



Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

Evaluación de la eficiencia del tamaño de gota en aplicación aérea de fungicidas para controlar Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis*) con dron en plantaciones de banano

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo

Autores:

Raúl Eduardo Cañetaco Barriga

Karen Nathalia Chalco Siguachi

Director:

Walter Iván Larriva Coronel

ORCID:  0000-0002-9292-1119

Cuenca, Ecuador

2026-02-18

Resumen

La Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) es una de las enfermedades más destructivas que afecta la producción de banano en Ecuador, generando importantes pérdidas económicas y reduciendo la productividad del cultivo. Tradicionalmente, el control de esta enfermedad se realiza mediante fumigaciones aéreas con avionetas, siendo un método que cubre grandes áreas, pero presenta limitaciones por su alto consumo de insumos y elevado riesgo de deriva. Ante ello, la presente investigación evaluó la eficiencia del tamaño de gota en la aplicación aérea de fungicidas con drones, comparando su desempeño frente al método convencional con avioneta. El estudio se realizó bajo un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos; tres aplicaciones con dron con diferentes tamaños de gota (200 μm , 250 μm y 300 μm) y un control con avioneta (235 μm). Se evaluaron variables de cobertura foliar mediante el uso de papeles hidrosensibles, incidencia y severidad de la enfermedad (usando la escala de Stover modificada por Gauhl) y costos operativos de fumigación por hectárea. Los resultados mostraron que los tamaños de gota (200–235 μm) correspondientes al tratamiento 1 y control fueron los más efectivos para controlar la enfermedad, reduciendo la severidad hasta un 2,6% y 1,4%, respectivamente. La aplicación con dron demostró ventajas muy significativas con respecto a la precisión y reducción de deriva. El análisis de costos reveló que las aplicaciones con dron fueron económicamente favorables, con el costo más bajo por hectárea con \$138,76, en comparación con \$150,67 para la aplicación con avioneta. Se concluye que el uso de drones es una alternativa tanto económicamente como técnica para el control de *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra).

Palabras clave del autor: Sigatoka Negra, drones, avioneta, fumigación, banano



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Black Sigatoka (*Mycosphaerella tiensis*) is one of the most destructive diseases affecting banana production in Ecuador, causing significant economic losses and reducing crop productivity. Traditionally, this disease has been controlled by aerial spraying with light aircraft, a method that covers large areas but has limitations due to its high consumption of inputs and high risk of drift. In view of this, the present research evaluated the efficiency of droplet size in the aerial application of fungicides with drones, comparing their performance with the conventional method using light aircraft. The study was conducted under a completely randomized design (CRD) with four treatments: three drone applications with different droplet sizes (200 μm , 250 μm , and 300 μm) and a control with a light aircraft (235 μm). Leaf coverage variables were evaluated using water-sensitive paper, disease incidence and severity (using the Stover scale modified by Gauhl), and operational costs of spraying per hectare. The results showed that the droplet sizes (200-235 μm) corresponding to treatment 1 and the control were the most effective in controlling the disease, reducing severity by up to 2.6% and 1.4%, respectively. The drone application demonstrated very significant advantages in terms of precision and drift reduction. The cost analysis revealed that drone applications were economically favorable, with the lowest cost per hectare at \$138.76, compared to \$150.67 for application by light aircraft. It is concluded that the use of drones is both an economical and technical alternative for the control of *Mycosphaerella fijiensis* (Black sigatoka).

Author Keywords: Black Sigatoka, drones, light aircraft, fumigation, banana



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

I. Introducción	12
II. Objetivos.....	14
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos específicos	14
III. MARCO TEÓRICO	15
3.1. Cultivo de Banano.....	15
3.1.1. Importancia y comercialización	15
3.2. Sigatoka Negra	16
3.2.1. Origen	16
3.2.2. Ciclo de vida y dispersión de la Sigatoka Negra.....	16
3.2.3. Control de la Sigatoka Negra	17
3.2.4. Manejo integrado de Sigatoka Negra	17
3.2.5. Estrategias químicas para el control de Sigatoka Negra	18
3.3. Agricultura de precisión.....	18
3.3.1. Drones	18
3.3.2. Tamaño de gota.....	19
3.3.3. Clasificación de tamaño de gota	19
3.3.4. Presión de aplicación	19
3.3.5. Deriva (Drift).....	20
3.3.6. Papel sensible al agua.	20
3.4. Diferencias de uso entre avioneta y dron para la aplicación de insumos agrícolas.....	21
IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	22
4.1. Materiales	22
4.2. Metodología	22
4.2.1. Descripción área de estudio	22
4.2.2. Diseño Experimental	23
4.2.3. Metodología para el objetivo uno	25
4.2.4. Metodología para el segundo objetivo.....	27
4.2.5. Análisis de los datos:.....	27
V. Resultados.....	28
5.1. Área de fumigación	28
5.2. Cobertura fumigada.....	29
5.3. Incidencia.....	30

5.4. Severidad.....	30
5.5. Costos por servicio de fumigación para 1 hectárea	32
VI. Discusión.....	34
VII. Conclusión.....	36
VIII. Recomendaciones.....	37
IX. Referencias.....	38
X. Anexos	42

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de vida de la Sigatoka Negra.....	16
Figura 2. Mapa de ubicación.....	22
Figura 3. Representación gráfica de la unidad experimental.....	23
Figura 4. Descripción gráfica por el método de Stover modificada por Gauhl.....	25
Figura 5. Evaluación de cobertura fumigada.....	29

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación entre el uso de avionetas y drones para fumigación.....	20
Tabla 2. Materiales utilizados en la ejecución del proyecto.....	21
Tabla 3. Tratamientos empleados.....	23
Tabla 4. Escala de Stover modificada por Gauhl.....	25
Tabla 5. Resumen de Test post hoc de Dunn aplicado a 4 tratamientos en cuanto al área total cm ² fumigado con drone y avioneta.....	27
Tabla 6. Promedios de cobertura fumigada.....	28
Tabla 7. Número de plantas totales con presencia de sigatoka negra.....	29
Tabla 8. Severidad inicial y final, en base a la escala de Stover.....	30
Tabla 9. Costos por ciclo de fumigación.....	31
Tabla 10. Costos totales de fumigación.....	31

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por brindarnos la oportunidad de poder culminar de la manera más bonita y feliz una de las etapas más lindas de nuestra vida, siendo el responsable de darnos la bendición de compartir días y momentos bellos junto a nuestros seres queridos. Agradecer a nuestras familias, principalmente a nuestros padres y hermanos los cuales son el motor principal por el cual seguimos adelante y los cuales son nuestra motivación y ejemplo de superación y resiliencia siempre creyendo en nosotros y en nuestras capacidades

También agradecer al Ing. Walter Larriva, director de nuestro trabajo de titulación por brindarnos su apoyo, conocimiento, sabiduría y guía para poder lograr nuestra meta. De igual manera por su apoyo y ayuda en esta etapa al Ing. Segundo Maita y al Ing. Patricio Castro, tribunal de revisión de nuestro trabajo, debido a todo el tiempo, sugerencias y experiencia la cual fue de suma importancia en este trabajo de titulación.

Por último, agradecer a todos los docentes que formaron parte de nuestra formación académica, desde el primer día en la universidad hasta el final de nuestra carrera universitaria quienes fueron los responsables de brindar el conocimiento necesario para ser unos profesionales con ética y respeto en nuestro campo. De igual manera a la Universidad de Cuenca, especialmente a la Facultad de Ciencias agropecuarias por todos los momentos vividos.

Raúl Cañetaco y Karen Chalco

Dedicatoria

Este trabajo de investigación va dedicado principalmente a Dios por brindarme la salud y fuerzas para siempre seguir adelante tanto en mi vida personal como en mi vida académica. De igual manera, va dedicado con todo mi amor a los pilares de mi existencia: a mi mami, Maribel Barriga, quien ha sido y será mi motor principal por su apoyo y cariño incondicional, por estar a mi lado a pesar de mis errores también por ser mi razón para esforzarme cada día para hacerla sentir orgullosa; a mi papi, Jannhyl Cañetaco, quien, aunque a veces la distancia nos separe, siempre está presente gracias a él soy un hombre con carácter, respeto, disciplina y responsabilidad, capaz de afrontar cualquier situación. Juntos han hecho todo lo posible para que cumpla mis sueños, apoyándome en cada meta, como en mis tiempos de ciclista, y son los responsables de la persona llena de valores y actitud que soy hoy. El sacrificio que han hecho por mí es tan grande que no podría pagarlos en esta vida ni en otra.

Desde el corazón, dedico este logro a mi familia, la mejor del mundo, que ha celebrado con alegría y emoción cada uno de mis triunfos, por pequeños que fueran, y siempre me ha hecho sentir su orgullo. Con especial cariño, se lo dedico a mis abuelas Mercedes y Jenny, a mi abuelo Raúl, a mis tíos Lenin, Gladys, Johnny, Katy, Guillermo, Cristian, Israel y Marine, y a todos mis primos, que son muchos, pero nunca faltan. Llevo conmigo, además, el recuerdo de mi tío Arturo y mi abuelo Gerardo, que desde el cielo siguen acompañándome y sintiéndose orgullosos.

