



UNIVERSIDAD
DE PAMPLONA



SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN A TRAVÉS DE IMÁGENES **MULTIESPECTRALES**

Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero
Diego Alfonso Peláez Carrillo
Alfonso Eugenio Capacho Mogollón



SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA EL DESARROLLO DE
LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN A TRAVÉS DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES

Soluciones tecnológicas para el desarrollo de la agricultura de precisión a través de imágenes multiespectrales

Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero
Diego Alfonso Peláez Carrillo
Alfonso Eugenio Capacho Mogollón



Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz

Soluciones tecnológicas para el desarrollo de la agricultura de precisión a través de imágenes multiespectrales /

Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero, Diego Alfonso Peláez Carrillo, Alfonso Eugenio Capacho Mogollón -- Pamplona: Universidad de Pamplona. 2023.

133 p. ; 17 cm x 24 cm.

ISBN: 978-628-7656-11-6

© Universidad de Pamplona

Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.

www.unipamplona.edu.co

Teléfono: 6075685303

Soluciones tecnológicas para el desarrollo de la agricultura de precisión a través de imágenes multiespectrales

ISBN: 978-628-7656-11-6

Primera edición, noviembre 2023

Colección Tecnologías e Ingenierías

© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D

Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Jefe Sello Editorial Unipamplona: Caterine Mojica Acevedo

Corrección de estilo: Andrea del Pilar Durán Jaimes

Diseño y Diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero

Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.

CONTENIDO

Introducción	7
Capítulo I	
Generalidades y marco conceptual en el contexto de la agricultura de precisión y del uso de las nuevas tecnología	13
Fuente de ondas electromagnéticas	15
Imágenes multiespectrales	21
Agricultura de precisión	30
Vehículos aéreos no tripulados	32
Capítulo II	
Combinación de bandas espectrales e índices de vegetación	37
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	41
Índice de vegetación de clorofila (IC)	45
Índice de clorofila verde (GCI O CI GREEN)	47
Índice de clorofila de borde rojo (CI RED-EDGE O RCI)	48
Índice de vegetación de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE)	49
Capítulo III	
Adquisición de imágenes multiespectrales	55
Cámara multiespectral	58
Procedimiento para la adquisición de imágenes	64
Capítulo IV	
Procesamiento de las imágenes multiespectrales	71
Capítulo V	
Análisis de las imágenes multiespectrales	81
Caracterización de suelos por medio de los resultados del procesamiento de imágenes	85

Primer ejemplo de análisis estadístico de los resultados	87
Segundo ejemplo de análisis estadístico de los resultados	89
Tercer ejemplo de análisis estadístico de los resultados	95
Capítulo VI	
Conceptualización y uso de otros índices espectrales (CI – NDRE) utilizados en la agricultura de precisión	99
Metodología para la implementación de los índices espectrales CI Y NDRE	103
Ejemplo interpretación índices CI Y NDRE	104
Capítulo VII	
Aplicaciones de las imágenes multiespectrales	111
Referencias bibliográficas	125

INTRODUCCIÓN

En este libro los autores pretenden transmitir la información necesaria y los resultados de investigaciones que demuestren que, por medio de la implementación de las imágenes multiespectrales como herramienta de adquisición remota de información para el monitoreo de cultivos, se puede identificar de antemano las características del terreno en cuanto a la calidad y cantidad de la vegetación presente, además, de la identificación de problemas en las áreas que son materia de estudio. Se busca destacar la integración del sistema en UAV, lo que permite, entre otras ventajas, una movilización rápida y eficiente por grandes extensiones de tierra a cualquier altura, complementando las actividades productivas de los cultivadores en el desarrollo de métodos de inspección no destructiva que permite suministrar información real y precisa de los cultivos de diferentes modelos agroecológicos.

Es importante resaltar que la elaboración de este libro nace como complemento a el trabajo que se ha venido realizando en la Universidad de Pamplona en los últimos años a través de los grupos de investigación de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura y la Facultad de Ciencias Agrarias, específicamente desde el grupo de investigación de sistemas multisensoriales (GISM) perteneciente al departamento de Eléctrica, Electrónica, Sistemas y Telecomunicaciones (EEST), en la línea de investigación de inteligencia artificial y tratamiento de imágenes, que ha permitido desarrollar una gran cantidad de productividad de generación de nuevo conocimiento y apropiación social del conocimiento, pero como principal objetivo la formación de recurso humano tanto en pregrado como en posgrado, incluyen-

do el trabajo de maestría en controles industriales “caracterización de suelos con potencial productivo en el departamento de Norte de Santander a través de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) usando imágenes multiespectrales” del investigador Diego Alfonso Peláez Carrillo, con la dirección del Ph. D Oscar Eduardo Gualdron Guerrero, autores partícipes de este documento, por lo que parte de este libro ha sido extraído de dicho trabajo el cual se encuentra ubicado en el repositorio bibliográfico de la Universidad de Pamplona, siendo utilizado como referencia en algunos espacios del texto presente.

El documento está distribuido en una serie de capítulos que abordan todo lo mencionado anteriormente, partiendo de un capítulo de generalidades y conceptos básicos para llevar una trazabilidad acorde al objetivo del mismo, necesarios para articular de buena manera los elementos de conocimiento de la agricultura de precisión, el manejo y el uso de las herramientas tecnológicas, así como la implementación de las imágenes multiespectrales en general. El segundo capítulo se centra en la parte conceptual, correspondiente a la combinación de las diferentes opciones de bandas espectrales y la generación de una serie de índices de vegetación existentes en la actualidad, haciendo un barrido detallado de los conceptos y las aplicaciones de cada uno de los índices definidos. En el tercer capítulo encontramos lo correspondiente a la metodología y estrategias para la adquisición de imágenes multiespectrales, ya en el cuarto capítulo y quinto tratan sobre el procesamiento y análisis de las imágenes multiespectrales como ayuda a los agricultores para el monitoreo y desarrollo de los cultivos. En el capítulo sexto, el documento se enfoca en la conceptualización y uso de otros índices espectrales, específicamente en los índices de clorofila, y NDRE, utilizados en la agricultura de precisión. Finalmente, en el séptimo capítulo se hace un recopilatorio actual de las diferentes aplicaciones en las que las imágenes multiespectrales aportan a la agricultura de precisión.

Ahora, a modo de introducción, es importante mencionar que la agricultura es una de las principales actividades económicas llevadas a cabo por los seres humanos y su sostenibilidad es crucial. Por lo tanto, es importante buscar formas de hacer que esta actividad sea más eficiente. La agricultura de precisión es una solución que implica la incorporación de nuevas tecnologías para optimizar los recursos utilizados en la producción agrícola y lograr un mayor rendimiento de los activos involucrados en esta actividad. Sin embargo, para obtener un impacto significativo, es fundamental desarrollar estrategias para su incorporación al sector productivo y proporcionar capacitación y socialización adecuadas para que la información y el trabajo con la tecnología puedan fluir sin dificultades. De esta manera, se puede asegurar que se aprovechen al máximo los beneficios que ofrece la agricultura de precisión.

La agricultura es uno de los sectores más importantes de la economía colombiana. Representa el 15% del PIB, el 40% de la producción nacional y el 50% del empleo. Además, es responsable del suministro alimenticio de la población colombiana. El sector agropecuario es uno de los más dinámicos de la economía colombiana y contribuye a la estabilidad de la moneda nacional. La agricultura contribuye también con la preservación de los ecosistemas y la biodiversidad natural del país y genera grandes cantidades de divisas gracias a sus exportaciones. Por último, es una fuente importante de empleo para muchos colombianos, principalmente en el área rural.

Hoy en día en Colombia se cuenta con conocimiento y experiencia para el desarrollo de nuevas tecnologías, que junto a un plan de implementación garantizan beneficios y productividad al campo. La implementación de la agricultura de precisión puede ser una solución viable para mejorar la competitividad y la sostenibilidad en el campo colombiano, al reducir los costos y aumentar la abundancia en las producciones. Además, puede mejorar los procesos de comercialización y convertir el campo en una

industria productiva que tenga en cuenta la sostenibilidad ambiental. De esta manera, se puede fomentar un desarrollo sostenible y una mejoría en las condiciones económicas y ambientales de la actividad agrícola en Colombia.

La agricultura de precisión es una de las innovaciones más importantes para mejorar la producción agrícola. A través de esta innovación, los agricultores pueden mejorar la eficiencia y la productividad de sus cultivos. Esto se logra mediante el uso de tecnologías modernas para controlar y optimizar el uso de los recursos, como el agua, fertilizantes, pesticidas y herbicidas. Estas herramientas permiten a los agricultores aplicar los recursos de manera precisa y apropiada en los campos, lo que contribuye a mejorar la calidad y la cantidad de los productos agrícolas. Además, la agricultura de precisión también ofrece una alternativa más sostenible para el medio ambiente. Esto se debe a que los recursos se aplican de manera más precisa y eficiente.

El rápido avance de la agricultura de precisión ha impulsado la investigación en diversas áreas, incluyendo patrones demográficos, evaluación agronómica y desarrollo de técnicas para el uso eficiente del suelo. Además, esta práctica puede proporcionar beneficios tanto ambientales como económicos. En la actualidad, Colombia es un país con una actividad agropecuaria importante que produce una amplia variedad de cultivos en distintas zonas geográficas y climas, tanto en planicies como en zonas de alta montaña. A pesar de esto, gran parte de la agricultura en Colombia sigue utilizando métodos tradicionales en el cultivo, monitoreo del crecimiento de las plantas, verificación del suelo, cosecha y postcosecha.

Uno de los principales desafíos que se enfrenta al iniciar un proceso productivo en la agricultura es verificar la calidad del terreno disponible para el cultivo. Esto es importante porque, dependiendo del estado en que se encuentre el terreno, puede

ser necesario realizar procesos de fertilización para garantizar un óptimo desarrollo de la vegetación. Es fundamental tener en cuenta la transformación de la vegetación durante el proceso, ya que esto puede ser un indicador importante del estado real del ecosistema. Sin embargo, la degradación de la capa vegetal es un fenómeno complejo y difícil de caracterizar.

En la actualidad, la inspección de los cultivos implica una evaluación y análisis directos para determinar la salud de las plantas, detectando muestras que puedan estar afectadas o zonas con un crecimiento deficiente. Sin embargo, este enfoque puede acelerar la degeneración del cultivo y provocar daños en el medio ambiente. A pesar de esto, este método es necesario para determinar el tipo y estado del cultivo, y se accede a las áreas afectadas para obtener una evaluación directa.

Es importante utilizar tecnología avanzada para evitar daños y ahorrar tiempo en la inspección de cultivos. Esto puede lograrse mediante el monitoreo de los cultivos más adecuados y el uso de nuevas tecnologías de adquisición remota de información, que permiten obtener imágenes multiespectrales y metadatos detallados que incluyen información del sistema de posicionamiento global. De esta manera, se puede obtener información directa de los campos y evitar el contacto continuo que puede dañar el cultivo y causar retrasos.

La agricultura de precisión utiliza la información de los satélites globales para obtener datos precisos de posicionamiento. Estos datos se utilizan para generar información geo-referenciada de las parcelas agrícolas y poder determinar la variabilidad del rendimiento de los cultivos en diferentes áreas geográficas con mayor precisión. De esta forma, se puede tener una mejor comprensión de la variabilidad de los cultivos en distintas zonas y tomar decisiones informadas para optimizar su rendimiento.

La utilización de UAV (vehículos aéreos no tripulados) ha revolucionado la forma en que se lleva a cabo la inspección fitosanitaria. Estos vehículos aéreos no tripulados se han convertido en una herramienta valiosa para la agricultura de precisión debido a su capacidad para cubrir grandes extensiones de terreno de manera rápida y eficiente. Los UAV están equipados con cámaras multispectrales que permiten obtener imágenes detalladas y precisas de la superficie terrestre. Además, pueden volar a diferentes alturas y ajustar su velocidad para adaptarse a las necesidades específicas del cultivo y obtener resultados óptimos. También son capaces de trabajar en terrenos irregulares y difíciles de alcanzar para otros medios de transporte, lo que los convierte en una opción ideal para la obtención de datos en áreas de difícil acceso.

Mediante la utilización de imágenes multispectrales capturadas por cámaras específicas y su posterior procesamiento, es posible obtener información precisa y confiable. Este tipo de imágenes permiten analizar el espectro electromagnético de las diferentes zonas de la siembra, lo que facilita la caracterización del suelo y la identificación de patrones de comportamiento en los cultivos. De esta forma, se puede contribuir a largo plazo con la implementación de modelos en la región que permitan planificar una producción óptima, eficiente y sostenible durante los diferentes ciclos de crecimiento de los cultivos. Además, estas imágenes multispectrales también pueden ser utilizadas para detectar áreas afectadas por enfermedades o plagas en los cultivos, lo que permite una pronta intervención y prevención de posibles pérdidas.

Gracias al uso de la tecnología de monitoreo remoto, es posible ahorrar una cantidad significativa de dinero en la inversión de productos agrícolas destinados a la fertilización del terreno y al crecimiento de plantas. Además, esta tecnología permite identificar las áreas con escasez y abundancia de nutrientes mediante el análisis de variables como los Índices Normalizados de Vegetación (NDVI), lo que permite detectar posibles problemas a largo plazo y mejorar el rendimiento por hectárea de áreas con un alto potencial agroecológico.

CAPÍTULO I:

GENERALIDADES Y MARCO CONCEPTUAL EN EL CONTEXTO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y DEL USO DE LAS NUEVA TECNOLOGÍAS



CAPÍTULO I

GENERALIDADES Y MARCO CONCEPTUAL EN EL CONTEXTO DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y DEL USO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS

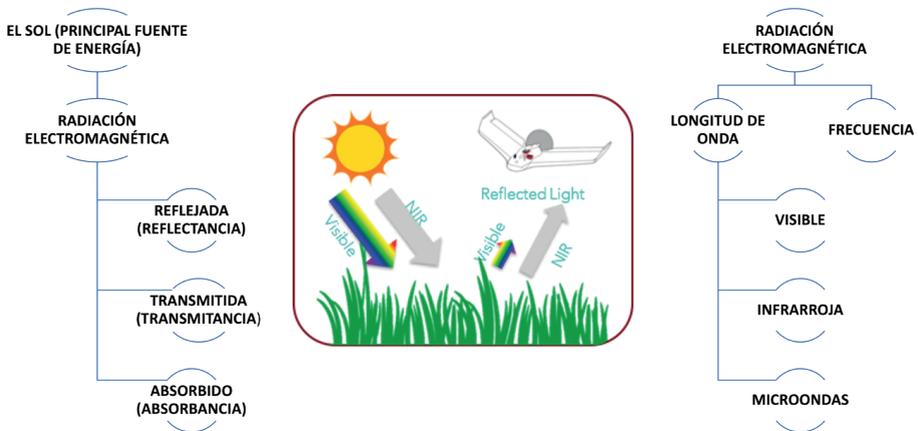
En este capítulo se realiza una contextualización de los temas más relevantes que permitan entender a fondo el concepto básico de la fuente de las ondas electromagnéticas, el comportamiento de la incidencia de estos y como los espectros electromagnéticos nos proveen de una información útil. De igual manera, se presenta el concepto de imágenes multiespectrales y las aplicaciones útiles que actualmente brinda esta tecnología en la detección de plagas y las características fenológicas de los cultivos, partiendo de dichas imágenes se desarrolla un nuevo concepto en el sector primario, como lo es la agricultura de precisión que no es más que el desarrollo de la idea de aprovechar lo mejor posible los recursos y aumentar la producción. Además, de presentar la temática que se desenvuelve alrededor de los vehículos aéreos no tripulados, que se presentan como una plataforma que puede albergar diferentes tecnologías acordes a un uso específico, presentándose las características generales y las aplicaciones de teledetección y monitoreo.

Fuente de ondas electromagnéticas

Las fuentes de ondas electromagnéticas corresponden a cualquier dispositivo que puede emitir radiación electromagnética. Estas fuentes incluyen dispositivos como antenas, láseres, dispositivos de radiofrecuencia, hornos de microondas y dispositivos eléctricos y electrónicos, entre otros. Las ondas electro

magnéticas emitidas por estas fuentes viajan a la velocidad de la luz a través de un medio material o del vacío, y pueden ser detectadas por receptores sensibles a la radiación (Pelaez, Gualdron, & Torres, 2020). La principal fuente de las ondas electromagnéticas es el sol. El sol emite una amplia gama de ondas electromagnéticas, desde rayos gamma hasta microondas, que se extienden por el espacio. Estas ondas viajan a través del universo, llegando a la Tierra y proporcionándonos luz y calor. El sol es el principal emisor de ondas electromagnéticas debido a su enorme tamaño y temperatura. Estas ondas electromagnéticas se forman cuando los electrones son arrastrados por el campo magnético del sol, acelerándose y emitiendo energía. Dicha energía se propaga a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas, que incluyen luz visible, rayos ultravioleta y rayos X, siendo ellas extremadamente importantes para la vida en la Tierra ya que nos permiten recibir energía solar, necesaria para la fotosíntesis y otros procesos biológicos (Gregg et al., 2020).

