



**NDVI como indicador de efectividad en la aplicación de *Ascophyllum nodosum*
en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass)**

Diego Alejandro Calderón Díaz

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesor: Omar Antonio Vega, Doctor (PhD)
Sociedades de la información y el conocimiento

Asesores de recursos académicos: Luz Andrea Sepúlveda Escobar (asesora bibliográfica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Calderón Díaz, 2025)
Referencia	Calderón Díaz, D. A. (2025). <i>NDVI como indicador de efectividad en la aplicación de <i>Ascophyllum nodosum</i> en el cultivo de aguacate (<i>Persea americana</i> var. <i>Hass</i>)</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXVII

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizada, ChatGPT, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

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

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
3 Objetivos	27
5 Marco teórico	28
5.1 VANT	28
5.2 NDVI.....	33
5.3 Aguacate (<i>Persea americana</i> var. Hass)	35
5.4 Extracto de <i>Ascophyllum nodosum</i>	37
6 Metodología	39
6.1 Tipo de estudio	39
6.2.1 Variables	40
6.3 Procedimiento.....	40
6.3.1 Fase 1: identificación de las áreas de cultivo designadas y captura de imágenes.....	41
6.3.1.1 Adquisición de datos iniciales.....	41
6.3.1.2 Selección de sitios de estudio.....	45
6.3.1.3 Delimitación de las copas de los árboles seleccionados y análisis preliminar NDVI	46
6.3.1.4 Extracción inicial del NDVI de los árboles.....	48
6.3.1.5 Preparación de las capas de entrada	49
6.3.1.6 Cálculo de estadísticas zonales del NDVI.....	50
6.3.1.7 Configuración de la herramienta	51
6.3.1.8 Creación de campos de almacenamiento en la capa de copas.....	53
6.3.1.9 Integración de resultados a la capa de copas.....	54

6.3.1.10 Configuración de Calculate Field.....	57
6.3.1.11 Consolidación de valores NDVI inicial	59
6.3.1.12 Exportación de la tabla consolidada.....	63
6.3.2 Fase 2: aplicación del extracto de <i>Ascophyllum nodosum</i>	64
6.3.2.1 Aplicación de tratamientos.....	64
6.3.2.2 Seguimiento: obtención de segunda imagen NDVI	68
6.3.3 Fase 3: análisis estadístico de los datos del NDVI después del tratamiento.....	70
6.3.3.1 Evaluación de la respuesta vegetativa.....	70
6.3.3.2 Análisis estadístico de los datos	72
6.3.3.3 Interpretación de resultados	78
7 Resultados	79
7.1 Fase 1: Selección del área experimental y caracterización inicial	79
7.2 Fase 2: Aplicación del bioestimulante y segundo vuelo NDVI	83
7.3 Fase 3: Análisis estadístico del NDVI después del tratamiento.....	87
7.3.1 Resultado ANOVA inicial y gráfica.....	87
7.3.2 Resultado ANOVA con covariable inicial y gráfica.....	90
8 Conclusiones	93
Referencias	97

Lista de tablas

Tabla 1 Clasificación taxonómica del aguacate Hass	35
Tabla 2 Área, producción y rendimiento nacional de aguacate Hass.....	36
Tabla 3 Datos generales	80
Tabla 4 Selección de árboles NDVI inicial	81
Tabla 5 Descripción protocolo de aplicación	83
Tabla 6 Valores NDVI inicial y final	85

Lista de figuras

Figura 1 Referentes teóricos.....	28
Figura 2 Clases de VANT.....	29
Figura 3 VANT ala fija.....	30
Figura 4 NDVI rotor único.....	31
Figura 5 VANT multirrotor.....	32
Figura 6 VANT híbrido.....	32
Figura 7 Imagen NDVI.....	34
Figura 8 Regeneración vegetal.....	37
Figura 9 Procedimiento de la investigación.....	40
Figura 10 Ortomosaico inicial del área de estudio.....	42
Figura 11 Dron Phantom 4 con soporte para cámara multispectral.....	43
Figura 12 Instalación y configuración del sistema GNSS.....	44
Figura 13 Punto de control terrestre (GCP) y levantamiento con GNSS.....	45
Figura 14 Selección sitio de estudio.....	46
Figura 15 Tratamientos y delimitación de los doseles de los árboles.....	47
Figura 16 Mapa de NDVI del primer vuelo.....	48
Figura 17 Organización de capas en el proyecto ArcGis Pro.....	49
Figura 18 Ubicación de la herramienta Zonal Statistic as table en ArcGis Pro.....	50
Figura 19 Configuración de la herramienta Zonal Statistics as Table.....	51
Figura 20 Resultado de la generación de la Tabla NDVI inicial.....	52
Figura 21 Tabla de resultados con valores promedio de NDVI.....	53
Figura 22 Creación del campo para almacenar los valores del NDVI inicial.....	54
Figura 23 Proceso de unión Join.....	55

Figura 24	Configuración del Join.....	56
Figura 25	Resultado del Join.....	57
Figura 26	Aplicación de la herramienta Calculate Field.....	58
Figura 27	Configuración de la herramienta Calculate Field.....	59
Figura 28	Campo NDVI inicial.....	60
Figura 29	Eliminación del Join.....	61
Figura 30	Configuración de la herramienta Remove Join.....	62
Figura 31	Tabla de atributos final consolidada para el análisis de NDVI.....	63
Figura 32	Archivo Excel generado con los datos inicial y final por árbol.....	64
Figura 33	Bioestimulantes a base de <i>Ascophyllum nodosum</i>	65
Figura 34	Aplicación vía drench.....	66
Figura 35	Aplicación vía foliar.....	67
Figura 36	Mapa NDVI del segundo vuelo.....	68
Figura 37	Registro de valores NDVI inicial y final.....	69
Figura 38	Filtro por área aplicado a la tabla NDVI inicial en Excel.....	70
Figura 39	Base de datos consolidada de NDVI y área de dosel por árbol.....	72
Figura 40	Carga de datos iniciales.....	73
Figura 41	Configuración de análisis de varianza (ANAVA) en InfoStat.....	74
Figura 42	Configuración del análisis de comparación de medias en InfoStat.....	75
Figura 43	Base de datos con valores NDVI inicial y final por tratamiento.....	76
Figura 44	Configuración del modelo de análisis de covarianza en InfoStat.....	77
Figura 45	Configuración del test de Duncan.....	78
Figura 46	Selección del área de estudio, asignación de tratamientos y digitalización de doseles sobre mosaico RGB.....	79
Figura 47	Mapa NDVI inicial.....	81
Figura 48	Mapa NDVI final con árboles seleccionados.....	84

Figura 49 Análisis de varianza (ANOVA) NDVI inicial.....	88
Figura 50 Comparación de medias del NDVI inicial.....	89
Figura 51 Resultado de varianza (ANOVA) NDVI final.....	90
Figura 52 Comparación de medias del NDVI final	91

Siglas, acrónimos y abreviaturas

Ha	Hectárea
IV	Índices vegetales
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
VANT (dron)	Vehículo aéreo no tripulado

Resumen

Esta investigación evaluó la utilidad del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como indicador de efectividad de la aplicación de un bioestimulante a base de extracto de *Ascophyllum nodosum* en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). Se tomaron imágenes con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) Phantom 4 equipado con una cámara multispectral Mapir Survey3W Red + Green + NIR (RGN, NDVI), las cuales se procesaron en el software ArcGIS Pro y se calculó el NDVI. Para el análisis, se estructuró un diseño experimental con asignación dirigida de tratamientos, priorizando la homogeneidad entre las unidades experimentales (árboles) en términos de área de dosel, estado fenológico y valores iniciales de NDVI. Los tratamientos se distribuyeron en cuatro grupos, incluyendo un testigo, con el fin de reducir la variabilidad intragrupo y facilitar comparaciones significativas en la respuesta al bioestimulante. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Para identificar cuáles tratamientos específicos difieren entre sí, se empleó la prueba de comparaciones múltiples de Duncan al nivel de significancia del 5%.

Palabras clave: VANT, NDVI, aguacate (*Persea americana* var. Hass), extracto de *Ascophyllum nodosum*

Abstract

This research evaluated the usefulness of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as an indicator of effectiveness in the application of a biostimulant based on *Ascophyllum nodosum* extract in avocado (*Persea americana* var. Hass) cultivation. Images were taken with a Phantom 4 unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a Mapir Survey3W Red + Green + NIR (RGN, NDVI) multispectral camera, which were processed using ArcGIS Pro software to calculate the NDVI. For the analysis, an experimental design was structured with targeted treatment assignment, prioritizing homogeneity among experimental units (trees) in terms of canopy area, phenological stage, and initial NDVI values. The treatments were distributed into four groups, including a control, in order to reduce intra-group variability and facilitate meaningful comparisons of the biostimulant's effects. Subsequently, an analysis of variance (ANOVA) was performed to determine whether statistically significant differences existed among treatments. To identify which specific treatments differed, Duncan's multiple range test was applied at a 5% significance level.

Keywords: UAV, NDVI, avocado (*Persea americana* var. Hass), *Ascophyllum nodosum* extract

Introducción

La agricultura moderna enfrenta el desafío de mejorar la productividad de los cultivos de manera sostenible, la variabilidad climática, el agotamiento de los suelos y la necesidad de reducir el uso de insumos de origen químico. Frente a este escenario, se ha aumentado el interés por el uso de tecnologías de agricultura de precisión y productos bioestimulantes que contribuyan al manejo eficiente de los cultivos. La teledetección, a través de sensores remotos como las cámaras multiespectrales, se ha consolidado como una herramienta clave para monitorear el estado fisiológico de las plantas y tomar decisiones agronómicas más acertadas.

En este contexto, el presente trabajo se centra en evaluar la eficacia del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como herramienta de análisis para medir el impacto de la aplicación de un extracto de *Ascophyllum nodosum* en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). La investigación combina el uso de imágenes NDVI de alta resolución obtenidas mediante el vuelo de un dron (AUV por sus siglas en inglés) equipado con una cámara multiespectral con la aplicación de diferentes tratamientos con el bioestimulante, para determinar si este índice permite observar cambios significativos en el vigor vegetal.

El uso de extractos de algas como bioestimulantes representa una alternativa prometedora para fortalecer el desarrollo fisiológico de los cultivos, mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes y aumentar la tolerancia al estrés abiótico. No obstante, la evaluación objetiva de su efectividad en campo aún requiere herramientas precisas. En este sentido, el NDVI ofrece un indicador cuantificable del vigor vegetal y permite realizar seguimientos no destructivos, rápidos, con baja utilización de mano de obra, por lo cual es pertinente estudiar su aplicabilidad como método de monitoreo del efecto del *Ascophyllum nodosum* en condiciones reales de cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass)

Esta investigación surge del interés por integrar herramientas geoespaciales y conocimiento técnico agronómico para aportar a la mejora en la toma de decisiones en campo, especialmente en cultivos de alto valor como el aguacate (*Persea americana* var. Hass). Desde la perspectiva académica, el estudio representa una oportunidad para aplicar metodologías SIG en agricultura de precisión, fortalecer el uso de indicadores espectrales como el NDVI y generar evidencia sobre el uso de bioestimulantes naturales, contribuyendo al enfoque de sostenibilidad en los sistemas productivos agrícolas.

El propósito de esta investigación es evaluar el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como indicador de efectividad en la aplicación de un extracto de *Ascophyllum nodosum* de origen canadiense en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). Para ello, se aplicaron tratamientos Foliar, *drench*, foliar más *drench* y un testigo sin aplicación del extracto, se realizaron dos vuelos multiespectrales (antes y después del tratamiento), con el fin de comparar los valores de NDVI por árbol y determinar si existen diferencias significativas atribuibles al bioestimulante.

Aunque existen diversas herramientas para evaluar el efecto fisiológico de los bioestimulantes en campo, muchas de ellas requieren mediciones puntuales, tiempo intensivo y mano de obra especializada. En cultivos como el aguacate (*Persea americana* var. Hass), donde el monitoreo continuo y a escala es fundamental, se hace necesario implementar métodos que permitan evaluar de forma rápida, eficiente y con mayor cobertura espacial. En este sentido, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se presenta como una alternativa prometedora, ya que permite identificar cambios en el vigor vegetal de manera no destructiva, reduciendo tiempos de evaluación y facilitando la comparación entre tratamientos aplicados bajo condiciones reales de producción.

1 Planteamiento del problema

El presente estudio aborda el problema de la falta de herramientas prácticas, rápidas y objetivas para evaluar la efectividad de aplicaciones de bioestimulantes en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). Actualmente, en Colombia los métodos de evaluación en campo dependen en gran medida de observaciones visuales y de la experiencia de los evaluadores, lo cual puede generar errores subjetivos y retrasos en la toma de decisiones agronómicas.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se presenta como una alternativa objetiva, Este índice se calcula mediante la utilización de sensores remotos, típicamente instalados en plataformas espaciales, para medir la intensidad de la radiación en determinadas bandas del espectro electromagnético que son emitidas o reflejadas por la vegetación (Aso et al., 2021). El NDVI permite estimar de manera rápida el vigor vegetativo, la densidad foliar y el estado general de la vegetación, ya que la disminución en la fotosíntesis o cambios en la morfología foliar se reflejan en una disminución en la reflectancia dentro del rango espectral NIR (Carter & Knapp, 2001).

Diversos estudios internacionales han demostrado la utilidad del NDVI para evaluar el estado fisiológico de los cultivos, detectar estrés, estimar rendimientos y monitorear el efecto de prácticas agrícolas (Hama et al., 2021; Guerrón et al., 2022; Arioli et al., 2023; Chedid et al., 2024). Sin embargo, en Colombia, y particularmente en cultivos perennes como el aguacate (*Persea americana* var. Hass), el uso del NDVI como herramienta de evaluación de bioestimulación aún es incipiente y poco documentado.

Esta investigación se desarrolló en un lote de aguacate (*Persea americana* var. Hass) de cinco años de edad en la finca La Yolanda, municipio de Salento, departamento del Quindío (1982 m.s.n.m.), sobre un área seleccionada de 1.23 ha. En este contexto, se reconoce que la industria del aguacate (*Persea americana* var. Hass) es estratégica para Colombia como producto de exportación no tradicional (Minagricultura, 2024), y que uno de los principales retos para los agricultores es acceder a métodos de monitoreo técnico, precisos y accesibles. En este contexto González-Musso et al. (2020) destaca la importancia de contar con métodos de monitoreo eficientes y plantea que en la actualidad los VANT han permitido obtener datos detallados en términos de espacio y tiempo para investigar procesos ecológicos y forestales. Sus atributos distintivos los hacen herramientas prometedoras para supervisar la salud de las plantaciones forestales.

A partir del planteamiento anterior surgió el siguiente interrogante: ¿Puede el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) utilizarse como un indicador eficiente para evaluar la efectividad de la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass)?

1.1 Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes de esta investigación, a partir de allí se configura el estado del arte que permitió triangular los resultados para realizar la discusión y concluir la investigación.

De Souza et al. (2019) plantean que una de las maneras de evaluar el estrés y la salud de las plantas en evaluaciones no destructivas es el uso de instrumentos como el clorofilometro atLEAF que miden la absorbancia de la luz roja (660 nm) y el infrarrojo cercano (NIR 940 nm) en las hojas, calculando un valor adimensional relacionado con el contenido de clorofila. Esta medición se asemeja al principio del NDVI, que también utiliza las reflectancias en el espectro rojo e infrarrojo cercano para evaluar la salud de las plantas. Ambos métodos se basan en la interacción de la luz con la vegetación, proporcionando información sobre el vigor y el estrés de las plantas de manera no destructiva.

El estudio realizado por Boiarskii y Hasegawa (2019) tiene como objetivo identificar áreas de vegetación deficientes que puedan requerir fertilizante. Se llevó a cabo en la granja experimental de Niigata, Japón, donde se utilizaron cinco imágenes multiespectrales obtenidas mediante un vehículo aéreo no tripulado. Se emplearon dos índices espectrales, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación de la Región Roja-Edge (NDRE). Los resultados de este estudio indican que diferentes índices pueden ser más útiles para diferentes cultivos, tasas de siembra y etapas de crecimiento. Esta conclusión subraya la importancia de seleccionar el índice adecuado según las características específicas del cultivo y las condiciones del entorno agrícola. Estos hallazgos respaldan la presente investigación porque ayudan en la comprensión de cómo los índices espectrales pueden ser utilizados para detectar deficiencias nutricionales y optimizar la aplicación de fertilizantes.

Liyantono et al. (2019) realizaron análisis adicionales para determinar el mejor período de evaluación del NDVI después de la siembra de arroz. Se concluyó que el máximo NDVI se alcanza

en el día 63 después de la siembra. Asimismo, se correlacionó la productividad del cultivo con el índice máximo de NDVI, encontrando que para las imágenes del Sentinel 2, la correlación fue de solo 0.27, mientras que, para las imágenes del vehículo no tripulado, la correlación fue significativamente mayor, alcanzando un valor de 0.53.

Estos resultados sugieren que el NDVI obtenido a partir de imágenes de alta resolución, como las capturadas por vehículos no tripulados, puede proporcionar una evaluación más precisa y detallada del estado del cultivo en comparación con los datos de satélites de baja resolución. En el contexto de la investigación sobre la efectividad de los bioestimulantes en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass), estos hallazgos respaldan la utilidad del NDVI de alta resolución para evaluar el cambio del cultivo del NDVI con mayor precisión.

Shukla et al. (2019) ofrecen una revisión de la literatura que explora los compuestos bioactivos presentes en los extractos del alga *Ascophyllum nodosum* y su impacto en la agricultura. Se destacan los efectos positivos de estos compuestos en la mejora de la tolerancia de las plantas al estrés biótico y abiótico, así como en la promoción del crecimiento vegetal y su interacción con las raíces. Como conclusión, se destaca que la evidencia de los extractos de *Ascophyllum nodosum* como bioestimulantes en la agricultura es prometedora. Sin embargo, se enfatiza la necesidad de centrar la investigación futura en prácticas agrícolas que utilicen estos extractos. Además, se resalta la importancia de evaluar otros aspectos de la aplicación de los extractos para comprender mejor sus modos de acción y maximizar su potencial en la agricultura. Estas conclusiones proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y el desarrollo de evaluaciones y metodologías que puedan ser utilizadas para entender el uso de los extractos.

Thapa et al. (2019) realizaron una investigación de dos años de seguimiento al trigo de invierno, donde midieron el NDVI del cultivo en todo su desarrollo, documentando épocas secas como también épocas óptimas para el cultivo, realizaron mediciones de biomasa final y rendimiento de madurez, encontraron una correlación positiva entre el NDVI y el rendimiento de grano, especialmente en el momento de empalme que es donde el cultivo cambia de estado vegetativo a estado reproductivo, en su trabajo concluye que el NDVI es un buen índice para correlacionarlo con el rendimiento potencial del grano, pero también advierte que en condiciones de sequía, su correlación con el rendimiento es muy baja, por esto se debe tener especial atención a los fenómenos climáticos durante el desarrollo del cultivo. Estos resultados son pertinentes para la investigación, ya que proporcionan información de la correlación que se puede encontrar entre el

NDVI y el aumento de producción de un cultivo, pero también alertan acerca de la necesidad de tener en cuenta las condiciones climáticas, especialmente sequía, al interpretar los datos NDVI.

El estudio llevado a cabo por Fawcett et al. (2020) utilizaron un dron equipado con una cámara multiespectral Parrot Sequoia, se realizaron capturas de imágenes en un bosque en Cornualles, Reino Unido, durante el período de reverdecimiento primaveral. Se monitoreó el NDVI a nivel de copa individual y de especie, clasificando los árboles según su tipo de hojas. Los resultados revelaron que el NDVI capturado durante tres etapas clave del reverdecimiento en árboles de hojas caducas mostró una correlación significativa con las mediciones in situ. Además, la comparación entre imágenes obtenidas bajo diferentes condiciones de iluminación no mostró diferencias estadísticamente significativas en el NDVI. Estos hallazgos sugieren que los datos del NDVI obtenidos a partir de imágenes multiespectrales de drones pueden ser una herramienta eficaz para rastrear los cambios estacionales en la vegetación forestal a nivel de corona. Esta información es relevante para la investigación, ya que permite comprender mejor la capacidad del NDVI para detectar cambios en la salud y el desarrollo del cultivo de aguacate, especialmente en entornos naturales heterogéneos.

El estudio realizado por Revelo et al. (2020) arroja luz sobre la aplicación del NDVI en el cultivo de café, un campo que ha recibido relativamente poca atención en comparación con otros cultivos. Utilizando imágenes obtenidas con un dron a una altura de 30 metros sobre el dosel del cultivo de *Coffea arabica*, se evaluaron las diferencias estadísticas entre los índices NDVI, GNDVI y NDRE, empleando el coeficiente de Spearman como medida de correlación. Los resultados indican que, tanto el NDVI como el GNDVI, muestran una mayor correlación en el coeficiente de correlación de Spearman en comparación con el NDRE.

Esto sugiere que el NDVI y el GNDVI son índices efectivos para determinar la cobertura vegetal en el cultivo de café. Sin embargo, señala que el NDVI puede no ser tan eficaz para detectar variaciones dentro de la cobertura vegetal debido a la saturación de la absorción en la banda alrededor de 668 nm. Esta limitación se atribuye a la capacidad del NDVI para distinguir entre diferentes niveles de clorofila en las plantas. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la investigación sobre el uso del NDVI en el cultivo de aguacate. Al comprender las fortalezas y limitaciones del NDVI en el contexto del cultivo de café se pueden adaptar el enfoque para evaluar la salud y el desarrollo del cultivo de aguacate utilizando datos del NDVI.

La investigación de Meivel y Maheswari (2020) se centra en el uso de tecnologías para mejorar los sistemas agrícolas mediante la automatización y monitoreo remoto, donde un dron equipado con una cámara termal y otra que toma banda verde y NIR para calcular NDVI, son usadas para el monitoreo de un cultivo. Los resultados del estudio demuestran que mediante el uso de imágenes NDVI y termal se logra una monitorización efectiva que permite ajustes en tiempo real, optimizando así las aplicaciones de fertilizantes y pesticidas por medio de una programación en donde se utiliza una escala del NDVI para activar una u otra aplicación. Este estudio es relevante porque muestra la capacidad de monitorear de manera precisa y continua el estado y los posibles cambios de un cultivo y como con el índice NDVI se pueden detectar e individualizarlos.

Espinosa-Antón et al. (2020) realizaron una revisión de estudios de los extractos de las algas marinas como fuentes de extractos bioactivos para la promoción del crecimiento vegetal y la protección de los cultivos, realiza una descripción de los efectos que han sido estudiados en las diferentes etapas como germinación de semillas, desarrollo radicular, incremento en el rendimiento y la calidad de las cosechas, efectos en la absorción y asimilación de nutrientes por las plantas, efectos en la fisiología y el metabolismo vegetal, efectos de mitigación del estrés, control de plagas y enfermedades, y en diferentes cultivos.

Los autores concluyen que la gran cantidad de estudios científicos realizados y publicados hasta la fecha de la revisión, muestran el gran interés de esto compuestos en el uso como fertilizantes, bioestimulantes, acondicionadores de suelo y la protección de plantas. Pero también advierten que los modos de acción de estos extractos no son totalmente conocidos, por lo tanto, se requieren investigaciones en cultivos específicos que ahonden en temas como duración del efecto una vez aplicado el extracto, mecanismos de acción, respuestas fenotípicas de las plantas, fases más apropiadas para su aplicación, cultivos de mejor respuesta y efectos sinérgicos de combinaciones de varias algas. Esta revisión subraya la eficacia de los bioestimulantes derivados de algas en diversas etapas del crecimiento vegetal incluyendo el desarrollo radicular, efectos en la fisiología de la planta y efectos en la asimilación de nutrientes, aspectos que se relacionan con la medición del NDVI dado que este índice refleja la salud y vigorosidad de la planta.

Chang et al. (2020) realizaron un estudio realizado en cítricos infectados con la enfermedad HLB en Estados Unidos, donde se delinearón los límites en el dosel de los árboles para extraer los índices por árbol, se compararon los índices de vegetación de árboles enfermos y sanos utilizando imágenes multispectrales tomadas por vehículos aéreos no tripulados (UAV), se calcularon los

índices espectrales de NDVI, NDRE, MSAVI, CI y se compararon cada una de estos índices de árboles enfermos vs árboles sanos, dando como resultado mayores índices en árboles sanos que en árboles enfermos. El estudio concluye que NDVI y MSAVI, pueden ser utilizados para monitorear la diferencia ocasionada en árboles enfermos y sanos del cultivo de cítricos. Esta relación destaca la importancia y la aplicabilidad de los índices de vegetación como el NDVI en la monitorización tanto en la salud de los cultivos como en el vigor, también valida la metodología de delinear los doseles de cada árbol y así extraer el NDVI individualmente para tener un dato más preciso.

