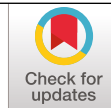


EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ASPERSIÓN Y EL CONTROL DE *Hypothenemus hampei* UTILIZANDO DRONES

Aníbal Arcila Moreno *, Luis Carlos Imbachí Quinchua **, Pablo Benavides Machado ***

Arcila-Moreno, A., Imbachí-Quinchua, L. C., & Benavides-Machado, P. (2025). Evaluación de la calidad de la aspersión y el control de *Hypothenemus hampei* utilizando drones. *Revista Cenicafé*, 76(1), e76105. <https://doi.org/10.38141/10778/76105>



La broca del café es la plaga más limitante de la caficultura colombiana. Los equipos de aspersión utilizados consumen altos volúmenes de mezcla por hectárea y son exigentes en calidad y cantidad de mano de obra. El objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad de la aspersión y control de la broca utilizando drones. El estudio se desarrolló en dos etapas. Inicialmente, se evaluó la calidad física de la aspersión utilizando drones DJI Agras MG-1 y MG-1S, equipados con boquillas de abanico, antideriva de cono hueco, operando a velocidades entre 1 y 7 m s⁻¹. Se analizaron variables como cubrimiento, tamaño de gota y porcentaje de cobertura en cafetales de dos edades. Posteriormente, se evaluó la eficacia biológica de una mezcla comercial de tiametoxam+clorantraniliprol aplicada con el dron MG-1S, empleando las boquillas seleccionadas en la primera fase, tres volúmenes de mezcla y dosis de 350, 500 y 1.000 cm³ ha⁻¹. El testigo relativo fue un equipo de espalda. El uso de drones permitió una distribución adecuada de las gotas en el estrato productivo de cafetos en segunda y cuarta cosecha, especialmente con las boquillas TJ XR11001, TX4 y TX6 a una velocidad de 1 m s⁻¹. A partir de una dosis de 500 cm³ ha⁻¹, se alcanzaron niveles de protección de almendras similares al testigo, protegiendo en promedio el 70% de los frutos. Bajo las condiciones del presente estudio, los drones son una alternativa viable y eficiente para el control de la broca del café en Colombia.

Palabras clave: Control químico, tecnología de aplicación, broca del café, UAV.

EVALUATION OF SPRAY QUALITY AND CONTROL OF *Hypothenemus hampei* USING DRONES

The coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) is the most limiting pest in Colombian coffee production. Conventional spraying equipment requires high volumes of spray mixture per hectare and demands significant labor in both quantity and quality. In response to this issue, the objective of the present study was to evaluate spray quality and borer control using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The study was conducted in two stages. In the first stage, the physical quality of the spraying was assessed using DJI Agras MG-1 and MG-1S UAVs, equipped with flat-fan, drift-reducing, and hollow-cone nozzles, operating at speeds ranging from 1 to 7 m s⁻¹. Variables such as coverage, droplet size, and percentage of surface coverage were analyzed in coffee plantations of two age groups. In the second stage, the biological efficacy of a commercial mixture of thiamethoxam + chlorantraniliprole was evaluated when applied with the MG-1S UAV. The selected nozzles from the first stage were used, applying three spray volumes and doses of 350, 500, and 1000 cm³ ha⁻¹. A handheld backpack sprayer was used as a relative control. The results showed that drone applications provided adequate droplet distribution within the productive canopy strata of coffee trees in their second and fourth harvests, particularly with TJ XR11001, TX4, and TX6 nozzles at a flight speed of 1 m s⁻¹. From a dose of 500 cm³ ha⁻¹ onward, almond protection levels were comparable to those achieved with the control treatment, protecting approximately 70% of the fruits on average. It is concluded that, under the conditions of this study, the use of UAVs for spraying represents a viable and efficient alternative for controlling the coffee berry borer in Colombia.

Keywords: Chemical control, application technology, coffee berry borer, UAV.

* Asistente de Investigación. Disciplina de Entomología, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4276-0521>

** Asistente de Investigación. Disciplina de Biometría, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-4356-694X>

*** Investigador Científico III. Disciplina de Entomología, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-2227-4232>



La broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), al encontrarse diseminada en toda la zona cafetera de Colombia e incidir negativamente sobre la calidad y peso del grano, caída de frutos y costos de control, la convierte en la plaga más limitante de la caficultura colombiana (Benavides Machado et al., 2021). Para mantener la plaga por debajo de los umbrales de daño económico, es necesario recurrir a prácticas de control sanitario como el uso de insecticidas biológicos, botánicos o de síntesis química; para ello debe contarse con una tecnología que permita obtener una calidad óptima de la aplicación en el momento oportuno y así, minimizar los costos de la misma, el impacto ambiental y los efectos sobre la salud humana (Benavides Machado et al., 2013).

La calidad de las aspersiones para el control de plagas está determinada básicamente por el cubrimiento y el tamaño de gota, los cuales se evalúan principalmente, mediante dos estudios: biológicos y de calidad física. El primero es una medición indirecta pero fundamental, establece el grado de control de la plaga (insecto, hongo, arvense, entre otros) o el efecto sobre el desarrollo o producción del cultivo o cosecha (Villalba-Gault, 2008). El segundo, mide la distribución y calidad de las gotas en el árbol o en el blanco al cual va dirigida la aspersión (Ferguson, Chechetto, Hewitt, et al., 2016); para ello, los parámetros más usados son número de gotas/cm² que determina el cubrimiento o densidad de gotas y el diámetro volumétrico mediano (DVM) que mide el tamaño de gota (Syngenta, 2020; Teixeira, 2010); un parámetro de reciente uso es la cobertura, expresado como el porcentaje de la superficie de la tarjeta cubierta por los impactos (gotas) (Fox et al., 2003; Merani et al., 2021; Sesquile Peña, 2014; Souza et al., 2022). Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que la uniformidad de la distribución de las

gotas o cubrimiento en distintos sitios de la planta, blanco o cultivo, es medido por el coeficiente de variación (CV%); en aplicaciones de insecticidas y fungicidas se aceptan hasta el 50% para los productos de contacto y 70% con los sistémicos (Ferrazzini & Zamora, 2004).

En los años recientes se inició el estudio de aplicaciones para el control de plagas en distintos cultivos con drones de aspersión, conocidos internacionalmente como UAVs (unmanned aerial vehicle). En Brasil se han realizado evaluaciones en café utilizando diferentes parámetros de operación de los drones como altura, velocidad, tipo de boquillas y volúmenes de aspersión, entre otros; los resultados han mostrado, de manera variable, su efecto sobre la calidad física y biológica de las aspersiones. En general, comparado con la aplicación de pesticidas con equipos manuales terrestres, la aspersión con drones es más eficiente (Chen et al., 2020; Pan et al., 2017; G. Wang et al., 2019; K. Wang et al., 2020; Zhang et al., 2019).

En la actualidad, los equipos de aspersión más utilizados en la zona cafetera colombiana son aspersoras hidráulicas de espalda, accionadas por palanca, o batería eléctrica y equipos motorizados semiestacionarios (Benavides Machado et al., 2013). Estos equipos requieren para el control de la broca, volúmenes de aspersión mayores a 200 L ha⁻¹ (Montoya & Villalba, 2013; Tabares-Carrillo et al., 2008) y son exigentes en calidad y cantidad de mano de obra.

En Colombia, no se ha estudiado el uso de drones de aspersión para el control de plagas en el cultivo del café; por tal razón, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la calidad física y biológica de las aspersiones para el control de la broca del café con el uso de drones, bajo diferentes parámetros operativos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La presente investigación se realizó en Estaciones Experimentales de Cenicafé y en una finca demostrativa en el departamento de Quindío (Tabla 1), en dos etapas: 1) evaluación de la calidad física de las aspersiones con los drones, y 2) evaluación de la calidad biológica de una aspersión de insecticida con dron para el control de la broca.

