 40 líneas de arroz obtenidas de cruces realizados en dos especies (*Oryza rufipogon* G. x *Oryza sativa* L. ssp. *Japónica*) y de tres variedades comerciales como control, en dos localidades de Ecuador (Babahoyo y Santa Lucía). Hicieron pruebas de humedad, arroz paddy, impurezas, granos limpios, tamo, arroz integral, masa blanca, polvillo, quebrados y arroz flor en el laboratorio de análisis de calidad de grano de la empresa Arrolamh S.A. Como resultado, los autores no encontraron diferencias significativas entre las líneas de arroz y entre las localidades en estudio.

Otra función del estudio de calidad molinera es la de observar la evolución de arroz almacenado. En el estudio de Rojas (2012) hecho en Río Claro, Costa Rica, realizó pruebas de calidad molinera en arroz almacenado en silos cada 15 días para ver cómo cambia la calidad durante la conservación y esto utilizando métodos descritos por la Corporación Arrocera Nacional en el Reglamento RTCR 406-2007 para el análisis de arroz en granza. Entre los resultados encontró un mayor deterioro de la calidad del arroz en el fondo del silo y mayor afectación por plagas de insectos.

2.2.4. Homogeneidad de aplicaciones líquidas

La homogeneidad de pulverización implica un uso más eficiente de las aplicaciones líquidas. Por lo tanto, se establecen estándares que son utilizados por investigadores para definir el CV a tomar en cuenta en estas labores. Subr et al. (2017) utilizó un spray boom a tres presiones (2, 3 y 4 bar) de boquillas nuevas y usadas para analizar la homogeneidad que se presenta. Para definir la homogeneidad utilizó el CV indicado por el estándar ISO 16122-2 el cual deber ser igual o menor a 10 % para considerarse uniforme. Entre los resultados destacan CV mayores a lo indicado por el estándar en bajas presiones con boquillas nuevas y CV dentro de lo estipulado en boquillas usadas.

El valor de CV de 10 % es igual al del estándar EN ISO 16119-2 utilizado por Kluza et al. (2019) para la creación de un modelo de homogeneidad de la cobertura de aplicaciones líquidas utilizando un spray boom para ensayos de laboratorio. El experimento de laboratorio utilizó valores de CV menores a 10 % para predecir la cantidad de agua de las boquillas necesaria para lograr este alto nivel de homogeneidad según la presión de trabajo logrando el menor CV con presiones de 207 kPa.

De igual forma, Wang et al. (2019) indican un CV igual o menor a 10 % según el estándar nacional chino para lograr una alta homogeneidad. En este estudio comparan un dron a 10 L/ha de volumen, un spray boom a cerca de 300 L/ha de volumen y dos bombas de espada (denominadas KMB y EAP) a 75 L/ha y 300 L/ha, tomando en cuenta, entre otros parámetros, la homogeneidad de la aplicación. Como resultado, los autores obtienen un CV de 87,2 % para el dron, un 84,4 % para KMB, 81,2 % para EAP y un 32,1 % para el spray boom indicando que si bien el spray boom proporciona mejor homogeneidad estos valores están muy por encima del 10 % de CV requerido, dando como resultado baja homogeneidad en las aplicaciones con todos los métodos propuestos.

Otros estudios donde también se analiza la homogeneidad de aplicaciones líquidas utilizan otros valores de CV sin basarse en estándares, pero siendo valores bajos para asegurar la homogeneidad. Zwertvaegher et al. (2022), para garantizar una aplicación uniforme, utiliza un CV de 12 % o menos en su estudio sobre la optimización de pulverizadores sobre zanahorias en distintas etapas de desarrollo teniendo como parámetros la distribución de pulverización y las características de la gota. En el estudio mencionado anteriormente de Woldt et al. (2018) es usado un CV de 25 % o menos para la determinación de la franja más ancha de aplicación con dron que se apegue a este parámetro.

En cuanto al porcentaje de cobertura de la aplicación, es importante mencionar que dicho parámetro depende del objetivo o accionar del producto químico aplicado. A los agroquímicos pre emergentes, es decir, que van directo al suelo antes del nacimiento de las plántulas, no se les exige muchos requisitos de calidad de aplicación. Los llamados productos sistémicos penetran a través de la cutícula de la planta y se desplazan a través de esta, por lo tanto, no es necesaria una cobertura de aplicación tan alta como sí sucede con los productos de contacto. Para estos últimos, al no penetrar ni desplazarse en la planta, es necesaria una mayor cantidad que llegue al cultivo (REM, 2018). De acuerdo con esto y según REM (2018) todo tipo de agroquímicos sistémicos requieren de una cobertura mínima 20-30 gotas/cm², mientras que para agroquímicos de contacto se indica una cobertura a partir del 30-40 gotas/cm² para herbicidas y de 50-70 gotas/cm² para insecticidas y fungicidas.

2.2.5. Evaluación de costos

Para evaluaciones económicas en operaciones agrícola, autores como Martínez et al. (2020) y Johnson (2020) estudiaron aspectos técnicos propuestos por American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) y su propia experiencia con las siguientes disposiciones: 1) costos fijos con la evaluación de la depreciación, intereses, almacenamientos, seguros e impuestos de la maquinaria, 2) costos variables como combustibles, lubricantes, neumáticos, reparaciones, mantenimientos y labores tomando en cuenta implementos y horas de operación.

En el caso del dron se pueden emplear las mismas partidas de costos, pero con más parámetros que incumben únicamente a este equipo. Jackson et al. (2021) incluyeron en los costos fijos del dron la depreciación en baterías y cargadores y las licencias requeridas para el vuelo del equipo según el país en el que se ubica. En los costos variables en lugar de combustible se estima el costo de energía eléctrica y licencias en softwares en caso de ser requeridas.

2.3. Marco legal

En Costa Rica existe una legislación vigente referente a la posesión y uso de drones o Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS). La Dirección Nacional de Aviación Civil de Costa Rica (DGAC), en su directiva operacional (DO-002-OPS-RPAS) “establece las bases para un futuro marco jurídico con relación a las condiciones de explotación de estas aeronaves para la realización de los diferentes trabajos aéreos con RPAS” (2021). A continuación, se presenta un resumen de los aspectos más importantes desarrollados en la directiva operacional mencionada.

Todas las RPAS con un peso menor a 25 kg deben llevar una placa de identificación en la se muestre la identificación de la aeronave. Dicha identificación estará compuesta por el número de serie, el nombre de la empresa operadora o propietario y el número de teléfono donde sea posible contactarla. Además, el propietario de la aeronave no tripulada, el solicitante o el titular de un certificado operativo, deberá inscribir el RPAS en la página oficial de la Dirección general de aviación civil (DGAC, 2021).

Cualquier empresa de fumigación aérea haciendo uso de RPAS, con fines comerciales o no, deberá estar registrada ante el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), como empresa dedicada a la aviación agrícola. Adicionalmente, todo equipo de aplicación de fumigación aérea con RPAS, deberá tener el número de registro otorgado por el SFE y el MAG (DGAC, 2021).

Para pilotar un RPAS, ya sea con fines privados o comerciales, es requerido un certificado de idoneidad expedido por la DGAC. Algunos de los requisitos son ser mayor de 18 años y tener un certificado médico Clase 3 de las Regulaciones Aeronáuticas Costarricenses - Licencias al Personal Técnico Aeronáutico (RAC-LPTA), extendido por alguno de los médicos designados de la DGAC. Otro requisito importante a tomar en cuenta es que el piloto debe haber aprobado un curso teórico y práctico de capacitación en la operación del tipo de RPAS que propone operar, llevado a cabo por un centro de instrucción aeronáutica certificado por la DGAC (DGAC, 2021).

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción general

El objetivo del estudio fue evaluar diferencias en la eficiencia de la aplicación de un regulador de crecimiento de arroz (*Oryza sativa*) mediante aplicaciones de dron y “spray boom”. Esta evaluación se llevó a cabo en un cultivo de arroz en Pavones, Guanacaste, Costa Rica. Para comparar e identificar el método y volumen más eficiente para la aplicación de un regulador de crecimiento en arroz se concretaron, primeramente, los parámetros a evaluar, los cuales fueron: el rendimiento productivo, la calidad molinera, la homogeneidad de aplicación y los costos asociados.

Como se muestra en la Figura 3 el proceso comenzó con la selección del área y el diseño experimental, con el fin de propiciar condiciones lo más uniformes posibles para poder realizar comparaciones válidas. Seguidamente, se estandarizaron parámetros como el volumen de agua en la aplicación, la concentración del regulador de crecimiento, altura de aplicación y la colocación de papel hidrosensible en el campo. Después de determinar el momento óptimo, se procedió con las aplicaciones del regulador de crecimiento bajo los métodos propuestos y posteriormente se recolectaron los papeles hidrosensibles.

Antes de la cosecha se definió el método de obtención de granos en granza desde la planta y su almacenamiento y etiquetado. Para cada tratamiento se obtuvieron datos de rendimiento productivo por área de cultivo, la calidad molinera y el porcentaje de cobertura promedio. Una vez recopilados estos datos de mediciones y experimentación en campo, se determinaron los resultados finales con análisis estadísticos y análisis de costos. Esto permitió realizar una comparación entre métodos obteniendo finalmente el más favorable para aplicaciones líquidas haciendo uso de un regulador de crecimiento.

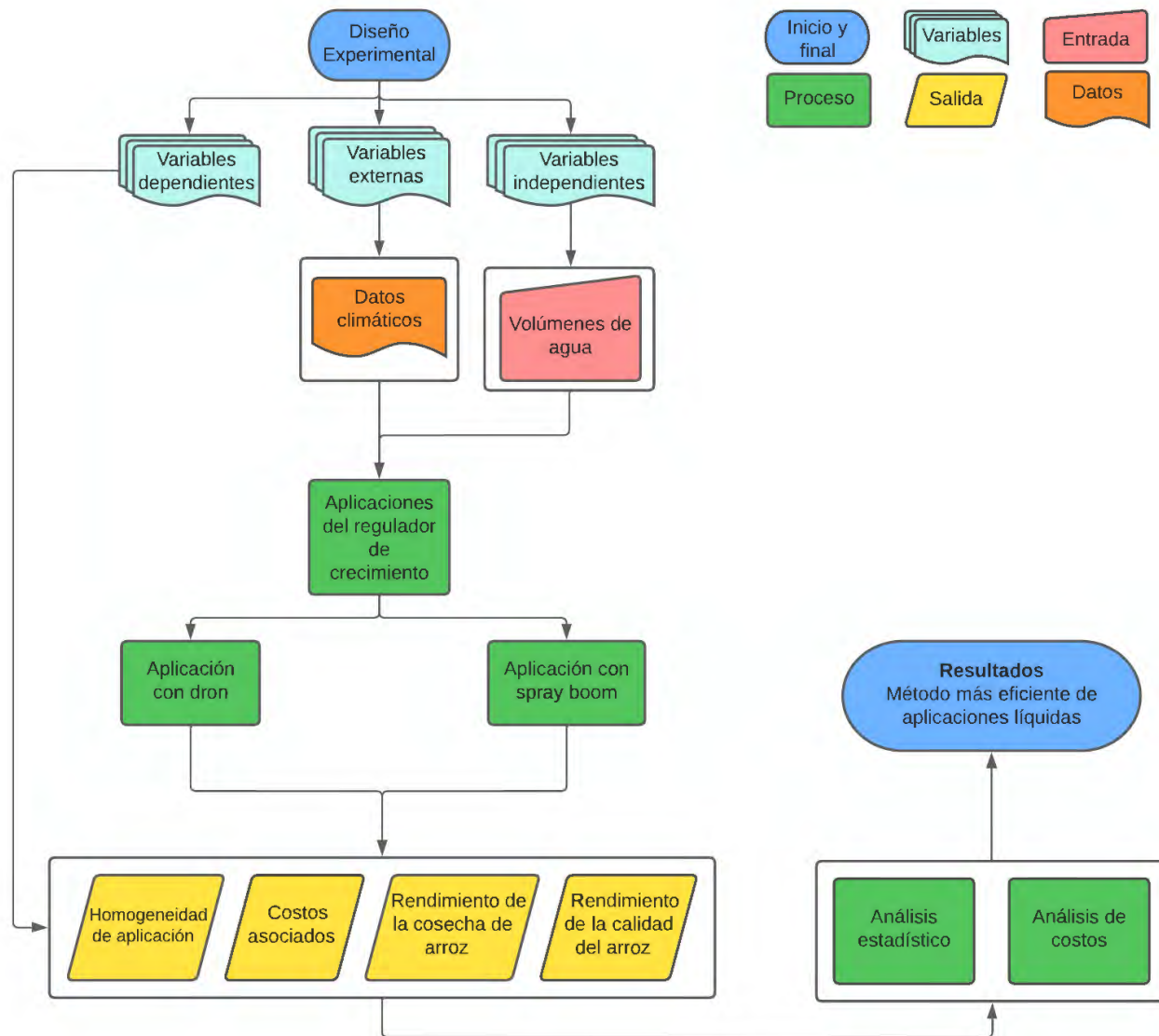


Figura 3. Diagrama metodológico

3.2. Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en Pavones, un pueblo ubicado en la zona limítrofe entre la provincia de Puntarenas y Guanacaste, en la zona peninsular ($10^{\circ}0'13,84''$ N $85^{\circ}12'24,73''$ O) de Costa Rica. En la Figura 4 se muestra una fotografía satelital del lote donde se llevó a cabo la investigación. Dicha localidad se caracteriza por su activa participación agro-productiva, en la cual se cultivan principalmente melón, sandía y arroz. La zona de vida del sitio de estudio, según la clasificación de Holdridge, es bosque seco tropical, el cual presenta temperaturas máximas de 33°C y mínimas de 22°C (con promedios anuales entre 24 y 28°C). Su altitud se encuentra entre 0 - 600 m.s.n.m. Posee una estación seca de 6 meses aproximadamente. La precipitación anual varía entre 1000 y 2000 mm (Instituto Nacional de Aprendizaje [INA], s.f.).



Figura 4. Mapa zonal de finca donde se llevó a cabo la investigación.

La finca en la cual se desarrolló el estudio es administrada por un productor de la zona y encargado del cultivo de arroz. Se utilizaron $1,5$ Ha de la finca para el estudio, la cual cumplió con todos los procedimientos descritos en esta metodología para asegurar la obtención de datos estadísticos confiables. Toda el área de estudio estaba sembrada de arroz (*Oryza Sativa*) de la variedad SENUMISA 20 FL, semilla certificada y proporcionada por la casa comercial Semillas del Nuevo Milenio S.A.

3.3. Diseño experimental

Se procedió a realizar la parcelación como se muestra en la Figura B.2. El tamaño recomendado para la experimentación en arroz en la zona es de 20 m² (Vargas, 2013). Sin embargo, según López y González, (2016) se puede trabajar en áreas mayores definidas en trabajos previos en el mismo cultivo con resultados satisfactorios. Por lo tanto, tomando en cuenta estudios de Solera (2020) y Valerio y Molina (2012) donde utilizan unidades experimentales de 100 m², se hizo uso de un área que se encuentre en ese rango de 20 y 100 m², ya que esto permitirá un vuelo del dron más sencillo.

Las unidades experimentales fueron definidas de 8 m x 5 m (40 m²). Sin embargo, el estudio de Castro et al. (2013) concluyó que, a partir de 30 cm desde el límite hacia el interior de una parcela de arroz, no existe riesgo de obtener resultados de aplicaciones alterados por el efecto de borde. Además, debido a la existencia de franjas de arroz aplastadas por las llantas de los tractores agrícolas utilizados frecuentemente en la finca se, decidió dejar estas fuera del área de las unidades experimentales lo que dio como resultado parcelas de 9 m x 8 m (54 m²). Esto representa una franja de 0,5 m extra a lo largo y 1,5 m a lo ancho para eliminar el efecto borde al realizar las aplicaciones.

Los 8 m de ancho se seleccionaron puesto que uno de los brazos del spray boom puede alcanzar más de 4 m de largo, con lo que se podrá realizar la aplicación sin ingresar las llantas del tractor a la unidad experimental. Entre parcelas se seleccionó una distancia de 10 m para evitar traslape por deriva en la aplicación. Dichos 10 m son suficientes para evitar la deriva. Lo anterior puesto que para la aplicación con dron la deriva es nula después de 8 m a una altura de aplicación de 2 m (Wang et al., 2018) y para la aplicación con spray boom la deriva se presenta hasta 9,14 m (Moore et al., 2021). Las aplicaciones se realizaron en orientación de izquierda hacia derecha (ver Figura B.2), tanto para dron como para spray boom.

En el diseño experimental se evaluaron un tratamiento control y tres tratamientos por método en estudio (dron y spray boom). Se realizaron cinco repeticiones por tratamiento. En el caso del dron, se utilizaron volúmenes de aplicación de 10, 20 y 30 L/ha como tratamientos (nombrados: D10, D20 y D30, respectivamente) y en el caso del spray boom se utilizaron 100, 150 y 200 L/ha (nombrados: SB100, SB150 y SB200, respectivamente). Estos volúmenes junto con la altura y método de aplicación son las variables independientes del diseño. Mientras que los parámetros a analizar (rendimiento productivo, calidad molinera, homogeneidad de aplicación y costos asociados) son las variables dependientes. Las parcelas estaban divididas y se implementó un diseño completamente al azar.

En ambos métodos de aplicación (dron y spray boom), el clima presenta un papel importante, especialmente el viento. A altas velocidades del viento, la deriva puede aumentar. De igual forma, en medio de precipitaciones no se pueden realizar aplicaciones. Por lo tanto, se tuvo en cuenta la velocidad del viento en los días próximos a realizar las aplicaciones y estas se hicieron en la mañana y tarde para evitar en la medida de lo posible afectaciones por estos factores.

Las aplicaciones fueron iniciadas el 20 de octubre del 2022 a las 9:00 horas de la mañana, aproximadamente. La hora de inicio se escogió con el fin de que el sol secase el agua que se adhiere al arroz en la madrugada y así evitar errores en las pruebas de cobertura y homogeneidad con el papel hidrosensible. Este mismo día se detuvieron las aplicaciones a las 15:00 horas, ya que había posibilidad de lluvia y la misma podría afectar el estudio. El experimento fue reiniciado a las 9:00

horas del 21 de octubre del 2022 y se finalizaron por completo a las 11:00 horas del mismo día. Es importante mencionar que los papeles hidrosensibles fueron recolectados inmediatamente después de cada aplicación y en el momento de la recolección se tomaba la fotografía necesaria para su análisis. De esta forma la lectura de la cobertura de aplicación no se vio afectada por la humedad ambiental o algún otro inconveniente que provocará un mayor humedecimiento de las láminas.

3.3.1. Descripción del equipo y características para aplicación con spray boom

Se usó el tractor John Deere 4500 (Figura 5) de alto despeje de 100 hp, el cual posee un ancho total de 2,15 m. El tractor fue proporcionado por el productor encargado del área de cultivo donde se realizó la investigación. El mismo, se hizo cargo de los gastos que involucró el uso de la maquinaria agrícola (tractor y spray boom, así como uso de bombas para extracción de agua y pago de operarios). El spray boom utilizado fue uno marca Jacto de 12 m de ancho de trabajo y 600 L de capacidad con boquillas cónicas negras con 50 cm de separación.



Figura 5. Tractor y spray boom utilizados durante aplicaciones líquidas

Estudios como el de Dou et al. (2021) definen la altura de la barra del spray boom aproximadamente a 1,10 m del suelo, mientras que Lamare et al. (2022) indicaron que los tratamientos con alturas de 0,60 m desde la parte alta del objetivo tenían la deposición más alta en estratos superiores del cultivo. Con una altura menor, Foqué et al. (2013) obtiene CV menores a 9 %, que es lo requerido por el estándar europeo EN 12761-2, con altura de barra de 0,45 m sobre el objetivo. Sin embargo, Lamare et al. (2022) indica una menor deriva y mayor deposición al utilizar 0,45 m de altura, pero en etapas tempranas del cultivo. Con base en lo anterior, para el experimento, se utilizó un 1,2 m de altura de barra, lo que significa un 0,6 m de altura sobre el arroz aproximadamente.

En cuanto a la velocidad de aplicación, Dou et al. (2021) indican que la velocidad durante pruebas con tractores debe estar entre 1,5 y 2,5 m/s. Lamare et al. (2022) recalcaron algo similar, que con velocidades de 1,0 a 3,0 m/s, aproximadamente, se obtienen mayores volúmenes aplicados. Por consiguiente, la velocidad utilizada fue de 1,7 m/s, ya que es la utilizada normalmente por los productores de la zona y se encuentra dentro del rango descrito previamente. Para ello, el tractor se utilizó a 1 700 RPM en la marcha B3. Para entregar el caudal por hectárea definido se ajustó la presión del spray boom a 70 psi para 100 L/ha, 125 psi para 150 L/ha y 450 psi para 200 L/ha.