Figura 1
Comportamiento de las ondas electromagnéticas



Fuente: Equipo investigador

En la figura 1 se describe la forma en la que se pueden clasificar las ondas electromagnéticas. Cuando una fuente de luz como el sol incide sobre un objeto, la luz se comporta de diferentes maneras dependiendo de la composición del objeto y de la longitud de onda de la luz. La luz puede pasar a través del objeto, ser reflejada por él o ser absorbida (Hoffmann, 2001).

Si la luz incide en un objeto transparente como el vidrio, la luz pasa a través del objeto sin ser alterada. Cuando la luz incide en un objeto opaco como una pared, parte de la luz se refleja, parte se absorbe y parte puede ser transmitida. Si la luz incide en un objeto mate, la mayor parte de la luz se refleja, mientras que, si la luz incide en un objeto reflectante, la mayor parte de la luz se refleja. Finalmente, si la luz incide en un objeto luminoso, como una lámpara, la luz se emite en todas direcciones (Sun et al., 2020).

La adquisición remota se basa en la interacción entre la radiación electromagnética (REM) y los objetivos de interés. Esa interacción será registrada y analizada de acuerdo con fines específicos y ocurre de la siguiente manera: Del total de radiación incidente sobre el objetivo, parte es reflejada por éste (reflectancia); parte es transmitida (transmitancia), o sea que atraviesa el objetivo; y parte es absorbida (absorbancia), para posteriormente ser emitida en forma de calor (L'Annunziata, 2023).

La reflectancia es una medida de la cantidad de luz que es reflejada por una superficie. Esta medida se expresa como un porcentaje de la luz incidente, que es la luz que incide en la superficie. La reflectancia varía dependiendo del ángulo de incidencia de la luz y de las propiedades de la superficie, como el color, la rugosidad y la textura. La reflectancia también puede variar según la longitud de onda de la luz incidente. Por ejemplo, una superficie reflectante puede reflejar más luz de una longitud de onda determinada que de otra (Suomalainen et al., 2021).

La reflectancia es útil para medir la cantidad de luz que es reflejada por una superficie. Esta información se utiliza para determinar el color y la luminosidad de una superficie. La reflectancia también es útil para medir la eficiencia de los espejos y los paneles solares. (Bendig et al., 2020)

La transmitancia es una medida de la cantidad de luz que es transmitida a través de un material. Esta medida se expresa como un porcentaje de la luz incidente, que es la luz que incide en el material. La transmitancia varía dependiendo de la longitud de onda de la luz incidente y de las propiedades del material, como el grosor y la absorción (Akatsu et al., 2022) .

La transmitancia es útil para medir la cantidad de luz que atraviesa un material. Esta información se utiliza para calcular la luminosidad de un material y para diseñar sistemas ópticos, como lentes, filtros y espejos. La transmitancia también se utiliza para estudiar el comportamiento de la luz a través de los materiales (Ruiz-Arias, 2022).

La absorbancia es una medida de la cantidad de luz que es absorbida por un material. Esta medida se expresa como un porcentaje de la luz incidente, que es la luz que incide en el material. La absorbancia varía dependiendo de la longitud de onda de la luz incidente y de las propiedades del material, como el color y la rugosidad.

La absorbancia es útil para medir la cantidad de luz que es absorbida por un material. Esta información se utiliza para medir la cantidad de luz que un material absorbe y para calcular la cantidad de luz que se refleja y se transmite. La absorbancia también se utiliza para estudiar cómo los materiales absorben la luz. Las ondas electromagnéticas se miden por su longitud de onda, frecuencia y amplitud (Atia et al., 2023).

Otro concepto importante es lo relacionado a la longitud de onda la cual, es la distancia entre dos crestas consecutivas de una onda electromagnética. Esta longitud de onda determina la frecuencia de la onda, que se mide en Hertz (Hz). Esta frecuencia es el número de veces que una onda pasa a través de un punto en un segundo. Las ondas electromagnéticas con longitudes de onda más largas tienen una frecuencia más baja, mientras que las ondas con longitudes de onda más cortas tienen una frecuencia más alta. La luz visible, por ejemplo, tiene una longitud de onda de 380 nanómetros (nm) a 780 nm y una frecuencia de entre 4×10^{14} hertz y 8×10^{14} hertz (de Abreu Fontes et al., 2021).

La amplitud es la cantidad de energía transportada por una onda electromagnética. Esta energía se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Cuanto mayor es la amplitud de una onda, mayor es la cantidad de energía que transporta (González Bosquet, 2003).

Las ondas electromagnéticas también pueden medirse según su polarización, que es el patrón de la onda. La polarización horizontal representa ondas que se propagan en línea recta, mientras que la polarización vertical representa ondas que se propagan en una dirección cíclica (Rodríguez, 2018).

Las ondas electromagnéticas se clasifican según su longitud de onda en rayos gamma, rayos X, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja y microondas. Los rayos gamma tienen una longitud de onda muy corta, desde menos de 10 picómetros (pm) hasta aproximadamente 0,1 nanómetros (nm). Estas ondas tienen una frecuencia muy alta, entre 10^{20} hertz y 10^{24} hertz. Estas ondas pueden usarse para destruir células cancerosas. Los rayos X tienen una longitud de onda entre 0,01 nanómetros y 10 nanómetros. Estas ondas tienen una frecuencia de entre 10^{17} hertz y 10^{20} hertz. Estas ondas son esenciales para la radiografía y la tomografía computarizada (Almeida & Gregorio-Hetem, 2022).

Las bandas de longitud de onda son grupos de ondas electromagnéticas con longitudes de onda relativamente similares. Estas bandas se usan para describir la luz visible, la luz infrarroja y la luz ultravioleta. Por ejemplo, La luz visible se divide en seis bandas: rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. Estas bandas tienen longitudes de onda entre 380 nanómetros y 780 nanómetros (Verrelst et al., 2016).

La luz infrarroja se divide en tres bandas: cercana (IR-C), media (IR-M) y lejana (IR-L). Estas bandas tienen longitudes de onda entre 750 nanómetros y 1.400 nanómetros (Yavru et al., 2022).

La luz ultravioleta se divide en tres bandas: cercana (UV-C), media (UV-M) y lejana (UV-L). Estas bandas tienen longitudes de onda entre 100 nanómetros y 400 nanómetros (Mikhail et al., 2023).

La clasificación de las longitudes de onda se relaciona con las bandas de longitudes de onda a través de la categorización de las ondas electromagnéticas. La clasificación de las ondas electromagnéticas en rayos gamma, rayos X, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja y microondas se basa en la longitud de onda de cada onda. Esta clasificación se utiliza para identificar la longitud de onda de una onda específica y, a su vez, para identificar el grupo de ondas con longitudes de onda similares, también conocido como las bandas de longitudes de onda. Las bandas de longitudes de onda permiten que los científicos estudien y midan con precisión las ondas electromagnéticas en una gama específica de longitudes de onda. Aunque existen sensores que no dependen de esa fuente natural, pues poseen su propia fuente de energía, como el caso de los radares. La energía emitida por la fuente puede atravesar la atmósfera terrestre, interactuar con ella (Pu et al., 2015).

Imágenes Multiespectrales

Las imágenes multiespectrales son imágenes que muestran la luz en diferentes longitudes de onda (Rahiche et al., 2020). Estas imágenes se usan para estudiar la composición de la superficie de un objeto y para determinar su reflectancia. Las imágenes multiespectrales se obtienen mediante el uso de sensores especiales que detectan la luz en diferentes longitudes de onda (Chaminda Bandara et al., 2020). Estos sensores recopilan datos en diferentes bandas de longitud de onda, como la luz visible, la luz infrarroja cercana, la luz infrarroja media y la luz infrarroja lejana. Estos datos se combinan para crear una sola imagen que muestra la luz reflejada en todas las bandas de longitud de onda (T. Zhang et al., 2023).

Las imágenes multiespectrales son conjuntos de datos de imágenes capturadas en múltiples bandas o longitudes de onda del espectro electromagnético, que van más allá de lo que puede ser percibido por el ojo humano. Estas imágenes se utilizan comúnmente en aplicaciones de agricultura de precisión, minería y ciencias de la Tierra para determinar la reflectancia de la superficie de un objeto (Wang et al., 2022). Esto se utiliza para identificar diferentes materiales, identificar áreas de vegetación, localizar minerales y para estudiar los cambios en la superficie de la Tierra (Bonnaire Rivera et al., 2021).

Las imágenes multiespectrales se adquieren mediante el uso de sensores especiales que detectan la luz en diferentes longitudes de onda. Estos sensores recopilan datos en diferentes bandas de longitud de onda, como la luz visible, la luz infrarroja cercana, la luz infrarroja media y la luz infrarroja lejana. Estos datos se combinan para crear una sola imagen que muestra la luz reflejada en todas las bandas de longitud de onda (Cui et al., 2016).

Los sensores multiespectrales pueden montarse en aviones,

vehículos aéreos no tripulados, satélites o robots terrestres. Estos sensores recopilan datos a partir de una variedad de fuentes, como el sol, luminarias artificiales, fuegos artificiales y láseres. Estos datos se procesan para crear imágenes multiespectrales detalladas que muestran la luz reflejada en diferentes longitudes de onda (Kaljahi et al., 2019). Estas imágenes se utilizan para estudiar la composición de la superficie de un objeto.

Por otro lado, un sensor óptico es un dispositivo que detecta la luz y la convierte en señales eléctricas para su procesamiento. Estos sensores se utilizan para una variedad de aplicaciones, como la detección de movimiento, el nivel de luz y la medición de distancia. Los sensores ópticos se pueden clasificar en dos categorías principales: sensores pasivos y sensores activos (Yu et al., 2024). Los sensores pasivos detectan la luz que ya está presente en el entorno, mientras que los sensores activos emiten luz para detectar objetos u objetivos. Los sensores ópticos pasivos se utilizan en los sistemas de detección de movimiento para detectar objetos en un área, como los sensores de movimiento infrarrojos. Los sensores ópticos activos se utilizan para medir distancias o para detectar objetos en movimiento, como los sistemas de detección de movimiento láser (L. Zhang et al., 2023).

Las cámaras multiespectrales se clasifican como sensores ópticos activos. Estos sensores emiten luz en un rango específico de longitudes de onda y luego detectan la luz reflejada de los objetos. Estos sensores se utilizan para detectar objetos en movimiento, medir distancias y para la identificación y análisis de objetos (Shafiee et al., 2023).

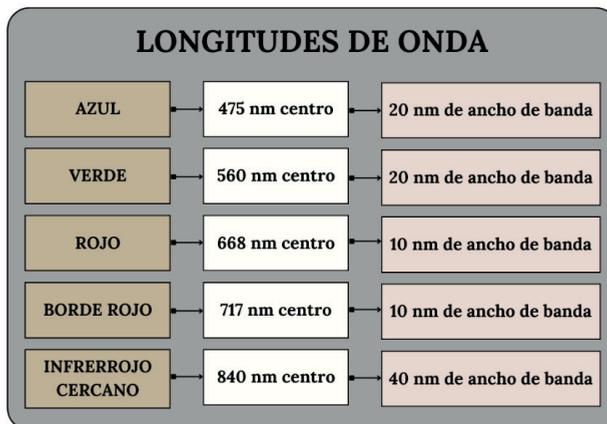
La teledetección es una tecnología que se utiliza para recopilar información del entorno a distancia. Esta información se recopila mediante el uso de sensores remotos, como sensores ópticos. Estos sensores recopilan información sobre la superfi-

cie de la Tierra, como la temperatura, la humedad, la luz, el movimiento y otros parámetros. Esta información se utiliza para realizar estudios de la superficie de la Tierra y para fines militares, entre otros usos (Yue & Tian, 2020).

Las herramientas multispectrales utilizadas en las tecnologías de teledetección actuales ofrecen alternativas eficientes para monitorear cultivos de gran extensión, lo cual es una estrategia poco común, además de ser ampliamente utilizadas en el control de calidad e inspección de la producción de alimentos debido a que es una técnica no destructiva (Alabi et al., 2022). Aunque es una tecnología relativamente nueva, presenta dos grandes desventajas: el alto costo de los sistemas para su implementación y la gran cantidad de datos que se adquieren en un tiempo muy reducido, lo que requiere un alto poder computacional para procesar la información a una velocidad razonable. En este sentido, es necesario tener en cuenta el marco conceptual que rodea el uso de esta tecnología y cómo puede ser aplicada de manera eficiente en la agricultura para mejorar la producción y reducir costos (Orlando et al., 2022).

Figura 2

Longitudes de onda disponibles en cámara multispectral



Fuente: Equipo investigador

Las cámaras multiespectrales utilizan una variedad de bandas espectrales como se muestra en la Figura 2, y la selección de estas bandas se realiza mediante dos métodos: filtro y envoltura. El resultado final de la captura de imágenes multiespectrales es un conjunto de imágenes que corresponden a la cantidad de bandas utilizadas. El análisis de estas imágenes puede llevarse a cabo mediante métodos estadísticos supervisados o no supervisados. En ambos métodos, las imágenes se dividen en píxeles y se agrupan por características similares, y se etiquetan para que el algoritmo de clasificación pueda identificar la clase a la que pertenece cada píxel (Nandibewoor et al., 2015). Mientras que los métodos supervisados requieren etiquetar las muestras de entrenamiento, los no supervisados no necesitan esta información, aunque pueden perder la correlación entre los grupos y las clases que se desea obtener.

Las herramientas de predicción en tiempo real permiten a los usuarios predecir el comportamiento futuro de una variable, como el precio de un activo, el clima o la demanda de un producto (Walshe et al., 2020). Estas herramientas pueden ser utilizadas para tomar decisiones de inversión, para optimizar inventarios o para ayudar a planificar eventos. Las herramientas de predicción en tiempo real se basan en datos recopilados en tiempo real para construir modelos predictivos. Estos modelos pueden ser construidos utilizando técnicas de aprendizaje automático, lo que significa que pueden aprender de los datos para mejorar la predicción (Lan et al., 2020).

El interés por obtener y desarrollar herramientas para predecir parámetros en tiempo real ha llevado al desarrollo de técnicas de inspección no invasivas en los cultivos utilizando imágenes espectrales. A pesar de ser una técnica relativamente nueva, se espera que proporcione resultados precisos, aunque el análisis de los datos debe realizarse offline debido a la gran cantidad de información que se debe procesar para obtener una respuesta confiable. Para asegurar el éxito en el uso de estos

sensores, se requiere un proceso de calibración radiométrica exhaustivo para obtener datos precisos, ya que estos sensores son muy sensibles a la cantidad de luz presente en el ambiente.

La calibración radiométrica se realiza para obtener mediciones precisas de la cantidad de luz que llega al sensor de la cámara multiespectral, lo que permitirá obtener información confiable de las imágenes. Para llevar a cabo la calibración radiométrica se deben realizar una serie de pasos, como la eliminación de señales de ruido y la corrección por las condiciones atmosféricas presentes en el momento de la captura de la imagen (Cao et al., 2019).

Una de las formas de realizar la calibración radiométrica es mediante la utilización de paneles de referencia, que son objetos con propiedades espectrales conocidas y estables. Estos paneles se colocan en la misma posición que los objetos que se van a medir y se utilizan para establecer un nivel de referencia de la luz incidente (Bourgeon et al., 2016).

Otro método de calibración radiométrica es mediante el uso de modelos matemáticos que permiten la corrección de las variaciones en la sensibilidad del sensor a lo largo del espectro electromagnético. Estos modelos se basan en mediciones realizadas en el laboratorio o en el campo, utilizando equipos especializados para obtener mediciones precisas de la luz en diferentes longitudes de onda (Bouvet, 2014).

