

Evaluación de métodos de fumigación contra la Sigatoka Negra en plantaciones de banano usando la metodología AHP

Evaluation of fumigation methods against Black Sigatoka in banana plantations using the AHP methodology

Danay Vanessa Pardo Bermúdez



Miguel Angel Polo Castañeda



Jorge Gómez Rojas



Universidad del Magdalena, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido: 31/05/2023

Aceptado: 27/07/2023

Publicado: 30/10/2023

Correspondencia de autores:

danaypardovb@unimagdalena.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Evaluar la eficiencia de los métodos de fumigación contra la Sigatoka Negra en plantaciones de banano que aporte al desarrollo territorial sostenible en el departamento del Magdalena, Colombia. **Metodología:** Se utilizó la metodología del proceso analítico jerárquico (AHP) considerando cinco criterios: costo, cobertura, impacto ambiental, eficacia y precisión, seguridad y salud. Se consultó a cuatro expertos en las siguientes áreas: Fitopatólogo, agricultor, administrador de finca, especialista en salud pública y ambiental, para obtener su opinión sobre la importancia de cada uno de los criterios e identificar cada método de fumigación en relación con estos. **Resultados:** Se establece un listado jerárquico de los métodos de fumigación, basado en los criterios anteriormente descritos, identificando que el dron es el método de fumigación ideal para cumplir el objetivo con 62,41%, seguido de los equipos manuales con 21,45%, por último, la fumigación con avioneta con 16,14%. Asimismo, se identificó que el costo no es un criterio relevante en la fumigación, comparado con la salud de los campesinos, el impacto ambiental y la efectividad. **Conclusiones:** La metodología AHP es válida para identificar el listado jerárquico de los métodos de fumigación, permitiendo con este trabajo justificar la decisión para seleccionar el más adecuado y conocer la importancia de cada criterio en dicha selección. Además, se recomienda el uso del dron como método de fumigación para el control de la Sigatoka Negra en plantaciones de banano, ya que, es el método más efectivo y sostenible en términos de impacto ambiental, seguridad y salud de las personas.

Palabras clave: AHP, banano, fumigación, dron, avioneta, Sigatoka Negra.

Abstract

Objective: To evaluate the efficiency of fumigation methods against Black Sigatoka in banana plantations that contribute to sustainable territorial development in the department of Magdalena, Colombia. **Methodology:** The Analytic Hierarchy Process (AHP) methodology was used considering five criteria: cost, coverage, environmental impact, efficacy and precision, safety and health. Four experts in the following areas were consulted: Phytopathologist, farmer, farm administrator, public and environmental health specialist, to obtain their opinion on the importance of each of the criteria and to identify each fumigation method in relation to these. **Results:** A hierarchical list of fumigation methods is established, based on the aforementioned criteria, identifying that the drone is the ideal fumigation method to achieve the objective with 62.41%, followed by manual equipment with 21.45%, and finally aerial fumigation with 16.14%. Likewise, it was identified that cost is not a relevant criterion in fumigation compared to the health of farmers, environmental impact and effectiveness. **Conclusions:** The AHP methodology is valid for identifying the hierarchical list of fumigation methods, allowing this work to justify the decision to select the most appropriate one and to know the importance of each criterion in this selection. In addition, the use of drones as a fumigation method for controlling Black Sigatoka in banana plantations is recommended as it is the most effective and sustainable method in terms of environmental impact and safety and health of people.

Keywords: AHP, banana, fumigation, drone, airplane, Black Sigatoka.

Introducción

El banano tiene un rol significativo en la alimentación de las personas, debido a que cuenta con un alto valor nutricional, considerándose el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo [1]. Éste es fundamental en la economía de los países de Latinoamérica y el Caribe [2]. Tan sólo en Colombia, para el año 2021 se exportaron 111 millones de cajas de banano, por un valor de 898 millones de dólares, de las cuales 41,2 millones de cajas provenían de los departamentos del Magdalena y La Guajira [3].

Desafortunadamente, el banano es susceptible a diversas enfermedades fúngicas, bacterianas y virales, generando hasta un 47% pérdidas, entre las que se destaca la Deightoneilla torulosa, la Cordana musae y la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) [4]. Siendo ésta última la que se tratará en esta investigación, la cual afecta la madurando prematura del fruto, además de reducir el tamaño y peso del racimo [5]. Para mantener el ritmo de económico de la agricultura, se debe prevenir y cuidar cualquier impacto que exista sobre la producción o en la eficiencia, ya que, puede afectar la rentabilidad [6].

Para controlar la Sigatoka Negra, se necesita de un control riguroso, y la manera tradicional realizarlo es a través de fumigaciones terrestres con equipos manuales o aéreas por medio de avionetas y drones [7]. Siendo que, la fumigación agrícola es la base para tener un cultivo productivo [8], pero, deteriora el ecosistema, además de afectar la salud de los que lo manipulan y de las personas que habitan o trabajan cerca de las bananeras [9]. Lo anterior, debido a que los productos utilizados son altamente cancerígenos y existe evidencia de personas que han sido afectadas a lo largo de los años [10, 11].

