



Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Ingeniería Agronómica

Detección de niveles de infección de *Alternaria* spp. en *Brassica oleracea* var. *botrytis*, utilizando imágenes multiespectrales capturadas a corta distancia

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


Autores:

Nancy Rocío Gualán Gualán

Juan Carlos Sánchez Llanos

Director:

Walter Ivan Larriva Coronel

ORCID:  0000-0002-9292-1119

Cuenca, Ecuador

2024-08-07

Resumen

La detección temprana de enfermedades, como *Alternaria spp* en coliflor, es crucial para evitar pérdidas. Las imágenes multiespectrales constituyen una alternativa que permite identificar patrones de daño y dar soluciones agrícolas de manera sostenible. La presente investigación, realizó la detección de los niveles de infección de *Alternaria spp*. en coliflor, mediante la captura de imágenes multiespectrales a corta distancia (2m). El trabajo se realizó en la Facultad de ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca, en la cual se implementó un DBCA 4X4 con 4 dosis de concentración de inóculo de alternaria (Dosis 1: 1×10^3 ; Dosis 2: 1×10^5 ; Dosis 3: 1×10^7 ; Dosis 4: 1×10^0 (testigo)). La captura de las imágenes se realizó con el sensor Parrot Sequoia en dos estadios fenológicos de la planta, además, se realizó la determinación de la severidad en campo empleando un método convencional. Los resultados revelaron que no hubo diferencias significativas en la mayoría de los casos, sin embargo, los índices NDVI, GNDVI y NDRE, mostraron sensibilidad tras su aplicación. NDVI y GNDVI discriminaron de mejor forma las áreas que presentaron necrosis y clorosis a diferencia del NDRE. Al comparar entre los dos métodos evaluados, dan como resultado discrepancia, generando así nuevas dudas debido a la limitación de la precisión en las imágenes capturadas con la cámara multiespectral para la determinación del estado de salud de la planta, generando así la necesidad de revisar y ajustar los métodos de evaluación para corregir diferentes errores.

Palabras clave del autor: imágenes multiespectrales, *Alternaria*, severidad, índices de vegetación



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

Early detection of diseases, such as *Alternaria* spp in cauliflower, is crucial to avoid losses. Multispectral imaging offers a solution, allowing the identification of damage patterns and improving agricultural productivity in a sustainable way. The present research, carried out the detection of *Alternaria* spp. infection levels in cauliflower, by capturing multispectral images at close range (2m). The work was carried out at the Faculty of Agricultural Sciences of the University of Cuenca, in which a 4X4 DBCA was implemented with 4 doses of *Alternaria* inoculum concentration (Dose 1: 1x10³; Dose 2: 1x10⁵; Dose 3: 1x10⁷; Dose 4: 1x10⁹ (control)). The images were captured with the Parrot Sequoia sensor at two phenological stages of the plant, and the severity was determined in the field using a conventional method. The results revealed that there were no significant differences in most cases; however, the NDVI, GNDVI and NDRE indices showed sensitivity after application. NDVI and GNDVI discriminated better the areas showing necrosis and chlorosis than NDRE. When comparing the two methods evaluated, the result was discrepancy, generating new doubts due to the limitation in the capacity presented by the camera to offer precision in the determination of the state of health of the plant, thus generating the need to review and adjust the evaluation methods that lead us to adjust different errors.

Author Keywords: multispectral images, *Alternaria*, severity, vegetation indices



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

1	Justificación	10
2	Objetivos	11
2.1	Objetivo general.....	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	Revisión bibliográfica	11
3.1	La Agricultura de Precisión	11
3.2	Teledetección	12
3.3	Cámaras	12
3.4	Cámaras Multiespectrales.....	13
3.5	Cámaras Hiperespectrales.....	13
3.6	Índices de Vegetación.....	13
3.6.1	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	14
3.6.2	Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE).....	16
3.6.3	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)	17
3.7	Reflectancia de las hojas	17
3.8	Procesamiento de Imágenes	17
3.9	Detección de Objetos.....	18
3.10	Cultivo de la Coliflor	18
3.10.1	Descripción botánica.....	19
3.10.1.1	Raíz	19
3.10.1.2	Tallo.....	19
3.10.1.3	Hojas	19
3.10.1.4	Inflorescencia	19
3.10.1.5	Fenología de la Coliflor	19
3.10.2	Requerimientos edafoclimáticos	20
3.10.2.1	Clima	20
3.10.2.2	Suelo	20
3.10.2.3	Riego	21
3.10.2.4	Fertilización	21
3.10.3	Enfermedades	21
3.10.3.1	Alternaria spp.....	21
3.10.4	Severidad	22
3.10.5	Medición de la severidad	22
3.11	Cálculo de concentración de inóculo	23
4	Materiales y métodos	23

4.1	Área experimental.....	23
4.2	Tipo de investigación	24
4.3	Materiales	24
4.4	Siembra	25
4.5	Diseño experimental	25
4.6	Obtención y preparación del inóculo	25
4.6.1	Conteo de esporas	26
4.6.2	Inoculación de <i>Alternaria</i> spp. por aspersión	26
4.7	Preparación del área de fotografía.....	26
4.8	Captura de las imágenes multiespectrales.....	27
4.9	Procesamiento de las imágenes multiespectrales.....	27
4.10	Levantamiento de datos de severidad	30
4.11	Análisis estadístico	31
5	Resultados	31
5.1	Resultado del primer objetivo específico.....	31
5.2	Resultado del segundo objetivo específico	33
5.2.1	Captura de imágenes en la tercera etapa fenológica (67 DDS)	33
5.2.2	Captura de imágenes en la cuarta etapa fenológica (87 DDS).....	35
5.3	Resultado del tercer objetivo específico	38
6	Discusión	42
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	43
	Referencias.....	45

Índice de figuras

Figura 1. Índices basados en pendientes..	14
Figura 2. Índices basados en la distancia.....	14
Figura 3. Reflectancia de las bandas en función del estado vegetal.....	15
Figura 4. Radiación electromagnética.	16
Figura 5. Zona de transición de la banda del borde rojo.....	17
Figura 6. Mapa de ubicación del establecimiento del ensayo.....	24
Figura 7. Diagrama del proceso de imágenes.....	28
Figura 8. Segmentación de la hoja para estimar el porcentaje de área infectada.....	30
Figura 9. Flujograma de levantamiento de información y procesamiento de imágenes multiespectrales.....	32
Figura 10. Reclasificación de los IV en la segunda etapa y tercera etapa fenológica.....	34
Figura 11. Valores mínimos y máximos de los IV en la segunda y tercera etapa fenológica.....	35
Figura 12. Reclasificación de los IV en la segunda y cuarta etapa fenológica.....	37
Figura 13. Valores mínimos y máximos de los IV en la segunda y cuarta etapa fenológica.....	38
Figura 14. Diagrama de cajas para el PDI en la segunda etapa fenológica de la coliflor....	39
Figura 15. Comparación de medias de área para el rango 1 (-1 a 0) del NDVI.....	40
Figura 16. Diagrama de barras de comparaciones múltiples para PDI a los 87 DDS.....	40
Figura 17. Diagrama de comparación de medias en el rango tres para GNDVI.....	41
Figura 18. Diagrama de comparación de medias en el rango tres para NDVI.....	42

Índice de tablas

Tabla 1.	<i>Esquema del diseño experimental.....</i>	25
Tabla 2.	<i>Puntos de control</i>	29
Tabla 3.	<i>Rangos de clasificación para los IV.....</i>	30
Tabla 4.	<i>Escala de severidad para evaluar la severidad de Alternaria en coliflor.</i>	31
Tabla 5.	<i>Registro de captura de imágenes.....</i>	32
Tabla 6.	<i>Comparación de medias de área para el rango 1 del NDVI.....</i>	33
Tabla 7.	<i>Comparación de medias en el rango tres para NDVI.....</i>	36
Tabla 8.	<i>Comparación de medias en el rango tres para GNDVI.....</i>	36

Agradecimiento

Queremos agradecer a la Universidad de Cuenca, institución que nos brindó la oportunidad de formarnos y convertirnos en profesionales capaces de servir a la sociedad. Además, agradecemos profundamente a todo el cuerpo docente por sus conocimientos impartidos y su invaluable guía a lo largo de la carrera.

De manera especial, se le agradece al Ing. Walter Larriva, director de esta investigación, por su constante apoyo, orientación y motivación. Sus amplios conocimientos y su compromiso inquebrantable fueron fundamentales para poder culminar con éxito este trabajo de titulación. Asimismo, extendemos la gratitud a la Ing. Adriana Tenesaca y al Ing. Mateo López, quienes, con su colaboración y valiosos aportes en la parte práctica de este proyecto, hicieron posible llegar a su término.

Finalmente, queremos expresar la más profunda gratitud a la familia, amigos y compañeros, quienes nos brindaron su apoyo incondicional durante toda la trayectoria universitaria. Los momentos compartidos y su constante aliento fueron fundamentales para alcanzar este valioso logro.

Dedicatoria

Con profunda gratitud y humildad, dedicamos esta tesis a Dios, por habernos regalado la oportunidad de culminar con éxito esta etapa de nuestra formación profesional. A nuestras amadas familias, en especial a nuestras madres, quienes, con su infinito amor, apoyo incondicional y sabios consejos, nos han impulsado a perseverar y alcanzar este importante logro académico.

Asimismo, dedicamos este trabajo a nuestros hermanos, quienes han sido un pilar fundamental en nuestras vidas, compartiendo momentos de alegría, brindándonos su ayuda desinteresada y siendo un gran soporte para superar los desafíos que se presentaron durante la realización de este proyecto.

Finalmente, dedico este trabajo de tesis a mi compañero/a de investigación, cuya colaboración y compromiso fueron fundamentales para el éxito de este proyecto. A lo largo de este arduo proceso, su dedicación, conocimientos y habilidades han sido una fuente constante de inspiración y motivación. Agradezco sinceramente su apoyo incondicional, su trabajo arduo y su amistad, que han sido pilares indispensables en este viaje académico. Esta tesis es el resultado de un esfuerzo en conjunto y refleja nuestra pasión por este campo de estudio. Dedicamos este logro a nuestro esfuerzo y esperamos que este trabajo sirva de base a futuras investigaciones en esta área de estudio.

1 Justificación

La producción agrícola mundial se enfrenta a una serie de desafíos, como el aumento de la población y el cambio climático; este último afecta en la disponibilidad de alimentos con la aparición y propagación acelerada de plagas y enfermedades en los cultivos (Hamada & Ghini, 2011; Jiménez-Díaz, 2008). La incidencia de estos agentes influye directamente en la calidad y producción de alimentos. De acuerdo al ESPAC (2021) el Ecuador cuenta con grandes extensiones de hortalizas como la coliflor, brócoli, col y entre otras; teniendo un aumento de superficie de 2.37% con respecto al 2020. Esto se debe a la creciente demanda de alimentos por el incremento poblacional y el cambio de hábitos alimenticios (López-Chillón, 2020).

El registro constante de los cultivos es crucial para garantizar la productividad de los pequeños y grandes productores. Las variaciones climáticas aumentan la propagación de enfermedades y la susceptibilidad de los cultivos (Lozano-Povis et al., 2021) lo que se ha visto en la región sierra (Dillard et al., 1998). Estos patógenos pueden ocasionar pérdidas de hasta un 30% en las inflorescencias y hojas de los cultivos (Tamayo & Jaramillo, 2004).

En este sentido, la detección temprana permite tomar medidas rápidas y eficientes para controlar y prevenir la propagación de enfermedades. Actualmente, existen diversas técnicas para una detección temprana, pero muchas de ellas son costosas, requieren mucho tiempo y no son efectivas (Calderón et al., 2018). En contraste, el uso de imágenes multiespectrales capturadas a corta distancia se presenta como una técnica prometedora y eficaz para la detección temprana de *Alternaria* en coliflor. Esto se debe a que las imágenes multiespectrales, permiten obtener información detallada sobre la reflectancia de las plantas en diferentes longitudes de onda, pudiendo ser utilizado, para identificar patrones de daño en las hojas y determinar el grado de infección (Lone & Pais, 2022), siendo por lo tanto una técnica no destructiva.

En un estudio, Baranowski et al. (2015) demostró la eficacia de esta técnica para detectar niveles de infección de *Alternaria* spp. en Brassicaceas. Los investigadores utilizaron un conjunto de imágenes hiperespectrales capturadas a corta distancia para analizar diferentes niveles de infección en las plantas. Los resultados dejaron ver que el análisis de temperatura y reflectancia de las hojas mostraron cambios en el tiempo. Por tal razón, las imágenes multiespectrales a corta distancia permiten detectar enfermedades en las plantas, siendo una herramienta valiosa para mejorar la productividad agrícola y reducir el uso de pesticidas de manera inadecuada; además, proporciona nuevos conocimientos entre las interacciones planta-patógeno, pudiendo con ello, llevar a la identificación y uso de nuevas estrategias de control de enfermedades.

La investigación proporcionará resultados que pueden ser utilizados en primera instancia por investigadores, quienes podrían afinar los procesos de ser necesario, por los técnicos de campo, si quisieran emplear dicha alternativa tecnológica, y por agricultores detectar la enfermedad evaluada en la presente investigación de manera temprana y adoptar prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes, siendo estos mismos los beneficiados directos en la producción de coliflor, mientras que los beneficiarios indirectos se extienden a la sociedad en general al mejorar la calidad de los alimentos, proteger el medio ambiente y promover la salud pública.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

- Detectar los niveles de infección de *Alternaria* spp. en *Brassica oleracea* var. *botrytis*, utilizando imágenes multiespectrales capturadas a corta distancia.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento de información y procesamiento de imágenes del cultivo de *Brassica oleracea* var. *botrytis* sometido a tres niveles de infección de *Alternaria* spp.
- Evaluar el comportamiento de los índices de vegetación aplicados al cultivo de *Brassica oleracea* var. *botrytis*.
- Evaluar las técnicas multiespectrales con referencia al método de determinación de severidad del *Alternaria* spp. en campo en el cultivo de *Brassica oleracea* var. *botrytis*.

3 Revisión bibliográfica

3.1 La Agricultura de Precisión

La agricultura en todo el mundo está buscando tecnologías modernas para ayudar a abordar la seguridad alimentaria a largo plazo, al mitigar la falta de atención a ciertas particularidades de los cultivos, lo que genera gastos innecesarios en su monitoreo. Antiguamente, las fincas no eran muy grandes, pero ahora, el aumento de la población y con ello la demanda de alimentos requiere cultivos más extensos que son difíciles de administrar. Esto puede llevar a decisiones equivocadas sobre los cultivos que se manejan, pérdidas económicas y un mayor impacto ambiental a corto y mediano plazo (González et al., 2016).

La investigación, extensión e innovación en el sector agrícola han respondido a los nuevos desafíos mediante la creación de tecnología que permita desarrollar técnicas para cuantificar y manejar la variabilidad natural del área de producción de manera diferenciada. Es por ello que, la Agricultura de Precisión (AP) la cual consta de un nuevo concepto de agricultura que se desarrolló a partir de los años 70 mediante la automatización de máquinas agrícolas. En los años 80 y 90, con la liberación del GPS para uso civil, se pudo desarrollar

equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas, lo que aumentó la eficiencia en la aplicación de insumos, redujo el impacto ambiental y disminuyó los costos de producción de alimentos (Bongiovanni et al., 2006).

La agricultura de precisión busca mejorar la eficiencia en el uso de los insumos agrícolas considerando la variabilidad del suelo y del cultivo en el espacio y el tiempo. Se cuantifica la variabilidad para distribuir adecuadamente los insumos en función de las necesidades de cada punto de las áreas de manejo. Por ello, la AP no solo implica medir la variabilidad, sino también adoptar prácticas administrativas que se ajusten a ella (Bongiovanni et al., 2006).

Para enfrentar los desafíos, la AP utiliza diversas herramientas, tecnológicas de monitoreo (González et al., 2016), como la teledetección remota basada en sensores multiespectrales, que se utilizan para abordar los desafíos actuales en la agricultura, tales como la variabilidad en la calidad, el rendimiento de la producción, y el impacto ambiental del uso ineficiente de plaguicidas y fertilizantes. Estas herramientas proporcionan información precisa y en tiempo real sobre los cultivos, lo que ayuda a mejorar la gestión y toma de decisiones en la agricultura (Kharuf-Gutierrez et al., 2018).

3.2 Teledetección

La Teledetección es una técnica para adquirir información sin contacto directo, en las ciencias de la Tierra y se enfoca en capturar, procesar y analizar imágenes digitales tomadas por satélites artificiales (Chuvieco, 1990). Se diferencia de la Fotogrametría por el carácter cíclico de las tomas, la orientación temática y el carácter multiespectral de la información. Comenzó alrededor de 1960 con misiones espaciales militares, pero pronto se utilizó para fines civiles (Pérez, 2006).