3.3.2. Descripción del equipo y características para aplicación con dron

Se usó de un dron DJI Agras MG-1P (Figura 6), el cual posee un tanque de capacidad de 10 L, y 4 boquillas modelo XR11001VS y fue facilitado por un productor de la zona.



Figura 6. Dron utilizado durante las aplicaciones líquidas

Con base en el artículo de CropLifeLA, (2021) que indica que la altura de vuelo para aplicaciones en cultivos debe estar entre 1,5 y 2,5 m. Estos datos se asemejan a los indicados por otros autores como Li et al. (2019) quienes señalan que alturas mayores a 3 m y menores a 1,5 m pueden aumentar la deriva y afectar el patrón de aplicación en arroz. Similar a lo argumentado por Wang et al. (2018), donde recomienda alturas menores a 2,5 m en aplicaciones con dron. Por lo tanto, se definió una altura promedio de 2 m para utilizar en el experimento

En cuanto a la velocidad del dron, CropLifeLA, (2021) indica que la velocidad debe estar entre 4-6 m/s. Li et al. (2019) también aconseja velocidades de vuelo entre 3-6 m/s, mientras que Zhang et al. (2020) obtuvieron resultados óptimos a velocidades entre 4-5 m/s. Por consiguiente, en este estudio, para el volumen de 10 L/ha la velocidad fue de 6,06 m/s, para el volumen de 20 L/ha la velocidad fue de 5,33 m/s y para el volumen de 30 L/ha la velocidad fue de 4,61 m/s.

3.3.3. Determinación de momento óptimo para aplicación del regulador de crecimiento

Las aplicaciones se realizaron cuando el arroz estaba en etapa de grano lechoso. Para conocer el momento idóneo para la aplicación del regulador de crecimiento se siguió el consejo de un Ingeniero Agrónomo experto en pruebas de campo en arroz. La recomendación del fabricante del InGrain indica que la aplicación de este se debe hacer cuando el arroz posea un porcentaje de grano “lechoso” alrededor 25 %. Esto se midió manualmente escogiendo panículas de arroz al azar, dentro de toda el área experimental, y pinchando los granos superiores. Los granos que dejaron salir un líquido blancuzco lechoso (Figura 7) se contaron. En total se verificaron 100 panículas y 24 se encontraban con grano lechoso. Esto quiere decir que alrededor de un 24% de los granos se encontraban en la etapa fenológica de grano lechoso, lo cual permitió iniciar con el proceso experimental.



Figura 7. Muestra de grano lechoso

3.3.4. Cantidad de regulador de crecimiento aplicada por tratamiento

La dosis recomendada de InGrain para arroz es entre 30 y 60 g/ha. Se escogió la dosis de 60 g/ha, ya que, en el estudio de Solera, (2019) esta fue la dosis con mejores resultados en cuanto a rendimiento productivo. Para el tratamiento con spray boom SB100 (100 L/ha), fue necesario usar 0,6 g/L. Puesto que se quería introducir 40 L en el spray boom, entonces se utilizaron 24 g de InGrain. Para los tratamientos SB150 y SB200 los cálculos son similares, lo que concluyó en el uso de 16 g y 12 g, respectivamente.

De la misma manera, para el tratamiento con dron de 10 L/ha se necesitó 6 g/L, además, considerando las pérdidas de líquido que se da en las bombas y conductos del sistema de aplicación del dron, se decidió introducir 4 L de mezcla en el mismo. De esta manera, se utilizaron en total 24 g de InGrain para el tratamiento D10. Para los tratamientos D20 y D30 los cálculos son similares, lo que concluyó en el uso de 12 g y 8 g, respectivamente. La cantidad de InGrain requerida fue pesada en una balanza analítica del laboratorio de Aguas, Suelo y Ambiente de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica. Las cantidades necesarias se separaron por tratamiento en bolsas con cierre hermético para su traslado al sitio de estudio.

3.3.5. Cosecha de arroz

La cosecha se inició el 16 de noviembre del 2022 y se finalizó el 19 de noviembre de ese mismo año. Cada día, se dio inicio de la cosecha a las 9:00 horas de la mañana, aproximadamente. La hora de inicio se escogió con el fin de que el sol secase el agua que se adhiere al arroz en la madrugada y así evitar exceso de humedad en los granos y errores a la hora de pesar. En este proceso se utilizó una “machina” (Figura 8), la cual consiste en una serie de barras de madera, sobre la cual las panículas de arroz fueron golpeadas tres veces por cada lado a modo de estandarización. Bajo la machina se colocó una lona que permitía la recolección de los granos de arroz.



Figura 8. “Machina” utilizada durante la cosecha

La cosecha se inició en la primera parcela del tratamiento D10 y se continuo con la primera parcela de cada tratamiento. Seguidamente con la segunda parcela de cada tratamiento y así sucesivamente, esto con el fin de evitar variaciones en las condiciones en cada cosecha de cada tratamiento.

3.4. Análisis de rendimiento productivo

En esta sección se presenta la metodología desarrollada tanto para el método de aplicación con dron, como para el método de aplicación con spray boom.

Se evaluó el rendimiento productivo de los tres tratamientos y el tratamiento control. Con el fin de evitar el aumento en la humedad del arroz y según lo recomendado por el International Rice Research Institute (IIRI, 2015), se almacenó en sacos diferenciados por cada unidad experimental y fueron llevados inmediatamente a la zona de pesaje que se encuentra a 5 km del sitio de estudio, en la cual se obtuvo el peso de arroz recolectado en cada parcela por cada tratamiento. Se hizo uso de la balanza digital T-Scale modelo MBW-300 con una precisión de ± 20 g proporcionada por el productor encargado del arrozal.

El rendimiento se calculó en base de arroz en granza y sucio. Es decir, que se pesó el arroz en granza, y se dividió entre el área total de donde fue cosechado, para así obtener un rendimiento en kg/ha. A los datos obtenidos se les aplicó una prueba estadística de normalidad Shapiro Wilks y posteriormente una prueba ANOVA unifactorial, con un nivel de confianza del 95 %, para

determinar si existen diferencias significativas en el peso del arroz entre los tres tratamientos y el control.

3.5. Determinación de calidad molinera de arroz

En esta sección se presenta la metodología desarrollada tanto para el método de aplicación con dron, como para el método de aplicación con spray boom.

Se siguió el Reglamento Técnico “*RTCR 406-2007: Arroz en Granza. Especificaciones y Métodos de Análisis para la Comercialización e Industrialización*” para determinar la calidad molinera de cada unidad experimental. Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de granos del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica (UCR). Luego de obtener los parámetros de calidad molinera para cada parcela (descritos en la Tabla 2), se evaluó la normalidad de los datos con una prueba de Shapiro Wilks ($\alpha=0,05$) para aplicar un ANOVA unifactorial con un nivel de confianza del 95 % en los resultados que presentan normalidad y una prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha=0,05$) en los casos que los datos no presentaron una distribución normal. Lo anterior, con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre los cuatro tratamientos (SB100, SB150, SB200 y C o D10, D20, D30 y C).



Figura 9. Muestras llevadas al CIGRAS para pruebas de calidad molinera

3.6. Determinación de la homogeneidad de la aplicación

En esta sección se presenta la metodología desarrollada tanto para el método de aplicación con dron, como para el método de aplicación con spray boom.

Para obtener el porcentaje de área cubierta por la mezcla líquida por tratamiento se colocaron papeles sensibles al agua (hidrosensibles) al azar en las unidades experimentales. Se tuvo la limitación de que el papel hidrosensible tiene un precio elevado y solo obtuvimos un sobre que contiene 50 láminas. Por esta razón y con el objetivo de colocar mínimo dos láminas por unidad experimental, en lugar de aplicar esta metodología a las cinco parcelas de cada tratamiento se aplicó a cuatro parcelas de cada tratamiento. Cabe recalcar que en las unidades de control no era necesario utilizar papel hidrosensible ya que no se le realizó ninguna aplicación líquida.

Una vez realizada la aplicación del InGrain con los distintos volúmenes, se recolectaron los papeles hidrosensibles de cada parcela e inmediatamente se les tomó fotografías las cuales fueron analizadas mediante el software ArcGis 10.8, el cual indica el porcentaje de papel que fue humedecido. El procedimiento consiste crear un polígono (Figura 10, b) que tenga las medidas de las láminas de papel hidrosensible utilizadas (76 mm x 26 mm). Luego, se añadió una fotografía de la lámina de papel hidrosensible en el software (Figura 10, a) y al utilizar los puntos de control de la herramienta de “georreferenciación” la fotografía se ajusta al rectángulo de referencia y se recorta con la herramienta “recortar” de procesamiento de ráster (Figura 10, c). Seguidamente se aplicó una clasificación no supervisada de Cluster ISO de dos clases (Figura 10, d), una clase para el área húmeda y otra para el área seca. Con la herramienta de conversión “de ráster a polígono” se creó una capa de polígonos (Figura 10, e) que se ajustan a los datos brindados por el ráster que en este caso fueron los pequeños polígonos creados a partir de la imagen de las gotas sobre el papel. Finalmente, en esta última capa se encuentra la tabla de atributos que indica el área de la lámina cubierta por agua y el área seca con lo que se obtuvo el porcentaje de cobertura.

El promedio del porcentaje obtenido en ambas láminas de papel representa la cantidad de área de la parcela que recibió aplicación líquida. Para definir la homogeneidad de las aplicaciones se utilizó el CV, el cual se obtuvo del porcentaje del área aplicada en las unidades experimentales. Este proceso con el software ArcGis 10.8 se realizó a todas las láminas utilizadas y de esta forma fue posible obtener los datos de promedio de cobertura y la desviación estándar necesarios para determinar el CV de cada tratamiento.

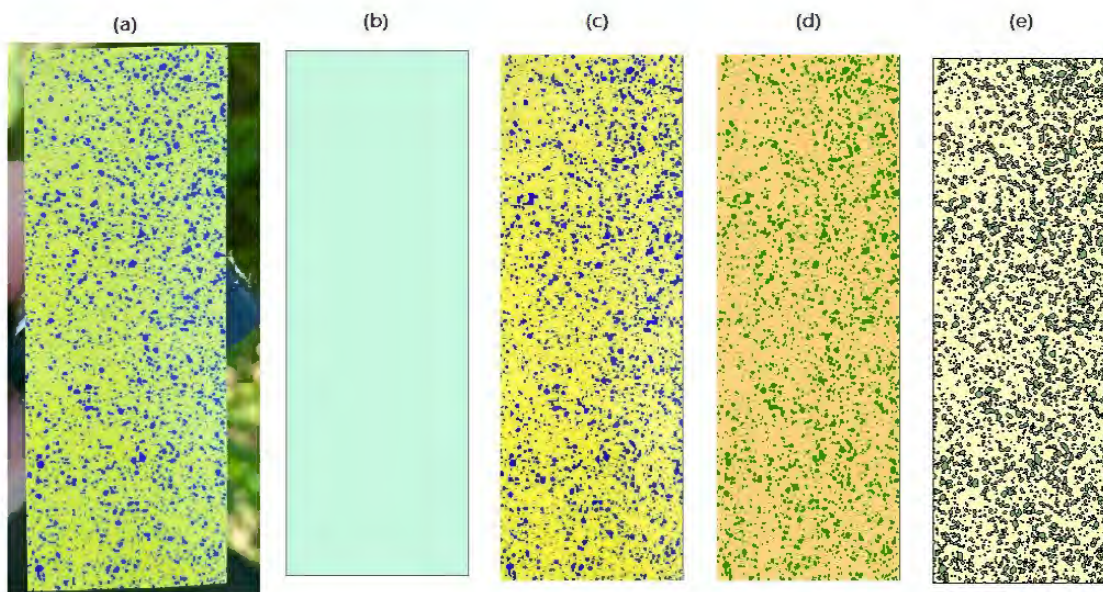


Figura 10. (a) fotografía de lámina de papel hidrosensible, (b) rectángulo de referencia, (c) recorte de la imagen, (d) ráster de la clasificación no supervisada y (e) capa de polígonos con la información de cobertura.

Además de la obtención del CV, a los datos de cobertura se les aplicó una prueba de normalidad Shapiro Wilks con un nivel de significancia de 0,05 y acorde a esta se aplicó una prueba de ANOVA unifactorial con nivel de confianza del 95 % a los resultados del método con spray boom que presentaban normalidad y una prueba de Kruskal Wallis con nivel de confianza del 95 % a los

datos del método con dron que no presentaban normalidad. Con esta estadística se identificó si existen diferencias significativas entre los tres tratamientos de cada método y el control. Además, se realizó una prueba Tukey ($\alpha=0,05$) posterior al ANOVA unifactorial y prueba de Dunn ($\alpha=0,05$) posterior a Kruskal Wallis para comparar las medias de todos los tratamientos y determinar el volumen y método que presenta mejor cobertura.

3.7. Análisis de costos asociados

En esta sección se presenta la metodología desarrollada tanto para el método de aplicación con dron, como para el método de aplicación con spray boom.

El cálculo de costos en equipos agrícolas tiene cierta complejidad y depende de muchas variables que son diferentes según equipos, lugar de trabajo, actividad y normas vigentes. Sin embargo, existen diversos autores que utilizan metodologías basadas en experimentación y criterios dados por ASABE para realizar una estimación y cuyas partidas de costos son similares en sus artículos.

Con esto en cuenta, la estimación de costos fijos y costos variables en ambos métodos en estudio se basaron en el artículo Johnson, (2020). En el caso del tractor agrícola con el spray boom como implemento se tienen como costos fijos la depreciación, impuestos, seguros y almacenamiento. En los costos variables se calcula costos de reparación o mantenimiento, combustible, pago al operario, lubricador y filtros.

En el caso del dron, además de las partidas basadas en el artículo Johnson (2020), se utilizaron otras descritas por Jackson et al. (2021), las cuales incluye en los costos fijos del dron la depreciación en baterías y cargadores, licencias en softwares en caso de ser requeridas y las licencias requeridas para el vuelo del equipo, según el país en el que se ubica. En los costos variables en lugar de combustible se estima el costo de energía eléctrica.

Tomando en cuenta que la velocidad del tractor fue constante de 1,67 m/s o 6000 m/h en todos los tratamientos, se utiliza un factor de labor (fr) de entre 1,1 y 1,2 que aproxima el tiempo extra que se utiliza el equipo en actividades como desplazamiento al lugar de trabajo, dar vuelta, entre otros (Johnson, 2020). Entonces este factor será de 1,1 para SB100, 1,15 para SB150 y de 1,2 para SB200 al notar que conforme aumente el volumen de los tratamientos mayor será la necesidad de desplazamiento del tractor con el spray boom. Finalmente, durante la experimentación el tractor recorrió 16 metros lineales para cubrir un área de 0,0072 ha y se puede obtener las horas necesarias por hectárea según las expresiones (1), (2) y (3):

$$horas SB100 = \frac{\frac{16 m}{0,0072 ha} 1,1}{6 000 \frac{m}{h}} = 0,407 \frac{h}{ha} \quad (1)$$

$$horas SB150 = \frac{\frac{16 m}{0,0072 ha} 1,15}{6 000 \frac{m}{h}} = 0,426 \frac{h}{ha} \quad (2)$$

$$horas SB200 = \frac{\frac{16 m}{0,0072 ha} 1,2}{6 000 \frac{m}{h}} = 0,444 \frac{h}{ha} \quad (3)$$

Tomando en cuenta que la velocidad de uso del dron fue de 6,06 m/s (21800 m/h) para D10, 5,33 m/s (19200 m/h) para D20 y 4,61 m/s (16600 m/h) para D30. Se utiliza un factor de labor (fr) de 1,1 para D10, 1,15 para D20 y de 1,2 para D30 al notar que conforme aumente el volumen de los

tratamientos mayor será la necesidad de desplazamiento del dron. Finalmente, durante la experimentación el dron recorrió 24 metros lineales para cubrir un área de 0,0072 ha y se puede obtener las horas por hectárea de uso de este equipo según las expresiones (4), (5) y (6):

$$\text{horas } D10 = \frac{\frac{24 \text{ m}}{0,0072 \text{ ha}}^{1,1}}{21\ 800 \frac{\text{m}}{\text{h}}} = 0,168 \frac{\text{h}}{\text{ha}} \quad (4)$$

$$\text{horas } D20 = \frac{\frac{24 \text{ m}}{0,0072 \text{ ha}}^{1,15}}{19\ 200 \frac{\text{m}}{\text{h}}} = 0,200 \frac{\text{h}}{\text{ha}} \quad (5)$$

$$\text{horas } D30 = \frac{\frac{24 \text{ m}}{0,0072 \text{ ha}}^{1,2}}{16\ 600 \frac{\text{m}}{\text{h}}} = 0,241 \frac{\text{h}}{\text{ha}} \quad (6)$$

Este procedimiento permite crear una relación entre ambos equipos de tal manera que con la misma estrategia de aplicaciones líquidas se puede conocer el tiempo anual que les tomaría la ejecución total a cada uno. Esta información es la utilizada en las ecuaciones de esta sección (3.7) para la estimación de costos.

3.7.1. Costos fijos en tractor y spray boom

Para el cálculo de la depreciación anual es necesario conocer el valor inicial del tractor, el valor de salvamento o valor final al vender el equipo y la vida útil en años. A su vez, el valor de salvamento se obtiene mediante la ecuación (1).

$$\text{Costo salvamento } (\text{€}) = \frac{\text{Costo inicial}(\text{€}) \cdot fs}{100} \quad (1)$$

Donde fs es el factor de salvamento que depende del equipo. Según el estándar ASAE D497.7 (ASABE Standards, 2011) para un tractor de entre 80 y 149 hp el fs es de 34 y de un spray boom es 26. Según información consultada a un trabajador de la empresa Matra (J. Gamboa, comunicación personal, 8 de junio del 2023) el valor inicial promedio del tractor es de €43 125 000 (\$69 000) a tipo de cambio del 20/10/2022 (€625 = \$1) (Banco central de Costa Rica, 2022) y del spray boom es de €6 250 000 (\$10 000), la vida útil de un tractor se puede estimar en 15 años y de un spray boom en 10 años (Edwards, 2015). Con estos datos y la ecuación (2) se obtiene la depreciación.

$$\text{Depreciación anual } \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Costo inicial } (\text{€}) - \text{costo salvamento}(\text{€})}{\text{vida útil (años)}} \quad (2)$$

Los costos de impuestos, seguros y almacenamiento (ISA) que se pagan anualmente se engloban en un solo apartado que corresponde al 15 % del costo promedio del equipo (Johnson, 2020) según la ecuación (3):

$$\text{ISA } \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Costo inicial}(\text{€}) + \text{Costo salvamento}(\text{€})}{2} \cdot 15\% \quad (3)$$

3.7.2. Costos variables en tractor y spray boom

La estimación de costos de combustible se obtiene con la ecuación (4) y para esto es necesario conocer la potencia del equipo, horas de uso por hectárea aproximadas (U_a = expresiones (1), (2)

y (3)), el costo del diesel o gasolina y un factor de combustible (fc) que es 0,06 galones/hp-h para gasolina y 0,044 galones/hp-h para diesel (Johnson, 2020).

$$\text{Costo combustible} \left(\frac{\$}{ha} \right) = \text{potencia}(hp) \cdot fc \left(\frac{gal}{hp \cdot h} \right) \cdot Ua \left(\frac{h}{ha} \right) \cdot \text{costo diesel} \left(\frac{\$}{gal} \right) \quad (4)$$

El costo del diesel en Costa Rica fue de ₡867 /L el 31 de octubre del 2022 (Refinadora Costarricense de petróleo [RECOPE], 2023) fecha cercana al día de las aplicaciones, es decir, ₡3 282 /gal.