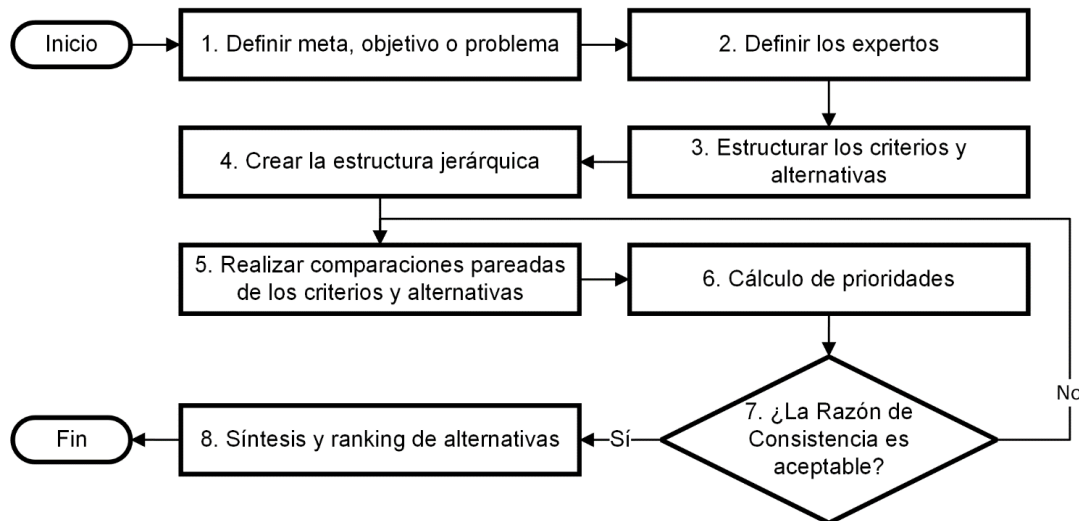
El uso de los fungicidas químicos de manera constante ha desarrollado una resistencia por parte de la plantación contra la Sigatoka Negra [12, 13]. Por lo que, los productores deben seleccionar el método de fumigación más eficiente que genere un mayor impacto en la plantación, reduciendo la proliferación de la enfermedad y no afecte el medio ambiente ni la salud de las personas, dirigiéndose hacia un desarrollo del territorio de manera sostenible.

Considerando lo plasmado anteriormente, este trabajo fundamenta su motivación en identificar la alternativa idónea para fumigar los cultivos de banano contra la Sigatoka Negra, identificando cuáles son los criterios más importantes que influyen en dicho proceso. Para ello, se utiliza el proceso analítico jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process), siendo éste un método desarrollado por Thomas L. Saaty que integra múltiples criterios, tanto cuantitativos como cualitativos y permite identificar para un proceso de toma de decisiones qué alternativa, en conjunto con los criterios, presenta mayor relevancia al lograr un objetivo o solucionar un problema, todo esto según la experiencia y el conocimiento de expertos en el tema y datos obtenidos en el proceso de investigación [14, 15, 16].

Metodología

En el presente estudio, se trabajó basándose en la metodología AHP, a través de la cual se definió un grupo de criterios y alternativas, las cuales fueron evaluados por expertos para encontrar cuál alternativa soluciona la problemática identificada. El esquema por seguir en esta investigación se presenta en la Figura 1 y se desglosa más adelante.

Figura 1. Esquema de metodología de trabajo AHP.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de [17, 18, 19]

Definir meta, objetivo o problema

La Sigatoka Negra es una enfermedad que afecta la producción de las plantaciones de banano [5], para desacelerar el proceso de la enfermedad, los productores utilizan métodos de fumigación agrícola. Sin embargo, es importante destacar que los fungicidas utilizados son los responsables del deterioro del ecosistema y de la afectación a la salud tanto de los trabajadores como de las personas que habitan o trabajan cerca de las plantaciones de banano [9]. Por lo que, esta investigación tiene como objetivo, identificar el mejor método para la fumigación contra la Sigatoka Negra.

Definir los expertos

Seguidamente en la metodología AHP se integra un grupo de expertos, los cuales son fundamentales, una vez que los resultados de la investigación tendrán su sustento en la opinión de este selecto grupo de especialistas. Los cuales se describen a continuación:

- **Fitopatólogo:** Puede brindar información sobre el manejo integrado de plagas, incluyendo la Sigatoka Negra en los cultivos de banano. Es un experto en enfermedades de las plantas y en los diferentes métodos para controlar y prevenir la propagación de estas enfermedades, por lo que, puede ofrecer una perspectiva valiosa sobre la efectividad de los diferentes métodos de fumigación.
- **Agricultor:** Cuenta con experiencia en el cultivo del banano y en la aplicación de diferentes métodos de fumigación. Por lo tanto, puede brindar información sobre los costos, la facilidad de uso y la eficacia de los diferentes métodos.
- **Especialista en salud pública y ambiental:** Esta persona puede aportar información sobre los efectos de los productos químicos utilizados en la fumigación en la salud de las personas y el medio ambiente. Puede ayudar a identificar los riesgos y las precauciones necesarias para minimizar los impactos negativos en la salud y el ambiente.
- **Administrador de la finca:** Es alguien con una comprensión profunda del funcionamiento de la finca y puede brindar información sobre la disponibilidad de recursos y la logística para aplicar diferentes métodos de fumigación. Además, puede aportar información sobre los objetivos y metas específicas

de la finca en relación con el control de la Sigatoka Negra y el impacto de diferentes métodos en la rentabilidad y productividad de la finca.

Estructurar los criterios y alternativas

Continuando con la metodología AHP, para seleccionar las alternativas se realizó una revisión en el estado del arte, evidenciando que las alternativas para fumigar de las plantaciones de banano contra la Sigatoka Negra son los equipos manuales, avioneta y drones [7].