Asimismo, le dedico esto a una persona que nunca creí que llegara a ser así de importante en mi vida: a mi novia Zayetzi, la cual, desde séptimo ciclo que comencé a salir con ella, hizo que mi vida cambiara a mejor. Soportando mi carácter fuerte, mis enojos, mis actitudes raras y mi poca paciencia, ha estado ahí para brindarme todo su cariño y hacer que no me sienta solo en Cuenca, al darme la felicidad de tener a alguien tan buena, linda y feliz como ella. No tengo palabras para describirla, pero ella sabe que, desde el fondo de mi corazón, todo lo que hago por ella es genuino y verdadero, así como lo es un amor real. Quiero dedicarle este logro ya que ella ha estado para mí siempre, ayudándome y apoyándome tanto académica como emocionalmente; este logro también es tuyo.

También deseo dedicar este logro a esos compañeros de universidad que, con el tiempo, se convirtieron en amigos entrañables: a mi mejor amigo Nicolás, y a Oscar, Esteban, Nayely, Bryan, Kevin, Cinthia, Karen, Ángel y José Luis, con quienes compartí no sólo aula, sino risas, esfuerzos y sueños. Agradezco cada momento, tanto los buenos como los difíciles: esos días de estrés por las notas bajas o los regaños de los profesores, pero también las tardes felices

en la Ruta 67, las parrilladas improvisadas después de clase, las salidas a bailar, los almuerzos en el Iberia y tantas otras experiencias que hicieron de esta etapa algo inolvidable. Su apoyo incondicional, su compañía en los momentos clave y la amistad que construimos juntos hicieron que este camino valiera aún más la pena.

Por último, dedicárselo a mis docentes, que me guiaron desde el inicio hasta el final y, más que darme clases, me han dado su apoyo y experiencia, así como consejos para seguir adelante. A los ingenieros Walter Larriva, Mélida Rocano, Adriana Tenesaca y Lourdes Díaz, quienes me han brindado la confianza, sabiduría y amistad sincera a lo largo de mi carrera universitaria.

Raúl Cañetaco

Dedicatoria

Este trabajo de investigación va dirigido primeramente a Dios por darme la fuerza y el valor necesario para enfrentar cada situación de mi vida, tanto personal como académica. De igual manera, dedico con mucho amor a mis padres Carlos Eduardo Chalco Guncay y María Esperanza Siguachi Cuzco, quienes me brindaron su apoyo incondicional y por esforzarse cada día para que nuestra familia siga adelante y por enseñarme el valor del respeto, disciplina y responsabilidad. Dedico este logro a toda mi familia, hermanos y abuelos, que me ayudaron en este proceso, por sus consejos sabios, por darme amor, cariño y por esa alegría que me transmitían que me ayudaba a seguir adelante y no rendirme.

Gracias a todos por su apoyo incondicional en cada paso de mi vida desde que pisé este mundo, al estar hoy en este punto de mi existencia es porque sé que tengo una misión que cumplir, así que esto es por y para ustedes.

También dedico este logro a esas personas que con el transcurso del tiempo se volvieron indispensables como lo son mis amigos de la universidad: Andrea, Lesly, Erika, Raúl, Jonathan que con ellos compartí las mejores experiencias de mi vida, conocimos nuevos lugares juntos, las salidas a bailar, a comer después de clases. Coincidir con ustedes fue lo mejor que me pudo pasar en mi vida universitaria y deseo que todos cumplamos nuestras metas, los quiero.

Finalmente, agradezco a los docentes que fueron parte esencial de nuestra experiencia, que compartieron con nosotros su sabiduría, risas, anécdotas, el mismo que ha sido enriquecedor a lo largo de nuestra formación como Ingeniera Agrónoma.

Karen Chalco

I. Introducción

En Ecuador el sector bananero representa una de las columnas vertebrales de su economía. Ecuador es reconocido mundialmente por su producción de bananos, el mismo que contribuye significativamente al Producto Interno Bruto (PIB) y a la generación de empleos. Según Vásquez (2009), el banano constituye aproximadamente el 2% del PIB total del Ecuador y representa el 35% del PIB agrícola, teniendo peso en la economía del país. En 2022, la producción bananera mostró una participación activa en los mercados internacionales, con 413 empresas dedicadas a la comercialización y exportación del banano, mostrando su importancia en la economía nacional. El sector bananero en nuestro país involucra a más de 35,490 trabajadores, la mayoría de las provincias de El Oro, Guayas y Los Ríos con un total del 90% de empleo en este sector (CFN, 2024). Este trabajo evidencia la importancia socioeconómica y cultural de la actividad bananera, además de ser una fuente de ingresos, da empleo a gran parte de la población que se dedica a la agricultura.

A pesar del éxito y la expansión del sector, la producción de banano enfrenta diversos desafíos que amenazan su sostenibilidad y rentabilidad. Entre los problemas fitosanitarios que enfrenta el banano se encuentra la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) es destacada por ser una enfermedad dañina ya que afecta gravemente a las plantaciones de banano y compromete la producción a nivel mundial, especialmente en el Ecuador, donde la industria juega un papel fundamental para la economía. La sigatoka negra es más resistente que su predecesora, la sigatoka amarilla, ya que su capacidad de propagación ha demostrado que se adapta a cambios climáticos abruptos, como los que se han generado por fenómenos meteorológicos como El Niño (Marín et al., 2003).

La enfermedad ha provocado graves pérdidas en las plantaciones, alcanzando en algunos casos la pérdida total de la superficie cultivada. Se presenta en las hojas de la planta, produciendo necrosis severa que reduce la capacidad fotosintética, deteriorando tanto la calidad como la cantidad de producto final. Cuenta con seis fases distintas, desde la inoculación del hongo hasta el deterioro global de la planta, lo que, en casos severos, conduce a la muerte de la misma (Flores, 2015). Por lo tanto, es necesario implementar estrategias eficaces de control y manejo fitosanitario que reduzca el impacto de la enfermedad en la producción de banano.

Actualmente, las prácticas tradicionales de manejo incluyen la aplicación de fungicidas por métodos manuales o maquinaria convencional, resultando ineficientes o costosos, además de tener un alto impacto ambiental por el uso excesivo de pesticidas y el consumo de recursos como agua y energía. La agricultura de precisión surge como método alternativo que promete

optimizar los procesos de producción, reducir costos y minimizar los efectos negativos al medio ambiente. En particular el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (UAVs), ha abierto nuevas oportunidades para mejorar los procesos de fumigación, control de plagas y enfermedades y el manejo en general del cultivo de banano, el mismo que nos permite una aplicación rápida, precisa y eficiente de insumos (Rao et al., 2016).

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito comparar dos tecnologías como el dron y la avioneta, tomando como referencia el tamaño de gota generado durante la fumigación, siendo un factor determinante en la cobertura y efectividad en el control de sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*). Gotas demasiado grandes o pequeñas pueden disminuir la protección del cultivo, reducir la eficiencia del tratamiento e incluso causar daños por dispersión excesiva (Drone Innovation COL, 2024). De acuerdo con la normativa establecida por la *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASAE), se recomienda que el rango de tamaño de gota para la aplicación de productos agrícolas se mantenga entre 150 y 400 μm , ya que este intervalo maximiza la deposición del fungicida y minimiza los riesgos de deriva o contaminación hacia otros cultivos. Por lo tanto, la presente investigación busca determinar las condiciones óptimas de aplicación, especialmente en el uso de drones para la fumigación en plantaciones de banano, donde factores climáticos y las características técnicas del equipo influyen significativamente en los resultados obtenidos (Rao et al., 2016).

II. Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar la eficiencia del tamaño de gota en aplicación aérea de fungicidas para controlar *Mycosphaerella fijiensis* (Sigatoka Negra) con dron en plantaciones de banano.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la relación entre el tamaño de gota generado por drones y la efectividad en la reducción de la incidencia y severidad de la Sigatoka Negra, evaluando la cobertura foliar alcanzada y el control de la enfermedad en diferentes estadios de desarrollo de la planta de banano.
- Evaluar los costos variables de aplicación aérea de fungicidas mediante drones, en comparación con métodos tradicionales de fumigación en plantaciones de banano afectadas por la Sigatoka Negra.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Cultivo de Banano

En Ecuador la producción de banano se ha realizado en grandes cantidades a partir de los años 1944 y 1948. La mayor parte de productores de banano empezaron sus operaciones en la presidencia de Galo Plaza, quien decretó a la producción de banano como prioridad nacional (Cioppo, 2015).

El cultivo de banano se encuentra en cuarto lugar después del maíz, trigo y arroz teniendo un promedio del 15% de la producción mundial. El banano es un cultivo de gran importancia en el sector agrícola y económico, siendo una fuente de ingresos importante para las familias de agricultores dedicadas a este cultivo en el Ecuador (Vignola et al., 2018).

3.1.1. Importancia y comercialización

El género Musaceas es uno de los más importantes en la parte socioeconómica y alimentaria del Ecuador (Troya, 2019). La mayor parte de su producción se encuentra en áreas tropicales y subtropicales, y es un aporte en la soberanía alimentaria y económica en el mundo entero (Herrera, 2018). En Ecuador el cultivo de banano se distribuye en las provincias de Manabí, Los Ríos, Guayas, El Oro y Esmeraldas, generando anualmente fuentes de empleo durante todo el proceso productivo de esta fruta. En el año 2015 la producción incrementó un 5%, mediante este mejoramiento se pudo financiar mejoras de infraestructura, fertilización y reducir el impacto de la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) (Cioppo, 2015).

El cultivo de banano ecuatoriano es uno de los productos con mayor demanda en el mercado internacional, siendo el segundo rubro de mayor exportación del país, por lo que el 30% de la oferta mundial de banano proviene de nuestro país. En el año 2015, aproximadamente el 50% de las exportaciones de banano ecuatoriano se destinó a Rusia, Estados Unidos, y Alemania, con participaciones de 20.22%, 15.39% y 11.97%, respectivamente. Entre otros destinos con menor participación tenemos a Turquía con 7.67%, China con 4.62%, Bélgica con 4.50% y Argentina con 4.13% (Mariscal, 2020).