Los costos de reparación o mantenimiento se estiman con la ecuación (5) haciendo uso del costo inicial del equipo, horas por hectárea (Ua = expresiones (1), (2) y (3)) y un factor de reparación (fr) que depende del equipo. El factor de reparación se encuentra en el ASAE D497.7 (ASABE standards, 2011). Según este estándar para un tractor de entre 80 y 149 hp el fr es de 0,84 y de un spray boom es 4,63.

$$\text{Costo Mantenimiento} \left(\frac{\$}{ha} \right) = \frac{\text{Costo inicial}(\$) \cdot fr}{100 (h)} \cdot Ua \left(\frac{h}{ha} \right) \quad (5)$$

El costo de filtros y lubricantes se calculan con la ecuación (6) y corresponden a un 15 % del costo de combustible (Johnson, 2020):

$$\text{Costo lubricantes y filtros} \left(\frac{\$}{ha} \right) = \text{Costo combustible} \cdot 15 \% \quad (6)$$

El pago a operarios se obtiene de la ecuación (7) utilizando los datos de horas por hectárea (Ua = expresiones (1), (2) y (3)) y el pago por hora que se le realiza al operario (en Costa Rica es de ₡1 656,88 (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de Costa Rica [MTSS], 2023).

$$\text{Pago a operarios} \left(\frac{\$}{ha} \right) = \text{pago horario} \left(\frac{\$}{h} \right) \cdot Ua \left(\frac{h}{ha} \right) \quad (7)$$

El costo del agua también es considerado y se toma en cuenta el gasto en que se incurre al bombear el agua de un pozo y el costo del canon, el cual es el impuesto que se debe pagar por uso de agua de pozo. Se toma en cuenta una bomba marca Truper de 1^{1/3} HP de potencia con flujo de 6600 L/h, consumo de gasolina de 0,5 L/h y profundidad de succión de 8 m (Truper, 2023).

Para calcular el costo de bombear agua se asume la ecuación (8) en la que se utiliza el volumen de aplicación (VA) en L/ha, el flujo de agua obtenido de la bomba (FB), el consumo de combustible de la bomba (CC) y el costo de la gasolina, el cual es de ₡811 /L para el 31 de octubre del 2022 en Costa Rica.

$$\text{Costo bombeo} \left(\frac{\$}{ha} \right) = \frac{VA \left(\frac{L}{ha} \right)}{FB \left(\frac{L}{h} \right)} \cdot CC \left(\frac{L_{gasolina}}{h} \right) \cdot \text{Costo combustible} \left(\frac{\$}{L_{gasolina}} \right) \quad (8)$$

El costo de canon se obtiene de las tarifas indicadas por la dirección de aguas (DA) y el MINAE para uso en cultivos extensivos tradicionales con un valor de ₡0,2099 /m³ y el volumen de aplicación (VA), a través de la ecuación (9) (Ministerio de ambiente y energía [MINAE] y Dirección de aguas [DA], 2023).

$$\text{Costo canon} \left(\frac{\$}{ha} \right) = \text{tarifa DA} \left(\frac{\$}{L} \right) \cdot VA \left(\frac{L}{ha} \right) \quad (9)$$

3.7.3. Costos fijos en dron

Para el cálculo de la depreciación anual es necesario conocer el valor inicial del dron, el valor de salvamento o valor final al vender el equipo y la vida útil en años. A su vez, el valor de salvamento se obtiene mediante la ecuación (1) (Johnson, 2020). Donde fs es el factor de salvamento que depende del equipo. Según ASAE D497.7 (ASABE standars, 2011) para un equipo misceláneo tipo spray el fs es de 42. Según datos recolectados en fuentes como Dronespray (2021), EBAY (2023), Indigodrones (2023a) y Gabahobby (2022) el valor inicial promedio del dron es de ₡5 469 609 (\$8 751) a tipo de cambio del 20/10/2022 (₡625 = \$1). La vida útil de un dron se puede estimar en 5 años (Jackson, 2021) y con estos datos se obtiene la depreciación con la ecuación (2).

Para las baterías y el cargador se utiliza la misma ecuación (2), pero sin el costo de salvamento, asumiendo que son equipos que no son vendidos al finalizar su vida útil. El valor de cada batería es de ₡846 250 (\$1 354) con impuestos incluidos (Indigodrones, 2023a) y se cuenta con aproximadamente 4 baterías. El costo del cargador de 4 canales es de ₡1 235 938 (\$1977,5) aproximadamente (Indigodrones, 2023a).

Los costos de cursos, certificaciones y registros se deben obtener de los sitios oficiales. Para esta materia en Costa Rica se usa como referencia a la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) y corresponde a un valor de ₡1 171 250 (\$1 874) colones en certificación (DGCA, 2017) y aproximadamente ₡296 875 (\$475) en cursos (Indigodrones, 2023b). El precio de la certificación a la fecha de publicación de esta investigación concuerda con el referenciado con fecha de 2017, esto se comprueba en documentos de 2023 de formalización de certificaciones para empresas que desean hacer explotación de RPAS.

Los costos de impuestos y almacenamiento (IA) se engloban en la ecuación (10) que corresponde al 15 % del costo promedio del equipo (Jonhson, 2020)

$$IA \left(\frac{\text{₡}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Costo inicial (₡)} + \text{Costo salvamento (₡)}}{2} \cdot 15\% \quad (10)$$

Finalmente, el dron puede incluir un software que ayude en una tarea específica. Por ejemplo, el DJI Terra software realiza mapeos para clasificación de objetos o inspección de sitios con un costo de ₡500 000/año (₡800/año) y el Agrilyze software que brinda espacio ilimitado para guardar los mapas agrícolas realizados con un costo de ₡121 875/año (\$195/año) (Indigodrones, 2023c).

3.7.4. Costos variables en dron

La estimación de costos de energía se obtiene con las ecuaciones (11) y (12) (Morales et al., 2022). Para este cálculo es necesario conocer el amperaje y voltaje de las baterías, horas por hectárea aproximadas (U_a = expresiones (4), (5) y (6)) y el costo de la energía.

$$\text{Consumo anual} \left(\frac{kWh}{ha} \right) = \text{Voltaje (V)} \cdot \text{Amperaje (A)} \cdot \frac{1}{1000} \left(\frac{kW}{W} \right) \cdot U_a \left(\frac{h}{ha} \right) \quad (11)$$

$$\text{Costo energía} \left(\frac{\text{₡}}{ha} \right) = \text{valor energía} \left(\frac{\text{₡}}{kWh} \right) \cdot \text{Consumo anual} \left(\frac{kWh}{ha} \right) \quad (12)$$

Para el dron utilizado la batería tiene un voltaje de 44,4 V y un amperaje de 12 000 mAh o 12 A. En el caso de la energía, se toma en cuenta la institución que brinda el servicio de electricidad en la zona de estudio, Coopeguanacaste R.L. En octubre del año 2022, para un consumo de energía

fuera del bloque fijo, el costo fue de ₡62,82/kWh (Autoridad reguladora de los servicios públicos [ARESEP], 2023).

Los costos de reparación o mantenimiento se estiman con la ecuación (5) (Johnson, 2020) haciendo uso del costo inicial del equipo, horas por hectárea (U_a = expresiones (4), (5) y (6)) y un factor de reparación (fr) que depende del equipo y se encuentran en ASAE D497.7 (ASABE standards, 2011). Según este estándar, para un equipo misceláneo tipo spray el fr es de 4,63.

El pago a operarios se obtiene con la ecuación (7) (Carrasco et al., 2018), lo cual incluye las horas por hectárea (U_a = expresiones (4), (5) y (6)) y el pago por hora que se le realiza al operario (en Costa Rica es de ₡2 974,46 para un trabajador en ocupación especializada).

El costo del agua también es estimado y como este se obtiene de un pozo se toma en cuenta el gasto derivado de bombear y el costo del canon. Se toma como referencia una bomba marca Truper de $1^{1/3}$ HP de potencia con flujo de 6600 L/h, consumo de gasolina de 0,5 L/h y profundidad de succión de 8 m (Truper, 2023). Para estimar el costo de bombear agua se asume la ecuación (8) utilizando el volumen de aplicación (VA) en L/ha, el flujo de agua de la bomba (FB), el consumo de combustible que presenta la bomba (CC) y el costo de la gasolina, el cual es de 811 ₡/L para el 31 de octubre del 2022 en Costa Rica. El costo de canon se calcula con la ecuación (9) y se obtiene de las tarifas indicadas por la dirección de aguas (DA) y el MINAE para uso en cultivos extensivos tradicionales (MINAE y DA, 2023) con un valor de ₡0,2099 /m³ y el volumen total de aplicación (VA).

3.8. Identificación del método de aplicación óptimo

Después de ser definidos los volúmenes óptimos por cada método de aplicación, se compararon los parámetros en estudio de los tratamientos. Para los resultados de los parámetros de calidad molinera y rendimiento productivo se realizó una prueba estadística Shapiro Wilks para identificar la normalidad de los datos. A los datos que presentaron normalidad se les aplicó una prueba ANOVA unifactorial para demostrar si existen diferencias significativas entre los tratamientos. A los datos que no presentaron normalidad se les realizó una prueba de Kruskal Wallis que también demostraba la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Todas las pruebas estadísticas se analizaron para un nivel de confianza del 95%.

En el caso de la cobertura de aplicación se realizó una prueba de normalidad Shapiro Wilks ($\alpha=0,05$) a los datos y posteriormente se aplicó una prueba de Wilcoxon con un nivel de confianza del 95 % para identificar si existen diferencias significativas en ambos métodos. El CV de cada tratamiento fue comparado directamente entre ellos para indicar el más bajo, el cual corresponde al tratamiento con mejor homogeneidad. Estas pruebas permitieron realizar la comparación entre ambos grupos (dron y spray boom) y junto con el análisis de los costos asociados se determinó el método con mejor evaluación de los parámetros estudiados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación del volumen de aplicación óptimo con spray boom

4.1.1. Rendimiento productivo

En la Tabla 3, se observa que los promedios de rendimiento productivo obtenidos de las parcelas tratadas con spray boom, son similares entre ellos con una diferencia entre el valor máximo y

mínimo del promedio de 783 kg/ha y con una desviación estándar promedio de 654 kg/ha. En estos rendimientos no se aprecia que haya una tendencia, ya sea de aumentar con mayores volúmenes de aplicación o viceversa. La Tabla 4 muestra los resultados del ANOVA validados por la prueba de normalidad Shapiro-Wilks, ambos con un nivel de confianza del 95 %. Sabiendo que los datos del rendimiento productivo son normales ($W = 0,91$, $p = 0,1442$), se puede asegurar que no existen diferencias significativas en los rendimientos entre los tratamientos con spray boom ($F = 1,14$, $p = 0,3634$).

Tabla 3. Medidas de resumen estadístico del rendimiento productivo de las parcelas de arroz con tres tratamientos de spray boom y un control.

Parámetro	Tratamiento	Promedio (kg/ha)	D.E. (kg/ha)	Mín (kg/ha)	Máx (kg/ha)
RProd	SB100	3 163	631,29	2 770	4 265
	SB150	2 721	564,90	2 145	3 335
	SB200	3 504	929,60	2 685	4 865
	C	3 192	490,20	2 695	3 900

Rprod= rendimiento productivo.

Tabla 4. Prueba de normalidad y ANOVA aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de spray boom y un control.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		ANOVA	
	<i>W</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
RProd	0,91	0,1442	1,14	0,3634

**Resultados para un nivel de significancia del 95%. Rprod= rendimiento productivo.*

En la Tabla A.1 y Tabla A.2, se muestran los rendimientos obtenidos en Costa Rica y en la región Chorotega desde la temporada 2011-2012 hasta la temporada 2021-2022 (CONARROZ, 2019; CONARROZ; 2022; CONARROZ, 2023 y INEC, 2017). La Figura 11 muestra el promedio de estos datos y se comparan con el rendimiento obtenido en las unidades experimentales tratadas con spray boom. Se esperaba obtener mejores rendimientos productivos con los tratamientos que con el control y que con el promedio nacional. Al contrario, no hay diferencias significativas entre los rendimientos obtenidos y el control y, además, el promedio de lo obtenido con estas aplicaciones es de 3 129,33 kg/ha que es inferior en un 21,79% y 25,68% con el promedio nacional y el promedio de la región Chorotega, respectivamente.

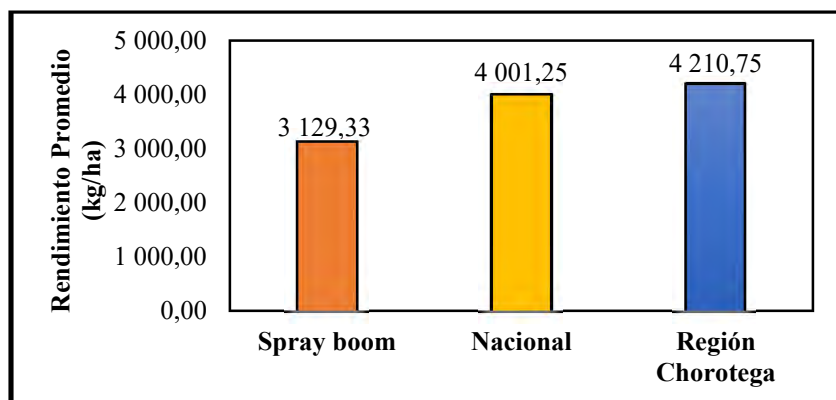


Figura 11. Comparación de rendimientos promedio nacional y de la región Chorotega con el rendimiento de aplicaciones con spray boom.

Según lo expuesto en la sección 4.1.2 sobre calidad molinera, los insectos, microorganismos o enfermedades no parecen ser los responsables de tales resultados. La razón más probable es la insuficiente aplicación de fósforo durante el periodo de siembra o por la deficiencia de este en el suelo. Autores como (Porras, 2013) indican que el fósforo es capaz de moverse a través de la planta de arroz y mientras que en las etapas tempranas de cultivo ayuda en la formación de macollos y raíces, en fases posteriores, el 75 % es traslocado hacia los granos. Juárez, (2018) indica que la traslocación se da para un 85 % del fósforo y ambos estudios afirman que este ayuda al desarrollo del grano y al rendimiento del arroz.

Al suelo donde se encontraba el arroz se le aplicaron tres sacos por hectárea de fórmula 10-30-10 que si está dentro de lo recomendado según se expuso en la sección 2.2.2, pero no se realizó un análisis de suelo previo a la siembra para determinar la dosis correcta. Según Pezo y García. (2018) el 82 % de los suelos en zonas tropicales están deficientes de fósforo, además, a esta finca se le da un uso excesivo de producción, es decir, se producen cultivos todo el año lo que podría provocar una degradación del suelo (Reyes y Cano, 2022). Esta posibilidad requeriría de mayores dosis de aplicación o utilizar una formula con mayor cantidad de fósforo para evitar afectaciones negativas en el rendimiento.

Puesto que no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento productivo de las unidades experimentales correspondientes a los tratamientos aplicados con spray boom y tampoco hubo diferencias con el tratamiento control, no se puede seleccionar un volumen de aplicación óptimo con spray boom según el rendimiento productivo. En caso de haber existido diferencias entre los tratamientos mencionados y el control, se podría haber realizado una prueba de Tukey que permitiría destacar al tratamiento o tratamientos con mayor masa cosechada por hectárea. Por el contrario, se demuestra que con los tres volúmenes de aplicación evaluados con las características de las aplicaciones líquidas aquí mostradas se obtienen resultados similares en cuanto a este parámetro.

4.1.2. Calidad molinera

El rendimiento de arroz comercial (RAC) es una medida representativa de los demás parámetros de calidad molinera del arroz. Es el porcentaje de grano entero que se reporta para el consumidor final, y su porcentaje es subsecuente de todos los demás parámetros de calidad molinera (Poder Judicial, 2008). Como los resultados no fueron significativamente diferentes para ningún

parámetro (Tabla 5) y todos tuvieron un comportamiento similar, se utiliza el RAC como base para presentar los resultados.

El RAC presenta promedios casi idénticos para los distintos tratamientos con spray boom, con una diferencia máxima de apenas 1,81 %. Además, no es posible apreciar a simple vista que exista una tendencia de los promedios respecto al volumen de aplicación (Tabla 6). Luego de comprobar la normalidad de los datos de los tres tratamientos y el control con Shapiro Wilks y aplicar un ANOVA (ambas con $\alpha=0,05$), no se encontraron diferencias significativas para ningún parámetro de calidad molinera (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba de normalidad y ANOVA, aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de spray boom y un control.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		ANOVA	
	<i>W</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
GY	0,92	0,2468	0,55	0,6584
GD	0,9	0,1184	0,25	0,8581
RPi	0,95	0,6290	0,48	0,6990
RS	0,96	0,8313	0,21	0,8908
RPu	0,95	0,6676	0,24	0,8668
RQG	0,91	0,1383	0,27	0,8444
RGE	0,94	0,458	0,32	0,8119
RQ	0,91	0,1957	0,26	0,8505
RAC	0,96	0,7785	0,36	0,7824

*Resultados para un nivel de significancia del 95% y W, F y H (3,16) en todos los casos, GY = grano yesoso, GD = grano dañado, RPi = rendimiento pilado, RS = rendimiento semolina, RPu = rendimiento puntilla, RQG = rendimiento quebrado grueso, RGE = rendimiento grano entero, RQ = rendimiento quebrado y RAC = rendimiento arroz comercial.

Tabla 6. Medidas de resumen estadístico del RAC de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de spray boom y un control

Parámetro	Tratamiento	Promedio (%)	D.E. (%)	Mín (%)	Máx (%)
RAC	SB100	65,28	2,31	62	67,8
	SB150	64,12	3,05	58,9	66,5
	SB200	65,04	2,28	63,4	69
	C	65,88	3,14	61,30	69,20

Los porcentajes promedios de las pruebas de calidad molinera del arroz tratado con spray boom se muestran en la Tabla 7 donde, además, se presentan y se comparan con los resultados de estudios internacionales y nacionales. Tales pruebas se realizaron con metodologías distintas al de la presente investigación. No obstante, se puede observar que las diferencias en los parámetros comparables son bajas.

Tabla 7. Comparación de parámetros de calidad molinera obtenidos de las parcelas tratadas con spray boom contra reportados por otros estudios

Pruebas de calidad	Tratamientos con spray boom	(Rojas, 2012)	(Hernández et al., 2021)	(Reyes et al., 2020)
GY	12,47	4,5	1,33	-
GD	3,56	2,48	-	-
RPi	68,17	65,55	-	-
RS	11,06	13,47	10,52	9,34
RPu	3,35	8,67	-	1,36
RQG	18,07	-	-	-
RGE	46,65	44,9	53,4	-
RQ	21,43	22,84	-	6,8 0

GY = grano yesoso, GD = grano dañado, RPi = rendimiento pilado, RS = rendimiento semolina, RPu = rendimiento puntilla, RQG = rendimiento quebrado grueso, RGE = rendimiento grano entero, RQ = rendimiento quebrado y RAC = rendimiento arroz comercial.

Los efectos de elementos menores de fertilizantes en calidad molinera estudiados por Hernández et al. (2021) en Colombia, muestran un rendimiento de semolina inferior al obtenido en la presente investigación por solo 0,54 %, así mismo, el rendimiento de grano entero posee una diferencia del 6,75 % y la prueba que más se aleja de Hernández et al. (2021) es el de grano yesoso con una diferencia de 11,14 % mayor en este estudio. Al realizar la comparación con la calidad molinera resultado del cruce de dos especies de arroz hecha por Reyes et al. (2020) en Ecuador se muestra un 0,54 % más de impurezas, 1,72 % más de rendimiento de semolina, 1,99 % más en rendimiento de puntilla y 14,66 % más de rendimiento de quebrado en los resultados obtenidos durante esta investigación.

Además, en la tesis de Rojas (2012) realizada en la zona de Río Claro, Costa Rica, donde evaluó pruebas de calidad molinera en arroz almacenado en silos, se pueden comparar más parámetros y las diferencias no son de gran importancia. En los resultados del presente estudio se obtiene un 2,20 % menos de impurezas, 2,62 % más de rendimiento de pilada, 2,41 % menos semolina, 5,32 % menos de rendimiento de puntilla, 1,75 % más en rendimiento de grano entero y un 1,41 % menos en rendimiento de quebrado al comparar con Rojas (2012). La pequeña diferencia en estos parámetros se puede dar debida a que el arroz es de una zona distinta y que ya paso por varios procesos hasta su almacenamiento en un silo, lo cual no sucede en la presente investigación. Cabe mencionar que el parámetro de grano yesoso es el que presenta una mayor diferencia con un 7,97 % más en comparación con el estudio de Rojas (2012).

Como se puede observar, la calidad molinera del arroz cosechado para esta investigación es similar a lo presentado por otros autores, por lo tanto, utilizando spray boom con los tres volúmenes evaluados con las características de las aplicaciones líquidas descritas previamente, no se logra un aumento en la calidad del producto. Esto permite también corroborar que el bajo rendimiento productivo (21,79% menos que el rendimiento nacional) presentado en la sección 4.1.1 no se dio por el efecto negativo de insectos, microorganismos o enfermedades. Esto se observa más específicamente con el porcentaje de GD el cual es bajo (3,56 %) y es también un resultado similar a lo visto en otros estudios.