Para la selección de los criterios, se realizó una revisión del estado del arte y consultas a expertos con conocimiento especializado en el contexto regional del manejo de la Sigatoka Negra, a partir de lo cual se identificaron los múltiples factores los cuales se presentan a continuación:

- **Eficacia y eficiencia:** Se ve tanto en el método de fumigación, como en el producto utilizado. Debido a que, el producto debe estar formulado para que garantice el máximo de la efectividad en el control de la enfermedad [20], combinado con un método de fumigación que entregue una alta eficiencia, ya que, es poco probable lograr una producción sostenible a largo plazo si esto no se cumple [21].
- **Costo:** Es un factor importante por considerar en la elección de un método de fumigación, ya que, influye en la rentabilidad del cultivo. Debido a que ha incremento en el número de aspersiones con fungicidas en las plantaciones a través del tiempo, las cuales pasaron de 13 ciclos en el año 1992 a 24 en el año 2002 [22]. Lo anterior repercutiendo en el precio de producción por los elevados costos que genera la contratación con los servicios de fumigación [21]. Por lo que, se desea buscar un servicio que maneje la fertilización con dosis específicas y recomendadas, ya que, permiten el aprovechamiento del potencial productivo, reduciendo gastos innecesarios en la producción, además, reduce el desgaste de suelos [23].
- **Cobertura:** Es un criterio que se refiere a la cantidad de área de un cultivo que puede ser cubierta por cada método de fumigación. Siendo relevante debido a que se necesita una aplicación generalizada en todas las plantas para que sea efectivo el sistema de fumigación. Ésta es esencial teniendo en cuenta que, la eficacia de estos depende de la calidad y cobertura de la aplicación foliar, de tal manera que se cubra toda la plantación [24].
- **Tiempo:** La eficacia del método de fumigación puede depender del momento adecuado en que se realiza. Lo anterior, debido a que se debe tener cuidado con las condiciones climáticas al momento de la fumigación y sólo se puede realizar en una pequeña ventana, temprano en la mañana o al finalizar la tarde. De lo contrario, la inversión térmica y la turbulencia del aire no permiten la deposición correcta del fungicida. Por lo que, es primordial que el servicio de fumigación se realice de manera óptima durante la pequeña ventana de tiempo [24].
- **Impacto ambiental:** Es importante evaluar el impacto de cada método de fumigación en términos de emisiones de gases, contaminación de agua, suelo, entre otros, ya que, la contaminación ambiental podría producir pérdidas en la biodiversidad [12]. La aplicación constante de los fungicidas produce un impacto negativo al medio ambiente, y debido al aumento de la frecuencia en las fumigaciones se debe contemplar usar un método de fumigación que reduzca el impacto que genera [21].
- **Precisión:** Se refiere a la capacidad de cada método de fumigación para aplicar un control específico y estrictamente localizado de los puntos donde se encuentre mayor infección de Sigatoka Negra [24]. Teniendo en cuenta que, un control preciso de fungicidas reduce el impacto de la enfermedad en el área foliar de la planta [13].

- **Seguridad de operarios:** Es importante contemplar la seguridad de los operarios que realizan la fumigación, especialmente en términos de exposición a productos químicos tóxicos, buscando que se encuentren en un entorno más saludable y con menos riesgos [12].
- **Franja de seguridad:** Es la distancia que se debe mantener entre el área fumigada y los límites del cultivo, fuentes hídricas o áreas residenciales. La cual se encuentra regulada en Colombia por el Decreto 1843 de 1991, el cual en el artículo 87, que establece las zonas de seguridad donde no se debe fumigar:

“La aplicación de plaguicidas en zonas rurales no podrá efectuarse a menos de 10 metros en forma terrestre y de 100 metros para el área como franja de seguridad, en relación a cuerpos o cursos de agua, carreteras troncales, núcleos de población humana y animal, o cualquiera otra área que requiera protección especial” [25].
- **Riesgo para la salud:** Está asociado con cada método de fumigación, tanto para los trabajadores como para los consumidores de los productos del cultivo, por lo que se debe buscar la metodología que permita que todos puedan trabajar de modo más saludable y con menos riesgos [12].
- **Disponibilidad:** Se refiere a la facilidad para acceder a los equipos necesarios para cada método de fumigación. Teniendo en cuenta que con algunos métodos se necesita una buena logística de control del tiempo con el fin de reducir en lo más corto posible el periodo entre la identificación del hongo en la planta, la toma de decisiones de aplicar el fungicida y realizar la acción. Lo anterior para indicar que cuando se evidencia un foco de infección el tiempo entre la decisión y ejecución no debería exceder los dos días. Además, la aplicación aérea no es posible en días lluviosos y ventosos [24].

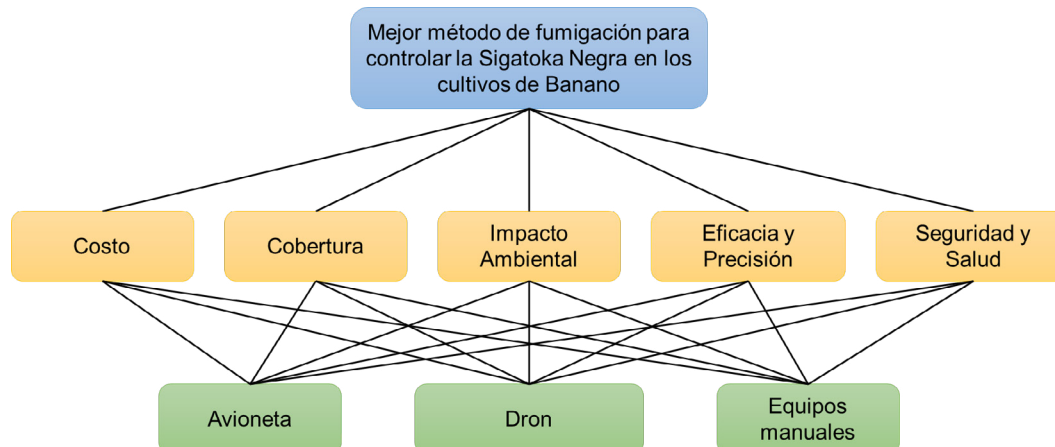
Pero, debido a que la cantidad de criterios es elevada y tener demasiados puede hacer que el análisis sea complejo y difícil de abstraer [26]. Se resumieron en 5 criterios, unificando los anteriormente descritos para que el estudio tenga mayor consistencia, de tal manera que los seleccionados fueron mutuamente excluyentes, colectivamente exhaustivos, relevantes y tenían mayor significado con el problema que se está abordando.