Estas exportaciones generaron ingresos de USD 3.79 mil millones, un aumento del 15%. El precio promedio de producción osciló entre USD 6.25 y USD 6.50 por caja de 43 libras (CFN, 2024). Las provincias de El Oro, Guayas y Los Ríos concentran la producción, operada por 645 empresas de distintos tamaños. Debido a la popularidad de los bananos en el mercado de importación, las cadenas de valor mundiales se caracterizan por una intensa competitividad entre los actores del mercado de todos los niveles incluyendo al sector

minorista (Mariscal, 2020). En total, el sector emplea a 35,490 personas, lo que equivale al 90% de la fuerza laboral del sector bananero (CFN, 2024).

3.2. Sigatoka Negra

3.2.1. Origen

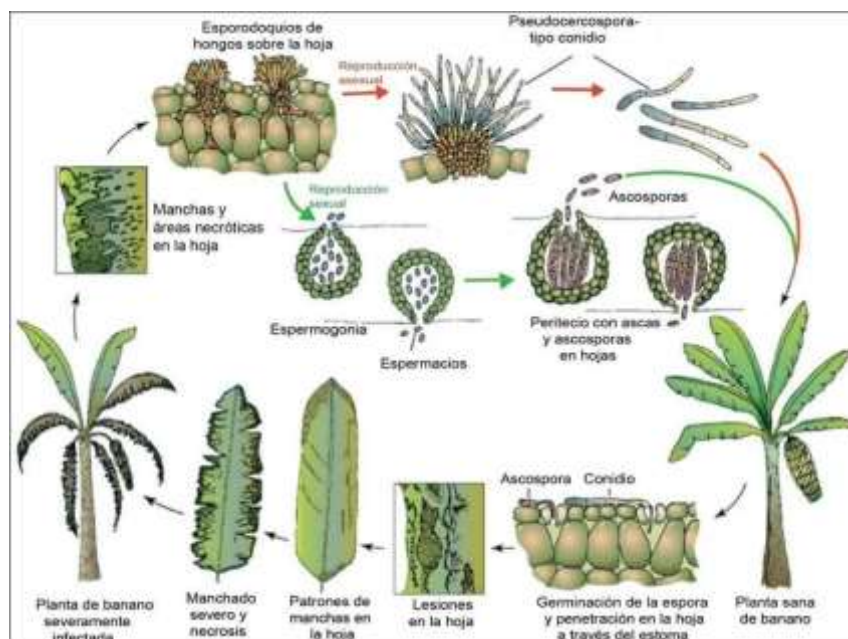
La Sigatoka negra, causada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis*, fue identificada por primera vez en Fiji en 1963. Desde su descubrimiento, se ha propagado rápidamente por regiones tropicales y subtropicales, afectando de manera severa las plantaciones de banano y plátano en América Latina, Asia y África. Este patógeno pertenece al complejo de enfermedades foliares conocidas como Sigatoka, que también incluye la Sigatoka amarilla (*Mycosphaerella musicola*); sin embargo, la Sigatoka negra es mucho más agresiva y difícil de controlar debido a su capacidad para generar resistencia a fungicidas y su rápida dispersión a través del viento y la lluvia (Marín et al., 2003).

3.2.2. Ciclo de vida y dispersión de la Sigatoka Negra

El hongo *Mycosphaerella fijiensis* que causa la Sigatoka negra sigue un ciclo de vida complejo. Las esporas (ascosporas y conidios) se dispersan principalmente por el viento y la lluvia, infectando las hojas jóvenes de las plantas de banano. El hongo penetra a través de las estomas y comienza a desarrollarse en el tejido foliar, causando manchas que inicialmente son pequeñas y amarillas, pero que rápidamente se oscurecen y se extienden, limitando la capacidad fotosintética de la planta. La diseminación ocurre principalmente durante la temporada de lluvias, cuando las condiciones son de alta humedad y temperaturas entre 24 y 28 °C favorecen la esporulación y la infección. La infección severa provoca la caída prematura de las hojas, lo que reduce significativamente el rendimiento de la planta (Romero y Sutton, 1997).

Figura 1

Ciclo de vida de la Sigatoka Negra



Fuente: Intagri, 2018.

3.2.3. Control de la Sigatoka Negra

El control de la Sigatoka negra ha sido un desafío importante para los productores de banano debido a la necesidad de múltiples aplicaciones de fungicidas sistémicos y protectores durante todo el ciclo de cultivo. Los fungicidas como los triazoles y estrobilurinas han sido efectivos en algunas regiones, aunque su uso excesivo ha provocado la aparición de cepas resistentes del hongo. Además, el manejo integrado de plagas (MIP) ha ganado terreno, combinando el uso de fungicidas con prácticas culturales, como la poda de hojas afectadas, la mejora del drenaje y la reducción de la densidad de plantas para minimizar la humedad (Pérez, 2012).

3.2.4. Manejo integrado de Sigatoka Negra

El Manejo Integrado de Plagas (MIP) es fundamental para combatir la Sigatoka negra de manera sostenible. Este enfoque incluye la integración de varias prácticas de manejo para reducir la presión de la enfermedad y mejorar la productividad del cultivo. Entre estas prácticas se encuentran la poda sanitaria de hojas infectadas, la mejora del drenaje para reducir la humedad alrededor de las plantas, la rotación de cultivos y la reducción de la densidad de plantaciones para mejorar la circulación del aire (Rivas y Rosales, 2003). Los métodos de manejo para el control de esta enfermedad pueden ser también biológicos como lo son los hongos del género *Trichoderma*, los cuales se emplean en muchos cultivares de plantas en

muchas partes del mundo. Este agente biológico puede inhibir gran parte del patógeno reduciendo su propagación y controlando su crecimiento (Sagratzki et al., 2015).

3.2.5. Estrategias químicas para el control de Sigatoka Negra

El control químico sigue siendo una de las estrategias principales para manejar la Sigatoka negra. Los productores aplican una combinación de fungicidas protectores y sistémicos para frenar el desarrollo de la enfermedad. Entre los fungicidas más comunes se encuentran los triazoles, estrobilurinas y bencimidazoles; sin embargo, el uso repetido de estos productos ha generado una creciente preocupación por la resistencia fungicida en varias regiones del mundo. En respuesta, los agricultores han adoptado programas de manejo de fungicidas que implican la rotación de productos con diferentes modos de acción y la reducción de la cantidad de aplicaciones, apoyándose también en la vigilancia continua para detectar posibles fallos en el control (Pérez, 2012).

3.3. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un concepto el cual se usa en la mayoría de sectores agropecuarios debido a su concepto moderno, lleno de innovaciones y ventajas para optimizar procesos como también mejoras que facilitan la producción agrícola, esto debido a que se requieren menos insumos (agua, fertilizantes, energía, etc). La principal función de este tipo de agricultura es la reducción de costos y recursos perecibles que normalmente hacen que la agricultura convencional sea más nociva para el medio ambiente y la economía en distintos sectores agrícolas del mundo (Schrijver, 2016).

3.3.1. Drones

En la actualidad, el uso de nuevas tecnologías agrícolas ha puesto un punto de crecimiento para la mejora y eficiencia de la agricultura en el mundo entero. El uso de vehículos aéreos no tripulados (Drone o VANT) ayuda a resolver problemáticas muy importantes en el agro, como lo son las imágenes, aplicaciones foliares, sistematización y posicionamiento satelital, información geográfica, entre otros. Haciendo que la agricultura sea más fácil y eficaz al momento de utilizar alguna de las características que posee este tipo de herramientas que nos brinda la agricultura de precisión (Koh y Wich, 2012). Al día de hoy, los drones se utilizan en varios campos, uno de estos es la aspersión de agroquímicos y fertilizantes, los cuales mejoran considerablemente la aplicación y el consumo de dichos productos, siendo esta una alternativa más rentable al momento de aplicar cualquier tipo de producto en el campo, mejorando su aplicación y reduciendo el uso de recursos hídricos y químicos que se usan en las fumigaciones (Espitia y Santiago, 2021).

3.3.2. *Tamaño de gota*

El tamaño de las gotas es un factor crítico en la aplicación de fungicidas, ya que una correcta gestión de este aspecto reduce las pérdidas por deriva. Según Matamoros (2015) destaca diferencias entre los métodos de aplicación con *micronair* y boquillas. Las boquillas utilizadas en aviones promedian una cobertura de 0.6 metros lineales y un tipo de boquillas de medidas “24/60” (24 milésimas de pulgada a un ángulo de 60°), mientras que el *micronair* alcanza una cobertura de 2.0 metros lineales “24/12” (24 milésimas de pulgada a un ángulo de 60°), con un tamaño de gota que varía entre 200 y 250 micras. Esto permite una mayor cobertura y eficacia en la distribución de los fungicidas.

La densidad de gotas también es fundamental. Para fungicidas de contacto, se requiere una aplicación de 50 a 70 gotas por cm², mientras que los fungicidas sistémicos necesitan entre 20 y 30 gotas por cm². Además, es crucial considerar el tamaño de las gotas para minimizar las pérdidas por deriva y evaporación durante las fumigaciones, asegurando un mejor control de enfermedades (García et al., 2022).