Dado que no se encontraron diferencias significativas en ninguna prueba de calidad molinera de las unidades experimentales, correspondientes a los tratamientos aplicados con spray boom ni con el control, no se puede seleccionar un volumen de aplicación óptimo con spray boom en este parámetro. Si hubieran existido diferencias significativas entre los tratamientos mencionados y el control, con una prueba de Tukey se podría verificar cuáles tratamientos y cuáles parámetros de calidad presentaban diferencias entre sí. Con esto, se podría haber formulado un método para dar un puntaje global a cada tratamiento según los diferentes aspectos de calidad molinera (entre menores valores de GY, GD, RPu, RQ y RS, mayor puntuación). Por otro lado, el RQG y RGE se pueden evaluar en un solo parámetro que es el RAC, y este se desea que sea mayor. Todo lo anterior, según el propósito de tener los mejores resultados y cantidades de arroz comercial de la mejor calidad.

4.1.3. Homogeneidad de aplicación con spray boom

Se analizó la homogeneidad y la cobertura promedio de las aplicaciones líquidas con spray boom el cual era un dato necesario para obtener los valores de CV. La Tabla 8 muestra la prueba de normalidad realizada a los datos de porcentaje de cobertura promedio de los tratamientos, el cual es la cantidad de papel hidrosensible que fue alcanzado por las gotas y es mayor al aumentar el volumen de aplicación. Estos resultados fueron los esperados y coinciden con lo obtenido por Matilde et al. (2018) que indica que la cobertura en los estratos del cultivo decrece al disminuir el volumen utilizado.

Tabla 8. Prueba de normalidad Shapiro Wilks aplicada a los tres tratamientos de spray boom.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		ANOVA	
	<i>W</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Cobertura	0,93	0,3162	9,94	0,0009

En este caso como el valor de *p* es mayor al nivel de significancia (0,05) los datos presentan normalidad y se aplica la prueba ANOVA unifactorial la cual presenta un valor *p* de 0,0009. De igual forma, como el valor *p* es menor a la significancia dada de 0,05, se corrobora que se presentan diferencias significativas entre tratamientos, lo que requiere la aplicación de la prueba de Tukey presente en la Tabla 9.

Tabla 9 . Cobertura promedio y CV de los tres tratamientos de spray boom.

Tratamiento	Cobertura promedio (%)	Desviación estándar (%)	CV	Tukey*
SB100	21,20	8,79	41,46	A
SB150	37,52	14,71	39,20	A B
SB200	51,19	15,82	30,92	B

* Pruebas con letras iguales no poseen diferencias significativas entre sí.

El tratamiento SB150 no presenta diferencias significativas con respecto a los otros dos tratamientos, pero si se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos SB100 y SB200. Tomando en cuenta la prueba de Tukey el tratamiento SB200 posee un mayor porcentaje de cobertura y el menor CV (Tabla 9), confirmando al tratamiento SB200 como el que posee una

mejor homogeneidad de aplicación. Según Zhang et al. (2020), a menor CV se obtiene mayor homogeneidad de las gotas y es mejor la penetración del líquido entre el cultivo.

Los resultados de CV presentan similitudes a lo obtenido por Wang et al. (2019), el cual utilizó un spray boom con un volumen cercano al 300 L/ha y obtuvo un CV de 32,1 %. A pesar de esta semejanza, en ambas investigaciones los resultados son mayores al CV=10 % requerido por el estándar nacional chino y los estándares utilizados por Subr et al. (2017) y Kluza et al. (2019). Asimismo, estos resultados son mayores al CV=12 % indicado por Zwertvaegher, (2022) para lograr alta homogeneidad y al CV=25 % utilizado por Woldt et al. (2018).

Una posible explicación a la baja homogeneidad presentada en el uso de spray boom es el hecho de que el tractor que transporta el equipo recorre distancias en un terreno con variaciones que pueden provocar vibraciones y cambios de altura de la barra pulverizadora, siendo estos algunos de los factores que propician errores en las condiciones requeridas durante aplicaciones líquidas con spray boom afectando a la homogeneidad (Dou et al., 2021). Sin embargo, a pesar de la baja homogeneidad, la cobertura de los tratamientos es ligeramente mayor a lo indicado en artículos como Matilde et al. (2018) donde analizaron la cobertura en distintos estratos del cultivo de soja de tres boquillas (abanico plano, cónica y abanico plano con aire inducido) y obteniendo para un volumen de 90 L/ha coberturas de aproximadamente 15 % y para un volumen de 130 L/ha lograron coberturas de aproximadamente 20 %. También la cobertura es similar al caso de Borger et al. (2013) que, al evaluar el efecto de diferentes volúmenes de aplicación de un pre-herbicida, entre otros parámetros, midieron la cobertura presentada en papel hidrosensible obteniendo un promedio de 32 % con aplicación de 150 L/ha, 24 % con 110 L/ha y 20 % con 90 L/ha.

4.1.4. Costos asociados

Según lo descrito en la sección 3.7.1 de metodología, los costos fijos asociados al tractor y spray boom son la depreciación, impuestos, seguros y almacenamiento. Estos rubros equivalen a ¢1 897 500/año de depreciación del tractor y ¢462 500/año de depreciación del spray boom; ¢433 406/año y ¢59 062/año de impuestos, seguros y almacenamiento del tractor y spray boom, respectivamente. Lo descrito resulta en un total de costos fijos de ¢2 852 469/año que es igual para todos los tratamientos.

Es importante recalcar que este es un análisis de costos asociados al uso de spray boom en aplicaciones líquidas y por lo tanto los costos que se ven afectados por estas aplicaciones son los costos variables. Como se mencionó anteriormente, el total de costos fijos se mantiene independientemente del tratamiento. En la Tabla 10 se muestra la distribución de los costos variables de cada tratamiento.

Tabla 10 . Costos variables asociados a aplicaciones líquidas con el uso del spray boom.

Tipo de costo	Concepto	Costo SB100 (₡/ha)	Costo SB150 (₡/ha)	Costo SB200 (₡/ha)
Costos variables	Combustible	5 883,20	6 150,62	6 418,04
	Mantenimiento	1 915,09	1 953,43	1 991,76
	Filtros y lubricante	882,48	922,59	962,71
	Pago operario	675,02	705,71	736,39
	costo agua	6,16	9,25	12,33
Total (₡/ha)		9 361,96	9 741,59	10 121,22

A simple vista se nota que los costos variables aumentan con pocas diferencias conforme aumentan los volúmenes de aplicación, siendo que SB150 tiene un aumento porcentual de 4,06 % con respecto a SB100; SB200 de 3,90 % con respecto a SB150 y de 8,11 % con respecto a SB100. Esta diferencia en los costos se da porque, al aumentar el volumen de aplicación, aumenta el tiempo de trabajo que influye en los costos variables del equipo presentándose un mayor consumo de combustible, de agua, lubricantes y filtros y mayor gasto de mantenimiento por aumento en su uso y en el pago del operario.

Si bien los costos aumentan conforme aumentan los volúmenes de aplicación, la diferencia entre tratamientos es muy baja. Estas diferencias representan solo un aumento de ₡379,63/ha de SB150 con respecto a SB100 y lo mismo de SB200 con respecto a SB150. Además, se dio un aumento de ₡759,26/ha de SB200 con respecto a SB100. A modo de ejemplificación, si se considera que en la temporada 2021-2022 había 534 productores de arroz y se sembraron 35 301 ha en el país (CONARROZ, 2023), en promedio cada productor poseía 66,1 ha. Esto quiere decir que, para esta área superficial, la diferencia máxima en los costos variables es de ₡50 192 por cada aplicación (diferencia entre SB200 y SB100).

Era esperable que el tratamiento SB100 fuera el más económico y para productores que tengan como prioridad la máxima reducción de costos en su actividad puede ser la mejor opción. No obstante, al existir tan bajas diferencias entre los tratamientos (máximo de 8,11 %) no es recomendable basarse únicamente en este aspecto si otros factores referentes a aplicaciones líquidas, como productividad, mejoramiento de calidad, ahorro de agua, control de plagas, homogeneidad, entre otros, se verán afectados.

Analizando SB100 más a fondo, en la Figura 12 se hace una representación de los costos variables, donde se observa con mayor facilidad que el mayor costo es el referente al consumo de combustible (62,84 % de los costos variables), seguido por el costo de mantenimiento (20,46 % de los costos variables). Por el contrario, el costo del agua corresponde únicamente a un 0,07 % de los costos variables siendo ese el menor de ellos.

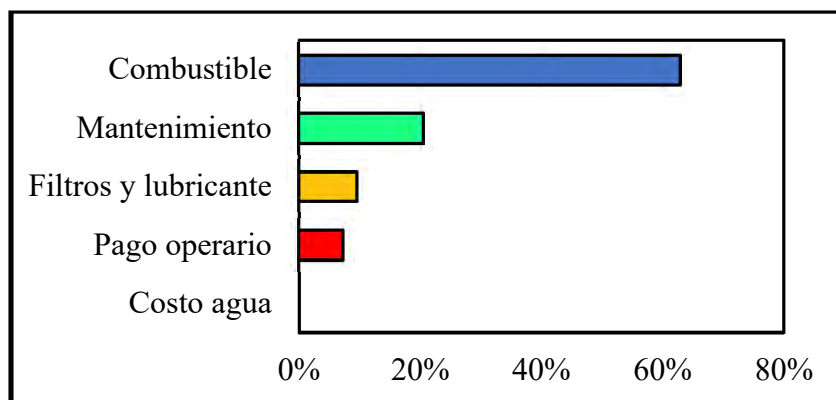


Figura 12. Distribución porcentual de los costos asociados al uso del spray boom.

El combustible también es el mayor costo presente en los tratamientos SB150 y SB200, siendo el 63,14 % y 63,41 % de los costos variables, respectivamente. Entonces, si se quisiera una mayor reducción en los costos del uso de tractor y spray boom, es importante considerar la reducción del consumo de combustible. Tomando en cuenta que en este análisis la diferencia de las operaciones entre tratamientos es que a mayor volumen se tiene mayor necesidad de desplazarse a recargar el tanque de agua del spray boom, se podrían optimizar las operaciones de tal forma que los recorridos hasta la toma de agua sean los menos extensos, eviten obstáculos y busquen, en la medida de lo posible, no subir pendientes.

4.1.5. Tratamiento más eficiente en aplicaciones líquidas con el uso de spray boom.

El hecho de que no existieran diferencias significativas en las pruebas de calidad molinera y rendimiento productivo permite seleccionar los mejores tratamientos haciendo análisis de los parámetros de costos asociados y homogeneidad de la aplicación.

En cuanto al porcentaje de cobertura de la aplicación, según lo explicado en la sección 2.2.4 este parámetro depende del modo de acción del agroquímico. Para el caso específico del InGrain y reguladores de crecimiento en general, no se encontró información referente en cuanto a la cobertura deseada en su aplicación o si la homogeneidad requerida es alta. Sin embargo, como es un agroquímico sistémico, la cobertura mínima recomendada es de 20 gotas/cm² y al hacer el conteo de las gotas depositadas en las láminas de papel hidrosensible se demuestra que todos los tratamientos del spray boom cumplen con esta condición (Tabla 11). Sin embargo, sin importar si el agroquímico es sistémico o de contacto, es deseable una homogeneidad alta (REM, 2018) y asumiendo que es preferible que todas las plantas reciban la mayor cantidad posible de deposición líquida, se escoge el tratamiento SB200 al presentar menor CV y mayor cobertura promedio (Tabla 11) como ya se mencionó en la sección 4.1.3.

Tabla 11. Resumen de parámetros evaluados en los tratamientos con spray boom.

Parámetro	Características	Tratamientos			
		SB100	SB150	SB200	C
Rendimiento productivo	Promedio rendimiento (kg/ha)	3 163	2 721	3 504	3 192

Tabla 11 (continuación). Resumen de parámetros evaluados en los tratamientos con spray boom.

Parámetro	Características	Tratamientos			
		SB100	SB150	SB200	C
Calidad Molinera	Promedio RAC (%)	65,28	64,12	65,04	65,88
Homogeneidad de aplicación	Promedio cobertura (%)	21,2	37,52	51,19	N/A
	Promedio cobertura (gotas/cm ²)	171,64	406,81	460,2	N/A
	CV (%)	41,46	39,2	30,92	N/A
Costos asociados	Costos totales (€/año)	2 852 468,75	2 852 468,75	2 852 468,75	N/A
	Costos variables (€/ha)	9 361,96	9 741,59	10 121,22	N/A

En la estimación de costos asociados de la sección 4.1.4 se indica al tratamiento SB100 como el más económico y, aunque los costos entre tratamientos son similares, en dicha sección se introducen factores de importancia que pueden estudiarse más allá de su valor monetario. Entre estos, el uso del agua que, si bien solo representa un 0,07 % de los costos variables, posee importancia ambiental. A modo de ejemplo, en la temporada 2021-2022 se sembraron 19 180 ha en la región Chorotega (CONARROZ, 2023), si los productores utilizarán los volúmenes de aplicación estudiados con el spray boom, SB100, SB150 y SB200 necesitarían 1 918 000 L, 2 877 000 L y 3 836 000 L por cada aplicación líquida, respectivamente, para cubrir esta área superficial.

En Costa Rica se estima que cada persona utiliza 180 L de agua diarios (Acueductos y Alcantarillados [AYA], 2010), lo que quiere decir que el agua consumida al hacer uso del volumen de 100 L/ha (tratamiento SB100) para solo una aplicación en el área correspondiente a la región Chorotega equivaldría al uso diario de aproximadamente 10 656 personas. Para el volumen de 150 L/ha (tratamiento SB150) equivaldría al uso diario de 15 983 personas aproximadamente y para el volumen de 200 L/ha (tratamiento SB200) equivaldría al uso diario de 21 311 personas aproximadamente. Con esta información, es notable que si bien el costo por usar este líquido es bajo (0,07 % de costos variables) el aumento en la diferencia en el consumo de altos volúmenes (de hasta el 100 % entre SB100 y SB200) podría contribuir a afectaciones ambientales y sociales, especialmente en lugares que pueden presentar escasez de agua como la provincia de Guanacaste.

Otro factor de interés es el combustible, que representa el mayor gasto en el uso de un spray boom con tractor. Este representa el 62,84 % de los costos variables, pero, como es bien sabido, su consumo también produce gases de efecto invernadero (GEI). El estudio de Gómez et al. (2021) tenía como objetivo determinar las emisiones de GEI en vehículos agrícolas de Costa Rica. Dicho estudio brindó como resultados que el promedio de emisión de CO₂ de tractores con potencias entre 60 y 168 kW es de 128 400 kgCO₂/año. También indicó que este gas representa el 98 % de los gases emitidos por este tipo de maquinaria y se puede estimar a partir de la ecuación (13),

donde L_{diesel} = cantidad de diésel consumida (L/ha) y FE_{dieselCO_2} = factor de emisión de dióxido de carbono en la combustión que para el diésel es de 2,69 kgCO₂/L:

$$T_{\text{CO}_2} (\text{kgCO}_2/\text{ha}) = L_{\text{diesel}} * FE_{\text{dieselCO}_2} \quad (13)$$

De esta forma, el tratamiento SB100 con un consumo de diésel aproximado de 6,79 L/ha produce 18,25 kgCO₂/ha, el tratamiento SB150 con un consumo de diésel aproximado de 7,09 L/ha produce 19,08 kgCO₂/ha y SB200 con un consumo de diésel aproximado de 7,40 L/ha produce 19,91 kgCO₂/ha. Si la producción de CO₂ promedio por tractor es de 126 250 kgCO₂/año, entonces SB100, SB150 y SB200 solo emiten el 0,014 %, 0,015 % y 0,016 % de la producción anual por cada hectárea a la que se le realice una aplicación líquida, lo cual no es suficiente para que ningún tratamiento sobrepase o contribuya a sobrepasar el promedio de emisiones por vehículo. Los porcentajes no son significativos, pero SB200 produce 1,66 kg de CO₂ por cada hectárea, más que SB100 (un aumento del 9,1 %) que, si bien no parece mucho, esta reducción en las emisiones de GEI al disminuir el volumen de aplicación y junto a lo explicado anteriormente con respecto al consumo del agua ayudarían a los productores a alcanzar objetivos ambientales que les otorguen valor agregado a sus cultivos.

4.2.. Determinación del volumen de aplicación óptimo con dron

4.2.1. Rendimiento productivo

Como se muestra en la Tabla 12, los promedios de rendimiento productivo obtenidos de las parcelas tratadas con dron son similares entre ellos con una diferencia entre el valor máximo y mínimo de 545 kg/ha y en promedio con una desviación estándar de 464,4 kg/ha. Sin embargo, se aprecia que hay una tendencia a la disminución del promedio del rendimiento productivo, conforme aumenta el volumen de aplicación. Dado que los datos del rendimiento productivo son normales ($W(3, 16) = [0,95]$, $p = 0,6356$), se puede asegurar que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con dron ($F(3, 16) = [1,54]$, $p = 0,2415$) (Tabla 13).

Tabla 12. Medidas de resumen estadístico del rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con dron y control.

Parámetro	Tratamiento	Promedio (kg/ha)	D.E. (kg/ha)	Mín (kg/ha)	Máx (kg/ha)
RProd	D10	3 205	423,72	2 835	3 845
	D20	2 921	453,74	2 295	3 495
	D30	2 660	489,94	2 070	3 245
	C	3 192	490,20	2 695	3 900

Si bien, una diferencia de 545 kg/ha, es una diferencia importante y fácilmente se podría pensar que debe haber diferencias entre los tratamientos, se puede observar que las desviaciones estandar dentro de las repeticiones de cada tratamiento también son altas (423,72 – 490,20 kg/ha). Esto puede deberse al factor de topografía u otras características morfológicas del área donde se encontraban las parcelas que propician o no un mejor rendimiento. Dicho factor se eliminó al utilizar un experimento de parcelas completamente aleatorizadas. Al llevar a cabo el experimento en arroz seco y no inundado, las pequeñas irregularidades del terreno pueden influir

ampliamente en el almacenamiento de agua en puntos específicos. Por esta razón, de una parcela a otra pueden haber importantes diferencias de rendimiento productivo, puesto que el terreno permite o dificulta el almacenamiento de agua. En presencia de alta cantidad de agua, el rendimiento aumenta. Por el contrario, secciones con menos almacenamiento de agua reducen el rendimiento productivo. Dicho fenómeno se vuelve aún más significativo cuando el experimento se realiza en una zona de bajas precipitaciones (Calvo et al., 2018).

Tabla 13. Prueba de normalidad y ANOVA aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz tratadas con dron y control.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		ANOVA	
	<i>W</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
RProd	0,95	0,6356	1,54	0,2415

*Resultados para un nivel de significancia del 95%. RAC= rendimiento de arroz comercial.

En la Tabla A.1 y Tabla A.2, se indican los rendimientos productivos de arroz obtenidos en el país y en la región Chorotega en los últimos 11 años (CONARROZ, 2019; CONARROZ, 2022; CONARROZ, 2023 y INEC, 2017). La Figura 13 muestra el promedio de estos datos y se hace una comparación con el rendimiento obtenido en las parcelas tratadas con dron. El rendimiento productivo promedio de las unidades experimentales aplicadas con dron fue de 2 928,67 kg/Ha, lo que equivale a una diferencia de 36,62 % y 43,78 % respecto al promedio nacional y al promedio de la región Chorotega, respectivamente. Este bajo rendimiento pudo darse debido a la acción de plagas, eventos climáticos adversos o a una deficiencia de fósforo en el suelo, puesto que solamente se realizó una aplicación de fósforo en fórmula 10-30-10 con una dosis de 3 quintales por hectárea a los 10 días de germinado. Como se mencionó en la sección 2.2.2, es recomendado hacer aplicaciones de fósforo en las etapas iniciales de crecimiento del arroz para favorecer el crecimiento de raíces, pero más adelante en el llenado de granos el fósforo es indispensable (Juárez, 2018). Según Solera (2019), el 85 % del fósforo absorbido por el arroz es traslocado en los granos produciendo así un grano más lleno y de mejor calidad.

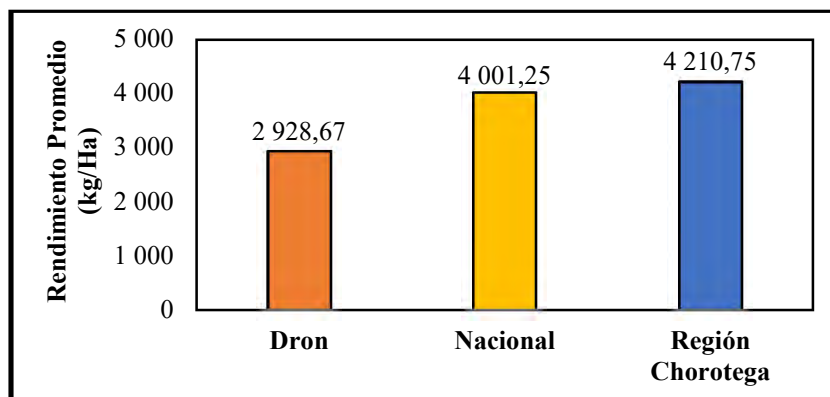


Figura 13 . Comparación de rendimientos promedio nacional y de la región Chorotega con el rendimiento de aplicaciones con dron.