Metodología

Etapas 1. Evaluación de la calidad física de las aspersiones

Durante el año 2016, se realizaron aspersiones con los drones Agras MG 1 y Agras MG 1S (DJI, China) (Figura 1), en lotes de café de la finca El Agrado y la Estación Experimental Paraguaicito (Tabla 1). El objetivo del estudio fue conocer la distribución de las gotas en el árbol de café. En cada lugar se seleccionaron diez árboles al azar y en cada uno de ellos se tomaron diferentes puntos de evaluación. En El Agrado la evaluación se realizó en tres alturas del tercio productivo del árbol: bajo, medio y alto, en estos sitios se tomó una rama, seleccionando dos sectores de la misma: parte interna y externa, y en cada sector, dos caras: superior (frutos orientados hacia arriba) e inferior (frutos orientados hacia abajo); así mismo, en una rama se midió el tercio vegetativo superior del árbol. El dron se operó con la boquilla de abanico plano TJ XR11001 (rango extendido) (Teejet, Glendale Heights, IL, EE. UU.), a una velocidad de vuelo $1,0 \text{ m s}^{-1}$. En la Estación Paraguaicito se eligieron dos ramas en cada árbol: una del tercio vegetativo superior y otra del tercio medio productivo, en cada rama se tomaron dos sectores: parte interna y externa de la misma, en ambos sectores se escogió la cara

superior de la rama; el dron fue operado con las boquillas TJ XR11001 y TJ 800050 (Teejet, Glendale Heights, IL, EE. UU.) a velocidades de $3,0$ y $5,0 \text{ m s}^{-1}$. En ambos lugares la altura de vuelo sobre el dosel del cultivo fue de $2,0 \text{ m}$ aproximadamente, determinada en el modo manual del equipo.

En el año 2017, en la Estación Experimental Paraguaicito, se evaluó la distribución de la aspersión en lotes de café (Tabla 1) operando el dron MG 1S a diferentes velocidades (1 , 3 , 5 y 7 m s^{-1}), con las boquillas de abanico plano TJ XR11001, TJ TT11001 (ángulo ancho), TJ AIXR110015 (rango extendido con inducción de aire) y las boquillas de cono hueco TX6 y TX4 (Teejet, Glendale Heights, IL, EE. UU.) (Figura 2). Los puntos de medición se realizaron en nueve árboles al azar, seleccionando la cara superior del sector medio de la rama en tres alturas del tercio productivo del árbol (alto, medio y bajo). Adicionalmente, en otros tres ensayos independientes se determinó la distribución de la aspersión evaluando diferentes boquillas y velocidades a dos alturas de vuelo sobre el dosel del cultivo ($1,5$ y $3,0 \text{ m}$), dos edades del cafetal (segunda y cuarta cosecha) y dos caras en la rama (superior e inferior).

Procedimiento. En los puntos indicados de evaluación, se colocó una tarjeta colectora de gotas (Villalba-Gault, 2008) (Figura 3). Como material colector se utilizaron tarjetas de papel fotográfico (Baio et al., 2014) tipo glossy de 200 g , con un tamaño de $6,0 \text{ cm} \times 3,0 \text{ cm}$, como colorante durante la aspersión se utilizó el producto alimenticio UVA C31 (Frutaroma, Colombia) al 1% (p/v) en mezcla con agua. Las tarjetas se fijaron a las hojas o frutos con “chinchas” o “push pins” de $9,0 \text{ mm}$ (Figura 4). Luego de la aplicación, las tarjetas se dejaron en el árbol por al menos cinco minutos con el fin de permitir la mayor deposición y

fijación de las gotas a la tarjeta colectora; posteriormente, las tarjetas fueron recogidas por un operario, usando guantes desechables. Las tarjetas se colocaron en bolsas plásticas

previamente marcadas con toda la información necesaria para identificar el tratamiento al cual correspondían y fueron llevadas al laboratorio para el respectivo análisis.

Tabla 1. Características de los lotes y condiciones agroclimáticas durante los vuelos de los drones.

Características	El Agrado ¹	Paraguaicito ¹	Paraguaicito ²	Naranjal ³
Municipio	Montenegro	Buenavista	Buenavista	Chinchiná
Departamento	Quindío	Quindío	Quindío	Caldas
Fecha	25/11/2016	16/12/2016	6/12/2017	28/10/2021
Coordenadas	Latitud 4° 31' N Longitud 75° 48' W	Latitud 4° 24' N Longitud 75° 48' W	Latitud 4° 24' N Longitud 75° 48' W	Latitud 4° 58' N Longitud 75° 39' W
Altitud (m)	1.275	1.203	1.203	1.381
Temperatura media (°C)	20,9	21,3	22,2	20,9
Humedad relativa media (%)	84,3	81,0	82,0	82,7
Brillo solar (h)	2,0	3,1	7,0	5,5
Sistema	Libre exposición	Libre exposición	Libre exposición	Libre exposición
Topografía lote	Plana	Plana	Plana	Plana
Variedad	Castillo	Castillo Paraguaicito	Castillo Paraguaicito	Cenicafé 1
Tipo de renovación	Zoca tradicional	Zoca tradicional	Zoca tradicional	Zoca tradicional
Distancia de siembra	Doble surco: (2,0 m + 1,5 m) x 1,0 m	1,0 m x 1,5 m	1,0 m x 1,5 m	1,0 m x 1,4 m
Edad Cosecha	Tercer año	Primer año	Segundo–Cuarto año	Primer año
Hora de vuelo	10:00–14:00	10:00–13:00	10:00–16:00	10:00–12:00
Velocidad del viento (m s ⁻¹)	1,5 aprox.	1,5 aprox.	< 3,0 ⁴	< 3,0 ⁴

¹ Fuente Coordenadas e información agroclimática: (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2017).

² Fuente Coordenadas e información agroclimática: (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2018).

³ Fuente Coordenadas e información agroclimática: (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2022).

⁴ De acuerdo con la observación visual, tomando como referencia la Escala de Beaufort (The Royal Meteorological Society, s.f.).



Figura 1. Drones de aspersión DJI Agras. a. MG -1; b. MG-1S.



Figura 2. Boquillas evaluadas. a. TJ XR11001; b. TJ TT110012; c. TJ AIX110015; d. TX6; e. TX4.

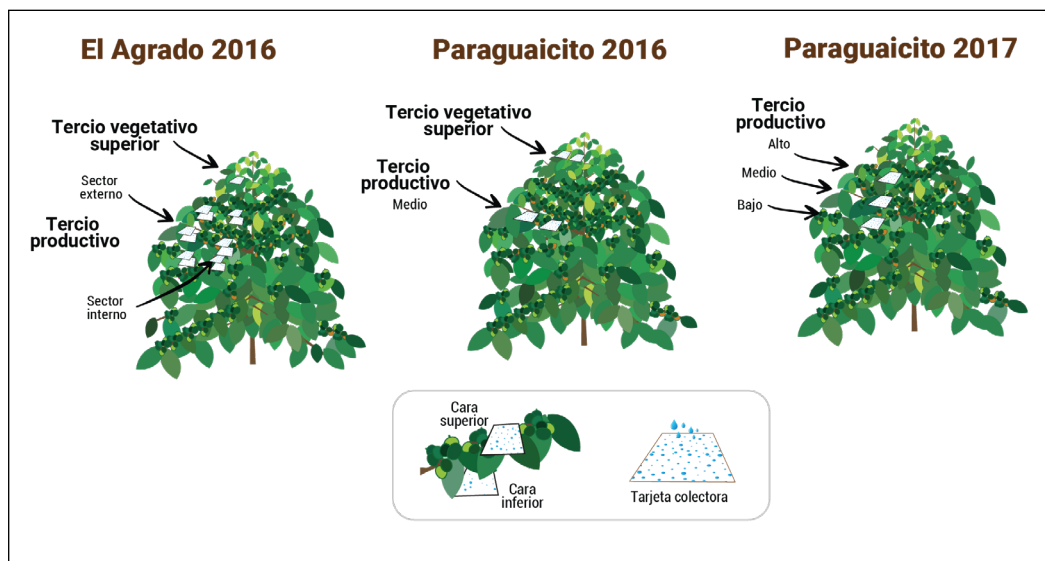


Figura 3. Ubicación de las tarjetas colectoras en cada punto de evaluación del árbol.



Figura 4. Tarjetas colectoras. a. Puesta de tarjetas en el árbol; b. Tarjeta después de la aspersión.

Tabla 2. Descripción de tratamientos para la aspersión del insecticida Voliam Flexi con el dron Agras MG -1S para el control de la broca del café. Naranjal, 2021.