3.3.3. *Clasificación de tamaño de gota*

La Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE) y la Organización Internacional de Normalización (ISO) detallan una clasificación de tamaños de gota ([ISO], 2018), mediante el diámetro volumétrico medio (Dv_{50}):

- **Muy finas:** < 100 μm (alto riesgo de deriva).
- **Finas:** 100–200 μm (usadas en insecticidas y fungicidas).
- **Medias:** 200–300 μm (balance entre cobertura y deriva).
- **Gruesas:** 300–400 μm (recomendadas para herbicidas).
- **Muy gruesas:** > 400 μm (baja deriva, riesgo de escurrimiento) ([ASABE], 2009).

3.3.4. *Presión de aplicación*

El tamaño de gota depende de la presión a la que esta se aplique.

Presión Alta (≥ 4 bar)

Cuando se incrementa la presión se genera gotas muy finas debido a la alta fuerza que se genera al momento de atomizar. El Dv_{50} (diámetro medio volumétrico) puede disminuir 20–30% al pasar de 2 bar a 4 bar (Cunha, Farnese, & Olivet, 2012).

Presión Baja (1–2 bar)

Debido a que la presión con la que se atomiza es menor a 2 bar, el tamaño de la gota se vuelve más grueso con un tamaño de $> 300 \mu\text{m}$. Siendo esta la aplicación ideal para herbicidas debido a que su efecto deriva es mínima (Nuyttens et al., 2007).

3.3.5. Deriva (Drift)

La deriva es la pérdida de producto la cual queda fuera del área del objetivo debido a la fuerza del viento la cual hace que falle la aplicación. El tamaño de gota menor a $<150 \mu\text{m}$ es más susceptible a sufrir este efecto debido al tamaño de su partícula, la cual la hace extremadamente ligera (Fritz et al., 2019).

3.3.6. Papel sensible al agua.

Son un tipo de papel especial de color amarillo la cual se tiñe de azul cuando entra en contacto con un medio acuoso. Es ampliamente utilizado en la agricultura para desarrollar estudios o análisis sobre las pulverizaciones de bajo y alto volumen en instrumentos agrícolas; dicho papel o tarjeta se coloca en el área o en el objeto el cual queremos analizar la cobertura de pulverización la cual se mide por gotas/cm². Estas tarjetas se utilizan muy frecuentemente en las prácticas agrícolas para controlar las aplicaciones de fungicidas, fertilizantes, entre otros métodos de pulverización aplicables a cultivos (Balestrini, 2015).

3.4. Diferencias de uso entre avioneta y dron para la aplicación de insumos agrícolas.

Tabla 1

Comparación entre el uso de avionetas y drones para fumigación

Criterio	Fumigación con avionetas	Fumigación con drones
Tipo de equipo	Aeronaves, diseñadas para transportar y aplicar productos fitosanitarios a gran escala.	Vehículos aéreos no tripulados (UAVs) con sistema de aspersión automatizado.
Cobertura	Amplia, ideal para grandes extensiones de terreno y plantaciones de difícil acceso.	Adecuada para áreas pequeñas o de difícil acceso para maquinaria convencional.
Control del proceso	Supervisado por un técnico especializado; permite una alta velocidad de aplicación.	Control automatizado con precisión mediante GPS y sensores; permite monitoreo en tiempo real.
Eficiencia en el uso de recursos	Requiere mayor cantidad de insumos agrícolas y consumo significativo de combustible.	Permite ahorrar hasta un 90% de agua y reduce notablemente el uso de agroquímicos.
Impacto ambiental	Mayor riesgo de deriva y contaminación debido a la altura y dispersión del producto.	Menor impacto ambiental; aplicación localizada y dirigida.
Costos operativos	Elevados por consumo de combustible, mantenimiento y personal especializado.	Menores costos de operación, inversión y mantenimiento.

Fuente: Pila (2019); Rodríguez & Vásquez (2018); UTEQ (2020); Duarte & Pinza (2021).

IV. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. Materiales

Tabla 2

Materiales utilizados en la ejecución del proyecto

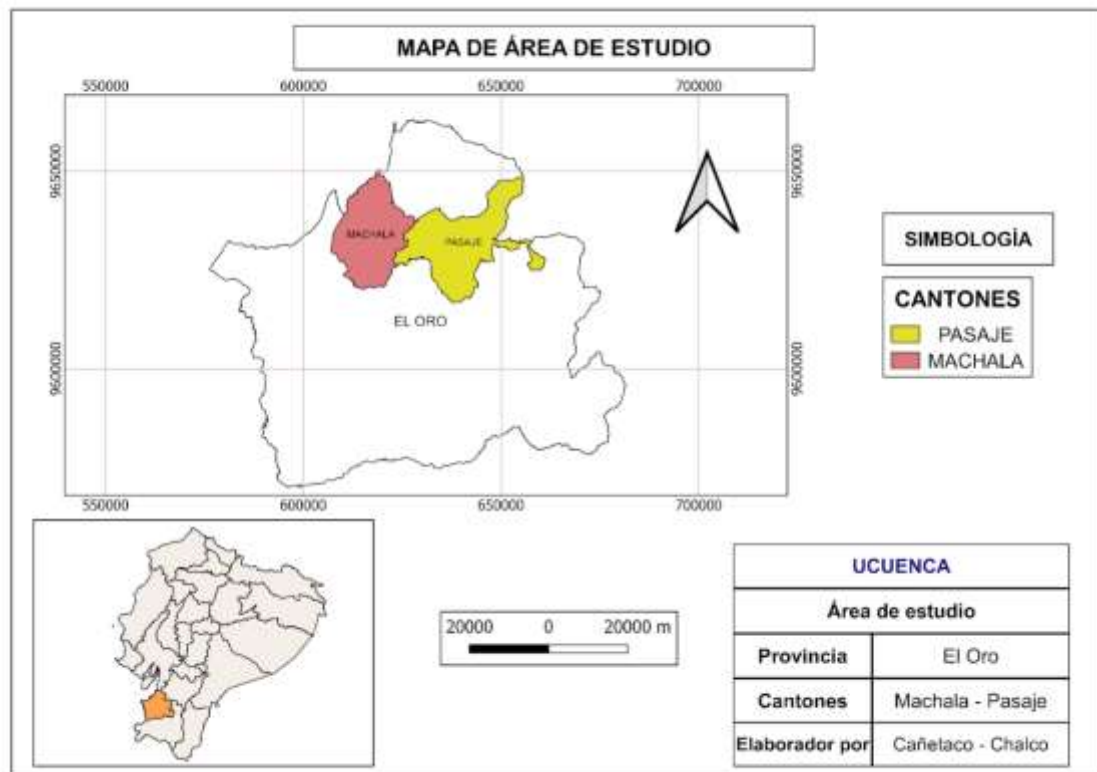
Físicos	Químicos	Equipos	Programas
• Lápiz • Cuaderno de apuntes • Tijeras • Cinta • Fundas herméticas • Fundas de papel • Escalera • Papeles hidrosensibles • Cinta métrica • Pintura	• Siganex–<i>Pyrimethanil</i> • <i>Bumper-propiconazo</i> • <i>Seeker-fenpropidin</i> • <i>Tridetox-tridemorph</i>	• Dron “AGRAS T40” • Avioneta • Computadora • Cámara fotográfica	• Image J • R studio

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

4.2. Metodología

4.2.1. Descripción área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en la provincia de El Oro, ubicada en la costa sur del Ecuador, en los cantones de Pasaje y Machala. Estos cantones se encuentran dentro de los rangos de latitud 3.05° a 3.62° Sur y longitud 79.55° a 80.06° Oeste, en una zona caracterizada por su clima cálido y relativamente húmedo. El clima de estas áreas representa temperaturas que oscilan entre los 23°C y 33°C durante todo el año, con una precipitación anual de aproximadamente 62.1 mm. La velocidad del viento en estas zonas es moderada, con una media de 1.0 km/h (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2017); lo que favorece la estabilidad en las aplicaciones aéreas con drones. Estas áreas presentan condiciones climáticas similares y son representativas del ecosistema agrícola de la región.

Figura 2*Mapa de ubicación***Elaborado por:** Cañetaco y Chalco, 2025.

4.2.2. Diseño Experimental

Se empleó un diseño experimental completamente al azar (DCA), con 4 tratamientos y cada tratamiento contó con 4 repeticiones que fueron evaluadas a lo largo del proyecto (ICA, 1987). La aplicación de fungicidas se realizó en cuatro etapas, con intervalos de 15 días entre cada una. De este modo, se pudo evaluar la efectividad de los tratamientos en función de sus costos.

En la presente investigación, cada tratamiento se implementó en una hacienda distinta, relativamente cercanas entre sí, lo que garantiza que pertenezcan a una misma conformación ecológica. Cada hacienda contó con cuatro repeticiones, y cada repetición estuvo compuesta por 18 plantas. Para la evaluación de los datos, se consideró como parcela neta a las cuatro plantas centrales, mientras que las 14 plantas restantes se las consideró como efecto borde.