La Teledetección se basa en la interacción de la energía electromagnética con la superficie terrestre, cuyo comportamiento reflectivo varía en función de factores externos, como el ambiente, y de las características físico-químicas propias de la superficie en el momento de la captura de la imagen. Entre los componentes clave que hacen posible el fenómeno de la Teledetección tenemos: la fuente generadora de radiación electromagnética como el sol, los sensores óptico-electrónicos, los receptores, las herramientas de análisis digitales y el usuario (Pérez, 2006).

3.3 Cámaras

Al elegir las cámaras que se usarán para tomar fotografías, es necesario verificar la resolución espectral, que se refiere a la capacidad de los sistemas de percepción que permite distinguir y diferenciar entre la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. La cantidad y amplitud de las bandas espectrales son los factores principales que pueden

determinar las capacidades del sensor: una mayor resolución espectral se traduce en información más valiosa. Hay varios tipos de cámaras o sensores disponibles con diferentes resoluciones espectrales, como RGB (Red, Green, Blue) estándar, multiespectral, hiperespectral, infrarroja o térmica, óptica, 3D y fluorescencia, todos los cuales permiten la caracterización de índices de vegetación (IV) (Saavedra et al., 2019).

3.4 Cámaras Multiespectrales

Estas cámaras capturan información en varias bandas espectrales, generalmente entre 3 y 7, cada una con un ancho de banda de unos 100 nm. Estas bandas incluyen la verde (550 nm de longitud de onda y 40 nm de ancho de banda), roja (~660 nm de longitud de onda y 40 nm de ancho de banda), y las dos bandas infrarrojas: Bordo rojo (centrado en ~735 nm, con banda de paso de 10 nm) e Infrarrojo cercano (centrado en ~790 nm y banda de paso de 40 nm) (Trueba, 2017).

3.5 Cámaras Hiperespectrales

Este tipo de cámara o sensor es altamente sofisticado, ya que captura información en un amplio rango de longitudes de onda y puede tomar datos en hasta 300 bandas. Proporciona información espectral detallada de la vegetación, y se pueden ajustar la geometría, la calibración radiométrica y la corrección atmosférica. Cada píxel de la imagen capturada contiene toda la información recopilada, con aproximadamente 300 valores en bandas de 2 nm de ancho y se lo conoce como "cubo hiperespectral" (García-Cervigón et al., 2014).

3.6 Índices de Vegetación

Los índices de vegetación (IV) no son más que un conjunto de parámetros, estadísticos-matemáticos que permiten cuantificar el estado fenológico y la salud de las plantas (Radočaj et al., 2023). Usualmente, los IV como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) son utilizados para estimar la biomasa forestal durante el tiempo (Lin et al., 2021; Ogaya et al., 2015), además, existen otros índices que omiten o reducen el error provocado por las condiciones atmosféricas y el efecto del brillo del suelo (Huete et al., 2002) y permiten realizar mejores estimaciones del estado vegetal. Sin embargo, algunos índices son inversamente proporcionales a la cantidad de biomasa vegetal, por lo que un correcto análisis debe reducir la incertidumbre (Muñoz, 2013).

Los IV pueden clasificarse en: los basados en pendientes y los basados en la distancia. Según menciona Muñoz (2013), el primero usa un cociente de reflectancia de una banda a otra (Rojo (RED) e infrarrojo cercano (NIR)) y el término pendiente hace referencia a la pendiente de las líneas que pasan a través del punto de origen tal y como se observa en la figura 1.

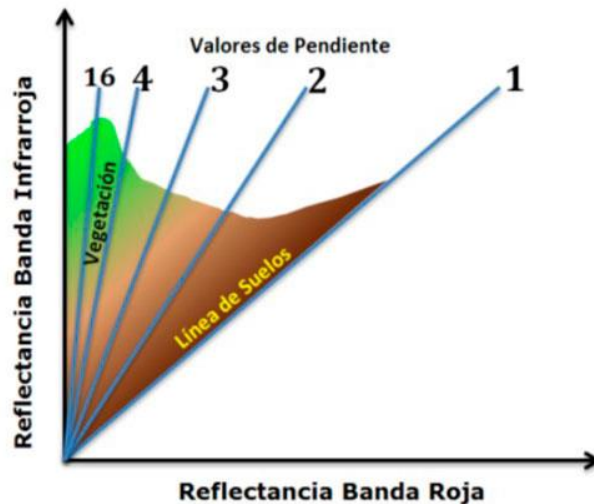


Figura 1. Índices basados en pendientes. Fuente: Muñoz (2013).

Con respecto al segundo, el mismo autor describe, que estos índices tienen como objetivo separar la información de un píxel (figura 2), ya que éste contiene tanto la información de la cubierta vegetal, como la del suelo, lo que ayuda a discernir la diferencia entre ellos.

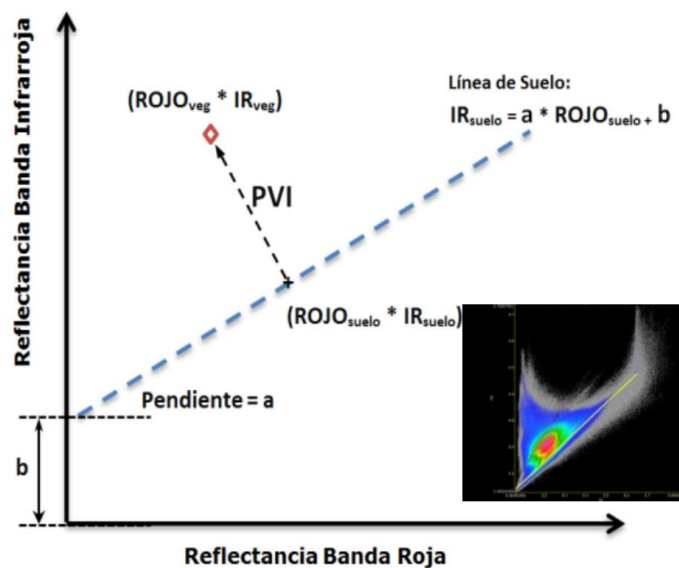


Figura 2. Índices basados en la distancia.

Fuente: Muñoz (2013)

3.6.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es un índice que determina los parámetros de la cobertura vegetal a través de los píxeles, por ello, se utiliza principalmente para evaluar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Esto se logra mediante la medición de la intensidad de la radiación que es reflejada por la vegetación y que se puede detectar a través de las diferentes bandas del espectro electromagnético (figura 3). En sí esto nos permite comprender el estado general de

la vegetación, aplicando operaciones algebraicas entre las bandas de una imagen obtenida mediante un dron, un avión o un satélite (González et al., 2016).

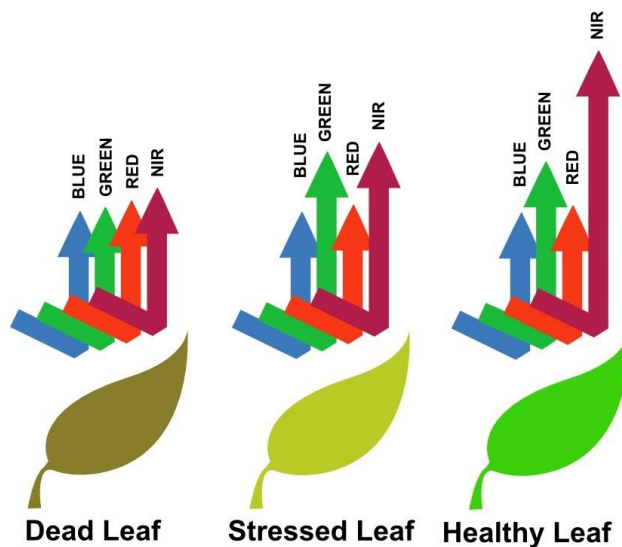


Figura 3. Reflectancia de las bandas en función del estado vegetal.

Fuente: González et al. (2016).

El índice NDVI es una herramienta importante para el monitoreo global de la vegetación y es utilizado en el mundo para prevenir incendios forestales, predecir la producción agrícola y mapear la desertificación. Es especialmente útil debido a su capacidad para compensar factores externos como las variaciones en la iluminación y la orientación (González et al., 2016).

En la adquisición remota, las diferentes características de la radiación electromagnética (figura 4) se agrupan en bandas o segmentos, entre las más importantes son la visible, la infrarroja y las microondas. El infrarrojo se subdivide en cercano, medio y lejano, lo que facilita la evaluación del estado de los cultivos y la vegetación (Páscoa et al., 2016).

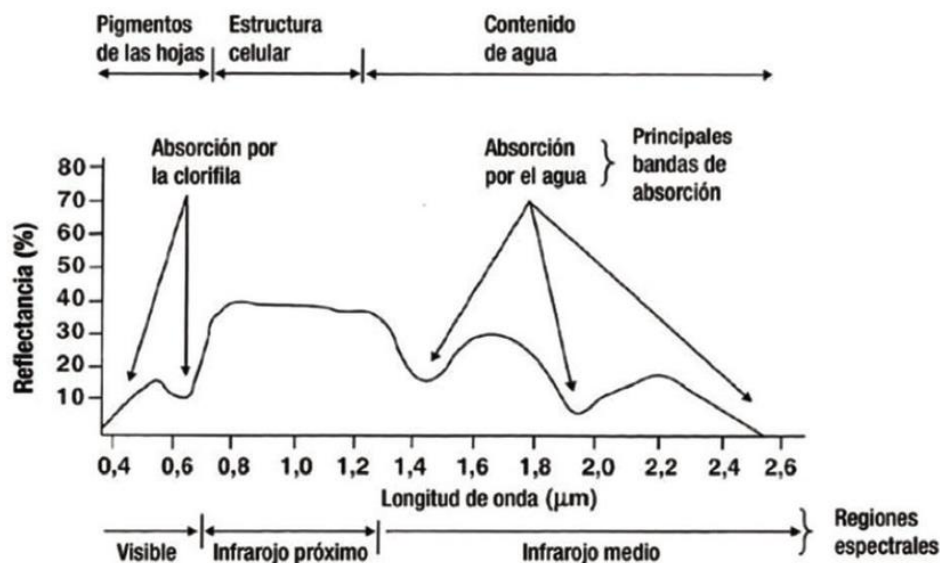


Figura 4. Radiación electromagnética. Fuente: González et al. (2016).

El NDVI al ser un simple indicador de la biomasa fotosintéticamente activa o, en términos simples, un cálculo de la salud de la vegetación. Según Días (2015), para su cálculo se utiliza una fórmula sencilla (Ecuación 1) que establece una relación inversa entre los valores de reflectancia de estas dos bandas, el infrarrojo cercano ($NIR_{(\sim 790nm)}$) y el rojo ($RED_{(\sim 660nm)}$), lo que permite utilizarla para diferenciar y distinguir la cobertura vegetal. Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

3.6.2 Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE)

El NDRE es un índice que se construye por la deducción matemática (ecuación 2), la cual utiliza la banda del $NIR_{(\sim 790nm)}$ y la banda del borde rojo ($RE_{(\sim 735nm)}$). Este índice es muy similar al NDVI, sin embargo, se caracteriza por ser más sensible que el NDVI, lo que le hace un mejor indicador del estado vegetal de las plantas (Revelo et al., 2020).

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE} \quad (2)$$

La banda RE se encuentra en una zona de transición o brinco, es decir, paso del rojo al infrarrojo cercano, tal y como se observa en la figura 5. La longitud de onda de esta zona de salto, permite atravesar las hojas a una mayor profundidad, esto se debe a que la clorofila absorbe en gran cantidad esta longitud de onda (Li et al., 2014), de este modo, este índice permite detectar el cambio de contenido de clorofila provocado, ya sea por la falta de nitrógeno o también por el daño causado por algún patógeno (Fajardo-Rojas et al., 2023).

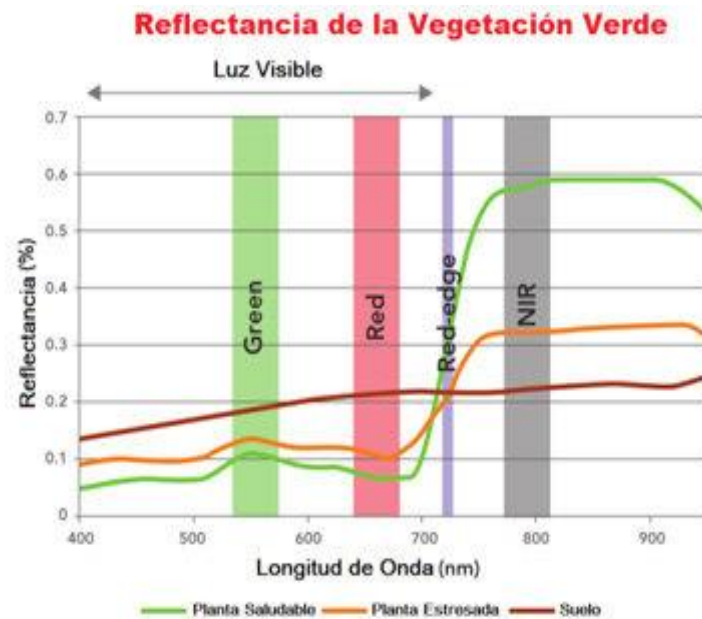


Figura 5. Zona de transición de la banda del borde rojo. Fuente: Kharuf-Gutierrez et al. (2018).

3.6.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI)

El GNDVI, de acuerdo a lo que describe Kharuf-Gutierrez et al. (2018), es un índice muy parecido al NDVI, que ha sido utilizado para realizar estimaciones de absorción del agua y la actividad fotosintética, sin embargo, este utiliza la banda del verde ($GREEN_{(550nm)}$) en lugar del rojo visible; representado en la ecuación 3.

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (3)$$

Usualmente, dicho índice ha sido utilizado para la caracterización de café (Revelo et al., 2020), en la clasificación de síntomas de la roya en centeno (Wójtowicz et al., 2021)

3.7 Reflectancia de las hojas

Las características de las hojas, como su superficie y contenido, afectan su capacidad de reflejar y absorber la luz. Los pigmentos en las hojas verdes absorben la luz en la región visible, pero la luz azul y roja son importantes para la fotosíntesis. La reflectancia de las hojas puede ser alta en ciertas longitudes de onda, como en la región del infrarrojo. El agua en las hojas es un buen absorbente de radiación solar y puede afectar varios procesos de transferencia radiactiva (Cordón, 2009; Peña, et al., 2019).

3.8 Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de imágenes multispectrales es una técnica utilizada para extraer información valiosa de imágenes capturadas por cámaras con una alta resolución espacial.

Estas cámaras pueden capturar información en varias bandas espectrales, lo que permite analizar la vegetación y otros aspectos del terreno con mayor detalle (Sandipan, 2018).

Para su procesamiento implica varios pasos, como la corrección geométrica, la calibración radiométrica y la corrección atmosférica. Estos pasos son esenciales para garantizar que las imágenes sean precisas y confiables. Es por ello, que tiene muchas aplicaciones prácticas, como la detección temprana de enfermedades en cultivos, la monitorización de la salud de la vegetación y la evaluación del impacto ambiental de las actividades humanas. También se utiliza en la industria de la teledetección para obtener información valiosa sobre el terreno, para la planificación y gestión de recursos naturales y en la toma de decisiones en agricultura y silvicultura (Trueba, 2017; Valenzuela, 2021).

3.9 Detección de Objetos

La detección de objetos en imágenes espectrales implica el uso de algoritmos que procesan la información capturada por los sensores para identificar y localizar objetos de interés (Yan et al., 2021). El proceso se puede dividir en tres etapas: pre-procesamiento, extracción de características y clasificación. El preprocesamiento implica la reducción de ruido, la mejora de la imagen y la corrección de distorsiones atmosféricas y geométricas. La extracción de características se utiliza para identificar información relevante de los datos, como textura, forma y características espectrales. La clasificación es la etapa final, donde se utilizan algoritmos de aprendizaje automático para categorizar los objetos en función de sus características extraídas. La detección de objetos en imágenes espectrales se puede utilizar en varios campos, como la agricultura, el monitoreo ambiental y la exploración de minerales (Lone & Pais, 2022).

3.10 Cultivo de la Coliflor

Brassica oleracea var. *botrytis* comúnmente conocida como coliflor, es una planta perteneciente a la familia Brassicaceae, que ha tenido una creciente demanda a nivel mundial debido a sus bondades nutricionales (Albiach et al., 2008). Según la investigación realizada por Singh et al. (2018), existe a nivel mundial una producción de coliflor que sobrepasa los 22 millones de toneladas métricas, siendo los países de China, India, México y Estados Unidos los mayores productores de esta hortaliza.

Ecuador es exportador neto de brócoli y coliflor congelados; donde sus exportaciones promediaron 42.300 toneladas durante el período 1998-2005, y sus importaciones menos de 1 tonelada, en promedio. La provincia de Cotopaxi es la que contribuye con los mayores rendimientos, alcanzando las 23,5 TM/ha a diferencia del resto de provincias que no superan el 50% de la producción máxima (Loma, 2010).