La investigación de Hama et al. (2021) tuvo como objetivo desarrollar una corrección empírica para corregir las diferencias en las condiciones de luz solar en imágenes NDVI en el cultivo de arroz, con imágenes obtenidas por un dron, consideraron trabajos anteriormente realizados en este tema, y determinar la hora exacta, para obtener unas mejores imágenes y por lo tanto una imagen NDVI sin interferencias por la luz, esto lo realizaron instalando sensores de humedad dentro del cultivo y sensores de reflectancia espectral. Se compararon imágenes en días despejados y nublados. Concluyeron que en días despejados el NDVI es influenciado por la posición del sol, disminuye hacia las 12 del mediodía y vuelve a aumentar en la tarde por el contrario en días nublados el NDVI se mantuvo estable independiente de la hora. En las imágenes comparadas en vuelos realizados a las 8, 10, 12 y 16 horas, el NDVI fue más estable de un día para otro a las 10 a.m. Esta investigación proporciona un marco valioso para ajustar la toma de las imágenes NDVI y así poder tener unas imágenes de mejor calidad.

La revisión de Huang et al. (2021) sobre el progreso en la obtención de imágenes NDVI ofrece una mirada detallada a cerca de las aplicaciones y desafíos asociados a esta herramienta. En su estudio se centra en discutir tres problemas claves que afectan el NDVI: los efectos atmosféricos, el fenómeno de la saturación y los factores sensoriales. En sus comentarios finales destacan como el NDVI simplifica el análisis de complejas propiedades de la vegetación, lo que hace útil para correlacionarlo en cambios que suceden en la vegetación, y afirma que el NDVI facilita considerablemente las aplicaciones de teledetección. Esto permite respaldar el uso del NDVI como herramienta de evaluación en el uso del extracto y permitirá ser un indicador efectivo en la evaluación de la respuesta en el cultivo de aguacate.

La investigación de Harsh et al. (2021) se enfoca en el desarrollo de un sistema de drones de bajo presupuesto que integra funcionalidades autónomas y manuales para mapeo, inspección y fumigación con buena precisión y velocidad. Este sistema incluye un dron FPS armado y

programado con código abierto, equipado con una cámara común modificada para capturar imágenes NDVI.

Los resultados destacan que el NDVI proporciona información valiosa para visualizar la salud de los cultivos de manera que el ojo humano no puede, facilitando un monitoreo detallado y efectivo. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para adoptar tecnologías de teledetección accesibles y eficientes en el estudio. La integración de drones equipados con cámaras NDVI en la evaluación de tratamientos con bioestimulantes puede mejorar las metodologías de monitoreo y optimizar la gestión agrícola en cultivos de aguacate.

El estudio de Tenreiro et al. (2021) se centró en un metaanálisis que examina la relación entre el NDVI y la cobertura del dosel verde (CC) a partir de datos recopilados de 19 estudios diferentes. Esto dio lugar a una propuesta de modelos genéricos aplicables a trece diferentes cultivos, detallando también grados de incertidumbre y errores asociados a cada modelo. Concluyen que al validar sus resultados experimentalmente, proporcionan evidencia cuantitativa de la aplicabilidad de los modelos en múltiples contextos de investigación y aunque estos modelos presentan ciertas incertidumbres, los experimentos confirmaron que pueden ser utilizados confiablemente en aplicaciones de modelado donde las variaciones relativas de las predicciones son más críticas que la precisión absoluta. Este estudio respalda el NDVI como una herramienta eficaz para monitorear la salud del cultivo y también ofrece un método probado para mejorar la comprensión y aplicación de los tratamientos con extractos de algas.

La Fundación Miguel Lillo (2022) propone una metodología en el cultivo de tomate, donde usa un seguimiento a las mismas plantas durante varias etapas fenológicas, su estudio se basa en una predicción temprana de rendimiento mediante el seguimiento de imágenes multiespectrales tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y mediante un modelo predictivo basado en la recopilación de características, estima el rendimiento del cultivo de tomate de una parcela de 0.4 ha, realizó siete vuelos con un intervalo de nueve días, empezando 44 días después del trasplante, realizó un diseño experimental de 22 variedades y cuatro repeticiones, utilizó una zona de tres hileras cada una de 6 m, con una resolución espacial de 4 cm por pixel y una altura de vuelo de 42.5 metros, evaluó NDVI, NDRE y se utilizaron dos algoritmos DTE para la realización del pronóstico de cosecha. Concluye que el NDVI no es un buen atributo para considerar en el pronóstico de cosecha en tomate, ya que la medición de este índice no varió en la semana seis, cuatro y dos antes

de la cosecha. La estabilidad del NDVI en las últimas seis semanas, sugieren que este índice puede no ser tan sensible a los cambios fenológicos de las plantas.

Guerrón et al. (2022) realizaron una validación de índices vegetales (IV) que utilizan la banda roja y el infrarrojo cercano y lo correlacionan con el contenido de nitrógeno foliar en el cultivo de aguacate, utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación transformada (TVI) como variables en su correlación. Se realizaron regresiones y correlaciones con los análisis foliares del contenido de nitrógeno, generando valores de NDVI de 0.93 y 0.95 en TVI. Concluyen que se puede utilizar los índices vegetales NDVI y TVI como un indicador de vigor en función del nitrógeno foliar. Esta investigación respalda la integración de la medición NDVI, proporcionando una base para utilizar este índice vegetal como parte de la evaluación de cómo los extractos de *Ascophyllum nodosum* afectan el crecimiento y la salud del cultivo de aguacate.

Crusiol et al. (2022) evaluaron estrategias para el monitoreo de rendimiento en soja utilizando bandas multiespectrales del satélite Sentinel-2, utilizaron las bandas visibles (RGB), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), para evaluar productividad en el cultivo de soja en más de 500 ha, en el estado de Paraná, todos los índices calculados (BNDVI, GNDVI, NDVI, NDRE, NDII, NDI 2, EVI, EVI 2) se correlacionaron con la producción del cultivo, utilizaron métodos de regresión de aprendizaje automático. Concluyen que, para imágenes individuales, los índices de vegetación tienen un desempeño bajo en su precisión para la predicción de rendimiento en el cultivo en comparación cuando se usan las nueve bandas espectrales bajo métodos de regresión de aprendizaje automático. La investigación sugiere que al utilizar un solo índice multiespectral podría no ser tan preciso como la utilización de otros métodos que combinan varias bandas, se debe tener en cuenta este punto para la investigación, y que al utilizar solo el índice NDVI como variable de medición, podría no ser tan eficiente como se espera.

Zamani-Noor & Feistkorn (2022) estudiaron el índice NDVI y el NDYI (índice de diferencia de amarillez normalizado) en el cultivo de colza de invierno, donde su objetivo fue realizar un monitoreo de estados fenológicos, desde la siembra, hasta la cosecha, este estudio se realizó en Salzdahlum, Alemania, las imágenes multiespectrales fueron tomadas por un dron a una altura de 25 metros y una cámara multiespectral Micasense, se realizó un seguimiento por dos años. Se diseñó un experimento con un sistema de bloques en parcelas divididas, el factor fue la densidad

y el subfactor los fertilizantes nitrogenados, además, se contó con cuatro repeticiones y cada parcela tenía un tamaño de 10 metros por 4.5 metros.

Para este trabajo “se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) usando la diferencia menos significativa de Fisher y un p valor de 0.05” (párr., 14). El estudio concluye que el NDVI es el índice más adecuado para el monitoreo del crecimiento del cultivo de colza y se pueden detectar fácilmente cambios fenológicos, mientras el NDYI es un índice adecuado para monitorear diferentes genotipos de colza durante la etapa de floración. Estos hallazgos tienen una relevancia para el presente trabajo, ya que se centra en medir el impacto del NDVI después de la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). La conclusión sobre la efectividad del NDVI para detectar cambios fenológicos respalda el uso de este índice en el estudio para evaluar mejoras en la salud y vigor del aguacate tras la aplicación del bioestimulante.

Torres-Madronero et al. (2023) presentan una caracterización espectral del cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass) de cuatro diferentes fincas, donde se utilizaron imágenes satelitales de Landsat 8 y Sentinel 2 y se compararon con espectrofotometría tomada in situ con un sensor portátil GreenSeeker, estas mediciones fueron comparadas con los índices espectrales calculados con las imágenes satelitales, para la toma de datos in situ se recolectaron un total de 60 hojas jóvenes y 60 hojas maduras y se hizo la medición con los medidores portátiles, para las imágenes multispectrales se utilizaron las imágenes del satélite Sentinel 2 con una resolución espacial de 10 m por pixel y las imágenes del satélite Landsat 8 con una resolución espacial de 30 m por pixel, se calculó el NDVI, NDRE, OSAVI, MCARI y MERIS.

En su trabajo caracteriza el NDVI medido con el GreenSeeker de hojas maduras y hojas jóvenes en donde su media en hojas jóvenes es de 0.45 y en hojas maduras 0.76, para el NDVI calculado mediante las imágenes satelitales el promedio en Sentinel alrededor de 0.4 y landsat en 0,3 también expresa que los árboles de aguacate tienen varios estados fenológicos en el mismo momento, encontrando hojas maduras y jóvenes dentro del mismo árbol. Concluyen que el NDVI es un índice de vegetación ampliamente utilizado en sistemas agrícolas, en el trabajo realizado demostró que varía dependiendo del sensor utilizado y no guarda coherencia entre ellos. A partir de lo anterior, se evidencia que es necesario implementar nuevos métodos que consideren información espectral adicional.

Dentro de los antecedentes de esta problemática en el ámbito internacional se tiene que Arioli et al. (2023), quienes encontraron que la aplicación regular del extracto de algas a los árboles de aguacate era práctica y económicamente viable para mejorar la producción de fruta y la calidad poscosecha en los huertos australianos. Por lo tanto, se evalúa la efectividad de un extracto de algas de *Durvillaea patatarum* y *Ascophyllum nodosum* sobre el rendimiento, los ingresos y la calidad del fruto poscosecha del aguacate en una serie de experimentos de campo en Australia, y sobre el crecimiento de las raíces de las plántulas en un experimento en maceta. Los experimentos de campo se llevaron a cabo en granjas comerciales en tres lugares diferentes del norte de Queensland durante cuatro años y utilizaron árboles de aguacate con diferentes edades, cultivares (Hass y Shepard) y presiones de inóculo de *Phytophthora cinnamomi*.

Los resultados mostraron que la aplicación del extracto de algas por fertiirrigación mejoró significativamente el rendimiento del aguacate (kg de fruto por árbol) en un 38%, la firmeza del fruto en un 4% (piel) y un 22% (pulpa) y el color de la piel del fruto en 1° (tono). y una puntuación de madurez visual mejorada. Los aumentos en el rendimiento se asociaron con una mayor cantidad de frutos por árbol (hasta un 42%), lo que indica que el extracto líquido de algas mejoró el cuajado y la retención de frutos por árbol. La aplicación regular al suelo del extracto de algas a árboles jóvenes (cv. Hass) en macetas aumentó el peso fresco de las raíces en un 22%. En general, se encontró que la aplicación regular del extracto de algas a los árboles de aguacate era práctica y económicamente viable para mejorar la producción de fruta y la calidad poscosecha en los huertos australianos.

Chedid et al. (2024) realizaron un estudio en un finca comercial de café durante un año, donde utilizaron índices de vegetación, obtenidos a partir de imágenes multiespectrales de la plataforma Planet, realizó el seguimiento en la temporada (2021/2022) en donde se relacionaron el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), Índice de vegetación atmosféricamente resistente (ARVI), Índice de vegetación mejorado (EVI) y Índice de vegetación de diferencia visible (VDVI). El estudio concluye que el índice NDVI y SAVI son eficientes para el seguimiento del cultivo ya que el índice Kappa fue superior al 90%, indicando un acuerdo casi perfecto entre las clasificaciones derivadas de estos índices y las observadas en campo. El hecho que el NDVI y SAVI hayan demostrado alta precisión y confiabilidad en el seguimiento en el cultivo de café, sugiere que el índice NDVI también podría ser efectivo para evaluar el estado y el desarrollo en el cultivo de aguacate.

2 Justificación

En el siguiente apartado se justifica esta investigación a partir de su relevancia social teórica y metodológica.

En el aspecto social esta investigación respondió a las necesidades de los agricultores de aguacate (*Persea americana* var. Hass) en el departamento del Quindío, quienes debido al crecimiento acelerado de estos cultivos han buscado herramientas de evaluación que sean, rápidas, efectivas y que permitan mejorar el proceso de la toma de decisiones. “El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es uno de los primeros productos analíticos de teledetección utilizado para simplificar las complejidades de las imágenes multiespectrales, es ahora el índice más popular utilizado para la evaluación de la vegetación” (Huang et al., 2021, p. 1).

Esta investigación representó un aporte al explorar el uso del NDVI como posible indicador de respuesta fisiológica frente a la aplicación de extracto de *Ascophyllum nodosum* de origen canadiense en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). Aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, se evidenció un leve incremento en el NDVI en árboles tratados, lo cual sugiere que este índice, complementado con otras herramientas espectrales o fisiológicas, podría ser útil para que agricultores, asesores y empresas del sector evalúen la efectividad de sus aplicaciones de forma rápida y no destructiva.

En el aspecto teórico se observa un creciente interés en el campo de la teledetección multiespectral, en este sentido la respuesta espectral de una superficie se puede utilizar para identificar materiales y objetos dentro del área observada por el sensor. Por tanto, tiene aplicaciones en cartografía, estudios meteorológicos, defensa y seguridad, minería y agricultura. En concreto, los sistemas multiespectrales son útiles en agricultura de precisión al ser capaces de reconocer extensas zonas de cultivo y proporcionar información en diferentes bandas del espectro electromagnético.

Desde el punto de vista metodológico, se puede ver que a partir de esta investigación pueden surgir nuevos estudios donde se evalúe la efectividad de otros índices, se aplique otro tipo de producto al cultivo o se evalúen otros tipos de cultivos. A partir de los resultados obtenidos de manera específica en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass) de la finca La Yolanda, se desprenden conclusiones y aportes que permiten llevar a cabo proyectos similares. Además, los resultados de esta investigación pueden utilizarse para obtener mejoras en diversos cultivos. Es

importante mencionar que el cultivo de aguacate experimenta un rápido crecimiento, convirtiéndose en uno de los más importante en la región por su potencial para ser exportado y esta técnica permite medir la cantidad y salud de la vegetación, lo que brinda información valiosa sobre el estado de las plantas y el impacto de la aplicación de este fertilizante natural en el crecimiento y desarrollo de los árboles de aguacate (*Persea americana* var. Hass).

La herramienta Zonal Statistics as Table, implementada en el entorno de ArcGIS Pro, fue utilizada para calcular el valor promedio del índice NDVI por cada árbol previamente delimitado con polígonos. Esta metodología es ampliamente reconocida en investigaciones de fenotipado de alto rendimiento, donde se requiere obtener estadísticas zonales de índices espectrales por unidades experimentales definidas (Chatterjee et al., 2025). Aunque existen alternativas como FIELDDimageR o FIELDDimagePy, el uso de ArcGIS Pro fue priorizado por su integración directa con ortomosaicos de alta resolución, su capacidad para gestionar grandes volúmenes de datos raster y vectoriales, y por la familiaridad con su entorno de trabajo.

De acuerdo con Chatterjee et al. (2025), los algoritmos de zonificación permiten extraer con alta precisión medidas espectrales como el NDVI a nivel de parcela, árbol o dosel, facilitando el análisis comparativo entre tratamientos o genotipos. En su estudio, validaron el uso de estadísticos zonales como la media y la mediana en imágenes de alta resolución para representar con precisión el vigor vegetal.

La metodología implementada para la extracción del NDVI promedio por árbol se fundamenta en el uso de polígonos que delimitan cada copa individual, sobre los cuales se aplicó la herramienta Zonal Statistics as Table en ArcGIS Pro. Este enfoque se alinea con el propuesto por Abd-Elrahman et al. (2020), quienes desarrollaron un flujo de trabajo automatizado para la delimitación de plantas y extracción de métricas de tamaño en cultivos de fresa mediante imágenes de alta resolución. Si bien su estudio se centró en métricas geométricas como volumen y área, los principios de zonificación raster y análisis por planta individual resultan análogos al cálculo del NDVI promedio por copa en este estudio.

A pesar de los múltiples estudios realizados en torno al uso del NDVI y los extractos de algas marinas en agricultura, existen vacíos metodológicos y contextuales que esta investigación busca abordar. Por ejemplo, Fawcett et al. (2020) realizaron el monitoreo del NDVI a nivel de copa individual utilizando drones, pero lo hicieron en un entorno forestal con especies caducifolias y sin intervención agronómica. A diferencia, esta investigación aplicó el NDVI a árboles frutales de

aguacate (*Persea americana* var. Hass) bajo condiciones de manejo comercial y con aplicación de un bioestimulante, lo que representa un enfoque práctico y directamente relacionado con la producción agrícola.

Por su parte, Shukla et al. (2019) destacan en su revisión los efectos positivos del extracto de *Ascophyllum nodosum* en el crecimiento vegetal y la tolerancia al estrés, pero su análisis es netamente fisiológico y no incorpora herramientas de teledetección. A diferencia de ello, este estudio utilizó imágenes multiespectrales tomadas por un dron para evaluar, mediante NDVI, el impacto fisiológico del extracto aplicado, aportando así una herramienta objetiva, no destructiva y repetible.

Finalmente, Guerrón et al. (2022) evaluaron la correlación entre NDVI y el contenido de nitrógeno foliar en aguacate, sin embargo, su investigación no incluyó tratamientos bioestimulantes ni diferentes tipos de aplicación del producto. Este trabajo, en cambio, introduce la aplicación de un extracto de *Ascophyllum nodosum* vía foliar, *drench* y foliar y *drench*, midiendo el efecto de manera diferenciada por árbol mediante NDVI de alta resolución.

En conjunto, estos aportes permiten evidenciar que la presente investigación no solo incorpora tecnologías de monitoreo remoto como el NDVI, sino que las aplica en un diseño experimental específico y controlado, enfocándose en evaluar cuantitativamente la respuesta del cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass) a un bioestimulante a base de *Ascophyllum nodosum*, lo cual representa una contribución metodológica y aplicada para el desarrollo de una agricultura de precisión más eficiente.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como indicador de efectividad en la aplicación de un extracto de *Ascophyllum nodosum* origen Canadá en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass).

3.2 Objetivos específicos

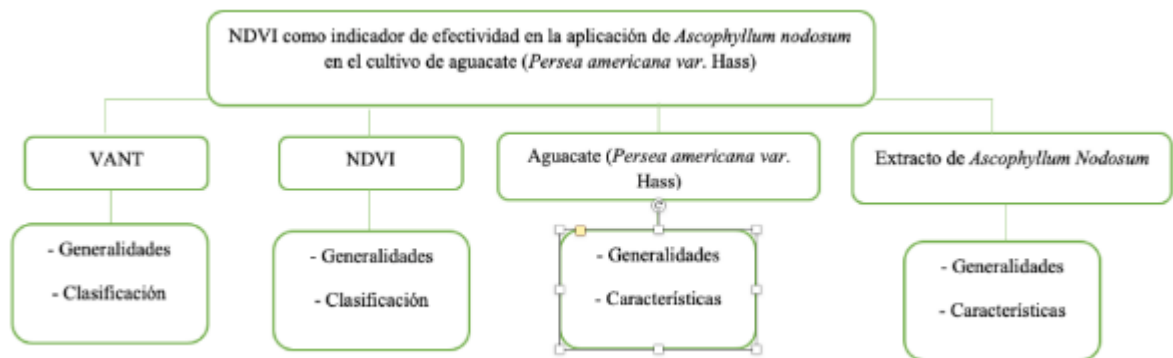
- Identificar el área del cultivo por medio de imágenes RGB y NDVI para determinar la distribución de los tratamientos.
- Realizar la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* y hacer el vuelo del dron para extraer los datos NDVI en los árboles seleccionados.
- Analizar estadísticamente los datos del NDVI después del tratamiento para determinar la significancia de los cambios observados en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass).

5 Marco teórico

A continuación, se presentan los referentes teóricos de la investigación los cuales se dividen en categorías como se observa en la **Figura 1**.

Figura 1

Referentes teóricos



5.1 VANT

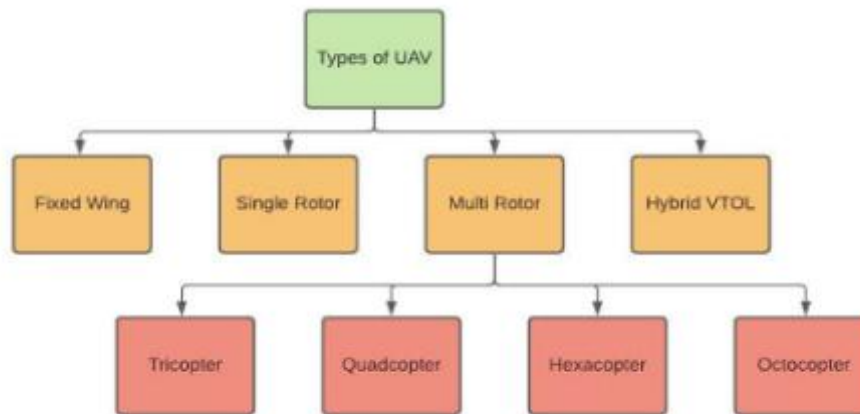
Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) se definen como: “dispositivos que vuelan siguiendo un curso preestablecido con la ayuda de un piloto automático y coordenadas GPS” (Delavarpour et al., 2021, p. 15). Son utilizados en múltiples campos como la ciencia y la ingeniería, se caracterizan por su bajo costo y su capacidad para recoger información precisa de manera rápida (Guevara-Bonilla et al., 2020). En el sector agrícola han sido de gran ayuda para compensar la reducción de la mano de obra y para precisar las dosis en la aplicación de productos químicos y así evitar problemas de salud en las plantas.

Entre las principales aplicaciones de los drones en la agricultura se encuentran la pulverización de cultivos, el monitoreo de plantaciones, el análisis del suelo, del campo y el control de aves (Ahirwar et al., 2019). Generalmente, se usan para la adquisición de imágenes para conteo de plantas y análisis de diferentes cultivos, las áreas donde son más relevantes son el conteo de plantas, árboles, frutos y la detección de enfermedades en plantas. Los VANT son instrumentos que pueden ayudar a aumentar la eficiencia y la productividad agrícola y bajar los costos

operativos. Velusamy et al. (2022) los clasifica en: ala fija, rotor único, multirotor y vuelo híbrido (Figura 2).

Figura 2

Clases de VANT



Nota. Fuente <https://doi.org/10.3390/en15010217> (Velusamy, 2022, p. 3).

Ala fija (*fixed wing*) (Figura 3): tiene una estructura similar a un avión convencional, se desplaza por el aire de manera estable y a una gran velocidad, esto permite cubrir grandes áreas y una gran autonomía de vuelo, generalmente se utilizan para realizar levantamientos topográficos con fotogrametría. Según, Delavarpour et al. (2021): “Estos UAV pueden viajar varios kilómetros desde un punto de lanzamiento y volar a grandes altitudes y velocidades cruceros, cubrir áreas más grandes y obtener una precisión de nivel centimétrico de la distancia de muestreo de suelo” (p. 5), por estas características son utilizados en la agricultura.

Figura 3*VANT ala fija*

Nota. Fuente <https://idc.apddrones.com/drones/drones-multirotor-vs-ala-fija/> (Profesionales de drones, 2024, párr. 14).

Rotor único (single rotor) (**Figura 4**): es un VANT que posee un solo rotor, pueden volar en altitudes y velocidades más baja, pero cubren una menor área. “Está equipado con un controlador de vuelo, giroscopio, receptor de GPS, transmisor de imágenes, trasmisor de telemetría, altímetro, sensor de rumbo y sistema de pulverización” (Xue, 2016, como se cita en Velusamy et al., 2022, p. 5).

Figura 4*NDVI rotor único*

Nota. Fuente <https://agteacher.com/es/producto/helicopteros-yamaha/> (Ag teacher, 2024, párr. 1).