Por lo anterior, se integraron de la siguiente manera: costo, cobertura, impacto ambiental, eficacia y precisión, seguridad y salud. Teniendo en cuenta que, la eficacia y eficiencia va correlacionada con la precisión, el tiempo y la franja de seguridad de fumigación, lo cual afectará en el rendimiento del producto, por lo que, puede ser evaluado en conjunto. De igual forma, la seguridad y salud se integraron en un solo criterio.

Crear la estructura jerárquica

Una vez definido el objetivo del estudio, los criterios a tener en cuenta en la evaluación y las alternativas a tener en cuenta en la investigación, se procedió a construir la estructura jerárquica definida por AHP, la cual se evidencia a partir del árbol de decisiones presente en la en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama AHP.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de [14, 26]

Realizar comparaciones pareadas de los criterios y alternativas

Posterior a tener el árbol de decisiones, fue necesario diseñar un instrumento en el cual los expertos realizarán evaluaciones pareadas para cada uno de los criterios y alternativas, para lo que se utilizó Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS) [27]. Éste se eligió dado que permite diseñar el instrumento, el cual entrega el análisis y resultado en tiempo real una vez el experto lo haya diligenciado.

El instrumento se realizó basado en un formulario con preguntas y respuestas con opción múltiple, estructurado con escalas numéricas para medir la intensidad de preferencia entre cada par de criterios y alternativas, basándose en la escala de 9 puntos de Saaty, el cual se presenta en la Tabla 1 [26]. La cual representará los juicios o preferencias de cada uno de los expertos entre las diferentes opciones. Teniendo en cuenta que, los valores intermedios 2, 4, 6 y 8 que se presentan en la Tabla 1, se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia de los expertos entre cada uno de los criterios o alternativas [16].

Tabla 1. Escala de evaluación de AHP.

Peso	Definición	Explicación
1	Igual de importante	El criterio "A" es igual de importante que el criterio "B". Por lo tanto, ambos criterios contribuyen por igual al objetivo
2	Débil o leve	El criterio "A" es débilmente más importante que el criterio "B". La experiencia y el juicio favorecen débilmente a un criterio sobre el otro
3	Importancia moderada	El criterio "A" es moderadamente más importante que el criterio "B". La experiencia y el juicio favorecen ligeramente a un criterio sobre el otro
4	Importancia más moderada	El criterio "A" tiene una importancia más moderada que el criterio "B". La experiencia y el juicio favorecen con una importancia más moderada a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	El criterio "A" es fuertemente más importante que el criterio "B". La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
6	Importancia más fuerte	El criterio "A" tiene una importancia más fuerte que el criterio "B". La experiencia y el juicio favorecen con una importancia más fuerte a un criterio frente al otro

7	Importancia muy fuerte o demostrada	El criterio "A" es mucho más fuerte en importancia que el criterio "B". La práctica ha demostrado su dominio y fuerte favorabilidad de un criterio sobre el otro
8	Muy, muy fuerte	El criterio "A" tiene una importancia muy fuerte sobre el criterio "B". La experiencia y el juicio favorecen con una importancia muy fuerte a un criterio frente al otro
9	Importancia extrema	El criterio "A" es extremadamente más importante que el criterio "B". La evidencia que favorece en la más alta medida a un criterio sobre el otro

Fuente: Elaboración propia, adaptado de [14, 26]

Cada experto llevó a cabo una evaluación de los criterios para determinar cuál es el más crítico mediante una comparación par a par, utilizando la metodología AHP. Por ejemplo, considerando la fumigación contra la Sigatoka Negra en plantaciones de banano, ¿cuál es el criterio más importante a tener en cuenta el "A" y el "B"? Dependiendo de la respuesta anterior, se procede a establecer el grado de importancia de acuerdo con la escala establecida en la Tabla 1.

Seguidamente en AHP-OS cada experto realizó una comparación entre cada alternativa de fumigación, ya sea con avioneta, dron o con equipos manuales. Pero, en este caso, dicha comparación estuvo en función de un determinado criterio con el fin de identificar la alternativa que cumple con el objetivo del estudio y en qué rango. Por ejemplo, considerando el criterio "X", entre la alternativa "A" y "B", cuál es la que mejor secunda ese criterio, luego en qué grado de importancia, rigiéndose de lo especificado en la Tabla 1.

Cálculo de prioridades

Seguidamente, cuando los expertos diligenciaron el formulario en AHP-OS se obtuvo la matriz de comparación a pares consolidada de para los criterios y el vector de prioridad, el cual resume las prioridades para cada criterio dentro del estudio. De lo cual se realizó un análisis detallado.

¿La Razón de Consistencia es aceptable?

Una vez que se hayan realizado las encuestas por parte de los expertos y obtenido las prioridades de los criterios, el programa AHP-OS permitió calcular la Razón de Consistencia (CR) de las respuestas de cada experto, la cual mide el grado de inconsistencia lógica, validando que los resultados obtenidos no se contradigan entre sí [26]. Si la CR es inferior al 10%, se dice que las respuestas son aceptables y justificadas para la toma de decisiones, pero, si el coeficiente es mayor a 10%, representa que los juicios de la matriz son inconsistentes y no son aceptables [16], en este caso, se le debió informar al experto para replantear sus respuestas en la matriz de comparaciones y volver a calcular los índices para proceder con el análisis.

Síntesis y listado jerárquico de alternativas

Por último, siendo aceptable la razón de consistencia, se obtuvo matriz jerárquica de decisión, que combina cada alternativa con los criterios, de donde se obtiene un listado jerárquico de prioridad de las alternativas según la contribución individual de cada criterio, apuntando al objetivo planteado. Identificando así, cuál es el mejor método de fumigación a implementar, al presentar cada una de las alternativas, criterios y un porcentaje de preferencia para cada una de ellas. Entendiendo que, la metodología propone un resultado, el cual podrá ser utilizado o no, dependiendo de los requerimientos de cada plantación.