3.10.1 Descripción botánica

La coliflor es una hortaliza herbácea de ciclo anual y se caracteriza por poseer una roseta o pella de color blanco, también llamada inflorescencia, la cual está constituida por numerosas flores dispersas alrededor de un eje central (Jaramillo & Díaz, 2006); siendo estas el órgano que se consume. Se diferencia de otras variedades como el brócoli, porque éste posee una inflorescencia de color verde, por otra parte, el repollo el órgano comercial y de consumo, posee hojas envueltas formando una cabeza compacta de forma redonda.

3.10.1.1 Raíz

Su zona radicular está constituida por una raíz principal y raíces secundarias fasciculadas que puede extenderse hasta el metro de profundidad, no obstante, el 80% de sus raíces se encuentra a no más de los 30 cm las cuales les sirven de anclaje y para la captación de agua y nutrientes (Jaramillo & Díaz, 2006; Nachimba, 2022).

3.10.1.2 Tallo

Tallo corto, carnoso, grueso sin ramificación con un eje central de donde nacen las axilas foliares y la inflorescencia (pella o roseta)

3.10.1.3 Hojas

Son oblongas, hendidas, simples, largas de aproximadamente de unos 40 a 50 cm de longitud, color verde oscuro, bordes festoneados, nervaduras marcadas en el envés, el haz cubierto de cera, y con peciolo cortos de color verde (Pinto, 2013).

3.10.1.4 Inflorescencia

Es la parte comestible del cultivo, también llamada pella o roseta. Es el conjunto de flores dispuestas alrededor de un eje central con un pedúnculo corto y carnoso. La inflorescencia es de color crema o blanca, compacta, densa de forma esférica, que llega a medir aproximadamente hasta 30 cm, con un peso entre 300 y 1.200 gramos (Nachimba, 2022; Pinto, 2013). Además, el tiempo de formación de la pella va a depender de la variedad (ciclo corto, medio o largo) (Maroto, 1989).

3.10.1.5 Fenología de la Coliflor

El ciclo de desarrollo de la coliflor está dispuesto en varias etapas, dependiendo el sistema de clasificación (escala de BBCH) no obstante, de acuerdo a Jaramillo & Díaz (2006) describen en 4 etapas de desarrollo a diferencia de la clasificación que le da Theunissen & Sins (1984) en donde mencionan 7 etapas, sin embargo, en dicha clasificación no enfatiza los estados fisiológicos de gran importancia del cultivo. En coliflor se diferencian 3 estados: a) el vegetativo, en donde solo se forman hojas hasta el momento de la, b) pre-reproductiva que parte desde el inicio del brote floral hasta su maduración, y, c) reproductiva que inicia

desde la maduración de la inflorescencia hasta la maduración de las semillas (Cotrina, 2020). A continuación, se describen las siguientes etapas de desarrollo según Jaramillo & Díaz (2006):

- **Etapas 1 o Etapa semillero (V0)**

Tiene una duración de 30 días desde cuando la semilla germina hasta que las plántulas presenten de 3 a 4 hojas bien formadas y miden de 10 a 12 cm de altura

- **Etapas 2 o Etapa juvenil (V1)**

Tiene una duración de 50 días luego del trasplante, es decir esta fase dura desde que las plántulas tienen de 3 a 4 hojas hasta la visualización floral de la pella. Hasta este estado la planta ha completado ya sus 80 días de desarrollo.

- **Etapas 3 o Etapa de emergencia floral (R2)**

En esta etapa se empieza a visualizar la flor de la coliflor, que ocurre antes de los 50 días después del trasplante, generalmente ocurre cuando la planta presenta de 15 a 16 hojas.

- **Etapas 4 o Etapa de formación de la roseta (R3)**

Ocurre durante los 25 días después de la visualización de la cabeza floral, esto corresponde a los días promedio en la que la coliflor llega a su madurez comercial.

Como se mencionó con anterioridad, las etapas de clasificación de la coliflor u otro cultivo, va a depender exclusivamente del uso que se le dé, por ejemplo, Wurr et al. (1995) describe en 3 etapas de desarrollo; considerándola como un cultivo de importancia comercial, dentro de las cuales va a responder fisiológicamente a los diferentes cambios ambientales. El mismo autor deduce que la temperatura es un factor que puede alterar dicha respuesta, por otra parte, Everaast & De Moel (1995) manifiestan, que la deficiencia de nitrógeno puede llegar a inducir una floración precoz.

3.10.2 Requerimientos edafoclimáticos

3.10.2.1 Clima

La coliflor es una hortaliza no muy exigente en cuanto a la temperatura, ya que puede soportar bajas temperaturas (-10°C) y temperaturas máximas (40°C) en cortos periodos de tiempo; sin embargo, para su desarrollo óptimo es preferible que las condiciones se encuentren entre 8 y 28°C (Singh et al., 2018). Por otra parte, este cultivo puede adaptarse a diferentes pisos altitudinales. En Ecuador el cultivo se realiza entre los 1000 a 3100 m.s.n.m lo que demuestra que se trata de una especie vegetal con un amplio rango de adaptación a diferentes tipos de climas (Ilbay, 2009).

3.10.2.2 Suelo

Debe ser de textura franco arenosa, de buena profundidad, alto contenido de materia orgánica, que no sea susceptible a encharcamientos, pero que pueda retener suficiente

humedad; pH que oscile entre los 5,8 a 6,2 (Jaramillo & Díaz, 2006; Nachimba 2022). Además, de ser muy sensible a la salinidad, por lo cual, su rendimiento va a depender de ello, de ahí que, en suelos con conductividad eléctrica entre 2.5 a 7 dS/m su rendimiento se verá reducido entre 10 al 50% (Zamora, 2016).

3.10.2.3 Riego

Por lo general, la coliflor necesita de una moderada cantidad de riego que va desde los 700 a 1500 mm durante su ciclo en especial durante el trasplante y en el desarrollo de la pella, sin embargo, hay que tomar en cuenta que la frecuencia de riego va a depender de la textura del suelo (Hidalgo, 2007, como se citó en Ilbay, 2009).

3.10.2.4 Fertilización

La coliflor es un cultivo que demanda gran cantidad de nitrógeno, según Everaast & De Moel (1995), estas fluctúan entre 100 a 300 Kg/ha, por otra parte, los minerales principales extraídos por este cultivo son: P_2O_5 : 67 Kg/ha; K_2O : 295 Kg/ha; N: 198 Kg/ha (Gros 1967; como se citó en Ilbay, 2009)

3.10.3 Enfermedades

Los cultivos de brasicáceas, como el brócoli, la coliflor y la col rizada, pueden verse afectados por una variedad de enfermedades que pueden afectar su rendimiento y calidad. Una enfermedad común en estos cultivos es la pudrición de la raíz, que es causada por hongos del suelo y puede hacer que las raíces se pudran y las plantas mueran. Otra enfermedad común es la mancha negra, que aparece como manchas circulares en las hojas y puede ser causada por bacterias o hongos. La hernia de la raíz de las crucíferas también es una enfermedad que puede afectar a estos cultivos, causando daño en las raíces y reduciendo el rendimiento de la cosecha. Además, las brasicáceas son susceptibles a la infección por virus, como el virus del mosaico del brócoli, que puede causar decoloración de las hojas y reducción del tamaño de la cabeza (Tamayo, 2005).

3.10.3.1 *Alternaria* spp.

La *Alternaria* es un género de hongos que puede afectar a una variedad de plantas, incluyendo la coliflor. La *Alternaria brassicicola* y *Alternaria brassicae* son las especies de *Alternaria* más comúnmente asociadas con la coliflor. Los síntomas de la infección por *Alternaria* en la coliflor pueden incluir manchas marrones o negras en las hojas y la inflorescencia de la coliflor. Las manchas pueden extenderse rápidamente y hacer que las hojas se vuelvan amarillas y caigan, reduciendo el rendimiento de la cosecha (Díaz-Ángel & Duarte-Flores, 2013).

Las condiciones climáticas pueden tener un impacto en la aparición y propagación de la *Alternaria* en la coliflor. La infección puede ser más común en climas húmedos y cálidos, especialmente si hay una humedad relativa alta. Además, la infección afecta plantas que han sido dañadas por insectos u otros factores estresantes (Fraire-Cordero et al., 2009). Las pérdidas de rendimiento debidas a la infección por *Alternaria* en la coliflor pueden variar dependiendo de la gravedad de la infección y de las condiciones ambientales. En algunos casos, la infección puede reducir el rendimiento en un 30% de las inflorescencias (Tamayo, 2005).

En las semillas de hortalizas del género *Brassica*, específicamente en la col blanca y coliflor, el patógeno predominante es *Alternaria brassicicola*. Esta enfermedad puede afectar el cultivo en todas sus etapas de crecimiento, incluyendo las hojas, inflorescencias y semillas. Por lo general, las manchas foliares de *Alternaria* aparecen primero en las hojas más viejas y luego se extienden hacia las hojas más nuevas y las puntas. Es importante destacar que esta enfermedad disminuye el valor nutritivo de las hortalizas y puede reducir el rendimiento de la semilla de coliflor en alrededor del 47,8%; además, la pérdida de rendimiento oscila entre 5% y 30% en toda la zona de cultivo de coliflor y repollo (Godika et al., 2022).

3.10.4 Severidad

Se trata de una evaluación de los signos de una enfermedad en las plantas con el fin de determinar su gravedad y, en consecuencia, establecer la resistencia de un genotipo o la efectividad de un agente fitosanitario. Esta herramienta de diagnóstico posibilita la identificación de la enfermedad, su estado y la propuesta de estrategias para su control (Oliveros, 2019).

La intensidad de los signos puede implicar el recuento de síntomas, especialmente si estos aparecen en un solo punto en la superficie de la hoja, o puede consistir en la estimación del área afectada, un proceso que a menudo se basa en la observación visual (Agrios, 1995). Existen diferentes tipos de escalas de calificación para medir la gravedad de la enfermedad. Estas escalas de severidad respaldan la consideración de los diferentes métodos utilizados para evaluar visualmente la gravedad de una enfermedad en las plantas, tanto desde una perspectiva histórica como para medir su eficacia, aplicabilidad y justificación científica en la actualidad (Oliveros, 2019).

3.10.5 Medición de la severidad

Este concepto se refiere a la evaluación cuantitativa del grado de daño que una enfermedad o plaga está causando en una planta específica. Normalmente, esto se da por la aparición de uno o varios patógenos en uno o varios órganos de la planta. La medición de la severidad se realiza mediante la observación y evaluación en campo, como la cantidad de

tejido afectado, la intensidad de los síntomas (como manchas, deformidades, necrosis, etc.), la extensión de la enfermedad en la planta y la progresión temporal del daño (Ramón & Arauz, 1999).

Para la medición se la severidad varios autores han creado varias escalas: para la mancha foliar en el olivo (Salman et al., 2011); para el pie negro de las crucíferas (Moreno-Rico et al., 2005) entre otras escalas que varían en función de la zona afectada. Sin embargo, al tener diferentes niveles de rangos o clases de severidad, utilizan la misma fórmula para estimar el porcentaje de severidad de la planta o la unidad experimental. La fórmula se encuentra representada en la ecuación 4; donde PDI (Porcentual disease index por sus siglas en inglés) o índice porcentual de enfermedad de McKinney (López-Díaz et al., 2021; Sultana et al., 2018).

$$PDI = \frac{\text{Suma de la calificación de las hojas infectadas}}{\text{Número de Hojas} \times \text{Calificación Máxima de enfermedad}} \times 100 \quad (4)$$

3.11 Cálculo de concentración de inóculo

En la evaluación de la capacidad de las plantas para resistir enfermedades o en la realización de investigaciones epidemiológicas sobre agentes patógenos, a menudo es necesario recurrir a la inoculación artificial, ya sea en un entorno controlado como un invernadero o en el campo. Este proceso implica el uso de una cantidad específica de inóculo, es decir, un número preciso de esporas por mililitro, ajustado según el patógeno y la planta que se está investigando. Cuyo objetivo es lograr una infección efectiva que permita diferenciar las variaciones entre los diferentes materiales evaluados (Peña & Paez, 2005).

El mismo autor menciona que para determinar la concentración exacta, se utiliza un hemocitómetro, mismo que permite realizar recuentos de esporas en áreas de dimensiones conocidas, proporcionando así el número de esporas por mililitro de la suspensión inicial. Seguidamente, a través de diluciones sucesivas, se logra obtener el inóculo con la concentración deseada, lo que permite una aplicación controlada y específica en el contexto del estudio de la resistencia de las plantas a las enfermedades. Este proceso garantiza que los resultados obtenidos en el ámbito de la investigación agronómica sean reproducibles y válidos.

4 Materiales y métodos

4.1 Área experimental

El estudio se ejecutó en los invernaderos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca (figura 6), Cuenca - Ecuador, con coordenadas (UTM WGS84) siguientes; X: 719596,30 Y:9677058,14; a una altitud de 2562 m.s.n.m.

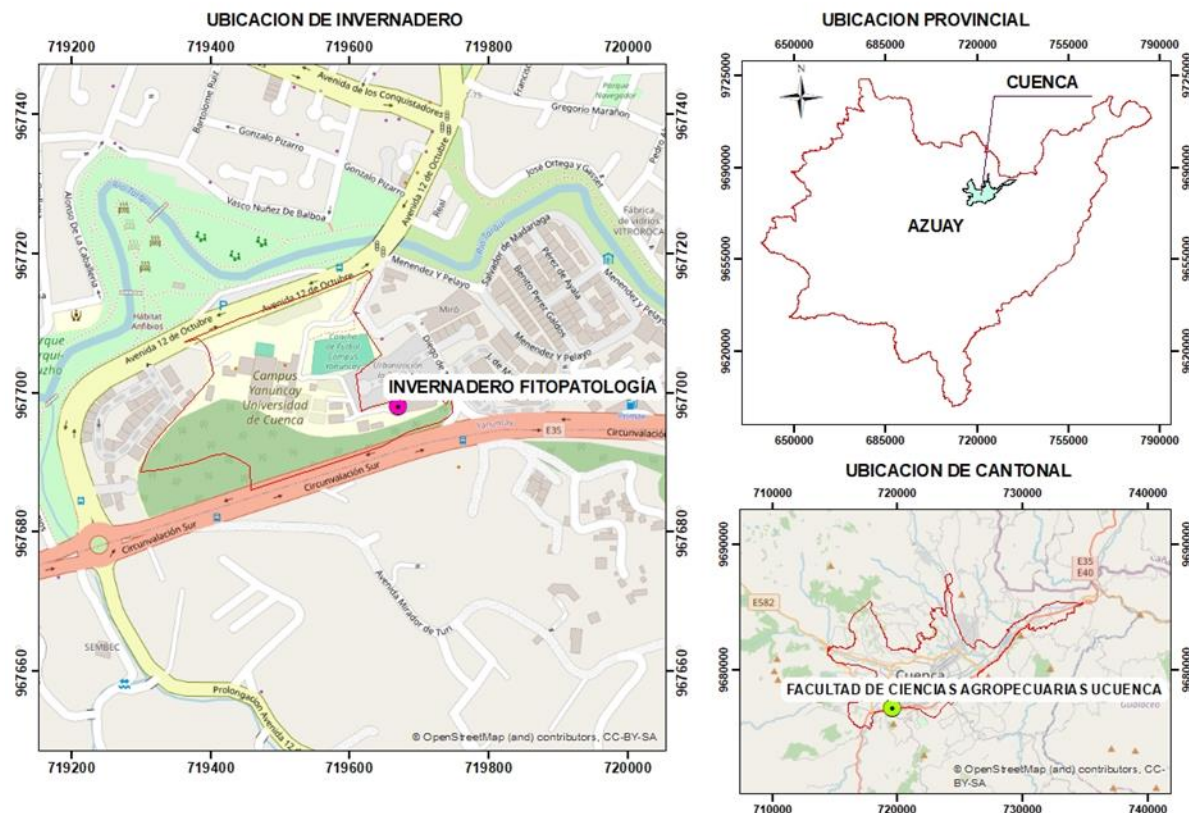


Figura 6. Mapa de ubicación del establecimiento del ensayo.

Fuente. Elaboración propia.

El ensayo se realizó sobre el área foliar de plántulas de coliflor mediante inoculación de *Alternaria* spp. en cuatro diferentes dosificaciones del inóculo (*Alternaria* spp.) más un testigo (D1: 110^3 ; D2: 110^5 ; D3: 110^7 ; D4: 110^0).

4.2 Tipo de investigación

La presente investigación es de carácter experimental.

4.3 Materiales

Para la ejecución del presente trabajo de titulación se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

Gabinete: computadora, cámara Parrot Sequoia.

Campo: fundas plásticas negras, sustrato, fundas plásticas transparentes perforadas, palillos de madera.

Laboratorio: microscopio, Cámara de Neubauer, PDA, cajas Petri, cámara de flujo laminar, cámara de esterilización, cámara de incubación.

Biológico: hongo *Alternaria* spp., plantas de coliflor variedad bola de nieve.