Multirotor (**Figura 5**): es un VANT que posee más de tres rotores, su clasificación se da según el número de rotores, los más comunes son los de tres, cuatro, seis y ocho rotores. Tiene un costo de mantenimiento bajo, su vuelo en tiempo es limitado de (20-30) minutos, fácil de volar y se utilizan en fotografía aérea, cartografía, vigilancia (Velusamy et al., 2022).

Figura 5*VANT multirrotor*

Nota. Fuente <https://doi.org/10.3390/rs13061204> (Delavarpour et al., 2021, p. 6).

Híbrido o VTOL (**Figura 6**): según Delavarpour et al. (2021) “los sistemas VTOL hacen que los VANT de ala giratoria sean independientes de una pista y permiten una amplia gama de opciones operativas en diferentes situaciones de cultivo, como terreno empinados y desiguales” (p. 6). También afirma que pueden ser utilizados en vuelos de baja velocidad lo que permite volar en áreas confinadas o con obstáculos y volar a bajas altitudes por encima de los cultivos.

Figura 6*VANT híbrido*

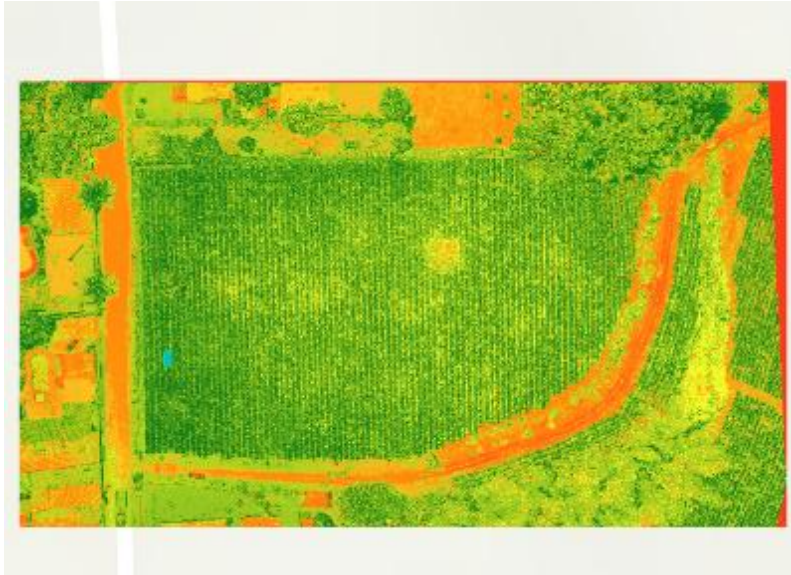
Nota. Fuente <https://doi.org/10.3390/rs13061204> (Delavarpour et al., 2021, p. 6).

Delavarpour et al. (2021) plantea que los VANT tienen “limitaciones en el suministro de imágenes de resoluciones espaciales y temporales adecuadas, dependencia de las condiciones climáticas y requisitos de corrección geométrica y radiométrica” (p. 1). Sin embargo, las imágenes que se obtienen por medio de los drones pueden servir de complementos para los datos que se obtiene con el NDVI, “Por ejemplo los datos del NDVI y los puntos de enfermedades o plagas obtenidos con los VANT en diferentes etapas del crecimiento de los cultivos podrían compararse, junto con los datos de rendimiento de varias temporadas” (p. 16).

5.2 NDVI

Los IV son información calculada a partir de la reflectancia espectral capturada por sensores remotos como drones y satélites equipados con cámaras especializadas para este fin. Esta información se utiliza para la monitorización de la salud de las plantas, cantidad o calidad de la vegetación de un área determinada, además, son muy útiles para el monitoreo ambiental y la silvicultura.

Según Radočaj et al. (2023), los ocho índices con más apariciones en investigaciones desde el 2020 son: Normalized difference vegetation index (NDVI); Enhanced vegetation index (EVI); Green normalized difference vegetation index (GNDVI); Soil adjusted vegetation index (SAVI); Simple ratio (SR); Normalized differences red-edge index (NDRE); Optimized soil adjusted vegetation index (OSAVI); Global environmental monitoring index (GEMI). A continuación, en la **Figura 7** se observa una imagen NDVI de un cultivo de café ubicado en Montenegro, Quindío.

Figura 7*Imagen NDVI*

Se puede afirmar que el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), introducido por Rouse, Hass, Schell, & Deering, en 1973, es el índice más utilizado en la monitorización de la salud y estado general de las plantas, y consiste en una herramienta para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Este índice mide la intensidad de la radiación que la vegetación emite o refleja en ciertas bandas del espectro electromagnético, lo que lo hace indispensable en diversos estudios agrícolas y ecológicos (Bhandari et al., 2012).

Según Huang et al. (2021) el NDVI se calcula utilizando la fórmula matemática $NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$, donde "Red" y "NIR" representan las mediciones de la radiancia espectral (o reflectancia) que se capturan con sensores en las regiones roja (visible) y del infrarrojo cercano, respectivamente. Esta fórmula facilita la evaluación de la salud vegetal, ya que los valores más altos de NDVI indican una mayor actividad fotosintética y, por lo tanto, una mejor salud del cultivo. El NDVI es cada vez más relevante en los estudios de vegetación debido a su capacidad para proporcionar una indicación clara del estado de salud de las plantas. Como señalan (Harsh et al., 2021, p. 15) el NDVI varía entre -1 y 1, siendo los valores más altos un indicativo de una mayor salud vegetal.

5.3 Aguacate (*Persea americana* var. Hass)

El origen del aguacate (*Persea americana* var. Hass) se sitúa en Guatemala y a México, se originó a partir de una mutación espontánea que fue clasificada por Rudolph Hass, representa aproximadamente el 80% de todos los aguacates consumidos en el mundo. Más de sesenta países cultivan aguacates de forma comercial, destacándose México, Colombia y Estados Unidos como principales productores (Córdoba-Gaona et al., 2024). Su producción se ve modificada por múltiples factores como la posición cardinal, la temperatura y la humedad relativa, lo cual influye en su calidad, la cual se ve reflejada en su peso, salud y contenido nutricional (Arias-García et al., 2023). Dentro de sus características se encuentran: pulpa de alta calidad, mayor productividad y maduración más tardía. “En Colombia se observa un notable aumento en las zonas dedicadas al cultivo de aguacate 'Hass', incrementando de 13.000 ha en 2015 a más de 30.000 ha en 2021” (Arias-García et al., 2023, p. 3).

Según la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (2008) existen tres variedades de aguacate: mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia*); guatemalteca (*Persea nubigena* var. *Guatemalis* y Antillana (*Persea americana* var. *americana*.). Esta clasificación se basa en las épocas de recolección, de floración, el tipo de flor, su resistencia al frío y su olor. Dentro de los requisitos agrícolas se tiene que el aguacate requiere de periodos secos y una temperatura estable. En la **Tabla 1** se presenta su taxonomía.

Tabla 1

Clasificación taxonómica del aguacate Hass

Clasificación taxonómica	
Familia	Lauraceae
Género	Persea
Subgénero	Persea
Especie	Persea americana Mill. Aguacate Hass

Fuente. (Abonamos, 2024, párr. 2).

Con respecto a su comercialización Torres y Trochez (2023) exponen que se ha observado un aumento en la popularidad del aguacate, especialmente de la variedad Hass. Esta destaca por su tamaño, tiempo de maduración y beneficios nutricionales, siendo reconocida como un alimento excepcional debido a sus propiedades antioxidantes y sensoriales, incluyendo su alto contenido graso y su riqueza en vitaminas. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (2021), se observa un alto crecimiento de su producción entre los años 2015 y 2021 (**Tabla 2**).

Tabla 2

Área, producción y rendimiento nacional de aguacate Hass

Año	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)
2015	13.530	7.429	52.003	7
2016	16.642	9.435	70.761	8
2017	17.474	11.322	90.574	8
2018	19.221	12.907	116.162	9
2019	20.182	14.843	148.429	10
2020	26.045	15.531	155.310	10
2021	31.518	20.446	214.678	11

Fuente. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021, p. 8).

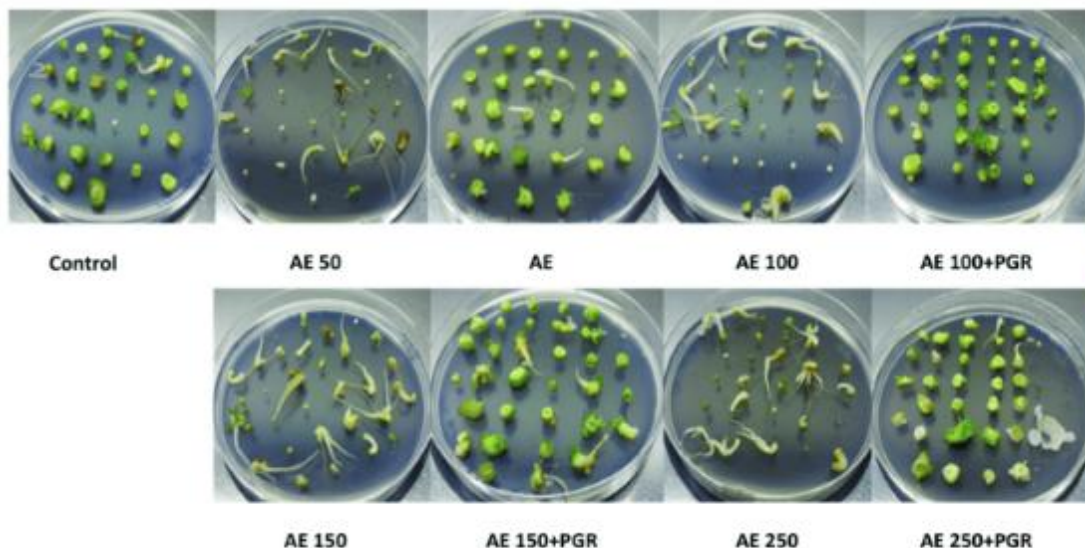
Desde el punto de vista comercial, se ha observado un aumento en el volumen de exportaciones hacia países como Estados Unidos y algunos miembros de la Unión Europea y sus principales ventajas competitivas se encuentra su disponibilidad durante todo el año y sus altas normas de excelencia. Los proveedores de insumos como el extracto de *Ascophyllum nodosum* hacen parte de la cadena de valor que además está integrada por: productores, distribuidores, procesadores, exportadores, centros de investigación, universidades y entidades gubernamentales que respaldan el proceso (Ospina-Parra et al., 2023).

5.4 Extracto de *Ascophyllum nodosum*

En el actual panorama de la agricultura moderna, los consumidores buscan alimentos más sanos y una producción sustentable y limpia, pero la presión por aumentar la productividad y poder satisfacer la demanda creciente de alimentos, hacen que los agricultores utilicen pesticidas químicos y más fertilizantes químicos. “Para minimizar la huella química agrícola, se han explorado extractos de *Ascophyllum nodosum* por su capacidad para mejorar el crecimiento de las plantas y la productividad” (Shukla et al., 2019). En la **Figura 8** se observa la regeneración de yemas y raíces en un medio compuesto por extracto de *Ascophyllum nodosum*.

Figura 8

Regeneración vegetal



Nota. Fuente <https://doi.org/10.3390/plants10071354> (Faize et al., 2021).

Para Craigie (2011):

Tanto las microalgas como las macroalgas se han utilizado durante mucho tiempo para aumentar la productividad de las plantas y la producción de alimentos en varias regiones del mundo a través de sus efectos beneficiosos cuando se aplican a los suelos.

Según Zermeño et al. (2015): “Los extractos de algas marinas, utilizados como biofertilizantes, son materiales naturales que incrementan el crecimiento, rendimiento y mejorar la calidad de los cultivos” (p. 2437). En particular, los extractos derivados del alga parda común *Ascophyllum nodosum* se destacan dentro de la categoría de bioestimulantes, atrayendo un interés considerable en la investigación agrícola. Los bioestimulantes, que se definen como agentes promotores del crecimiento de las plantas y se diferencian claramente de los fertilizantes, están ganando importancia. Su uso se considera cada vez más crucial como parte de una estrategia global para asegurar la producción de alimentos sin comprometer el medio ambiente (De Saeger et al., 2019).

6 Metodología

Esta investigación se realizó bajo un enfoque metodológico cuantitativo y se evaluó la efectividad del extracto de *Ascophyllum nodosum*, originario de Canadá, en el cultivo de aguacate (*Persea americana var. Hass*), utilizando el Índice de vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) como un indicador de eficacia en la evaluación de la aplicación del bioestimulante. Este enfoque permitió el uso de métodos estadísticos para analizar las variaciones del NDVI y determinar la significancia estadística de los cambios.

Determinación de la variación del NDVI: se midió el NDVI en el cultivo de aguacate antes y después de la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum*. Esta medición se realizó utilizando un dron Phantom 4 con una cámara multispectral MAPIR que capturó las bandas roja e infrarroja. Los valores recolectados se compararon antes del tratamiento y postratamiento para evaluar los cambios inducidos por el bioestimulante.

Análisis estadísticos de los datos NDVI: se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para interpretar los datos recolectados del NDVI, así se determinó si los cambios observados en el NDVI después de la aplicación son estadísticamente significativos. Comparación con tratamiento testigo: además de comparar los valores de NDVI antes y después del tratamiento, el estudio incluyó un grupo testigo sin aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* para establecer una comparativa directa. Se analizaron las diferencias entre el grupo tratado y el testigo para determinar una variación significativa al uso del extracto de *Ascophyllum nodosum*.

6.1 Tipo de estudio

La investigación es cuantitativa correlacional, diseñada para evaluar si el NDVI puede utilizarse como indicador de la eficacia de la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* en el cultivo de aguacate (*Persea americana var. Hass*). Este diseño permitió cuantificar la relación entre la aplicación del bioestimulante y los cambios observados en el NDVI.

6.2.1 Variables

Variable independiente: aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum*, esta variable se manipula a través de las diferentes formas de aplicación, foliar, *drench*, foliar más *drench* esto para observar cómo afectó el NDVI

Variable dependiente: NDVI, medido después de la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* para evaluar los cambios en el cultivo de aguacate.

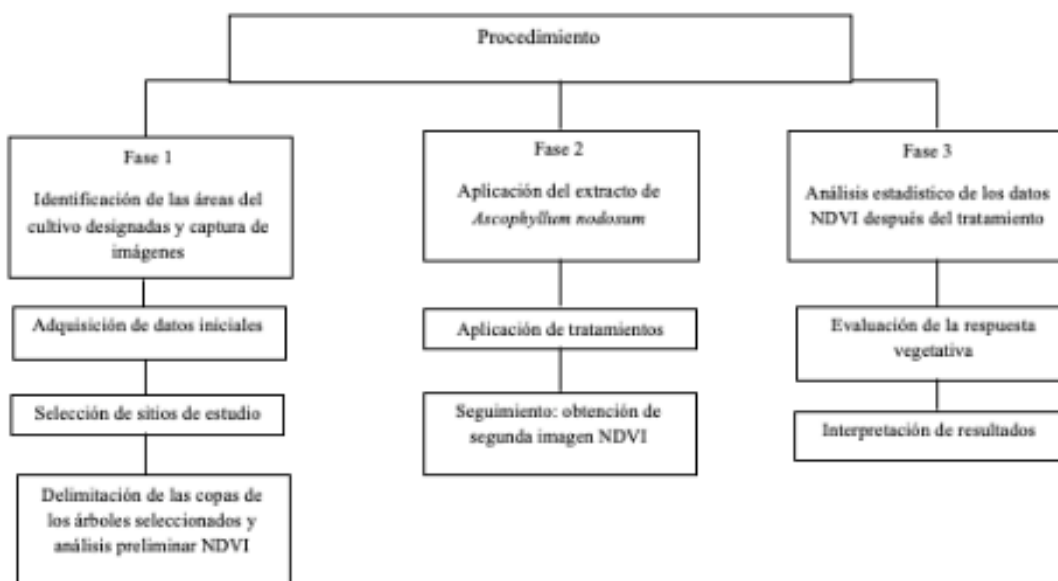
Análisis propuesto: se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias estadísticamente significativas en los valores NDVI.

6.3 Procedimiento

A continuación, se describen por fases, las actividades que se ejecutaron para lograr el cumplimiento de los objetivos (**Figura 9**).

Figura 9

Procedimiento de la investigación

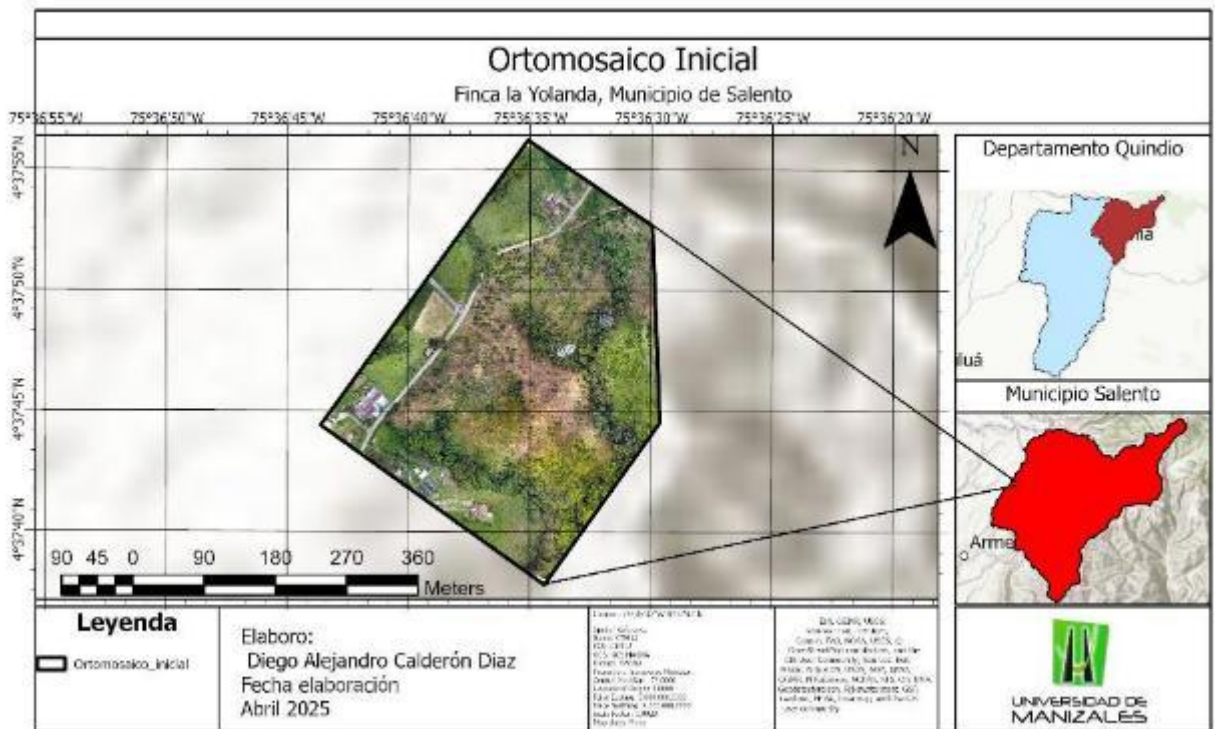


6.3.1 Fase 1: identificación de las áreas de cultivo designadas y captura de imágenes

En esta fase se le da cumplimiento al primer objetivo específico, para ello se identificó el área del cultivo por medio de una imagen de alta calidad obtenida por un dron con una cámara RGB y se realizó el análisis preliminar NDVI para determinar la distribución de los tratamientos.

6.3.1.1 Adquisición de datos iniciales

Ortomosaico preliminar: se llevó a cabo el primer vuelo en la finca la Yolanda, ubicada en el municipio de Salento, en el departamento del Quindío, con un dron equipado con una cámara multiespectral para capturar imágenes aéreas del lote seleccionado. Luego se procesaron estas imágenes para generar un ortomosaico detallado en RGB (red, green, blue), el cual sirvió como base para la distribución de los tratamientos.

Figura 10*Ortomosaico inicial del área de estudio*

En la **Figura 10** se observa el ortomosaico RGB inicial del cultivo, el cual fue adquirido como un producto geoespacial ya procesado, entregado por un proveedor especializado mediante la contratación de un servicio técnico de captura y procesamiento fotogramétrico. Este insumo fue utilizado como base para la delimitación del área de estudio y el análisis posterior de imágenes NDVI. Este ortomosaico fue generado a partir del primer vuelo con dron Phantom 4 sobre la finca La Yolanda, en Salento (Quindío). El mapa está referenciado en el sistema MAGNA-SIRGAS / CTM12, mapa realizado en ArcGIS Pro.

El ortomosaico inicial fue generado utilizando el software Agisoft a partir de imágenes capturadas con un dron Phantom 4. El vuelo se realizó a una altura de sesenta metros, obteniendo una resolución espacial de 3.4 cm por píxel. Se empleó un 70% de traslape entre las imágenes, lo que permitió una mayor precisión en la alineación durante el proceso de fotogrametría. Además, se utilizaron cinco puntos de control tomados con una antena GNSS Allynnav para mejorar la exactitud geométrica. El software alineó las imágenes utilizando puntos en común y aplicó correcciones geométricas basadas en los puntos de control, minimizando las distorsiones.

Figura 11

Dron Phantom 4 con soporte para cámara multiespectral



En la **Figura 11** se puede ver la configuración del dron DJI Phantom 4 utilizado en el primer y segundo vuelo, con soporte impreso en 3D y cámara multiespectral externa Mapir Survey3 RGN NDVI para la captura de imágenes NDVI.

Se utilizó un dron DJI Phantom 4, reconocido por su precisión en vuelo y su capacidad de navegación autónoma mediante GPS y GLONASS. El dron tiene un rango de vuelo máximo de hasta treinta minutos y puede alcanzar velocidades de hasta 20 m/s. Su sistema de sensores de obstáculos en múltiples direcciones asegura un vuelo estable y seguro, especialmente en áreas de difícil acceso. La altura de vuelo fue controlada a sesenta metros, lo que, con su sistema de estabilización de tres ejes, permitió capturar imágenes de alta calidad con resolución espacial de 3.4 cm por píxel.

Se acopló al dron una cámara externa Mapir Survey3 RGN NDVI, diseñada específicamente para estudios de vegetación y análisis de índices espectrales. La Mapir Survey3 puede capturar imágenes en las bandas del rojo, verde e infrarrojo cercano (RGN), lo que facilita la obtención de índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Esta cámara tiene las siguientes características:

- Sensor CMOS de 12 megapíxeles, optimizado para capturas de alta calidad en imágenes multiespectrales.
- Captura de imágenes en una resolución de 3.4 cm por píxel a una altura de vuelo de 60 metros.
- Lentes de 8.25 mm que aseguran una cobertura amplia del área estudiada, con un campo de visión (FOV) de 48°.
- Intervalómetro para captura automática de imágenes a intervalos regulares, ideal para vuelos planificados.
- Peso ligero, lo que permite una integración eficiente con el Phantom 4 sin afectar su estabilidad ni tiempo de vuelo.

Figura 12

Instalación y configuración del sistema GNSS



En la **Figura 12** se puede observar el proceso de instalación y configuración del sistema GNSS utilizado en el levantamiento de puntos de control en campo. En la primera imagen se muestra la instalación de la antena GNSS en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass), y en la segunda la configuración del colector de datos para asegurar la captura precisa de coordenadas geográficas, fundamentales para la georreferenciación del ortomosaico NDVI.

Figura 13

Punto de control terrestre (GCP) y levantamiento con GNSS



En la **Figura 13** se puede ver en la primera fotografía, un punto de control terrestre (GCP) instalado sobre el terreno, utilizado como referencia geoespacial para mejorar la precisión del ortomosaico generado. En la segunda se realiza el levantamiento preciso del GCP mediante antena GNSS y colector de datos, asegurando la georreferenciación adecuada de las imágenes capturadas por dron.

Se realizó un levantamiento de cinco puntos de control georreferenciados utilizando una antena GNSS (Global Navigation Satellite System) Allynnav. Antes de iniciar el proceso de captura, se llevó a cabo una calibración del sistema GNSS, que incluyó la configuración y verificación del receptor y la antena para asegurar la precisión del posicionamiento.