Resultados y Discusión

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos al aplicar la metodología expuesta anteriormente en la Figura 1, a partir de la estructura jerárquica de la Figura 2. Partiendo de las revisiones del estado del arte, se obtuvo un alto número de criterios, los cuales no fueron agregados manera individual en el estudio, debido a la complejidad e inconsistencia que podría generarse al aplicar la metodología AHP. Pero, debido a que se consideraron importantes para facilitar el proceso a los tomadores de decisión al momento de seleccionar el método de fumigación, se desarrolló la Tabla 2, en la cual se enmarcan las características, ventajas y desventajas de cada método de fumigación contra los criterios iniciales, siendo diligenciado a partir de la información presente en el estado del arte, consultas a expertos y salidas de campo.

Tabla 2. Características de los métodos de fumigación.

Características	Fumigación aérea con avioneta	Fumigación aérea con Dron	Fumigación terrestre con equipos manuales
Costo (COP/ha)	Alto	Medio	Bajo
Cobertura	Alta	Media	Baja
Tiempo (ha/h)	Rápido	Medio	Lento
Impacto ambiental	Alto	Bajo	Bajo
Franja de seguridad	Alta 100 m	Bajo 10 m	Bajo 10 m
Precisión	Baja	Alta	Alta
Seguridad de operarios	Media	Alta	Baja
Disponibilidad	Baja	Media	Media
Riesgo para la salud	Medio	Baja	Alta
Eficacia y eficiencia	Baja	Alta	Alta

Fuente: Elaboración propia.

Continuando con la metodología planteada, se desarrolló el formulario en AHP-OS agregando los criterios y alternativas establecidos en la estructura jerárquica de la Figura 2, lo cual fue enviado a los expertos. Una vez todos diligenciaron la encuesta, se creó la matriz de comparación a pares entre los criterios presente en la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de comparación a pares entre los criterios.

	Costo	Cobertura	Impacto Ambiental	Eficacia y Precisión	Seguridad y Salud
Costo	1,00	0,34	0,11	0,14	0,11
Cobertura	2,94	1,00	0,23	0,45	0,12
Impacto Ambiental	8,74	4,36	1,00	1,97	0,76
Eficacia y Precisión	7,09	2,21	0,51	1,00	0,39
Seguridad y Salud	9,00	8,21	1,32	2,59	1,00

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Tabla 3 y los resultados individuales de cada experto, se desarrolló la matriz de prioridad de los criterios, la cual integra el vector de prioridad y se observa en la Tabla 4. En esta, se obtienen las prioridades particulares y consolidada de cada criterio, así como su razón de consistencia, el cual es del 2% y ninguno de los expertos obtuvo una razón de consistencia superior al 10%, por lo que, no fue necesario repetir las encuestas.

Tabla 4. Matriz de prioridad de criterios.

Experto	Fitopatólogo	Agricultor	Especialista en salud pública y ambiental	Administrador de la finca	Prioridad ponderada
Costo	2,70%	2,80%	4,40%	3,00%	3,20%
Cobertura	6,60%	6,90%	8,30%	6,70%	7,20%
Impacto Ambiental	25,90%	38,50%	26,20%	28,30%	30,50%
Eficacia y Precisión	13,10%	7,60%	26,20%	28,30%	17,10%
Seguridad y Salud	51,70%	44,20%	34,90%	33,60%	42,00%
CR	8,50%	8,80%	6,50%	1,90%	2,00%

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que, todos los expertos coincidieron en asignar el mismo orden de prioridad a los criterios, variando solamente el peso de cada uno. Siendo que, la seguridad y salud de los operarios y la población es el criterio más importante al momento de elegir el método para fumigar una plantación de banano contra la Sigatoka Negra, seguido del impacto ambiental que se puede generar al tratar los cultivos con el fungicida. Dando como resultado que, el costo, a pesar de ser un criterio importante a tener en cuenta, éste no era tan relevante, siempre que la fumigación fuese eficiente, precisa, cubriera toda la finca y generara los mínimos impactos al medio ambiente y la salud de las personas.

Cuando ya se tuvieron listas las comparaciones de los criterios y se demostró la consistencia del estudio, se obtuvo la Tabla 5, en la que se sintetizan los resultados de cada experto respecto a qué alternativa aporta más al objetivo de la investigación en relación de los criterios, de la cual fue posible obtener el ordenamiento de las alternativas y su listado jerárquico. Evidenciándose qué, el dron favorece al objetivo de ser el mejor método de fumigación con un 62,41%, seguido de los equipos manuales con un 21,45%, encontrándose qué, la avioneta, a pesar de ser el método más empleado por los agricultores, lo consideran como el menos adecuado para fumigar sus plantaciones con un 16,14%. Cabe resaltar que, la relación de consistencia del estudio dio como resultado un 6,19%, lo cual es inferior a 10%, por lo que, se considera que los resultados de esta investigación son consistentes y válidos para los procesos de toma de decisiones.

Tabla 5. Matriz de prioridad de alternativas

Participante	Fitopatólogo	Agricultor	Especialista en salud pública y ambiental	Administrador de la finca	Prioridad ponderada
Dron	56,72%	70,51%	51,51%	57,81%	62,41%
Avioneta	15,13%	12,16%	39,40%	7,47%	16,14%
Equipos manuales	28,14%	17,33%	9,09%	34,72%	21,45%
CR	7,67%	8,39%	7,44%	7,66%	6,19%

Fuente: Elaboración propia

Con la totalidad de comparaciones de los criterios y alternativas realizadas por los expertos, se desarrolló la Tabla 6, en la cual se puede observar la relación que hay de manera porcentual entre cada alternativa y criterio del estudio, así como sus vectores de prioridad.