Figura 3*Representación gráfica de la unidad experimental*

X	X	X
X	X	X
X	X	X
X	X	X
X	X	X
X	X	X

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

El rango de valores DMV (Diámetro volumétrico medio) para fumigaciones en el control de hongos con fungicidas es de un rango de 226µm-235µm en las avionetas y cualquier método de aplicación para el control fitosanitario. Basado en esto, los tratamientos propuestos tuvieron diferentes tamaños de gota, el cual se detalla a continuación:

Tabla 3

Tratamientos empleados

Tratamientos			
Hacienda	Equipo	Ubicación	DMV Fumigación
Patastal	Avioneta	3°18'07.9" S 79°50'14.1" W	235 µm
Patastal	Dron	3°18'07.9" S 79°50'14.1" W	200 µm
La Cancha	Dron	3°19'08.6" S 79°51'24.1" W	250 µm
La Unión	Dron	-3°18'09.1" S 79°53'05.9" W	300 µm

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

4.2.3. Metodología para el objetivo uno

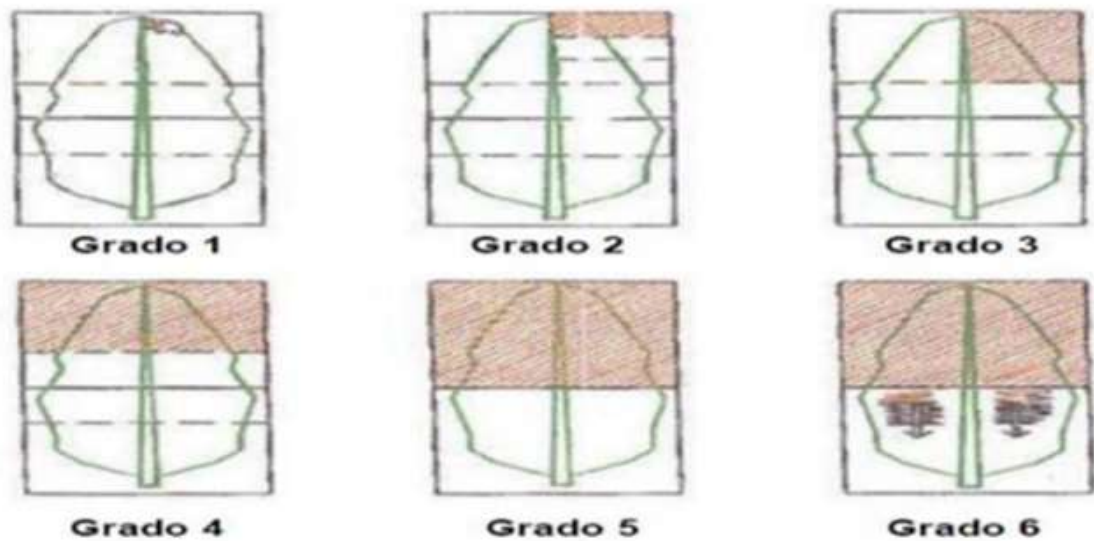
La metodología correspondiente al primer objetivo se basó en la medición de la incidencia y severidad de la enfermedad, en función del tamaño de gota aplicado en cada uno de los cuatro tratamientos. Tres de los tratamientos se realizaron mediante aplicaciones con dron, mientras que el tratamiento restante, que corresponde al control, se llevó a cabo mediante avioneta, siendo el método convencional más utilizado para la aplicación de fungicidas [Siganex – (Pyrimethanil), Bumper-(propiconazol), Seeker-(fenpropidin), Tridetox-(tridemorph)] en plantaciones de banano.

Para la determinación de la incidencia de Sigatoka Negra en las plantaciones de banano, se realizó un muestreo mediante observación directa de las hojas. La identificación del patógeno se basó en la sintomatología descrita por Mayary y Jairo (2008), quienes señalan que aparece inicialmente como estrías finas de color marrón claro en el envés de las hojas, generalmente desde la parte apical; dichas estrías evolucionan a manchas de tono marrón oscuro que luego se tornan negras e irregulares, y en fases avanzadas afecta la parte superior foliar funcional. Esta caracterización permitió establecer los niveles de incidencia en los lotes evaluados.

Con respecto a la severidad, se recopilaron datos mediante la captura de imágenes fotográficas con el objetivo de determinar el porcentaje inicial de severidad de la enfermedad. Estas imágenes se procesaron mediante las aplicaciones ImageJ, tomando como referencia la escala gráfica de severidad de Sigatoka negra en hojas de plátano, basada en la escala de Stover modificada por Gauhl. Para ello, fue necesario identificar el nivel de infección que presentan o no las plantas de banano al inicio de la investigación. El análisis de estas imágenes permitió establecer con precisión el grado de severidad presente, lo cual sirvió como línea base para el seguimiento del ensayo.

Figura 4

Descripción gráfica por el método de Stover modificada por Gauhl



Fuente: González, J. (2018).

Tabla 4

Escala de Stover modificada por Gauhl

Grado de severidad	Descripción de la severidad
0	Sin síntomas
1	< 1% de área foliar afectada y/o hasta 10 estrías
2	1 – 5% de área foliar afectada
3	6 -15% de área foliar afectada
4	16 - 33% de área foliar afectada
5	34 – 50% de área foliar afectada
6	> 50% de área foliar afectada

Fuente: González, J. (2018).

Para medir el tamaño de las gotas se utilizó papeles hidrosensibles, los cuales fueron colocados en la segunda hoja a partir de la hoja bandera en plantas de banano (*Musa paradisiaca*), por tratamiento. La recolección de los papeles hidrosensibles y la captura de imágenes se realizó manualmente con ayuda de una escalera, registrando los datos correspondientes durante el proceso. Posteriormente, se emplearon dos aplicaciones digitales ImageJ y Easy Leaf Area Free para calcular el porcentaje de desarrollo de *Mycosphaerella fijiensis* (Sigatoka negra). Estas herramientas permitieron estimar el porcentaje de área foliar efectivamente fumigada, lo que sirvió como base para evaluar la eficiencia del tratamiento y el progreso de la enfermedad. Así, se obtuvo un indicador clave para el manejo y control de la Sigatoka negra.

4.2.4. Metodología para el segundo objetivo

Con respecto al segundo objetivo se identificó los costos directos como el combustible, fungicidas, mano de obra; también costos indirectos como tiempo de operación, eficiencia del tratamiento y con ello medir la cantidad de fungicida aplicado en cada finca y verificar el control de la Sigatoka negra y finalmente proponer que tratamiento es factible, lo que nos da como un análisis de costos semi variables resultado (Reyes, 2018).

4.2.5. Análisis de los datos:

Los datos obtenidos de las distintas variables fueron analizados para verificar su normalidad. Al no cumplir con este supuesto, se aplicó un método no paramétrico, específicamente la prueba de Kruskal-Wallis. El análisis estadístico se realizó utilizando el software R Studio.

V. Resultados

5.1. Área de fumigación

Para el caso de la variable área fumigada, se realizó una prueba de normalidad por tratamiento, obteniendo que los datos, no son normales, pues el valor de p, para cada tratamiento es $< 0,05$, por lo tanto, las variables no cumplen con el supuesto de normalidad, siendo necesario aplicar pruebas estadísticas no paramétricas para la comparación entre tratamientos.

Con estos resultados se realizó un test no paramétrico (Kruskal-Wallis) obteniendo un p-value ($1.004e-08$) $< 0,05$, rechazando la hipótesis de que todos los tratamientos tienen la misma distribución de área fumigada, lo cual quiere decir que, al menos un tratamiento difiere significativamente de los demás, por ello se realizó el test de Dunn para realizar una comparación múltiple entre los tratamientos.

Tabla 5

Resumen de Test post hoc de Dunn aplicado a 4 tratamientos en cuanto al área total cm^2 fumigada con dron y avioneta.

Método	Comparación	Estadístico (Z)	p.adj	Significancia
Tratamiento	1 - 2	2,02	$1,30 \times 10^{-1}$	ns
Tratamiento	1 - 3	1,04	$8,97 \times 10^{-1}$	ns
Tratamiento	2 - 3	-0,98	$9,79 \times 10^{-1}$	ns
Tratamiento	1 - 4	5,92	$9,58 \times 10^{-9}$	****
Tratamiento	2 - 4	3,90	$2,87 \times 10^{-4}$	***
Tratamiento	3 - 4	4,88	$3,14 \times 10^{-6}$	****

Nota: Significancia **** ($P < 0,0001$), *** ($p < 0,001$), ns= no significativo ($p \geq 0,05$). *

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Con respecto a la tabla 5 se demostró que se encontraron diferencias significativas correspondientes a las comparaciones entre tratamientos (1-4, 2-4 y 3-4) lo cual nos demuestra que los tratamientos 1,2 y 3 son positivos para el control de *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra) con diferentes tamaños de gota. Lo que nos da a entender que entre el control y los tratamientos existen diferencias acordes a los tamaños de gota y el área fumigada la cual se midió con los papeles hidrosensibles demostrándose que la cobertura foliar entre tratamientos obtiene diferencias estadísticas significativas.

5.2. Cobertura fumigada

En la Tabla 6 se observa que los tratamientos T1, T2 y T3 se encuentran en el mismo grupo estadístico (b), mientras que el Control forma un grupo distinto (a). Esto indica que el Control difiere significativamente de los demás tratamientos.

La comparación entre promedios de cobertura fumigada muestra diferencias de área de cobertura entre tratamientos. El tratamiento control, aplicado con avioneta, alcanzó la mayor cobertura fumigada teniendo un promedio de 18,75 cm², que corresponde al 100% del área total del papel hidrosensible utilizado para evaluar el alcance de la aplicación. Mientras que los tratamientos aplicados con dron (T1, T2 y T3) registraron promedios de coberturas menores, con valores de 0,85 cm², 1,22 cm² y 1,01 cm².