6.3.1.2 Selección de sitios de estudio

Selección de surcos y árboles: del lote seleccionado (1,48 ha) se contaron el número de árboles en el ortomosaico y se dividió entre los cuatro tratamientos. Esto dio como resultado el número de árboles aproximados que deben estar en cada tratamiento. Se tuvo en cuenta que por logística de aplicación se deben tener mínimo tres surcos completos por tratamiento y un número de árboles similares. Esto para tener la oportunidad de escoger los árboles que cumplan los parámetros establecidos, para medir el NDVI. Posteriormente, se seleccionaron ocho árboles por tratamiento, que cumplieran las siguientes características: dosel mayor a 8M² y NDVI entre 4.5 y

6.5 para obtener una muestra homogénea que permitió la reducción del margen de ventaja de los árboles elegidos.

Figura 14

Selección sitio de estudio



En la **Figura 14** se observa el mapa del ortomosaico inicial donde se delimita el área total del lote (contorno negro) y el área seleccionada para el estudio (contorno naranja), sobre el cultivo de aguacate (*Persea americana var. Hass*) en la finca La Yolanda. La selección se basó en criterios de homogeneidad, estado sanitario y distribución espacial de los árboles.

6.3.1.3 Delimitación de las copas de los árboles seleccionados y análisis preliminar

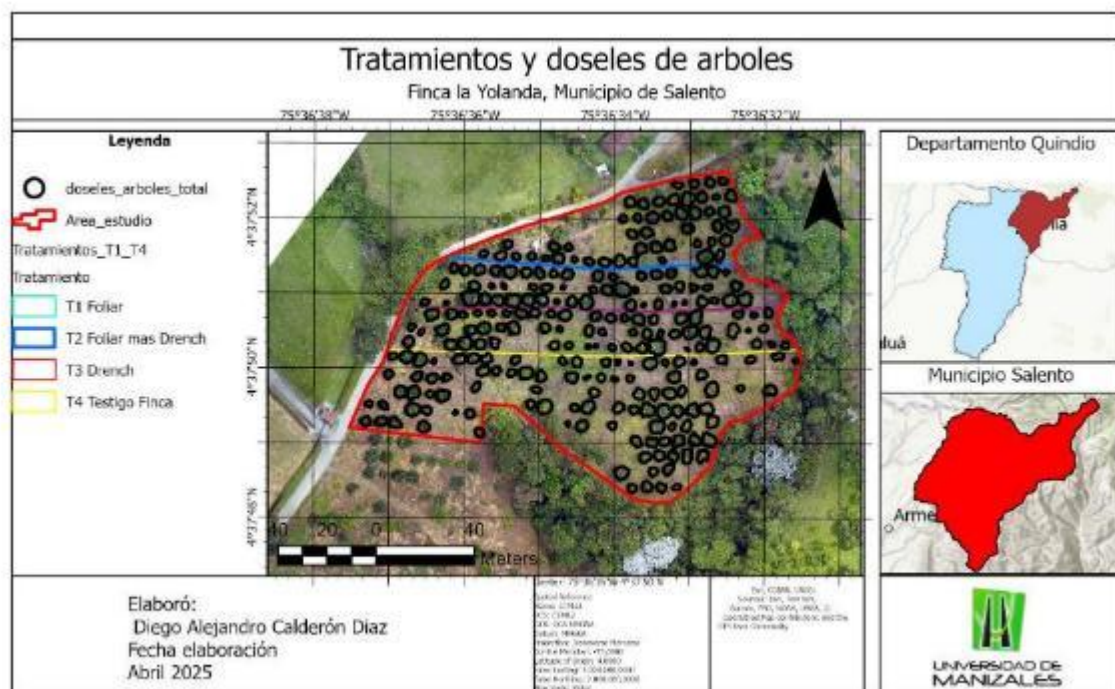
NDVI

La selección del sitio de estudio se realizó utilizando el software ArcGIS Pro, a partir de un ortomosaico con un área total de 5,1 ha, de las cuales se eligieron 1.48 ha. Los criterios de selección incluyeron la homogeneidad en el cultivo, el tamaño de los árboles, el porcentaje de muerte en el

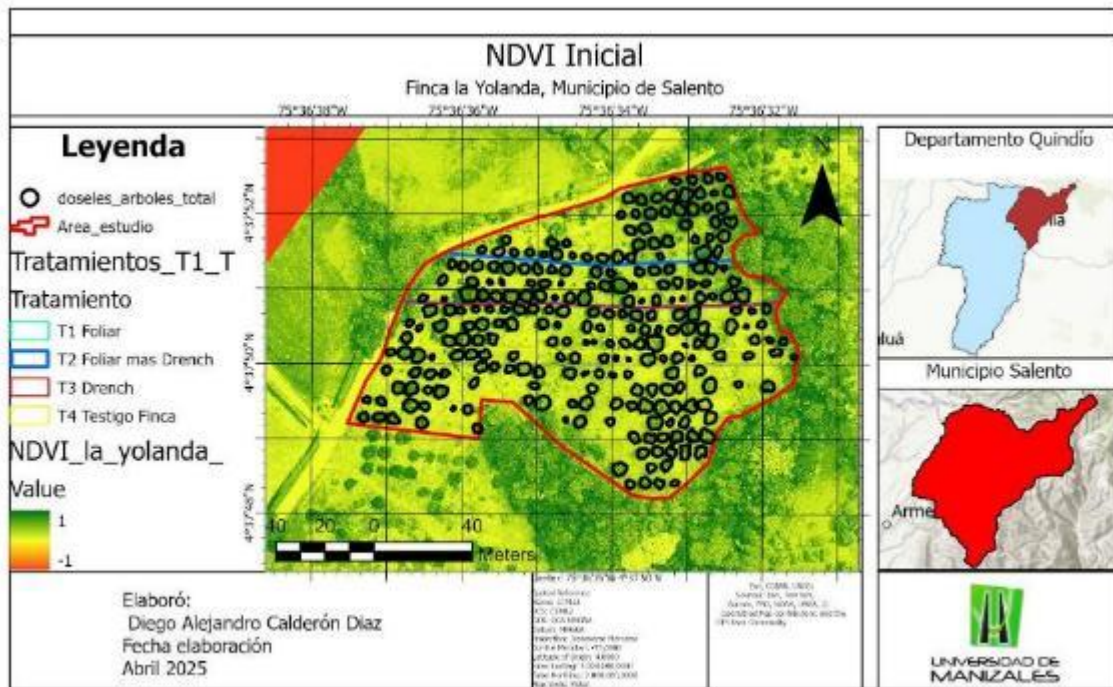
lote y la edad similar de siembra. El área seleccionada fue dividida en cuatro tratamientos: T1 (foliar), T2 (foliar más *drench*), T3 (*drench*) y T4 (testigo). Para cada tratamiento, se seleccionaron cuatro árboles con copas de tamaño similar. Esta selección se complementó mediante una imagen NDVI capturada por una cámara externa MAPIR Survey3W (RGN, NDVI) con una resolución espacial de 3.4 cm por píxel, lo que ayudó a asegurar que los árboles seleccionados tuvieran un NDVI similar, garantizando la uniformidad de las condiciones iniciales del estudio.

Figura 15

Tratamientos y delimitación de los doseles de los árboles



En la **Figura 15** se observa el mapa temático de la Finca La Yolanda, ubicada en el municipio de Salento, departamento del Quindío, donde se muestra la delimitación del área experimental (en rojo) y la distribución espacial de los tratamientos aplicados en árboles de aguacate (*Persea americana var. Hass*). Los tratamientos se identifican por colores: T1 (Foliar) en azul, T2 (Foliar + *Drench*) en cian, T3 (*Drench*) en magenta y T4 (Testigo) en amarillo. Cada círculo negro representa un dosel de árbol delimitado individualmente. El mapa se georreferenció utilizando coordenadas WGS 84 y se incluye una escala gráfica en metros para referencia espacial. A la derecha se presentan mapas de localización del departamento y del municipio.

Figura 16*Mapa de NDVI del primer vuelo*

En la **Figura 16** se encuentra el Mapa NDVI generado a partir del primer vuelo sobre la finca La Yolanda, municipio de Salento. Se representa la variabilidad del índice NDVI en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass), junto con la delimitación de copas de árboles y la distribución espacial de los tratamientos experimentales. El área de estudio está marcada en color rojo.

6.3.1.4 Extracción inicial del NDVI de los árboles

La herramienta Zonal Statistics as Table, implementada en el entorno de ArcGIS Pro, fue utilizada para calcular el valor promedio del índice NDVI por cada árbol previamente delimitado con polígonos. Esta metodología es ampliamente reconocida en investigaciones de fenotipado de alto rendimiento, donde se requiere obtener estadísticas zonales de índices espectrales por unidades experimentales definidas (Chatterjee et al., 2025). Aunque existen alternativas como *FIELDimageR* o *FIELDimagePy*, el uso de ArcGIS Pro fue priorizado por su integración directa

con ortomosaicos de alta resolución, su capacidad para gestionar grandes volúmenes de datos raster y vectoriales, y por la familiaridad con su entorno de trabajo.

De acuerdo con Chatterjee et al. (2025), los algoritmos de zonificación permiten extraer con alta precisión medidas espectrales como el NDVI a nivel de parcela, árbol o dosel, facilitando el análisis comparativo entre tratamientos o genotipos. En este estudio, se validó el uso de estadísticos zonales como la media y la mediana en imágenes de alta resolución para representar con precisión el vigor vegetal. Con el objetivo de obtener datos representativos por individuo y tratamiento, se desarrolló un procedimiento sistemático en ArcGIS Pro para extraer, organizar y consolidar los valores promedio de NDVI correspondientes a cada árbol evaluado.

6.3.1.5 Preparación de las capas de entrada

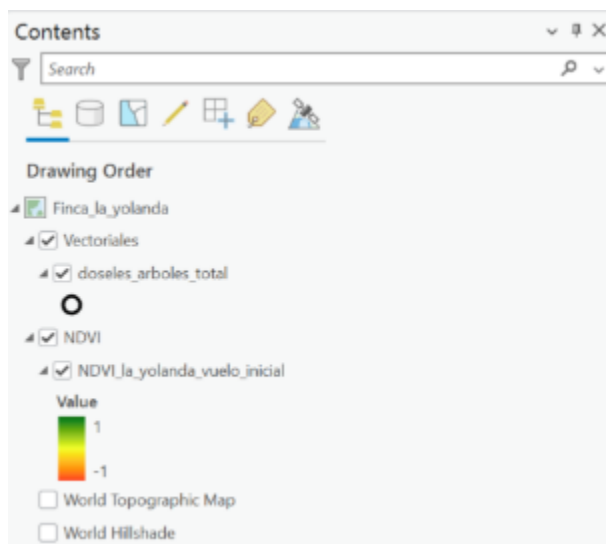
Las capas utilizadas para el análisis fueron:

- NDVI Inicial: Imagen ráster derivada del primer vuelo de dron.
- Copas de Árboles: Capa vectorial tipo polígono (Copas_Arboles) que delimita individualmente las copas de los árboles seleccionados.

Todas las capas se trabajaron en el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / CTM12, garantizando la correspondencia espacial entre fuentes ráster y vectoriales (**Figura 17**).

Figura 17

Organización de capas en el proyecto ArcGis Pro

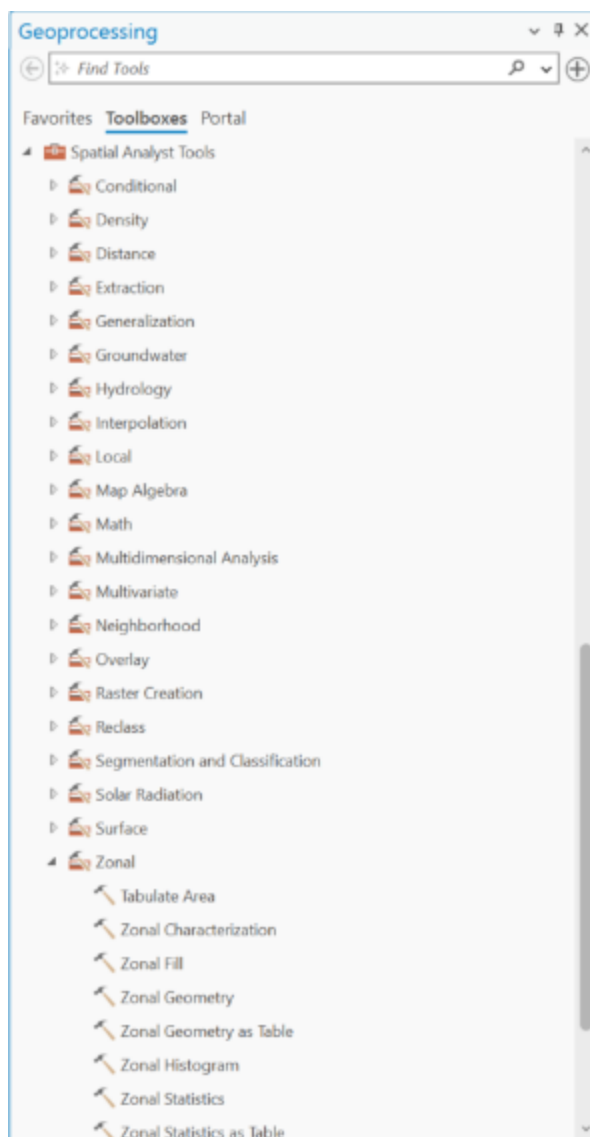


6.3.1.6 Cálculo de estadísticas zonales del NDVI

Para obtener el valor promedio de NDVI de cada copa, se utilizó la herramienta Zonal Statistics as Table ubicada en: Toolboxes > Spatial Analyst Tools > Zonal > Zonal Statistics as Table.

Figura 18

Ubicación de la herramienta Zonal Statistic as table en ArcGis Pro



En la **Figura 18** se presenta el panel de herramientas en geoprocesamiento donde se accede al módulo Spatial Analyst Tool Zonal. Desde esta ruta se seleccionó Zonal Statistics as Table, utilizada para calcular los valores promedio de NDVI por cada copa de árbol.

6.3.1.7 Configuración de la herramienta

- Input feature zone data: Copas árboles
- Zone field: código (identificador único de cada copa)
- Input value raster: NDVI_inicial
- Statistics type: Mean
- Output table: tabla NDVI_inicial_todos árboles

Figura 19

Configuración de la herramienta Zonal Statistics as Table



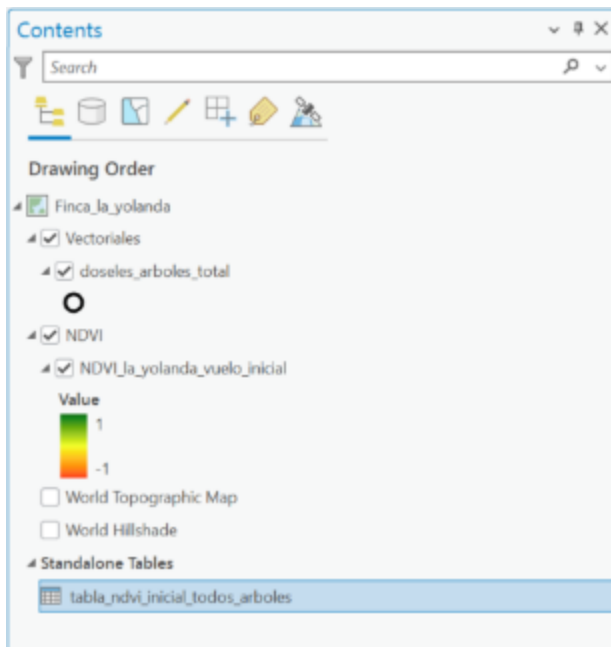
La **Figura 19** muestra la parametrización utilizada para calcular el valor promedio de NDVI por copa de árbol. Se definió: “doseses_árboles_total” como capa de zonas, el campo “Codigo” como identificador de zona y “NDVI_la_yolanda_vuelo_inicial” como raster de entrada.

El tipo de estadística seleccionada fue “Mean” y la salida se configuró como la tabla “Tabla_ndvi_Inicial_todos_arboles”.

Este proceso generó tablas de resultados que contenían el valor promedio de NDVI para cada copa.

Figura 20

Resultado de la generación de la Tabla NDVI inicial



En la **Figura 20** se observa en el panel de contenido, la incorporación de la Tabla “Zonal_NDVI_Inicial” como resultado del procesamiento de la herramienta Zonal Statistics as Table. Esta tabla contiene los valores promedios de NDVI calculados para cada copa de árbol en la capa vectorial “copas_árboles”.

Figura 21

Tabla de resultados con valores promedio de NDVI

Rowid	CODIGO	ZONE-CODE	COUNT	AREA	MEAN
1	T1P1	1	6857	8,319987	0,773139
2	T1P2	2	9325	11,314551	0,766017
3	T1P3	3	7875	9,555184	0,741397
4	T1P4	4	5923	7,186712	0,369243
5	T1P5	5	12605	15,294361	0,662929
6	T1P6	6	3188	3,868181	0,577779
7	T1P7	7	10677	12,955009	0,741723
8	T1P8	8	18065	21,919289	0,632125
9	T1P9	9	11877	14,411038	0,546029
10	T1P10	10	10369	12,581296	0,617867
11	T1P11	11	10622	12,888275	0,723558
12	T1P12	12	11232	13,628422	0,546074

La **Figura 21** presenta la tabla de atributos generada tras aplicar la herramienta Zonal Statistics as Table, donde se registran los valores promedio de NDVI (Campo Mean), que corresponden a cada copa de árbol identificado por el campo “Código”.

6.3.1.8 Creación de campos de almacenamiento en la capa de copas

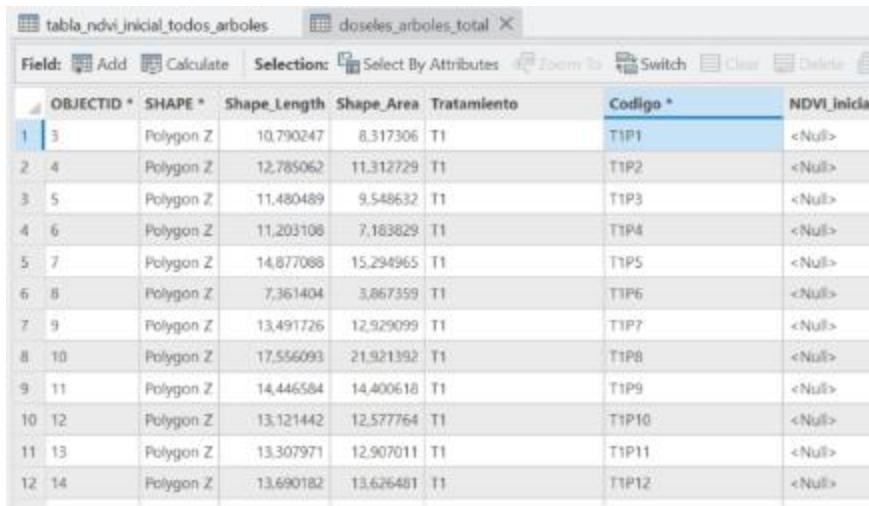
Antes de integrar los resultados, se crearon en la capa Copas_Arboles dos nuevos campos:

- NDVI_Inicial (tipo Double, precisión 15 decimales)

Esta preparación permitió almacenar los valores extraídos de manera precisa, considerando que las diferencias entre tratamientos podían ser de magnitud reducida.

Figura 22

Creación del campo para almacenar los valores del NDVI inicial

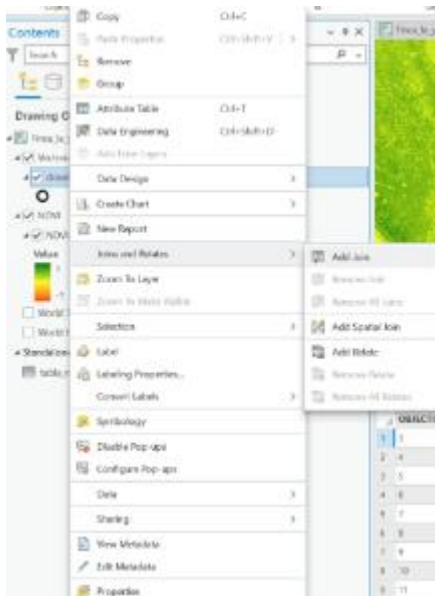


OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	Tratamiento	Código *	NDVI_inicial
1	3	10,790247	8,317306	T1	T1P1	<Null>
2	4	12,785062	11,312729	T1	T1P2	<Null>
3	5	11,480489	9,548632	T1	T1P3	<Null>
4	6	11,203108	7,183829	T1	T1P4	<Null>
5	7	14,877088	15,294965	T1	T1P5	<Null>
6	8	7,361404	3,867359	T1	T1P6	<Null>
7	9	13,491726	12,929099	T1	T1P7	<Null>
8	10	17,556093	21,921392	T1	T1P8	<Null>
9	11	14,446584	14,400618	T1	T1P9	<Null>
10	12	13,121442	12,577764	T1	T1P10	<Null>
11	13	13,307971	12,907011	T1	T1P11	<Null>
12	14	13,690182	13,626481	T1	T1P12	<Null>

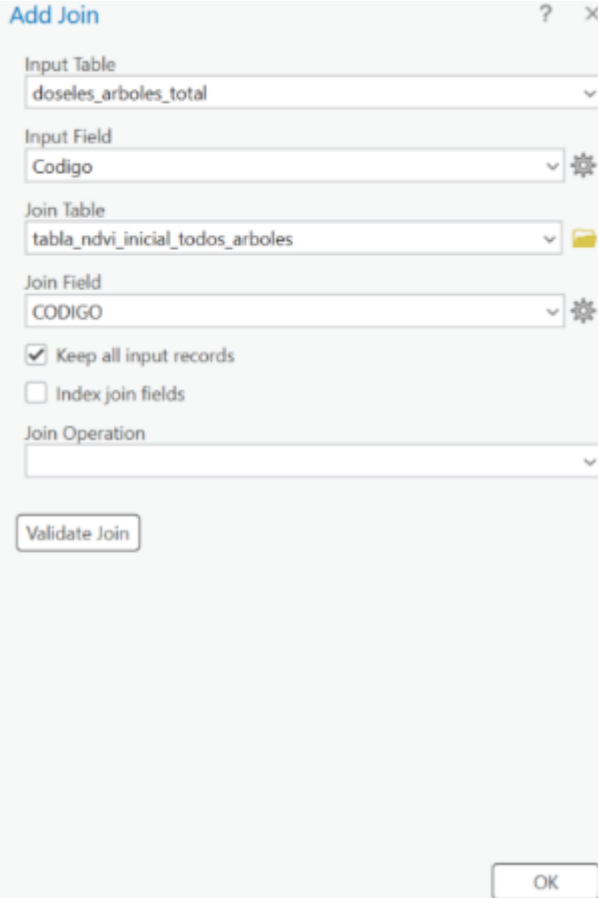
En la **Figura 22** se presenta la visualización de la tabla de atributos de la capa *doseses_arboles_total* en ArcGIS Pro, en la que se muestra el proceso de creación del campo denominado NDVI_inicial. Este campo fue añadido con el propósito de almacenar los valores promedio del índice NDVI extraídos para cada dosel digitalizado durante el primer vuelo. La tabla también incluye los campos de identificación, área del dosel, tratamiento asignado y código de cada árbol.

6.3.1.9 Integración de resultados a la capa de copas

Se realizó un Join entre la tabla Zonal_NDVI_Inicial y la capa Copas_Árboles, utilizando como campo común el Código.

Figura 23*Proceso de unión Join*

En la **Figura 23** se observa el menú contextual utilizado para acceder a la opción “Add Join” sobre la capa “copas_arboles”. Esto permitió vincular la tabla “Zonal_NDVI_Inicial” mediante el campo común “Codigo” con el fin de transferir los valores promedio de NDVI a la capa vectorial.

Figura 24*Configuración del Join*

The image shows a dialog box titled "Add Join" with the following configuration:

- Input Table:** doseles_arboles_total
- Input Field:** Codigo
- Join Table:** tabla_ndvi_inicial_todos_arboles
- Join Field:** CODIGO
- Keep all input records
- Index join fields
- Join Operation:** (empty dropdown)

Buttons: Validate Join, OK

La **Figura 24** muestra la ventana de configuración de la herramienta 'Add Join', en la que se especifica como tabla de entrada 'copas_arboles' y como tabla a unir 'total_ndvi_inicial_todos_arboles'. Ambas tablas están relacionadas mediante el campo 'Codigo', lo que permite asociar cada copa de árbol con su valor promedio de NDVI calculado previamente.