Químico: azul de metileno, hipoclorito de sodio (1,5%), ácido láctico.

4.4 Siembra

El trasplante se realizó cuando las plántulas que tenían 4 hojas verdaderas, en fundas plásticas de 35 cm x 30 cm, el sustrato empleado fue tierra negra más bocashi en una proporción de 75:25. En el experimento se utilizaron un total de 64 plantas de coliflor. (Anexo A).

4.5 Diseño experimental

El diseño fue en Bloques Completos al Azar (DBCA) con 4 tratamientos y 4 repeticiones; teniendo un total de 16 unidades experimentales (UEs), cada UE estaba constituida de 4 plántulas. En la tabla 1 se describe la distribución de las UEs, las cuales ocuparon un área total de 20 m².

Tabla 1. Esquema del diseño experimental.

Bloque 2	Bloque 4
T1	T1
T2	T4
T3	T2
T4	T3
Bloque 1	Bloque 3
T2	T1
T3	T3
T4	T2
T1	T4

4.6 Obtención y preparación del inóculo

Se colectó muestras de material vegetal de plantas de brócoli infectadas por *Alternaria*, ubicadas en las parcelas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca. Se tomó un número considerable de hojas infectadas y se procedió a realizar la identificación del patógeno en el laboratorio de Fitopatología. Una vez realizada la identificación a nivel de microscopio se desinfectó las muestras bajo un protocolo en el siguiente orden, se sumergió durante 2 minutos en hipoclorito de sodio al 1,5%, se lavó en agua destilada, nuevamente se sumergió en alcohol por dos minutos, y se lavó en agua destilada.

Seguidamente se colocaron las muestras en cámaras húmedas (Cajas Petri con papel toalla completamente húmedas) durante 5 días, pasado ello se procedió a realizar el aislamiento del patógeno, mediante siembras en cajas Petri con medio de cultivo PDA (Papa-Dextrosa-

Agar). Se procedió a verificar la muestra de manera periódica el desarrollo de la colonia del patógeno, así como la verificación de la esporulación del mismo.

Una vez que se obtuvo un buen desarrollo de la colonia del patógeno se ejecutó la resiembra del mismo obteniendo un total de 3 cajas Petri con muestras completamente puras, las cuales fueron la base o las muestras madres, mientras que sirvieron para sembrar un total de 17 cajas Petri empleadas en el experimento. Estas 17 cajas fueron dejadas en reposo en la incubadora bajo una temperatura de 25°C por el transcurso de un mes, con la finalidad de poder observar una buena esporulación de la *Alternaria*.

4.6.1 Conteo de esporas

Para el conteo y cálculo de las dosificaciones se preparó las debidas soluciones de inóculo empleando un agitador, mismas que luego fue colocado en la cámara de Neubauer, para realizar el conteo de las esporas, a continuación, se realizó el cálculo de la concentración empleando la aplicación Hemocytometer Sidedick (Anexo2). Una vez obtenida la concentración de la solución madre se procedió a preparar las dosificaciones de interés, que corresponden a, Dosis 1: 1×10^3 ; Dosis 2: 1×10^5 ; Dosis 3: 1×10^7 ; Dosis 4: 1×10^0 (control).

4.6.2 Inoculación de *Alternaria* spp. por aspersión

La inoculación se llevó a cabo en el envés de las hojas, aplicando las diferentes dosis de soluciones del patógeno, además de un grupo de control (D1: 1×10^3 ; D2: 1×10^5 ; D3: 1×10^7 ; D4: 1×10^0 (control)). Para la inoculación, se realizó una herida en el haz de las hojas con un palillo esterilizado, y se colocaron 100 μ L (0,1 ml) de cada suspensión conidial sobre cada herida usando una jeringa de 1 ml, (Anexo D), cubriendo totalmente todas las hojas. En el caso del grupo de control, únicamente se puso agua destilada. Luego de 12 horas de la inoculación, todas las plantas se cubrieron con bolsas de polietileno transparente para asegurar una alta humedad relativa (HR) (Ortega-Centeno et. al., 2010). y facilitar el proceso de infección. A las 72 h se retiraron las bolsas y las plantas se mantuvieron en el invernadero (Anexo E).

4.7 Preparación del área de fotografía

Se eligió un espacio plano, libre de sombra, en donde se ubicó un palet de 1,20 m x 1,20 m cuyos vértices fueron usados como puntos de referencia y el cual fue cubierto por plástico negro para evitar durante la captura la presencia de musgos u otro material vegetal que no corresponda a la unidad de estudio, lo cual también sirvió para homogenizar el fondo

de las fotografías (Anexo F). Por otra parte, se diseñó una estructura para la estabilidad de la cámara multispectral, el cual constó de 2 tiras de madera; uno de 2,10 m y otro pequeño de 1,0 m de largo, y en el extremo de la tira pequeña se ajustó la cámara (Anexo G).

4.8 Captura de las imágenes multispectrales

La captura de las imágenes multispectrales se las ejecutó en 2 etapas fenológicas, en función a la descripción fenológica propuesta por Jaramillo & Díaz (2006):

La **primera captura** se llevó a cabo durante la tercera etapa fenológica de las plantas, etapa en la que al menos el 50 % de las plantas de coliflor comenzaron el proceso de emergencia floral, que para este caso ocurrió a los 67 DDS. Para la captura de las imágenes se aplicó el siguiente protocolo: se tuvieron que sacar las UEs fuera del invernadero, considerando que era un día mayormente despejado durante las 10 a.m. y 2 p.m. La cámara multispectral permaneció conectada a una laptop como fuente de energía.

Para obtener imágenes más precisas fue importante realizar en el campo varias calibraciones, tanto a nivel de cámara, como es el giroscopio y la calibración radiométrica de acuerdo a las instrucciones del fabricante, además, se estableció la distancia focal de acuerdo a la metodología empleada por Quito et al. (2020). Posteriormente se capturaron las imágenes para cada UE; en total 16 capturas, las cuales están compuestas por las bandas NIR, RED, RED EDGE, GREEN y RGB.

Por otra parte, se registraron datos de severidad como método invasivo para su posterior interpretación y contraste aplicando el protocolo detallado más adelante.

La **segunda captura** se realizó a los 87 DDS, periodo en la que las plantas se encontraban en la cuarta etapa fenológica, donde al menos el 50% de las plantas empezaron a mostrar su madurez comercial. En cuanto al protocolo para la captura de imágenes al igual que el registro de severidad se empleó el mismo de la toma anterior.

4.9 Procesamiento de las imágenes multispectrales

Las imágenes capturadas fueron importadas (excepto RGB) al programa ArcMap con licencia de la Universidad de Cuenca, de tal manera, que se realizó la orientación y transformación de ajuste espacial para las 4 bandas (GREEN, RED, RED EDGE y NIR).

Usualmente las imágenes capturadas por distintos sensores no muestran una correcta información de ubicación, ya que los datos no se alinean correctamente con datos preexistentes, es por ello, que a las imágenes fueron referenciadas con 4 puntos de control, dada por los vértices del marco de referencia (Tabla 2) corrigiendo dicho error (ESRI, 2013), además, se aplicó una transformación proyectiva, ya que este solo requiere de un mínimo de 4 puntos de control, lo cual permite reducir el error cuadrado medio (RMS) a cero

(Esmaeilzadeh & Amini, 2019; Jáuregui & Chacón, 2007). Las imágenes fueron guardadas con un tamaño de píxel en $x=0,002$; $y=0,002$.

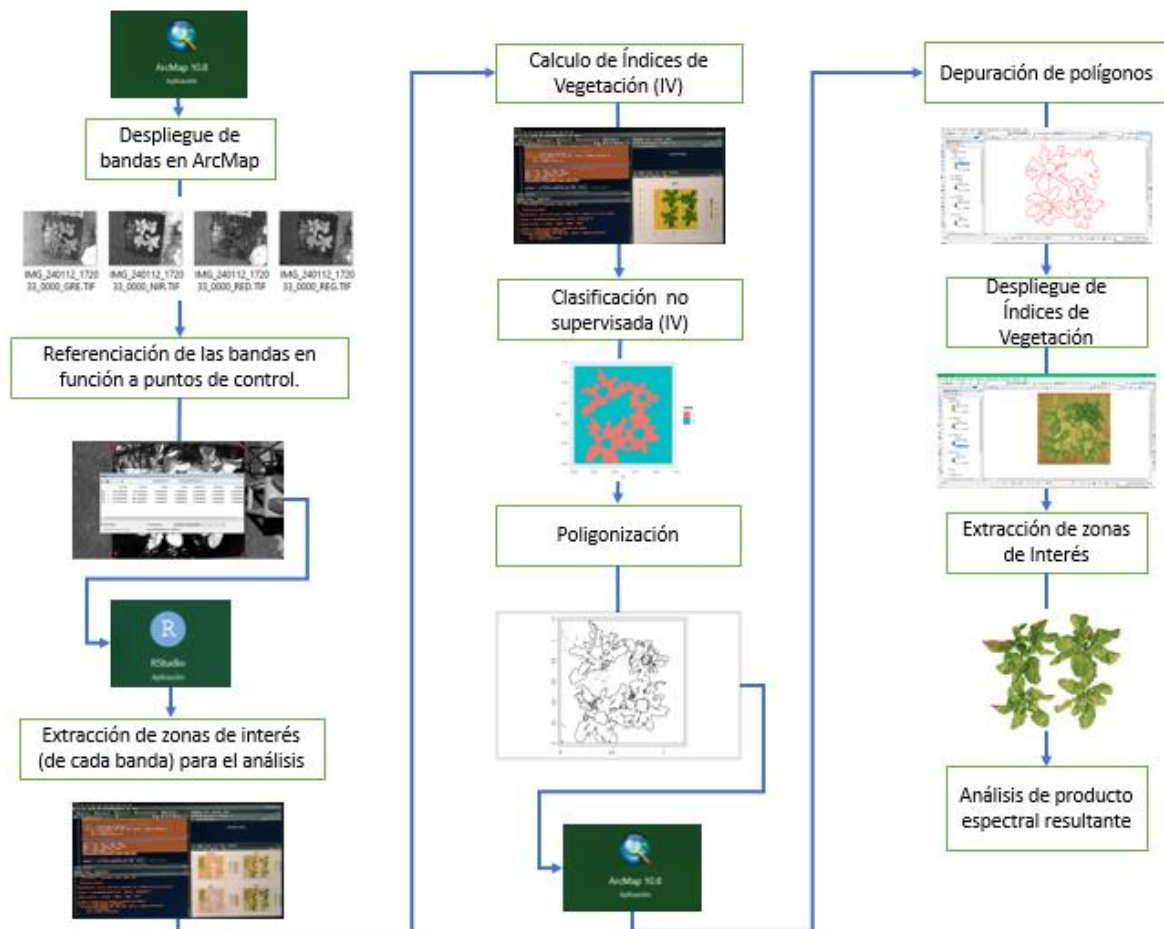


Figura 7. Diagrama del proceso de imágenes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Puntos de control

PUNTOS DE CONTROL	
Xmax	1,20
Xmin	0
Ymax	1,20
Ymin	0

Nota. La distancia entre puntos se encuentra en el sistema métrico. Sistema de proyección UTM

Posteriormente, se utilizó el software R (interfaz R Studio) versión 4.3.3 para el recorte del área de estudio de acuerdo a los puntos de control, también se calculó los IV (NDVI, GNDVI y NDRE), de los cuales se eligió el NDVI como el índice más representativo para la clasificación no supervisada. Esta clasificación se llevó a cabo mediante la función *unsuperClass()* del paquete *RStoolbox* (Leutner et al., 2024) utilizando el algoritmo de K-means. Finalmente, se generó de dicha clasificación, el polígono de la región de interés con la ayuda de la función *as.polygons()* del paquete *terra* (Hijmans et al., 2024).

La verificación y depuración del polígono se ejecutó en ArcMap, esto se dio para mejor manipulación de las capas. A partir de ello, se realizó el recorte de los IV y una reclasificación en 3 rangos como se muestra en la tabla 3.

Según Villadiego-Rojas (2023), se menciona que, para casos, particularmente de fines agrícolas, es común clasificar el estado o salud de la vegetación por tercios en la escala de 0-1, siendo los valores negativos de NDVI correspondiente a objetos inanimados o vegetación muerta. Con base en ello se realizó una reclasificación de tres rangos como se muestra en la tabla 3, debido a que el fin del trabajo es determinar el nivel de infección de la enfermedad en las plantas de coliflor mas no la sanidad del mismo, además se hizo la unificación de los últimos rangos, debido a que en las imágenes del trabajo se encontraban vacíos debido a que algunas UE, no poseían áreas vegetativas que estén dentro del rango 4 que correspondía a áreas muy sanas o si lo encontraban el número de pixeles eran mínimos por ende para evitar errores al momento de armar la tabla de variables y realizar el respectivo análisis se optó por unificar los dos últimos rangos, que correspondía al rango donde las plantas se encontraban en estado sano y muy sano tomando solamente como áreas vegetativas sanas o planta sana.

Tabla 3. Rangos de clasificación para los IV.

RANGOS	MEDIDA	DESCRIPCIÓN
1	-1 - 0	Planta muerta
2	0 - 0,33	Planta moderadamente sana
3	0,33 - 1	Planta sana

4.10 Levantamiento de datos de severidad

Este proceso se llevó a cabo de forma invasiva, registrando el número de hojas infectadas para cada plántula en todas las UEs, conjuntamente con la toma de fotografías para cada hoja que presentó signos del agente causal. Para ello, se utilizó un teléfono celular de marca Realme 7 Pro y para reducir el ruido de la imagen se utilizó un fondo azul (Anexo H). Este registro se realizó 2 veces como se mencionó con anterioridad.

Estas imágenes capturadas fueron analizadas en el programa R Studio utilizando el paquete *pliman* el cual permite estimar el porcentaje de área infectada de la hoja a través de la función *measure_disease()*, en donde el algoritmo segmenta la imagen en 3 categorías: la zona saludable, la zona sintomática y el fondo de la imagen; esto se produce mediante el previo ingreso de una paleta de colores a partir del recorte de la imagen (figura 8) (Olivoto, 2022). El anexo I describe el ingreso de los datos.

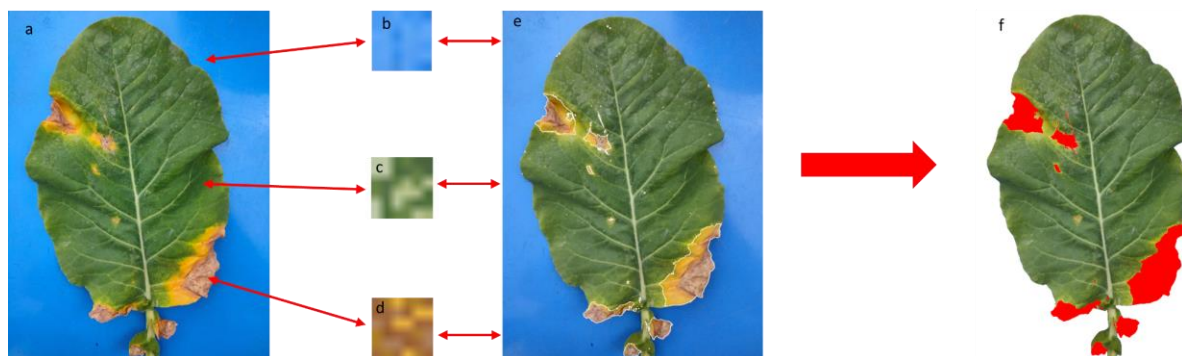


Figura 8. Segmentación de la hoja para estimar el porcentaje de área infectada

Nota. (a) muestra la hoja de la coliflor con un fondo azul; (b, c y d) representan las paletas de colores para los tejidos sintomáticos, saludables y el fondo respectivamente; (e) es la delimitación del área sintomática; (f) enmascaramiento de la zona sintomática con color rojo.

El área enferma en esta imagen es de 9,90%. Fuente: Elaboración propia

La paleta de colores fue diseñada a partir de la selección de 5 muestras para cada categoría mediante la función *pick_palette()* del paquete *pliman*. Esta paleta de colores se aplicó a todas las imágenes de cada una de las UEs.

Con los datos de porcentaje de área infectada se procedió a aplicar la fórmula de cálculo del PDI, la cual la adaptamos acorde a estudios realizados en cuanto a la evaluación de la severidad provocada por *Alternaria* (Tabla 4).

Tabla 4. Escala de severidad para evaluar la severidad de *Alternaria* en coliflor.

CLASIFICACIÓN	ÁREA FOLIAR INFECTADA (%)	REACCIÓN DE LA ENFERMEDAD
1	0 - 30	(MR) Resistente - Moderadamente resistente
2	31 - 60	(S) Susceptible
3	61 - 100	(HS) Altamente susceptible

4.11 Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a la prueba de normalidad, en vista de que variable área de cada rango, la respuesta no mostró normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) y el método de ajuste de bonferroni.