TTO	Volumen mezcla (L ha ⁻¹)	Dosis P.C. (cm ³ ha ⁻¹)	Concentración insecticida (cm ³ L ⁻¹)	Boquilla	Pases del dron sobre la parcela
T1	100	1.000	10,0	TJ XR11001	Uno solo
T2	100	500	5,0	TJ XR11001	Uno solo
T3	50 + 50	250 + 250	5,0	TJ XR11001	Dos pases: cruzados
T4	40	500	12,5	TJ XR11001	Uno solo
T5	70	500	7,1	TJ XR11001	Uno solo
T6	100	350		TX6	Uno solo
T7	100	500	5,0	TX6	Uno solo
T8	100	350	3,5	TJ XR11001	Uno solo
T9 (TR)	260	364	1,4	TX3	
T10 (TA)	0	0	0		

Análisis de la información. Las tarjetas se digitalizaron en un escáner HP serie Scanjet 5590, a una resolución de 1.200 dpi. El análisis se realizó con la ayuda del programa de procesamiento de imágenes DepositScan

(USDA. Wooster, OH, EEUU) (Zhu et al., 2011), el cual calculó y entregó los siguientes parámetros de calidad física: cubrimiento o densidad de gotas (gotas/cm²); la cobertura de la tarjeta, expresado como cobertura (%), y el

tamaño de gota, medido por el indicador DVM (en μm); estos parámetros fueron considerados las variables de respuesta del estudio en la Etapa 1. El análisis de la evaluación de la distribución de la aspersión en cada punto del árbol de café se realizó por factor (velocidad, boquilla, tercio del árbol, sector, cara de las ramas, altura de vuelo y edad del cultivo); se realizó un análisis descriptivo calculando los valores máximos, mínimos, media y error estándar. A continuación, dada la dificultad para asumir la normalidad y homogeneidad en los datos, se implementó un análisis de varianza no paramétrico y las diferencias se evaluaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis al 5% de significancia. Adicionalmente, con el coeficiente de variación (CV%) para la variable cubrimiento, se determinó la uniformidad de la distribución de la aspersión.

Etapla 2. Evaluación de la calidad biológica de una aspersión de insecticida con dron para el control de la broca

En la Estación Naranjal (Tabla 1) se evaluó la eficacia de una aspersión con el dron Agras 1S (DJI, China) para el control de la broca del café; se utilizó el insecticida Voliam Flexi, formulación mezcla de thiametoxam más clorantropilol (Syngenta, Stein, Suiza). La descripción de los tratamientos: dosis aplicada de insecticida (producto comercial), volumen de mezcla, tipo de boquilla utilizada y pases del dron, se presenta en la Tabla 2. Se utilizó como testigo relativo (TR), una aspersión convencional con equipo eléctrico de espalda, boquilla TX3 y una presión de trabajo de 40 psi, aplicando una concentración del producto comercial de $1,4 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$. El testigo absoluto (TA) no tuvo aplicación de insecticida.

Procedimiento. Se aplicó el insecticida de acuerdo con cada tratamiento, en parcelas de 347 m^2 , con árboles que tuvieron frutos de más de 150 días de desarrollo. Después de seis

días de la aspersión, se realizó una primera infestación, con el método de las mangas entomológicas (Tabares-Carrillo et al., 2008). En este caso se tomó una rama por árbol, con 30 frutos sanos y se liberaron 70 brocas recién emergidas en la manga; después de ocho días se realizó una segunda liberación, para garantizar un porcentaje de infestación inicial superior al 70% en el TA. Se infestaron al azar 20 árboles por parcela (tratamiento). Las parcelas fueron asignadas a los tratamientos de manera aleatoria. Después de siete días de la segunda infestación, se cortaron los frutos y se llevaron al laboratorio para su evaluación, registrando el número total de frutos infestados y el número de frutos infestados en donde la broca no llegó a las almendras, es decir, frutos infestados con la almendra sana. Las condiciones operativas del dron fueron con las cuatro boquillas funcionando y un interlineado (desplazamiento lateral) ajustado a 3,0 m.

Análisis de la información. Como variable de interés se tomó el porcentaje de frutos de almendra sana (PFAS), tomado con el total de frutos infestados con almendra sana sobre el total de frutos infestados y multiplicado por 100. Para cada tratamiento con la variable PFAS se construyeron intervalos de confianza (t-Student) al 95% y sus diferencias respecto al TR, evaluadas bajo una prueba t al 5% de significancia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Etapla 1. Evaluación de la calidad física de aspersiones

En las mediciones de las tasas de descarga de las boquillas se encontró que ambos drones trabajan con presiones entre 29 y 58 psi aproximadamente; de acuerdo a la norma ASABE 572.2 (American Society of Agricultural & Biological Engineers) y catálogo de boquillas Tee®Jet 52-M, con las presiones

indicadas, el tamaño de gota, cualitativa y cuantitativamente (DVM), para las boquillas evaluadas son los siguientes: TJ 800050, gotas muy finas (60 a 105 μm); TJ XR11001, gotas muy finas a finas (60 a 235 μm); TJ TT11001 y TJ AIXR110015, gotas medianas a gruesas (236 a 403 μm) y las boquillas de cono hueco TX4 y TX6 gotas muy finas (60 a 105 μm) (Grisso, 2019; TeeJet® Technologies, 2023b). En cuanto a las evaluaciones preliminares de altura de vuelo, para las boquillas TX4 y TX6, por su ángulo de aspersión de 80° y no de 110° como en las otras boquillas, se demostró que vuelos a una altura de 1,5 m sobre el dosel del cultivo, dejan espacios sin asperjar en la mitad de la franja asperjada; a su vez, a 3,0 m de altura, el tamaño muy fino de las gotas disminuyó el cubrimiento, por tal razón, para estas boquillas fue seleccionada la altura de vuelo de 2,0 m sobre el dosel del cultivo.

Los resultados de las pruebas físicas muestran que las aspersiones, con ambos tipos de dron, permitieron una buena distribución de las gotas en casi todas las partes del árbol evaluadas (Tabla 3). Un buen cubrimiento es importante en insecticidas de contacto, especialmente cuando se trata de insectos que están inmóviles (Matthews, 2000); en términos generales, se considera que las aplicaciones contra insectos son eficaces a partir de un cubrimiento mínimo teórico (CMT) de 20 a 30 gotas/cm² para insecticidas sistémicos y 40 a 70 gotas/cm² con insecticidas de contacto (Syngenta, 2020; TeeJet® Technologies, 2023a; Teixeira, 2010). Respecto al tamaño de gota, no hay consenso sobre la medida requerida para obtener eficacia al aplicar los pesticidas; Matthews (2000) afirma que el tamaño óptimo es de 30 a 50 μm para el control de insectos que están en el follaje; Grisso (2019) presenta rangos de 236 a 340 μm y 341 a 403 μm para insecticidas de contacto y sistémicos, respectivamente.

Para la variable cubrimiento no se encontró efecto significativo de la altura o posición de la rama en el árbol (vegetativa superior o tercio productivo) y del sector en la rama (externo o interno); así mismo, la cantidad de gotas cumple con los requerimientos de CMT para obtener eficacia con insecticidas sistémicos y de contacto (Syngenta, 2020; TeeJet® Technologies, 2023a); sin embargo, en los frutos que están orientados hacia la cara inferior de la rama, independiente del tipo de dron, tipo de boquilla o lugar de la planta, el número de gotas que llegan al blanco no cumple con los requerimientos de CMT, con lo cual, no habría control sobre la broca que esté infestando estos frutos; este menor cubrimiento indicaría que la turbulencia y movimiento de ramas que generan los drones no es suficiente para voltear las ramas y permitir la llegada de las gotas a los frutos de debajo de la rama. Por otro lado, aun cuando existe efecto de la edad del cultivo sobre la distribución de las gotas en el árbol, el menor cubrimiento en los cafetales de dos años, dado su CMT, es suficiente para esperar control eficaz de la broca; las diferencias del cubrimiento podrían explicarse debido a que, en los cultivos de segunda cosecha, el tercio productivo está en una zona donde el follaje es más denso que los de cuarta cosecha.

En cuanto a la variable porcentaje de cobertura, los promedios encontrados en los diferentes sitios del árbol, fueron menores al 10%, lo cual indica que los valores del cubrimiento son confiables y permiten una buena interpretación de la información (Fox et al., 2003; Hołownicki et al., 2002; Zhu et al., 2011). Cabe resaltar que los valores de CMT obtenidos en el presente estudio, corresponden a coberturas entre 2% y 10%, lo cual podría relacionar estos porcentajes de cobertura con la eficacia de los insecticidas recomendados para el control de broca.

Tabla 3. Calidad física de una aspersión, en diferentes partes del árbol de café, obtenida con el Dron DJI Agras MG 1 y 1S.