Dado que no se encontró diferencias significativas en el rendimiento productivo de las unidades experimentales correspondientes a los tratamientos aplicados con dron, no se puede seleccionar un volumen de aplicación óptimo con dron para obtener mejores resultados en el parámetro en estudio.

4.2.2. Calidad molinera

Como se mencionó en la sección 4.1.2, en el caso de las aplicaciones con dron, se utiliza el RAC como base para presentar los resultados de calidad molinera debido a que todas las pruebas tuvieron un comportamiento estadístico similar. Dicho comportamiento estadístico refleja que no existen diferencias significativas para cada parámetro evaluado entre las parcelas tratadas con dron y contra el control. De igual forma, tras realizar la comprobación de la normalidad y aplicar ANOVA y Kruskal-Wallis, no se encontraron diferencias significativas para ningún parámetro de calidad molinera (Tabla 14). El análisis estadístico descrito se aplicó para comparar tratamientos entre sí y contra el control. El RAC tiene promedios muy similares para los tratamientos del dron, con una variación porcentual máxima de 0,70 % entre el D30 y el C. (Tabla 15).

Tabla 14 . Prueba de normalidad, ANOVA y prueba de Kruskal-Wallis, aplicados al rendimiento productivo de las parcelas de arroz con tres tratamientos de dron y un control.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		ANOVA		Kruskal-Wallis	
	<i>W</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>
GY	0,94	0,5455	0,25	0,8633	-	-
GD	0,94	0,4685	0,06	0,9823	-	-
RPi	0,93	0,3657	0,02	0,9962	-	-
RS	0,90	0,0883	0,65	0,5928	-	-
RPu	0,87	0,0296	-	-	0,31	0,8792
RQG	0,90	0,1100	0,08	0,9691	-	-
RGE	0,89	0,0712	0,02	0,9968	-	-
RQ	0,87	0,0260	-	-	0,31	0,9583
RAC	0,94	0,4511	0,07	0,9741	-	-

*Resultados para un nivel de significancia del 95% y W, F y H (3,16) en todos los casos. GY = grano yesoso, GD = grano dañado, RPi = rendimiento pilado, RS = rendimiento semolina, RPu= rendimiento puntilla, RQG = rendimiento quebrado grueso, RGE = rendimiento grano entero, RQ = rendimiento quebrado y RAC = rendimiento arroz comercial

Tabla 15 . Medidas de resumen estadístico del RAC de las parcelas de arroz tratadas con tres tratamientos de dron y un control.

Parámetro	Tratamiento	Promedio (%)	D.E. (%)	Mín (%)	Máx (%)
RAC	D10	65,72	2,26	62,1	67,7
	D20	65,18	2,64	62,8	69,1
	D30	65,60	1,73	63,6	67,7
	C	65,88	3,14	61,3	69,2

RAC= rendimiento de arroz comercial.

Resultados de estudios efectuados en Costa Rica y en otros países se compararon con los porcentajes promedios de las pruebas de calidad molinera del arroz tratado con dron (Tabla 16). Dentro de los parámetros comparables no se encontró ningún estudio que diera resultados de arroz comercial, pero sí de RGE, el cuál sigue siendo un parámetro significativo, pues especifica la cantidad de grano entero que rinde una muestra de arroz. Al observar estos datos, la diferencia resultante entre otros estudios y el presente es mínima (máxima diferencia de 4,75 puntos porcentuales).

Tabla 16 . Comparación de parámetros de calidad molinera obtenidos de las parcelas tratadas con dron contra reportados por otros estudios.

Pruebas de calidad	Tratamientos con dron	(Rojas, 2012)	(Hernández et al., 2021)	(Reyes et al., 2020)
GY	11,46	4,50	1,33	-
GD	3,97	2,48	-	-
RPi	68,69	65,55	-	-
RS	10,70	13,47	10,52	9,34
RPu	3,19	8,67	-	1,36
RQG	16,79	-	-	-
RGE	48,65	44,90	53,40	-
RQ	19,98	22,84	-	6,80

GY = grano yesoso, GD = grano dañado, RPi = rendimiento pilado, RS = rendimiento semolina, RPu= rendimiento puntilla, RQG = rendimiento quebrado grueso, RGE = rendimiento grano entero, RQ = rendimiento quebrado y RAC = rendimiento arroz comercial.

En comparación con el estudio de Reyes et al. (2020), realizado a 40 líneas de arroz producto del cruce de dos especies en Ecuador, los resultados de los tratamientos con dron mostraron un 0,45% más de impurezas, un 1,36% más de rendimiento de semolina, un 1,83% más de rendimiento de puntilla y 13,22% más de rendimiento de quebrado. El estudio de Hernández et al. (2021), realizado en Santander, Colombia, mostró un rendimiento de semolina 0,18% inferior al obtenido en este estudio. El parámetro más alejado de Hernández et al. (2021) es el de grano yesoso, con 10,13 puntos porcentuales más que lo obtenido con los tratamientos con dron del presente estudio.

Sin embargo, en la investigación de Rojas (2012), que se llevó a cabo en Río Claro, Costa Rica, donde se examinaron pruebas de calidad molinera en arroz almacenado en silos, se pueden comparar más parámetros y no hay diferencias significativas. Al comparar esta investigación con el trabajo de Rojas (2012), se obtiene un 3,14 % más de rendimiento de pilada, un 2,77 % menos de semolina, un 5,88 % menos de rendimiento de puntilla, un 3,75 % más de rendimiento de grano entero y un 2,86 % menos de rendimiento de quebrado. La estrecha diferencia en estos parámetros se debe a que el arroz proviene de una región diferente y ha pasado por varios procesos antes de ser almacenado en un silo, lo cual no ocurre en este estudio. Cabe mencionar que el parámetro de grano yesoso es mayor en un 6,96 % en comparación con el estudio de Rojas (2012).

Dado que no se encontraron diferencias significativas en ninguno de los parámetros de calidad molinera de las unidades experimentales correspondientes a los tratamientos aplicados con dron ni con el control, no se puede seleccionar un volumen de aplicación óptimo con dron. En caso de haber existido diferencias significativas entre los tratamientos mencionados y el control, se podría

haber seleccionado un volumen de aplicación como el óptimo según la calidad molinera de las parcelas. De manera similar a lo mencionado en la sección 4.1.2, de haberse encontrado diferencias significativas entre los distintos tratamientos, se habrían clasificado los tratamientos para obtener los mejores resultados y cantidades de arroz comercial de la mejor calidad.

4.2.3. Homogeneidad de aplicación con dron

La calidad de las aplicaciones liquidas con dron es analizada a través de la cobertura y el CV. Los resultados del porcentaje de cobertura promedio de cada uno de los tratamientos (Tabla 17) no muestran una tendencia clara entre los volúmenes de aplicación, los cuales varían entre un máximo de 6,11 % y un mínimo de 2,35 %. Sin embargo, se puede apreciar que existe una tendencia entre la cobertura promedio y la desviación, tal que, a mayor cobertura, mayor desviación. Esto puede apreciarse más claramente en la Figura 14. Gráfico de cajas para la cobertura según el tratamiento., donde las marcas de desviaciones se extienden más, conforme se encuentra más arriba el porcentaje de cobertura. Lo anterior puede deberse a que, entre más cobertura, mayor dispersión de las gotas, lo que puede resultar en una variación mayor en la distribución de las mismas, dando como resultado una mayor desviación estándar.

Tabla 17. Cobertura promedio y coeficiente de variación según tratamiento.

Tratamiento	Cobertura promedio (%)	Desviación estándar (%)	CV (%)
D10	2,35	1,33	56,64
D20	6,11	2,96	48,49
D30	4,41	2,55	57,77

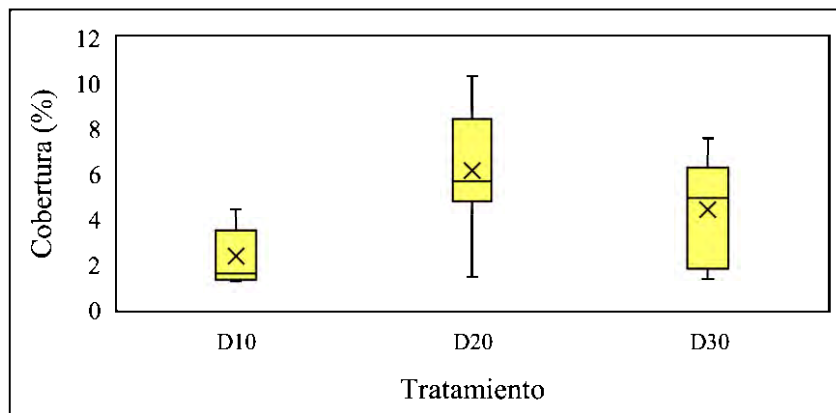


Figura 14. Gráfico de cajas para la cobertura según el tratamiento.

Al efectuar la prueba de Shapiro Wilks, cuyo resultado se muestra en la Tabla 19, los datos de porcentaje de cobertura no presentaron normalidad ($p = 0,0115$), por lo tanto, se realizaron dos pruebas adicionales. La prueba de Kruskal Wallis (Tabla 19) indica que si existen diferencias significativas en los datos ($p = 0,0152$). La comparación de pares utilizando la prueba de Dunn, mostró que no existen diferencias significativas entre los tratamientos D20 y D30 ($p = 0,1884$). Sin embargo, si existen diferencias significativas entre el tratamiento D10 y el D20 ($p = 0,0023$) y entre D10 y D30 ($p = 0,0259$).

Tomando en cuenta los resultados de la prueba de Dunn, el tratamiento D20 posee un mayor porcentaje de cobertura (6,11%). Aun así, en la Tabla 17 se muestra que, aunque el CV es menor para este tratamiento, sigue siendo muy alto para confiar en los valores de homogeneidad. Por esta razón, se realizó un conteo de gotas por área, y ninguno de los tres tratamientos cumple con el mínimo recomendado de 20 gotas/cm² (Tabla 18) (REM, 2018). Aunque ninguno de los tratamientos cumple con los requerimientos para aplicaciones de productos sistémicos, cabe mencionar que lo que se busca para seleccionar el mejor método en estos casos son valores de CV bajos, pues es mejor la homogeneidad de las gotas y la penetración del líquido (Zhang et al., 2020). Según el estudio de Matilde et al. (2018), mayores volúmenes de aplicación resultan en mayor cobertura y homogeneidad, lo cual no ocurrió en este caso. Por otro lado, Cedeño et al. (2020) indican que el flujo de aire producto de las hélices del dron ayudan a que el líquido llegue a más zonas del cultivo. En este caso, el tamaño de las gotas y dicho flujo de aire pudo afectar su distribución, por lo que para futuras investigaciones es recomendable hacer uso de un coadyuvante que haga las funciones encapsuladoras y antideriva.

Tabla 18. Promedio de cobertura en gotas/cm² para los tratamientos aplicados con dron.

Tratamiento	Cobertura promedio (gotas/cm ²)
D10	7,44
D20	15,38
D30	17,40

Los resultados de porcentaje de cobertura presentan similitudes a lo obtenido por Wang et al. (2019), el cual utilizó un dron a un volumen de 10 L/ha y encontró una cobertura de 2,2 %. Respecto al CV, este autor obtuvo un 87,2 % muy alejado de lo obtenido en la presente investigación. A pesar de las diferencias en la comparación de los CV, en ambas investigaciones los resultados superan al CV=10 % requerido por el estándar nacional chino y los estándares indicados por Subr et al. (2017) y Kluza et al. (2019). También, estos resultados son mayores al CV=12 % indicado por Zwervaegher, (2022) para lograr alta homogeneidad y al CV=25 % usado por Woldt et al, (2018).

Tabla 19. Prueba de normalidad Shapiro Wilks aplicada a los tratamientos de dron.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		Kruskal Wallis	
	W	P	H	P
% Cobertura	0,87	0,0115	8,38	0,0152

4.2.4. Costos asociados

De acuerdo con lo descrito en la sección 3.7.3 de metodología, los costos fijos asociados al dron son la depreciación, software, cursos y certificaciones, seguros y almacenamiento. Estos rubros equivalen a ₡1 559 097/año de depreciación; ₡621 875/año de software; ₡1 468 125/año de certificaciones y ₡58 251/año de seguros y almacenamiento. Para un total de costos fijos de ₡2 532 848/año, lo cual es igual para todos los tratamientos.

En la Tabla 20 se muestra la distribución de costos variables de cada tratamiento. A simple vista se observa que los costos aumentan conforme aumentan los volúmenes de aplicación. Por ejemplo,

D20 tiene un aumento de 18,76 % con respecto a D10, D30 tiene un aumento del 20,72 % con respecto a D20 y de 43,37 % con respecto a D10. Esta diferencia en los costos se da porque, al aumentar el volumen de aplicación, aumenta el tiempo de trabajo que influye en los costos variables del equipo presentándose un mayor consumo de energía, un mayor gasto de agua, mayor gasto de mantenimiento por aumento en su uso y un mayor costo en el pago del operario.

Tabla 20. Costos variables asociados a aplicaciones líquidas con el uso del dron.

Tipo de costo	Concepto	Costo D10 (₡/ha)	Costo D20 (₡/ha)	Costo D30 (₡/ha)
Costos variables	Pago operario	500,29	593,86	716,74
	Mantenimiento	425,94	505,61	610,22
	Energía	9,40	11,16	13,47
	Costo agua	0,62	1,23	1,85
Total (₡/ha)		936,26	1 111,86	1 342,28

Teniendo en cuenta que el tratamiento D10 produce menores costos, menores gastos de energía y menores tiempos de trabajo, se interpreta a este como el tratamiento más eficiente respecto al parámetro de costos asociados. Aunque los porcentajes de costos podrían verse altos, en términos absolutos, la diferencia de costos es pequeña, y según el criterio de cada productor, podría ser significativa o no. De todas formas, dependerá de cada caso específico, cantidad de aplicaciones, área de trabajo y opinión de cada productor si vale la pena tomar una decisión en cuánto a cuál tratamiento utilizar, según los costos asociados.

Analizando con más detalle el tratamiento D10, en la Figura 15 se hace una representación de los costos variables, donde se infiere que el mayor costo es el referente al pago del operario (53,65 % de los costos variables), seguido por el costo de mantenimiento (45,68 % de los costos variables). Por el contrario, el costo del agua corresponde únicamente a un 0,07 % de los costos totales, el cuál es prácticamente despreciable.

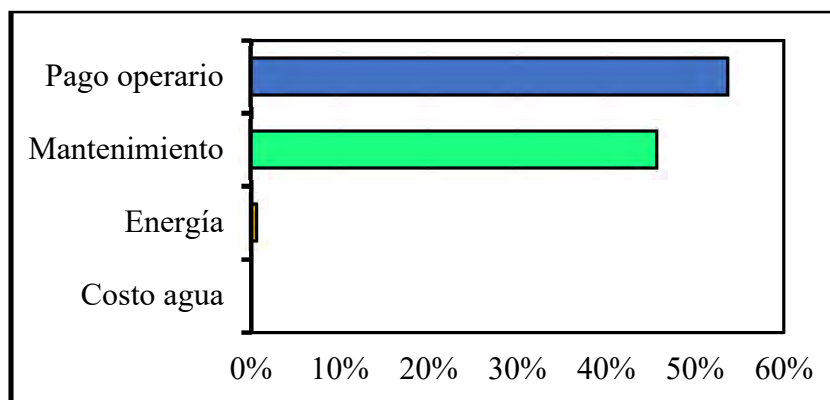


Figura 15. Distribución porcentual de los costos variable asociados al uso del dron del tratamiento D10.

4.2.5. Tratamiento más eficiente en aplicaciones líquidas con el uso de dron.

El hecho de que no existieran diferencias significativas en las pruebas de calidad molinera y rendimiento productivo permite seleccionar el mejor tratamiento haciendo análisis de los parámetros de costos asociados y homogeneidad de aplicación. Como se mencionó previamente, dependerá de cada productor decidir si la diferencia de costos entre tratamientos de dron es significativa en su respectivo caso. La diferencia de costos máxima posible (€406,02/ha), no representa una diferencia significativa. Dicho esto, la selección del tratamiento de dron más eficiente se reduce al cumplimiento de homogeneidad de aplicación para el InGrain. Como se mencionó previamente en la sección 2.2.4, para los productos de contacto se requiere una cobertura mínima de 20 gotas/cm² y ninguno de los tratamientos cumple dicho requisito. Aun así, el D20 presenta mayor homogeneidad (48,49%) y cobertura (6,11%, 15.38 gotas/cm²), por lo que se selecciona para la comparación final de los métodos más adelante en la sección 4.3.

Tabla 21. Resumen de parámetros evaluados en los tratamientos con dron.

Parámetro	Características	Tratamientos			
		D10	D20	D30	C
Homogeneidad de aplicación	Promedio cobertura (%)	2,35	6,11	4,41	N/A
	Promedio cobertura (gotas/cm ²)	7,44	15,38	17,40	N/A
	CV (%)	56,50	48,49	57,77	N/A
Costos asociados	Costos fijos (€/año)	2 532	2 532	2 532	N/A
	Costos variables (€/ha)	848,45	848,45	848,45	N/A
Calidad Molinera	Promedio RAC (%)	936,26	1 111,86	1 342,28	N/A
Rendimiento productivo	Promedio rendimiento (kg/ha)	65,72	65,18	65,6	65,88
		3 205	2 921	2 660	3 192

4.3. Identificación del método de aplicación más eficiente

Basados en el análisis de las secciones anteriores, se realizó una comparación entre los tratamientos SB100, SB200 y D20 siendo estos los mejores evaluados según los parámetros en estudio (Tabla 22).

Tabla 22. Principales comparaciones entre métodos de aplicación.

Parámetros	Tratamiento más eficiente según el método de aplicación	
	Dron	Spray Boom
Rendimiento productivo	Sin diferencias significativas	Sin diferencias significativas
Calidad molinera	Sin diferencias significativas	Sin diferencias significativas
Homogeneidad de aplicación	D20	SB200
Costos asociados	D20	SB100

Después de comprobar que existe normalidad en los datos según las pruebas Shapiro Wilks de calidad molinera (Tabla 23), se realiza un ANOVA unifactorial, la cual indica que no existen diferencias significativas entre los métodos según todas las pruebas de laboratorio de calidad. En el caso del rendimiento productivo, según Shapiro Wilks ($W = 0,85$, $p = 0,03$) no hay normalidad en los datos, por lo tanto, se aplica la prueba de Kruskal Wallis donde se encontró que no existe diferencias significativas de este parámetro entre los tratamientos evaluados ($H = 0,55$, $p = 0,7573$) (Tabla 23).

Tabla 23. Prueba de normalidad y ANOVA para comparación de rendimiento productivo y calidad molinera en D20, SB100 y SB200.

Parámetro	Shapiro-Wilks		ANOVA		Kruskal-Wallis	
	W*	p-valor	F*	p-valor	H*	p-valor
GY	0,91	0,26	0,06	0,9452	-	-
GD	0,88	0,1	0,64	0,5455	-	-
RPi	0,94	0,56	0,05	0,9539	-	-
RS	0,92	0,31	0,01	0,9873	-	-
RPu	0,94	0,56	0,06	0,9104	-	-
RQG	0,9	0,17	0,11	0,8969	-	-
RGE	0,88	0,1	0,06	0,9458	-	-
RQ	0,88	0,08	0,05	0,9553	-	-
RAC	0,91	0,24	0,01	0,9876	-	-
Rprod	0,85	0,03	-	-	0,55	0,7573

*Resultados para un nivel de significancia del 95% y W, F y H (2,12) en todos los casos. GY = grano yesoso, GD = grano dañado, RPi = rendimiento pilado, RS = rendimiento semolina, RPu = rendimiento puntilla, RQG = rendimiento quebrado grueso, RGE = rendimiento grano entero, RQ = rendimiento quebrado, RAC = rendimiento arroz comercial y Rprod = rendimiento productivo

Cabe destacar que la diferencia máxima entre promedios de rendimiento productivo se da entre SB200 y D20 y es de 583 kg/ha como se muestra en el resumen de la Tabla 24, el cual podría ser un valor significativo para los productores. Sin embargo, por ejemplo, la desviación estándar en los resultados de este factor para SB200 es 929,60 kg/ha. Esto significa que existe una dispersión de datos, a partir del promedio, mayor que la máxima diferencia encontrada. Esta dispersión se aprecia más claramente en la Figura 16 donde la mediana de los tres tratamientos posee valores muy cercanos entre sí, pero la mayoría de los valores extremos se alejan del promedio. Cabe mencionar que se puede descartar que el tipo de siembra haya afectado la variabilidad del rendimiento productivo, puesto que el sembrado fue realizado con máquina sembradora. En caso de haber utilizado voleadora para la siembra, esta homogeneidad se hubiera visto reducida, propiciando mayor variabilidad en este parámetro.