5 Resultados

5.1 Resultado del primer objetivo específico

Como resultado del levantamiento de información se obtuvieron 20 archivos como resultado de la captura de las imágenes de cada bloque, teniendo un total de 80 imágenes multiespectrales para la primera toma (Tabla 5), siendo el mismo número para la segunda y tercera toma, dando así, un total de 240 imágenes multiespectrales durante todo el estudio que posteriormente fueron procesadas siguiendo el protocolo de la figura 9.

Tabla 5. Registro de captura de imágenes.

BLOQUE	TRATAMIENTO	N° CAPTURAS	N° ARCHIVOS		N° TOTAL
			GREEN-RED-REG-NIR- RGB		
Bloque 1	T1-T2-T3-TEST	4	5		20
Bloque 2	T1-T2-T3-TEST	4	5		20
Bloque 3	T1-T2-T3-TEST	4	5		20
Bloque 4	T1-T2-T3-TEST	4	5		20

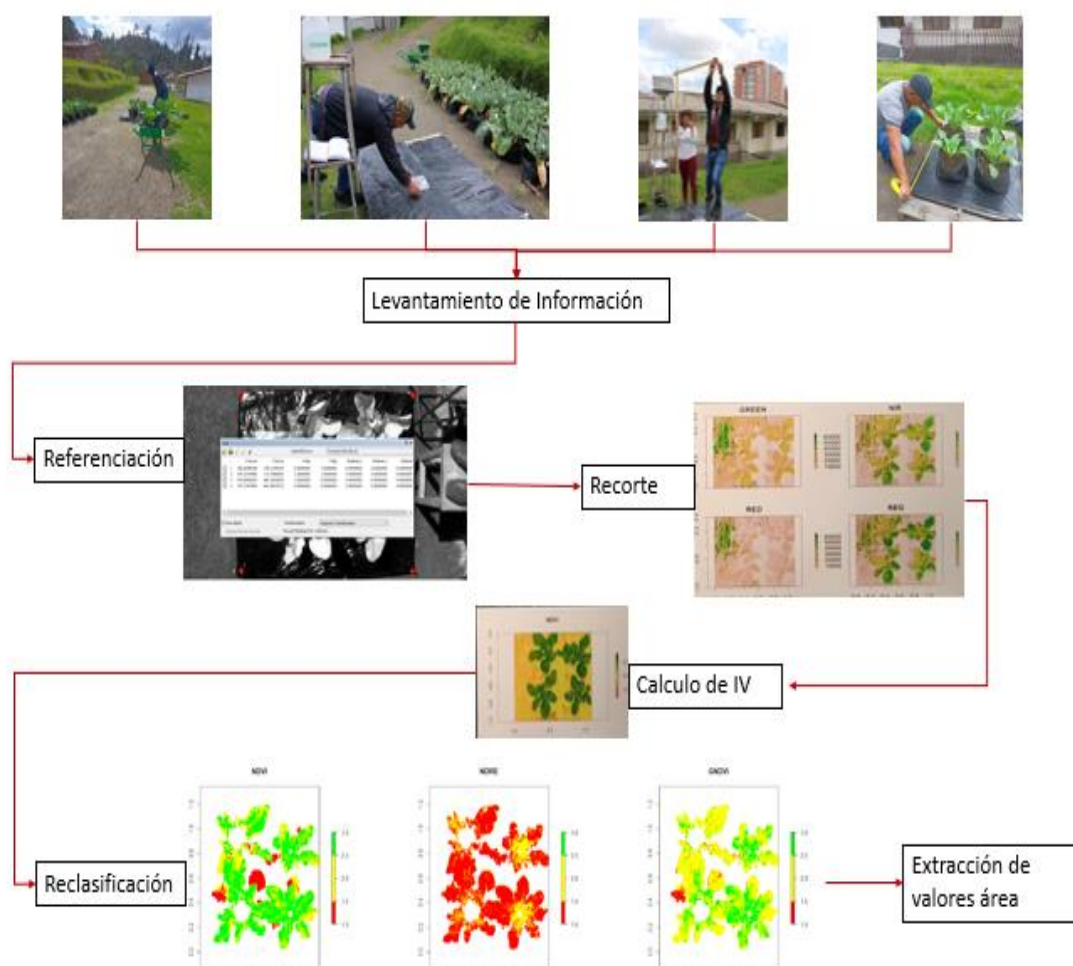


Figura 9. Flujograma de levantamiento de información y procesamiento de imágenes multiespectrales.

Fuente. Elaboración propia.

5.2 Resultado del segundo objetivo específico

5.2.1 Captura de imágenes en la tercera etapa fenológica (67 DDS)

Primero, dentro de la reclasificación realizada a los 67 DDS, en donde las plantas se encontraban dentro de su etapa de emergencia floral (R2), para el caso del NDVI, el área de las plantas que se encuentran dentro del rango uno (-1 a 0) que corresponde a áreas foliares muertas, sí muestran diferencias significativas entre el tratamiento 2 (1×10^{-5}) con un valor de media del área 12,75 en comparación al tratamiento 4 (1×10^0 testigo) con un valor de 3,5 como se muestra en la tabla 6. En complemento a ello, para el caso del rango 2 que corresponde a áreas foliares moderadamente sanas (0 a 0,33), al presentar su valor de $p = 0,8456$, que es un valor mayor en comparación de $\alpha = 0,05$ no muestran diferencias significativas y, finalmente, el área de las plantas que se encuentran dentro del rango tres (0,33 a 0,1) que corresponde a áreas foliares sanas al igual que los datos anteriores no tuvieron diferencias significativas debido a que su valor de $p = 0,1745$ es mayor al valor de α .

Tabla 6. Comparación de medias de área para el rango 1 del NDVI.

TRATAMIENTOS	RANGO	NDVI
T1	-1 a 0	8,25 ab
T2		12,75 a
T3		9,5 ab
T4		3,5 b

Nota. Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes $p > 0,05$.

Segundo, para el caso de la toma realizada a los 67 DDS, días en la que las plantas se encontraban dentro de su etapa de emergencia floral (R2), para el caso del NDRE, el área de las plantas que se encuentran dentro del rango uno (-1 a 0) que corresponde a áreas foliares muertas, no mostraron diferencias significativas, esto debido a que el valor de $p = 0,8924$ corresponde a un valor mayor a $\alpha = 0,05$, lo mismo sucede para el caso se dio del rango 2 que corresponde a áreas foliares moderadamente sanas (0 a 0,33), con un valor de $p = 0,9498$, mismo que es un valor mayor en comparación de α , finalmente, el área de las plantas que se encuentran dentro del rango tres (0,33 a 0,1) que corresponde a áreas foliares sanas al igual que los datos anteriores no tuvieron diferencias significativas debido a que su valor de $p = 0,8666$ es mayor al valor de $\alpha = 0,05$.

Para GNDVI, el área de las plantas que se encuentran dentro del rango uno (-1 a 0) que corresponde a áreas foliares con necróticas, no muestran diferencias significativas, con

un valor de $p = 0,6874$, valor mayor a $\alpha = 0,05$, lo mismo sucede para el caso se dio del rango 2 que corresponde a áreas foliares moderadamente sanas (0 a 0,33), con un valor de $p = 0,1339$, un valor mayor en comparación de α , finalmente, el área de las plantas que se encuentran dentro del rango tres (0,33 a 0,1) que corresponde a áreas foliares sanas al igual que los datos anteriores no dejaron ver diferencias significativas debido a que su valor de $p = 0.3434$ es mayor al valor de α .

Por consiguiente, como se observa en la figura 10, la clasificación no supervisada (K-means), el NDVI pudo diferenciar la zona no sintomática de la sintomática, observándose los tres rangos correspondientes, sucedió de igual manera en el GNDVI, sin embargo, el índice NDRE no lo explica de tal forma, esto se debe a que éste responde de manera distinta a los cambios en la cantidad de clorofila. Por otra parte, el área que representa a la zona estresada o bajos niveles de reflectancia ocupa en el NDVI el 1,56%, un valor bajo en comparación al GNDVI que posee un 7%, y que difiere con el NDRE con un 85,5%.

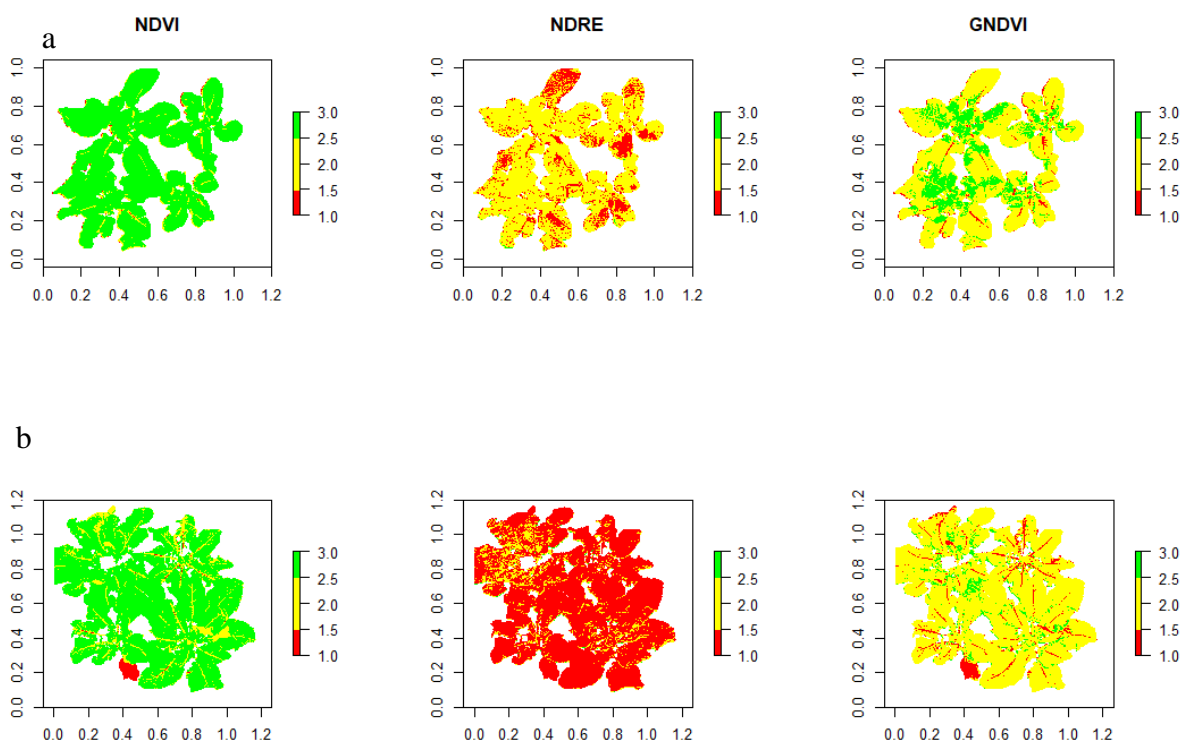


Figura 10. Reclasificación de los IV en la segunda etapa y tercera etapa fenológica.

Nota. Valores de pixeles. Tono rojo: pixeles entre -1 a 0; tono amarillo: 0 a 0,33; tono verde: 0,33 a 1. a) segunda etapa fenológica; b) tercera etapa fenológica. Fuente: elaboración propia.

Esa disparidad también lo reflejan las métricas extraídas para cada uno de los tratamientos, por lo tanto, para NDVI los valores máximos no superaron el 0,79 en donde se encontraba la mayor cantidad de pixeles, del mismo modo, pero para GNDVI con un valor que excedían el 0,74; este mismo caso se dio en el NDRE cuyos valores oscilaron entre 0,5

y 0,74 lo cual nos indicó la saturación de clorofila por estar en un estado máximo de desarrollo foliar debido a la etapa fenológica en la cual se tomaron las fotografías figura 11b), cuyos valores no fueron diferentes a los de la primera toma (figura 11a).

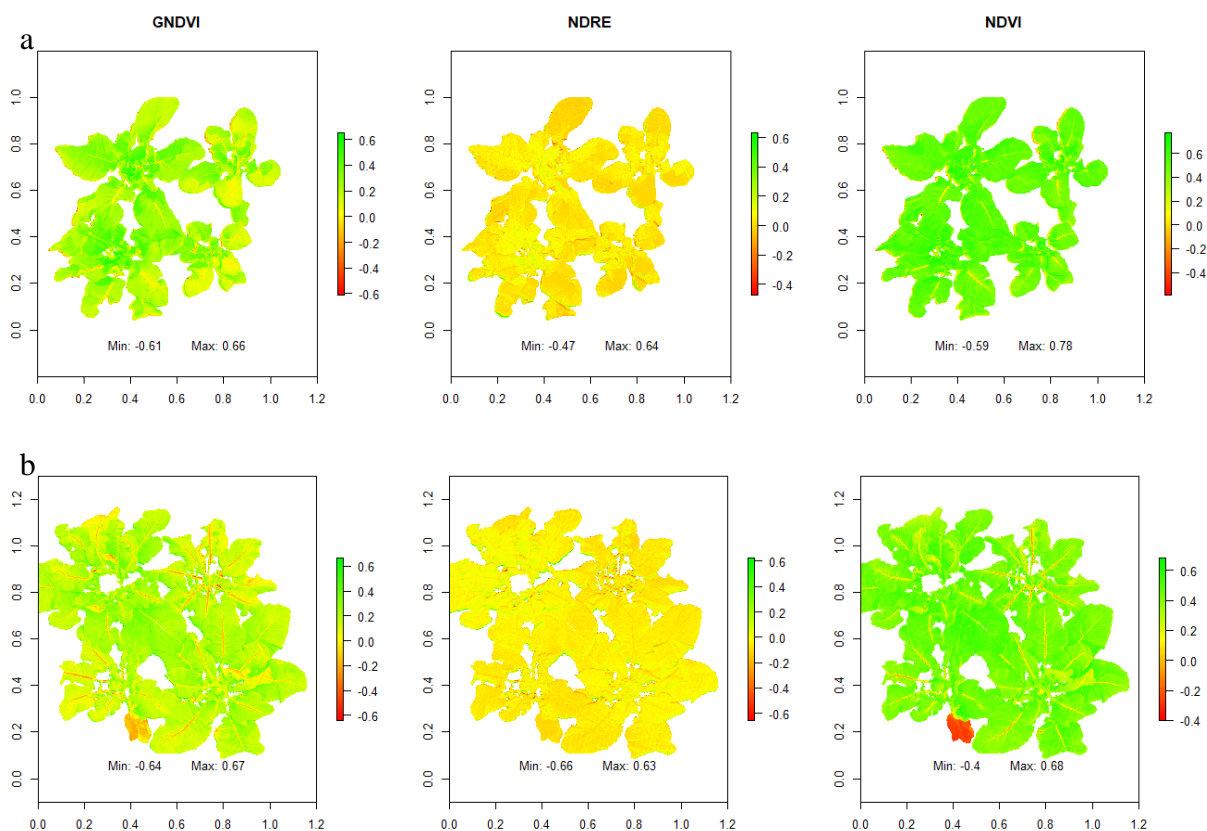


Figura 11. Valores mínimos y máximos de los IV en la segunda y tercera etapa fenológica.

Nota. Píxeles con tonalidades rojizas presentan una baja concentración de clorofila, por lo contrario, las tonalidades verdes. a) segunda etapa fenológica; b) tercera etapa fenológica.

Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Captura de imágenes en la cuarta etapa fenológica (87 DDS)

Tras el análisis estadístico para todos los índices, para el caso de la toma realizada a los 87 DDS, momento en el que las plantas se encontraban dentro de su etapa de formación de la roseta (R3), las plantas de coliflor ya presentaron en al menos un 50% su inflorescencia; lo cual se consideró como una parte de la unidad de estudio que infería en los valores de reflectancia, ya que al ser un órgano de color blanco incidió en el producto final, por lo que se optó en no considerarlo en la poligonización.

Considerando lo anterior el índice NDVI no presentó diferencias significativas en el primer rango (valores de píxeles entre -1 a 0), con un valor de $p = 0,1681$ mayor a $\alpha = 0,05$; este mismo caso se dio para el rango 2 (píxeles entre 0 a 0,33) con un $p\text{-value} = 0,2529$; por otra parte, para el rango tres (valores entre 0,33 a 1) el $p\text{-value} = 0,04964$ presentó una

pequeña diferencia significativa, el cual al aplicar la prueba de comparaciones múltiples con el método de bonferroni con $\alpha = 0,05$, deja ver el T1 (1×10^3 cn/uL) en el NDVI a pesar de contar con la media más baja (Tabla 7), lo cual nos indica que gran parte de los píxeles se encuentran distribuidos en los rangos anteriores, denotando con aquello un área foliar saludable más baja en comparación con los otros tratamientos, mostrando cambios en los valores de reflectancia.

Tabla 7. Comparación de medias en el rango tres para NDVI.

TRATAMIENTOS	RANGO	MEDIAS
T1	0,33 - 1	3,75 b
T2		13,00 a
T3		7,75 ab
T4		9,50 ab

Nota. Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($p > 0,05$).