Tabla 6

Promedios de cobertura fumigada

Tratamientos	Promedios (cm ²)	Grupo
Control	18,75	a
T1	0,85	b
T2	1,22	b
T3	1,01	b

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

5.3. Incidencia

Los resultados obtenidos en la Tabla 7 mostraron que la totalidad de plantas evaluadas (16/16), presentaron síntomas, lo que representa una incidencia del 100% en todos los tratamientos. Evidenciando que el patógeno se encuentra ampliamente distribuido en la zona de estudio el mismo que ayudó a valorar de manera efectiva la respuesta de los diferentes tamaños de gota empleados en la aplicación de fungicidas, constituyendo un factor importante para analizar la eficiencia de los métodos aplicados.

Tabla 7

Número de plantas totales con presencia de sigatoka negra

Tratamientos	N ° de plantas
T1	16/16
T2	16/16
T3	16/16
Control	16/16

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

5.4. Severidad

Para estimar el grado de severidad de la enfermedad en las plantas, se recopiló datos mediante fotografías por cada finca y se determinó la existencia de algunos de los síntomas de acuerdo con la escala de Stover modificada por Gauhl (1989) (Figura 4). Posteriormente se procedió analizar los datos con el programa Image J, que permitió determinar el grado de severidad inicial y final del proyecto. De acuerdo con la escala de Stover, los resultados obtenidos muestran variaciones en el grado de severidad de la *Sigatoka negra* entre los diferentes tratamientos evaluados. Reflejando una dinámica natural de la sigatoka negra en el cultivo de banano y permite valorar la eficacia de cada método aplicado.

Tabla 8

Severidad inicial y final, en base a la escala de Stover

	Inicial		Final	
	%	Grado	%	Grado
T1	4.2%	2	6.8 %	3
T2	9.1 %	3	15 %	3
T3	9.4 %	3	21.40 %	4
Control	6.6 %	3	8 %	3

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

De acuerdo con la Tabla 8, el tratamiento T1 (200 μm) y Control (235 μm) presentaron un menor incremento en la severidad, indicando una mejor efectividad en el control de la enfermedad debido a una mejor cobertura del fungicida. El tratamiento T2 (250 μm) mantuvo valores intermedios, con una progresión moderada, del daño foliar. Al finalizar el periodo de fumigación, se observó un incremento en la severidad, alcanzando valores de 9,45% a 21,4%, destacando el tratamiento T3 (300 μm) reflejando un avance considerable de la enfermedad.

Confirmando que el tamaño de gota influye directamente en el grado de severidad, y que las gotas de menor diámetro que son los del tratamiento T1 y Control (200 μm a 235 μm) permiten una distribución más uniforme del producto y ayuda a reducir el progreso de la sigatoka negra.

5.5. Costos por servicio de fumigación para 1 hectárea

Tabla 9

Costos por ciclo de fumigación

	T1	T2	T3	Control
Ciclo 1	\$ 34,52	\$ 30,63	\$ 34,75	\$ 44,79
Ciclo 2	\$ 35,02	\$ 30,63	\$ 37,05	\$ 33,79
Ciclo 3	\$ 42,72	\$ 43,75	\$ 36,55	\$ 36,32
Ciclo 4	\$ 32,72	\$ 33,75	\$ 44,75	\$ 35,77
Costo total	\$ 144,98	\$ 138,76	\$ 153,1	\$ 150,67

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Los costos totales que se muestran en la Tabla 9 corresponden a los costos requeridos para la fumigación por hectárea. Dando como resultado que los costos correspondientes al tratamiento 2 que tiene un coste de \$15 dólares por hectárea es el más económico, mientras que el tratamiento más costoso es el tratamiento 3 el cual tiene un precio de \$16 dólares por hectárea.

Tabla 10

Costos totales de fumigación

	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Control
Costo total	\$ 144,98	\$ 138,76	\$ 153,10	\$ 150,67
Incidencia	16/16	16/16	16/16	16/16
Severidad	6.8 %	15%	21.40 %	8%

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Los costos totales de fumigación mostrados en la Tabla 10 dan como resultado que la fumigación en base a su efectividad en el control de la severidad contra *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra) son los tratamientos 1 y el control. Mientras que los tratamientos 2 y 3 son los menos efectivos contra la severidad y los más baratos en comparación con los tratamientos que son efectivos en la presente investigación.

VI. Discusión

La investigación de Calle & Yangali (2014) muestra un cambio fitopatológico radical en Ecuador desde 1992, donde la sigatoka negra sustituyó por completo a la amarilla. Esto elevó entre 40% y 100% el uso de fungicidas y las aplicaciones aéreas durante 2007-2010, intensificando el control químico. Demostrando que en nuestro estudio el uso de alternativas de agricultura de precisión como son los drones, es eficaz para controlar el patógeno y tener una mayor eficacia en cuanto a precisión, efectividad y optimización en comparación a los medios comunes como la avioneta.

En la comparación de la cobertura fumigada entre los dos métodos de fumigación, el control realizado mediante avioneta obtuvo la mayor cobertura, alcanzando un promedio de 18,75 cm². Mientras que los tratamientos 1, 2 y 3, aplicados con drones, registraron coberturas menores, con promedios de 0,85 cm², 1,22 cm² y 1,01 cm². Estos resultados coinciden con lo señalado por Rodríguez y Vásquez (2018), quienes sostienen que la fumigación con avionetas tiene un mayor alcance de cobertura de fumigación y se emplea principalmente en plantaciones de gran extensión. Sin embargo, esta diferencia no se vio reflejada en la evolución de la severidad de *Mycosphaerella fijiensis*, ya que el tratamiento T1, pese a presentar una cobertura baja, mostró el menor incremento en la severidad, superando al T2 y T3. Confirmando que no solo la cobertura influye en la eficacia del control de la enfermedad, sino que el tamaño de gota es un factor importante en la eficacia de la fumigación.

La investigación realizada por Cañetaco (2015), evidenció que el uso de una avioneta calibrada y con boquillas específicas para la resulta efectivo al evaluar la cobertura foliar y la eficiencia de la atomización en el control de *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra). Demostrando que un tamaño de gota fino es adecuado en aplicaciones aéreas para el control de patógenos en cultivo de banano. Sabiendo que en nuestro estudio el tratamiento 1 (200µm) y el control (235µm) utilizado con dron, fueron efectivos para controlar la propagación del patógeno. Esto llega a coincidir también con ASABE (2009), la cual establece tamaños de gota específicos para fungicidas entre los 100-200 µm, mientras que en el rango de 200 a 300 µm ofrece un equilibrio entre cobertura y reducción de deriva.

Sánchez et al. (2021) demostraron que la fumigación con dron es efectiva ya que reduce significativamente la deriva, optimiza la aplicación foliar y disminuye la pérdida de producto gracias a la baja turbulencia y mayor control de velocidad. Estos hallazgos concuerdan con los resultados obtenidos en el presente estudio, en el cual los tratamientos 1, 2 y 3, que se aplicaron con dron, mostraron una mayor efectividad en el control de la severidad del patógeno

en comparación con métodos tradicionales, como la aplicación aérea mediante avioneta utilizada en el manejo fitosanitario. Esto puede representar un impacto económico significativo e importante para los productores del Ecuador al momento de contratar servicios de control fitosanitario.

Otro estudio realizado por García et al. (2022) señala que su uso es favorable no solo en la cobertura foliar sino también en la reducción de severidad de la enfermedad, además de presentar costos operativos más bajos en comparación con métodos tradicionales como la motobomba. Esto coincide con nuestra investigación, donde el dron mostró resultados eficaces y costos más accesibles, especialmente considerando que las condiciones climáticas y geográficas de nuestra área de estudio son similares a las evaluadas en este trabajo (zona de Vinces).

Por otra parte, Castrillón et al. (2021) reportaron que el dron no solo mejora la cobertura foliar en comparación con aplicaciones terrestres, sino que también reduce la severidad de la enfermedad, disminuye el tiempo de trabajo y optimiza el uso de insumos. Estos beneficios coinciden con nuestros hallazgos, donde el dron se posicionó como una herramienta eficiente tanto en lo fitosanitario como en lo económico, especialmente en contraste con la avioneta, cuyo uso resulta menos práctico para pequeños y medianos productores.

Finalmente, Cedeño et al. (2020) demostraron que el dron genera una distribución uniforme del producto gracias a la altura y al flujo generado por las hélices, a diferencia de la motobomba que depende de la destreza del operador. En nuestra investigación se observó un comportamiento similar donde el dron permitió una dispersión homogénea sobre la mayor parte de las hojas, mientras que la avioneta nos dio una cobertura amplia, pero a la vez no logra cubrir todas las hojas de banano debido a la velocidad de vuelo mayor y la cantidad de producto que requiere hace que esta pulverice con mayor presión y no se cubra por completo la planta.

En base a nuestro objetivo 2, Tomala (2022) demostró que el costo de fumigación por hectárea es de \$18 para dron y \$20 para la avioneta, siendo este similar a los costos requeridos por hectárea de nuestra investigación, los cuales tienen un precio por ciclo, incluido los productos de fumigación por hectárea de \$144,98 en el tratamiento 1 y \$150,67 en el control; los mismos que fueron los más efectivos en cuanto al control del avance de la enfermedad de *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra) en plantaciones de banano.

VII. Conclusión

En conclusión, los resultados que dio este estudio nos propone que los tratamientos para evitar el aumento de severidad en *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra) son los tratamientos con tamaños de gota entre los 200 a 235 μm correspondientes al control y al tratamiento 1, los cuales al tener una mayor cobertura foliar por cm^2 , controla la severidad de la enfermedad y no supera el 2.6% en el tratamiento 1 y el 1.4% correspondiente al control, de esta manera estos tratamientos son eficientes en comparación al tratamiento 3 y 4 los mismos que superan el 5.9% y 12% respectivamente. Sabiendo esto, podemos concluir que la fumigación con avioneta dio mayor resultado en torno a controlar la enfermedad, sin embargo, la velocidad, la capacidad, la propulsión y deriva que esta tiene sea diferente a comparación del dron, haciendo que el método de fumigación sea apto para evitar pérdida de producto.