Tabla 24 . Resumen de parámetros estudiados en aplicaciones líquidas con tratamiento SB100, SB200 y D20.

Parámetro	Características	Tratamientos		
		D20	SB100	SB200
Rendimiento productivo	Promedio rendimiento (kg/ha)	2 921	3 163	3 504
Calidad Molinera	Promedio RAC (%)	65,18	65,28	65,04
Homogeneidad de aplicación	Promedio cobertura (%)	6,11	21,2	51,19
	Promedio cobertura (gotas/cm ²)	15,39	171,64	460,2
	CV (%)	48,49	41,46	30,92
Costos asociados	Costos fijos (€/año)	2 532 848	2 852 469	2 852 469
	Costos variables (€/ha)	1 112	9 362	10 121

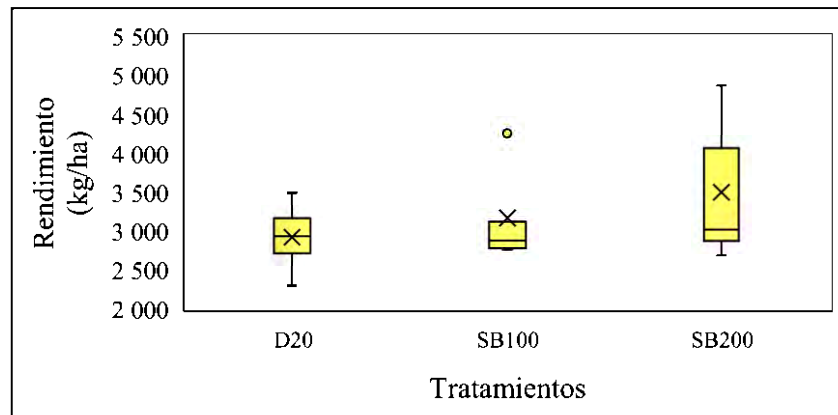


Figura 16. Gráfico de cajas del rendimiento de D20, SB100 y SB200.

Como no se encontraron diferencias significativas en las pruebas de calidad molinera y rendimiento productivo se seleccionó el mejor tratamiento haciendo análisis de los parámetros de homogeneidad de aplicación y costos asociados.

Con respecto a la homogeneidad y cobertura de aplicación, previamente se había determinado al tratamiento SB200 como el mejor evaluado entre los tratamientos de spray boom, por lo tanto, la comparación de este parámetro se hace únicamente entre los tratamientos D20 y SB200. La prueba de Shapiro Willks indica no normalidad ($W = 0,82$, $p = 0,007$) y la posterior prueba de Wilcoxon muestra que si existen diferencias significativas en la cobertura entre ambos tratamientos ($W = 36,00$, $p = 0,0002$) (Tabla 25). Como se puede apreciar en la Tabla 24, el tratamiento SB200 posee una mayor cobertura y un CV más bajo, indicando así mayor homogeneidad con respecto a D20. Los bajos volúmenes de aplicación del dron pueden ser la causa de la reducida área de cobertura (Wang et al., 2019). Cabe remarcar que la dosis de InGrain (60 g/ha) es la misma en ambos métodos.

Tabla 25. Prueba de normalidad aplicada a los datos de cobertura de los tratamientos D20 y SB200.

Parámetro	Shapiro-Wilks modificada		Wilcoxon	
	<i>W</i>	<i>p-valor</i>	<i>W</i>	<i>p-valor</i>
Cobertura	0,82	0,007	36	0,0002

*Resultados para un nivel de significancia del 95%

Según lo discutido en la sección 2.2.4, dependiendo del mecanismo de acción del producto a aplicar, así serán las exigencias en cuanto a cobertura de aplicación. A los agroquímicos pre emergentes no se les demanda un porcentaje específico de cobertura, sino que solamente llegue al suelo la dosis recomendada (REM, 2018). Para los productos sistémicos se requieren porcentajes de cobertura a partir de 20 gotas/cm², en el caso de insecticidas, fungicidas y herbicidas. Por otra parte, para los productos de contacto es necesario que una mayor cantidad del líquido llegue al cultivo; más específicamente, para herbicidas es necesaria una cobertura mínima de 30 gotas/cm², y para fungicidas e insecticidas a partir de 50 gotas/cm² (REM, 2018).

Dicho esto, según los resultados del conteo de gotas (Tabla 24), en el caso de aplicaciones de pre emergentes, cualquiera de los dos métodos cumple con los requisitos de cobertura de aplicación. Ahora bien, el tratamiento SB200 cumple también los requisitos para aplicaciones de productos sistémicos (como es el caso del InGrain) y de contacto de cualquier tipo. Por el contrario, el tratamiento D20 no cumple con los requerimientos de porcentaje de cobertura para aplicaciones de ningún tipo de agroquímico.

Cabe recalcar que es posible descartar que el causante del bajo rendimiento productivo obtenido sea una mala aplicación del InGrain, puesto que para el tratamiento SB200, la cobertura mínima encontrada fue de 301,62 gotas/cm² (Tabla C. 8). Esto quiere decir que, para todas las repeticiones de este tratamiento, se cumplió con los requisitos de cobertura de aplicación para un producto sistémico y, aun así, no se encontraron diferencias significativas en el promedio de rendimiento contra el control o alguno de los otros tratamientos.

Es importante considerar que, aunque se vieron estas diferencias en la cantidad de gotas y cobertura por método, se requiere más estudios para hacer un análisis del efecto de la homogeneidad sobre otros parámetros. En el caso del spray boom, se aplican muchas gotas por el alto volumen de aplicación, pero por esta misma razón cada gota está menos concentrada del regulador de crecimiento. Por el contrario, el dron realiza aplicaciones de muy bajo volumen, lo que hace que las gotas tengan una mucho más alta concentración. Todo esto se da porque la dosis de aplicación se mide en g/Ha, y al cambiar el volumen, cambia la concentración de InGrain.

Como se mencionó previamente, en este estudio se estandarizaron variables como la altura, velocidad, presión y tipo de boquillas para optimizar las aplicaciones. Se podrían obtener resultados diferentes a los vistos en la homogeneidad al cambiar, por ejemplo, la altura de aplicación. Tanto en dron como en spray boom, se puede afectar la distribución de las gotas, puesto que mayor altura, más deriva (Cui et al, 2019). Una baja altura puede causar una distribución pobre por una insuficiente sobreposición de los patrones de aplicación de las boquillas (TeeJet Technologies, 2023).

En base a lo descrito en la sección 3.7, se obtienen los costos de ambos tratamientos y un resumen es mostrado en la Tabla 24. Tomando en cuenta estos valores, se encontró un aumento del 742% en el costo de SB100 con respecto al costo de D20, dicha diferencia equivale a $\text{C}\$8\,250/\text{ha}$. Basados en este parámetro, el tratamiento D20 posee una mejor evaluación que SB100 y SB200. Es importante recalcar que el dron también posee algunas otras ventajas sobre el uso de un spray boom tales como la facilidad de almacenamiento y el hecho de que, al volar, no se producen pisadas que aplastan el arroz de la forma en la que lo hace un tractor.

La ganancia en rendimiento productivo al no pisar con llantas de tractor es de alrededor de un 7%. Para realizar este cálculo se consideró un área de 100 m x 100 m, y tomando en cuenta que el ancho de trabajo para aplicaciones líquidas en este caso es de 12 m y las llantas traseras, que son las que presentan el mayor efecto de aplastamiento, poseen un ancho total de 0,429 m; el tractor debería pasar 8 veces. Entonces $0,429\text{ m} \times 2\text{ llantas} \times 100\text{ m} \times 8\text{ veces}$ da como resultado $686,4\text{ m}^2$, lo cual corresponde aproximadamente a un 7% del área total considerada. Estas ventajas afectan directamente al rendimiento de arroz cosechado y a las ganancias percibidas por el productor.

Considerando el valor ambiental del recurso hídrico, es de suma importancia analizar el consumo de agua de los métodos de aplicación en estudio. Entre el D20 y SB100, la diferencia absoluta de consumo de agua es de 80 L/ha, lo cual es una cantidad significativa de ahorro al usar el método D20. Esto adquiere aún más peso en una zona expuesta a sequías, cómo lo es la Región Chorotega, donde se ha dado una disminución de las precipitaciones que ha provocado pérdidas en la producción de granos básicos, además de dificultar el acceso al recurso hídrico de la población (Calvo et al., 2018).

La Tabla 26 muestra un resumen comparativo de los métodos de aplicación evaluados. Para aplicaciones líquidas, las mayores ventajas respecto a los parámetros estudiados y los factores descritos previamente las presenta el tratamiento D20, puesto que presenta el menor costo económico, propicia un menor consumo de agua, podría evitar la reducción del rendimiento productivo en aproximadamente un 7% (en caso de realizar fertilización con otros métodos que no aplasten el cultivo de arroz) y es más fácil de transportar y almacenar. Sin embargo, al no cumplir con las condiciones mínimas de cobertura para productos agrícolas sistémicos no se puede considerar a D20 como el tratamiento y método de aplicación óptimo incluso para el caso específico de InGrain.

En ese caso, el tratamiento con mejor evaluación de los tres comparados es el SB100, ya que posee menores costos y menor consumo de agua con respecto a los otros dos tratamientos de spray boom y, al igual que SB200, cumple con los requerimientos de cobertura para cualquier tipo de agroquímico con un promedio de $171,64\text{ gotas}/\text{cm}^2$. Además, como información adicional y según se indicó en la sección 4.1.5., SB100 es el tratamiento de spray boom que produce menores emisiones de GEI.

Tabla 26. Resumen comparativo de los métodos evaluados.

Tratamiento	Cobertura de aplicación		Ahorro económico	Menor consumo de agua	Eliminación de aplastamiento	Facilidad de almacenaje
	Agroquímico sistémico	Agroquímico de contacto				
D20	x	x	✓	✓✓	✓	✓
SB100	✓	✓	x	✓	x	x
SB200	✓	✓	x	x	x	x

5. CONCLUSIONES

En el método de aplicación mediante el uso del sistema de aspersión spray boom, se ha determinado que los tratamientos más eficientes son el SB100 y SB200. La escogencia de estos tratamientos se da con la evaluación de los parámetros rendimiento productivo, calidad molinera, homogeneidad y análisis de costos. Como no existe una diferencia significativa de rendimiento productivo y calidad molinera entre los tratamientos y tampoco con el control, se considera SB100 como método más eficiente, principalmente, por ser el tratamiento con menores costos asociados (7,50 % menos con respecto a SB200). También cumple con los requerimientos de cobertura de aplicación para productos sistémicos y de contacto con una cobertura promedio de 171,64 gotas/cm². Como ventaja adicional también presenta una reducción en consumo de agua en 100 L/ha respecto al SB200 y 50 L/ha respecto al SB150, y una reducción en emisión de GEI de 0,83 kgCO₂/ha con respecto a SB150 y 1,66 kgCO₂/ha en comparación con SB200.

Se destaca al SB200 en homogeneidad y cobertura de aplicación líquida, ya que presenta un área cubierta de 13,66 % mayor al SB150 y 29,98 % más respecto al SB100. También, el CV del SB200 resultó en 8,29 % menor al SB150 y 10,55 % menor al SB100, confirmando al SB200 como el método con mejor homogeneidad de aplicación entre los evaluados. Además, este método cumple con los requisitos de cobertura para aplicaciones de agroquímicos con un promedio de 460,2 gotas/cm². Sin embargo, no presenta ninguna otra ventaja con respecto a SB100 y SB150 y como ya se discutió, SB100 también cumple los requerimientos de cobertura, por lo tanto, SB200 no se consideró como tratamiento óptimo.

En los tratamientos evaluados de aplicaciones con dron, el tratamiento D20 resultó tener el desempeño más aceptable. Si bien no presentó diferencias significativas en cuanto a rendimiento productivo y calidad molinera entre los tratamientos de dron y contra el control, destacó por ser el que posee mayor homogeneidad y cobertura con un 6,11 %. Por otra parte, este tratamiento aumenta los costos de aplicación en ₡176/ha respecto al D10, empero este incremento de costos es bajo y podría ser hasta despreciable, según el criterio de cada productor. Asimismo, las aplicaciones con el tratamiento D20, aumentan el consumo de agua en 10 L/ha comparado con el D10, y lo reduce en la misma cantidad comparado con el D30.

Al comparar los tres tratamientos sobresalientes (D20, SB100 y SB200), se concluye que el mejor tratamiento para aplicar un regulador de crecimiento en arroz es el SB100. No se encontraron diferencias significativas en el rendimiento productivo y la calidad molinera del arroz entre dichos tratamientos y el control. Sin embargo, si se presenta al SB100 como el tratamiento menos costoso (₡759,26/ha menos que SB200) que, además, aunque la aplicación no es homogénea (CV=41,46%) al nivel recomendado (CV≤10 %), si cumple con las condiciones necesarias de cobertura para productos agrícolas sistémicos como lo es el InGrain. Adicionalmente, SB100 posee ventajas en cuanto a consumo de agua y emisión de GEI, factores comparados directamente con SB200 siendo 50 % menos consumo y 8,34 % menos emisiones, respectivamente.

El tratamiento SB200 presenta mayor homogeneidad y cobertura comparado a SB100 y D20, pero de igual forma el valor de CV=30,92 % está por encima del valor recomendado y aparte de este parámetro no existe otra ventaja en SB200, por lo tanto, no se considera como tratamiento óptimo. En el caso del tratamiento D20 es remarcable la reducción de costos, el bajo consumo hídrico, facilidad de almacenamiento y no incurre en daños al cultivo por pisadas como lo hace el spray boom. Más específicamente, los costos se disminuyen en ₡8 250/ha y ₡9 009/ha en contraste con

el SB100 y SB200, respectivamente; la reducción del consumo de agua es de 80 L/ha respecto al SB100 y 180 L/ha en comparación con el SB200. Sin embargo, la baja homogeneidad ($CV=48,49\%$) y baja cobertura (6,11 % y 15,39 gotas/cm²) demuestran que D20 no cumple con las características de cobertura necesaria para productos sistémicos de al menos 20 gotas/cm², descartándose así, como tratamiento óptimo.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda agregar un coadyuvante en la mezcla que se realice con InGrain o cualquier otro agroquímico en estudios posteriores. Esto porque los coadyuvantes brindan protección a los agroquímicos y facilitan su adhesión a la planta, evitándose así que factores climáticos como el viento, la lluvia, calor o rayos ultravioleta degraden o afecten la eficiencia del químico utilizado (Lozano, 2014).
- Es imperante realizar una medición de la humedad del arroz al momento del pesaje, para poder ajustar los rendimientos productivos según el peso del agua que este posea. Cuando el arroz se cosecha en campo, este posee cierto nivel de humedad, el cual puede diferir de una muestra a otra y añadir más peso a algunas muestras que no corresponden a masa de arroz. Al registrar la humedad, se puede calcular el peso de agua presente y ajustar al valor real de arroz en granza sucio.
- A pesar de las indicaciones bibliográficas respecto al área de las unidades experimentales, es recomendable usar dimensiones más grandes, pues facilitará la maniobrabilidad del dron. Un espacio pequeño a las velocidades que se mueve el dron dificulta la precisión de alcanzar solamente el área marcada para aplicación.
- Basados en los resultados obtenidos de homogeneidad y cobertura en ambos métodos es recomendable optimizar este aspecto lo máximo posible para la realización de aplicaciones líquidas y para futuros estudios. En el caso del spray boom, como se mencionó en la sección 4.1.3. y respaldado por otros autores la cobertura y homogeneidad se ven afectadas principalmente por movimientos verticales del equipo producidos por la irregularidad del terreno y para contrarrestar este efecto se utilizan spray boom con suspensiones o se agregan estas suspensiones al equipo existente (Cui et al., 2019). La aplicación también tendrá menores afectaciones mientras menor sea la altura de las boquillas sobre el cultivo ya que se disminuye el riesgo de deriva (Cui et al., 2019).
- En el caso del dron, como se indicó anteriormente, ningún tratamiento cumple con la cobertura mínima recomendada para agroquímicos sistémicos, sin embargo, la mejora en este aspecto haría del dron un equipo muy eficiente para aplicaciones líquidas.
- Es recomendable hacer uso de drones con mayor tecnología y mayores capacidades de carga de volumen. Si bien el equipo utilizado para realizar está más estudiado, las nuevas versiones, tales como DJI Agras T30 o DJI Agras T40 poseen amplias ventajas frente al DJI Agras MG-1P. Dentro de las mismas se recalca mayor eficiencia de trabajo y mejorados sistemas de aspersion.
- Se recomienda hacer un análisis del efecto de la homogeneidad de aplicación sobre otros parámetros como la calidad molinera y el rendimiento productivo. Esto porque la cantidad de regulador de crecimiento aplicada por gota cambia según el método de aplicación, pero también cambia la cantidad de gotas y, por ende, la cobertura.
- Se puede llevar a cabo estudios que investiguen cómo se ven afectadas las variables analizadas, al variar parámetros de aplicación como la presión, velocidad, tipo de boquilla y altura.
- Se recomienda utilizar un diseño experimental de bloques completos al azar, para reducir la variabilidad del experimento. Según (Navarro y Vargas, 2015), este diseño es el más utilizado en experimentación en campo, ya sea para tratar causas de ruido conocidas y controlables o desconocidas y no controlables. Además, estos autores señalan que un

diseño de bloques al azar es más eficiente para algunas pruebas de calidad y pruebas de rendimiento (kg/ha) comparado con otros diseños como el irrestricto al azar.

REFERENCIAS

- Acueductos y Alcantarillados. (2010). *Estimación de consumo de agua potable en una casa*. <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Estimaci%C3%B3n%20de%20consumo%20de%20agua%20potable%20en%20una%20casa.pdf>
- Alcántara, J., Godoy, A., Alcántara, D., Sánchez, R. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Revista NOVA*, 17(32), 109-129.
- ASABE Standards. (2011). Agricultural Machinery Management Data. ASAE D497.7. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Autoridad reguladora de los servicios públicos. (2023). *Tarifas vigentes electricidad*. <https://aresep.go.cr/electricidad/tarifas/>
- Avila, M. (2017). Evaluación de la calidad molinera y sensorial de arroz como herramienta de apoyo al mejoramiento genético. *Fundación Para la Investigación Agrícola Danac*.
- Banco Central de Costa Rica. (2022). *Tipo cambio de compra y de venta del dólar de los Estados Unidos de América: Referencia del Banco Central de Costa Rica en colones costarricenses*. <http://bit.ly/40uflau>
- Bechar, A. (2021). Innovation in Agricultural Robotics for Precision Agriculture: A Roadmap for Integrating Robots in Precision Agriculture. *Editorial Springer International Publishing*.
- Borger, C., Reithmuller, G., Ashworth, M., Minkey, D., Hashem, A. y Powles, S. (2013). Increased carrier volume improves preemergence control of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) in zero-tillage seeding systems. *Weed Technology*, 27(4), 649- 655.
- Bueno, M., Cunha, J., Naves, M. y Tavares, R. (2014). Spray deposition and weed control using a conventional boom sprayer and an auxiliary boom sprayer with reduced spray volumes. *Planta daninha*, 32(2). <https://doi.org/10.1590/S0100-83582014000200023>
- Calvo, O., Quesada, L., Hidalgo, H. y Gotlieb, Y. (2018). Impacto de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 695-709. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828>
- Camarillo, B. (7 de Julio del 2021). *Apoyar la agricultura en Costa Rica a través de fumigación aérea con drones busca Muraya Drone Terra*. La República. <https://bit.ly/3QSDxFC>
- Carrasco, J., Abarca, P. y Catalán, A. (2018). Metodología de cálculo de costos de uso de maquinaria agrícola para el cultivo de Maíz. *Instituto e investigaciones agropecuarias*, 64.
- Castro, R., Morejón, R., Díaz, S. y Álvarez, G. (2013). Efecto de borde y la validez de los muestreos en el cultivo del arroz. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 70-75.
- Cedeño, K., Mero, G., Vera, A y Reyna, L. (2020). Evaluación de la distribución de gotas en la pulverización de plaguicida en maíz por el método tradicional y por dron. *Agricultura y Silvicultura Universidad Técnica de Manabí*. 65-78.