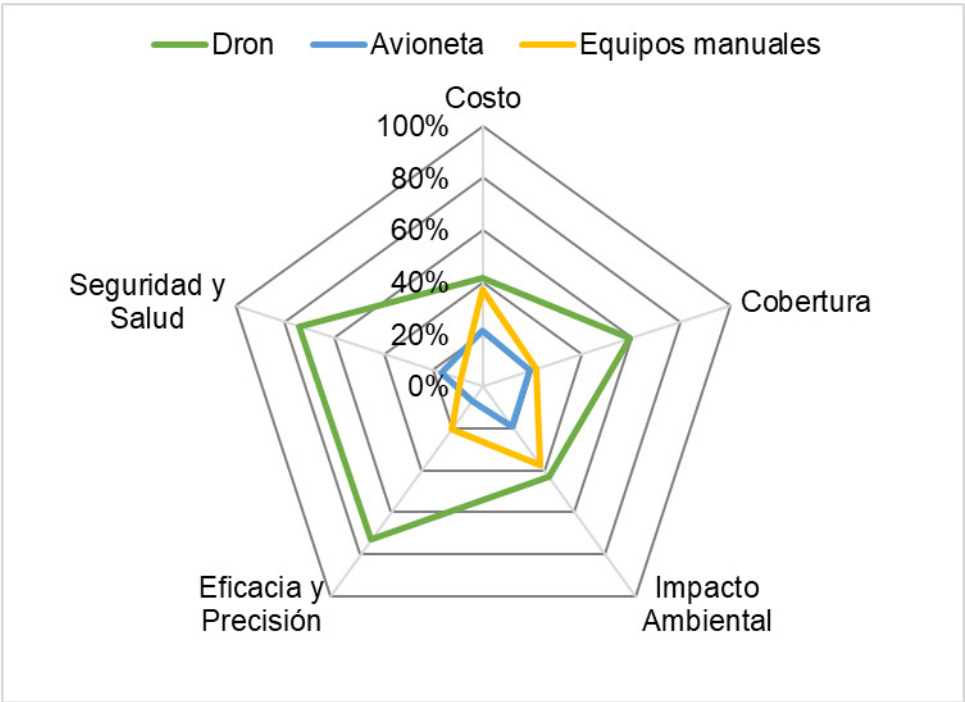
Tabla 6. Jerarquía de prioridades consolidadas.

Alternativas / Criterios	Dron	Avioneta	Equipos manuales	Prioridad de criterios
Costo	41,40%	21,30%	37,30%	3,20%
Cobertura	59,40%	19,10%	21,50%	7,20%
Impacto Ambiental	43,10%	19,40%	37,50%	30,50%
Eficacia y Precisión	72,80%	7,00%	20,20%	17,10%
Seguridad y Salud	74,30%	16,60%	9,10%	42,00%
Prioridad de alternativas	62,40%	16,10%	21,40%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Tabla 6, se desarrolló la Figura 3, en la cual se puede ver gráficamente cómo las alternativas aportan sobre cada criterio para cumplir el objetivo de encontrar la mejor metodología para fumigar el banano contra la Sigatoka Negra. Se evidencia que, el dron es superior a las demás alternativas en todos los criterios, por lo que, se recomienda hacer uso de esta tecnología para fumigar las plantaciones de banano, debido a que con éste sería posible cubrir toda la plantación de manera uniforme, de manera eficaz y precisa, con poco impacto ambiental o riesgos para la salud y seguridad de la población. Todo lo anterior con costos medios comparado con las otras alternativas.

Figura 3. Gráfico radial de jerarquía de prioridades consolidadas.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados evidencian que, los equipos manuales quedan en segundo en el listado jerárquico de alternativas sobre todos los criterios, a excepción del criterio de seguridad y salud, en el cual es superado por la avioneta. Lo cual tiene relación al evidenciarse que, el especialista en salud pública y ambiental fue el fue el único que definió a la avioneta como mejor alternativa que los equipos manuales en la Tabla 5. Todo lo anterior se debe a que, en algunas fincas pequeñas, tienden a utilizar los equipos manuales sin ningún elemento de protección personal, lo que, podría generar problemas de salud para las personas al estar expuesto a los químicos de fumigación, tal como se evidencia en la Figura 4, donde se ve a un trabajador fumigando sin los elementos mínimos de protección.

Figura 4. Fumigación con equipos manuales sin elementos de protección.



Fuente: Elaboración propia.

En principio se puede declarar que el implementar los drones como método de fumigación contra la Sigatoka Negra en las plantaciones de banano presentan resultados más sostenibles y aportan al desarrollo territorial, comparado con las otras alternativas como las avionetas o equipos manuales. Pero, es importante recalcar que cada plantación es diferente y se debe profundizar en sus necesidades para elegir el método adecuado, ya que, éste dependerá de diversos factores, como el tamaño del cultivo, la topografía del terreno, el presupuesto disponible y las regulaciones ambientales y de salud. Por lo que, los resultados de esta investigación se presentan como una guía a tener en cuenta por parte de los agricultores y las fincas productoras, más no se considera como una obligación.

Aplicar la metodología del proceso analítico jerárquico (AHP) entrega los resultados de los criterios en orden de prioridad y el peso que representa al objetivo, lo cual es idóneo para la selección del método de fumigación requerido, ya que, si llegase a existir otra forma de fumigación, diferente a las planteadas, se puede analizar cómo cada criterio aporta a dicha alternativa y establecer si es la mejor para cumplir con el objetivo de fumigación de la plantación.

Esta investigación entrega un punto de partida para extender el uso de múltiples criterios sobre el ámbito de la selección del método de fumigación adecuado, sea sobre el banano u otro producto agrícola.