Lugar	Factor	Nivel Factor	N	Cubrimiento (gotas/cm²)					Cobertura (%)					DVM (µm)				
				Max.	Min.	Media	EE		Max.	Min.	Media	EE		Max.	Min.	Media	EE	
El Agrado 2016¹	Cara de la rama	Inferior	60	8,7	0,1	1,4	0,2	B	3,7	0,0	0,1	0,1	B	1.453,0	52,0	133,3	23,9	B
		Superior	70	186,5	1,0	43,4	5,9	A	11,7	0,0	2,8	0,3	A	1.697,0	95,0	294,1	27,9	A
	Sector de la rama	Externo	40	186,5	2,1	48,0	8,0	A	10,2	0,1	3,4	0,5	A	1.697,0	111,0	331,4	47,3	A
		Interno	30	183,8	1,0	37,2	8,6	A	11,7	0,0	2,2	0,5	A	428,0	95,0	244,3	12,7	B
Paraguaicito 2016²	Tercio del árbol	Veg. Superior	28	203,3	4,0	58,3	10,9	A	13,5	0,1	3,4	0,7	A	317,0	112,0	207,3	11,3	A
		Productivo	27	237,8	7,2	75,4	13,2	A	23,2	0,1	5,4	1,3	A	373,0	100,0	226,9	13,7	A
	Sector de la rama	Externo	28	203,1	4,0	66,9	11,0	A	19,5	0,7	4,3	0,9	A	355,0	133,0	218,4	11,4	A
		Interno	27	237,8	6,0	66,4	13,3	A	23,2	0,1	4,4	1,2	A	373,0	100,0	215,4	13,8	A
Paraguaicito 2017	Cara de la rama³	Inferior	257	42,4	0,4	4,8	0,4	B	1,4	0,0	0,1	0,0	B	568,0	56,5	311,6	6,6	A
		Superior	250	300,4	4,4	72,4	4,5	A	43,9	0,1	6,7	0,6	A	982,0	166,0	306,3	8,7	A
	Tercio Productivo del árbol⁴	Alto	171	263,6	0,8	55,3	5,0	A	49,5	0,1	6,5	0,8	A	4.109,0	121,0	453,3	35,3	A
		Medio	171	300,4	0,8	58,9	5,2	A	50,8	0,0	8,0	0,9	A	3.254,0	93,0	483,5	37,4	A
		Bajo	178	276,4	2,4	59,2	5,1	A	41,8	0,1	7,4	0,8	A	2.785,5	144,0	435,9	26,7	A
	Cosecha⁵	Cuarta	103	304,4	8,4	100,0	7,6	A	39,8	0,3	7,8	0,9	A	719,5	136,0	256,3	10,3	B
		Segunda	101	270,0	12,0	70,1	6,6	B	39,1	0,7	6,4	0,9	A	982,0	176,5	310,8	13,0	A

Los promedios corresponden, salvo en el factor "Cara de la rama", a lecturas de las tarjetas de la cara superior de la rama.

Para cada lugar, factor y nivel, letras no comunes indican diferencias según prueba de Kruskal-Wallis al 5%.

¹ Promedio del tercio vegetativo superior y los tres tercios productivos (alto, medio y bajo), asperjando con boquilla TJ XR11001 y volando a 3 m s⁻¹.

² Promedio del tercio vegetativo superior y tercio medio productivos, con dos boquillas (TJ XR11001 y TJ 800050) y volando a 3 y 5 m s⁻¹.

³ Promedio de árboles de segunda cosecha, sector medio de la rama, tres tercios productivos (alto, medio y bajo), cuatro velocidades (1–3–5–7 m s⁻¹) y tres boquillas (TJ XR11001, TX4 y TX6).

⁴ Promedio de árboles de segunda cosecha, sector medio de la rama, cuatro velocidades (1–3–5–7 m s⁻¹) y cinco boquillas (TJ XR11001, TJ TT11001, TJ AIXR110015, TX4 y TX6)

⁵ Promedio del sector medio de la rama en tres tercios productivos (alto, medio y bajo), con cuatro velocidades (1–3–5–7 m s⁻¹) y la boquilla TX6.

La calidad de las aspersiones con drones en cultivos arbustivos como manzanos, almendros, duraznos o café, ha sido ampliamente estudiada y los resultados, aun cuando han sido variables, en su mayoría muestran distribución de las gotas en diferentes sectores o alturas del árbol. En café, J. P. A. R. da Cunha et al. (2024) no encontraron diferencias de cubrimiento entre el sector superior e inferior de la planta, mientras que Moraes (2022) halló diferencias entre sectores de la planta de café. En huertos de guayaba, el cubrimiento, cobertura y tamaño de gota fueron significativamente diferente en distintas partes del árbol (Verma et al., 2022). En general, los estudios concluyen que la calidad del cubrimiento, cobertura, tamaño de gota o uniformidad, dependen de los parámetros de vuelo del dron como altura de aspersión, velocidad, tipo de boquillas y volumen de aspersión, entre otros (Alvarenga et al., 2024; L. Li et al., 2022; X. Li et al., 2019; K. Wang et al., 2020).

En lo referente a los parámetros operativos de vuelo como altura, velocidad y tipo de boquilla, estos por sí solos mostraron efecto sobre la calidad de las aspersiones (Tabla 4). Adicionalmente, la Tabla 5 muestra en mayor detalle la relación entre la combinación de los parámetros operativos (tipo de boquilla y velocidad de vuelo) y la posición de la rama en el tercio productivo del árbol sobre las variables cubrimiento y cobertura; además, presenta la calidad de la uniformidad del cubrimiento, medida por el CV(%).

La altura de vuelo sobre el dosel del cultivo influye en la calidad de la aspersión dependiendo del tipo de boquilla usada; cuando se utilizan boquillas que producen gotas medianas o gruesas como las diseñadas para reducir deriva (TJ AIXR110015), el cubrimiento no se ve afectado al operar el

dron a una altura de 1,5 o 3,0 m, o mientras que con boquillas que generan gotas muy finas o finas (TJ XR11001), un aumento de 1,5 m en la altura de vuelo produce una diferencia significativa, posiblemente, debido a la pérdida por deriva; en las variables cobertura y tamaño de gota no se encontró efecto de la altura. El efecto de la altura de vuelo de los drones sobre la calidad de la aspersión se midió en *Coffea canephora* y en huertos de manzano, encontrando que el cubrimiento se mejora al disminuir la altura de aspersión (Crause et al., 2023; Shan et al., 2024); a su vez, Tang et al. (2018), en huertos de cítricos, descubrieron que la mejor calidad de la aspersión se obtiene a 1,2 m frente a 0,8 o 1,8 m. En el cultivo del café, J. P. A. R. da Cunha et al. (2024), registran una mayor deposición de producto a 1,5 m que a 3,0 m al asperjar con la boquilla TJ XR11001 o la de cono hueco COAP 9001 (KGF, Brasil), resultados similares al presente estudio; a su vez, Sousa et al. (2022), trabajando con boquillas TJ TT11002 hallaron que el efecto de la altura de vuelo no se aprecia en variables como cubrimiento y DVM pero sí en la cobertura, el presente trabajo difiere en estos resultados por cuanto la altura no afectó la cobertura.