- Chen, T., Li, G., Rezaul, M., Fu, W., Feng, B., Tao, L. y Fu, G. (2019). Abscisic acid synergizes with sucrose to enhance grain yield and quality of rice by improving the source-sink relationship. *BMC plant biology*, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2126-y>
- Corporación Arrocera Nacional. (2019). *Informe estadístico periodo 2017-2018*. Corporación arrocera nacional Costa Rica. https://www.conarroz.com/userfile/file/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO_PERIODO_2017_2018.pdf
- Corporación Arrocera Nacional. (2022). *Informe anual estadístico periodo 2020-2021*. Corporación arrocera nacional Costa Rica. https://www.conarroz.com/userfile/file/Informe_anual_estad%C3%ADstico2020-2021.pdf
- Corporación Arrocera Nacional. (2023). *Informe anual estadístico periodo 2021-2022*. Corporación arrocera nacional Costa Rica. https://www.conarroz.com/userfile/file/Presentacion_informe_anual2021_2022.pdf
- Creech, C., Henry, R., Werle, R., Sandell, L., Hewitt, A. y Kruger, G. (2015). Performance of postemergence herbicides applied at different carrier volume rates. *Weed Technology*, 29(3), 611- 624. <https://www.jstor.org/stable/43702041>
- CropLifeLA. (Enero, 2021). *Recomendaciones para crear un procedimiento operativo estándar (POE) para la aplicación de plaguicidas con drones*. <https://www.croplifela.org/es/actualidad/articulos/uso-de-drones-en-la-agricultura>
- Cruz, M. (2020). Defensa del modelo agrícola-industrial. *Revista Arrocera*, 30, 2-22
- Cui, L., Xue, X., Le, F., Mao, H y Ding, S. (2019). Design and experiment of electro hydraulic active suspension for controlling the rolling motion of spray boom. *Int J Agric & Biol Eng*. 12(4), 72–81. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.4648>
- Da Costa, D., Boller, W. (2008). Aerial and ground applications of fungicide for the control of leaf diseases in maize crop (*Zea mayz* L.). *CIGR - International Conference of Agricultural Engineering - XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*.
- Dinno, A. (2015). Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test. *The Stata Journal*, 1, 292–300.
- Dirección general de aviación civil. (2017). *13 de Agosto entra en vigencia regulación para la operación de drones*. <https://www.dgac.go.cr/wp-content/uploads/2017/08/COMUNICADO-DE-PRENSA-DRONES.-ULTIMO..pdf>
- Dirección general de aviación civil. (septiembre, 2021). *Operaciones con sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) [Directiva operacional DO-002-OPS-RPAS]*. <https://www.dgac.go.cr/wpcontent/uploads/2021/09/DO-002-OPS-RPAS-06-de-sep-2021-PRA-1.pdf>
- DJI. (2016). *Agras MG-1: User manual v1,2*. <https://www.dji.com/mg-1/info#specs>

- Dodd, V. y Grace, P. (1989). *Agricultural Engineering Volume 3: Agricultural Mechanisation: Proceedings of the Eleventh International Congress on Agricultural Engineering, Dublin, 4-8 September 1989*. CRC Press.
- Dou, H., Wang, S., Zhai, C., Chen, L., Wang, X. y Zhao, X. (2021). A LiDAR Sensor-Based Spray Boom Height Detection Method and the Corresponding Experimental Validation. *Revista Sensors*, 21, 2107. <https://doi.org/10.3390/s21062107>
- Dronespray. (2021). *Drone Agras DJI MG-1P*. <https://tienda.dronespray.cl/producto/mg-1p/>
- EBAY. (2023). *DJI AGRAS MG-1P (drone pulverizador agrícola)*. <https://www.ebay.com/itm/166306993197>
- Edwards, W. (2015). Estimating Farm Machinery Costs Ag decision maker. *Iowa State University extension and outreach*, File A3-29
- Environmental Systems Research Institute. (2021). *¿Qué es la clasificación de imagen?* <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/what-is-image-classification-.htm>
- Food and agriculture organization. (23 de septiembre, 2009). *2050: un tercio más de bocas que alimentar*. <https://www.fao.org/news/story/es/item/35675/icode/>
- Food and agriculture organization. (24 de enero, 2018). *FAO is using drones to help end hunger*. <https://www.fao.org/e-agriculture/news/fao-using-drones-help-end-hunger>
- Food and agriculture organization. (2019). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación, Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. <https://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf>
- Food and agriculture organization. (22 de marzo, 2019). *Escasez de agua: Uno de los mayores retos de nuestro tiempo*. <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1185408/>
- Food and agriculture organization. (10 de noviembre, 2020a). *Three ways drones help us better manage our land and protect our planet*. <https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1323066/>
- Food and agriculture organization. (13 de noviembre, 2020b). *Food outlook: Biannual report on global food markets*. FAO
- Fernández, R., Trapero, A y Dominguez, J. (2010). *Experimentación en agricultura*. Sevilla: Consejería de Agricultura y Pesca, Servicio de Publicaciones y Divulgación
- Foqué, D., Pieters, J., Nuyttens, D. (2013). Effect of spray angle and spray volume on deposition of a medium droplet spray with air support in ivy pot plants, *Society of chemical industry*, 70, 427-439. <https://doi.org/10.1002/ps.3584>
- Gabahobby. (2022). *DJI AGRAS MG-1P*. https://www.gabahobby.com/index.php?route=product/product&product_id=356305

- Garcés, G., Medina, J. (2018). *La fisiología del cultivo del arroz en el programa AMTEC*. FEDEARROZ-Fondo Nacional del arroz.
- García Rodríguez, E. (2020). *Tránsito y efecto de la compactación de los tractores agrícolas en el cultivo de maíz*. [Tesis de maestría en ciencias agropecuarias y recursos naturales]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gómez, A., García, P. (2006). Fitohormonas: metabolismo y modo de acción. *Editorial Universitat Jaume I*.
- Gómez, N., Rodríguez, J y Fernández, E. (2021). Gases de efecto invernadero emitidos por los vehículos agrícolas en Costa Rica. *UNED Research Journal*, 13(1).
- Hernández, J., Salazar, S. y Rodríguez, E. (2021). Efecto de los elementos menores en la calidad molinera del arroz (*Oryza sativa* L.) variedad F-2000. *Mutis*, 11(1), 8-21. <https://doi.org/10.21789/22561498.1711>
- Huang, Y., Hoffmann, W., Fritz, B. y Lan, Y. (2008). Development of an unmanned aerial vehicle-based spray system for highly accurate site-specific application. *Proceedings of the ASABE Annual International Meeting*, Número de página: 083909
- Indigodrones. (2023a). *Comprar Drones DJI-AGRAS en Costa Rica, accesorios y repuestos*. <https://indigodrones.com/productos>
- Indigodrones. (2023b). *Curso Licencia para Piloto de Drone en Costa Rica*. <https://indigodrones.com/aeroacademia/ku44a8ug3nqp1s17ruhzi28nng2i3z>
- Indigodrones. (2023c). *Indigo Drones vende y distribuye software de agricultura de precisión para el manejo de Drones Agrícolas y Control de las Operaciones de su Finca*. <https://indigodrones.com/software-para-drones/agrilyze>
- International Rice Research Institute. (2015). Steps to successful rice production. *IRRI*, ISBN 978-971-22-0313-8.
- Instituto Nacional de Aprendizaje. (s.f.). *Vegetación de Costa Rica*. Historia Natural de Costa Rica. <https://www.ina-pidte.ac.cr/mod/resource/view.php?id=17003>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (09 de enero, 2017). *Cuadro 1.2.6 Costa Rica, Área sembrada de arroz y producción según región y cantón, por período agrícola, 2011/2012 - 2014/2015*. <https://inec.cr/busqueda?searchtext=arroz&page=2>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (20 de septiembre, 2022). *Cuatro cultivos permanentes concentran 95 % de la producción*. <https://inec.cr/noticias/cuatro-cultivos-permanentes-concentran-95-la-produccion>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (17 de octubre, 2023). *Agropecuario 6. Costa Rica. Área sembrada de arroz y producción según región y cantón, por período agrícola, 2020/2021 - 2021/2022*. <https://inec.cr/busqueda?searchtext=arroz>

- Jackson, J., Ladino, K. y Abdulai, G. (2021). Decision Aid for Estimating the Cost of Using a Drone in Production Agriculture. *University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment Cooperative Extension Service*, AEN-160.
- Jiménez Salas, M. (2015). *Manual de buenas prácticas agrícolas del cultivo del arroz*. Servicio fitosanitario del estado.
- Johnson, J. (2020). *Farm Machinery costs calculation*. Mississippi State University Extension Service.
https://extension.msstate.edu/sites/default/files/publications/publications/P3543_web.pdf
- Juárez, G. (2018). *El Fósforo en la Fertilización del Arroz y otras Consideraciones para Optimizar su Rendimiento*. <https://fisiologiavegetal.es/2018/05/el-fosforo-en-la-fertilizacion-del-arroz-y-otras-consideraciones-para-optimizar-su-rendimiento/>
- Kluza, P., Kuna, I. y Parafiniuk, S. (2019). Modeling and Prediction of the Uniformity of Spray Liquid Coverage from Flat Fan Spray Nozzles. *Sustainability*, 11, 6716.
<https://doi.org/110.3390/su11236716>
- Lamare, A., Zwertvaegher, I., Nuyttens, D., Balsari, P., Marucco, P., Grella, M., Caffini, A., Mylonas, N., Fountas, S. y Douzals, J. (2022). Performance of a Prototype Boom Sprayer for Bed-Grown Carrots Based on Canopy Deposition Optimization, Ground Losses and Spray Drift Potential Mitigation in Semi-Field Conditions. *Appl, Sci*, 12, 4462.
<https://doi.org/10.3390/app12094462>
- Li, X., Andaloro, J., Lang, E., Pan, Y. (2019). Best Management Practices for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Application of Insecticide Products on Rice. *ASABE 2019 Annual International Meeting*. <https://doi.org/10.13031/aim.201901493>
- López, E. y Gonzales, B. (2016). *Diseño y análisis de experimentos: fundamentos y aplicaciones en Agronomía*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lozano, S. (2014). *UF0006 - Determinación del estado sanitario de las plantas, suelo e instalaciones y elección de los métodos de control*. ELEARNING S.L.
- Martínez, J., Agüera, P., Agüera, J., Pérez, M. (2019). Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards. *Springer*, 21, 226-243.
<https://doi.org/10.1007/s11119-019-09665-7>
- Matilde, M., Ponce, M., Vázquez, J., Guilino, F., Merani, V., Palancar, T. y Balbuena, R. (2018). Aplicación de agroquímicos en cultivos de soja (*Glycine max* L Merr). Evaluación del efecto de diferentes técnicas sobre la eficiencia de distribución. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 117 (1): 77-88.
- Ministerio de ambiente y energía y Dirección de aguas. (19 de enero, 2023). *Incremento a los valores de Canon por uso para el periodo 2023*. <https://da.go.cr/wp-content/uploads/2017/07/DA-0147-2023-Manuel-Garcia-Interior-Incremento-Imp.-por-Usos-CAA.pdf>

- Ministerio de agricultura y ganadería. (2008). *Reglamento Técnico RTCR 406:2007. Arroz en Granza, Especificaciones y Métodos de Análisis para la Comercialización e Industrialización*. <http://www.mag.go.cr/legislacion/2008/de-34487.pdf>
- Molina, E y Rodriguez, J. (2012). Fertilización con N, P, K y S, y curvas de absorción de nutrimentos en arroz var. CFX 18 en Guanacaste. *Agronomía Costarricense*. 36(1): 39-51
- Moore, D., Priest, C., Brayden, B., Hanzas, J., Arpino, M., Richardson, L., Stryker, J., Banman, C., Rodney, S., Chapple, A., Hall, T., Isemer, R., Ortego, L., Rodea, I., Tang, J., Wang, M., Xu, T, y Yang, Y. (2021). A field spray drift study to determine the downwind effects of isoxaflutole herbicide to nontarget plants. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(3), 757-769. <https://doi.org/10.1002/ieam.4508>
- Morales, A., Cano, E., Villena, J y López, J. (2022). A Comparison between Conventional Sprayers and New UAV Sprayers: A Study Case of Vineyards and Olives in Extremadura (Spain). *Agronomy*, 12, 1307. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061307>
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de Costa Rica. (2023). *Lista de salarios mínimos año 2023*. <https://bit.ly/3sr8hUZ>
- Navarro, J y Vargas, J. (2015). Eficiencia relativa del diseño de bloques completos al azar para ensayos de arroz en Bagaces, Guanacaste, Costa Rica. *Editorial InterSedes*. 16(34).
- Núñez, P. (2016). *Comparativa de software para la realización de ortofotos a partir de imágenes obtenidas por drones*, [Trabajo final de maestría, Universidad de Oviedo]. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/37635/TFM_PaulaNunezCalleja.pdf?sequence=9
- Organización de las Naciones Unidas. (23 de noviembre, 2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Orozco, A., Ayala, C., Aramendiz, H. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Revista U,D,C,A actualidad y divulgación científica*, 15 (1), 63-76.
- Perez, C y Cuevas, A. (2018). *Manejo integrado de insectos en el cultivo de arroz*. FEDEARROZ-Fondo Nacional de arroz.
- Pérez, H., Rodríguez, I y García, R. (2018). Principales enfermedades que afectan al cultivo del arroz en Ecuador y alternativas para su control. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(1), 16-27.
- Pezo, D y García, F. (2018). *Uso eficiente de fertilizantes en pasturas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)
- Pincioli, M., Ponzio, N y Salsamendi, M. (27 de mayo 2015). El arroz: alimento de millones, *Editorial de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires*.

- Poder Judicial. (2008). *Reglamento Técnico RTCR 406:2007. Arroz en Granaa. Especificaciones y Métodos de Análisis para la Comercialización e Industrialización* (N° 34487). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=63051&nValor3=74480&strTipM=TC
- Porras, E. (2013). *Respuesta del arroz (Oryza sativa. L) cultivar C-7 stec a tres densidades de siembra, cuatro niveles de nitrógeno y dos niveles de potasio, en siembra de verano en finca La Vega, San Carlos*. [Trabajo final de graduación de licenciatura], Instituto tecnológico de Costa Rica.
- Qin, P., Zhang, G., Hu, B., Wu, J., Chen, W., Ren, Z., Liu, Y., Xie, J., Yuan, H., Tu, B., Ma, B., Wang, Y., Ye, L., Li, L., Xiang, C y Li, S. (2021). Leaf-derived ABA regulates rice seed development via a transporter-mediated and temperature-sensitive mechanism. *SciencesAdvances*, 7(3), 1-12. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc8873>
- Ramírez, H., Mancera, L., Zermeño, A., Jasso, D y Villarreal, J. (2019). Efecto del ácido abscísico sobre fenotipo y calidad del fruto en vid Shiraz. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 6(16), 153-158.
- Recio, P. (2018). *Operadores de drones con fines comerciales deben contar con permiso desde este martes*. *La Nación*. <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/operadores-de-drones-con-fines-comerciales-deben/BF2MNI2GCZGR5MSHNBB4KPAB74/story/>
- Refinadora Costarricense de petróleo. (2023). *Precios históricos: Precio de las gasolinas y el diésel 2011 - 2023*. <https://www.recope.go.cr/productos/precios-nacionales/historicos/>
- REM. (2018). *Manejo de malezas problema y Calidad de aplicación de herbicidas: Bases para lograr un tratamiento eficiente*. Editora AAPRESID
- Reyes, S y Cano, D. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53–64.
- Reyes, W., Zamora, B., Cobos, F y Espinoza, F. (2020). Calidad molinera de 40 líneas avanzadas f6 de arroz (Oryza sp.) cultivadas en dos zonas arroceras del Ecuador, *Journal of science and research*, 5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4429290>
- Rojas, S. (2012). *Evaluación de la calidad del arroz en granza (Oryza sativa) almacenado en silo de compañía arroceras industrial planta industrial Río Claro* [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Escuela de Ingeniería en biosistemas. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2015/08/6EVALUACIONDELACALIDADDELARROZ.pdf>
- Salazar Navarro, J. (2018). *Aplicación de productos biocidas y fitosanitarios*. SEAG0110, *IC editorial homogene*.
- Sidek, B. (2019). *Wheel sprayer* [Diploma en ingeniería Mecánica, *Politeknik Sultan Salahuddin Abdul Aziz Shah*]. <http://repository.psa.edu.my/bitstream/123456789/3556/1/WHEEL%20SPRAYER.pdf>

- Solera, E. (2019). Evaluación de la eficacia del regulador fisiológico InGrain 20 SG (S-acido abscísico 20%) en el cultivo de arroz (oryza sativa). *Servicio fitosanitario del estado*.
- Sperry, B., Calhoun, J., Ferguson, J., Kruger, G., Bond, J., Johnson, A y Reynolds, D. (2021). Effect of carrier volume and spray quality on glyphosate-resistan soybean response to sublethal dicamba exposure. *Pest Management Science*, 77(6), 2719-2725.
- Subr, A., Parafiniuk, S y Milanowsky, M. (2017). testing the uniformity of spray distribution under differet applcation parameters, *IX International Scientific Symposium "Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture*, 359-364, <https://doi.org/10.24326/fmpmsa.2017.64>
- Tapia, F., Ernesto, C., Cevallos, F y Lissette, K. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, ShapiroWilk y Kolmogórov-Smirnov. *Societas. Revista de Ciencias Sociales y Humanísticas*, 23(2), 83-97.
- Teejet Technologies. (2023). *LI-TJ416 A user's guide to spray technology*. https://www.teejet.com/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/product-market-bulletin/li-tj416_user-guide-to-spray-technology.pdf
- Truper. (2023). *Catálogo 2023: motobombas con motor a gasolina y diesel*. <https://www.truper.com/CatVigente/Motobombas-Con-Motor-A-Gasolina-Y-Diesel-TRUPER-242.html>
- Valerio y Molina. (2012). Evaluación de una fuente de enmienda líquida en el rendimiento del arroz en un ultisol de la zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 89-96
- Vargas, J. (2013). *Determinación de un tamaño adecuado de unidad experimental, utilizando el método de curvatura máxima, para ensayos de arroz (Oryza sativa), en Bagaces, Guanacaste*, [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Kérwá. <https://hdl.handle.net/10669/29285>
- Vignola, R., Poveda, K., Watler, W., Vargas, A., Berrocal, A y Morales, M. (2018). Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en Costa Rica: Cultivo de arroz. *CATIE*
- Yallappa, D., Veeragounda, M., Devanand, M., Vihayakumar, P., Bheemanna, M. (2017, octubre). Development and evaluation of drone mounted sprayer for pesticide applications to crop. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, <https://doi.org/10.1109/GHTC.2017.8239330>
- Wang, J., Lan, Y., Zhang, J., Zhang, Y., Wen, S., Yao, W y Deng, J. (2018). Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions. *International Journal of agricultural and biological engineering*, 11(6), 5-12.
- Wang, J., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F y Han, Y. (2019). Comparison of Spray Deposition, Control Efficacy on Wheat Aphids and Working Efficiency in the Wheat Field

- of the Unmanned Aerial Vehicle with Boom Sprayer and Two Conventional Knapsack Sprayers. *Applied science*, 9, 218, <https://doi.org/10.3390/app9020218>
- Woldt, W., Martin, D., Latheef, M., Kruger, G., Wright, R., McMechan, J., Proctor, C., Jackson-Ziems, T. (2018). Field evaluation of commercially available small unmanned aircraft crop spray systems, *ASABE 2018 Annual International Meeting, Detroit, Michigan, Estados Unidos*, <https://doi.org/10.13031/aim.201801143>
- Zang, S., Xue, X., Qin, W., Sun, Z., Ding, S., Zhou, L. (2015). Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(3),87- 93.
- Zhang, X., Song, X., Qin, Z., Zhang B., Wei, J., Li, Y y Wu, J. (2020). Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy. *Sugar Tech*, 22(4), 583-588, <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00792-z>
- Zwertvaegher, I., Lamare, A., Douzals, J., Balsari, P., Marucco, P., Grella, M., Caffini, A., Mylonas, N., Dekeyser, D., Foqué, D y Nuyttens, D. (2022), Boom sprayer optimizations for bed-grown carrots at different growth stages based on spray distribution and droplet characteristics. *Pest Manag Sci*, 78, 1729–1739, <https://doi.org/10.1002/ps.6792>

APÉNDICES

APÉNDICE A:

Datos zonales

Tabla A.1. Rendimiento productivo de arroz en Costa Rica.