En cuanto al índice GNDVI los rangos uno y dos no presentaron diferencias significativas con un p-value = 0,5801 y 0,1515 respectivamente, sin embargo, el rango tres con un p-value = 0,0084 presentó diferencias significativas con un $\alpha = 0,05$; estas diferencias se observan en la tabla 8, en donde destaca T3 (1×10^7 cn/uL) que a pesar de poseer la media más baja nos indica que gran parte del total de píxeles se encuentran distribuidos en el rango uno y dos, debido al cambio de los valores de reflectancia provocado por las zonas afectadas por el patógeno y en el cambio fisiológico que presentaron las plantas.

Tabla 8. Comparación de medias en el rango tres para GNDVI

TRATAMIENTOS	RANGO	MEDIAS
T1	0,33 - 1	6,00 bc
T2		14,50 a
T3		3,75 c
T4		6,00 bc

Nota. Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($p > 0,05$).

Por otra parte, para NDRE no se mostraron diferencias significativas en ninguno de los rangos de clasificación, tomando un valor de $p = 0,6422$ en el rango uno; para el rango

dos un $p = 0,3373$ y para el rango tres un $p = 0,1745$; lo que evidencia la sensibilidad del índice al utilizar la banda del borde rojo_(735nm), ya que este índice puede subestimar parte del área foliar que presente algún daño del patógeno y clasificándolo en el mismo rango.

En la figura 12b se puede observar un contraste entre índices, siendo el NDRE el índice que lo clasifica dentro del rango de -1 a 0 el que posee la mayor parte del área foliar (80%) a diferencia del NDVI (8%) y GNDVI (3,5%). Esta disminución en el área foliar en NDRE y GNDVI se debe también a que las plantas de coliflor ya no desarrollaban más hojas, lo cual redujo el número de píxeles, y además a que otra parte de píxeles se ubicaban en el rango de 0 a 0,33. Por el contrario, al NDVI en comparación a la toma inicial (figura 12a).

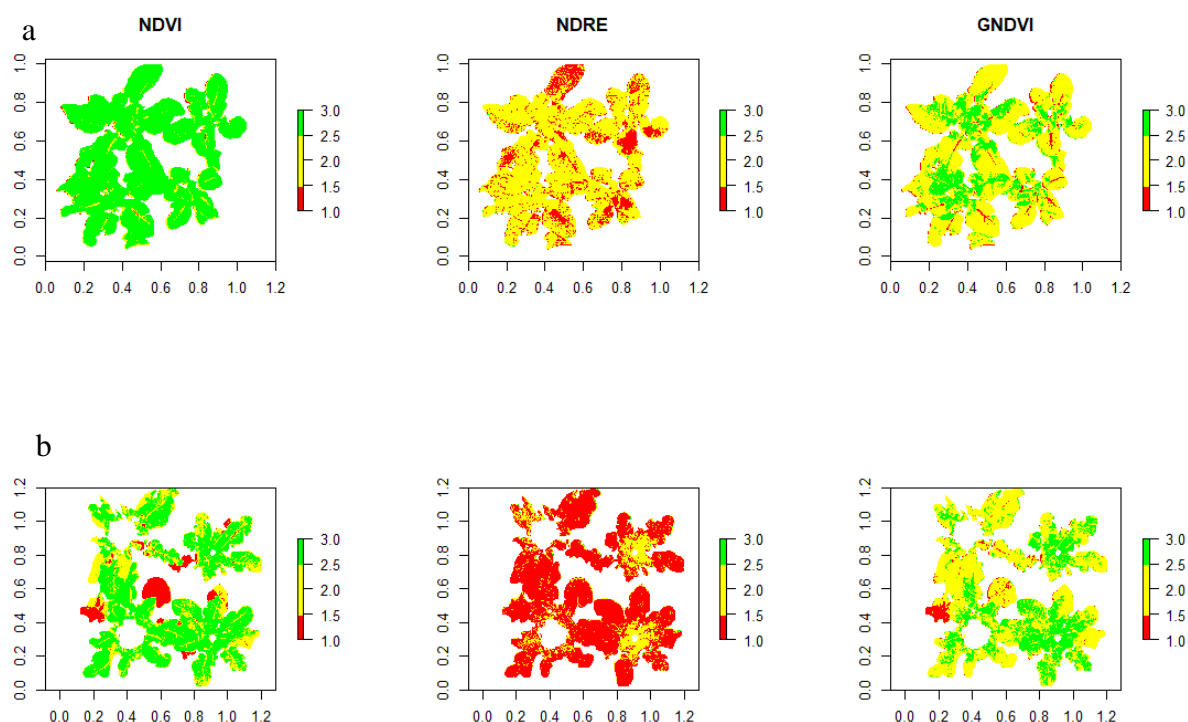


Figura 12. Reclasificación de los IV en la segunda y cuarta etapa fenológica.

Nota. Valores de píxeles. Tono rojo: píxeles entre -1 a 0; tono amarillo: 0 a 0,33; tono verde: 0,33 a 1. a) segunda etapa fenológica; b) cuarta etapa fenológica. Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que, a pesar de no haber existido diferencias estadísticas significativas en la mayoría de los rangos de los índices, de manera visual se pudo apreciar un contraste utilizar una banda u otra. Es decir que si no se cuenta con una banda con longitud de onda ~660 nm (banda roja) como es el caso del NDVI, se puede utilizar una banda con longitud de onda ~550 nm (banda verde), debido que estas bandas pueden diferenciar el área foliar verde o sana del área que presenta clorosis o necrosis, lo que lo diferencia del NDRE; ya que como se mencionó anteriormente, al ser más sensible debido a que al utilizar la banda del borde

rojo, éste puede atravesar las hojas más profundamente y devolver valores de reflectancia menores en comparación del NDVI y GNDVI.

Este contraste también se pudo evidenciar cuando se extrajeron los valores mínimos y máximos de los píxeles para los IV. En la figura 13b se puede observar como el índice NDVI presenta los valores máximos, los cuales fueron $\leq 0,7$; lo que sucede para todos los tratamientos, a diferencia de GNDVI donde sus valores no superaron el 0,66 y 0,58 para NDRE valores reducidos en comparación de la toma inicial.

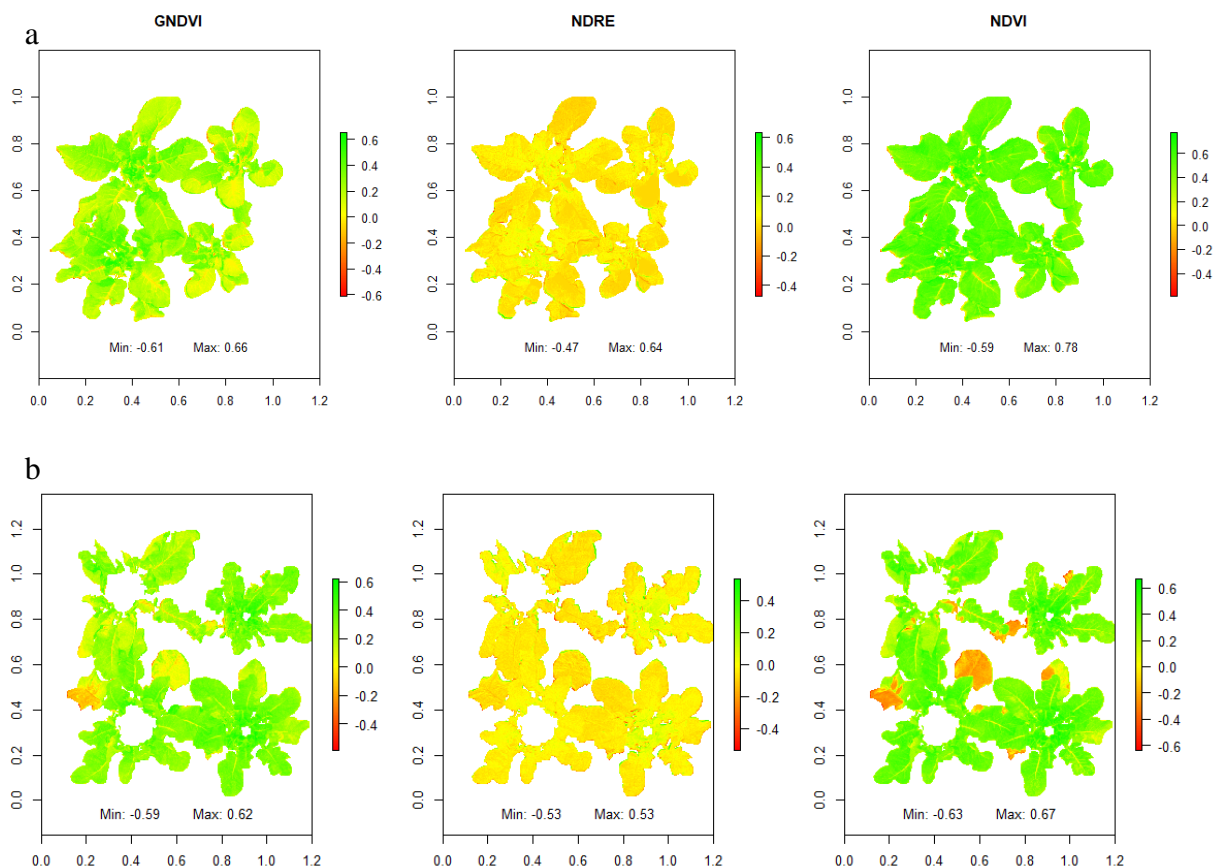


Figura 13. Valores mínimos y máximos de los IV en la segunda y cuarta etapa fenológica.

Nota. Píxeles con tonalidades rojizas presentan una baja concentración de clorofila, por lo contrario, las tonalidades verdes. a) segunda etapa fenológica; b) cuarta etapa fenológica.

Fuente: elaboración propia.

5.3 Resultado del tercer objetivo específico

• Índices de Vegetación vs Severidad en la tercera etapa fenológica (67 DDS)

Al realizar el análisis estadístico para los datos de severidad levantados en campo en la segunda etapa fenológica, al aplicar el test de normalidad de Shapiro-Wilk estos presentaron normalidad ($p = 0,7014$). Sin embargo, al realizar el ANOVA con un $p\text{-value} = 0,2712$ los tratamientos no presentaron significancia tal y como se ve en la figura 14. Lo que

nos permite asumir que T1, T2, T3 y T4 se comportaron de manera similar, aunque visualmente, T4 difiere del resto claramente. De otro lado, T3 posee el PDI mayormente alto, aproximadamente del 40%, es decir, el inóculo de 1×10^7 cn/uL ha afectado con mayor severidad a cada una de las UEs que se les aplicó dicho tratamiento.

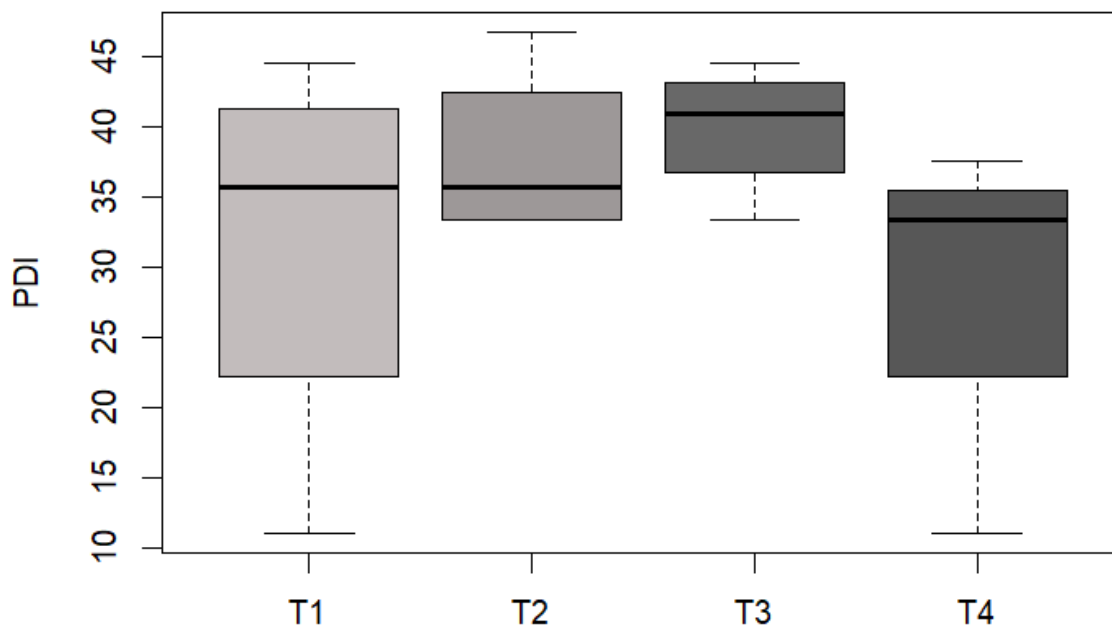


Figura 14. Diagrama de cajas para el PDI en la segunda etapa fenológica de la coliflor.
Fuente. Elaboración propia.

En contraste a lo anterior se pudo evidenciar que el método de determinación de alternaria mediante imágenes multiespectrales difiere con el método de determinación en campo, debido a que, según la medición de severidad nos muestra que, la media porcentual más alta está dado por el tratamiento 3 (1×10^7) en comparación del tratamiento 4 (1×10^0). En tanto que, para los datos del IV (NDVI) calculados a partir de las imágenes multiespectrales, nos deja ver que el tratamiento 2 presentó mayor infección en comparación del T4 (testigo) que correspondió al tratamiento con menos infección al haber representado la mediana más baja (figura 15).

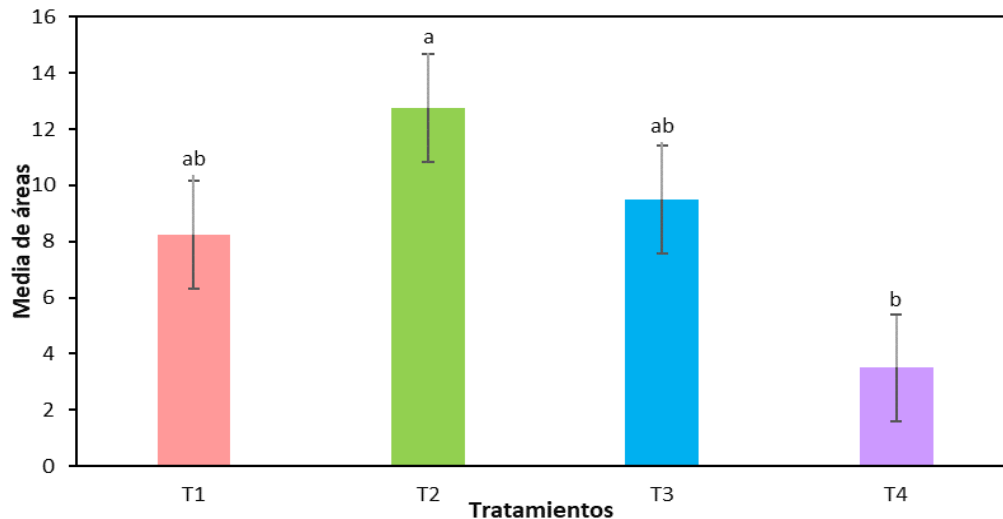


Figura 15. Comparación de medias de área para el rango 1 (-1 a 0) del NDVI.

Fuente: Elaboración propia.

- **Índices de Vegetación vs Severidad en la cuarta etapa fenológica (87 DDS)**

Como resultado del segundo levantamiento de datos de severidad en campo, se observó que los tratamientos 3 y 4 no presentan diferencias significativas en el PDI. En tanto que el tratamiento 2 muestra una ligera diferencia entre los demás tratamientos al presentar una media del PDI más alto con un valor de 49,6 % de infección en comparación a los tratamientos 3 y 4 que muestran una media del 40% de infección (figura 16).

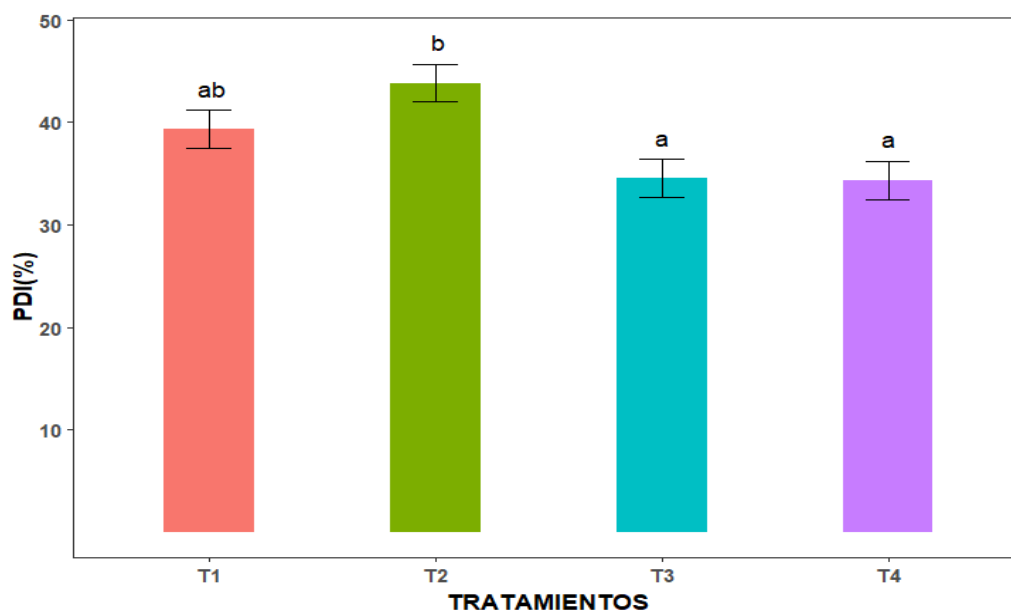


Figura 16. Diagrama de barras de comparaciones múltiples para PDI a los 87 DDS.