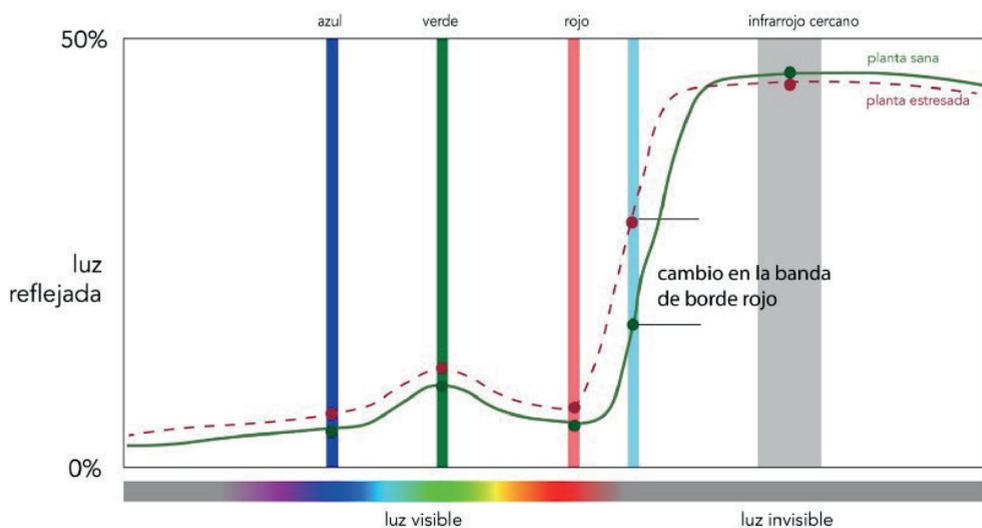
Es importante mencionar que el proceso de calibración radiométrica debe realizarse de forma rigurosa y exhaustiva, ya que la precisión de los datos obtenidos dependerá en gran medida de la calidad de la calibración.

Al analizar las bandas espectrales, es crucial tener en cuenta el ancho de banda, independientemente del índice de vegetación utilizado, ya que esto es esencial para determinar la preci-

sión de un sensor multispectral. Los sensores de banda ancha, como las cámaras modificadas, miden grandes fragmentos del espectro de luz, lo que genera un promedio de la luz reflejada en esa región. En cambio, los sensores de banda estrecha son dispositivos que capturan la reflectancia de un área muy específica del espectro electromagnético. En contraste con los sensores de banda ancha que miden grandes fragmentos del espectro de luz y generan un valor promedio de la luz reflejada en esa región, los sensores de banda estrecha producen información más precisa sobre los cambios sutiles que pueden estar ocurriendo en puntos clave. Estos sensores pueden ser monocromáticos o tener varias bandas estrechas que se centran en longitudes de onda específicas del espectro electromagnético.

Figura 3

Comparación huella espectral planta sana vs planta estresada



Fuente: Punto Focal (2018)

Podemos ilustrar esta idea teniendo en cuenta la figura 3, al considerar la banda de borde rojo, que se ubica entre las bandas roja e infrarroja cercana y es fundamental en la medición del contenido de clorofila de la planta. Cuando una planta experimenta estrés, la variación es más evidente en la banda de borde rojo, como se aprecia en el gráfico anterior. No obstante, una banda de borde rojo ancha se solapará con las bandas vecinas, lo que dará lugar a una medición menos precisa. En contraposición, el sensor de banda estrecha (en color rojo) es más sensible a los diferentes niveles de clorofila que el sensor de banda ancha (en gris). En concreto, la banda estrecha es 1,6 veces más sensible que la banda ancha.

En la agricultura de precisión, una de las tecnologías utilizadas para la percepción remota es la toma de imágenes del terreno, suelo y cobertura en áreas de cultivo. Estas imágenes se obtienen simultáneamente en múltiples rangos del espectro electromagnético, conocidos como bandas, debido a las propiedades espectrales del suelo y las plantas en diferentes etapas de crecimiento. Estas propiedades incluyen reflectancia, transmitancia y absorbancia, y están estrechamente relacionadas con factores como la actividad fotosintética, la cantidad de agua, la clorofila y la biomasa. La adquisición de estas imágenes es necesaria para mejorar la precisión en la agricultura y aumentar la eficiencia en el manejo de los cultivos (Deng et al., 2018).

Las imágenes obtenidas a través de la percepción remota han demostrado ser una herramienta eficaz en la agricultura de precisión. Por ejemplo, se han utilizado para estimar el contenido de carotenoides en hojas de vid, para detectar el estrés hídrico en las plantas y para generar modelos de superficie para estimar el rendimiento de los cultivos de maíz. Para obtener y procesar estas imágenes se utiliza un sistema de teledetección, que consta de una fuente de energía electromagnética, la cubierta terrestre (suelo y cultivo), un sistema de sensores (ya sea satelital, terrestre o aerotransportado), un sistema de recep-

ción (si se deben transmitir las imágenes en tiempo real o desde plataformas satelitales) y un sistema de tratamiento digital y análisis de datos, que permite interpretar y dar sentido a la información obtenida. Este proceso es crucial para mejorar la precisión en la agricultura y ayudar a los agricultores a tomar decisiones más informadas sobre el manejo de sus cultivos (Bastiaansen et al., 2000).

En la agricultura, las coberturas de interés tienen firmas espectrales específicas, que son curvas de reflectividad espectral que se encuentran en los rangos de longitudes de onda del espectro de la luz visible (~400nm a ~700nm) y el infrarrojo cercano, medio y térmico (~700nm a ~1400nm). En el caso de las coberturas vegetales, se pueden distinguir diferencias notables en las firmas espectrales entre la vegetación sana y estresada, y se pueden analizar cuantitativamente mediante diversas técnicas, como el cálculo de índices vegetacionales. Gracias a estos análisis, es posible realizar diagnósticos de variables clave, como la productividad. Este conocimiento es importante para los agricultores, ya que les permite obtener información sobre la salud de sus cultivos y tomar medidas para mejorar la producción y la calidad de los mismos (Doering et al., 2016).

En la agricultura de precisión se han evaluado tecnologías de adquisición de imágenes que consisten en el registro de la interacción entre la radiación electromagnética del sol y las coberturas vegetales. Estos sistemas implican el análisis y procesamiento de características de la imagen, como su reflectancia en distintas bandas espectrales, la forma y las dimensiones de los objetos. Algunas aplicaciones de estos sistemas incluyen la cartografía y evaluación de áreas cultivadas, la detección de zonas afectadas y el análisis de suelos. Los sistemas de captura remota de imágenes se componen de un sensor y una plataforma de transporte. Las características de resolución espacial, radiométrica, temporal y espectral de las imágenes capturadas dependen de las características técnicas y operativas de estas

partes. Este conocimiento es importante para los agricultores, ya que les permite seleccionar el sistema de adquisición de imágenes más adecuado para sus necesidades y obtener información valiosa para mejorar la gestión de sus cultivos (Maes & Steppe, 2019).

Como una limitación importante se encuentra la necesidad de realizar una calibración en campo de los equipos de captura de imagen, lo que depende de las condiciones meteorológicas, como el nivel de radiación solar incidente. Esta calibración es esencial para lograr consistencia en la captura de datos en diferentes situaciones. Aunque se han desarrollado herramientas de software que utilizan modelos matemáticos para simular el comportamiento de la firma espectral de las plantas, la calibración radiométrica y geométrica de cada sistema es importante para obtener resultados confiables (Talaviya et al., 2020). Para lograrlo, se han desarrollado métodos que implican el análisis físico del sistema y experimentación en campo con sistemas UAV-cámara multispectral. Además, se utiliza software especializado y se realiza la caracterización de los sensores en el laboratorio.

La tecnología utilizada para procesar las imágenes capturadas por vehículos aéreos se llama georreferenciación directa, la cual consiste en recopilar las imágenes capturadas por los sensores, corregirlas geométrica y radiométricamente, unir las en un mosaico y asignar cada píxel a una proyección geográfica para que puedan realizarse mediciones y análisis en el terreno. La mayoría de las técnicas utilizadas en este proceso se basan en el uso de sensores inerciales (IMU) y sistemas de navegación satelital (GNSS) para georreferenciar imágenes provenientes de sensores ópticos multispectrales. Este proceso puede realizarse en tiempo real o posteriormente mediante software especializado como PIX4D® o Agisoft Photoscan®.

Se lleva a cabo un proceso en campo para reducir el error en el resultado final, y este procedimiento implica colocar puntos de control en tierra. Estos puntos de control se conocen como marcadores de campo y son objetos georeferenciados con una figura impresa que es fácilmente visible en las imágenes. Sin embargo, se han desarrollado recientemente diversos métodos que permiten evitar el uso de los marcadores de campo, basados en el procesamiento de imágenes en tiempo real en la plataforma aerotransportada.

En los siguientes capítulos, complementaremos más a fondo todos los detalles relacionados con las imágenes multiespectrales y el uso y beneficios que se pueden extraer de dicha información.

Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un enfoque de la agricultura que se basa en el uso de tecnologías de información y de comunicación para optimizar la producción. Esta práctica utiliza sensores remotos, teledetección y herramientas de predicción en tiempo real para recopilar datos y proporcionar información valiosa sobre el suelo, el cultivo, el clima y otros factores. Esta información se utiliza para tomar decisiones de gestión de cultivos, como la fertilización, los riegos, el control de plagas y la cosecha. La agricultura de precisión también puede ayudar a los agricultores a mejorar la sostenibilidad, reduciendo el uso de agua y fertilizantes (Nanda Kumar et al., 2021).

Las herramientas utilizadas para la agricultura de precisión incluyen sensores remotos, teledetección, herramientas de predicción en tiempo real, sistemas de información geográfica, drones, robots y vehículos autónomos. Estas herramientas permiten recopilar una variedad de datos, como la temperatura, la humedad del suelo, el contenido de nutrientes del suelo, los niveles de luz y la ubicación geográfica. Esta información se

utiliza para tomar decisiones de gestión de cultivos, como la fertilización, los riegos, el control de plagas y la cosecha. La agricultura de precisión también puede ayudar a los agricultores a mejorar la sostenibilidad, reduciendo el uso de agua y fertilizantes.

Teniendo en cuenta que la agricultura de precisión tiene la meta de aumentar la productividad y reducir el desperdicio de recursos en la actividad de cultivar la tierra, se integran sensores multiespectrales a vehículos aéreos no tripulados y robot tele-operados que sirven como herramientas de fenotipado. Bajo este contexto se presentan múltiples aplicaciones como la eficiente inspección no invasiva en la industria alimentaria proporcionando atributos de calidad en productos líquidos y semilíquidos, o para cuantificar la etapa de maduración de las cosechas de frutas además en la inspección para la detección de la autenticidad de alimentos realizadas por las entidades regulatorias.

La agroindustria se refiere a las actividades relacionadas con la producción, el procesamiento y la distribución de alimentos y otros productos agrícolas (Pelaez Carrillo & Gualdron Guerrero, 2020). Esta industria abarca desde la agricultura, la ganadería y la pesca hasta la producción de alimentos, la fabricación de productos derivados y la distribución de productos alimenticios. La agroindustria también se involucra en la producción de biocombustibles, productos medicinales y otros productos derivados de la agricultura. La agricultura de precisión y la tecnología de información y comunicación se utilizan cada vez más para mejorar la productividad y la sostenibilidad de la agroindustria.

En el área agroindustrial se destacan las técnicas destinadas a la detección de plagas con el fin de dar un tratamiento preventivo gracias a la detección de invertebrados en hojas verdes con imágenes hiperespectrales, de igual forma, se puede estimar la

composición del suelo entre ellas la textura y el PH además de la capacidad del suelo para retener líquidos.

A modo de ejemplo y tomando como referencia un proyecto recientemente ejecutado en el Departamento de Norte de Santander por la Universidad de Pamplona, en el cual se ha podido medir el impacto que tiene la agricultura de precisión a través de imágenes multispectrales dentro de las técnicas innovadoras en pasturas utilizadas en la alimentación de ganado bovino, que ha permitido al productor la detección temprana de plagas y enfermedades que inciden en la producción de forraje en pasturas, controlando de ésta manera -de una forma eficaz- los ataques que se puedan presentar en diferentes épocas del año asegurando poder contar con una biomasa suficiente para sostener la alimentación del ganado de una forma limpia sin emplear agroquímicos que tienen una incidencia negativa en los forrajes e invirtiendo más dinero para el sostenimiento. Todo ello es debido a que en la actualidad se deben manejar praderas con mínima intervención de uso de fungicidas e insecticidas que contaminan el medio ambiente y por lo tanto, se requiere manejo de pasturas limpias para llevar el producto final confiable de cualquier tipo de trazas o residuos que afecten la salubridad del consumidor; garantizando un contexto de agricultura sostenible dentro de un entorno socioambiental óptimo que permita a los agricultores la toma de decisiones (Pelaez Carrillo & Gualdron Guerrero, 2020).

Vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son aeronaves pequeñas sin tripulación a bordo. Estos vuelan de manera autónoma o controlada por un operador en tierra. Los UAV se utilizan para una variedad de usos, como la vigilancia, la fotografía aérea, el control de incendios, el transporte de equipos, la vigilancia de fronteras y mucho más. Los UAV también se conocen

como drones, y pueden ser equipados con cámaras y sensores de última generación para tomar imágenes de alta calidad y proporcionar datos precisos para diversos fines (Invernizzi & Lovera, 2018). Los avances en la tecnología de UAV permiten realizar tareas más complejas y ahorrar tiempo y costos en la realización de proyectos.

Los UAV son una herramienta única para una amplia variedad de aplicaciones. Algunas de las principales ventajas de los vehículos aéreos no tripulados son:

- 1. Mayor alcance:** Los UAV pueden volar a niveles de altura superiores a los de los aviones tripulados, lo que les permite acceder a áreas remotas y difíciles de alcanzar. Esto también significa que los UAV pueden tomar imágenes de áreas más grandes y cubrir más terreno en menos tiempo.
- 2. Menor coste:** Los UAV son mucho más baratos que los aviones tripulados, lo que significa que los costes operativos son mucho más bajos. Esto permite a los usuarios ahorrar tiempo y dinero en la realización de proyectos complejos.
- 3. Menor riesgo:** Los UAV reducen el riesgo de accidentes ya que no tienen tripulación a bordo. Esto significa que no hay personas en peligro en caso de un accidente.
- 4. Mayor precisión:** Los UAV pueden ser equipados con sensores de última generación para tomar imágenes y datos precisos. Esto significa que los usuarios pueden obtener resultados más precisos para diversos fines.

Se pueden distinguir cuatro fases de operación en los UAV: el despegue, donde se inicia el funcionamiento del aparato, y que puede realizarse mediante diversos métodos. La fase de ruta, donde el UAV se dirige hacia el área de destino y la planificación y navegación son importantes. La fase de acción es clave, ya que en ella el UAV lleva a cabo la tarea o el objetivo principal, como la toma de fotografías, el sensado remoto o la vigilancia. La última fase, el redespiegue, implica el regreso del UAV al lugar de despliegue inicial (Kaljahi et al., 2019). Además, dentro de cada fase operativa, las maniobras de un UAV se pueden dividir en cinco patrones. Por ejemplo, un UAV de tipo quadrotor tiene las siguientes maniobras: despegue y aterrizaje vertical, permanecer en una ubicación determinada durante un tiempo, volar en línea recta con o sin un ángulo específico, volar en arco con un radio determinado y maniobras combinadas, como zigzag o similares (Singh & Silva, 2018).

En la actualidad, los sistemas aéreos no tripulados (UAS) han ganado popularidad para obtener imágenes bajo demanda en aplicaciones comerciales e investigaciones gracias a sus recientes avances. Comparados con las plataformas aéreas o satelitales tradicionales, los UAS presentan diversas ventajas exclusivas, tales como la capacidad de obtener imágenes de alta resolución espacial a un costo razonable en diversos entornos, y en el momento que lo requiera el usuario (Maimaitijiang et al., 2020).

Con el aumento del uso comercial de sensores multiespectrales en sistemas aéreos no tripulados (UAS), cada vez más usuarios con conocimientos técnicos limitados en detección remota o procesamiento de imágenes están operando estos sistemas. Esto ha llevado a una capacidad reducida por parte de los usuarios para considerar y evaluar de manera adecuada la calidad de los datos adquiridos por estos sistemas. Esta limitación es importante porque a diferencia de los sistemas aéreos o satelitales que han sido rigurosamente calibrados y validados

(como la serie Landsat, MODIS y Sentinel-2), los sensores multiespectrales en UAS se personalizan con diferentes configuraciones de banda y los fabricantes rara vez reportan la confiabilidad y precisión de los sensores.