Temporada	Peso cosechado (t)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (kg/ha)
2011-2012	261 644	77 240	3 387,42
2012-2013	201 531	59 298	3 398,61
2013-2014	239 699	66 135	3 624,39
2014-2015	216 053	58 197	3 712,44
2015-2016	187 577	49 573	3 783,85
2016-2017	200 347	46 426	4 315,41
2017-2018	157 930	37 560	4 204,74
2018-2019	155 051	36 979	4 192,95
2019-2020	149 339	33 048	4 518,85
2020-2021	152 721	33 668	4 536,09
2021-2022	153 173	35 301	4 339,06
Promedio	188 642,27	48 493,18	4 001,25

Fuente: Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ, 2019; CONARROZ, 2020; CONARROZ, 2023; INEC, 2017)

Tabla A.2. Rendimiento productivo de arroz en Región Chorotega

Temporada	Peso cosechado (t)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (kg/ha)
2011-2012	98 413	29 052	3 387,48
2012-2013	71 502	21 039	3 398,55
2013-2014	90 949	24 968	3 642,62
2014-2015	88 787	23 932	3 709,97
2015-2016	86 140	22 788	3 780,06
2016-2017	94 885	25 025	3 791,61
2017-2018	87 028	19 934	4 365,81
2018-2019	92 995	19 357	4 804,21
2019-2020	87 546	16 802	5 210,45
2020-2021	94 570	18 262	5 178,51
2021-2022	96 839	19 180	5 048,96
Promedio	89 968,55	21 849,00	4 210,75

Fuente: Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ, 2019; CONARROZ, 2020; CONARROZ, 2023; INEC, 2017)

Tabla A.3. Datos meteorológicos de días cercanos a las aplicaciones realizadas el 20/21 de octubre, 2022.

Fecha	Velocidad del viento (km/h)	Velocidad máxima del viento (km/h)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Lluvia acumulada (mm)	Humedad relativa (%)
6/10/2022	2,1	17,1	30,8	24	0	74
7/10/2022	3,6	22,9	30,7	23,4	0	71
8/10/2022	1,3	15,3	29,4	22,2	0	62
9/10/2022	4,6	4,6	24,4	22,7	0	94
15/10/2022	3,2	11,4	30	22,8	0,8	96
21/10/2022	1,6	6,2	31	22,3	0,4	98
26/10/2022	1,7	6	32	21,8	0	81
30/10/2022	1,4	5,2	32,2	21,8	0	61

Datos medidos por Estación Automática de Santa Rita de Nandayure Guanacaste, Instituto Meteorológico Nacional. Latitud 10°01'08" N, longitud 85°15'43" O y altitud 46 msnm.

APÉNDICE B:
Metodología

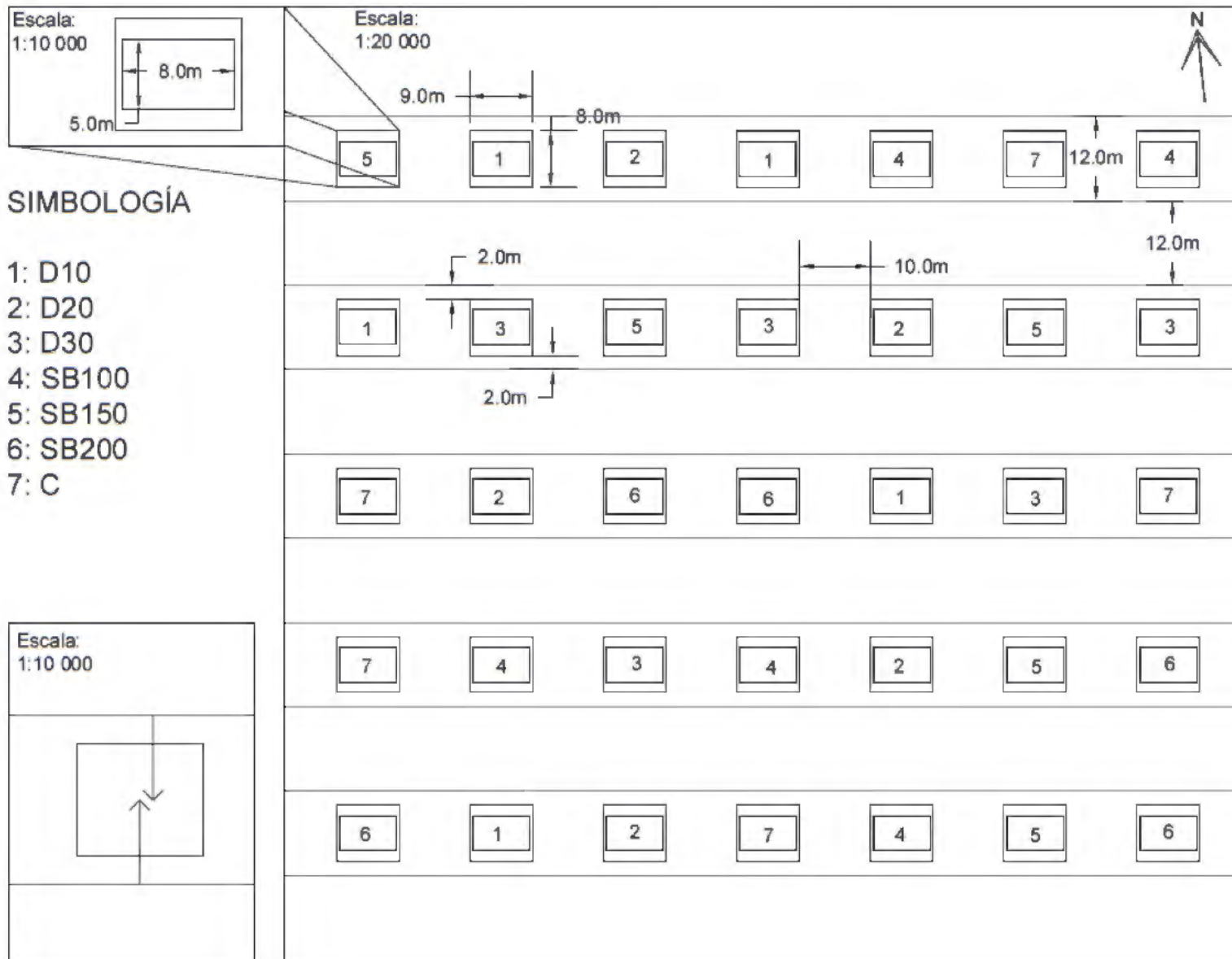


Figura B. 1. Distribución de unidades experimentales.

APÉNDICE C:
Recolección de datos y resultados

Tabla C. 1. Rendimiento productivo medido de cada unidad experimental.

Tratamiento	Parcela	Rprod (kg/ha)
D10	1	3 025
D10	2	3 845
D10	3	2 900
D10	4	2 835
D10	5	3 420
D20	1	2 935
D20	2	3 495
D20	3	2 715
D20	4	2 295
D20	5	3 165
D30	1	2 730
D30	2	3 245
D30	3	2 265
D30	4	2 070
D30	5	2 990
SB100	1	3 115
SB100	2	2 785
SB100	3	4 265
SB100	4	2 770
SB100	5	2 880
SB150	1	3 245
SB150	2	2 145
SB150	3	2 180
SB150	4	3 335
SB150	5	2 700
SB200	1	4 865
SB200	2	2 685
SB200	3	3 025
SB200	4	4 065
SB200	5	2 880
C	1	3 900
C	2	2 945
C	3	3 485
C	4	2 695
C	5	2 935

RProd= Rendimiento productivo.

Tabla C. 2. Recolección de datos en laboratorio y resultados para impurezas y humedad.

Tratamiento	Peso inicial (g)	Peso limpio (g)	Porcentaje de impurezas (%)	Humedad 1 (%)	Humedad 2 (%)	Porcentaje de humedad promedio (%)
D10	1 500	1 483,8	1,1	12,1	12	12,05
D10	1 500	1 475,5	1,6	12,4	12,4	12,4
D10	1 500	1 443,2	3,8	12,8	12,8	12,8
D10	1 500	1 464,1	2,4	12,9	12,9	12,9
D10	1 500	1 472,2	1,9	12	12	12
D20	1 500	1 463,7	2,4	12,6	12,6	12,6
D20	1 500	1 465,0	2,3	12,5	12,4	12,45
D20	1 500	1 462,4	2,5	12,2	12,1	12,15
D20	1 500	1 478,8	1,4	11,8	11,7	11,75
D20	1 500	1 469,7	2	11,9	11,9	11,9
D30	1 500	1 468,9	2,1	12,8	12,6	12,7
D30	1 500	1 456,5	2,9	12,6	12,6	12,6
D30	1 500	1 454,5	3	12,4	12,5	12,4
D30	1 500	1 473,0	1,8	11,7	11,5	11,6
D30	1 500	1 480,2	1,3	12,2	12,4	12,3
SB100	1 500	1 473,1	1,8	12,5	12,6	12,5
SB100	1 500	1 481,5	1,2	12,7	12,6	12,6
SB100	1 500	1 464,9	2,3	12,7	12,8	12,7
SB100	1 500	1 462,2	2,5	12	12,1	12
SB100	1 500	1 459,2	2,7	12,9	13	12,9
SB150	1 500	1 471,2	1,9	13	13	13
SB150	1 500	1 471,5	1,9	12	12	12
SB150	1 500	1 432,1	4,5	12,9	12,9	12,9
SB150	1 500	1 482,5	1,2	12,5	12,4	12,4
SB150	1 500	1 463,0	2,5	12	11,7	11,8
SB200	1 500	1 470,6	2	12	11,9	11,9
SB200	1 500	1 452,4	3,2	12,4	12,3	12,3
SB200	1 500	1 456,1	2,9	12,8	12,8	12,8
SB200	1 500	1 482,6	1,2	12,3	12	12,1
SB200	1 500	1 468,3	2,1	12,4	12,5	12,4
C	1 500	1 468,0	2,1	12,8	12,7	12,7
C	1 500	1 485,5	1	12,3	12,4	12,3
C	1 500	1 474,1	1,7	12,7	12,7	12,7
C	1 500	1 446,3	3,6	12,6	12,7	12,6
C	1 500	1 462,2	2,5	12,9	12,9	12,9

Tabla C. 3. Datos recolectados en laboratorio para cálculo de factores de mesa.

Tratamiento	Muestra* (g)	GM (g)	GR (g)	GY (g)	GD (g)	GDC (N°)
D10	25	0	0	2,54	1,08	0
D10	25	0	0	3,26	1,34	0
D10	25	0	0	2,75	0,72	0
D10	25	0	0	2,76	0,67	0
D10	25	0	0	4,17	0,99	0
D20	25	0	0	1,53	0,88	0
D20	25	0	0	1,93	0,42	0
D20	25	0	0	3,62	1,37	0
D20	25	0	0	4,08	1,32	0
D20	25	0	0	2,25	1,26	0
D30	25	0	0	1,8	0,57	0
D30	25	0	0	2,78	1,1	0
D30	25	0	0,01	2,13	0,88	0
D30	25	0	0	3,93	1,19	0
D30	25	0	0	3,44	1,09	0
SB100	25	0,01	0	1,5	0,3	0
SB100	25	0	0	2,58	1,22	0
SB100	25	0	0	3,56	0,99	0
SB100	25	0	0	2,86	0,79	0
SB100	25	0	0	3,8	0,43	0
SB150	25	0	0	2,85	0,36	0
SB150	25	0	0	1,26	0,41	0
SB150	25	0	0	6,6	1,44	0
SB150	25	0	0	3,48	1,01	0
SB150	25	0	0	3,91	1,7	0
SB200	25	0	0	2,05	0,19	0
SB200	25	0	0	3,03	1,44	0
SB200	25	0	0	3,1	1,19	0
SB200	25	0	0	4,33	1,14	0
SB200	25	0	0,02	1,85	0,74	0
C	25	0	0,02	2,36	0,42	0
C	25	0	0	3,11	1,67	0
C	25	0	0	2,21	0,72	0
C	25	0	0	3,24	1,54	0
C	25	0	0	2,91	0,66	0

*Muestra de arroz pilado sin puntilla. GM= grano manchado, GR= grano rojo, GY= grano yesoso, GD= grano dañado, GDC= grano dañado por calor.

Tabla C. 4. Resultados de factores de mesa.

Tratamiento	GDC (%)	GR (%)	GY (%)	GD (%)
D10	0	0	10,14	4,34
D10	0	0	13,04	5,37
D10	0	0	11,02	2,87
D10	0	0	11,06	2,68
D10	0	0	16,67	3,97
D20	0	0	6,14	3,5
D20	0	0	7,72	1,66
D20	0	0	14,48	5,49
D20	0	0	16,33	5,27
D20	0	0	8,98	5,05
D30	0	0	7,2	2,3
D30	0	0	11,12	4,38
D30	0	0,03	8,52	3,5
D30	0	0	15,73	4,76
D30	0	0	13,74	4,38
SB100	0,05	0	6	1,21
SB100	0	0	10,31	4,89
SB100	0	0	14,24	3,97
SB100	0	0	11,45	3,16
SB100	0	0	15,2	1,74
SB150	0	0	11,39	1,46
SB150	0	0	5,03	1,64
SB150	0	0	26,4	5,77
SB150	0	0	13,92	4,03
SB150	0	0	15,65	6,8
SB200	0	0	8,21	0,74
SB200	0	0	12,12	5,76
SB200	0	0	12,4	4,77
SB200	0	0	17,3	4,56
SB200	0	0,07	7,41	2,97
C	0	0,1	9,42	1,67
C	0	0	12,45	6,67
C	0	0	8,84	2,87
C	0	0	12,94	6,17
C	0	0	11,62	2,65

GR= grano rojo, GY= grano yesoso, GD= grano dañado, GDC= grano dañado por calor.

Tabla C. 5. Datos recolectados en laboratorio para cálculo de rendimientos de calidad molinera.

Tratamiento	Arroz en granza (g)	Arroz integral (g)	Arroz pilado (g)	GE (g)	GQG (g)	Pu (g)
D10	1 000	799,2	696,8	30,54	8,35	1,13
D10	1 000	803,4	697,3	28,54	10,03	1,35
D10	1 000	793,9	687,2	29,51	9,08	1,32
D10	1 000	797,3	669,4	25,36	11,68	2,85
D10	1 000	783,4	688	26,34	11,59	2,15
D20	1 000	810,5	688,5	31,49	7,07	1,44
D20	1 000	807,3	703,2	32,2	7,16	0,66
D20	1 000	791,8	673,8	26,08	11,18	2,64
D20	1 000	789,6	684,9	26,36	11,49	2,23
D20	1 000	777,7	678,6	25,3	11,59	3,01
D30	1 000	798,3	690,7	32,9	6,27	0,82
D30	1 000	783,2	691,4	30,72	7,87	1,41
D30	1 000	806,5	684,3	28,83	9,71	1,45
D30	1 000	785,6	683,2	25,34	11,83	2,75
D30	1 000	781,1	685,9	25,12	11,99	2,65
SB100	1 000	799,5	697,1	31,51	7,33	1,08
SB100	1 000	785,3	690,4	28,25	9,97	1,62
SB100	1 000	811,5	692,3	28,46	9,93	1,54
SB100	1 000	784	666,7	24,79	12,48	2,8
SB100	1 000	792,1	673,1	26,02	11,9	2,04
SB150	1 000	802,9	684,4	29,43	9,46	1,12
SB150	1 000	787,5	679	28,91	9,89	1,23
SB150	1 000	766,3	653,1	21,76	13,93	3,9
SB150	1 000	794,5	685,3	27,89	10,28	1,86
SB150	1 000	792,3	683,7	24,56	12,87	2,51
SB200	1 000	819,6	704,6	31,95	7,23	0,88
SB200	1 000	782,6	681,5	28,59	9,12	2,26
SB200	1 000	791,2	679,3	25,63	11,73	2,49
SB200	1 000	790,3	680	28,58	9,53	1,85
SB200	1 000	784,4	674,5	23,71	13,85	2,44
C	1 000	807	702,6	31,56	7,76	0,64
C	1 000	801,1	690,9	30,01	8,41	1,56
C	1 000	804,2	699,7	30,52	8,36	1,1
C	1 000	782,6	657,9	23,56	13,5	2,76
C	1 000	809	686,1	25,49	12,05	2,44

GE= grano entero, GQG= grano quebrado grueso, Pu= puntilla.

Tabla C. 6. Resultados de rendimientos de calidad molinera.

Tratamiento	RPi (%)	RS (%)	RPu (%)	RQG (%)	RGE (%)	RQ (%)	RAC (%)
D10	69,7	10,2	2	14,5	53,2	16,5	67,7
D10	69,7	10,6	2,4	17,5	49,7	19,9	67,3
D10	68,7	10,7	2,3	15,6	50,7	17,9	66,4
D10	66,9	12,8	4,8	19,5	42,4	24,3	62,1
D10	68,8	9,5	3,7	19,9	45,3	23,6	65,1
D20	68,9	12,2	2,5	12,2	54,2	14,7	66,4
D20	70,3	10,4	1,2	12,6	56,6	13,8	69,1
D20	67,4	11,8	4,5	18,9	43,9	23,4	62,9
D20	68,5	10,5	3,8	19,7	45,2	23,5	64,7
D20	67,9	9,9	5,1	19,7	43	24,8	62,8
D30	69,1	10,8	1,4	10,8	56,8	12,2	67,7
D30	69,1	9,2	2,4	13,6	53,1	16	66,7
D30	68,4	12,2	2,5	16,6	49,3	19,1	65,9
D30	68,3	10,2	4,7	20,2	43,3	24,9	63,6
D30	68,6	9,5	4,5	20,6	43,1	25,1	64,1
SB100	69,7	10,2	1,9	12,8	54,9	14,7	67,8
SB100	69	9,5	2,8	17,2	48,7	20	66,2
SB100	69,2	11,9	2,7	17,2	49,2	19,9	66,5
SB100	66,7	11,7	4,7	20,8	41,3	25,5	62
SB100	67,3	11,9	3,4	20	43,8	23,4	63,9
SB150	68,4	11,9	1,9	16,2	50,3	18,1	66,5
SB150	67,9	10,9	2,1	16,8	49,1	18,9	65,8
SB150	65,3	11,3	6,4	22,7	35,5	29,1	58,9
SB150	68,5	10,9	3,2	17,6	47,8	20,8	65,3
SB150	68,4	10,9	4,3	22	42	26,3	64,1
SB200	70,5	11,5	1,5	12,7	56,3	14,2	69
SB200	68,2	10,1	3,9	15,6	48,7	19,5	64,3
SB200	67,9	11,2	4,2	19,9	43,5	24,1	63,7
SB200	68	11	3,2	16,2	48,6	19,4	64,8
SB200	67,5	11	4,1	23,4	40	27,5	63,4
C	70,3	10,4	1,1	13,6	55,5	14,7	69,2
C	69,1	11	2,7	14,5	51,8	17,2	66,4
C	70	10,5	1,9	14,6	53,4	16,5	68,1
C	65,8	12,5	4,5	22,2	38,8	26,7	61,3
C	68,6	12,3	4,2	20,7	43,7	24,9	64,4

RPi= rendimiento de pilada, RS= rendimiento de semolina, RPu= rendimiento de puntilla, RQG= rendimiento de quebrado grueso, RGE= rendimiento de grano entero, RQ= rendimiento de grano quebrado, RAC= rendimiento de arroz comercial.

Tabla C. 7. Cobertura según tratamientos aplicados con dron.

Tratamiento	Parcela	Lámina	Cobertura (%)
D10	1	1	1,30
		2	1,34
D10	2	1	1,35
		2	4,43
D10	3	1	1,26
		2	1,81
D10	4	1	3,96
		2	3,29
D20	1	1	3,35
		2	9,13
D20	2	1	5,41
		2	10,31
D20	3	1	8,12
		2	5,88
D20	4	1	1,45
		2	5,24
D30	1	1	1,36
		2	7,08
D30	2	1	1,91
		2	1,51
D30	3	1	5,74
		2	4,11
D30	4	1	7,56
		2	5,98

Tabla C. 8. Cobertura según tratamientos aplicados con spray boom

Tratamiento	Parcela	Lámina	Cobertura (%)	Cobertura (gotas/cm²)
SB100	1	1	21,24	169,03
		2	31,38	304,86
	2	1	31,43	281,78
		2	18,25	150,00
	3	1	27,86	157,89
		2	17,58	71,05
	4	1	5,64	68,42
		2	16,24	170,04
SB150	1	1	39,53	493,72
		2	22,60	252,23
	2	1	29,37	261,74
		2	40,15	605,47
	3	1	20,03	306,07
		2	61,99	348,18
	4	1	32,20	517,41
		2	54,30	469,64
SB200	1	1	41,10	416,80
		2	55,50	585,43
	2	1	62,19	527,94
		2	70,80	390,69
	3	1	33,78	396,76
		2	43,40	594,33
	4	1	33,06	468,02
		2	58,17	301,62