Nota. Medias con letras diferentes son estadísticamente diferentes (Tukey $\alpha = 0,05$).

Fuente: Elaboración propia.

Comparando los resultados obtenidos de la medición de severidad de *Alternaria* en campo se pudo evidenciar que el método de determinación de este patógeno mediante imágenes multiespectrales no es igual, esto debido a que según la medición de severidad nos muestra que, la media porcentual más alta está dado por el tratamiento 2 (1×10^5) en comparación del tratamiento 3 (1×10^7) y 4 (1×10^0) que poseen la media porcentual más baja. En tanto que, los datos del IV (GNDVI) para el rango 3 calculados a partir de las imágenes multiespectrales, deja ver que el tratamiento 2 presentó menor área vegetativa sana, lo que nos lleva a inferir que este tratamiento representa el área mayormente afectada a comparación del T2 (1×10^5), que corresponde al tratamiento con menos infección al estar representado por la mediana del área más alta que está dentro del rango 3 que representa a plantas sanas (figura 17).

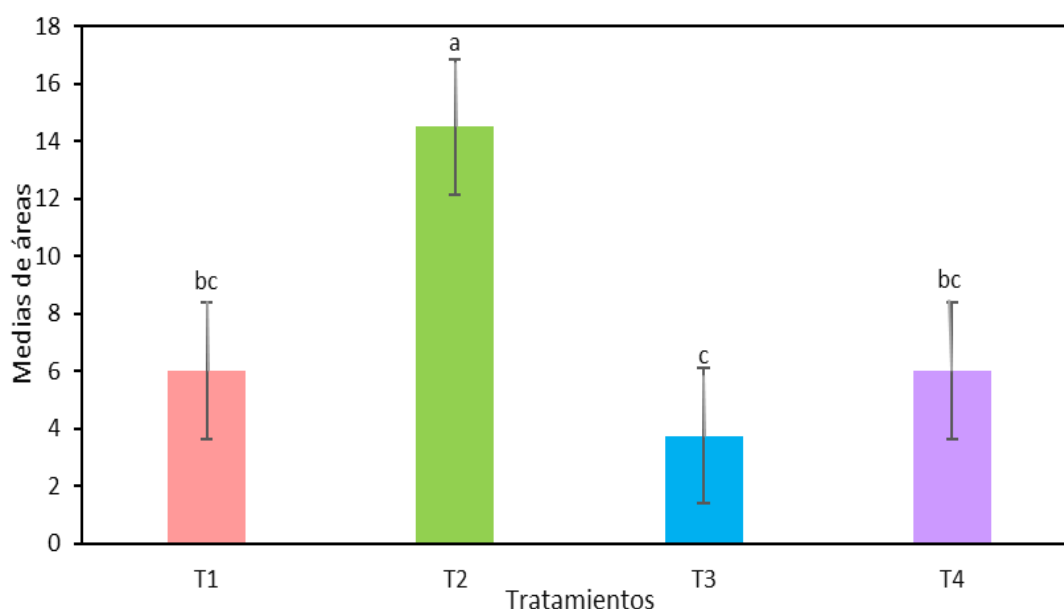


Figura 17. Diagrama de comparación de medias en el rango tres para GNDVI.

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera para el caso de la comparación entre el IV (NDVI) a comparación de los datos levantados en campo estos no muestran similitud en los resultados encontrados, ya que, la medición de severidad nos muestra que, la media porcentual más alta se muestra en el tratamiento 2 (1×10^5) si comparamos con los tratamientos 3 (1×10^7) y 4 (1×10^0) que poseen la media porcentual más baja. No obstante, para el caso del IV (NDVI) para el rango 3 calculados a partir de las imágenes multiespectrales, nos muestra que el tratamiento 1 presentó menor área vegetativa sana, lo que nos lleva a inferir que este tratamiento representa el área mayormente afectada al estar ocupada de menos área sana que enferma, a comparación de T2 (1×10^5) que corresponde al tratamiento con menos infección al estar

representado por la mediana del área más alta que está dentro del rango 3 que representa a plantas sanas (figura 18).

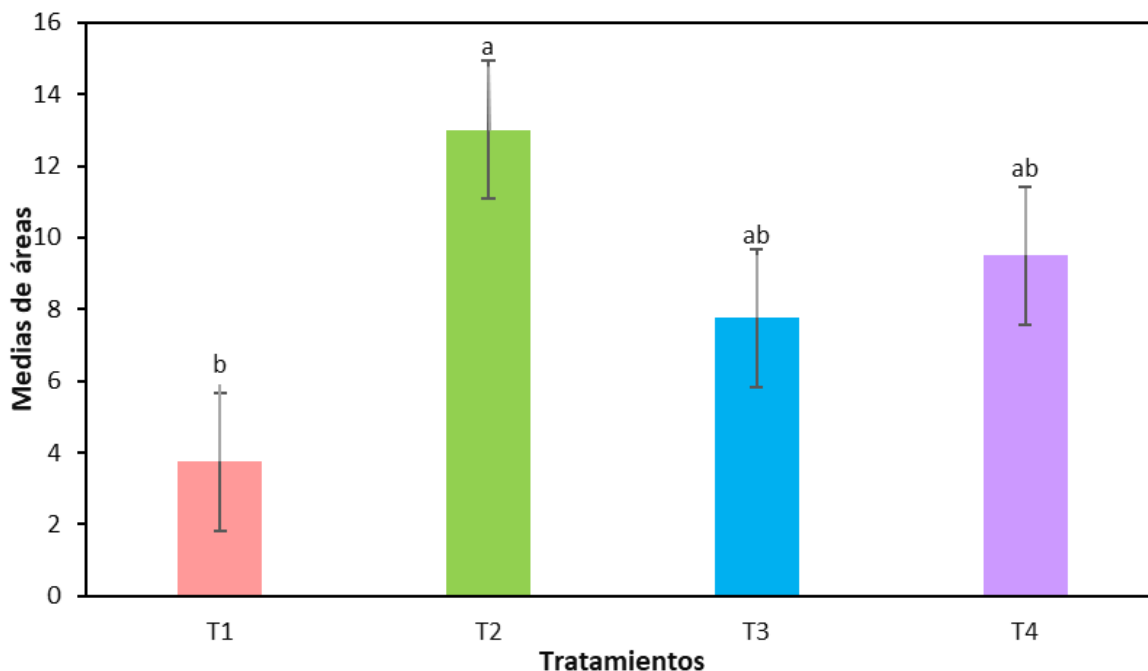


Figura 18. Diagrama de comparación de medias en el rango tres para NDVI.

Fuente: Elaboración propia

6 Discusión

En este estudio se ha podido evidenciar como el uso de las cámaras multispectrales pueden ser consideradas como una herramienta muy útil para detectar patrones de estrés, ya sea este, provocado por la intervención tanto de factores abióticos como de bióticos, como en este caso, el de *Alternaria*. Al aplicar cualquier dosificación del inóculo no hubo diferencias significativas en la mayoría de los eventos, cuando se extrajo el área de los píxeles que se encontraban en los rangos dados en este estudio.

El uso del NDVI y GNDVI permitieron diferenciar las zonas que presentaban clorosis y necrosis celular, este resultado se dio también al evaluar la afectación en fresa, y remolacha azucarera (Fajardo-Rojas et al., 2023; Mahlein et al., 2010), al comparar el nivel de reflectancia utilizando distintas bandas y en el contenido de clorofila (Gao et al., 2024; Gitelson et al., 2005; Solis et al., 2021).

Por otra parte, el NDRE al utilizar una banda en el espectro ~735 nm tiende a ser más sensible al monitorear cultivos, por lo cual sus valores de reflectancia tendieron a ser más bajos durante la toma en la cuarta fase fenológica; lo que sucedió en el presente estudio, ya que en la mayoría de los tratamientos los valores fueron < 0 que también ocurrió en el estudio de Naguib & Daliman (2022), en comparación al NDVI y GNDVI con promedios superiores. Esta posible variación se debe al cambio fenológico de las plantas de coliflor, es decir, al ya

presentar la inflorescencia, las hojas empiezan a madurar y los niveles de clorofila empiezan a descender (Silva-Costa et al., 2023; Yin et al., 2022), al igual que el estrés dado por las altas temperaturas (Cao et al., 2019; Sharma et al., 2014), lo cual impacta en los valores de reflectancia.

Al evaluar las técnicas multiespectrales con referencia al método de determinación de severidad del *Alternaria* spp. en campo, en el cultivo de *Brassica oleracea* var. *botrytis*, se pudo determinar que los índices de vegetación calculados a partir de las imágenes capturadas demostraron discrepancia con los datos tomados en campo, lo que nos lleva a inferir que las cámaras multiespectrales no lograron una determinación precisa de los niveles de infección de *Alternaria* spp. en coliflor, estos datos concuerdan con lo mencionado por Cubero et al. (2019), en su investigación titulada “Robot de campo para detectar enfermedades en cultivos hortícolas mediante imágenes multiespectrales” donde se empleó una cámara multiespectral con resolución 2,5, a una altura que abarque las plantas de interés, con el objetivo de ayudar en la detección temprana de cultivos infectados por *Candidatus Liberibacter solanacearum* a nivel de planta y cultivo de zanahoria, mencionando como resultados que, utilizando el índice de vegetación NDVI comparados con las inspecciones visuales, no se pudieron lograr resultados debido a que no se encontró relación entre los síntomas apreciables en la inspección visual y las plantas infectadas. Sin embargo, contrasta con el trabajo titulado “Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados” realizado por Kharuf-Gutierrez et al. (2018), donde realizaron capturas con la misma cámara usada en el presente trabajo y a una altura de 40 m, y calcularon el IV, el cual permitió evidenciar que la respuesta espectral admite identificar problemas en el cultivo. A pesar de que el NDVI no les permitió identificar las diferentes variedades de caña que fueron sembradas en la misma época, estos sí posibilitaron evaluar el estado de salud de la caña de azúcar en cada sector.

7 Conclusiones y Recomendaciones

La evaluación de técnicas multiespectrales para determinar la severidad de *Alternaria* spp. en el cultivo de *Brassica oleracea* var. *botrytis* ha generado resultados que encaminan a nuevas interrogantes, sobre su efectividad como herramienta de determinación de *Alternaria* spp. en coliflor. La diferencia observada entre los índices de vegetación generados a partir de las imágenes capturadas y los datos recopilados en campo indican una limitación en la capacidad de estas cámaras para ofrecer una evaluación precisa del estado de salud de la planta, el resultado encontrado, se vuelve desafiante debido a que nos genera interrogantes que nos llevan a la idea de volver a estimar y afinar de mejor manera las técnicas de evaluación, además también es importante abordar la complejidad de las interacciones entre los factores ambientales como viento, luz etc., al momento de realizar el levantamiento de

información, así también parámetros biológicos y tecnológicos que pudieran influir en la detección y monitoreo de enfermedades en los cultivos agrícolas.

En base a lo manifestado anteriormente, es fundamental que en las posteriores investigaciones se enfoquen en identificar y resolver las posibles causas de la discrepancia obtenida, así como en desarrollar y validar métodos mejorados que permitan garantizar la evaluación de manera más eficiente y confiable de la salud de los cultivos. Si se realiza lo recomendado no solo se podrá obtener una mejor gestión de productividad en los cultivos, sino que también como complemento se estará promoviendo una agricultura más sostenible y resiliente frente los desafíos ambientales y económicos que se presentan en el campo de la producción.

La diferencia en la longitud de onda de las bandas espectrales y su combinación; a pesar de que no hubo diferencias significativas en la mayoría de los casos, se pudo evidenciar la diferencia en la sensibilidad al usar una u otra banda, sin embargo, si se pretende evaluar cultivos de coliflor, el NDVI es una herramienta que permitirá discernir el cambio en la estructura foliar por la variación de la clorofila, además, si no se cuenta con la banda del espectro visible rojo, la banda del espectro visible verde, resulta una buena alternativa para el análisis del cultivo, por otra parte, si se necesita realizar un estudio a mayor detalle del comportamiento a nivel de hoja, el uso de la banda del borde rojo en combinación del rojo cercano, puede ser una alternativa para monitorear los cultivos.

Referencias

- Agrios, G. (1995). *Introducción a la fitopatología* (Editorial Limusa S.A De C.V, Ed.; 2nd ed.).
- Albiach, R., Tarazona, F., Canet, R., Pomares, F., Baixauli, C. & Aguilar, J. M. (2008). Contenido nutricional en cultivos hortícolas tratados con varias enmiendas orgánicas líquidas aplicadas al suelo con el riego. *Actas de Horticultura*, 50, 208-213
- Cao, Z., Yao, X., Liu, H., Liu, B., Cheng, T., Tian, Y., Cao, W., & Zhu, Y. (2019). Comparison of the abilities of vegetation indices and photosynthetic parameters to detect heat stress in wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.009>
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. In (*Fundamentals of remote sensing from space*).
- Cubero, S., López, S., Marco-Noales, E., Sanjuan, S., Alegre, V., Barbé, S., Ruiz, C., Aguilar, E., Navarro, I., Aleixos, N., & Blasco, J. (2019). Robot de campo para detectar enfermedades en cultivos hortícolas mediante imágenes multiespectrales. 1049–1054. https://doi.org/10.26754/c_agroing.2019.com.3473
- Cotrina, F. (2020). Cultivo de la coliflor. *Ministerio de Agricultura y Pesca*, 21, 1–28.
- Baranowski, P., Jedryczka, M., Mazurek, W., Babula-Skowronska, D., Siedliska, A., & Kaczmarek, J. (2015). Hyperspectral and Thermal Imaging of Oilseed Rape (*Brassica napus*) Response to Fungal Species of the Genus *Alternaria*. *PLOS ONE*, 10(3), E0122913. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0122913>
- Bongiovanni, R., Mantovani, E. C., Best, S., & Roel, A. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sostenible. In *Procisur*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/68412>
- Calderón, R., Zarco, P., Navas, J., Landa, B., & López, M. (2018). Detección de enfermedades de cultivos mediante imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución espacial -Grandes cultivos. *Grandes Cultivos*. <https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/208145-Deteccion-enfermedades-cultivos-mediante-imagenes-hiperespectrales-termicas-alta.html>
- Cordón, G. (2009). *Métodos ópticos no destructivos para monitoreo de salud vegetal* [Tesis Doctoral]. Universidad de Buenos Aires
- Díaz- Ángel, A., & Duarte-Flores, J. D. (2013). *Evaluación de la capacidad fungistática de la cáscara del mangostino (Garcinia Mangostana L.) sobre Botrytis cinerea y Alternaria brassicicola para la biopreservación del coliflor (Brassica oleracea var. botrytis)* [Tesis, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos
- Días, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. *Universidad*