La teleobservación es una técnica remota utilizada para recopilar información sobre una determinada área o región, a través del uso de sensores remotos como cámaras, satélites, vehículos aéreos no tripulados (VANT) y drones. Esta información puede ser utilizada para monitorear la salud de un ecosistema, identificar áreas vulnerables, controlar el uso de la tierra, realizar análisis de cambio climático, observar la seguridad de la ciudad y mucho más. La teleobservación se ha convertido en una herramienta invaluable para la investigación y la planificación de la gestión de la tierra. Los avances tecnológicos en los sensores remotos y la conectividad a Internet, han hecho que la teleobservación sea más accesible que nunca.

La tele-observación por medio de vehículos aéreos no tripulados está revolucionando la agricultura. Estos sistemas permiten recopilar una gran cantidad de datos espacio-temporales al operar cerca de los cultivos, lo que contribuye al aumento de la precisión de las decisiones. Los escáneres láser y la visión artificial a través de cámaras de alta definición permiten determinar el crecimiento de las plantas en un periodo específico, lo que facilita el tomar decisiones informadas respecto al cultivo.

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha aumentado en diversos campos, como la industria militar, pública y civil, especialmente en trabajos tediosos, sucios o peligrosos que a menudo son desagradables para los seres humanos. El UAV tiene ventajas en la ejecución de tareas, tales como una gran flexibilidad en su despliegue, una amplia cobertura de trabajo y la capacidad de comenzar en cualquier momento desde una posición estacionaria. Aunque los UAV se han utilizado principalmente en aplicaciones militares, su uso se ha expandido

rápida a otros sectores como el comercio, la ciencia, el entretenimiento y la agricultura, entre otros. Algunos ejemplos actuales de uso incluyen la vigilancia, la entrega de carga útil, la fotografía aérea y el sensado remoto aéreo.

CAPÍTULO II: COMBINACIÓN DE BANDAS ESPECTRALES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN



CAPÍTULO II

COMBINACIÓN DE BANDAS ESPECTRALES E ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación son una herramienta muy utilizada en el análisis de imágenes multiespectrales que permiten obtener información sobre la salud y la cantidad de vegetación en una zona determinada. Estos índices se basan en la relación entre la reflectancia de la luz en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, que son absorbidas y reflejadas de manera diferente por las plantas y otros materiales presentes en la superficie terrestre (Davis et al., 2023).

Algunos de los índices de vegetación más comunes que se utilizan con imágenes multiespectrales son:

- NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): es el índice de vegetación más utilizado y se basa en la relación entre la reflectancia en la banda del rojo e infrarrojo cercano. El NDVI varía de -1 a 1, donde los valores más altos indican una mayor cantidad de vegetación.
- EVI (Índice de Vegetación Mejorado): similar al NDVI, pero utiliza una combinación de las bandas del rojo, azul y el infrarrojo cercano para reducir la influencia de factores como la presencia de nubes y aerosoles. El EVI también varía de -1 a 1, y los valores más altos indican una mayor cantidad de vegetación.

- SAVI (Índice de Vegetación Ajustado por Sombreado del Suelo): similar al NDVI, pero se ajusta para tener en cuenta la presencia de sombras en la superficie terrestre, que pueden afectar la precisión de los resultados.
- GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde): similar al NDVI, pero utiliza la banda verde en lugar de la banda del rojo. El GNDVI se ha demostrado que es más sensible a los cambios en la vegetación de bajo crecimiento y en cultivos como la alfalfa y el pasto.
- TVI (Índice de Vegetación Transformado): similar al NDVI se le incluye un valor de suma de 0.5, este valor de 0.5 evita resultados negativos. La raíz cuadrada intenta corregir valores que se aproximan a una distribución de Poisson e introduce una distribución normal. No elimina todos los valores negativos.
- RVI (Cociente Simple): La reversa de la estándar simple. Red/NIR.
- PCA (Análisis de Componentes Principales): La técnica en cuestión se emplea para identificar la dimensionalidad de datos multivariados eliminando las redundancias presentes en la intercorrelación de los valores de píxeles de la imagen. En las imágenes, la primera componente suele representar el suelo en el fondo, mientras que la segunda componente representa la variación en la cobertura vegetal.
- GVI: La técnica proporciona coeficientes globales que se utilizan para asignar pesos a las bandas originales con el fin de generar nuevas bandas transformadas. Los pasos negativos de GVI (Índice de Vegetación Global) en las bandas visibles minimizan el efecto del suelo de fondo, mientras que los positivos en el infrarrojo enfatizan la señal de la vegetación.

- PVI (Índice de Vegetación Perpendicular): Es el índice de vegetación padre, de donde se derivan los demás. Usa la distancia perpendicular de cada píxel hacia la línea del suelo. Se sabe si el píxel pertenece a suelo o vegetación de acuerdo con la distancia de cada uno con el suelo.
- NRVI (Normalizado): El resultado de la técnica RVI (Índice de Vegetación por Ratio) se encuentra normalizado, al igual que el NVDI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), lo que disminuye los efectos topográficos, de iluminación y atmosféricos. Además, se genera una distribución normal estadísticamente deseable.
- TSAVI (de suelo ajustado): Considera la pendiente y el intercepto de la línea de suelo. Mucho efecto del suelo de fondo. Tiene varias modificaciones.
- MGVI: La misma filosofía que el GVI pero con muchas bandas. No produce el mismo efecto de componente principal, pues los coeficientes pueden ser colocados específicamente.

Estos son solo algunos ejemplos de los muchos índices de vegetación que se pueden utilizar con imágenes multiespectrales. La elección del índice depende del tipo de vegetación y del propósito específico del análisis. En este libro nos centraremos en el uso de tres de estos índices específicamente, como son los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Clorofila (CI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE).

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) es ampliamente utilizado para estimar la cantidad, calidad y

desarrollo de la vegetación a través de la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que son emitidas o reflejadas por la vegetación. Esto se logra comúnmente mediante sensores remotos instalados en una plataforma espacial. El índice NDVI utiliza la reflectancia para cuantificar áreas de alto vigor (densidad vegetal), las cuales tienen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano y una menor reflectancia en el rojo. Esto se debe a que estas áreas tienen un índice NDVI más alto (Castro Sardiña et al., 2023).

El índice NDVI se fundamenta en la capacidad de las capas esponjosas de las hojas de reflejar mucha luz en el infrarrojo cercano, lo que las diferencia notablemente de la mayoría de objetos no vegetales. Cuando las plantas están deshidratadas o estresadas, la capa esponjosa colapsa y las hojas reflejan menos luz en el NIR, pero la misma cantidad en el rango visible. Al combinar matemáticamente estas dos señales, es posible distinguir entre plantas y objetos no vegetales, así como también entre plantas saludables y enfermas. Por lo tanto, las áreas con mayor densidad vegetal tienen una mayor reflectancia en el NIR y una menor reflectancia en el rojo, lo que se refleja en un índice NDVI más alto.

El sensor captura por separado la radiación reflejada en las bandas roja e infrarroja, por lo que permite calcular el NDVI a partir de la siguiente ecuación

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

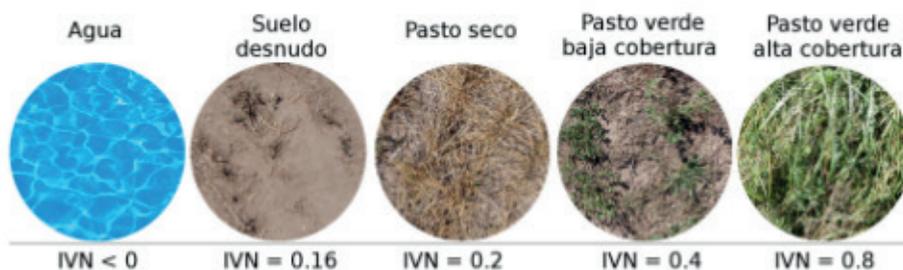
donde RED e NIR representan la radiación reflejada por la superficie en las bandas correspondientes al rojo y al infrarrojo respectivamente. El NDVI puede variar entre 1 y -1. Los valores

más altos indican que gran parte de la radiación se está aprovechando para la fotosíntesis. Es decir, que la tasa de crecimiento de la vegetación es alta. En cambio, valores bajos indican que la tasa de crecimiento de la vegetación es baja (Pelaez, Gualdron, & Castellanos, 2020).

Las fluctuaciones espaciales y temporales del NDVI pueden indicar modificaciones en el tipo de cobertura o en la radiación que es absorbida por una misma clase de cobertura (ver Figura 4). En términos generales, el NDVI de cualquier cobertura que no sea vegetación (por ejemplo, agua, ciudad, terreno arado) es bajo en todo momento. En cambio, el NDVI de una misma clase de vegetación cambia en el tiempo (entre estaciones y años) y en el espacio debido a las respuestas que tiene ante las condiciones ambientales y a las variaciones fenológicas. Cada tipo de cobertura vegetal (por ejemplo, praderas, bosques, cultivos, etc.) posee un NDVI que es característico, el cual se debe a su fenología y su respuesta ante las condiciones ambientales.

Figura 4

Valores de índice verde de distintos tipos de cobertura



Fuente: Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo' de Posada-Asprilla, W.; Medina-Sierra, M.; Cerón-Muñoz, M., 2019, Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient., 22(1), e1195, <https://doi.org/10.31910/rudca.-v22.n1.2019.1195>.

Por otro lado, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) también se puede definir como el índice utilizado para medir la salud y el estado de la vegetación. Utiliza imágenes infrarrojas y de visión visible para identificar áreas con mayor o menor cantidad de vegetación. El NDVI se calcula como la diferencia de reflectancia de la luz verde y la luz infrarroja, normalizada por la suma de la misma. Esta información se utiliza para estimar la densidad de vegetación y la productividad de los cultivos. El NDVI es uno de los principales productos de sensores remotos, y se usa ampliamente en agricultura para monitorizar y gestionar las plantaciones (Alvarenga et al., 2023).

Como mencionamos el NDVI indica el estado de salud de la vegetación y se calcula como la diferencia entre la luz visible e infrarroja reflejada (NIR) y la luz visible reflejada (red) dividida por la suma de ambas. Cuanto mayor sea el NDVI, más saludable será la vegetación. El NDVI se utiliza para determinar el estado de salud de la vegetación, ya que diferentes tipos de vegetación reflejan diferentes cantidades de luz, y el NDVI permite identificar este patrón de reflejo.

Este índice es ampliamente utilizado para monitorear la salud de los cultivos, la desertificación, la erosión del suelo, la biodiversidad y la calidad del aire. Esta información se puede utilizar para la restauración y el manejo de ecosistemas, la evaluación de la fertilización, la lucha contra plagas y enfermedades y otras aplicaciones tales como:

- Detección y monitoreo de cambios en el uso de la tierra como la desertificación, la erosión del suelo y la expansión urbana.
- Evaluación de la salud de los cultivos como la fertilización, la lucha contra plagas y enfermedades, el riego y el estrés hídrico.

- Estudios de la biodiversidad, análisis de la vegetación para la restauración y el manejo de ecosistemas.
- Detección de incendios forestales y la detección de áreas quemadas.
- Estudios ambientales tales como la calidad del aire, la contaminación del suelo y los efectos del cambio climático.
- Estudios de la capa de hielo como el derretimiento de los glaciares y los cambios en la extensión de la capa de hielo.
- Estudios de la ecología acuática como el monitoreo de la salinidad, la turbidez y la temperatura de los cuerpos de agua.
- Estudios geológicos como la detección de minerales y la caracterización de la topografía.

Por ejemplo, Las plagas pueden detectarse con NDVI usando imágenes de teledetección multiespectral. Estas imágenes capturan la reflectancia de los diferentes rangos de longitud de onda de la luz emitida por las plantas. Cuando una planta está infectada por una plaga, el NDVI cambiará porque la reflectancia de la luz verde cambia. Esto se debe a que las plagas comen parte de la hoja, lo que reduce la reflectancia de la luz verde. Esto produce una disminución en el NDVI, lo que indica que hay una plaga en la planta.

Índice de vegetación de clorofila (ic)

Con el fin de tener un muestreo intensivo y más detallado de la clorofila de los cultivos presentes en los modelos agroecológicos se realiza una medición por medio de la reflectancia de las

ondas electromagnéticas que inciden en las coberturas de los cultivos y de esta forma poder caracterizar mediante la respuesta espectral los estados de la clorofila presente, la dinámica para obtener esta información se basa en que estas tienen típicamente dos puntos de absorción en el espectro visible, uno en el entorno azul y otro en el rojo; sin embargo reflejan la parte media del espectro, la más nutrida y correspondiente al color verde.

La medición del Índice de Clorofila (CI) es una forma de estimar la cantidad total de clorofila presente en las plantas. En términos generales, el CI se compone de dos bandas separadas: el CI Verde (GCI) y el CI del Borde Rojo (RCI). Estas bandas son sensibles a las variaciones leves en el contenido de clorofila y son consistentes en la mayoría de los tipos de plantas. Como resultado, el CI es un indicador confiable de la salud de las plantas y puede ser una herramienta eficaz en la gestión de nutrientes durante toda la temporada. La información recopilada a través de la medición de este índice de vegetación también puede utilizarse en la planificación de temporadas futuras.

La agricultura moderna se apoya en una serie de herramientas y técnicas que permiten optimizar la producción y el rendimiento de los cultivos. Una de las más relevantes es el Índice de Clorofila, que se basa en el análisis de un pigmento fundamental para la vida de las plantas: la clorofila. Este pigmento, presente en las hojas y en otras partes verdes de la planta, es esencial para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas producen su propio alimento a partir de la luz solar.

El Índice de Clorofila se obtiene midiendo la reflectancia espectral de la clorofila en las plantas desde el espacio. Este índice permite conocer el estado de los cultivos y su salud de forma regular. En general, se utilizan dos tipos de índices: el Índice de Clorofila Verde (GCI) y el Índice de Clorofila del Borde Rojo (RCI). Estos índices son consistentes para la mayoría de

los tipos de plantas y son un indicador relativamente preciso de la salud de las plantas. Gracias a la información que proporcionan, los agricultores pueden planificar y gestionar mejor la temporada de cultivo y mejorar la producción de alimentos.

Si se realiza una correcta interpretación del Índice de Clorofila, se pueden obtener datos valiosos sobre el desarrollo de los cultivos que pueden ser de gran utilidad para los productores de alimentos. La información obtenida a través de este índice puede ser aprovechada para mejorar la productividad del campo y aumentar los beneficios.

En el ámbito de la agricultura de precisión, el Índice de Clorofila se utiliza para diversas aplicaciones, entre ellas: la identificación de deficiencias nutricionales en las plantas, la evaluación de la absorción de fertilizantes nitrogenados, la predicción del rendimiento y la creación de mapas de prescripción de VRA, entre otras.

Además de los agricultores, otras industrias también pueden beneficiarse del uso del Índice de Clorofila. Por ejemplo, los proveedores de insumos pueden monitorear la salud de los cultivos para verificar el rendimiento de sus productos, las compañías de seguros pueden utilizar el índice para predecir el rendimiento y basar los pagos de sus préstamos en datos objetivos, y las cooperativas agrícolas pueden ajustar sus planes de fertilización en un gran número de campos con la ayuda de los datos del Índice de Clorofila. Las posibilidades son diversas.

Hay diversas variantes del CI que se utilizan hoy en día, entre las más importantes tenemos:

Índice de clorofila verde (gci o ci green)

En el campo de la botánica y la agricultura se ha desarrollado una herramienta útil para medir la salud y el vigor de las plantas.

Este método utiliza la relación entre la reflectancia de la luz en las bandas verde e infrarroja cercana para determinar la presencia y cantidad de clorofila en la planta. Aunque la ecuación exacta para este índice varía según el contexto, se puede adaptar a diferentes tipos de vegetación y condiciones ambientales para obtener mediciones precisas y útiles. Con este índice, los agricultores y otros expertos en el campo pueden obtener información valiosa sobre el estado de las plantas y tomar decisiones informadas para mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos.

La fórmula del Índice de Clorofila Verde es la siguiente:

$$GCI = \frac{NIR}{GREEN} - 1$$

Índice de clorofila de borde rojo (Ci red-edge o rci)

El Índice del Borde Rojo es un método de análisis de plantas que se basa en la detección de una banda espectral estrecha entre las bandas roja e infrarroja cercana. Esta banda se encuentra dentro del rango de reflectancia de las plantas y se utiliza para calcular el Índice de Clorofila. Este método se ha demostrado efectivo para una amplia variedad de especies vegetales y puede ser utilizado como una herramienta útil para monitorear la salud de las plantas en diferentes entornos.

$$RCI = \frac{NIR}{RED\ EDGE} - 1$$

La banda del borde rojo en el rango espectral de las plantas puede proporcionar información valiosa sobre la salud del cultivo. La reflectancia en esta banda está relacionada con la cantidad de células vegetales, lo que se traduce en una mayor densidad de vegetación y una apariencia más verde (Xu et al., 2023).