Con respecto al objetivo dos, se determinó que los tratamientos más eficientes con respecto a costos fueron el Tratamiento 1 y 2. La fumigación realizada con dron presentó variaciones de precio por hectárea debido al tamaño de gota empleado ya que implica un consumo diferente de producto y tiempo. El costo más bajo corresponde al uso de avioneta, con un valor de 12\$ por ha, al mismo que se le debe añadir el 10% adicional debido a las pérdidas ocasionadas por deriva. Mientras que la aplicación con dron presentó costos entre los 14\$, 15\$ y 16\$ para los Tratamientos 1, 2 y 3. Concluyendo, que el uso de drones representa una alternativa viable tanto desde el punto económico como técnico, al ofrecer un control de la enfermedad y menor impacto ambiental.

VIII. Recomendaciones

Se recomienda emplear la fumigación aérea con avioneta únicamente en haciendas que superen las 20 hectáreas, ya que este método, aunque efectivo, incrementa el costo operativo total en aproximadamente un 10% debido a las pérdidas por deriva. Este tipo de aplicación es conveniente en grandes extensiones de cultivo, donde la amplia cobertura compensa el gasto adicional, sin embargo, para los pequeños y medianos productores, este incremento representa un gasto considerable en la rentabilidad de la producción.

Por otro lado, la fumigación con drones se presenta como una alternativa tecnológica más eficiente, tanto en el aspecto económico como fitosanitario, tienen la capacidad de aplicar fungicidas con precisión permitiendo optimizar con el tamaño de gota, el mismo que mejora la cobertura foliar y minimiza pérdidas de producto. Este método es adecuado para el control *Mycosphaerella fijiensis* (sigatoka negra), así como otras enfermedades o plagas. El uso de drones contribuye a la sostenibilidad agrícola y contaminación agrícola.

Finalmente, se recomienda continuar con actividades de investigación sobre la aplicación de plaguicidas, en general, con el uso de drones y diferentes tamaños de gota y número de éstas por cm² de área foliar.

IX. Referencias

- ASABE. (2009). *Spray nozzle classification by droplet spectra*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Balestrini. (2015). *Papel sensible al agua para controlar la distribución de gotas pulverizadas*. Villa Nueva.
- Calle, H., & Yangali, J. (2014). *La Sigatoka Negra en Ecuador*. Agrocalidad. Guayaquil: Sigatoka negra.
- Castrillón, E., Giraldo, J., & Areiza, L. (2021). *Viabilidad sobre el uso de drones para controlar la sigatoka negra (Pseudocercospora fijiensis) en áreas buffer en cultivos de banano*. Medellín: Fundación Universitaria Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Ambientales.
- Cañetaco, P. (2015). "Cobertura aérea para el control de sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en fincas convencionales, provincia de El Oro". Machala: Universidad Técnica de Machala Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias.
- Cedeño, K., Mero, G., Vera, A., & Reyna, L. (2020). *Evaluación de la distribución de gotas en la pulverización de plaguicida en maíz por el método tradicional y por dron*. Portoviejo: La Técnica. Revista De las Agrociencias.
- Cioppo, F. (2015). *Ecuador: Exportación de Banano (Musa sp.) estudio sectorial del banano ecuatoriano de exportación*. Universidad Agraria del Ecuador.
- Cunha, J., Farnese, A., & Olivet, J. (2012). *Droplet spectra and wind tunnel evaluation of aerial spray nozzles*. Scientia Agricola. São Paulo: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP).
- CFN. (2024). *Ficha Sectorial Banano*. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
- Duarte, M., & Pinza, G. (2021). *Plan de negocios para la creación de una empresa de servicios de fumigación agrícola con drones aéreos*. Universidad Laica Vicente Rocafuerte, Guayaquil.
- Drone Innovation COL. (10 de febrero de 2024). WEBINAR Importancia del Tamaño de gota en las aplicaciones de Plaguicidas con AGRAS T40 [video]. Youtube. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=Cr_1AHZVn0I

- Espitia, Y., & Santiago, S. (2021). "Diseño Conceptual y Preliminar de un UAV Fumigador para Cultivos de Papa en Úmbita – Boyacá,". Bogotá: Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Fritz, B; Hoffmann, W; Bagley, W. (2019). Measuring droplet size of agricultural spray nozzles—Measurement distance and wind speed effects. *Atmospheric Environment*. Ámsterdam: Elsevier.
- Flores, C. (2015). *Banano: Mycosphaerella fijiensis Morelet (Sigatoka negra)*.
- García, S., Meza, W., & Painii, V. (2022). Uso de drones para el control de sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) Vines, Ecuador. *Ecológica Agropecuaria*, 2(1), 25-33.
- González, J. (2018). *Evaluación de dosis de aplicacion de fungicidas orgánicos en la producción de plátano*. Escuela Agrícola Panamericana.
- Herrera, K. (2018). *Niveles de fertilizacion en las propiedades químicas del suelo y la eficiencia en el uso de nuetrientes CV Curare Enano*. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.
- ICA Instituto Colombiano Agropecuario. (1987). *Diseño completamente al azar*. En *Métodos estadísticos y diseño de experimentos en investigación agrícola y pecuaria* (pp. 36-46).
- INAMHI. (2017). Anuario Meteorológico, N° 53-2013. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Quito, Ecuador
- INTARI. (2018). Manejo de la Sigatoka Negra en banano. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/frutales/manejo-de-la-sigatoka-negra-en-banano>
- [ISO], I. O. (2018). *Crop protection equipment – Droplet-size classification of spray nozzles (ISO 25358:2018)*. doi: <https://www.iso.org>
- Koh, P., & Wich, R. (2012). "Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation". Thousand Oaks: SAGE Publications.
- Mariscal, A. (2020). *"Problemas de la comercialización de banano (Musa paradisiaca), en el Ecuador*. Universidad Técnica de Babahoyo.
- Marín, D., Romero, R., Guzmán, M., & Sutton, T. (2003). Black sigatoka: an increasing threat to banana cultivation. *Plant disease*.

- Matamoros, G. (2015). *Importancia del tamaño de gotas en las aplicaciones aéreas de Tesis de Maestría - Universidad Técnica de Machala- Unidad Académica*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Mayary, J., & Jairo, Z. (2008). Incidencia y severidad de las sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) y amarilla (*Mycosphaerella musicola* Leach et Mulder) del plátano según los estados fenológicos. *Agronomía Colombiana*, 26(3), 435-442.
- Nuyttens, D., Baetens, K., De Schamphelre, M., & Sonck, B. (2007). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*.
- Pérez, L. (2012). A holistic integrated management approach to control black sigatoka disease of banana caused by *Mycosphaerella fijiensis*. *food and agriculture organization of the united nations*, 4-14.
- Pila, G. (2019). *Evaluación de la eficiencia de aplicación de dos diferentes métodos de fumigación, mediante dron vs aplicación con aguilón en el cultivo de soya*. Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Rao, B., Gopi, G., & Maione, R. (2016). "The societal impact of commercial drones". New York: Technology. Soc.
- Reyes, Y. (2018). *Apunte Docente. Clasificación de costos*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Rivas, G., & Rosales, F. (2003). Manejo convencional y alternativo de sigatoka negra, nemátodos y otras plagas asociadas al cultivo de musáceas en los trópicos. Guayaquil: INIBAP.
- Rodríguez, T., & Vásquez, M. (2018). *Plan de negocio para la creación de una empresa de fumigación aérea por helicóptero*. Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil.
- Romero, R., & Sutton, T. (1997). Inoculum production and dispersal of *Mycosphaerella fijiensis*. *Plant Disease*.
- Sánchez, M., Villalobos, R., Villalta, R., Carr, C., & Guzmán, M. (2021). *Medición de la deriva en aplicaciones aéreas de fungicidas para el combate de la Sigatoka Negra con sistema de aeronaves no tripuladas (RPAS-DRONES) en el cultivo de banano*. CORBANA.