- Complutense De Madrid, junio, 25.
https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Dillard, H. R., Cobb, A. C., & Lamboy, J. S. (1998). Transmission of *Alternaria brassicicola* to Cabbage by Flea Beetles (*Phyllotreta cruciferae*). *Plant Disease*, 82, 153–157.
- Esmailzadeh, M., & Amini, J. (2019). Evaluation of a 2-D transformation model for georeferencing of Synthetic Aperture RADAR imagery. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.22059/eoge.2019.248253.1018>
- ESPAC. (2021). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2021*.
- ESRI. (2013). *Principios básicos de georreferenciación de un dataset ráster*. <https://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/009t000000mn00000/>
- Everaarts, A. P., & De Moel, C. P. (1995). The effect of nitrogen and the method of application on the yield of cauliflower. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 43, 409–418.
- Fajardo-Rojas, A. E., Castellanos González, L., & Peláez Carrillo, D. A. (2023). Spectral signature of leaf spot (*Mycosphaerella fragariae* (Tul.)) in strawberry plants (*Fragaria x ananassa* Duch) related to NDVI and NDRE index. *INGE CUC*, 19(2). <https://doi.org/10.17981/ingecuc.19.2.2023.04>
- Fraire-Cordero, M., Nieto-Ángel, D., & Cárdenas-Soriano, E. (2009). *Alternaria tenuissima*, *A. alternata* y *Fusarium oxysporum* hongos causantes de la pudrición del florete de Brócoli. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 28, 25–33.
- Gao, C., Li, H., Wang, J., Zhang, X., Huang, K., Song, X., Yang, W., Feng, M., Xiao, L., Zhao, Y., Shafiq, F., Wang, C., Qiao, X., & Li, F. (2024). Combined use of spectral resampling and machine learning algorithms to estimate soybean leaf chlorophyll. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108675>
- García-Cervigón, J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión* [Tesis de maestría]. Universidad Complutense de Madrid.
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Godika, S., Meena, A. K., Maurya, S., Sharma, A., & Kumar, A. (2022). *Management of Alternaria Leaf Spot of Cauliflower by using Plant Extracts*. 14(2), 540–545.
- Hamada, E., & Ghini, R. (2011). Impactos del cambio climático en plagas y enfermedades de las plantas en Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(SPE2), 195–205. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800003&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Hijmans, R., Bivand, R., Pebesma, E. & Sumner, M. (2024). *terra: Spatial Data Analysis*. R package version 1.7-74, <https://rspatial.github.io/terra/>, <https://rspatial.org/>.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Ilbay, J. (2009). *Estudio bioagronómico de 16 cultivares de coliflor (Brassica oleracea L. Var. Botrytis)* [Tesis de grado]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Jaramillo, J. E., & Díaz, C. D. (2006). *El cultivo de las crucíferas. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA, Centro de Investigación La Selva, Rionegro, Antioquia, Colombia. Manual Técnico 20*. 176 p.
- Jáuregui, M., & Chacón, L. (2007). Rectificación proyectiva plana de imágenes fotográficas digitales. *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA*, 11(43), 63–69.
- Jiménez-Díaz, R. (2008). Impactos potenciales del cambio climático sobre las enfermedades de los cultivos. *PHYTOMA ESPAÑA*, 203, 64–69. <https://www.phytoma.com/la-revista/phytohemeroteca/203-noviembre-2008/impactos-potenciales-del-cambio-climatico-sobre-las-enfermedades-de-los-cultivos>
- Kharuf-Gutierrez, S., Hernández-Santana, L., Orozco-Morales, R., Aday Díaz, O. de la C., & Delgado Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *RIELAC*, 39(2), 79–91.
- Kharuf-Gutierrez, S., Orozco-Morales, R., Aday, O., & Pineda, E. (2018). Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. *Sistemas & Telemática*, 16(47), 45–58. <https://doi.org/10.18046/syt.v16i47.3221>
- Leutner, B., Horning, N., Schwalb-Willmann, J., Hijmans, R. J., & Mueller, K. (2024). *RStoolbox: Remote Sensing Data Analysis*. R package version 0.4.0.
- Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X., Liu, Y., Liu, B., Ustin, S. L., & Chen, X. (2014). Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, 157, 111–123. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2013.12.018>
- Lin, M., Ling, Q., Pei, H., Song, Y., Qiu, Z., Wang, C., Liu, T., & Gong, W. (2021). Remote Sensing of Tropical Rainforest Biomass Changes in Hainan Island, China from 2003 to 2018. *Remote Sensing* 2021, Vol. 13, Page 1696, 13(9), 1696. <https://doi.org/10.3390/RS13091696>
- Loma, J. (2010) *El manejo de postcosecha y su incidencia en el tiempo de vida útil de la coliflor (Brassica oleracea) cultivada en el cantón Latacunga* [Tesis]. Universidad Técnica de Ambato.

- Lone, Z. A., & Pais, A. R. (2022). Object detection in hyperspectral images. *Digital Signal Processing*, 131, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103752>
- López-Chillón, M. (2020). *Efecto del Consumo de Brotes de Brócoli en Población Obesa* [Universidad Católica de Murcia]. <https://repositorio.ucam.edu/bitstream/handle/10952/4867/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López-Díaz, S., Sandoval-Flores, M. G., Flores-Pantoja, L. E., Jiménez-Mejía, R., Santoyo, G., & Damián Loeza-Lara, P. (2021). Quitosanos y compósito quitosano-octanoato de sodio reducen la pudrición de fresa en postcosecha. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 1131–1137.
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101–108. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.012>
- Mahlein, A. K., Steiner, U., Dehne, H. W., & Oerke, E. C. (2010). Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. *Precision Agriculture*, 11, 413–431. <https://doi.org/10.1007/s11119-010-9180-7>
- Maroto, J. (1989). *Horticultura para aficionados*. (M. Prensa, Ed.) Madrid.
- Moreno-Rico, O., Manzano-Flores, D. E., & Luna-Ruiz, J. J. (2005). Reacción de variedades de coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.) a *Phoma lingam* (Tode ex Fr.) Desm. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 23(2), 206–210. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61223215>
- Muñoz, P. A. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_In_dices_de_vegetacion
- Nachimba, V. (2022). *Adaptabilidad de nueve cultivares de coliflor (Brassica oleracea var. botrytis L.) en el cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi* [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Naguib, N. S., & Daliman, S. (2022). Analysis of NDVI and NDRE Indices Using Satellite Images for Crop Identification at Kelantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1102(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1102/1/012054>
- Ogaya, R., Barbeta, A., Başnou, C., & Peñuelas, J. (2015). Satellite data as indicators of tree biomass growth and forest dieback in a Mediterranean holm oak forest. *Annals of Forest Science*, 72(1), 135–144. <https://doi.org/10.1007/S13595-014-0408-Y/FIGURES/9>

- Oliveros, s. (2019). *Algoritmo para la medición del grado de severidad de tizón temprano causado por Alternaria solani, en hojas de tomate, a partir del análisis digital de imágenes.*
- Olivoto T (2022). "Lights, camera, pliman! An R package for plant image analysis." *Methods in Ecology and Evolution*, 13(4), 789-798. doi:10.1111/2041-210X.13803
- Ortega-Centeno, S., Guillén-Sánchez, D., Ramos-García, M., Troncoso-Rojas, R., Villanueva-Arce, R., Bosquez-Molina, E., Barrera-Necha, L., & Bautista-Baños, S. (2010). Métodos de inoculación y evaluación de extractos botánicos e isotiocianatos de la familia brassicaceae en el control de la roya del gladiolo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(1), 13–21.
- Páscoa, R. N. M. J., Lopo, M., Teixeira dos Santos, C. A., Graça, A. R., & Lopes, J. A. (2016). Exploratory study on vineyards soil mapping by visible/near-infrared spectroscopy of grapevine leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.014>
- Peña, L., Rentería, V., Velázquez, C., Ojeda, M. L., Barrera, E. (2019). Absorbancia y reflectancia de las hojas contaminadas de *Ficus* contaminadas con nanopartículas de planta. *Revista Mexicana de Física*, 69, 95-105.
- Peña, R., & Paez, J. (2005). Guía para el cálculo de la concentración de inóculo. *Chemical Reviews*, 105(18), 3167–3196.
- Pérez, C. M. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca.
- Pinto, V. (2013). *Obtención de plántulas de coliflor (Brassica oleracea var. bortytis a través de activadores ecológicos* [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Quito, N., Tacuri, E., López, M., & Lupercio, L. (2020). Detección de estrés hídrico en brócoli (brassica oleracea var. itálica), utilizando ndvi sobre imágenes multispectrales capturadas a corta distancia. *Journal of Science and Research*, 5(CININGEC2020), 41–59.
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3), 707–707. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE13030707>
- Ramón, J., & Arauz, L. (1999). Exactitud y repetibilidad de dos métodos para la evaluación de la severidad de enfermedades fungosas en el fruto de la papaya (Carica papaya). *Agronomía Costarricense*, 23(1), 89–96
- Revelo, D., Mejía, J., Montoya-Bonilla, B., & Hoyos, J. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (Coffea arabica). *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 2145–9371. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>

- Saavedra, D., Machado, L., Méndez, D., Murcia, V., & Vargas, D. (2019). Manual de interpretación y aplicación de imágenes multiespectrales en cultivos de importancia agrícola en el norte del Huila. In *Sena – Sennova*
- Salman, M., Hawamda, A.-A., Amarni, A. A.-A., Rahil, M., Hajjeh, H., Natsheh, B., & Abuamsha, R. (2011). Evaluation of the incidence and severity of Olive leaf spot caused by *Spilocaea oleagina* on Olive Trees in Palestine. *American Journal of Plant Sciences*, 02(03), 457–460. <https://doi.org/10.4236/ajps.2011.23053>
- Sandipan, (2018) Hands-On Image Processing with Python. Packt Publishing. United Kingdom.
- Sharma, D. K., Fernández, J. O., Rosenqvist, E., Ottosen, C. O., & Andersen, S. B. (2014). Genotypic response of detached leaves versus intact plants for chlorophyll fluorescence parameters under high temperature stress in wheat. *Journal of Plant Physiology*, 171(8), 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.09.025>
- Silva Costa, B. R., Oldoni, H., da Silva, T. M. M., Farinassi, L. G., Bognola, I. A., & Bassoi, L. H. (2023). How similar is the zoning of different vegetation indices: Defining the optimal framework for monitoring grapevines' growth within vigorous vineyards. *Scientia Horticulturae*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112404>
- Singh, B. K., Singh, B., & Singh, P. M. (2018). Breeding Cauliflower: A Review. *International Journal of Vegetable Science*, 24(1), 58–84. <https://doi.org/10.1080/19315260.2017.1354242>
- Solis, A. F., Revelo luna, D. A., Campo Ceballos, D. A., & Gaviria López, C. A. (2021). Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie *Coffea arabica* con índices espectrales en imágenes. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 51–68. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536>
- Sultana, S., Adhikary, S. K., Islam, M. M., & Rahman, S. M. M. (2018). Evaluation of pathogenic variability based on leaf blotch disease development components of *Bipolaris sorokiniana* in *Triticum aestivum* and agroclimatic origin. *Plant Pathology Journal*, 34(2), 93–103. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.08.2017.0175>
- Tamayo, P. J. & Jaramillo, J. E. (2004). Enfermedades de las crucíferas en Colombia. Guía para su diagnóstico y manejo. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica. Boletín técnico 24
- Tamayo, P. (2005). Manejo integrado de enfermedades y desordenes abióticos. Enfermedades Bióticas. In J. Jaramillo & C. Díaz (Eds.), *El cultivo de las crucíferas* (pp. 104–106). CORPOICA.
- Theunissen, J., & Sins, A. (1984). Growth stages of Brassica crops for crop protection purposes. *Scientia Horticulturae*, 24, 1–11.

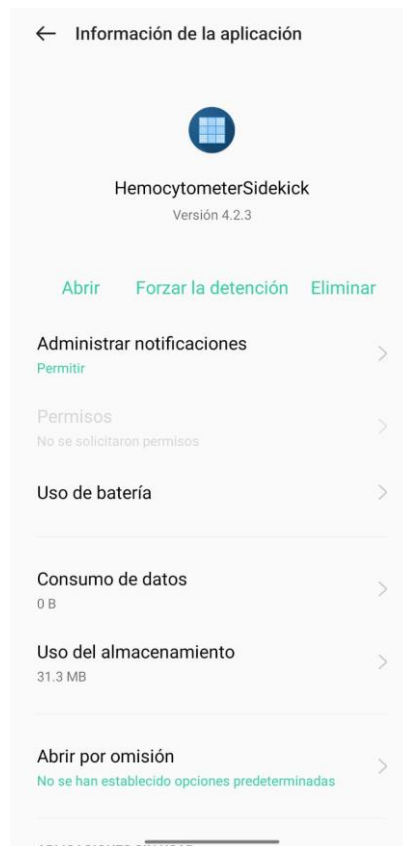
- Trueba, S. (2017). *Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de vegetación* [Tesis]. Universidad de Cantabria.
- Valenzuela, S. (2021). *Detección y Clasificación de Enfermedades en el Tomate Mediante Deep Learning y Computer Vision* [Tesis]. Universidad Nacional de La Plata.
- Wójtowicz, A., Piekarczyk, J., Czernecki, B., & Ratajkiewicz, H. (2021). A random forest model for the classification of wheat and rye leaf rust symptoms based on pure spectra at leaf scale. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 223, 112278. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOBIO.2021.112278>.
- Wurr, D. C. E., Fellows, J. R., & Hambidge, A. J. (1995). The potential impact of global warming on summer/autumn cauliflower growth in the UK. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72(3–4), 181–193. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02169-K](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02169-K)
- Yan, L., Zhao, M., Wang, X., Zhang, Y., & Chen, J. (2021). An Algorithm and Dataset for Object-level Hyperspectral Image Target Detection. *IEEE Signal Processing Letters*, 28, 508–512. <https://doi.org/10.1109/LSP.2021.3059204>
- Yin, G., Verger, A., Descals, A., Filella, I., & Peñuelas, J. (2022). A Broadband Green-Red Vegetation Index for Monitoring Gross Primary Production Phenology. *Journal of Remote Sensing (United States)*, 2022. <https://doi.org/10.34133/2022/9764982>
- Zamora, E. (2016). *El cultivo de la coliflor. Serie guías - producción de hortalizas DAG/HORT-013*. Universidad de Sonora.

Anexos


Anexo A. Siembra de plántulas y colocación en bloques completamente al azar.



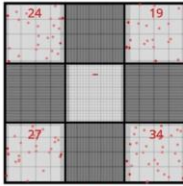
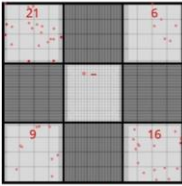
Anexo B. Información de aplicación empleada para el cálculo la concentración de la solución.



Anexo C: Número de esporas contabilizadas colocados en la aplicación Hemocitómetro

 Hemocitómetro

Neubauer mejorado



Muestra 2 *Alternaria* spp

Factor de dilución

Profundidad de cámara μm

1.95×10^5 células/mL

Guardar

Revertir

Anexo D: Inoculación de plantas de brócoli con *Alternaria* spp.



Anexo E: Fundas de polietileno cubriendo las plantas inoculadas.



Anexo F: Preparación del área de fotografía.



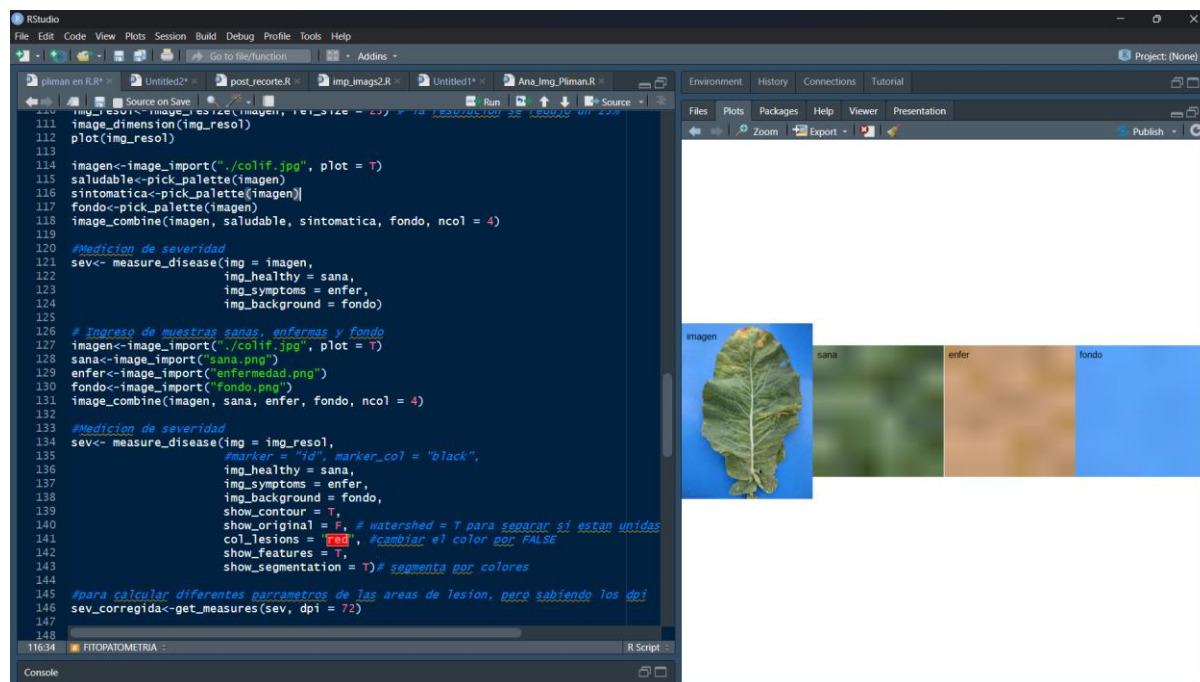
Anexo G. Ajuste de la cámara multiespectral.



Anexo H: Captura de imagen para el registro de severidad



Anexo I: Ingreso de los códigos en el programa RStudio para la segmentación de imágenes para el cálculo del porcentaje de severidad



Anexo J. Muestra de *Alternaria* tomada en campo para verificación de su ataque a las UE.