El que los drones hayan sido seleccionados como el mejor método de fumigación de manera unánime por los expertos, se puede reflejar en que éstos han presentado mayor eficiencia al fumigar, generando

menos desperdicio de pesticidas, convirtiéndose en un equipo con un alto rendimiento de agroquímicos [28]. Adicionalmente, resulta más seguro y rentable que las avionetas, debido a que los operarios no se encuentran cerca o dentro de ésta, además de permitirle al agricultor el ahorro de fungicidas, menor impacto ambiental, una mejor salud para las personas que se encargan de este proceso porque evitan la exposición directa con el líquido, con un eficiente y equilibrado riego [29, 30].

Conclusión

Con base en el análisis de los resultados se determinó que la metodología AHP permite conocer cuál es el mejor método de fumigación contra la Sigatoka Negra en las plantaciones de banano, el cual va alineado hacia un desarrollo territorial sostenible, encontrándose que, en un listado jerárquico, el dron ocupa el primer lugar con un 62,41%, seguido de los equipos manuales con un 21,45%, quedando en último lugar, a pesar de ser de los más usados las avionetas con un 16,14%.

Lo anterior conlleva importantes implicaciones para el desarrollo territorial sostenible y la política agrícola, ya que, puede ser utilizado como una herramienta valiosa para la toma de decisiones y la priorización de políticas públicas que promuevan el uso de estas tecnologías dentro de la agricultura de precisión.

Fomentar la inversión en tecnologías agrícolas de precisión puede mejorar la eficiencia y productividad del sector agrícola, contribuyendo a la sostenibilidad del desarrollo territorial. Esto puede motivar a pequeños agricultores a unir recursos e invertir en drones en lugar de avionetas. La adopción de estas tecnologías innovadoras puede reducir la exposición de los trabajadores a productos químicos peligrosos y mejorar la calidad de los cultivos, lo que puede tener impactos positivos en la salud pública y el medio ambiente.

Se puede observar qué, todos los expertos coincidieron, bajo todos los criterios planteados, que el dron es el mejor método de fumigación. Mientras qué, los equipos manuales a pesar de ser la segunda opción pierden este lugar frente a las avionetas sólo bajo el criterio de seguridad y salud, debido al alto riesgo que este tipo de fumigación le genera a la salud de las personas si no se utilizan los elementos de protección personal adecuado.

Los productores de banano cada vez son más conscientes sobre los daños a la salud y al medio ambiente que conlleva el realizar fumigaciones periódicas sobre las plantaciones de banano en contra de la Sigatoka Negra, por lo que, se encuentran en la búsqueda de métodos de fumigación más eficaces y precisos que apoyen al desarrollo territorial sostenible. Por lo que, este trabajo ayuda a justificar la decisión para seleccionar el método de fumigación adecuado, ya que, integra los criterios más importantes y su porcentaje de prioridad gracias a la metodología AHP.

Referencias

1. M. Betancourt, M. Dita, E. Saini, y L. Salazar, "Agenda para la prevención y el manejo de brotes de la raza 4 tropical de *Fusarium* (R4T) en el cultivo de musáceas en América Latina y el Caribe (ALC)", Washington, D.C., may 2020. DOI: 10.18235/0002346.
2. FAO, "Análisis del mercado del banano de 2019", Roma, 2020.
3. AUGURA, "COYUNTURA BANANERA 2021", 2021.
4. D. Mathew, C. Sathish Kumar, y K. Anita Cherian, "Foliar fungal disease classification in banana plants using elliptical local binary pattern on multiresolution dual tree complex wavelet transform domain", *Information Processing in Agriculture*, vol. 8, núm. 4, pp. 581–592, dic. 2021, DOI: 10.1016/j.inpa.2020.11.002.