- Sagratzki, P., Eiji, R., Gasparotto, L., Coelho, R., & Souza, T. (2015). Trichoderma, Biological control of banana black Sigatoka disease with. *Crop protection*, 2-5.
- Schrijver, R. (2016). La agricultura de precisión y el futuro del sector agropecuario en Europa. Bruselas: STOA.
- Tomala, V. (2022). Efecto de fumigación con dron y avioneta para el control de mycosphaerella fijiensis (sigatoka negra) en el cultivo de banano de variedad williams trabajo experimental. milagro: Universidad Agraria del Ecuador Facultad de Ciencias Agrarias Carrera de Ingeniería Agronómica.
- Troya, J. (2019). *Manejo de la fertilización potásica en el cultivo de banano "Musa paradisiaca AAA", en la Hacienda Bolívar del cantón Pueblo Viejo*. Universidad Técnica de Babahoyo.
- UTEQ. (2020). *Fumigación con drone*. <https://www.uteq.edu.ec/read/1/469>
- Vásquez, R. (2009). *El impacto del comercio del Banano en el desarrollo del Ecuador*. AFESE 53.
- Vignola, R., Poveda, K., Watler, W., Vargas, A., & Berrocal, Á. (2018). *Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos*. CATIE

X. Anexos

Anexo A: Datos de fumigación Tratamiento 1

Ciclo	ID Muestra	Área Total	Área faltante	Porcentaje
1	p1-1	0.7	18.05	3.73
1	p2-1	1.06	17.69	5.65
1	p3-1	1.3	17.45	6.93
1	p4-1	0.86	17.89	4.59
2	p1-2	1.3	17.45	6.93
2	p2-2	0.76	17.99	4.05
2	p3-2	0.96	17.79	5.12
2	p4-2	0.5	18.25	2.67
3	p1-3	1.2	17.55	6.40
3	p2-3	0.47	18.28	2.51
3	p3-3	0.72	18.03	3.84
3	p4-3	0.73	18.02	3.89
4	p1-4	0.84	17.91	4.48
4	p2-4	0.5	18.25	2.67
4	p3-4	1.18	17.57	6.29
4	p4-4	0.64	18.11	3.41
Total		13.72	286.28	73.17
Promedio		0.86	17.89	4.57

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Anexo B: Datos de fumigación Tratamiento 2

Ciclo	ID Muestra	Área Total	Área faltante	Porcentaje
1	p1-1	1.2	17.55	6.40
1	p2-1	1.8	16.95	9.60
1	p3-1	1.5	17.25	8.00
1	p4-1	0.65	18.1	3.47
2	p1-2	1.04	17.71	5.55
2	p2-2	1	17.75	5.33
2	p3-2	0.95	17.8	5.07
2	p4-2	1.5	17.25	8.00
3	p1-3	1.9	16.85	10.13
3	p2-3	1.4	17.35	7.47
3	p3-3	0.78	17.97	4.16
3	p4-3	1.25	17.5	6.67
4	p1-4	1.68	17.07	8.96
4	p2-4	0.5	18.25	2.67
4	p3-4	1.5	17.25	8.00
4	p4-4	0.85	17.9	4.53
Total	16	19.5	280.5	104
Promedio	16	1.22	17.53	6.50

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Anexo C: Datos de fumigación Tratamiento 3

Ciclo	ID Muestra	Área Total	Área faltante	Porcentaje
1	p1-1	0.7	18.05	3.73
1	p2-1	0.5	18.25	2.67
1	p3-1	0.58	18.17	3.09
1	p4-1	1	17.75	5.33
2	p1-2	1.5	17.25	8.00
2	p2-2	1	17.75	5.33
2	p3-2	0.9	17.85	4.80
2	p4-2	1.25	17.5	6.67
3	p1-3	1.3	17.45	6.93
3	p2-3	0.95	17.8	5.07
3	p3-3	1.15	17.6	6.13
3	p4-3	1.4	17.35	7.47
4	p1-4	0.8	17.95	4.27
4	p2-4	1.23	17.52	6.56
4	p3-4	1	17.75	5.33
4	p4-4	0.96	17.79	5.12
Total		16.22	283.78	86.51
Promedio		1.01	17.74	5.41

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Anexo D: Datos de fumigacion Tratamiento 4 (Control)

Ciclo	ID Muestra	Área Total	Área faltante	Porcentaje
1	p1-1	18.75	0	100.00
1	p2-1	18.75	0	100.00
1	p3-1	18.75	0	100.00
1	p4-1	18.75	0	100.00
2	p1-2	18.75	0	100.00
2	p2-2	18.75	0	100.00
2	p3-2	18.75	0	100.00
2	p4-2	18.75	0	100.00
3	p1-3	18.75	0	100.00
3	p2-3	18.75	0	100.00
3	p3-3	18.75	0	100.00
3	p4-3	18.75	0	100.00
4	p1-4	18.75	0	100.00
4	p2-4	18.75	0	100.00
4	p3-4	18.75	0	100.00
4	p4-4	18.75	0	100.00
Total		300	0	1600
Promedio		18.75	0	100

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

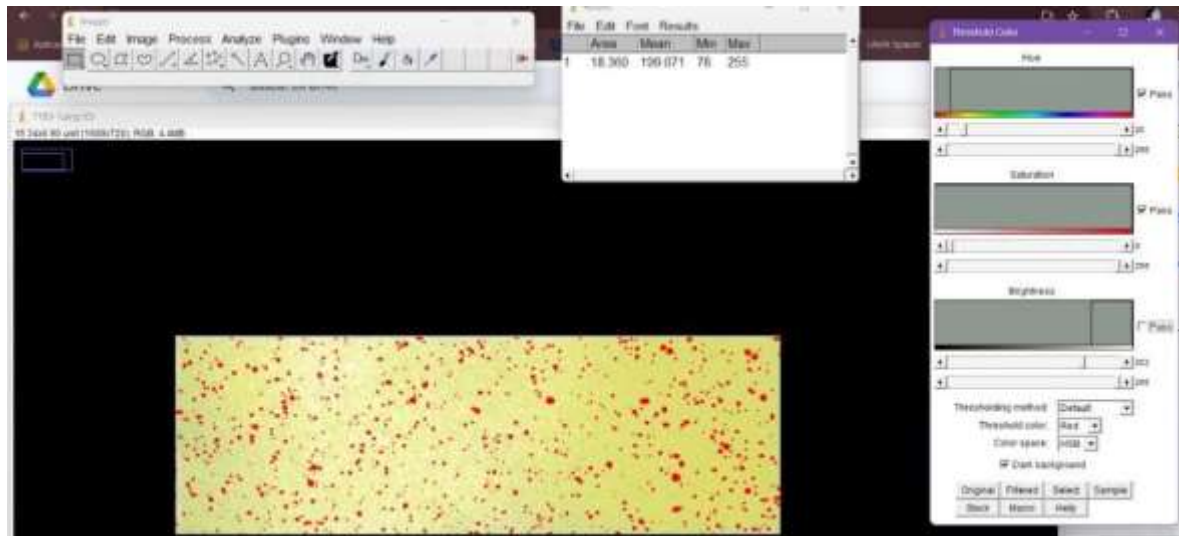
Anexo E: Recolección de muestras.



Anexo F: Insumos utilizados para fumigación.



Anexo G: Procesamiento de Datos.



Anexo H: Calibración tamaño de gota.



Anexo I: Costos totales de fumigación de la finca “La Cancha”

Evaluar los costos variables de aplicación aérea de fungicidas mediante drones, en comparación con métodos tradicionales de fumigación en plantaciones de banano afectadas por la Sigatoka Negra					
Información general	Ciclos de fumigación	Coste por Tamaño de gota/Hectarea	Insumos de fumigación fijos	Precio por ciclo de fumigación	Precio Final por fumigación + Insumos
Fumigación Dron "La Cancha"	4	15\$/ha	Fungicidas (Seeker, tridetox, bumper, siganex)	*****	\$559,9
Area: 11ha			EMULAD ES (Polioxietileno (23) Lautyl Éter)	\$11,00	\$44
Tamaño de gota: 250µm			Disperfol(Polietilenglycol Monoalkil Éter)	\$3,30	\$13,20
			Acelite agrícola para fumigación/ Galón	\$90,75	\$363
			Drone	\$165	\$660
TOTAL					\$1.640,10

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Anexo J: Costos totales de fumigación de la finca “La Unión”

Información general	Ciclos de fumigación	Coste por Tamaño de gota/Hectarea	Insumos de fumigación fijos	Precio por ciclo de fumigación	Precio Final por fumigación + Insumos
Fumigación Dron "La Unión"		16\$/ha	tridetox, bumper, siganex)	*****	\$407,2
Area: 8ha			EMULAD ES (Polioxietileno (23) Lautyl Éter)	\$8,00	\$32
Tamaño de gota: 300µm			Disperfol(Polietilenglycol Monoalkil Éter)	\$2,40	\$9,60
			Acelite agrícola para fumigación/ Galón	\$66,00	\$264
			Drone	\$128	\$512
TOTAL					\$1.224,80

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Anexo K: Costos totales de fumigación de la finca "Patastal"

Información general	Ciclos de fumigación	Coste por Tamaño de gota/Hectarea	Insumos de fumigación fijos	Precio por ciclo de fumigación	Precio Final por fumigación + Insumos
Fumigación Dron "Patastal"		14\$/ha	tridetox, bumper, siganex)	*****	\$1.934,2
Area: 38			EMULAD ES (Polioxietileno (23) Lautyl Éter)		
Tamaño de gota 200µm				\$38,00	\$152
3°18			Disperfol(Polietilenglycol Monoalkil Éter)	\$10,14	\$40,56
			Aceite agrícola para fumigación/ Galón	\$313,50	\$1.254
			Drone	\$532,00	\$2.128
TOTAL					\$5.508,76

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.

Anexo L: Costos totales de fumigación de la finca "Avioneta Patastal"

Información general	Ciclos de fumigación	Coste por Tamaño de gota/Hectarea	Insumos de fumigación fijos	Precio por ciclo de fumigación	Precio Final por fumigación + Insumos
Fumigación Avioneta "Patastal"		12\$/ha	tridetox, bumper, siganex)	*****	\$1.934,2
38ha			EMULAD ES (Polioxietileno (23) Lautyl Éter)		
Tamaño de gota: 235µm				\$38,00	\$152
			Disperfol(Polietilenglycol Monoalkil Éter)	\$10,14	\$40,56
			Aceite agrícola para fumigación/ Galón	\$313,50	\$1.254
			Avioneta + 10% costo general	\$456,00	\$1.824
TOTAL				\$520,48	\$5.725,24

Elaborado por: Cañetaco y Chalco, 2025.