Algunos agricultores han encontrado que el índice RCI, basado en la banda del borde rojo, puede ser más preciso que el NDVI para la aplicación de la tasa variable. Esto se debe a que el NDVI puede saturarse en áreas con alta densidad de biomasa, lo que no siempre indica la salud del cultivo. Sin embargo, cuando el dosel del cultivo está cerca del 80% de cierre, medir el contenido de clorofila puede ser más confiable para determinar la salud del cultivo.

Otro aspecto importante a considerar es la inocuidad del cultivo, ya que los cultivos naturales pueden aportar características únicas a los alimentos. La concentración de clorofila también puede indicar la presencia de algas y la salud de la cadena alimentaria en una zona específica. Es importante determinar las especies presentes en cada modelo y su importancia en la cadena de valor para evaluar la calidad del cultivo. (Preciado Vargas & Silva Rodríguez, 2015).

Índice de vegetación de diferencia normalizada de borde rojo (NDRE)

La dinámica de acumulación de nitrógeno (N), es un elemento relevante que se considera importante a la hora de realizar una fertilización, ya que a través de este análisis se puede considerar los rendimientos del cultivo, la materia seca total acumulada, y el rendimiento de producto o grano lo que implica directamente en la cosecha. Este análisis nos permite identificar la relación entre el rendimiento del cultivo y la acumulación de nitrógeno en la parte aérea del cultivo, con el fin de determinar lo que requerimos de nitrógeno para la producción de cada cultivo.

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y su falta puede limitar su desarrollo en muchos ecosistemas. La importancia del nitrógeno se debe a que más del 50% de este elemento se utiliza en el proceso fotosintético de las plantas. Se ha encontrado una fuerte relación positiva entre la capacidad fotosintética y el contenido de nitrógeno para cada especie de planta. Sin embargo, la pendiente de la recta de regresión entre estos dos parámetros varía según la especie. La variabilidad en la pendiente está influenciada por varios factores, como la distribución del nitrógeno en el proceso fotosintético, la actividad de las enzimas fotosintéticas, la conductancia y la difusión del CO₂ a través de las membranas de las plantas.

Los estudios realizados son de gran utilidad para identificar los componentes fundamentales de los fertilizantes, dado que los nitratos inorgánicos, producidos a partir de la descomposición de los compuestos nitrogenados, son los responsables de la formación de proteínas, mientras que el amoníaco se genera durante el proceso de descomposición. Por lo tanto, los nitratos representan un componente esencial de los fertilizantes. Al ser absorbidos por las plantas, estos nitratos se transforman de nuevo en compuestos nitrogenados orgánicos, tales como aminoácidos.

La acumulación de nitratos en partes verdes de las plantas es común y puede resultar peligroso para la salud humana si se consumen como alimentos cocidos. Por esta razón, es importante medir con precisión la cantidad de nitrógeno presente en las plantas. Si se aplica la cantidad adecuada de fertilizantes basados en las necesidades reales de las plantas, esto puede ser beneficioso tanto para la cosecha como para el agricultor.

La realización de análisis de este tipo permite optimizar la fertilización de nitrógeno, mejorando la eficiencia del uso de cultivos para obtener rendimientos elevados y limitar los efectos secundarios ambientales relacionados con la lixiviación de nitró-

geno. La medición de clorofila y la concentración de N-NO₃ en la savia peciolar son dos formas de realizar estos análisis mediante procedimientos de imagen multiespectral. Estos métodos permiten obtener información precisa sobre la cantidad de nitrógeno disponible para las plantas y ajustar la fertilización en consecuencia, lo que puede mejorar significativamente el rendimiento de los cultivos y reducir la contaminación ambiental.

La presencia de nitrógeno en los cultivos puede ser identificada de manera indirecta a través de la medición de la concentración de clorofila en las hojas, ya que existe una correlación directa entre la concentración de nitrógeno y clorofila. Aproximadamente el 10% del nitrógeno se almacena en las hojas y, por lo tanto, la medición de la reflectancia espectral puede ayudar a determinar el estado nutricional del nitrógeno en los cultivos. Esto permite una optimización en la fertilización y una mayor eficiencia en el uso de cultivos, lo que puede limitar los efectos ambientales negativos relacionados con la lixiviación de nitrógeno.

Para ello se utiliza el Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) el cual es un índice espectral que se construye como una mezcla de varias bandas: el espectro del Infrarrojo Cercano (NIR) y una banda que utiliza un estrecho rango espectral entre el rojo visible y el NIR. La fórmula NDRE es:

$$NDRE = \frac{NIR - BORDE ROJO}{NIR + BORDE ROJO}$$

El NDRE es un índice espectral utilizado para evaluar el estado nutricional de los cultivos, especialmente durante la temporada media y tardía de crecimiento. Es una técnica de análisis que utiliza la luz de borde rojo para medir la cantidad de clorofila presente en las hojas de las plantas. A diferencia del NDVI, el

NDRE es más sensible durante un cierto período de maduración del cultivo y es más capaz de atravesar las hojas para medir la clorofila en profundidad. Esta técnica es útil para una monitorización intensiva durante toda la temporada de cultivo, ya que el NDVI a menudo no es preciso cuando las plantas han alcanzado el máximo nivel de clorofila (Davidson et al., 2022).

El NDRE es una herramienta útil para monitorear el contenido de clorofila en los cultivos, y puede ser utilizado solo o en conjunto con el NDVI durante todo el ciclo de crecimiento de las plantas, desde la siembra hasta la cosecha. Este índice proporciona una visión completa del contenido de clorofila, que es un importante indicador de nitrógeno en los cultivos, y ayuda a generar mapas para determinar las áreas donde se requiere la aplicación de fertilizantes.

Durante el análisis de las imágenes NDRE, se puede observar que la paleta de colores va desde el rojo hasta el verde. El color rojo indica suelo desnudo, mientras que los colores amarillo pálido y verde pálido indican plantas poco saludables o vegetación en las primeras etapas de maduración. Por último, el color verde indica una cobertura vegetal saludable. A continuación, se presenta un ejemplo de datos analizados mediante el uso del índice NDRE.

El Índice de Borde Rojo de Diferencia Normalizada (NDRE para abreviar) es un método para medir la cantidad de clorofila en las plantas. El mejor momento para aplicar NDRE es a mediados o finales de la temporada de crecimiento, cuando las plantas están maduras y listas para ser cosechadas. En este punto, sería menos eficaz utilizar otros índices.

El NDRE es un índice espectral que se utiliza para evaluar la salud de las plantas midiendo el contenido de clorofila. Se puede aplicar en diferentes momentos durante la temporada de crecimiento, pero su mejor momento de uso es cuando las plan-

tas han alcanzado una cierta madurez y están listas para ser cosechadas. Utilizar otros índices en este punto podría ser menos efectivo para evaluar la salud de las plantas.

CAPÍTULO III: ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES



CAPÍTULO III

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Para poder utilizar imágenes multiespectrales como una herramienta de monitoreo remoto, es necesario llevar a cabo diversas actividades iniciales. En primer lugar, se deben tomar y adquirir los datos correspondientes a las imágenes multiespectrales y recopilar información complementaria para su posterior análisis. Es importante generar la mayor cantidad de datos posible para poder realizar las combinaciones necesarias de bandas y obtener el Índice Normalizado de Vegetación y otros índices representativos.

Es necesario realizar una valoración preliminar de la calidad de las imágenes y clasificarlas adecuadamente con el fin de delimitar las áreas y coberturas correspondientes. De esta forma, se podrá hacer una interpretación adecuada de los resultados de los índices representativos de cada pixel, lo que permitirá crear un mapa de colores que muestre la información recopilada de manera efectiva.

Con el fin de recopilar información numérica y geográfica sobre las áreas de terreno, se ha creado una base de datos que incluye los puntos GPS de los predios que serán sometidos a un análisis multiespectral y topográfico. Utilizando un sistema de referencia MAGNA Bogotá, se busca demostrar la evolución de la cobertura vegetal a través del tiempo, tomando en cuenta las

alteraciones tanto naturales como humanas. La evaluación de la cobertura vegetal se lleva a cabo de forma detallada, considerando cada píxel y agrupando los valores de NDVI por rangos de menor a mayor. A cada uno de estos rangos se le asigna un color representativo en el mapa (Duan et al., 2017).

Para obtener resultados precisos, las imágenes multiespectrales deben someterse a procesos de corrección geométrica, calibración radiométrica y correcciones atmosféricas. Estas imágenes contienen información en las longitudes de onda visibles y no visibles y dicha información depende de la estructura de las hojas, los procesos de dispersión interna y la absorción de agua en las hojas. Además, el infrarrojo de onda corta es especialmente sensible a la composición química de las hojas y a la cantidad de agua presente en la cobertura vegetal.

En resumen, el análisis multiespectral y topográfico de las áreas de terreno requiere una base de datos completa y precisa, así como la realización de una serie de procesos de corrección y calibración para obtener resultados confiables y representativos de la evolución de la cobertura vegetal.

Cámara multiespectral

Durante el proceso de recolección de información, se llevan a cabo diversas actividades para resolver la problemática principal. Una de ellas es la selección del sensor adecuado, teniendo en cuenta varias variables importantes, como la cantidad de bandas disponibles, el peso, la interfaz de conexión y la capacidad de almacenamiento. La cantidad de bandas es crucial, ya que determina la cantidad de información disponible para un procesamiento posterior. Las condiciones del terreno y del clima también son factores determinantes en la selección del sensor (Deng et al., 2018).

La resolución y la interfaz de conexión son características importantes para facilitar la recolección y el almacenamiento de la información. Además, las características de hardware del sensor están directamente relacionadas con el tiempo de vuelo del vehículo aéreo no tripulado (VANT), por lo que también son factores influyentes en la selección del sensor, especialmente en zonas rurales.

En este sentido, el sensor multiespectral RedEdge-M, fabricado por MicaSense, es uno de los más representativos y mejor valorados por la comunidad científica. La figura 3 muestra la cámara y las características que lo convierten en uno de los mejores sensores de su campo.

Figura 5
Cámara RedEdge Mx de Micasense



Fuente: El Vuelo del Drone (2020). MicaSense RedEdge-MX Cámara Multiespectral.

A continuación, se presentan algunas de las características técnicas del sensor seleccionado y las razones por las cuales se considera que cumple con los requisitos mencionados anteriormente:

Tabla 1
Características técnicas sensor multiespectral

Tipo de detalles técnicos	Descripción
Peso	173 gr (incluye DSL y cables)
Dimensiones	8,7 cm x 5,9 cm x 4,6 cm
Conexión externa	4,2 V DC - 15,6 V DC 4 W nominal, 8W pico.
Bandas espectrales	Azul, verde, roja, borde rojo, IR- cercano.
Salida RGB	Obturador global, alineado a todas las bandas.
Resolución(distancia en tierra)	8 cm por pixel (por banda) a 120 m sobre el nivel de la tierra.
Velocidad de captura	1 captura por segundo (para todas las bandas), RA de 12 bits.
Interfaces	Serial, 10/100/ 1000 Ethernet, Wi-Fi removible, obturador externo, GPS, SDHC.
Campo de visión	47,2° HFOV.
Bandas personalizadas	400nm - 900nm (QE de 10% a 900 nm).
Opciones de disparo	Temporizador, solape, disparador externo (Opciones PWM, GPIO, serial, y ethernet), modo de captura manual.

Fuente: El Vuelo del Drone (2020). MicaSense RedEdge-MX Cámara Multiespectral.

Con la utilización del sensor mencionado y el software de procesamiento correspondiente, es posible obtener información relevante como:

- Un mapa de clorofila que permite evaluar el vigor y salud de la planta a través de mediciones precisas.
- Una capa NDVI que utiliza la reflectancia de la banda roja e infrarrojo cercano, para determinar la cantidad de cobertura vegetal presente en el área de estudio.

- Un modelo digital del terreno, el cual es una herramienta útil para el análisis de las propiedades de la superficie y el flujo de agua, proporcionando una ventaja para los campesinos y otros usuarios interesados en la gestión del terreno.

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son capaces de cubrir grandes extensiones de terreno en un corto período de tiempo y con una mayor precisión que los métodos tradicionales, lo que reduce el costo y el tiempo dedicado al monitoreo de los cultivos. También proporcionan una vista aérea que permite la identificación de patrones de crecimiento de los cultivos y la detección de áreas problemáticas, lo que puede ayudar a los agricultores a optimizar la utilización de los recursos y mejorar la eficiencia de la producción. Además, los UAV también son una herramienta útil para la toma de decisiones en situaciones de emergencia, como desastres naturales o eventos climáticos extremos, ya que pueden proporcionar una evaluación rápida y precisa de los daños y la situación general del área afectada. En resumen, la tecnología UAV ha revolucionado la agricultura, proporcionando a los agricultores información precisa y oportuna para la toma de decisiones informadas y mejorando la eficiencia y la producción en el campo (Ivushkin et al., 2019).

El modelo DJI Matrice 100 se muestra en la figura 6, equipado con la cámara multiespectral; es ampliamente utilizado en la industria agrícola debido a su capacidad para recopilar datos precisos y detallados sobre los cultivos. Este dron puede volar a una distancia de hasta 2 km y cuenta con un sistema de estabilización de control de vuelo GPS, lo que le permite mantener una trayectoria uniforme. Además, el dron está equipado con un sensor de movimiento que ayuda a evitar colisiones durante el vuelo en interiores y en condiciones climáticas adversas. Todo esto hace que el DJI Matrice 100 sea una plataforma ideal para la recopilación de datos en aplicaciones agrícolas.

Figura 6
UAV DJI matrice 100



Fuente: Equipo investigador

Figura 7
UAV DJI matrice 100



Fuente: Equipo investigador

El vehículo aéreo no tripulado (UAV) utilizado cuenta con una resolución de control de 720 P HD, lo que permite tener un mayor control sobre la calidad de las imágenes capturadas y también del vuelo del dron. Estos controles suelen estar reservados para drones avanzados, pero con esta resolución, es posible realizar disparos en 360° sin obstáculos con total control.

En cuanto a la duración de la batería, esta es de aproximadamente 18 minutos de vuelo al grabar. Por esta razón, es recomendable tener un kit de baterías adicionales para asegurarse de completar cada plan de vuelo, especialmente si se trabaja en zonas donde el acceso a la electricidad no es fácil. Además, este UAV cuenta con un protocolo de vuelo sencillo, con GPS y un modo de seguimiento, así como hélices resistentes para un vuelo regular. Se recomienda cargar completamente la batería antes del vuelo, y en caso de que el nivel de batería sea bajo, el UAV regresará al punto de despegue para evitar accidentes.

A continuación, se describe de forma técnica las características y especificaciones del dispositivo:

Tabla 2

Características técnicas del vehículo aéreo no tripulado

Tipo de detalles técnicos	Descripción
Modelo	T600
Peso	6.74 lb (3060 g, incluidas hélices, batería)
Ángulo máximo de inclinación	35°
Velocidad máxima de ascenso	16.4 pies / s (5 m / s)
Velocidad máxima de descenso	13.1 pies / s (4 m / s)
Máxima velocidad	49 mph o 79 kph (modo ATTI, sin viento)
Resistencia a la velocidad máxima del viento	10 m / s

Tipo de detalles técnicos	Descripción
Tiempo de vuelo máximo	Aprox. 18 minutos
Modelo del motor	DJI 3510H
Modelo de hélice	DJI 1345T
Peso máximo de despegue	7.71 lb (3500 g)

Fuente: DJI. (2016). MATRICE 100 Specs. <https://www.dji.com/global/matrice100>

Para integrar el sensor con el UAV, se consideraron tres componentes principales. El primero es un sistema de posicionamiento global (GPS) que se utiliza para geoetiquetar cada una de las imágenes capturadas. El segundo es un sensor de luz descendente (DLS) que mide la luz ambiental durante el vuelo para cada una de las cinco bandas de la cámara. La información recopilada por el DLS se almacena en los metadatos y se utiliza para corregir los cambios de iluminación global que se producen durante el vuelo, los cuales pueden estar relacionados con las condiciones climáticas en el momento del sobrevuelo. Por último, se encuentra la cámara multispectral, que captura imágenes detalladas de las plantas y cultivos. En conjunto, estos componentes permiten obtener información precisa y detallada sobre el estado de los cultivos y las condiciones ambientales en la zona de vuelo (Pelaez Carrillo & Gualdron Guerrero, 2020).