5. G. Cedeño García, C. Suarez Capello, D. Vera Coello, C. Fadda, D. Jarvis, y P. de Santis, “Detección temprana de resistencia a *Mycosphaerella fijiensis* en genotipos locales de Musáceas en Ecuador”, *Scientia Agropecuaria*, vol. 8, núm. 1, pp. 29–42, mar. 2017, DOI: 10.17268/sci.agropecu.2017.01.03.
6. M. J. O’Grady y G. M. P. O’Hare, “Modelling the smart farm”, *Information Processing in Agriculture*, vol. 4, núm. 3, pp. 179–187, sep. 2017, DOI: 10.1016/j.inpa.2017.05.001.
7. Y. V. Tomala Chimbo, “EFECTO DE FUMIGACIÓN CON DRON Y AVIONETA PARA EL CONTROL DE *Mycosphaerella fijiensis* (SIGATOKA NEGRA) EN EL CULTIVO DE BANANO DE VARIEDAD WILLIAMS”, 2022. Consultado: el 12 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/TOMALA%20CHIMBO%20YOMIRA%20VERÓNICA.pdf>
8. S. N. Arriaga García, “EFICIENCIA DEL USO DE DRONES EN EL CONTROL DE SIGATOKA NEGRA (*Mycosphaerella fijiensis*) EN EL CANTÓN VINCES, PROVINCIA DE LOS RÍOS”, UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL, Guayaquil, 2022.
9. E. E. Espinoza-Freire y N. P. Tinoco-Cuenca, “LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL RESULTANTE DE LA FUMIGACIÓN AÉREA CONPLAGUICIDAS A BANANERAS DE LA PROVINCIA EL ORO, ECUADOR”, *Ciencia en su PC*, vol. 4, núm. 4, pp. 75–87, 2015, Consultado: el 12 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181349354008>
10. UTADEO, “Una nube de veneno se cierne sobre Urabá”, 2019. Consultado: el 12 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.utadeo.edu.co/es/articulo/crossmedialab/277626/una-nube-de-veneno-se-cierne-sobre-uraba>
11. M. Madrid Vergara, “Veneno del cielo: el riesgo de los bananeros en Urabá”, el 31 de marzo de 2019. Consultado: el 12 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://semanarural.com/web/articulo/pesticidas-y-salud-la-otra-cara-de-la-industria-banamera-en-uraba/876>
12. Á. Llerena Hidalgo y R. Castaño Oliva, “Influencia del tipo de riego con agua ozonificada en el control del nivel de daño de la sigatoka negra en banano”, *Alternativas*, vol. 20, núm. 1, pp. 39–46, mar. 2020, DOI: 10.23878/alternativas.v20i1.245.
13. J. Quevedo Guerrero, C. J. C. Infante Noblecilla, y C. R. M. García Batista, “Efecto del uso predominante de fungicidas sistémicos para el control de Sigatoka negra (*Mycosphaerella Fijiensis* Morelet) en el área foliar del banano”, *Agroecosistemas*, vol. 6, núm. 1, pp. 128–136, 2018, Consultado: el 22 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/181>
14. M. Polo-Castañeda, J. Gomez-Rojas, y J. Linero-Cueto, “Application of AHP and GIS for Determination of Suitable Wireless Sensor Network Zones for Oceanographic Monitoring in the South Caribbean Sea Upwelling Zone”, *Int J Adv Sci Eng Inf Technol*, vol. 11, núm. 5, p. 1696, oct. 2021, DOI: 10.18517/ijaseit.11.5.14293.
15. A. E. Valdez, M. A. P. Castaneda, J. Gomez-Rojas, y R. L. Ramos, “Canopy Extraction in a Banana Crop From UAV Captured Multispectral Images”, en *2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN)*, IEEE, nov. 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/CONCAPAN48024.2022.9997598.
16. J. C. Osorio Gómez, M. F. Herrera Umaña, y M. A. Vinasco, “Modelo para la evaluación del desempeño de los proveedores utilizando AHP”, *Ingeniería & Desarrollo*, vol. 23, núm. 1, pp. 43–58, 2008.
17. J. A. Gómez Romero, R. Soto Flores, y S. Garduño Román, “Determinación de las Ponderaciones de los Criterios de Sustentabilidad Hidroeléctrica mediante la Combinación de los Métodos AHP y GP Extendida”, *Ingeniería*, vol. 24, núm. 2, may 2019, DOI: 10.14483/23448393.14469.
18. J. A. Gómez Romero, R. Soto Flores, y S. Garduño Román, “Selección de un modelo para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica mediante el método AHP”, *Revista de Métodos Cuantitativos*

- para la Economía y la Empresa, vol. 30, núm. 30, pp. 117–141, dic. 2020, DOI: 10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3835.
19. B. Cordero Torres, “Selección de proveedores priorizando criterios sostenibles para productos: un enfoque de AHP en compras públicas peruanas”, *Industrial Data*, vol. 22, núm. 1, pp. 153–172, jul. 2019, DOI: 10.15381/idata.v22i1.16532.
20. F. Echeverri, “La protección del banano contra la Sigatoka Negra por métodos no biocidas”, *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, vol. 37, núm. 145, pp. 519–525, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://link.gale.com/apps/doc/A497671195/IFME?u=unimagdalena&sid=bookmark-IFME&xid=e54fd487>
21. J. García Regalado, A. Marcillo Plaza, y C. Palacios Sánchez, “Amenazas de las manchas foliares de Sigatoka (*Mycosphaerella* spp.) en la producción sostenible de banano en el Ecuador”, *Revista Verde*, vol. 14, núm. 5, pp. 591–596, 2019, DOI: 10.18378/rvads.v14i4.6623.
22. H. Bornacelly Horta y J. Bolaño González, “Efecto de diferentes labores de manejo sobre el desarrollo de la sigatoka negra del banano en el distrito de Sevilla, zona bananera del Magdalena.”, Universidad del Magdalena, Santa Marta, 2020. Consultado: el 22 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/5166>
23. J. S. Vivas-Cedeño, J. O. Robles-García, I. González-Ramírez, D. A. Álava-Cruz, y M. A. Meza-Loor, “Fertilización del plátano con nitrógeno, fósforo y potasio en cultivo establecido”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 4, núm. 1, pp. 633–647, ene. 2018, DOI: 10.23857/dc.v4i1.772.
24. J. Ganry, E. Foure, L. de L. de Bellaire, y T. Lescot, “An Integrated Approach to Control the Black Leaf Streak Disease (BLSD) of Bananas, while Reducing Fungicide Use and Environmental Impact”, en *Fungicides for Plant and Animal Diseases*, InTech, 2012, pp. 193–226. DOI: 10.5772/29794.
25. Constitución Política, DECRETO NÚMERO 1843 DE 1991. POR EL CUAL SE REGLAMENTAN PARCIALMENTE LOS TITULOS III, V, VI, VII Y XI DE LA LEY 09 DE 1979, SOBRE USO Y MANEJO DE PLAGUICIDAS. Colombia, 1991.
26. T. L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process”, 2008.
27. K. Goepel, “Implementation of an Online software tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS)”, *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, vol. 10, núm. 3, pp. 469–487, 2018, DOI: 10.13033/ijahp.v10i3.590.
28. D. D. López Juvinao, L. M. . Torres Ustate, y F. O. Moya Camacho, “Tecnologías, procesos y problemática ambiental en la Minería de arcilla”, *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, n.º 2, pp. 20–43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.2.3857>
29. J. P. Aguilar Noblecilla, “Control de la sigatoka negra *mycosphaerella fijiensis* morelet con dos sistemas de atomización aérea en una finca orgánica”, 2018. Consultado: el 13 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/12425>
30. R. Ríos-Hernández, “Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión”, *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 11, núm. 4, pp. 75–84, 2021, Consultado: el 9 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586268743010>