Figura 25

Resultado del Join

OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	Tratamiento	Codigo *	NDVI_inicial	tabla_nd...	tabla_ndvi_i...	tabla_ndvi_inicial...	tabla_ndvi_inic...	tabla_ndvi_in...	tabla_ndvi_inicial_todos_arboles.MEAN
1	Polygon 2	13,790247	8,317336	T1	T1P1	<Null>	1	T1P1	1	4857	8,519383	0,773339
2	Polygon 2	12,785962	11,312729	T1	T1P2	<Null>	2	T1P2	2	9325	11,314351	0,766817
3	Polygon 2	11,480489	9,548632	T1	T1P3	<Null>	3	T1P3	3	7935	9,555184	0,741397
4	Polygon 2	15,331538	7,583829	T1	T1P4	<Null>	4	T1P4	4	5923	7,188712	0,365243
5	Polygon 2	14,877088	15,294985	T1	T1P5	<Null>	5	T1P5	5	12655	15,254361	0,662329
6	Polygon 2	7,361404	3,967359	T1	T1P6	<Null>	6	T1P6	6	3198	3,868181	0,577729
7	Polygon 2	13,491726	12,529099	T1	T1P7	<Null>	7	T1P7	7	19677	12,955309	0,741723
8	Polygon 2	17,556093	21,521332	T1	T1P8	<Null>	8	T1P8	8	18065	21,913389	0,632125
9	Polygon 2	14,448584	14,408658	T1	T1P9	<Null>	9	T1P9	9	13877	14,419358	0,546829
10	Polygon 2	13,521442	12,577364	T1	T1P10	<Null>	10	T1P10	10	19369	12,585296	0,617367
11	Polygon 2	13,307921	12,907011	T1	T1P11	<Null>	11	T1P11	11	19632	12,888275	0,723558
12	Polygon 2	13,690582	13,626481	T1	T1P12	<Null>	12	T1P12	12	13232	13,628422	0,546824

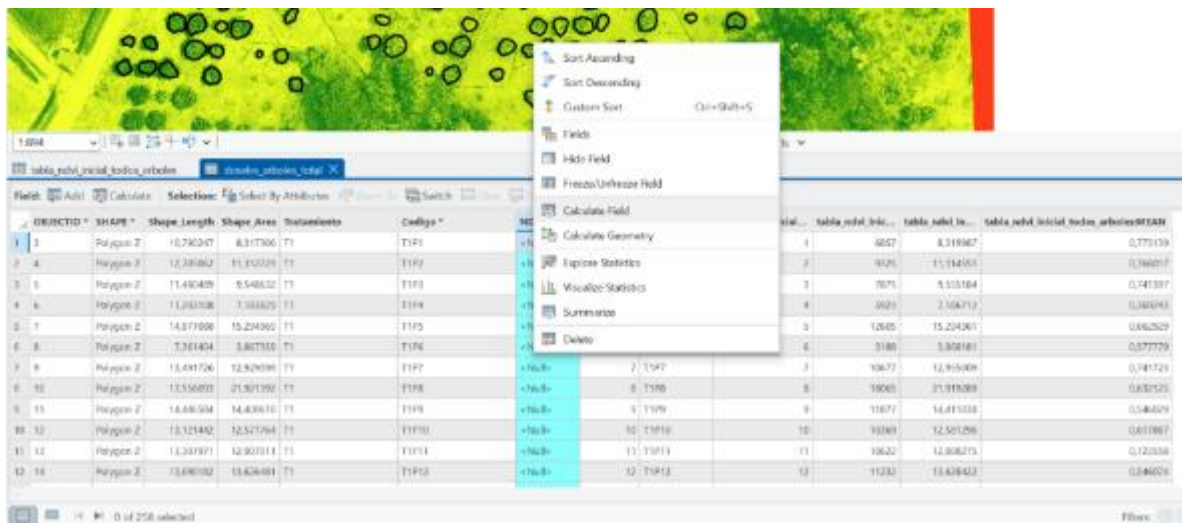
En la **Figura 25** se muestra la tabla de atributos de la capa 'copas_arboles' luego de realizar la unión con la tabla 'tabla_ndvi_inicial_todos_arboles'. En la parte derecha se visualizan los campos transferidos, incluyendo el valor promedio de NDVI ('MEAN'), el área de cada copa y el campo 'ZONE_CODE', vinculados por el campo común 'Codigo'. Esta información sería posteriormente copiada a los campos NDVI_inicial y NDVI_Final. Posteriormente, mediante la herramienta Calculate Field, se transfirió el valor del campo Mean de la tabla asociada al nuevo campo NDVI_inicial de la capa de copas.

6.3.1.10 Configuración de Calculate Field

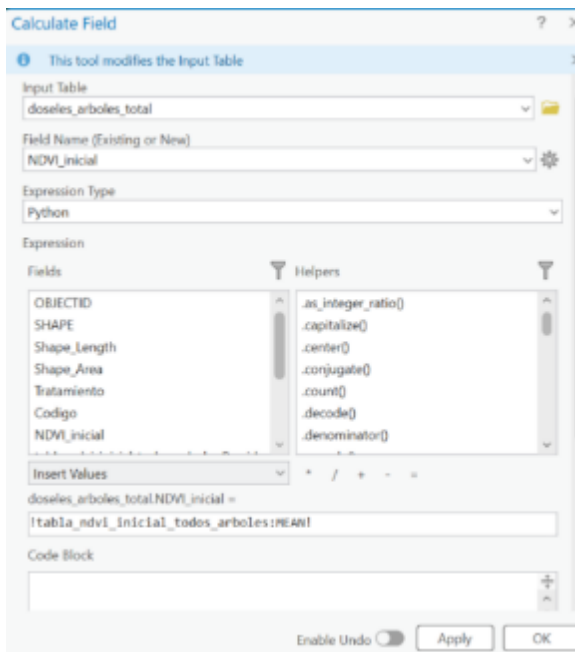
- Input Table: doseles_arboles_total
- Field Name: NDVI_inicial
- Expression: tabla_ndvi_inicial_arboles.MEAN

Figura 26

Aplicación de la herramienta Calculate Field



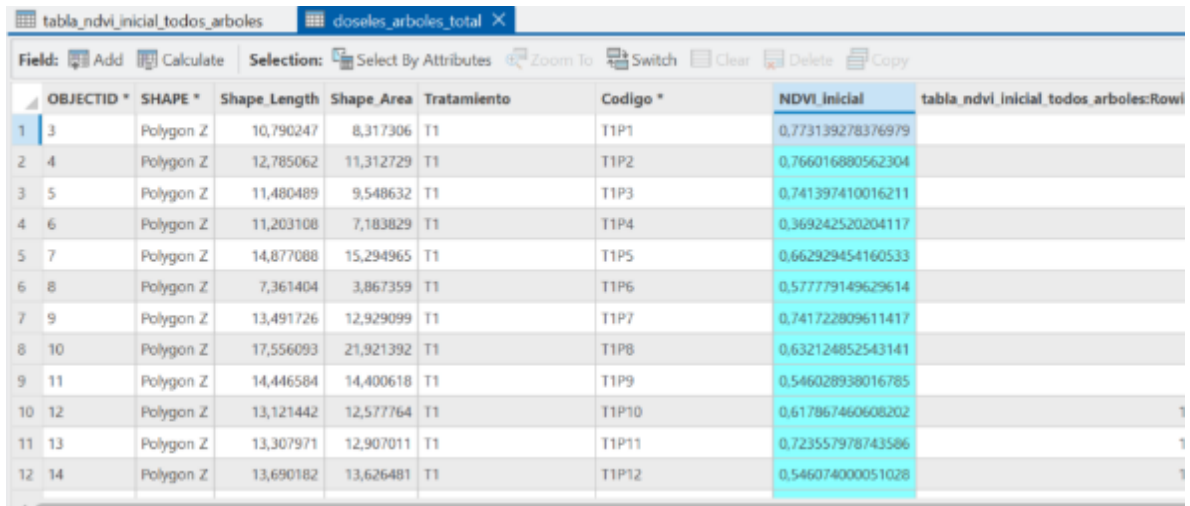
En la **Figura 26** se presenta la selección del campo 'NDVI_Inicial' en la tabla de atributos de la capa 'doses_arboles_total', previa a la ejecución de la herramienta 'Calculate Field'. Esta herramienta permite copiar los valores del campo 'MEAN', obtenido de la tabla 'tabla_ndvi_Inicial_total_arboles', al campo definido NDVI_Inicial.

Figura 27*Configuración de la herramienta Calculate Field*

La **Figura 27** muestra la ventana de configuración de la herramienta 'Calculate Field' en ArcGIS Pro. Se seleccionó el campo 'doseses_arboles_total' como destino, y se utilizó la expresión '!NDVI_inicial.MEAN!' para transferir los valores promedio de NDVI desde la tabla unida. Esta operación permitió incorporar los datos de NDVI inicial directamente en la tabla de atributos de la capa 'copas_arboles'.

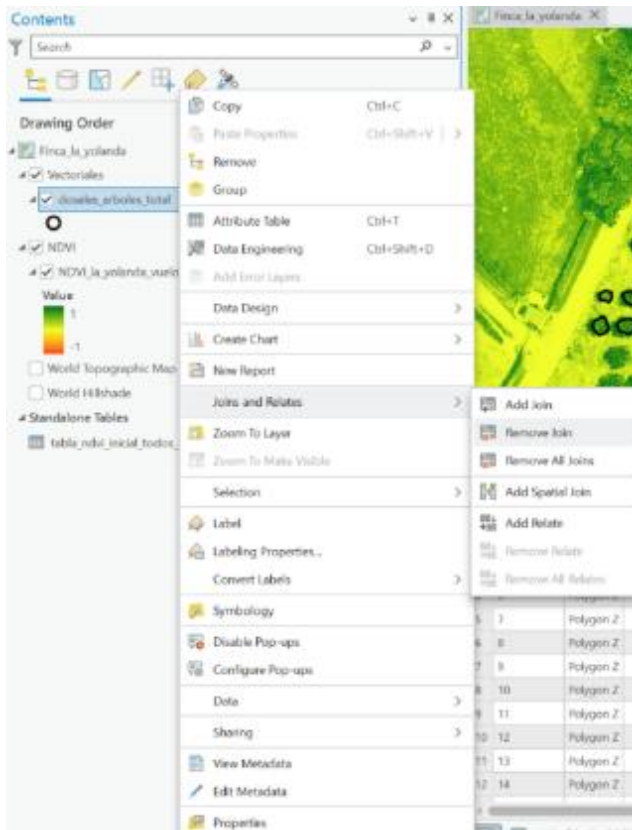
6.3.1.11 Consolidación de valores NDVI inicial

Se presenta la tabla de atributos de la capa 'doseses_arboles_total' después de realizar el procedimiento completo para el vuelo inicial. Se observa la incorporación de los valores de NDVI promedio para cada copa de árbol, correspondientes a las fechas inicial. Esta consolidación permitió disponer de una base de datos estructurada para los análisis comparativos y estadísticos posteriores.

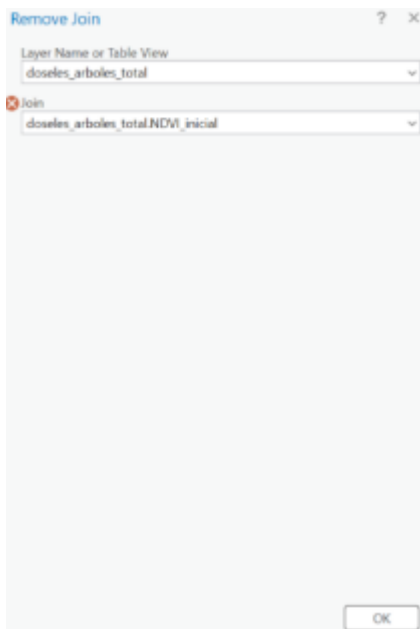
Figura 28*Campo NDVI inicial*

OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	Tratamiento	Codigo *	NDVI_inicial
1	3	10,790247	8,317306	T1	T1P1	0,773139278376979
2	4	12,785062	11,312729	T1	T1P2	0,766016880562304
3	5	11,480489	9,548632	T1	T1P3	0,741397410016211
4	6	11,203108	7,183829	T1	T1P4	0,369242520204117
5	7	14,877088	15,294965	T1	T1P5	0,662929454160533
6	8	7,361404	3,867359	T1	T1P6	0,577779149629614
7	9	13,491726	12,929099	T1	T1P7	0,741722809611417
8	10	17,556093	21,921392	T1	T1P8	0,632124852543141
9	11	14,446584	14,400618	T1	T1P9	0,546028938016785
10	12	13,121442	12,577764	T1	T1P10	0,617867460608202
11	13	13,307971	12,907011	T1	T1P11	0,723557978743586
12	14	13,690182	13,626481	T1	T1P12	0,546074000051028

La **Figura 28** muestra el campo 'NDVI_inicial' ya completado con los valores promedio obtenidos del campo 'MEAN' de la tabla 'Zonal_NDVI_Inicial'. Esta integración permitió consolidar la información espectral directamente sobre cada polígono de copa de árbol, facilitando su análisis posterior. Una vez copiados los datos, se utilizó la herramienta Remove Join para limpiar la relación y dejar únicamente los datos necesarios en la capa Copas_Arboles.

Figura 29*Eliminación del Join*

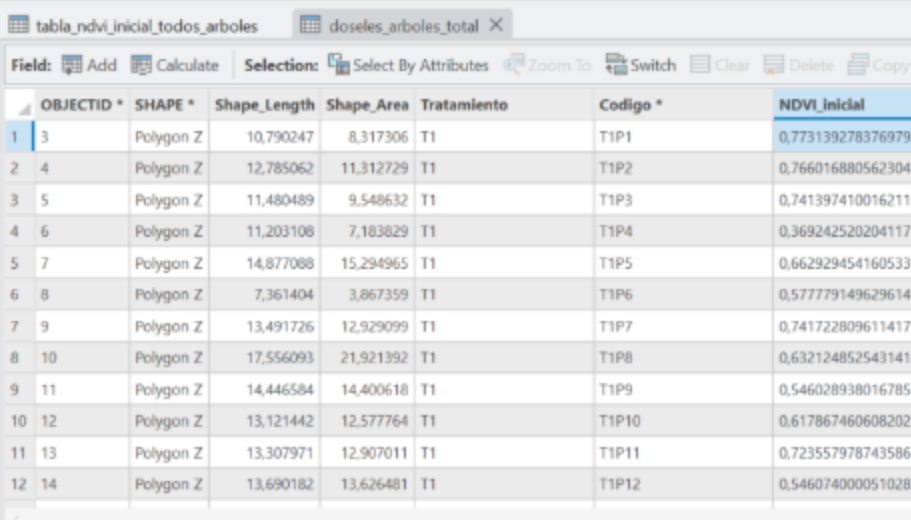
En la **Figura 29** se muestra el acceso a la opción 'Remove Join' en el menú contextual de la capa 'copas_arboles' en ArcGIS Pro. Esta operación se realizó para eliminar la unión previa entre la capa vectorial y la tabla 'Zonal_NDVI_Inicial', y luego la 'Zonal_NDVI_Final', dejando la tabla de atributos limpia y conservando únicamente los campos de interés (NDVI_inicial y NDVI_final).

Figura 30*Configuración de la herramienta Remove Join*

La **Figura 30** muestra la ventana de configuración de la herramienta 'Remove Join' en ArcGIS Pro. Se seleccionó eliminar la unión con la tabla 'doseses_arboles_NDVI_inicial', con el objetivo de dejar la tabla de atributos de la capa 'doseses_arboles_total' limpia, conservando únicamente los campos definitivos 'NDVI_inicial' para su posterior exportación.

Figura 31

Tabla de atributos final consolidada para el análisis de NDVI



OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	Tratamiento	Codigo *	NDVI_inicial	
1	3	Polygon Z	10,790247	8,317306	T1	T1P1	0,773139278376979
2	4	Polygon Z	12,785062	11,312729	T1	T1P2	0,766016880562304
3	5	Polygon Z	11,480489	9,548632	T1	T1P3	0,741397410016211
4	6	Polygon Z	11,203108	7,183829	T1	T1P4	0,369242520204117
5	7	Polygon Z	14,877088	15,294965	T1	T1P5	0,662929454160533
6	8	Polygon Z	7,361404	3,867359	T1	T1P6	0,577779149629614
7	9	Polygon Z	13,491726	12,929099	T1	T1P7	0,741722809611417
8	10	Polygon Z	17,556093	21,921392	T1	T1P8	0,632124852543141
9	11	Polygon Z	14,446584	14,400618	T1	T1P9	0,546028938016785
10	12	Polygon Z	13,121442	12,577764	T1	T1P10	0,617867460608202
11	13	Polygon Z	13,307971	12,907011	T1	T1P11	0,723557978743586
12	14	Polygon Z	13,690182	13,626481	T1	T1P12	0,546074000051028

En la **Figura 31** se presenta la tabla de atributos de la capa 'doses_arboles_total' completamente limpia, con los campos 'NDVI_inicial'. Esta estructura final permitió la exportación de los datos en formato Excel para su posterior análisis estadístico, garantizando la precisión y organización necesaria para el estudio.

6.3.1.12 Exportación de la tabla consolidada

Con ambos valores de NDVI (Inicial y Final) incorporados en la capa Copas_Arboles, se exportó la tabla de atributos a un archivo Excel mediante:

Toolboxes > Conversion Tools > Excel > Table to Excel

Configuración:

- Input Table: Copas_Arboles
- Output Location: Carpeta de destino definida.
- Output Format: .xlsx

Figura 32

Archivo Excel generado con los datos inicial y final por árbol

	A	B	C	D	E	F
1	OBJECTID	Shape_Length	Shape_Area	Codigo	Tratamiento	NDVI_inicial
2	3	10,79024739	8,317306318	T1P1	T1	0,7731392784
3	4	12,78506192	11,31272868	T1P2	T1	0,7660168806
4	5	11,48048884	9,548632101	T1P3	T1	0,7413974100
5	6	11,20310753	7,183828751	T1P4	T1	0,3692425202
6	7	14,87708809	15,2949655	T1P5	T1	0,6629294542
7	8	7,361403607	3,867358587	T1P6	T1	0,5777791496
8	9	13,4917261	12,92909904	T1P7	T1	0,7417228096
9	10	17,5560926	21,92139194	T1P8	T1	0,6321248525
10	11	14,44658393	14,40061842	T1P9	T1	0,5460289380
11	12	13,12144165	12,57776364	T1P10	T1	0,6178674606
12	13	13,30797056	12,90701057	T1P11	T1	0,7235579787
13	14	13,69018182	13,62648104	T1P12	T1	0,5460740001
14	15	14,91550988	16,29384545	T1P13	T1	0,7167417876
15	16	11,20495902	9,280850171	T1P13	T1	0,7167417876
16	17	15,69788561	17,35531904	T1P15	T1	0,7086226892
17	18	15,99460096	18,37376815	T1P16	T1	0,7223259138
18	19	12,30950008	10,9404933	T1P17	T1	0,6469947707
19	20	15,51080687	17,85021382	T1P18	T1	0,7020725420
20	21	10,25835345	7,546868205	T1P19	T1	0,4920939721
21	22	9,908859629	7,298767611	T1P20	T1	0,6195585547
22	23	16,55801572	15,91137108	T1P21	T1	0,6869969158

En la **Figura 32** se presenta el archivo Excel 'NDVIinicial_doseles_arboles_total.xlsx', exportado desde ArcGIS Pro. El archivo contiene la información consolidada de cada copa de árbol, incluyendo valores de NDVI inicial, NDVI final, área de copa y tratamiento asignado. Este archivo constituyó la base de datos para los análisis estadísticos posteriores realizados en InfoStat.

6.3.2 Fase 2: aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum*

6.3.2.1 Aplicación de tratamientos

Aplicación del bioestimulante: se procedió a aplicar el extracto de *Ascophyllum nodosum* en las áreas previamente seleccionadas y delimitadas. Se tuvo un tratamiento aplicado foliar a razón de 1,5 litros por ha del producto Alga-Plex, un tratamiento aplicado en *drench* a razón de 2 litros por ha del producto Stella Maris, y un tratamiento aplicado foliar y *drench* a razón de 1.5 litros por

ha de Alga-Plex foliar y 2 litros por ha del producto Stella Maris en *drench*. El último tratamiento fue un testigo con lo que realiza el agricultor.

Figura 33

Bioestimulantes a base de Ascophyllum nodosum



En la **Figura 33** se presentan los productos experimentales aplicados en el ensayo: Alga-Plex® (vía foliar) y Stella Maris® (vía *drench*), ambos formulados a partir del alga *Ascophyllum nodosum*. Estos bioestimulantes fueron utilizados para evaluar su efecto sobre el cultivo de aguacate (*Persea americana var. Hass*).

Figura 34*Aplicación vía drench*

En la **Figura 34** se puede observar la aplicación del bioestimulante Stella Maris mediante *drench*, realizada manualmente con bomba de espalda en el cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass), como parte del protocolo experimental.

La aplicación del bioestimulante se realizó vía *drench*, utilizando una mezcla de tres litros por árbol. El producto empleado fue Stella Maris®, con una dosis de dos litros por ha. El bioestimulante fue aplicado directamente al suelo alrededor de la base de cada árbol, asegurando que el producto fuera absorbido por las raíces. Se utilizó un sistema de aplicación calibrado para distribuir de manera uniforme la mezcla en la zona radicular, favoreciendo una absorción óptima del bioestimulante y garantizando que la dosis aplicada fuera precisa en cada árbol.

Figura 35*Aplicación vía foliar*

En la **Figura 35** se puede ver la aplicación manual del bioestimulante Alga-Plex mediante aspersión foliar con bomba de espalda, dirigida a realizar el cubrimiento total del área foliar del árbol de aguacate (*Persea americana* var. Hass), como parte del tratamiento experimental en campo.

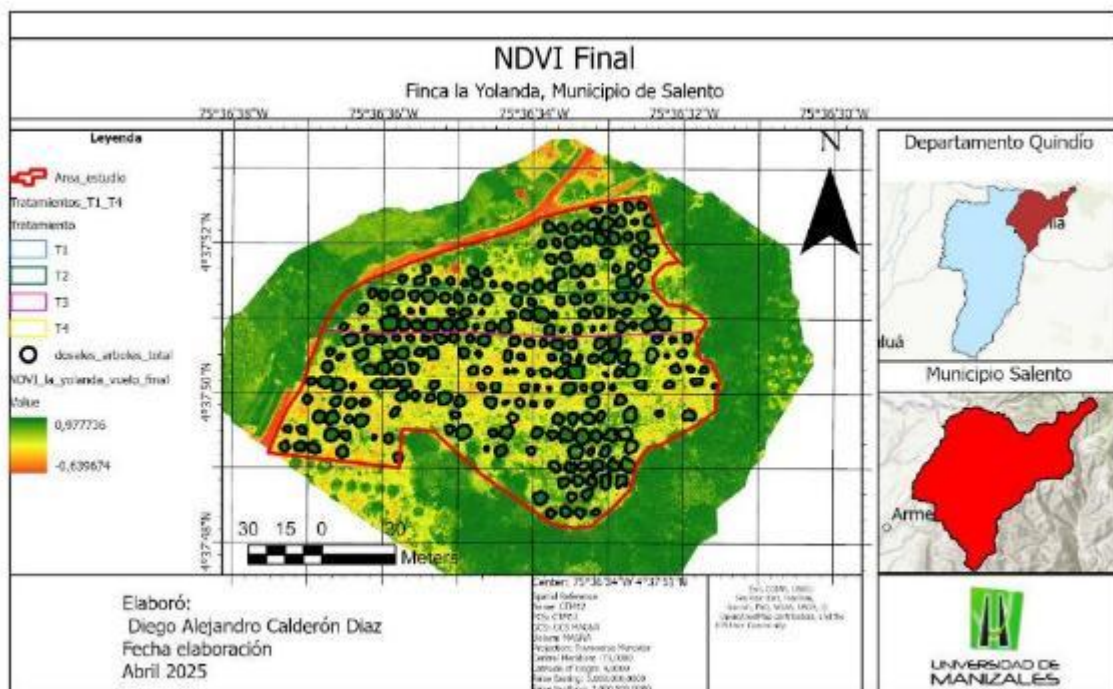
La aplicación del bioestimulante vía foliar se realizó utilizando el producto Alga-Plex a una dosis de 1.5 litros por ha y una mezcla de dos litros por árbol. El bioestimulante fue pulverizado uniformemente sobre el follaje de los árboles seleccionados, asegurando una cobertura completa de las hojas para maximizar la absorción del producto. Se utilizó un equipo de pulverización calibrado para garantizar una distribución homogénea de la mezcla, promoviendo una absorción eficiente de los nutrientes a través de las hojas.