Procedimiento para la adquisición de imágenes

La obtención de imágenes es una herramienta esencial para el procesamiento de imágenes multispectrales, que permite a los agricultores adquirir imágenes detalladas y precisas de sus cultivos para su posterior análisis. La adquisición de imágenes multispectrales se realiza comúnmente utilizando drones equipados con cámaras de alta definición. Estos drones son programados para volar en patrones predefinidos sobre el área de interés, capturando imágenes en diferentes longitudes de onda

que son posteriormente procesadas. Esta técnica permite a los agricultores obtener datos precisos sobre sus cultivos, lo que les ayuda a tomar decisiones informadas sobre su manejo.

Se inició el proceso de adquisición de datos mediante la elaboración de un plan de visitas. Con el objetivo de optimizar los métodos y los tiempos de recolección de datos, se estableció una estrategia que comenzaba por visitar en primer lugar los predios más alejados del casco urbano y avanzando progresivamente hacia los más cercanos. En la figura 8 se puede observar un resumen de las actividades que se llevaban a cabo durante cada visita.

Figura 8
Protocolo de Adquisición de imágenes



Fuente: Equipo investigador

Durante cada visita, se lleva a cabo una socialización con los propietarios en la que se detallan las actividades a realizar en sus terrenos y se responden a cualquier inquietud que puedan tener al respecto. Además, se determinan de manera conjunta los puntos del polígono que corresponden a los límites que serán muestreados y se realiza una inspección visual para definir las propiedades físicas del terreno y identificar posibles obstáculos que puedan afectar el vuelo del UAV y evitar colisiones no deseadas. Este proceso se inicia en los predios más lejanos del casco urbano para acercarse gradualmente a él, según se establece en un plan de visitas previamente diseñado.

Para obtener los puntos GPS, se utiliza un receptor de alta calidad manualmente para garantizar la precisión de las coordenadas de latitud y longitud. Es importante recolectar la mayor cantidad de puntos posible para delimitar con mayor precisión el terreno.

Posteriormente, estos puntos se importan a Google Earth, un programa cartográfico que cuenta con imágenes satelitales actualizadas. En este programa, se pueden etiquetar los puntos y delimitar el área que será muestreada. Es importante que el área de captura sea mayor que el campo de interés. Finalmente, se exporta el resultado en un archivo de lenguaje de marcado (.kml) para que pueda ser utilizado por otras aplicaciones.

Figura 9

Polígono formado con los puntos GPS recolectados



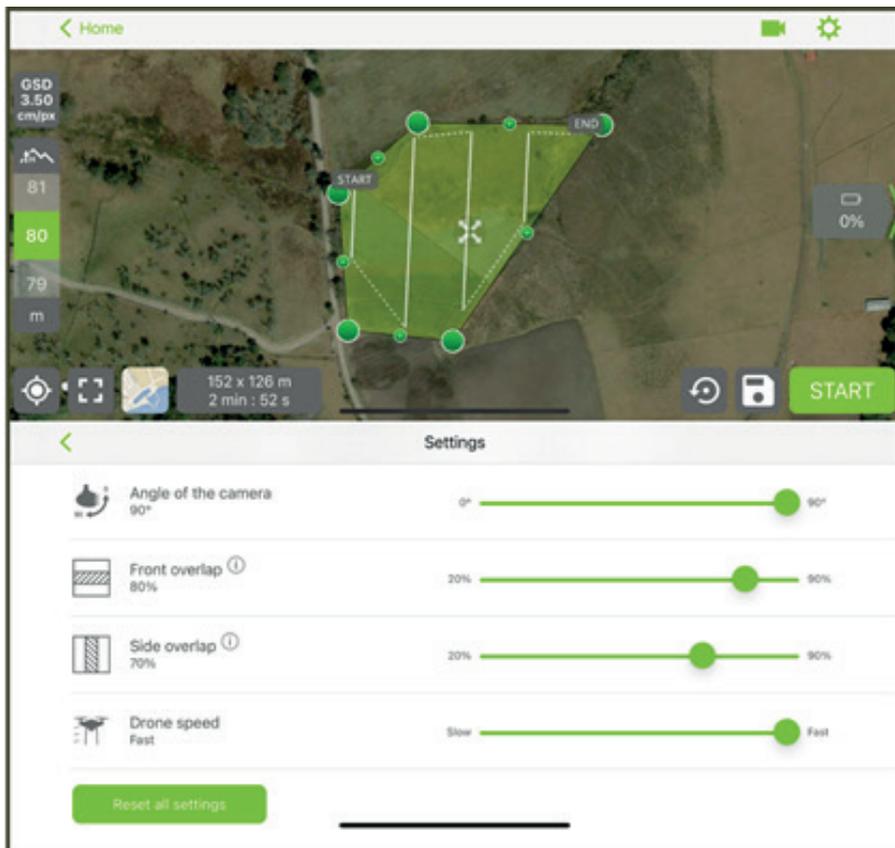
Fuente: Equipo investigador

Una vez delimitada el área a muestrear, se procede a planificar el vuelo del UAV mediante la aplicación Pix4D Capture. Esta herramienta permite cargar el archivo .kml previamente generado y, a partir de este, crear una ruta de vuelo que optimice la cobertura de todo el terreno, tal y como se muestra en la figura

9. Es importante mencionar que la altura máxima de vuelo del dron se ajusta entre 100 y 120 metros, ya que, según las regulaciones de la aeronáutica civil, ningún UAV puede volar por encima de los 200 metros. Además, se debe verificar la presencia de tráfico aéreo en la zona donde se realizará el vuelo, para evitar interferir con otras aeronaves en actividad.

Figura 10

Plan de vuelo y configuraciones generales de la adquisición de imágenes



Fuente: Equipo investigador

La aplicación Pix4D capture permite realizar las configuraciones más importantes del plan de vuelo. En primer lugar, se debe establecer el solapamiento entre las imágenes laterales y frontales. Se recomienda que este porcentaje sea superior al 70%, para evitar la pérdida de información entre las imágenes, asegurando que no se presente ningún inconveniente al momento de procesarlas y para evitar el desperdicio de tiempo. La velocidad de desplazamiento del UAV es fundamental, ya que una velocidad demasiado alta puede afectar la calidad de las imágenes adquiridas debido a desenfoques o inclinaciones no deseadas, mientras que velocidades demasiado bajas pueden hacer que no se aproveche al máximo la carga de la batería del dron, desperdiciando energía.

Conforme se realicen ajustes en el plan de vuelo, se verá afectado el número de imágenes que capturará el dispositivo. Un mayor solapamiento resultará en una mayor cantidad de imágenes capturadas. Asimismo, a medida que aumente la cantidad de hectáreas a cubrir, se necesitará más tiempo para llevar a cabo el sobrevuelo, lo que a su vez exigirá un mayor número de baterías para completar la misión. Si se requiere más de una batería, será importante contar con baterías adicionales para satisfacer la demanda energética. La aplicación DroneDeploy está diseñada para planificar vuelos con drones DJI y su estimación de duración de batería coincide con el rendimiento real. No obstante, es importante supervisar el vuelo y tomar decisiones para interrumpirlo antes de lo programado si se considera necesario. En caso de que se deba cambiar la batería, la aplicación interrumpirá la misión y guardará la ubicación de la última imagen capturada como el punto de partida para continuar la misión después de cambiar la batería. El dron aterrizará, se cambiará la batería y se despegará nuevamente para retomar la misión desde el punto de interrupción.

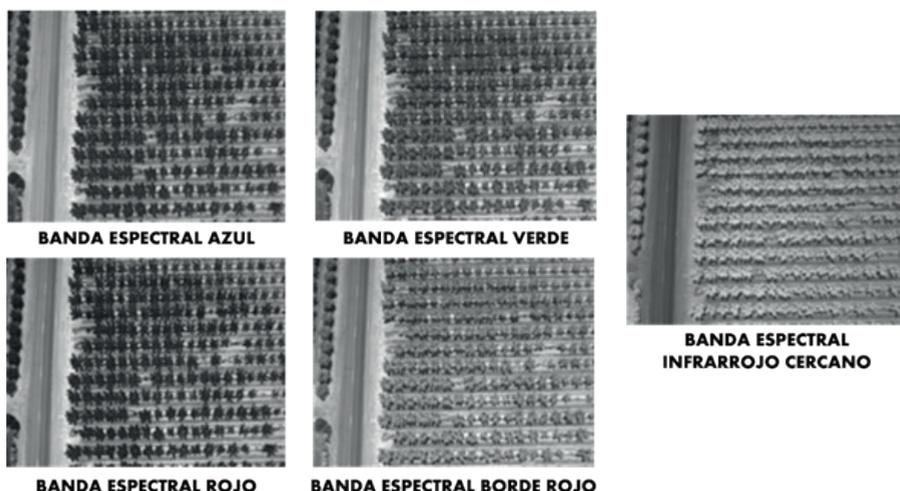
La figura 10 muestra las trayectorias que el dron seguirá para capturar las imágenes. La aplicación Pix4D capture permite

hacer un seguimiento en tiempo real del movimiento del dispositivo y su posición, lo que brinda información más precisa sobre la ubicación y orientación del control.

Sin embargo, delimitar el terreno para la misión no es una tarea fácil. Es importante examinar cuidadosamente la topografía del terreno, identificar posibles obstáculos, como árboles o edificios, y considerar la densidad de la vegetación y la irregularidad de las parcelas.

En la figura 11 se pueden observar las imágenes en bruto son en blanco y negro, mostrando brillo u oscuridad en lo que se refiere a la reflectancia de las plantas.

Figura 11
Imágenes por banda espectral



Fuente: Equipo investigador

CAPÍTULO IV: PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES



CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES

La utilización de imágenes multiespectrales en el ámbito agrícola se ha vuelto esencial en la actualidad. Gracias a estas imágenes los agricultores pueden obtener información detallada acerca del estado de sus cultivos, lo que les permite tomar decisiones más precisas en cuanto al manejo de los mismos. Además, el procesamiento de imágenes multiespectrales ayuda a los agricultores a supervisar el desarrollo de los cultivos, evitando problemas como la erosión del suelo, la contaminación del agua y el control de plagas. De igual manera, esta técnica puede ser utilizada para obtener información sobre la calidad de los alimentos, contribuyendo así a garantizar la seguridad alimentaria.

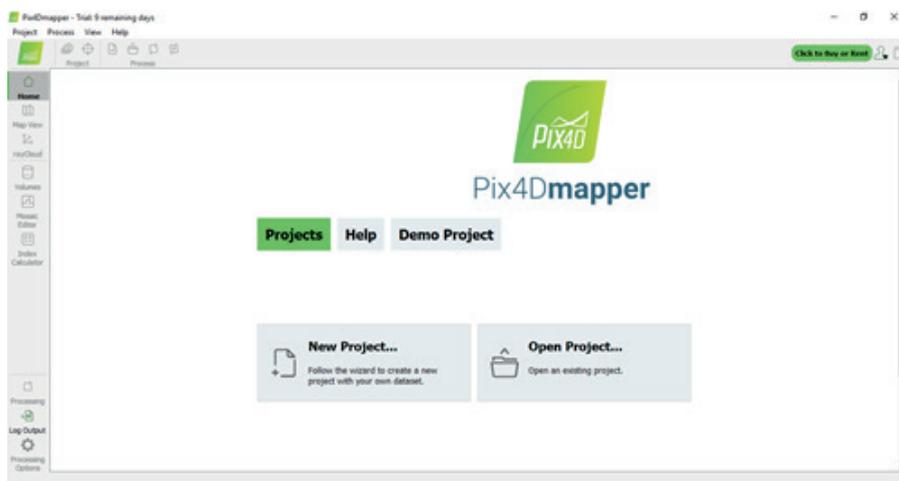
En el análisis de las tomas espectrales, es necesario utilizar un software de fotometría que permita capturar imágenes RGB, térmicas o multiespectrales de cualquier tipo de cámara, con las características adecuadas para este propósito. Durante el proceso de investigación, se verificaron las características de las herramientas digitales que podrían utilizarse para el procesamiento de la información recopilada. Entre las características más relevantes que debe tener el software se encuentra la capacidad de identificar los metadatos de cada imagen, ya que la información de georreferenciación del punto exacto donde se capturó la imagen, el ángulo de inclinación de la cámara y la

rotación del vehículo aéreo en el momento de la captura, las correcciones de brillo y exposición a la luz realizadas por la cámara y las etiquetas del sensor con el que se tomó la imagen para determinar el espectro de luz que fue capturado, están inmersas en la información de la malla de píxeles. Otra característica importante del software es su capacidad para realizar diferentes cálculos de índices, volúmenes y áreas, lo que es fundamental para la toma de decisiones en cuanto a la selección de la aplicación.

El software Pix4D se considera una herramienta completa para el procesamiento de imágenes multiespectrales, ya que permite realizar cálculos de volumen, área y elevación, y ofrece una gran versatilidad para la inspección virtual. A diferencia de las opciones de software libre, Pix4D facilita enormemente el procesamiento de imágenes multiespectrales y la generación de mapas espectrales, así como el cálculo de índices de vegetación como el NDVI. Con una adecuada calibración del sensor antes de cada vuelo, una organización adecuada del almacenamiento de la información y conocimientos técnicos apropiados, es posible procesar toda la información recopilada y obtener mapas de reflectancia de alta resolución con información confiable y disponible para realizar los análisis correspondientes. Sin embargo, para hacer uso del software, es necesario adquirir una licencia, que puede ser de acceso mensual, anual o ilimitado, y su precio varía según la duración de la licencia que se elija.

Después de haber organizado las imágenes por predios y municipios, se puede proceder con el procesamiento de las mismas utilizando el software. Es importante destacar que, para cada municipio, se pueden llegar a tener cientos de imágenes. En la figura 12 se puede observar la interfaz de inicio del software, donde se puede acceder de forma rápida para crear un nuevo proyecto o abrir uno ya existente, es decir, aquel en el que ya se ha llevado a cabo el procesamiento de las imágenes previamente.

Figura 12
Interfaz inicial del software PIX4D

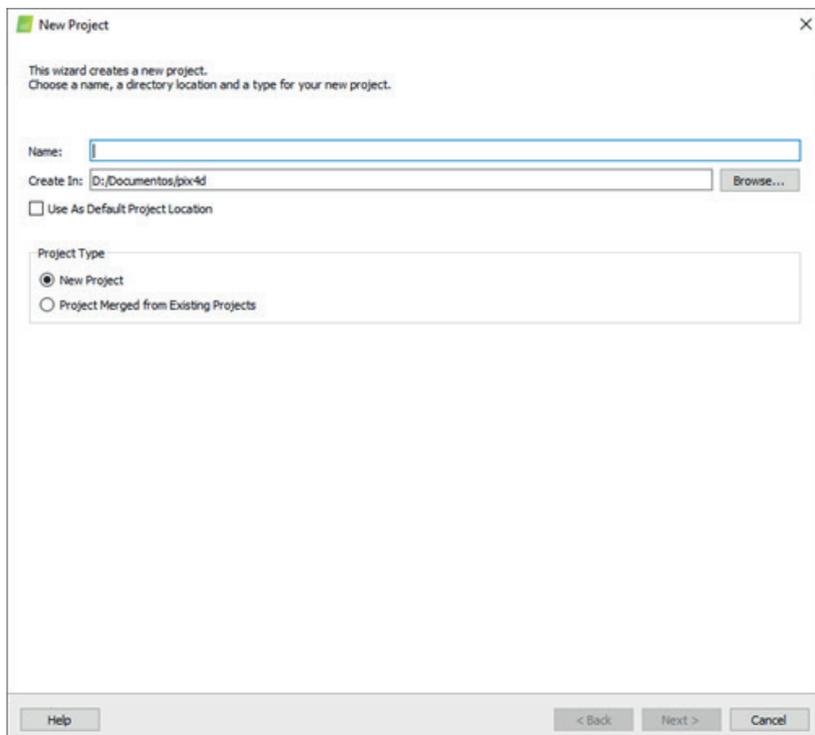


Fuente: Equipo investigador

Una vez seleccionada la opción de "nuevo proyecto" en el software, se abrirá una ventana en la que se deberá especificar un nombre para el proyecto y la ubicación donde se guardarán los archivos resultantes en el disco duro del equipo. Estos archivos incluyen los reportes de procesamiento de la información, que permiten observar las correcciones radiométricas realizadas por el software, así como los porcentajes de error de la georeferenciación, y verificar la calidad del ortomosaico final. Además, en esta misma ubicación se almacenarán los archivos resultantes del procesamiento, incluyendo un archivo .pdf que muestra la imagen en una escala de colores de acuerdo a los índices normalizados.