El aumento de la velocidad de vuelo, además de afectar negativamente el cubrimiento (gotas/cm²) y la cobertura, también disminuyó la uniformidad de la aspersión, lo cual también fue registrado por L. Li et al (2022); velocidades de 5 m s⁻¹ y 7 m s⁻¹, podrían afectar la calidad biológica de las aspersiones, en especial, para aplicaciones con insecticidas de contacto, mientras que el tamaño de gota, a partir de 3 m s⁻¹ en adelante, no es afectado por la velocidad (Tablas 4 y 5). En cuanto a la relación entre velocidad y boquilla (Tabla 5), se observa como las boquillas de cono hueco que producen gotas

muy finas, como la TX4, producen el mayor cubrimiento y mejor uniformidad en todas las alturas del tercio productivo cuando se opera el dron a 1 m s^{-1} ; sin embargo, a partir de 3 m s^{-1} , la calidad de la aspersión desciende notoriamente, algo similar se presenta con la boquilla TX6; posiblemente, las gotas más pequeñas son transportadas a sitios diferentes al blanco o la velocidad disminuye el tamaño ocasionando una mayor volatilización; en este sentido, la boquilla TJ XR11001 que produce un rango de tamaño de gotas un poco más grande (muy finas a finas) que las de cono hueco evaluadas, es menos susceptible a la pérdida de gotas y produce, en consecuencia, mejor cubrimiento al aumentar la velocidad, inclusive hasta 5 m s^{-1} . Debe tenerse en cuenta que el coeficiente de variación para 3 y 5 m s^{-1} , estuvo alrededor del 60 a 70%, con lo cual, la uniformidad del cubrimiento se redujo; por lo tanto, la calidad del control podría no ser tan consistente para insectos como la broca que son susceptibles a insecticidas de contacto. Estos resultados coinciden con lo hallado por Meng et al. (2020) en huertos de durazno, el aumento de la velocidad de 2 a 5 m s^{-1} , redujo significativamente la calidad del cubrimiento; por el contrario, difieren con los de Quin et al. (2016), quienes hallaron en el cultivo de arroz un mejor cubrimiento en el sector inferior de la planta con el aumento de velocidad de 3 a 5 m s^{-1} ; por otro lado, K. Wang et al. (2020) hallaron, en huertos de cítricos, al controlar *Diaphorina citri*, que la mejor cobertura (19%) fue con una velocidad de $1,7 \text{ m s}^{-1}$.

En cuanto al tipo de boquilla, como se ha indicado, los mejores cubrimientos se obtuvieron con las boquillas TJ XR11001, TX6 y TX4, que producen gotas muy finas a finas, contrario a las boquillas TJ TT11001 y TJ AIXR110015, diseñadas para producir un mayor tamaño de gota a fin de reducir

el efecto de deriva (Tabla 4). Alvarenga et al. (2024), registran DVMs iguales entre las boquillas TJ XR11001 y TJ TT11001 y menor tamaño con respecto a la boquilla TJ AIXR110015; a su vez, encontraron una mayor cobertura con la boquilla TJ TT11001 frente a las boquillas TJ XR11001 y TJ AIXR110015, resultados contrarios a los del presente trabajo. Los resultados muestran, para las diferentes boquillas, DVMs proporcionales a los establecidos en la norma ASABE 572.2; sin embargo, los promedios fueron mayores a los indicados por los rangos de referencia; esta diferencia puede estar dada por el efecto del factor de expansión del colorante, material de la tarjeta colectora o el programa de análisis (Baio et al., 2014; Deveau, 2021a, 2021b, 2021c; He et al., 2024; Xu et al., 2019).

En referencia a la relación entre el cubrimiento y la cobertura (Tabla 5), con todas las boquillas, excepto la TJ AIXR110115, se observa que con $110,7 \text{ gotas/cm}^2$ o más, la cobertura fue superior al 10%; para una densidad entre 47 y 73 gotas/cm^2 , la cobertura estuvo entre 3% y 6%; L. Li et al (2022) registraron con coberturas similares en aspersiones con dron en huertos de durazno, un cubrimiento entre 15 y 45 gotas/cm^2 . En las evaluaciones de calidad física de aspersiones en el cultivo de café, el establecimiento de una correlación entre el cubrimiento y la cobertura (%) podría permitir seleccionar a esta última como parámetro más práctico por cuanto esta variable es mejor procesada y medida por los programas de análisis de imagen y, por lo tanto, es más confiable que el cubrimiento o el tamaño de gota, especialmente cuando el número, tamaño o forma de las gotas, limita el desempeño de estos programas (M. Cunha et al., 2012; Deveau, 2021d; Ferguson, Chechetto, O'Donnell, et al., 2016).

Tabla 4. Calidad física de una aspersión en árboles de segunda cosecha, de acuerdo con diferentes tipos de boquilla y velocidad de vuelo con el dron DJI Agras MG-1S. Paraguaicito, 2017.

Factor	Nivel Factor	N	Cubrimiento (gotas/cm ²)					Cobertura (%)					DVM (μm)				
			Max.	Min.	Media	EE		Max.	Min.	Media	EE		Max.	Min.	Media	EE	
Altura vuelo ¹	1,5 m (TJ XR11001)	6	171,6	65,2	104,1	15,5	A	15,1	6,6	9,9	1,2	BC	787,0	583,0	687,3	27,4	B
	3,0 (TJ XR11001)	6	75,2	26,0	40,7	7,4	C	11,9	2,6	5,0	1,5	C	864,0	607,0	748,7	45,5	B
	1,5 m (TJ AIRX110015)	8	70,0	11,2	41,6	9,1	C	43,9	5,5	21,4	5,2	AB	4.430,0	1155,0	2.313,5	405,8	A
	3,0 m (TJ AIRX110015)	7	85,6	21,2	58,2	9,4	BC	32,5	8,8	20,6	3,3	A	3.107,0	1594,0	2.052,9	200,3	A
² Velocidad (m s ⁻¹)	1	126	300,4	5,2	141,1	7,2	A	50,8	0,1	22,3	1,1	A	4.109,0	121,0	796,8	66,6	A
	3	135	147,2	2,8	42,6	2,7	B	13,5	0,1	3,9	0,2	B	1.289,0	165,5	383,7	15,7	B
	5	130	161,2	0,8	27,0	2,7	C	15,9	0,0	2,0	0,2	C	818,0	93,0	355,5	13,2	B
	7	126	86,0	1,6	22,7	1,6	C	6,1	0,1	1,4	0,1	C	862,5	132,0	302,0	10,9	B
Boquilla ²	TJ XR11001	105	276,8	2,4	76,4	7,3	A	43,4	0,1	7,6	1,0	AB	984,0	121,0	333,2	14,7	C
	TJ TT11001	108	203,2	0,8	38,2	4,8	B	29,3	0,0	5,0	0,7	B	718,0	93,0	465,2	11,0	B
	TJ AIRX110015	108	91,2	2,0	28,5	2,3	B	50,8	0,2	9,4	1,3	A	4.109,0	132,0	832,1	77,7	A
	TX4	95	300,4	6,8	79,7	8,9	A	43,9	0,6	8,2	1,3	A	932,5	183,5	315,6	16,8	C
	TX6	101	270,0	12,0	70,1	6,6	A	39,1	0,7	6,4	0,9	AB	982,0	176,5	310,8	13,0	C

Los promedios corresponden a lecturas de las tarjetas de la cara superior de la rama.

Para cada factor y nivel, letras no comunes indican diferencias según prueba de Kruskal-Wallis al 5%.

¹ Promedio del tercio medio productivo, sector medio de la rama. Velocidad de vuelo de 1 m s⁻¹

² Promedio del sector medio la rama en tres tercios productivos (alto, medio y bajo). Altura de vuelo del dron sobre el dosel del cultivo según la boquilla: TJ XR11001 y TJ TT11001: 1,5 m; TJ AIRX110015: 3,0 m; TX4 y TX6: 2,0 m

Tabla 5. Cubrimiento en tres alturas del tercio productivo del árbol de café, utilizando el dron DJI Agras MG -1S con diferentes boquillas y velocidades de vuelo. Paraguaicito, 2017.

Boquilla	Velocidad (m s ⁻¹)	Tercio Productivo del árbol																							
		Alto								Medio								Bajo							
		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)	
		n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE
TJ XR11001	1	8	131,3	38,1	82,2	12,4	4,4	294,4	49,0	8	198,8	16,2	23,0	29,7	4,6	595,9	92,6	8	192,0	22,3	32,9	23,4	2,8	437,5	30,1
	3	9	72,1	13,7	56,8	5,3	1,2	300,4	11,3	9	61,3	12,3	60,2	4,3	0,8	291,4	13,1	9	72,8	14,4	59,4	6,3	1,2	299,7	22,3
	5	9	68,8	16,4	71,5	3,1	0,7	224,4	13,1	9	50,1	10,9	65,2	3,2	0,7	317,0	63,3	9	57,8	14,2	73,7	5,5	1,6	254,8	15,2
	7	9	16,9	6,7	118,3	0,7	0,3	271,7	15,6	9	16,8	4,3	77,4	0,9	0,2	300,5	20,2	9	11,0	2,6	70,0	0,5	0,1	446,7	60,1
TJ TT11001	1	9	84,2	18,5	66,0	10,6	2,1	511,8	18,8	9	110,7	19,8	53,7	16,2	3,2	546,6	26,5	9	116,7	14,9	38,2	16,7	2,2	515,7	27,9
	3	9	15,4	4,7	90,9	1,4	0,5	419,6	38,5	9	38,2	8,9	69,8	4,5	1,0	532,7	52,6	9	51,8	9,3	53,8	6,5	1,0	527,2	12,9
	5	9	1,6	0,3	47,8	0,3	0,1	436,8	31,3	9	4,4	0,7	50,8	0,4	0,2	371,9	57,6	9	4,8	0,5	31,6	0,5	0,1	490,8	18,0
	7	9	6,6	1,7	75,4	0,8	0,2	457,6	36,2	9	11,5	3,9	100,8	1,1	0,3	423,5	22,9	9	12,9	4,9	113,6	1,3	0,5	348,4	28,4

Continúa...