6.3.2.2 Seguimiento: obtención de segunda imagen NDVI

Segundo vuelo con dron: a los sesenta días de haber aplicado el extracto de *Ascophyllum nodosum* se llevó a cabo el segundo vuelo sobre el área de estudio utilizando un dron equipado con una cámara multiespectral, realizando el mismo plan de vuelo ejecutado en el vuelo número uno. Este vuelo tuvo como objetivo capturar las imágenes NDVI necesarias para actualizar el análisis NDVI y observar los efectos del tratamiento sobre la vegetación. Una vez obtenidas las imágenes se procesaron mediante el software ArgisPro, lo cual permitió la obtención de la imagen NDVI del área de estudio.

Figura 36

Mapa NDVI del segundo vuelo



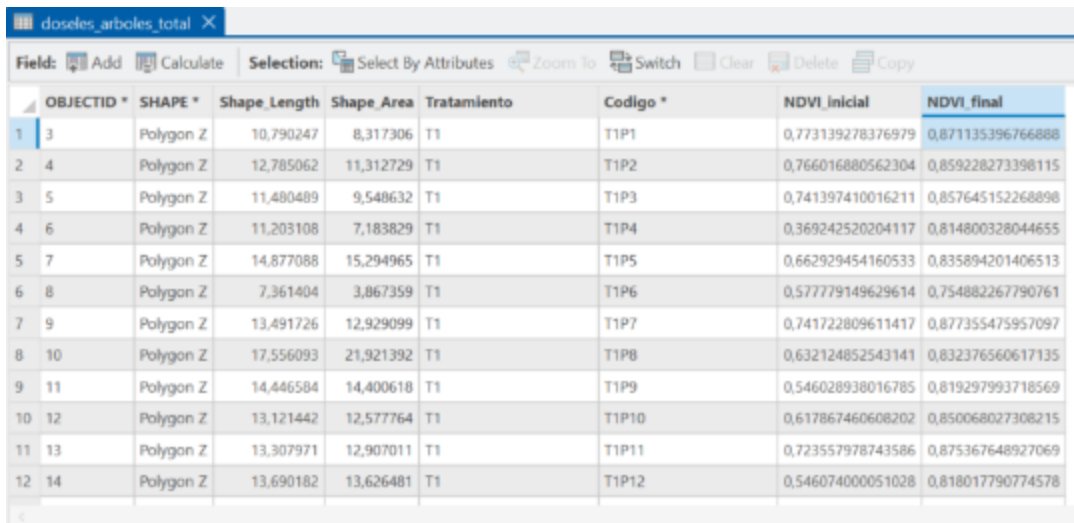
En la **Figura 36** se puede ver el mapa NDVI generado a partir del segundo vuelo sobre la finca La Yolanda, en Salento. Se observa la distribución espacial del índice NDVI dentro del área de estudio (en rojo), junto con la delimitación de copas y los tratamientos aplicados (T1 a T4).

Para la imagen correspondiente al segundo vuelo, se repitió el mismo procedimiento utilizado en el análisis del primer vuelo. Se realizó la extracción del valor medio del NDVI por

cada árbol previamente delimitado, utilizando la herramienta Zonal Statistics as Table en ArcGIS Pro. Los valores obtenidos se vincularon nuevamente a la capa de doseles mediante una relación por el campo "Código", y posteriormente fueron almacenados en un nuevo campo denominado NDVI_final, conservando la misma estructura y precisión de los datos utilizados en el análisis inicial y posteriormente exportado a Excel para su utilización en la herramienta estadística.

Figura 37

Registro de valores NDVI inicial y final



OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	Tratamiento	Código *	NDVI_inicial	NDVI_final	
1	3	Polygon Z	10,790247	8,317306	T1	T1P1	0,773139278376979	0,871135396766888
2	4	Polygon Z	12,785062	11,312729	T1	T1P2	0,766016880562304	0,859228273398115
3	5	Polygon Z	11,480489	9,548632	T1	T1P3	0,741397410016211	0,857645152268898
4	6	Polygon Z	11,203108	7,183829	T1	T1P4	0,369242520204117	0,814800328044655
5	7	Polygon Z	14,877088	15,294965	T1	T1P5	0,662929454160533	0,835894201406513
6	8	Polygon Z	7,361404	3,867359	T1	T1P6	0,577779149629614	0,754882267790761
7	9	Polygon Z	13,491726	12,929099	T1	T1P7	0,741722809611417	0,877355475957097
8	10	Polygon Z	17,556093	21,921392	T1	T1P8	0,632124852543141	0,832376560617135
9	11	Polygon Z	14,446584	14,400618	T1	T1P9	0,546028938016785	0,819297993718569
10	12	Polygon Z	13,121442	12,577764	T1	T1P10	0,617867460608202	0,850068027308215
11	13	Polygon Z	13,307971	12,907011	T1	T1P11	0,723557978743586	0,875367648927069
12	14	Polygon Z	13,690182	13,626481	T1	T1P12	0,546074000051028	0,818017790774578

En la **Figura 37** se observa la tabla de atributos de la capa *doseles_arboles_total* en ArcGIS Pro, donde se visualizan los campos NDVI_inicial y NDVI_final asignados a cada dosel digitalizado. Estos valores corresponden a los promedios extraídos de las imágenes multiespectrales capturadas antes y después de la aplicación del bioestimulante. La tabla también incluye la información del tratamiento aplicado, el código del árbol, el área del dosel y su geometría, permitiendo así el seguimiento del comportamiento espectral individual por árbol a lo largo del experimento.

6.3.3 Fase 3: análisis estadístico de los datos del NDVI después del tratamiento

6.3.3.1 Evaluación de la respuesta vegetativa

Para el análisis estadístico, se inició con una base de datos compuesta por todos los árboles incluidos en los tratamientos del ensayo. Dado que el objetivo del estudio fue evaluar el efecto del extracto de *Ascophyllum nodosum* sobre árboles completamente desarrollados, se estableció como criterio de inclusión que el área de copa (dosel) de cada árbol fuera superior a 8 m². Esta condición aseguró que únicamente se analizaran individuos adultos con cobertura suficiente, minimizando la influencia de árboles jóvenes o poco desarrollados sobre los resultados. Este criterio está respaldado por estudios como el de Tenreiro et al. (2021), quienes demostraron que la correlación entre el índice NDVI y la cobertura del dosel (*canopy cover*) es más estable y precisa en plantas con estructuras completamente desarrolladas.

Figura 38

Filtro por área aplicado a la tabla NDVI inicial en Excel

Codigo	Tratamiento	Area dosel	NDVI inicial
6			0,6629294542
7			0,5777791496
8			0,7417228096
9			0,6321248525
10			0,5460289380
11			0,6178674606
12			0,7235579787
13			0,5460740001
14			0,7167417876
15			0,7167417876
16			0,7086226892
17			0,7223259138
18			0,6469947707
19			0,7020725420
20			0,4920939721
21			0,6195585547
22			0,6869969158
23			0,6788482753
24			0,7828868384
25			0,7032394751
26			0,5863780040
27			0,6804161826
28			0,4594569468
29			0,5194469475
30			0,7768065594
31			0,7135438430
32			0,6913694002
33	T1P32	T1	0,6587532529
34	T1P33	T1	0,6227625269
35	T1P34	T1	0,5829035998

La **Figura 38** muestra una vista parcial de una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se está aplicando un filtro sobre la columna "Shape_Area", que representa el área del dosel (copa) de los árboles. En el panel desplegable se observa que se están seleccionando únicamente aquellos árboles cuya área de copa es mayor a 8 m², lo cual responde al criterio de inclusión establecido para el análisis estadístico. Esta acción forma parte del proceso metodológico de depuración de datos, donde se busca trabajar exclusivamente con árboles adultos completamente desarrollados.

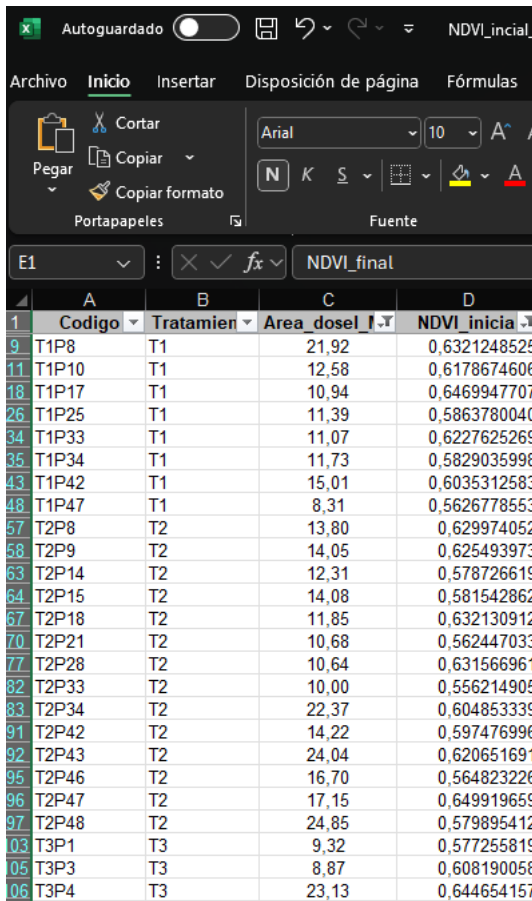
Según Tenreiro et al. (2021):

El índice NDVI presenta una fuerte correlación con la cobertura del dosel (CC), especialmente en estadios fenológicos donde la planta ha alcanzado un desarrollo estructural amplio. Por ello, para minimizar errores derivados de coberturas parciales o incompletas, se estableció como criterio de inclusión la selección de árboles con copas mayores a 8 m², lo cual garantiza una representación fisiológica completa del árbol y mayor precisión en la medición del índice espectral.

La selección de los árboles incluyó únicamente aquellos con valores de NDVI entre 0.55 y 0.65, con el objetivo de homogenizar el grupo experimental y reducir la variabilidad asociada a diferencias fisiológicas y fenológicas. Esta decisión se basa en la caracterización espectral realizada por Torres-Madronero et al. (2023), quienes demostraron que el NDVI puede variar significativamente dentro del mismo árbol según el estado de madurez de las hojas, siendo valores de 0.45 para hojas jóvenes y 0.76 para hojas maduras. Así, la selección de este rango medio, permitió incluir árboles con doseles desarrollados y características intermedias, evitando extremos de estrés o inmadurez.

Figura 39

Base de datos consolidada de NDVI y área de dosel por árbol



	A	B	C	D
1	Codigo	Tratamiento	Area dosel (m²)	NDVI inicial
9	T1P8	T1	21,92	0,6321248525
11	T1P10	T1	12,58	0,6178674606
18	T1P17	T1	10,94	0,6469947707
26	T1P25	T1	11,39	0,5863780040
34	T1P33	T1	11,07	0,6227625269
35	T1P34	T1	11,73	0,5829035998
43	T1P42	T1	15,01	0,6035312583
48	T1P47	T1	8,31	0,5626778553
57	T2P8	T2	13,80	0,629974052
58	T2P9	T2	14,05	0,625493973
63	T2P14	T2	12,31	0,578726619
64	T2P15	T2	14,08	0,581542862
67	T2P18	T2	11,85	0,632130912
70	T2P21	T2	10,68	0,562447033
77	T2P28	T2	10,64	0,631566961
82	T2P33	T2	10,00	0,556214905
83	T2P34	T2	22,37	0,604853339
91	T2P42	T2	14,22	0,597476996
92	T2P43	T2	24,04	0,620651691
95	T2P46	T2	16,70	0,564823226
96	T2P47	T2	17,15	0,649919659
97	T2P48	T2	24,85	0,579895412
103	T3P1	T3	9,32	0,577255819
105	T3P3	T3	8,87	0,608190058
106	T3P4	T3	23,13	0,644654157

En la **Figura 39** se observa la hoja de cálculo en Microsoft Excel que muestra los datos organizados por árbol evaluado, con su código identificador, tratamiento asignado, área del dosel en metros cuadrados y los valores de NDVI obtenidos antes (NDVI_inicial) de la aplicación del bioestimulante. Esta tabla permitió estructurar el análisis estadístico y realizar comparaciones por tratamiento a partir de mediciones espectrales individuales.

6.3.3.2 Análisis estadístico de los datos

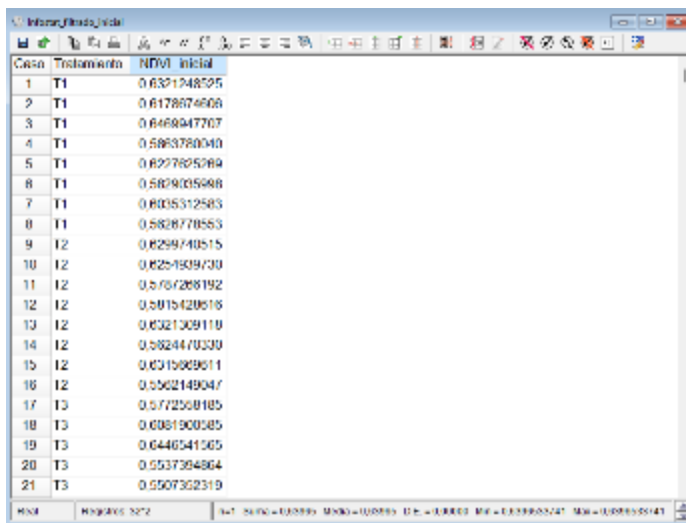
Aplicación de ANOVA: se empleó el análisis de varianza (ANOVA) para determinar si las diferencias observadas en los valores NDVI entre los grupos tratados y el control son estadísticamente significativas. Este análisis ayudó a validar la eficacia del extracto de *Ascophyllum nodosum* como bioestimulante. Se utilizó el software Infostat, se trata de un paquete

estadístico común en la investigación científica y en el ámbito académico, especialmente en áreas como la agronomía y las ciencias biológicas, desarrollado en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Este software proporcionó herramientas para el análisis de datos tanto descriptivo, como inferencial, incluyendo análisis de varianza, regresión, y métodos multivariados, con una interfaz amigable que facilitó su posterior al procesamiento de los datos, se generó una gráfica que muestra la variación de los valores de NDVI final entre los diferentes tratamientos, junto con las letras que indican las agrupaciones significativas. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos uso (Di Rienzo et al., 2002).

Figura 40

Carga de datos iniciales



Caso	Tratamiento	NDVI inicial
1	T1	0.632124825
2	T1	0.6178674606
3	T1	0.6468047707
4	T1	0.5863780040
5	T1	0.6227625289
6	T1	0.5878005688
7	T1	0.6035312583
8	T1	0.5828770553
9	T2	0.6299740515
10	T2	0.6254539730
11	T2	0.5707288192
12	T2	0.5015420616
13	T2	0.6321309110
14	T2	0.5824470330
15	T2	0.6315989011
16	T2	0.5562149047
17	T3	0.572258185
18	T3	0.6081900385
19	T3	0.6446541365
20	T3	0.5537384864
21	T3	0.5507352319

La **Figura 40** muestra una tabla de datos cargada en el software InfoStat, correspondiente al análisis del índice de vegetación NDVI inicial. Esta tabla presenta tres columnas:

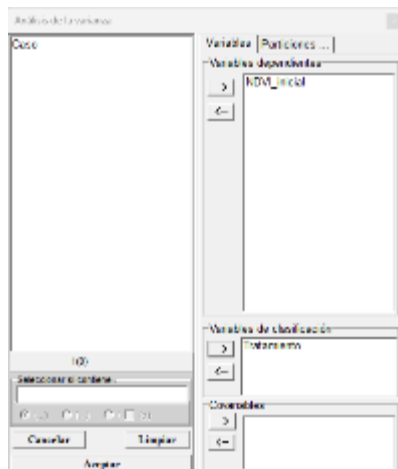
- Caso: identificador numérico consecutivo de cada registro.
- Tratamiento: identificador del tratamiento aplicado (T1, T2, T3).
- NDVI inicial: valores numéricos del índice NDVI inicial por cada unidad experimental (probablemente árboles).

En la parte inferior se observa un resumen estadístico automático que proporciona:

- Suma total de los valores NDVI inicial: 0,63965
- Media: 0,63965
- Desviación estándar: 0,00000 (esto sugiere que posiblemente todos los valores visibles en pantalla en ese momento eran iguales, pero parece un error de refresco temporal del programa).
- Mínimo y máximo: ambos 0,639653741

Figura 41

Configuración de análisis de varianza (ANAVA) en InfoStat



Para determinar si existían diferencias significativas entre tratamientos en los valores de NDVI inicial, se utilizó el procedimiento de análisis de varianza (ANAVA) en el software InfoStat.

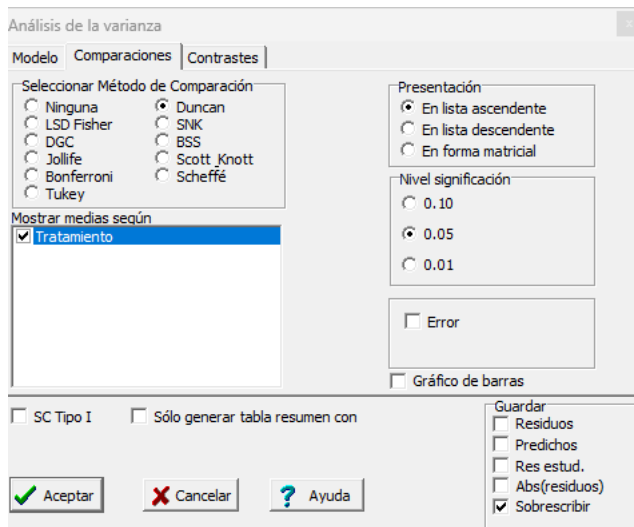
En la ventana de configuración (**Figura 41**), se establecieron las siguientes asignaciones:

- Variable dependiente: NDVI_inicial, correspondiente al valor del índice NDVI antes de la aplicación de tratamientos.
- Variable de clasificación: Tratamiento, que representa los grupos experimentales comparados (T1, T2, T3, etc.).
- Covariables: no se asignaron en este caso, ya que el análisis correspondía a la evaluación inicial de homogeneidad antes del tratamiento.

Esta configuración permitió verificar la uniformidad inicial de los tratamientos en cuanto al vigor de la vegetación medido por el NDVI, con el objetivo de validar que no existieran diferencias previas al inicio del ensayo.

Figura 42

Configuración del análisis de comparación de medias en InfoStat

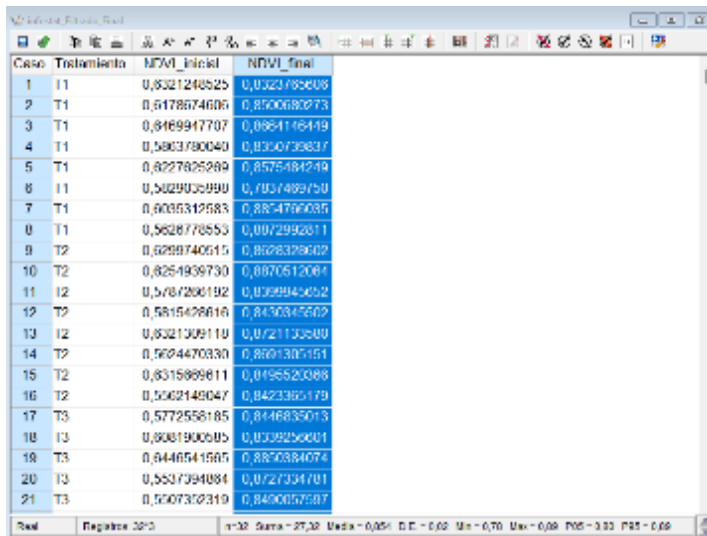


Dentro del análisis de varianza en InfoStat, se seleccionó la prueba de comparación de medias Duncan con un nivel de significancia de 0,05 (**Figura 42**), lo que permite identificar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Las medias se agruparon según la variable Tratamiento, presentadas en lista ascendente, lo cual facilita la interpretación jerárquica de los resultados. Además, se activó la opción de generar gráfico de barras para visualizar los promedios acompañados de las letras que representan la significancia estadística.

Una vez verificada la homogeneidad de los datos en el NDVI inicial entre tratamientos (vuelo 1), se procedió con el análisis estadístico del NDVI correspondiente al segundo vuelo, incorporando el NDVI inicial como covariable. Esto con el fin de ajustar las posibles diferencias iniciales y evaluar el efecto real de los tratamientos sobre el NDVI final.

Figura 43

Base de datos con valores NDVI inicial y final por tratamiento

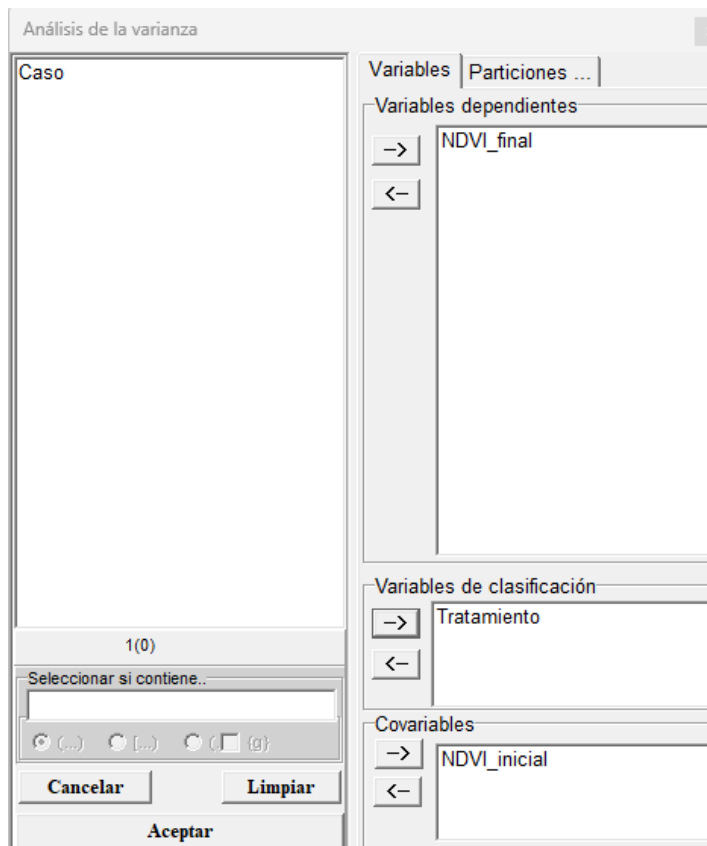


Caso	Tratamiento	NDVI_inicial	NDVI_final
1	T1	0,8321240525	0,0323789508
2	T1	0,5178674606	0,8700680273
3	T1	0,8469947707	0,0924168419
4	T1	0,5863780040	0,0300739837
5	T1	0,6227625269	0,8575484249
6	T1	0,5029035990	0,7057489750
7	T1	0,6005312983	0,884766035
8	T1	0,5628778553	0,0972992311
9	T2	0,6289740515	0,8228329602
10	T2	0,6254939730	0,8070512064
11	T2	0,5787286192	0,0399945632
12	T2	0,5815428616	0,8430345502
13	T2	0,6321309119	0,0721132640
14	T2	0,5694470330	0,8661305151
15	T2	0,6315889811	0,0495520388
16	T2	0,5062148047	0,8423365179
17	T3	0,5772558185	0,8446835013
18	T3	0,6001900605	0,0339250601
19	T3	0,6446541565	0,8873834074
20	T3	0,5537394094	0,0727334701
21	T3	0,5007322319	0,8480057597

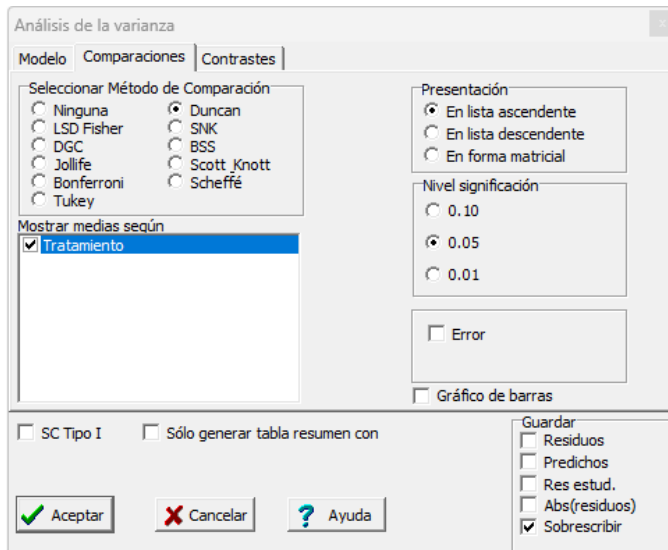
La **Figura 43** corresponde a la base de datos cargada en el software InfoStat, en la cual se presentan los valores del índice de vegetación NDVI registrados para cada uno de los tratamientos evaluados. Las columnas incluyen el número de caso, el tratamiento asignado (T1, T2, T3), el valor de NDVI inicial tomado antes de la aplicación del tratamiento, y el valor de NDVI final registrado después de la aplicación. Esta tabla fue utilizada para realizar el análisis estadístico comparativo entre tratamientos, considerando los cambios en el NDVI como indicador de respuesta a la aplicación.