Figura 13

Asistente de creación de un nuevo proyecto en PIX4D



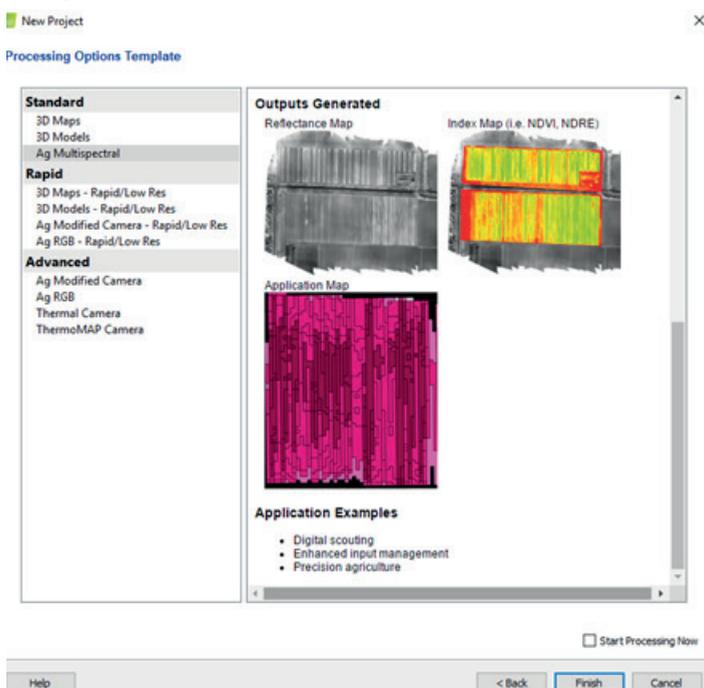
Fuente: Equipo investigador

Para el procesamiento de las imágenes multiespectrales, no es esencial una georreferenciación precisa, ya que lo más importante es determinar los diferentes índices normalizados. Por lo tanto, no es necesario ubicar puntos de control dentro de las imágenes adquiridas. El proceso es simple, breve y se inicia con la carga de todas las imágenes. Es importante tener en cuenta que la organización de las imágenes debe realizarse de acuerdo a como se guardan en la cámara, recordando que en cada captura se toman cinco imágenes, una por cada sensor inmerso en la cámara multiespectral. Esto aumenta el volumen

de información a manejar en comparación con una ortoimagen normal en RGB.

Se debe tener en cuenta que el procesamiento de las imágenes es demorado y depende totalmente de la capacidad de procesamiento del ordenador utilizado para este fin. Una vez importadas las imágenes, se procede a determinar la característica del nuevo proyecto que se está creando, en este caso, se denomina "Ag Multiespectral". Existe la opción de hacer un procesamiento rápido en donde se pueden obtener resultados finales aceptables o el estándar en donde la calidad del procesamiento será lo máximo posible.

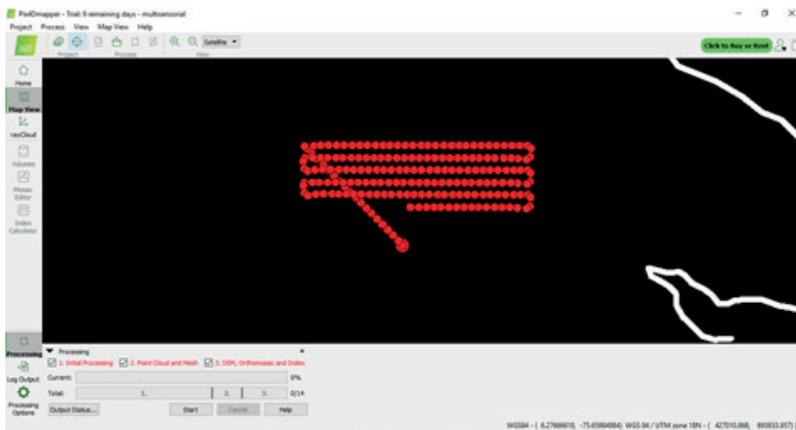
Figura 14
Selección de las características de procesamiento de las imágenes



Fuente: Equipo investigador

Las configuraciones de la creación del proyecto incluyen todos los parámetros mencionados anteriormente, los cuales permiten la organización y almacenamiento de la información, sin haber realizado aún ningún tratamiento a las imágenes. En la figura 15, se muestra el resultado de una importación exitosa de información, donde se puede verificar la calidad de los metadatos de cada imagen cargada. Se revisa la trayectoria que siguió el vehículo aéreo no tripulado para adquirir las muestras, representada por puntos rojos que indican la ubicación GPS exacta de cada toma. Se puede observar una trayectoria uniforme y organizada, lo que sugiere un proceso exitoso en capítulos anteriores.

Figura 15
Trayectoria del proceso de adquisición de las imágenes



Fuente: Equipo investigador

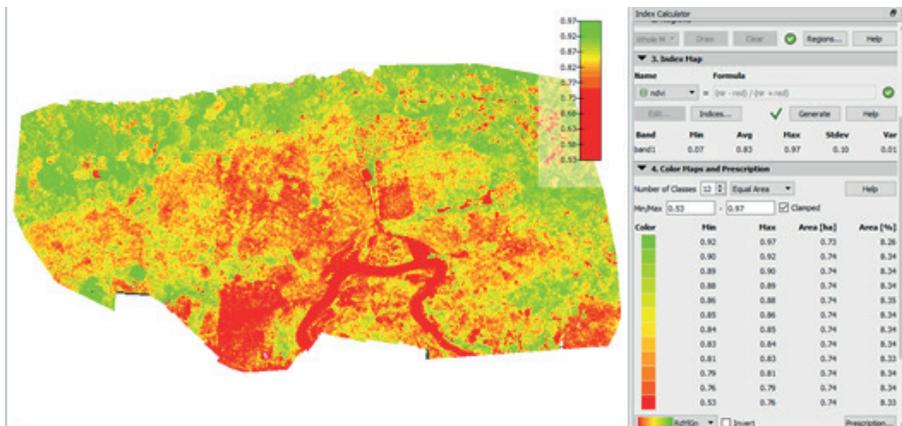
Antes de iniciar el procesamiento para unir las imágenes considerando su solapamiento y la información de radiación capturada por cada banda de la cámara, es fundamental realizar una revisión exhaustiva de los requisitos de procesamiento. Esto permitirá definir los informes que se generarán durante la actividad y extraer la mayor cantidad de datos posibles, para calcular

calcular los distintos índices normalizados. Una vez iniciada la generación del mosaico, los resultados se guardarán en el disco duro. Si se requiere un análisis más detallado, basta con acceder a la ruta definida en los primeros pasos del proyecto.

La imagen 11 muestra los resultados del procesamiento, en donde se observan diferentes tonalidades de colores que representan los índices normalizados de vegetación. A pesar de que la imagen se presenta en escala de grises, los colores están presentes como una representación de los distintos índices normalizados presentes en la imagen. Cada uno de ellos está asociado a un rango de numeración específico, en el que los tonos rojos representan los índices más bajos y los tonos verdes más intensos indican la presencia de los mejores datos de vegetación. En la parte derecha de la imagen se presenta una tabla que indica los diferentes colores y los rangos que representan, los cuales pueden ampliarse o reducirse según sea necesario. Es importante tener en cuenta que, al reducir el número de clases de igual área, se disminuirá la cantidad de información disponible, lo que podría afectar la representatividad del análisis estadístico que se realice posteriormente.

Además del NDVI, también es posible generar mapas de clorofilas que resultan indispensables para observar la presencia de enfermedades o posibles problemas en la vegetación. Estos mapas son especialmente útiles en el contexto de cultivos, ya que permiten identificar de manera más precisa las áreas que requieren una mayor atención por parte de especialistas en la materia. Con la ayuda de estos mapas, es posible detectar de manera temprana la presencia de enfermedades o problemas en la vegetación, lo que facilita la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas o correctivas necesarias para garantizar la salud y el desarrollo óptimo de las plantas.

Figura 16
Cálculo de NDVI y representación de la información en espacio de colores



Fuente: Equipo investigador

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES

El software PIX4D permite realizar el tratamiento de datos de alta precisión y además, facilita la interpretación y manejar en el procesado ayudando a generar unas excelentes interpretaciones, siempre y cuando se evite alterar de alguna forma la calidad de los datos. La aplicación nos entrega imágenes de la totalidad del terreno a escala 1cm:25m, desarrollando además una clasificación de los índices de NDVI de acuerdo al número de clases que se hayan seleccionado, entre mayor número de clases se tenga será menor la pérdida de información y mayor observación de las características del terreno se podrá realizar y por último la información general del predio, por ejemplo, el municipio en el cual se encuentra ubicado, su respectivo departamento y el sistema de coordenadas con sus respectiva descripción detallada.

Para facilitar la interpretación de la información de la imagen multiespectral se establecieron 7 intervalos, cada uno de ellos asignado a una categoría distinta, relacionando esta información al área total cubierta por el intervalo de valores NDVI. En la siguiente tabla se muestran los siete intervalos y la información que provee.

Tabla 3*Clasificación de los intervalos de NDVI*

Categoría	Intervalo de NDVI	
	Min	Máx (aprox)
Altamente óptima	0,75	1,00
Óptima	0,50	0,75
Baja cobertura de vegetación	0,25	0,50
Cero cobertura de vegetación	0,00	0,25
Cero cobertura (posible huella hídrica)	-0,30	0,00
Cero cobertura (rocas)	-0,60	-0,30
Nulo	-1,00	-0,60

Fuente: Equipo investigador

Con la información recopilada, procesada y analizada por cada una de las áreas de muestreo se determina experimental un análisis estadístico por métodos de conglomerados en el cual se puede lograr representar una asociación entre el índice normalizado de la cobertura vegetal y el porcentaje del área total.

Los rangos de los índices son asociados a su vez en los 4 posibles escenarios que puedan darse en la interpretación de los datos como lo son una alta concentración vegetal, media concentración, escasa y presencia de material rocoso o zonas húmedas. Además, se espera relacionar con dos diferentes imágenes tomadas en diferentes tiempos del cultivo para comparar los niveles digitales de las imágenes que deben tener las mismas características tales como la georreferenciación, altura a la cual se toman las muestras lo que permita realizar una comparación objetiva y real que permitan contribuir en la planificación y construcción de un cultivo sosteniblemente viable.

Caracterización de suelos por medio de los resultados del procesamiento de imágenes

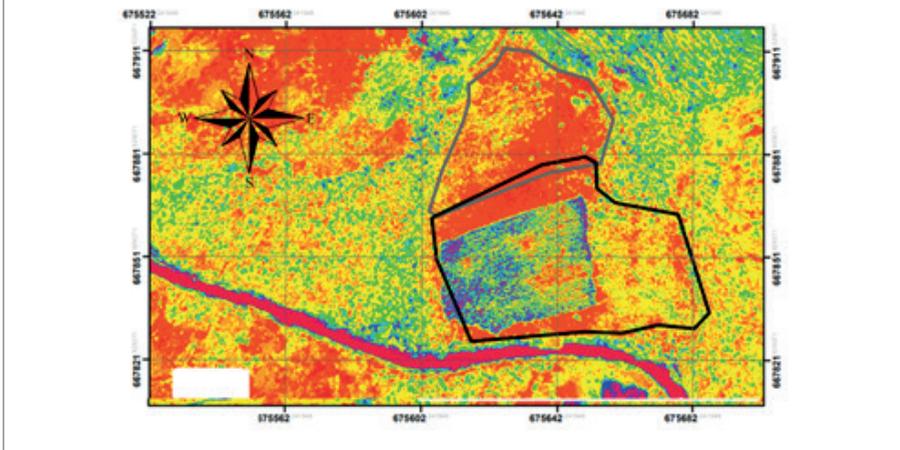
A continuación, se exponen los resultados de un levantamiento multiespectral, realizado en un predio en el cual se implementó un modelo agroecológico desde la selección del predio hasta el crecimiento de la vegetación sembrada. Para cada una de las locaciones se presentan las imágenes con su debida georreferenciación, además se agrupan los resultados de los porcentajes de áreas cubiertas, en siete intervalos en los cuales se categorizan los índices de vegetación de diferencia normalizada condensada en una tabla mostrada por predio. Además, se realiza por cada predio un análisis estadístico en el que se evidencie en mayor medida la evolución de los datos brindando un insumo importante en la observación de los cambios generados en el terreno de acuerdo con la implementación de los modelos agroecológicos.

Tabla 4

Clasificación de los intervalos de NDVI predio 1

Municipio	Propietario Nombre del predio		
	Intervalo de NDVI		Área afectada séptimo levantamiento (%)
	Min	Máx (aprox)	
Cobertura Alta	0,75	1,00	77,98
Cobertura Media	0,50	0,75	17,67
Cobertura Baja	0,25	0,50	4,36
Cero cobertura de vegetación	0,00	0,25	0
Cero cobertura (posible huella hídrica)	-0,30	0,00	0
Cero cobertura (rocas)	-0,60	-0,30	0
Nulo	-1,00	-0,60	0
Ortomosaico multiespectral séptimo levantamiento			

Figura 17
Ortomosaico multispectral predio 1



Fuente: Equipo investigador

El procesamiento de las imágenes multispectrales adquiridas en el predio 1, permitió caracterizar diferentes concentraciones de densidad de vegetaciones discriminadas a partir de los resultados de la implementación de la ecuación de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. La primera característica identificada afectada es la cobertura alta con un porcentaje total de 77,98% de área afectada, es decir que en su gran mayoría el predio se encuentra cubierto por matorrales húmedos con una calidad apropiada y una cantidad de hojas vivas muy superior. Posteriormente, encontramos la característica de cobertura media con un porcentaje de área afectada igual a 17,67% indicando presencia de vegetación con una densidad de hojas un poco baja y con indicios de presencia de estrés hídrico. En último lugar, se encuentran las características de cobertura baja con un porcentaje igual a 4,36% relacionado con matorrales con hojas semi secas y un conteo de estas bajo, ocasionando baja densidad vegetal.

Primer ejemplo de análisis estadístico de los resultados

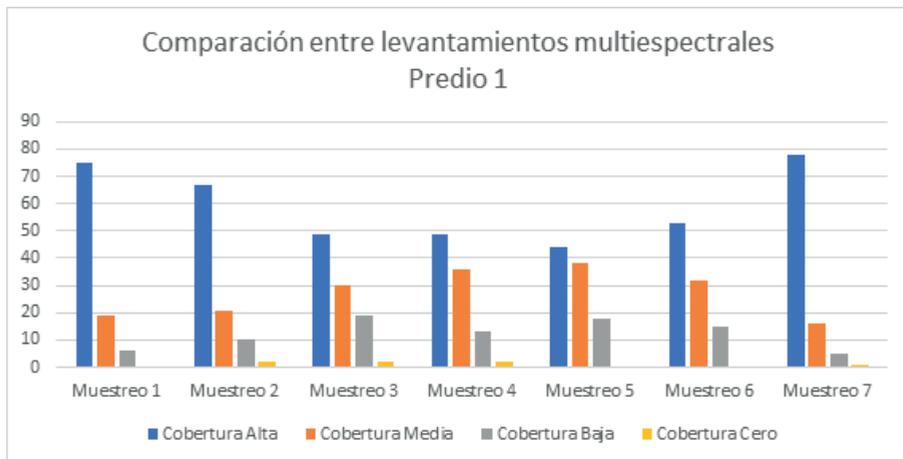
Un análisis estadístico es una herramienta que se utiliza para recopilar, organizar, analizar y presentar datos. Esta técnica se utiliza para descubrir patrones, tendencias y asociaciones entre variables. El análisis estadístico también puede utilizarse para predecir resultados futuros y evaluar la importancia de ciertos factores. Esta técnica se utiliza en una amplia variedad de disciplinas, desde la investigación médica hasta la agricultura. El análisis estadístico es una herramienta importante para ayudar a tomar decisiones informadas.

Existen varios tipos de análisis estadísticos estos incluyen el análisis descriptivo, el análisis inferencial, el análisis de regresión y el análisis de supervivencia. El análisis descriptivo se utiliza para describir datos a través de estadísticas como la media, la mediana y la desviación estándar. El análisis inferencial se emplea con el propósito de llevar a cabo pruebas estadísticas que permiten evaluar la significancia de los resultados. El análisis de regresión se utiliza para estudiar la relación entre dos o más variables. Finalmente, el análisis de supervivencia se emplea para estudiar la duración de los eventos.