...continuación.

Boquilla	Velocidad (m s ⁻¹)	Tercio Productivo del árbol																							
		Alto								Medio								Bajo							
		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)		(gotas/cm ²)				Cobertura (%)		DVM (µm)	
		n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE	n	Media	EE	CV (%)	Media	EE	Media	EE
TJAIXR 110015	1	9	57,1	6,5	34,1	31,1	4,4	1984,3	354,8	9	62,0	5,0	24,0	34,0	3,7	2.187,1	318,2	9	53,0	5,7	32,4	26,4	3,8	1675,9	226,7
	3	9	21,0	3,8	54,2	4,7	0,9	716,6	79,4	9	24,6	4,5	55,3	4,7	0,8	622,8	48,4	9	24,8	2,4	29,1	4,5	0,5	547,4	29,9
	5	9	4,5	1,0	66,1	1,0	0,3	527,8	19,6	9	6,2	1,3	61,0	1,5	0,3	569,4	32,2	9	5,7	0,5	25,2	1,5	0,2	530,3	13,4
	7	9	21,0	6,1	87,1	0,8	0,2	242,6	15,8	9	35,6	10,2	86,4	1,5	0,5	180,8	12,2	9	27,2	6,7	74,5	1,4	0,5	200,1	16,2
TX4	1	6	220,5	15,8	17,5	24,6	3,5	458,7	61,8	8	220,7	21,7	27,8	28,4	4,6	527,5	94,4	9	230,4	9,6	12,5	29,6	3,0	516,5	50,7
	3	9	43,9	8,1	55,3	2,3	0,3	233,7	8,2	9	35,4	8,2	69,3	2,3	0,4	234,4	12,4	9	24,3	5,2	64,1	1,5	0,3	232,0	10,8
	5	8	40,9	6,0	41,8	2,3	0,6	214,1	8,0	7	33,8	4,0	30,9	1,8	0,4	225,6	11,1	8	32,4	7,8	68,5	2,3	1,0	276,5	42,6
	7	8	30,2	7,5	69,8	1,3	0,3	362,3	74,6	7	22,4	3,0	35,7	1,3	0,2	266,1	22,5	7	36,5	4,3	30,9	2,4	0,2	256,9	21,3
TX6	1	8	186,7	24,9	37,7	23,4	4,6	553,1	65,2	8	169,2	25,9	43,3	19,0	4,3	498,5	74,3	9	137,2	19,9	43,6	10,6	1,7	328,4	16,1
	3	9	68,8	14,6	63,9	4,5	1,0	290,0	8,3	9	47,5	6,9	43,9	3,1	0,4	256,2	8,0	9	37,3	3,8	30,5	2,7	0,4	251,9	12,9
	5	9	47,2	8,9	56,7	3,0	0,7	241,8	18,4	9	26,6	3,8	43,1	2,2	0,6	314,4	34,6	8	23,4	1,9	22,7	1,8	0,3	274,1	9,4
	7	7	37,8	3,7	26,2	3,3	0,8	235,6	12,0	7	27,7	4,5	42,8	2,3	0,7	273,6	13,3	9	34,5	5,6	48,3	2,3	0,5	231,3	9,5

Finalmente, al analizar la uniformidad del cubrimiento según la posición de la rama en el tercio productivo, los coeficientes de variación indican que existe una influencia por el tipo de boquilla y velocidad de vuelo, en la medida que las ramas productivas están más bajas, la uniformidad aumenta o disminuye según la altura de vuelo, velocidad o tipo de boquilla, lo cual indica la necesidad de tener identificados los efectos de estos parámetros operativos sobre la calidad de la aspersión y calibrarlos de acuerdo a la ubicación del blanco donde debe llegar la aspersión.

Las evaluaciones de calidad física de las aspersiones realizadas entre 2016 y 2017, condujeron a la selección de las boquillas TJ XR11001 y TX6 para operar el dron a una velocidad de 1 m s⁻¹ en el ensayo de calidad biológica.

Etapla 2. Evaluación de la calidad biológica de una aspersión de insecticida con dron para el control de la broca

En cuanto a la eficacia de la aspersión con el dron, la Figura 5 muestra la protección de las almendras que ofreció cada tratamiento, los resultados obtenidos concuerdan con trabajos realizados en cultivos de algodón y árboles de castaño, en donde se lograron eficacias por encima del 60% en plagas del orden coleóptera, hemíptera y lepidóptera (Arakawa & Kamio, 2023; Lou et al., 2018). Cenicafé, al evaluar la calidad biológica y física de las aspersiones para el control de la broca del café en distintos sistemas cafeteros, con equipos de aplicación terrestre que utilizan volúmenes iguales a superiores a 250 L ha⁻¹, encontró una eficacia superior al 75% (Arcila-Moreno et al., 2013, 2015; Tabares-Carrillo et al., 2008), cubrimientos entre 328 y 1320 gotas/cm² y DVMs entre 98 a 310 µm (Montoya & Villalba, 2013).

Este estudio demostró que volúmenes entre 40 y 100 L ha⁻¹ asperjados con dron, producen una eficacia similar al aplicar 260 L ha⁻¹ con un equipo terrestre. En cuanto a la dosis eficaz se encontró que estuvo entre 500 y 1.000 cm³ ha⁻¹, superior a la indicada en la etiqueta del producto comercial (350 cm³ ha⁻¹), correspondiendo a concentraciones entre 5,0 y 12,5 cm³ L⁻¹ del insecticida, es decir, entre 3,6 y 8,9 veces la concentración recomendada por Cenicafé (1,4 cm³ L⁻¹). Al respecto, estudios demuestran un mayor cubrimiento y cobertura en aplicaciones con equipos terrestres que con drones de aspersión (Pan et al., 2016; Zhang et al., 2019). Sin embargo, con estos últimos utilizando volúmenes iguales o inferiores a 100 L ha⁻¹ se ha logrado un control sobre plagas y enfermedades en diferentes cultivos, similar al obtenido con equipos terrestres que aplican más de 200 L ha⁻¹ (G. Wang et al., 2019; K. Wang et al., 2020; Zhang et al., 2019); dado que, generalmente, la cantidad del pesticida aplicada por hectárea es igual, tanto con drones como con equipos terrestres, la concentración en el primer caso aumenta considerablemente. Por ejemplo, el control de áfidos en el cultivo de pimienta tuvo una concentración del insecticida flonicamid entre 7 y 21 veces más con respecto a la aspersión terrestre (Xiao et al., 2020); de igual manera, en huertos de castaño, para el control del coleóptero *Curculio sikkimensis* Heller, la concentración de flubendiamida se incrementó 50 veces (Arakawa & Kamio, 2023); en el cultivo del café, para el control de *Hemileia vastatrix* y *Cercospora coffeicola*, la concentración del fungicida cyproconazol y la mezcla azoxystrobin más cyproconazol aumentó entre 28 y 76 veces (Vitória et al., 2023); Rodrigues (2024), afirma que el aumento de la concentración insecticida mejora la eficacia del control de la broca del café.