Figura 44

Configuración del modelo de análisis de covarianza en InfoStat



Para evaluar el efecto de los tratamientos sobre el NDVI tras la aplicación, se realizó un análisis de covarianza, utilizando el valor del NDVI final como variable dependiente (**Figura 44**). El tratamiento fue considerado como variable de clasificación, mientras que el NDVI inicial se incluyó como covariable. Esta estructura permitió ajustar las diferencias previas entre los árboles y obtener una comparación más precisa del efecto de cada tratamiento sobre el estado vegetativo del cultivo.

Figura 45*Configuración del test de Duncan*

Posterior al análisis de la varianza, se procedió a realizar una prueba de comparación de medias mediante el método de rangos múltiples de Duncan con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Para ello, se seleccionó la opción “Duncan” dentro del módulo de comparaciones en InfoStat (**Figura 45**). Las medias se mostraron clasificadas según el factor "Tratamiento" y ordenadas de forma ascendente. Esta configuración permitió identificar diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados, asignando letras distintas a aquellos cuyas medias presentaron diferencias significativas. Finalmente, se habilitó la opción de sobrescritura para almacenar los resultados directamente en la hoja activa del software.

6.3.3 Interpretación de resultados

Determinación de significancia estadística: basándose en los resultados del análisis estadístico, se interpretó si hay una significancia en el NDVI que pueda ser atribuida al tratamiento con el extracto de *Ascophyllum nodosum*. Para ello se siguieron los siguientes pasos: colección y ordenamiento de los datos por tratamientos y repeticiones; ingreso de tabla al paquete estadístico; lectura de los datos a través de análisis de varianza; separación de promedios con prueba de Duncan al 5% de error.

7 Resultados

Este estudio evaluó el efecto de un bioestimulante de *Ascophyllum nodosum* origen Canadá en aguacate (*Persea americana* var. Hass) mediante imágenes NDVI tomadas por un dron, siguiendo un diseño experimental en tres fases. A continuación, se discuten los hallazgos clave en relación con la literatura

7.1 Fase 1: Selección del área experimental y caracterización inicial

Durante la primera fase del estudio se identificó el área del cultivo mediante imágenes RGB obtenidas por un dron y se delimitó la zona experimental basada en criterios de homogeneidad en el desarrollo de los árboles. Esta etapa permitió distribuir de forma adecuada los tratamientos, apoyados en la digitalización manual de los doseles de los árboles. Además, se construyó una tabla de datos generales por tratamiento, incluyendo número de árboles, área promedio de dosel y área total por tratamiento.

Figura 46

Selección del área de estudio, asignación de tratamientos y digitalización de doseles sobre mosaico RGB



En la **Figura 46** se muestra la parcela experimental dividida en cuatro tratamientos (T1 a T4), sobre el ortomosaico generado a partir de imágenes RGB capturadas por dron. Los círculos negros representan los doseles digitalizados de cada árbol seleccionado. Esta etapa permitió establecer la base espacial para la posterior extracción de datos espectrales (NDVI).

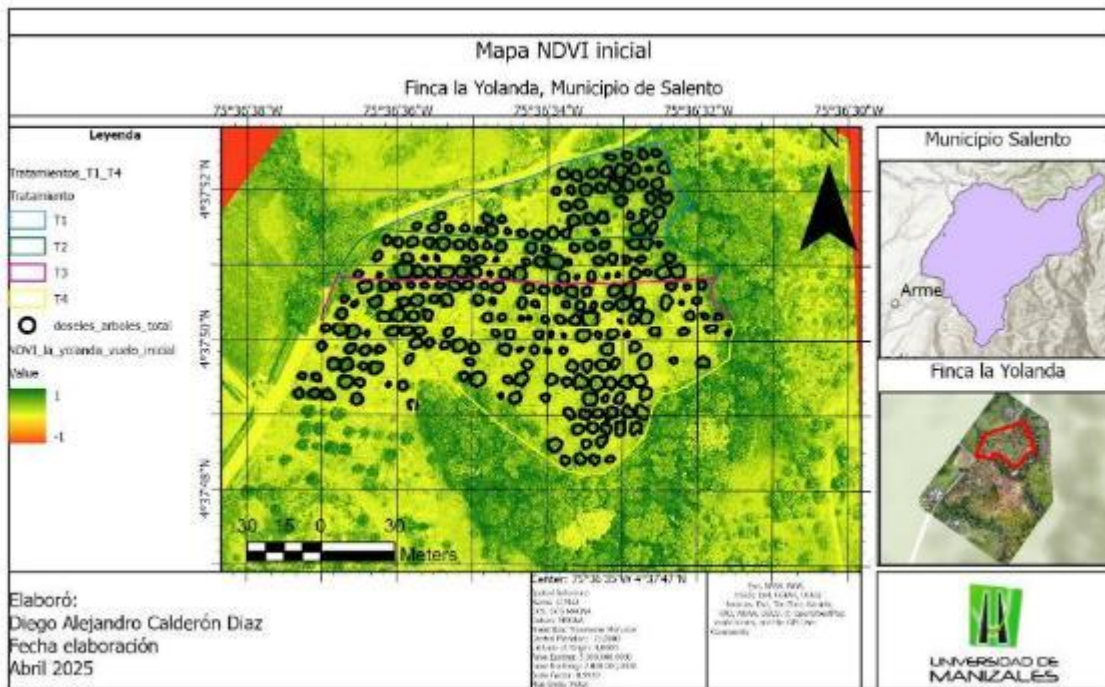
Tabla 3

Datos generales

Tratamiento	T1	T2	T3	T4
Número de arboles	47	53	59	98
Área promedio dosel M2	11,82	11,68	11,21	12,73
Área lote en ha	0,285	0,257	0,29	0,654
Área total área estudio ha			1,48	
Área total del lote ha			5,1	

La **Tabla 3** presenta un resumen de los tratamientos establecidos en el lote experimental, incluyendo la cantidad de árboles y las áreas asociadas, como parte de la planificación inicial del ensayo.

Posteriormente, se generó el mapa de NDVI inicial, mediante imágenes multiespectrales capturadas con dron, lo cual permitió evaluar el estado fisiológico de cada árbol antes de la aplicación del bioestimulante. Este índice NDVI fue extraído individualmente por polígono de dosel generando una tabla con valores precisos por árbol.

Figura 47*Mapa NDVI inicial*

En la **Figura 47** se visualiza el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) correspondiente al primer vuelo, antes de la aplicación del bioestimulante. Los valores varían de -1 a 1, indicando el vigor vegetal inicial. Se superponen los tratamientos (T1 a T4) y los doseles individualizados, lo que permite la comparación espacial entre condiciones fisiológicas y asignación experimental.

Tabla 4*Selección de árboles NDVI inicial*

Código	Tratamiento	Área dosel M2	NDVI inicial
T1P8	T1 (Foliar)	21,92	0,6321248525
T1P10	T1 (Foliar)	12,58	0,6178674606
T1P17	T1 (Foliar)	10,94	0,6469947707
T1P25	T1 (Foliar)	11,39	0,5863780040
T1P33	T1 (Foliar)	11,07	0,6227625269

Código	Tratamiento	Área dosel M2	NDVI inicial
T1P34	T1 (Foliar)	11,73	0,5829035998
T1P42	T1 (Foliar)	15,01	0,6035312583
T1P47	T1 (Foliar)	8,31	0,5626778553
T2P8	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	13,80	0,6299740515
T2P9	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	14,05	0,6254939730
T2P14	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	12,31	0,5787266192
T2P15	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	14,08	0,5815428616
T2P18	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	11,85	0,6321309118
T2P21	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	10,68	0,5624470330
T2P28	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	10,64	0,6315669611
T2P33	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	10,00	0,5562149047
T3P1	T3 (<i>Drench</i>)	9,32	0,5772558185
T3P3	T3 (<i>Drench</i>)	8,87	0,6081900585
T3P4	T3 (<i>Drench</i>)	23,13	0,6446541565
T3P7	T3 (<i>Drench</i>)	16,06	0,5537394864
T3P9	T3 (<i>Drench</i>)	9,80	0,5507352319
T3P13	T3 (<i>Drench</i>)	11,23	0,5554163649
T3P14	T3 (<i>Drench</i>)	14,06	0,6072938024
T3P19	T3 (<i>Drench</i>)	14,76	0,6396533741
T4P16	T4 (Testigo)	14,49	0,5665303572
T4P19	T4 (Testigo)	21,78	0,6378956291
T4P20	T4 (Testigo)	21,16	0,6486772246
T4P34	T4 (Testigo)	8,36	0,6101059794
T4P37	T4 (Testigo)	9,23	0,6355715687
T4P38	T4 (Testigo)	16,24	0,6207419321
T4P48	T4 (Testigo)	20,30	0,6496249741
T4P54	T4 (Testigo)	9,84	0,5576311344

La **Tabla 4** presenta las mediciones realizadas antes de la aplicación del bioestimulante, incluyendo el área proyectada del dosel en metros cuadrados y el valor del índice NDVI inicial para cada árbol identificado. Los árboles se agrupan por tratamiento aplicado y sirven como base para establecer la homogeneidad inicial entre tratamientos.

La delimitación del área experimental mediante imágenes RGB y NDVI cumplió con el primer objetivo, asegurando condiciones iniciales homogéneas. Este enfoque es respaldado por Chang et al. (2020), quienes destacan que la segmentación manual de doseles permite tener un dato más preciso. La homogeneidad en el NDVI inicial validó que cualquier cambio posterior podría atribuirse a los tratamientos, no a variabilidad preexistente.

7.2 Fase 2: Aplicación del bioestimulante y segundo vuelo NDVI

En esta fase se realizó la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* según el protocolo definido para cada tratamiento, el cual consideró tanto las dosis como la vía de aplicación (foliar, Foliar más *drench*, *drench*), siguiendo criterios técnicos usados en campo. Este procedimiento responde a lo señalado por Shukla et al. (2019), quienes destacan que los extractos de algas pueden inducir respuestas fisiológicas relacionadas con tolerancia al estrés, crecimiento vegetal y absorción de nutrientes, siempre que se usen en las dosis y momentos adecuados.

Tabla 5

Descripción protocolo de aplicación

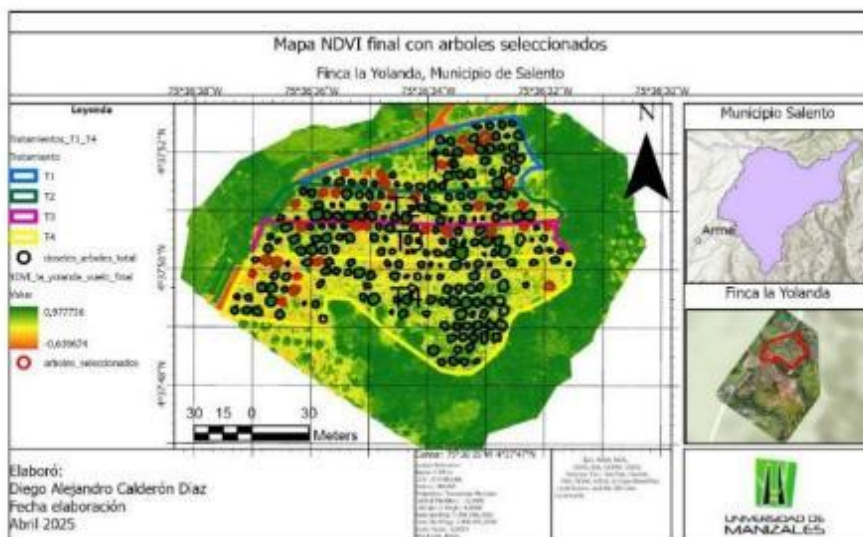
Tratamiento	Vía de aplicación	Producto aplicado	Dosis por ha	Volumen de mezcla aplicado por árbol	Número de árboles tratados
T1	Foliar	Alga-Plex	1,5 L	3 L	47
T2	Foliar + <i>Drench</i>	Alga-Plex + Stella Maris	1,5 L + 2 L	Foliar 3 L <i>drench</i> 5 L	53
T3	<i>Drench</i>	Stella Maris	2 L	5 L	59
Testigo		Manejo del agricultor			98

La **Tabla 5** resume las estrategias de aplicación del bioestimulante según cada tratamiento, especificando el tipo de producto, la dosis utilizada y el número de árboles tratados, incluyendo un testigo con manejo convencional.

Después de la aplicación, se realizó un segundo vuelo con dron para obtener una nueva imagen NDVI, con el objetivo de detectar posibles cambios fisiológicos en el cultivo. A partir de esta imagen se generó una tabla comparativa con los valores promedios de NDVI inicial y final por árbol, que permitió cuantificar la respuesta individual de los árboles y preparar los datos para el análisis estadístico.

Figura 48

Mapa NDVI final con árboles seleccionados



La **Figura 48** presenta el NDVI obtenido en el segundo vuelo, posterior a la aplicación de los tratamientos, reflejando el estado fisiológico del cultivo. Se destacan en rojo los árboles seleccionados para el análisis estadístico y se mantiene la delimitación por tratamiento. Este mapa permite observar espacialmente la respuesta diferencial de los árboles ante la bioestimulación.

Tabla 6*Valores NDVI inicial y final*

Código	Tratamiento	Área dosel M2	NDVI inicial	NDVI final
T1P8	T1 (Foliar)	21,92	0,6321248525	0,8323765606
T1P10	T1 (Foliar)	12,58	0,6178674606	0,8500680273
T1P17	T1 (Foliar)	10,94	0,6469947707	0,8664146449
T1P25	T1 (Foliar)	11,39	0,5863780040	0,8350739837
T1P33	T1 (Foliar)	11,07	0,6227625269	0,8575484249
T1P34	T1 (Foliar)	11,73	0,5829035998	0,7837469750
T1P42	T1 (Foliar)	15,01	0,6035312583	0,8854766035
T1P47	T1 (Foliar)	8,31	0,5626778553	0,8872992811
T2P8	T2 (Foliar+Drench)	13,80	0,6299740515	0,8628328602
T2P9	T2 (Foliar+Drench)	14,05	0,6254939730	0,8870512064
T2P14	T2 (Foliar+Drench)	12,31	0,5787266192	0,8399945652
T2P15	T2 (Foliar+Drench)	14,08	0,5815428616	0,8430345502
T2P18	T2 (Foliar+Drench)	11,85	0,6321309118	0,8721133580
T2P21	T2 (Foliar+Drench)	10,68	0,5624470330	0,8691305151

Código	Tratamiento	Área dosel M2	NDVI inicial	NDVI final
T2P28	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	10,64	0,6315669611	0,8495520366
T2P33	T2 (Foliar+ <i>Drench</i>)	10,00	0,5562149047	0,8423365179
T3P1	T3 (<i>Drench</i>)	9,32	0,5772558185	0,8446835013
T3P3	T3 (<i>Drench</i>)	8,87	0,6081900585	0,8339256601
T3P4	T3 (<i>Drench</i>)	23,13	0,6446541565	0,8850384074
T3P7	T3 (<i>Drench</i>)	16,06	0,5537394864	0,8727334781
T3P9	T3 (<i>Drench</i>)	9,80	0,5507352319	0,8490057597
T3P13	T3 (<i>Drench</i>)	11,23	0,5554163649	0,8867018084
T3P14	T3 (<i>Drench</i>)	14,06	0,6072938024	0,8649008317
T3P19	T3 (<i>Drench</i>)	14,76	0,6396533741	0,8593128780
T4P16	T4 (Testigo)	14,49	0,5665303572	0,8349624313
T4P19	T4 (Testigo)	21,78	0,6378956291	0,8573158355
T4P20	T4 (Testigo)	21,16	0,6486772246	0,8690178432
T4P34	T4 (Testigo)	8,36	0,6101059794	0,8390047070
T4P37	T4 (Testigo)	9,23	0,6355715687	0,8196154229
T4P38	T4 (Testigo)	16,24	0,6207419321	0,8128530428
T4P48	T4 (Testigo)	20,30	0,6496249741	0,8641350967
T4P54	T4 (Testigo)	9,84	0,5576311344	0,8578181108

La **Tabla 6** muestra los resultados obtenidos para cada árbol evaluado, permitiendo observar las variaciones en la respuesta del NDVI antes y después de la aplicación del bioestimulante, según el tipo de tratamiento aplicado. También se incluye el área proyectada del dosel en metros cuadrados, como referencia de tamaño de cada árbol.

En este contexto, los resultados permiten evaluar si el bioestimulante generó una mejora medible en los índices de vegetación, lo cual se relaciona directamente con lo planteado por Espinosa-Antón et al. (2020). Estos autores concluyen que los extractos de algas tienen efectos en diferentes etapas del desarrollo vegetal, incluyendo mejoras en la fisiología, metabolismo y fotosíntesis, procesos estrechamente vinculados con el NDVI.

Por otra parte, el hecho de comparar los valores NDVI antes y después del tratamiento a escala de árbol individual fortalece la precisión del estudio. Esta metodología fue validada por Torres-Madronero et al. (2023), quienes demostraron que el NDVI puede variar entre hojas jóvenes y maduras dentro del mismo árbol, lo que justifica el uso de herramientas precisas y segmentación de datos a nivel de copa, como se aplicó en esta investigación.

Revelo et al. (2020) advierten que el NDVI puede presentar limitaciones en cultivos de alta densidad, como consecuencia de la saturación en la banda roja. Aunque en el presente estudio no se comprobó directamente esta limitación, se reconoce que esta observación resulta pertinente para interpretaciones futuras y sugiere la conveniencia de integrar otros índices como NDRE o SAVI que ofrecen mayor sensibilidad a variaciones estructurales y fisiológicas inducidas por bioestimulantes.

A diferencia de Fawcett et al. (2020) que validaron la consistencia del NDVI bajo diversas condiciones lumínicas, este estudio implementó vuelos estandarizados a las 10 a.m. (siguiendo a Hama et al., 2021) para maximizar la sensibilidad en la detección de cambios inducidos por el bioestimulante. Este enfoque metodológico más restrictivo fue para garantizar una mayor homogeneidad de los datos recolectados.

7.3 Fase 3: Análisis estadístico del NDVI después del tratamiento

7.3.1 Resultado ANOVA inicial y gráfica

El análisis de varianza (ANOVA) realizado sobre los valores del NDVI inicial no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos antes de la aplicación del bioestimulante ($p = 0,5564$), lo que indica que las condiciones fisiológicas de los árboles eran homogéneas al momento del primer vuelo. Este resultado es coherente con el diseño experimental propuesto, en el que se buscó seleccionar árboles con características similares para cada tratamiento.

La prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0,05$) confirmó que todos los tratamientos compartían la misma letra "A", lo que refuerza que no existían diferencias en el vigor de los árboles al inicio del ensayo. La gráfica de barras permite visualizar que, aunque existen ligeras variaciones numéricas en los promedios del NDVI entre tratamientos (T3 = 0,59; T2 = 0,60; T1 = 0,61; T4 = 0,62), estas no fueron significativas estadísticamente.

Figura 49

Análisis de varianza (ANOVA) NDVI inicial

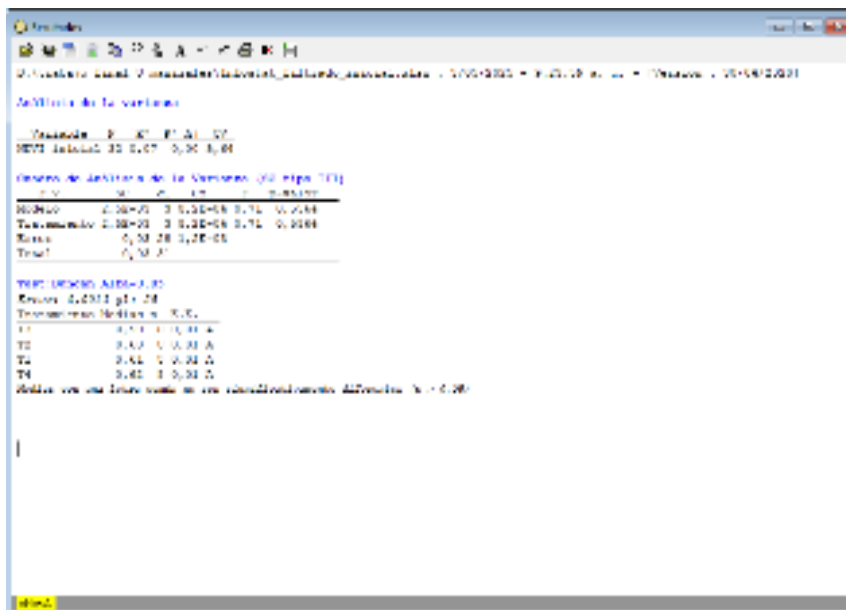
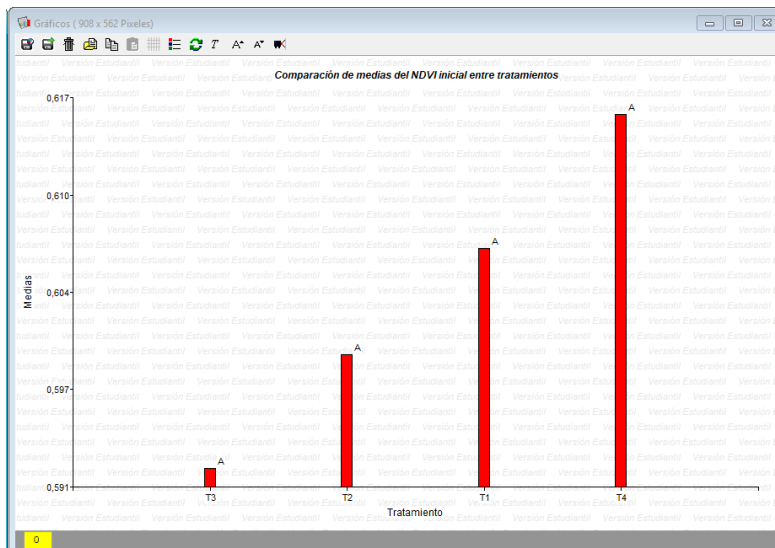


Figura 49 muestra la salida del software InfoStat con los valores del análisis estadístico ANOVA aplicado a los datos del NDVI inicial, permitiendo evaluar la homogeneidad de los tratamientos antes de la aplicación del bioestimulante.

Figura 50

Comparación de medias del NDVI inicial



La **Figura 50** muestra los promedios del NDVI inicial por tratamiento con sus respectivas letras según el test de comparación de medias de Duncan ($\alpha = 0,05$). Se evidencia que no existen diferencias significativas entre tratamientos, lo cual confirma la homogeneidad de los árboles antes de la aplicación del bioestimulante.