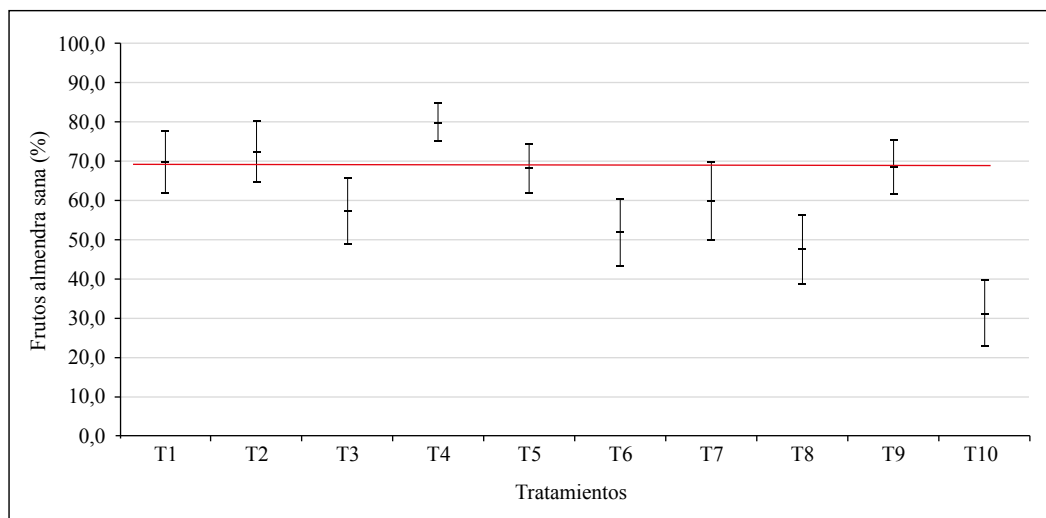


Figura 5. Promedio de porcentaje de frutos de café con almendra sana en cada tratamiento, obtenida con el dron DJI Agras MG -1S operando a 1 m s^{-1} y una altura de vuelo sobre el dosel del cultivo de 2,3 m. Naranjal, 2021

A pesar del incremento de la concentración aplicada, algunas investigaciones con drones de aspersión, han encontrado una reducción entre 25% y 66% de ingrediente activo por hectárea sin afectar la eficacia del control (Sreenivas et al., 2024; Xiao et al., 2020); en este sentido, dosis de 1.000 o $500\text{ cm}^3\text{ ha}^{-1}$, serían innecesarios y, posiblemente, podría utilizarse la dosis de etiqueta del producto ($350\text{ cm}^3\text{ L}^{-1}$) o menos, al aplicar volúmenes bajos de mezcla que permitan una concentración igual o mayor a $5,0\text{ cm}^3\text{ L}^{-1}$, para ello es necesario continuar los estudios y determinar si estos volúmenes ocasionan un cubrimiento óptimo.

Puede concluirse que:

Las aspersiones con drones para el control de la broca del café permiten obtener una adecuada distribución de las gotas en el estrato productivo de árboles de café de segunda a cuarta cosechas, cuando se usan boquillas TJ XR11001, TX4 y TX6, a una velocidad de 1 m s^{-1} , para las condiciones de este

estudio. La calidad física de las aspersiones permitió demostrar que pueden usarse drones para aplicar insecticidas para el control de la broca con eficacias similares a las obtenidas con el equipo de espalda con boquilla TX3 en la concentración de insecticida y volumen de mezcla, que se usa tradicionalmente en la caficultura colombiana.

Los resultados hallados también aportan conocimiento para el posible manejo de otras plagas o enfermedades que se ubican, particularmente, en los sectores del árbol evaluados en el presente estudio.

Es necesario validar estos resultados en lotes de diferentes pendientes, usando volúmenes por hectárea óptimos y limitando la dosis a la recomendada por la casa comercial.

Se recomienda realizar calibraciones y ajustes de operación de los drones para establecer los parámetros óptimos de vuelo como altura, ancho de faja y desplazamiento lateral o interlineado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Comité de Cafeteros del Quindío; a los Coordinadores y personal de las Estaciones Experimentales de Naranjal y Paraguaicito que participaron en el montaje de los ensayos; a los auxiliares Faber de los Ríos, de la disciplina de Entomología, a Juan Carlos Ortiz, de la disciplina de Poscosecha quien realizó todo el procesamiento de digitalización de las tarjetas y ajuste del software de análisis de imágenes; y al personal de las empresas operadoras de los drones. Esta

investigación fue financiada con recursos del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto ENT107005.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, curación de datos, investigación, metodología, administración del proyecto, visualización, redacción–borrador original: A.A.M; análisis formal, redacción–borrador original: L.C.I.Q; supervisión, visualización, redacción–borrador original: P.B.M.; todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Alvarenga, C. B. de, Zampiróli, R., Cunha, J. P. A. R. de, Rinaldi, P. C. N., Cunha, B. A. da, & Faria, L. O. (2024). Application rate and hydraulic tips used in remotely piloted aircraft affect the phytosanitary products in coffee plant canopies. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 46, e62969. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.62969>
- Arakawa, T., & Kamio, S. (2023). Control efficacy of UAV-based ultra-low-volume application of pesticide in chestnut orchards. *Plants*, 12(14), 2597. <https://doi.org/10.3390/plants12142597>
- Arcila-Moreno, A., Benavides Machado, P., & Mejía Orozco, J. (2015). Nueva alternativa de control químico para el manejo integrado de la broca del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 453, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0453>
- Arcila-Moreno, A., Duarte, A. F., Villalba, D. A., & Benavides-Machado, P. (2013). Nuevo producto en el manejo integrado de la broca del café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 437, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0437>
- Baio, F. H. R., Scarpin, I. M., & Silva, E. E. da. (2014). Papel hidrossensível e alternativo fotográfico em ensaios de deposição de gotas. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 9(4), 339-347. <https://doi.org/10.18011/bioeng2015v9n4p339-347>
- Benavides Machado, P., Ángel C., C. A., & Rivillas O., C. A. (2021). Sanidad vegetal. En *Centro Nacional de Investigaciones de Café. Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 133-178). Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/10791/00149>
- Benavides Machado, P., Gil-Palacio, Z. N., Constantino C, L. M., Villegas García, C., & Giraldo-Jaramillo, M. (2013). Plagas del café: Broca, minador, cochinillas harinosas, araña roja y monalónion. En Federación Nacional de Cafeteros (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 2, pp. 215-260). Cenicafé.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2017). *Anuario meteorológico cafetero 2016*. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2016>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2018). *Anuario meteorológico cafetero 2017*. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2017>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2022). *Anuario meteorológico cafetero 2021*. <https://doi.org/10.38141/10782/anu2021>
- Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Ouyang, F., Wang, G., Huang, X., Deng, X., & Cheng, S. (2020). Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, 10(2), 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>
- Crause, D. H., Vitória, E. L. da, Ribeiro, L. F. O., Ferreira, F. de A., Lan, Y., & Chen, P. (2023). Droplet deposition of leaf fertilizers applied by an unmanned aerial vehicle

- in *Coffea canephora* plants. *Agronomy*, 13(6), 1506. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061506>
- Cunha, J. P. A. R. da, Lopes, L. de L., & Alvarenga, C. B. de. (2024). Chemical control of coffee berry borer using unmanned aerial vehicle under different operating conditions. *AgriEngineering*, 6(2), 1639-1648. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020093>
- Cunha, M., Carvalho, C., & Marcal, A. R. S. (2012). Assessing the ability of image processing software to analyse spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosystems Engineering*, 111(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.002>
- Deveau, J. (2021a, julio 7). Comparing three brands of water sensitive paper – sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/3_wsp/
- Deveau, J. (2021b, julio 9). Assessing water sensitive paper – Part 1 – sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt1/
- Deveau, J. (2021c, julio 12). Assessing water sensitive paper – Part 2 – sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt2/
- Deveau, J. (2021d, julio 27). Assessing water sensitive paper – Part 3 – Sprayers 101. *Sprayers101*. https://sprayers101.com/assessing_wsp_pt3/
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., Hewitt, A. J., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., & O'Donnell, C. C. (2016). Assessing the deposition and canopy penetration of nozzles with different spray qualities in an oat (*Avena sativa* L.) canopy. *Crop protection*, 81, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.11.013>
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., O'Donnell, C. C., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., Coleman, C. E., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., & Hewitt, A. J. (2016). Assessing a novel smartphone application – SnapCard, compared to five imaging systems to quantify droplet deposition on artificial collectors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.022>
- Ferrazzini, H., & Zamora, E. (2004). *Calibración de equipos de aeroaplicación. Tablas y esquemas* (p. 43). Dirección General de Servicios Agrícolas República Oriental del Uruguay. <http://www.chasque.net/dgsa/nuevo/DivAnalisisDiagnostico/documentosDAYD/CalibequiposAEREOS.pdf>
- Fox, R. D., Derksen, R. C., Cooper, J. A., Krause, C. R., & Ozkan, H. E. (2003). Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive paper. *Applied engineering in agriculture*, 19(5), 549. <https://doi.org/10.13031/2013.15315>
- Grisso, R. D. (2019). *Droplet chart/selection guide*. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstreams/76053ef5-e359-44b1-b785-bfeb746eb18b/download>
- He, M., Qi, P., Han, L., & He, X. (2024). Study on spray evaluation: The key role of droplet collectors. *Agronomy*, 14(2), 305. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020305>
- Hołownicki, R., Doruchowski, G., Świechowski, W., & Jaeken, P. (2002). Methods of evaluation of spray deposit and coverage on artificial targets. *Electronic journal of polish agricultural universities*, 5(1), 3. <http://www.ejpau.media.pl/articles/volume5/issue1/engineering/art-03.pdf>
- Li, L., Hu, Z., Liu, Q., Yi, T., Han, P., Zhang, R., & Pan, L. (2022). Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard. *Frontiers in Plant Science*, 13, 981494. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.981494>
- Li, X., Andaloro, J. T., Lang, E. B., & Pan, Y. (2019, julio 7-10). *Best management practices for unmanned aerial vehicles (UAVs) application of insecticide products on rice*. 2019 ASABE Annual International Meeting, Boston, Massachusetts. <https://doi.org/10.13031/aim.201901493>
- Lou, Z., Xin, F., Han, X., Lan, Y., Duan, T., & Fu, W. (2018). Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9), 187. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090187>
- Matthews, G. A. (2000). *Pesticide application methods* (Third edition). Blackwell Science Ltd.
- Meng, Y., Su, J., Song, J., Chen, W.-H., & Lan, Y. (2020). Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105282. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105282>
- Merani, V. H., Guilino, F., Ponce, M., Vázquez, J. M., Larrieu, L., Giambelluca, A. L., Platz, P., Tour, S., & Mur, M. (2021). Pulverizaciones agrícolas: Comparación de metodologías para su evaluación. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 37(3), 325-337. <https://doi.org/10.29393/CHJAAS37-33PAVM90033>
- Montoya, D. F., & Villalba, D. A. (2013). Evaluación física de las aplicaciones con diferentes equipos de aspersión