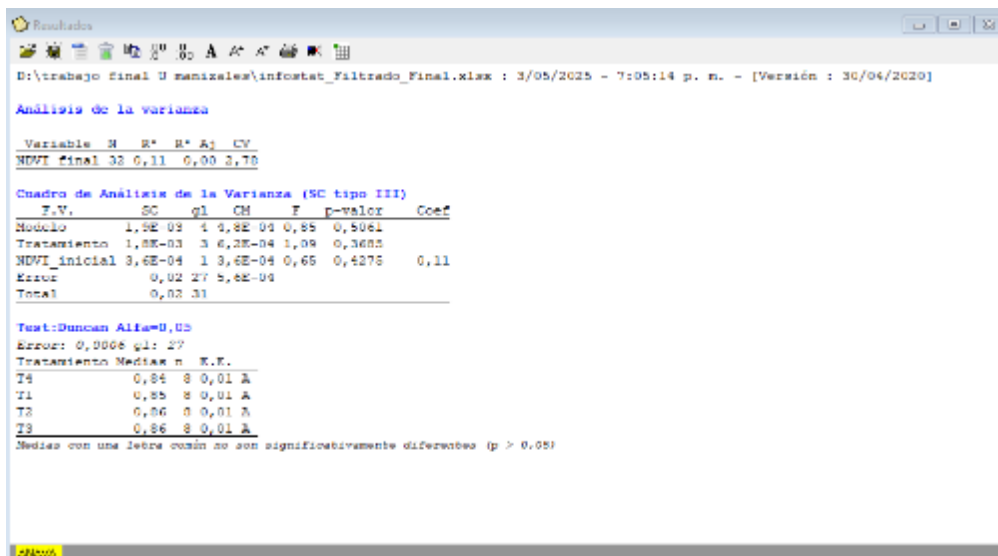
Este hallazgo es crucial porque garantiza que cualquier diferencia observada en la evaluación posterior del NDVI podrá ser atribuida a los efectos de los tratamientos aplicados, y no a una variabilidad inicial en el estado fisiológico de los árboles. Este enfoque metodológico concuerda con lo planteado por Chang et al. (2020), quienes resaltan la relevancia de segmentar el dosel individual de cada árbol para calcular índices espectrales como el NDVI, permitiendo así evaluaciones fisiológicas más precisas y comparables entre estados de salud vegetal.

7.3.2 Resultado ANOVA con covariable inicial y gráfica

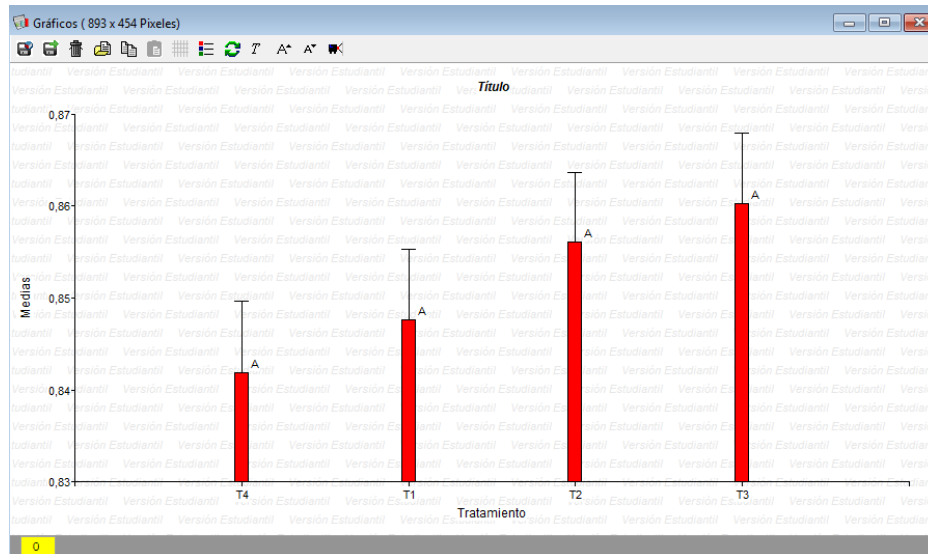
Posterior a la aplicación del bioestimulante, el análisis de covarianza (ANCOVA) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$), aunque se evidenciaron tendencias en los valores promedios del NDVI, siendo T3 (aplicación vía *drench*) el tratamiento con mayor media, seguido de T2 (foliar + *drench*). Estos resultados, si bien no estadísticamente concluyentes, pueden indicar un posible efecto fisiológico diferenciado.

Figura 51

Resultado de varianza (ANOVA) NDVI final



La **Figura 51** muestra los resultados del análisis de varianza (ANOVA) realizado sobre los valores de NDVI final, evidenciando que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($p = 0.5061$), según la prueba de comparación de medias de Duncan.

Figura 52*Comparación de medias del NDVI final*

La **Figura 52** presenta la comparación de las medias del NDVI final entre tratamientos, mostrando que no hubo diferencias estadísticas significativas (letra A común en todos los tratamientos), lo que indica respuestas similares del cultivo tras la aplicación del bioestimulante.

Arioli et al. (2023) reportan que la aplicación regular del extracto de *Ascophyllum nodosum* vía radicular mejora el cuajado y la retención de frutos en aguacate, asociándose a una mejor condición fisiológica del árbol. Aunque en este estudio solo se realizó una única aplicación y no se evaluó producción, el aumento observado en el NDVI en T3 podría estar indicando un comportamiento fisiológico coherente con los efectos reportados en estudios con aplicaciones repetidas.

En el estudio realizado por Torres-Madronero et al. (2023), el valor promedio del NDVI medido en campo con GreenSeeker en hojas maduras de aguacate alcanzó un máximo de 0.76, mientras que los valores obtenidos mediante imágenes satelitales de Sentinel 2 y Landsat 8 oscilaron alrededor de 0.4 y 0,3, respectivamente. Los autores concluyen que existe una variabilidad considerable del NDVI dependiendo del tipo de sensor, además de la heterogeneidad fenológica natural del cultivo de aguacate, el cual puede presentar hojas jóvenes y maduras en el

mismo árbol. En contraste, los resultados obtenidos en este estudio mediante imágenes de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) equipado con un sensor multiespectral con alta resolución espacial (3.4 cm/píxel) muestran valores más elevados de NDVI en el segundo vuelo, con un rango entre 0.84 y 0.86.

Esta diferencia puede atribuirse a la mayor resolución espacial del sensor instalado en el dron, así como a la evaluación sobre la totalidad del dosel, permitiendo capturar una integración espectral más representativa de la salud general del árbol. Esto confirma la observación de Torres-Madronero et al (2023). sobre la necesidad de emplear sensores más precisos o con mayor resolución para mejorar la interpretación del NDVI, especialmente en cultivos perennes y fenológicamente complejos como el aguacate.

La homogeneidad inicial (ANOVA) es consistente con estudios como Tenreiro et al. (2021), que destacan la importancia de partir de condiciones similares. La falta de significancia post-tratamiento contrasta con Espinosa-Antón et al. (2020), quienes reportan efectos significativos de extractos de algas en NDVI. Esto podría explicarse por resolución temporal: un solo vuelo posaplicación (vs. múltiples mediciones en Thapa et al., 2019). Variabilidad fenológica: diferencias no controladas en hojas jóvenes/maduras (Torres-Madronero et al., 2023).

8 Conclusiones

Finalmente, con respecto al primer objetivo se concluye que la identificación del área del cultivo por medio de imágenes RGB y NDVI fue una estrategia adecuada porque por la resolución de la imagen se pudieron identificar los árboles y se hizo una correcta distribución de los tratamientos. La imagen NDVI permitió seleccionar árboles que tuvieran un NDVI inicial similar y hacer seguimiento en los dos vuelos.

Esta metodología se encuentra en concordancia con los estudios de La Fundación Miguel Lillo (2022); Fawcett et al. (2020); Chang et al. (2020), así se evidencia que es la manera óptima de realizar este trabajo en cultivos de árboles frutales (aguacate, cítricos). Este tipo de cultivos se individualizan de manera diferente a los cultivos en hilera (banano, maíz, soja), así se seleccionan áreas del mismo tamaño dentro del cultivo y la muestra reúne varias plantas dentro de esa área. Este procedimiento permite a los agricultores validar la metodología de selección de los árboles de estudio.

Con relación al segundo objetivo, se determinó que la aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum* en sus tres modalidades: foliar, *drench* y foliar + *drench* tuvo un efecto positivo en los valores de NDVI de los árboles tratados. Si bien no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en el segundo vuelo, los tres tratamientos con aplicación del extracto presentaron, en promedio, valores de NDVI ligeramente superiores al testigo. El segundo vuelo se llevó a cabo a las 10:30 a.m., en un horario similar al del primer vuelo (10:00 a.m.), siguiendo las recomendaciones metodológicas de Hama et al. (2021) para reducir la interferencia de la posición solar en los resultados. Cabe resaltar que no fue necesario modificar los polígonos inicialmente digitalizados, ya que se mantuvieron concordantes con las copas de los árboles durante ambas evaluaciones, lo que permitió una medición precisa y consistente. Esta consideración metodológica destaca la importancia de validar la estabilidad espacial del dosel por labores como la poda antes de realizar comparaciones temporales en estudios NDVI.

Del tercer objetivo, relacionado con el análisis estadístico de los datos del NDVI después del tratamiento, se concluye que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos T1, T2, T3 y el testigo T4. Esto sugiere que, bajo las condiciones de este estudio y con una única aplicación del extracto de *Ascophyllum nodosum*, no fue posible evidenciar un efecto diferencial significativo en el NDVI. No obstante, los tratamientos con el extracto mostraron

valores promedio ligeramente superiores, lo cual podría indicar una tendencia fisiológica positiva que requeriría evaluaciones con mayor resolución temporal o más aplicaciones para confirmar su efecto. Además, la inclusión del NDVI inicial como covariable fue fundamental para controlar la variabilidad de partida y realizar una comparación más precisa entre tratamientos.

El uso del análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 0.05 es coherente con estudios como el de Zamani-Noor & Feistkorn (2022). El software utilizado, de acceso libre y manejo intuitivo, facilita la aplicación de análisis estadísticos rigurosos tanto para investigadores como para técnicos en campo.

9 Recomendaciones

Es importante considerar la evolución del dosel de los árboles entre los vuelos, especialmente cuando se realizan prácticas como podas de mantenimiento o podas específicas, como la poda de chimenea. Estas prácticas pueden alterar significativamente la forma y cobertura del dosel, lo que podría generar discrepancias entre los polígonos digitalizados en el primer vuelo y la cobertura real en el segundo vuelo. En particular, la poda de chimenea puede generar huecos visibles desde el aire, que aparecen como sombras en las imágenes capturadas.

Se debe prestar especial atención a las sombras proyectadas dentro de los polígonos, ya que el software de análisis puede interpretar estas áreas como valores de NDVI altos, cercanos a 1, debido a limitaciones en la interpretación de los píxeles oscuros como vegetación saludable. Esto puede llevar a sesgos en los datos y afectar la precisión de los análisis estadísticos. Para mitigar este problema, se recomienda:

- Evitar la inclusión de áreas de sombra dentro de los polígonos de análisis. Si las sombras son inevitables, considerar aplicar máscaras específicas o corregir estos valores mediante técnicas de preprocesamiento de imágenes, como: análisis de reflectancia en múltiples bandas para distinguir vegetación real de sombras; aplicación de umbrales para eliminar valores extremos en zonas sombreadas.

- Realizar vuelos adicionales en horarios donde las sombras sean mínimas, preferiblemente cerca del mediodía solar, para minimizar la proyección de sombras largas.

Estas medidas mejoran la precisión y la representatividad de los datos de NDVI, asegurando que reflejen las condiciones reales de la vegetación evaluada.

Se propone realizar un estudio para correlacionar los valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes aéreas con mediciones directas de contenido de clorofila en las hojas de los árboles en campo. Este enfoque permitiría validar el uso del NDVI como indicador del estado fisiológico y nutricional del cultivo de aguacate (*Persea americana* var. Hass). El contenido de clorofila puede medirse mediante herramientas portátiles como un clorofilómetro (SPAD) o mediante análisis de laboratorio. Al correlacionar estos datos con los valores de NDVI, se podrían obtener resultados como:

- Determinar si el NDVI refleja de manera consistente el contenido de clorofila en las hojas, estableciendo una relación cuantitativa.

- Generar modelos predictivos que permitan usar el NDVI para monitorear indirectamente el estado nutricional del cultivo.
- Identificar posibles discrepancias entre los valores de NDVI y las mediciones directas, ajustando los métodos de interpretación del índice.

Este estudio contribuiría a validar el uso del NDVI como herramienta en la agricultura de precisión, optimizando el manejo de los cultivos basado en datos confiables y correlacionados con indicadores fisiológicos clave.

Se recomienda explorar el uso de otros índices espectrales además del NDVI para evaluar la respuesta del extracto de *Ascophyllum nodosum* en los árboles de aguacate Hass. Algunos de los índices más utilizados en estudios de vegetación incluyen: EVI (Enhanced Vegetation Index); SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index); NDRE (Normalized Difference Red Edge Index); MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index); GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index); El uso de estos índices permitiría comparar la sensibilidad de cada índice en la detección de los efectos del bioestimulante.

Referencias

- Abd-Elrahman, A., Guan, Z., Dalid, C., Whitaker, V., Britt, K., Wilkinson, B., & Gonzalez, A. (2020). Automated Canopy Delineation and Size Metrics Extraction for Strawberry Dry Weight Modeling Using Raster Analysis of High-Resolution Imagery. *Remote Sensing*, *12*(21). <https://doi.org/10.3390/rs12213632>
- Abonamos. (2024). Ficha técnica para cultivo de aguacate. <https://www.abonamos.com> › aguacate
- Ag teacher. (2024). Drones agrícolas. <https://agteacher.com/es/producto/helicopteros-yamaha/>
- Ahirwar, S., Srinivas, B., Raghunandan-Swarnkar, S., Nanwade, G. (2019). Application of Drone in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* *8*(01):2500-2505. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2019.801.264>
- Arias-García, J.S., Ruden, S., Cruz, V., Hurtado-Salazar, A., & Ceballos-Aguirre, N. (2023). Quality, fruit retention and ecophysiology of 'Hass' avocado grown at two altitudes in the Andean tropics of Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *17*(2), <https://doi.org/10.17584/rcch.2023v17i2.15861>
- Arioli, T., Gepworth, G., Farnsworth, B., Villalta, O., & Mattner, S. W. (2023). Effect of seaweed extract on avocado root growth, yield and post-harvest quality in far north Queensland, Australia. *Journal of Applied Phycology*, *36*(2), 745-755. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02933-0>
- Ashok, A., Rani, H., & Jayakumar, K. (2021). Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, (23). <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100547>
- Bhandari, A., Kumar, A., & Singh, G. (2012). Feature extraction using normalized difference vegetation index (NDVI): A case study of Jabalpur City. *Procedia Technology*, *6*, 612-621. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.10.074>
- Boiarskii, B., & Hasegawa, H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE indices to detect differences in vegetation and chlorophyll content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, (4). 20-29. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Carter, G., & Knapp, A. (2001) Leaf Optical Properties in Higher Plants: Linking Spectral Characteristics to Stress and Chlorophyll Concentration. *American Journal of Botany*, (88), 677-684. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11302854/>
- Chang, A., Yeom, J., Jung, J., & Landivar, J. (2020). Comparison of Canopy Shape and Vegetation Indices of Citrus Trees Derived from UAV Multispectral Images for Characterization of Citrus Greening Disease. *Remote Sensing*, *12*(24), 4122, 1-12. <https://doi.org/10.3390/rs12244122>

- Chatterjee, S., Murray, S. C., Matias, F. I., & Fahlgren, N. (2025). FIELDimagePy: A tool to estimate zonal statistics from an image, bounded by one or multiple polygons. *Crop Science*, 65(1). <https://doi.org/10.1002/csc2.21357>
- Chedid, V., Cortez, J., & Arcoverde, S. (2024). Monitoring the vegetative state of coffee using vegetation indices. *Engenharia Agrícola*, (44), 1-11. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v44e20220212/2024>
- Córdoba-Gaona, O.J., Hernández-Arredondo, J.D., Loaiza-Ruíz, R.A., Barrera-Sánchez, C.F., & Cano-Gallego, L.E. (2024). Rootstock/scion compatibility effects on yield components in avocado cv. Hass in three locations in Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 18(1). https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/17074/14012
- Craigie, J. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology* 23(3):371-393. DOI:10.1007/s10811-010-9560-4
- Crusiol, L. G., Liang, S., Silbaldelli, R., Felipe, V., Furlaneti, W., Chen, R., Sun, Z., Wuyun, D., Chen, Z., Nanni, M., Furlanetto, R., Cezar, E., Nepomuceno, A., Farias, J. (2022). Strategies for monitoring within-field soybean yield using Sentinel-2 Vis-NIR-SWIR spectral bands and machine learning regression methods. *Precision Agriculture*, (23), 1093-1123. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09876-5>
- DANE. (2016). *Boletín mensual, insumos y factores asociados a la producción agropecuaria*. <https://www.dane.gov.co/componente-insumos-historicos>
- De Saeger, J., Van Praet, S., Vereecke, D., Park, J., Jacques, S., Han, T., & Depuydt, S. (2019). Toward the molecular understanding of the action mechanism of *Ascophyllum nodosum* extract on plant. *Journal of Applied Phycology*, 32, 573-597 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-019-01903-9>
- De Souza, R., Peña-Fleitas, M. T., Thompson, R. B., Gallardo, M., Grasso, R., & Padilla, F. M. (2019). The Use of Chlorophyll Meters to Assess Crop N Status and Derivation of Sufficiency Values for Sweet Pepper. *Sensors*, 19(13), 2949, 1-20. <https://doi.org/10.3390/s19132949>
- Delavarpour, N., Koparan, C., Nowatzki, J., Sreekala, Bajwa, S., & Sun, X. A. (2021). A Technical Study on UAV Characteristics for Precision Agriculture Applications and Associated Practical Challenges. *Remote Sens*, 13(6), 1204, 1-25. <https://doi.org/10.3390/rs13061204>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2002). Infostat: Software estadístico. Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar>
- Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., & González-González, M. (2020). Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas. *Biotecnología vegetal*, 20(4), 257-287. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2074-86472020000400257

- Faize, M., Faize, L., Burgos, L., Critchley, A. T., & Albuquerque, N. (2021). Application of Ascophyllum nodosum-Based Soluble Extract on Micropropagation and Regeneration of *Nicotiana benthamiana* and *Prunus domestica*. *Plants*, 10(7), 1354, 1-12. <https://doi.org/10.3390/plants10071354>
- Fawcett, D., Bennie, J., & Anderson, K. (2020). Monitoring spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired NDVI data. *Remote sensing in Ecology and Conservation*, 7(2), 227-244. <https://doi.org/10.1002/rse2.184>
- Foster, T., Brozović, N., & Butler, A. (2015). Why well yield matters for managing agricultural drought risk, *Weather and Climate Extremes*, 10, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.07.003>
- Fundación Hondureña de investigación agrícola (2008). *Manual técnico del cultivo de aguacate Hass*. <https://www.avocadosource.com › AlfonsoJose2008>
- Fundación Miguel Lillo. (2022, 4 de agosto). Nuevo equipo de la FML permitirá avanzar en investigaciones vegetales. <https://www.lillo.org.ar/node/3260>
- González-Musso, R., Rabino, A., & Azzaro, F. (2020). Uso de un Vehículo No Tripulado (VANT) como método de la sanidad forestal en plantaciones de coníferas en Patagonia Norte, Argentina. *Quebracho, Revista de Ciencias Forestales*, 28(1), 88-99. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48170468001>
- Guerrón, A., Viera, W., Campaña, D., Vásquez, L., & Montufar, C. (2022). Application of plant indices (red band and near infrared) in avocado plantations. *Advances in Modern Agriculture*, 3(2). <https://doi.org/10.54517/ama.v3i2.2110>
- Guevara-Bonilla, M., Meza-Leandro, A. S., Esquivel-Segura, E. A., Arias-Aguilar, D., Tapia-Arenas, A., Masís-Meléndez, F. (2020). Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis. *Tecnología en marcha*, 33(4), 77-88. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i4.4528>
- Hama, A., Tanaka, K., Chen, B., & Kondoh, A. (2021). Examination of appropriate observation time and correction of vegetation index for drone-base crop monitoring. *Journal of Agricultural Meteorology*, 77(3), 200-209. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00047>
- Harsh, S., Singh, D., & Pathak, S. (2021). Efficient and cost-effective drone NDVI system for precision farming. *International Journal of New Practices in Management and Engineering*, 10(4), 14-19. <https://doi.org/10.17762/ijnpme.v10i04.126>
- Hernández- Calvario, O., Florián, F., Sánchez, M.G. Ávila-George, H. (2021). Conteo de plantas de agave usando redes neuronales convolucionales e imágenes adquiridas desde un vehículo aéreo no tripulado. *Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, (45), 64-76. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8568426>

- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(5), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2021). *Resolución 090832. Por medio de la cual se establecen los requisitos para la comercialización, distribución, almacenamiento de los insumos agropecuarios y semillas para la siembra.* <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2021/2021r90832>
- Kaur, M. (2019). Avocado Breeding. <https://es.slideshare.net/slideshow/avocado-breeding/141912515>
- Liyantono, L., Almadani, Y., Adillah, Y., Maulana Yusuf, M., Reza Mahbub, M. N., & Fatikhunnada, A. (2019). Analysis of paddy productivity using NDVI and K-means clustering in Cibarusah Jaya, Bekasi Regency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (557), 012085, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/557/1/012085>
- Meivel, S., & Maheswari, S. (05-07 of June of 2020). *Optimization of agricultural smart system using remote sensible NDVI and NIR thermal image analysis techniques* [Presentation]. 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET), IEEE, Belgaum, India, <https://doi.org/10.1109/INCET49848.2020.9154185>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Cadena productiva aguacate.. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Documentos>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Cadena productiva de aguacate. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Pages/default.aspx>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (s.f.). Dirección de Innovación, Desarrollo Tecnológico y Protección Sanitaria. Funciones. <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Paginas/Direcci%C3%B3n-de-Innovaci%C3%B3n.aspx>
- Ospina-Parra, C.E., Garavito, L.V., & Correa, D. L. (2023). Cadena de valor aguacate Hass: procesos interinstitucionales hacia la exportación en Cauca, Colombia. *Rivar*, 10(28), <http://dx.doi.org/10.35588/rivar.v10i28.5333>
- Profesionales de drones. (2024). Drones multirrotor vs. ala fija. <https://idc.apddrones.com/drones/drones-multirrotor-vs-ala-fija/>
- Radočaj, D., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/agriculture13030707>
- Revelo-Luna, D., Mejía-Manzano, J., Montoya-Bonilla, B. P., & Hoyos-García, 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), 298-312. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>.
- Serrano-García, I., Saavedra Morillas, C., Beiro-Valenzuela, M. G., Monasterio, R., Hurtado-Fernández, E., González-Fernández, J. J., Hormaza, J. I., Pedreschi, R., Olmo-García, L., Carrasco-Pancorbo, A. (2024). Uncovering phytochemicals quantitative evolution in avocado fruit mesocarp during ripening: A targeted LC-MS metabolic exploration of Hass, Fuerte and Bacon varieties. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140334>
- Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., & Prithviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-Based biostimulant: Applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science*, 10, 655, 1-22. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>
- Tenreiro, T. R., Gacia Vila, M., Gómez, J. A., Jiménez Berni, J. A., & Fereres, E. (2021). Using NDVI for the assesment of canopy cover in agricultural crops within modelling research. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106038>
- Thapa, S., Rudd, J. C., Xue, Q., Bhandari, M., Reddy, S. K., Jessup, K. E., Liu, S., Devkota, R. N., Baker, J., & Baker, S. (2019). Use of NDVI for characterizing winter wheat response to water stress in a semi-arid environment. *Jornal of Crop Improvement*, 33(5), 633-648. <https://doi.org/10.1080/15427528.2019.1648348>
- Torres Madroñero, M. C., & Trochez González, J. (2023). El mercado del aguacate en Colombia. *Apuntes del Cenes*, 42(75), 273-292. <https://doi.org/10.19053/01203053.v42.n75.2023.15286>
- Torres-Madronero, M., Rondón, T., Franco, R., Casamitjana, M., Trochez, J. (2023). Caracterización espectral de aguacate Persea americana Mill cv. Hass empleando espectrometría e imágenes en el rango visible a infrarrojo cercano. *TecnoLógicas*, 26(56). <https://doi.org/10.22430/22565337.2567>
- Velusamy, P., Rajendran, S., Mahendran, R. K., Naseer, S., Shafiq, M., Choi, J. G. (2022). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Precision Agriculture: Applications and Challenges. *Energies*, 15(217), 1-19. <https://doi.org/10.3390/en15010217>
- Zamani-Noor, N., & Feistkorn, D. (2022). Monitoring Growth Status of Winter Oilseed Rape by NDVI and NDYI Derived from UAV-Based Red-Green-Blue Imagery. *Agronomy* 12(9), <https://doi.org/10.3390/agronomy12092212>
- Zermeño, A., Rodríguez, B. Melendres, A., Ramírez, H., Cárdenas, J., & Munguía, J. (2015). Extracto de alga marina y su relación con fotosíntesis y rendimiento de una plantación de vid. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (12), 2437-2446. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?i>