- para el manejo de la broca. *Revista Cenicafé*, 64(2), 48-58. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/530>
- Moraes, H. M. F. e. (2022). *Aplicação de pesticidas com veículos aéreos não tripulados nas culturas de café, citros e feijão* [Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Viçosa]. <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.783>
- Pan, Z., Kejian, W., Qiang, L., Shaolan, H., Shilai, Y., Rangjin, X., Yongqiang, Z., Yanyan, M., & Lie, D. (2017). Droplet distribution and control against citrus leafminer with UAV spraying. *International Journal of Robotics and Automation*, 32(3), 299-307. <https://doi.org/10.2316/journal.206.2017.3.206-4980>
- Pan, Z., Lie, D., Qiang, L., Shaolan, H., Shilai, Y., Yande, L., Yongxu, Y., & Haiyang, P. (2016). Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(4), 45-52. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v9i4.2178>
- Qin, W.-C., Qiu, B.-J., Xue, X.-Y., Chen, C., Xu, Z.-F., & Zhou, Q.-Q. (2016). Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*, 85, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.018>
- Rodrigues, A. V. (2024). *Aplicação de inseticida em volumes de calda baixos para controle da broca-do-café com uso de aeronave remotamente pilotada* [Tesis de Maestría, Universidade Estadual Paulista]. <https://hdl.handle.net/11449/257515>
- Sesquile Peña, J. D. (2014). *Evaluación de la calidad de aplicación de plaguicidas en un cultivo de espinaca* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52003>
- Shan, C., Xue, C., Zhang, L., Song, C., Kaousar, R., Wang, G., & Lan, Y. (2024). Effects of different spray parameters of plant protection UAV on the deposition characteristics of droplets in apple trees. *Crop Protection*, 184, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106835>
- Souza, F. G., Portes, M. F., Silva, M. V., Teixeira, M. M., & Furtado Júnior, M. R. (2022). Impact of sprayer drone flight height on droplet spectrum in mountainous coffee plantation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26, 901-906. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p901-906>
- Sreenivas, A. G., Ranganath, Wazid, Vijayalakshmi, & Shivayogiyappa. (2024). Unmanned aerial vehicle (UAVs): A novel spraying technique for management of sucking insect pests in cotton ecosystem. *Journal of Biosystems Engineering*, 49(2), 103-111. <https://doi.org/10.1007/s42853-024-00219-y>
- Syngenta. (2020). *Manual en tecnología de aplicación* (p. 94). https://www.syngenta.com.ar/sites/g/files/kgtny396/files/migration/f/2021/04/16/manual_en_tecnologia_de_aplicacion_syngenta.pdf
- Tabares-Carrillo, J. E., Villalba-Gault, D. A., Bustillo-Pardey, A. E., & Vallejo-Espinosa, L. F. (2008). Eficacia de insecticidas para el control de la broca del café usando diferentes equipos de aspersión. *Revista Cenicafé*, 59(3), 227-237. <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/136>
- Tang, Y., Hou, C. J., Luo, S. M., Lin, J. T., Yang, Z., & Huang, W. F. (2018). Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle. *Computers and electronics in agriculture*, 148, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.026>
- TeeJet® Technologies. (2023a). *A user's guide to spray technology LI-TJ416* (p.103).
- TeeJet® Technologies. (2023b). *Catalog 52-M* (p. 204). <https://www.teejet.com/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat52-m.pdf>
- Teixeira, M. M. (2010). Capítulo 5. Estudio de la población de gotas de pulverización. En J. C. Magdalena, B. Castillo, A. Di Prinzio, I. Homer Bannister, & J. Villalba (Eds.), *Tecnología de aplicación de agroquímicos* (pp. 67-76). INTA Alto Valle. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/16353>
- The Royal Meteorological Society. (s.f.). *The Beaufort Wind Scale. Weather. Recuperado el 17 de julio de 2025*. <https://www.rmets.org/metmatters/beaufort-wind-scale>
- Verma, A., Singh, M., Parmar, R. P., & Bhullar, K. S. (2022). Feasibility study on hexacopter UAV based sprayer for application of environment-friendly biopesticide in guava orchard. *Journal of Environmental Biology*, 43(1), 97-104. <https://doi.org/10.22438/JEB/43/1/MRN-1912>
- Villalba-Gault, D. A. (2008). Tecnología de aplicación y equipos de aspersión de agroquímicos. En A. E. Bustillo. (Ed.), *Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana* (pp. 201-225). Cenicafé.
- Vitória, E. L. da, Krohling, C. A., Borges, F. R. P., Ribeiro, L. F. O., Ribeiro, M. E. A., Chen, P., Lan, Y., Wang, S., Moraes, H. M. F. e, & Furtado Júnior, M. R. (2023). Efficiency of fungicide application using an unmanned aerial vehicle and pneumatic sprayer for control of *Hemileia vastatrix* and *Cercospora coffeicola* in mountain coffee

crops. *Agronomy*, 13(2), 340. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020340>

Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & 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 sciences*, 9(2), 218. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/2/218>

Wang, K., Li, L., Lü, Q., Yi, S., Zheng, Y., Xie, R., Ma, Y., He, S., & Deng, L. (2020). UAV spray technology for the citrus orchard: Taking control of the *Diaphorina citri* and *Phyllocnistis citrella* as examples. *Scientia Agricultura Sinica*, 53(17), 3509-3517. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2020.17.008>

Xiao, Q., Du, R., Yang, L., Han, X., Zhao, S., Zhang, G., Fu, W., Wang, G., & Lan, Y. (2020). Comparison of droplet deposition control efficacy on *Phytophthora capsica* and aphids in the processing pepper field of the unmanned

aerial vehicle and knapsack sprayer. *Agronomy*, 10(2), 215. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020215>

Xu, G., Zhang, R., Chen, L., Tang, Q., Xu, M., & Zhang, W. (2019). Assessing the ability of image processing methods of droplets sprayed on water sensitive papers for aerial application. En D. Li (Ed.), *Computer and Computing Technologies in Agriculture X* (Vol. 509, pp. 10-19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06155-5_2

Zhang, X.-Q., Liang, Y.-J., Qin, Z.-Q., Li, D.-W., Wei, C.-Y., Wei, J.-J., Li, Y.-R., & Song, X.-P. (2019). Application of multi-rotor unmanned aerial vehicle application in management of stem borer (Lepidoptera) in sugarcane. *Sugar Tech*, 21(5), 847-852. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0695-y>

Zhu, H., Salyani, M., & Fox, R. D. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(1), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003>