El gran volumen de información adquirida en los sobrevuelos o levantamientos multiespectrales impide identificar y generar una interpretación adecuada de los datos cuantitativos arrojados por el procesamiento, a través del algoritmo de visión artificial del software de fotogrametría, por tanto es necesario realizar una comparación que permita conocer el comportamiento de las cuatro características reconocidas en las hectáreas de suelo muestreadas, con el objetivo principal de identificar un patrón en la evolución de la densidad vegetal a partir de cambios en los datos dando la posibilidad de identificar relaciones entre el suelo y las variables controladas y no controladas. Para poder cumplir con dicho análisis fue necesario involucrar la totalidad de información recolectada en los levantamientos multies-

pectrales para el tipo de cálculos utilizado, los datos para el análisis estadístico fueron los porcentajes de área cubiertos de la totalidad de los predios, el estudio se realiza agrupando los NDVI en resultados de cobertura altos, medios, bajos y cobertura cero. Comparando dichos datos se puede determinar el grupo en el cual se encuentran el mayor porcentaje de cobertura obteniendo los promedios o valores característicos de tipo cuantitativos.

Figura 18
Comparación de los diferentes levantamientos multispectrales



Fuente: Equipo investigador

En la figura 18 se puede observar el resultado de calcular el promedio de los datos de porcentaje de área afectada para cada una de las cuatro características de tal forma que se puede diferenciar por cuatro colores diferentes, de igual forma, se muestran los resultados de los diferentes momentos de adquisición de información denominados muestreo y se pueden observar desde el primero hasta el último, la frecuencia de adquisición es variable. Las características de suelo para el ejemplo con mayor

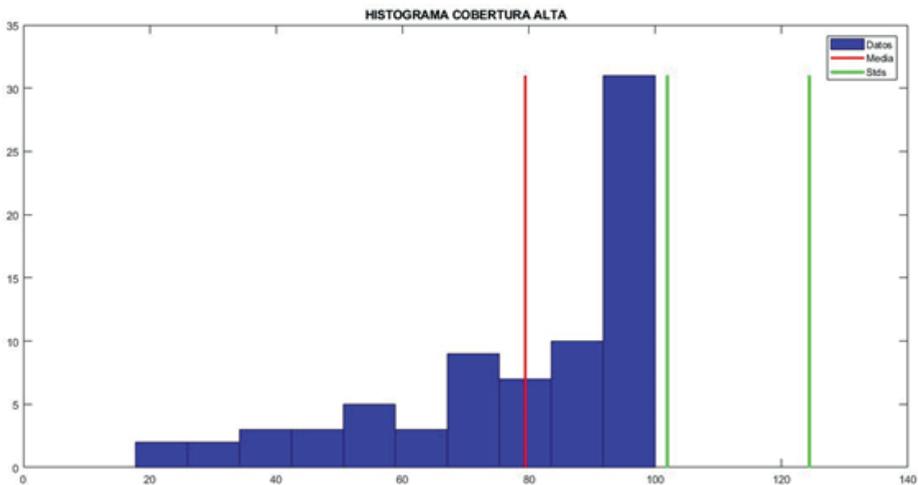
cobertura durante los diferentes muestreos, fue la representativa de índices NDVI entre 0,75 y 1 iniciando con altos valores en el muestreo 1 donde aún no se implementa la actividad económica productiva, posteriormente, se observa una considerable disminución de los porcentajes de área afectadas por dichos índices y presentando una importante recuperación a partir del muestreo 6 y continuando su aumento de los porcentajes hasta el último muestreo. Por otra parte, las características de cobertura media o índices entre 0,5 y 0,75 presentan un comportamiento inverso a la característica anteriormente descrita ya que a medida que la cobertura alta decrece la cobertura media aumenta y viceversa. La característica de cobertura baja tuvo un comportamiento casi constante durante todos los muestreos, excepto en el muestreo 1 y 7 donde el porcentaje de área promedio alcanzado no supera el 5%. Por último, el rango de índices entre 0 y 0,25 los promedios de porcentajes de área afectados por este tipo de características de suelo desnudo son inferiores a 1% lo que se considera despreciable o nada representativo.

Segundo ejemplo de análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico fue realizado en el software de Matlab el cual nos permite manipular los datos de entrada, un matiz conformada por tres filas que representan los rangos altos (0,75 a 1), medios (0,5 a 0,75) y bajos (0,25 a 0,5) de NDVI, los valores en la matriz son los porcentajes de área cubiertos para cada rango para 15 predios, esta matriz fue analizada por fila empezando por el rango alto al cual se le realiza una identificación de datos atípicos, un suavizado de datos para, por último, obtener un modelo polinomial que representa el comportamiento de los datos. Este mismo procedimiento fue realizado para las filas que representa los rango medios y bajo, por último se superponen los tres modelos para comparar las generalidades y concluir en las características generales de los suelos del municipio.

En primer lugar, se realiza un preprocesamiento con el cual se logra obtener un primer acercamiento del comportamiento de los datos obtenidos; en el que se puede identificar de manera minuciosa los valores atípicos o que son notablemente diferentes; no correspondían a un comportamiento normal de acuerdo al grupo que se estuvo analizando, también se pueden identificar valores faltantes o de mediciones erróneas. En la figura 19, se observa la generación de un histograma con los porcentajes de área cubierta con los valores de NDVI que representan una cobertura alta en los que se define la media y los valores que difieren de esta, ya sea por una o por dos desviaciones estándar.

Figura 19
Histograma porcentajes de área cobertura alta

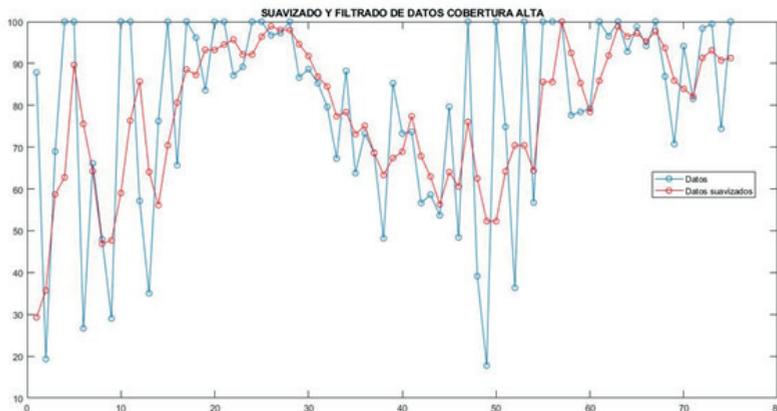


Fuente: Equipo investigador

Una vez que se demostró que los datos presentan un patrón de comportamiento normal, los datos ruidosos muestran variaciones aleatorias alrededor de los valores esperados. Por lo

tanto, antes de proceder a crear un modelo, fue necesario realizar un proceso de filtrado y suavizado para mostrar las características principales. El algoritmo simple de promedio móvil de suavizado utilizado permitió derivar valores que permiten mejores estimaciones de los valores esperados, ya que se redujo el ruido. El suavizado estima el centro de la distribución de valores de respuesta en cada valor del predictor. Esto invalida una suposición básica de muchos algoritmos de ajuste; los errores de cada valor del predictor son independientes. Por lo tanto, es posible usar datos suavizados para identificar un modelo. En la Figura 20, se muestra el diagrama de serie de tiempo de los datos de porcentaje de área con una alta cobertura de biomasa vegetal, que se muestra de color azul dentro de la gráfica resultante. El color rojo muestra el resultado del algoritmo de suavizado y filtrado, se destaca la acumulación de los datos en los valores de porcentaje de área superiores al 70%, lo que empieza a indicar la tendencia de los valores obtenidos y también empieza a identificarse un modelo polinomial del comportamiento de la corrección.

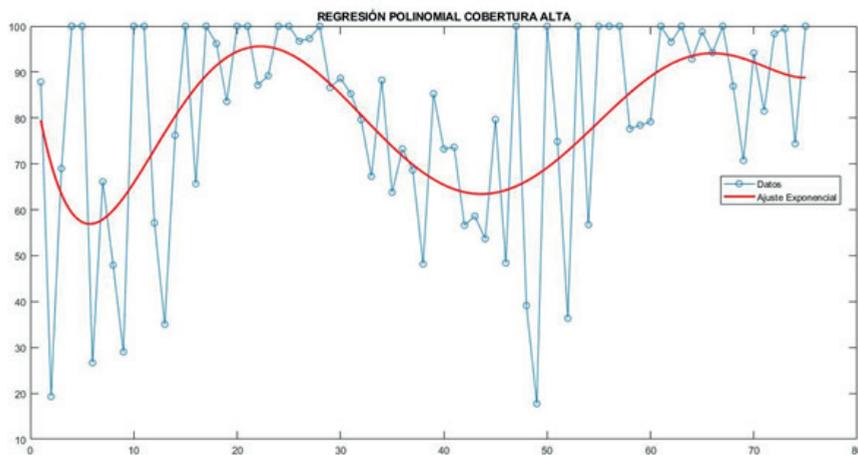
Figura 20
Suavizado y filtrado del diagrama de series de tiempo cobertura alta



Fuente: Equipo investigador

Por último, se realizó una aproximación de los datos suavizados a un modelo paramétricos traduciendo la comprensión de la relación entre datos en herramientas de análisis con poder predictivo. Los modelos polinómicos son maneras simples de ver tendencias al alta y a la baja de los datos de porcentaje de cobertura de los valores altos de NDVI. En la figura 21, se observa graficado de color rojo el modelo polinomial de grado 6 que mejor representa los datos de porcentaje de área cubierta por índices que representan una alta cobertura de biomasa, se destaca el hecho que el valor mínimo de modelo se proyecta en 58 porcientos de área y el valor máximo en 97.

Figura 21
Modelo polinomial de cobertura alta

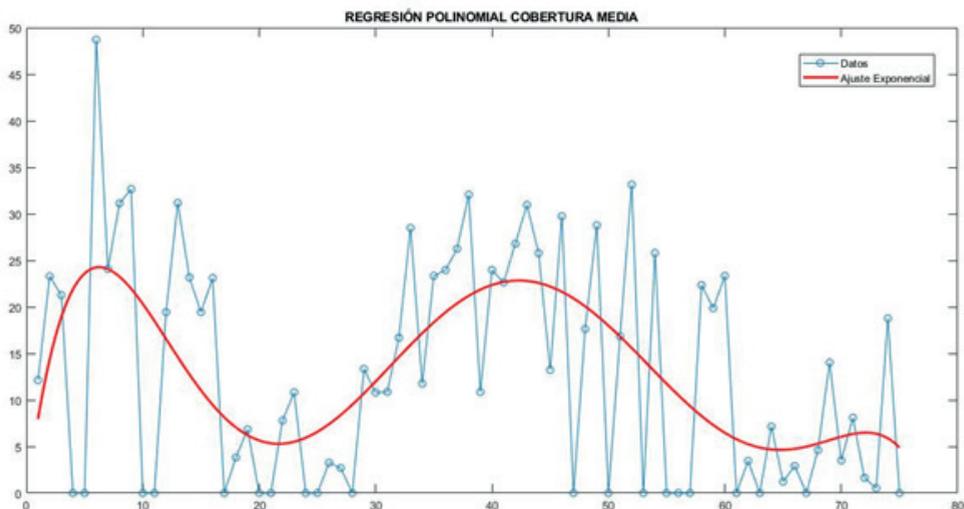


Fuente: Equipo investigador

Se realizó el mismo preprocesamiento, suavizado y modelado para los porcentajes de área cubiertos por índices representativos de cobertura de biomasa media y baja en la cual se identifica que cada vez son menos los porcentajes de cobertura por predio, además, se observa que los datos se agrupan en

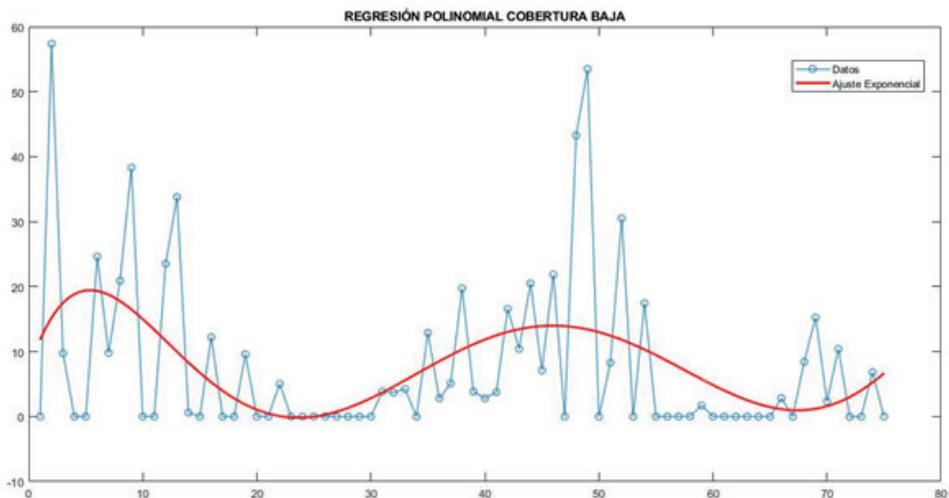
porcentajes menores al 25% de cobertura y mayores al 5% lo que es un dato importante debido a que en los cinco municipios analizados y correlacionados por medio de este proceso estadístico, los hallazgos demuestra una selección apropiada de predios muestras para el desarrollo del proyecto y esto se confirma por medio del modelado de porcentajes de áreas que representan una baja cobertura vegetal cuyo límite superior se establece en 20% y su límite inferior en 0%.

Figura 22
Modelo polinomial de cobertura media



Fuente: Equipo investigador

Figura 23
Modelo Polinomial de cobertura baja



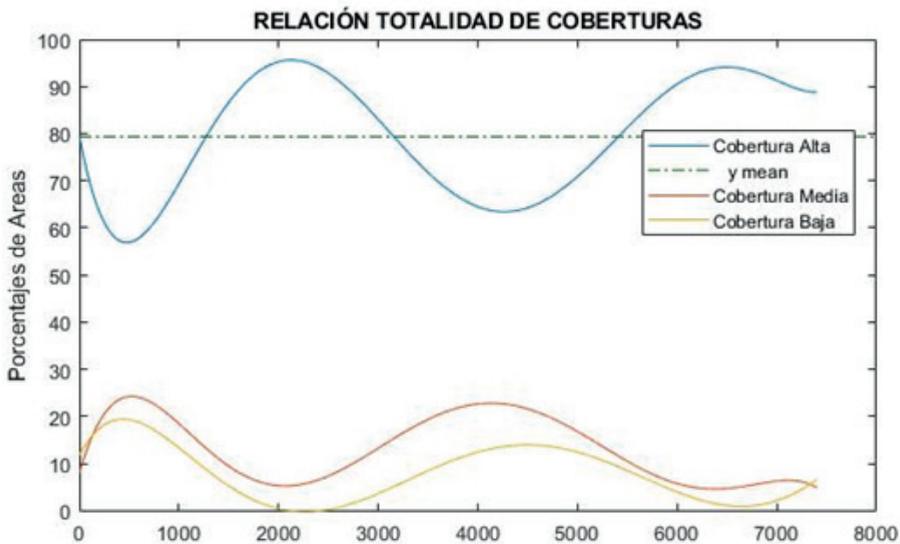
Fuente: Equipo investigador

Finalmente, para darnos una visión global de la diferencia entre los diferentes niveles de cobertura, se analiza la información obtenida de los porcentajes de área agrupándolos de acuerdo a los intervalos ya preestablecidos; presentando en una misma gráfica, los modelos predictivos desarrollados para cada intervalo de datos, con los que se verifica el comportamiento de los niveles de presencia de biomasa vegetal y las áreas de cobertura comprendiendo así, indirectamente que los datos se relacionan de acuerdo a variables no controladas del ambiente como temperatura y humedad, que se asocian principalmente al piso térmico o la altura a la que se encuentran ubicados los municipios e igualmente, los predios muestras. Se muestra que los valores con mayor porcentaje de área fueron los de cobertura alta con un promedio calculado de 79% para los 5 municipios, el porcentaje restante se dividen en 17% para

los índices medios y el 4% fina para los valores de cobertura baja, asegurando así que en todos los predios de los municipios en general se encontró excelente presencia de vegetación y que puede deberse a material boscoso, arbustos o pastizales con una humedad apropiada y que en su reflectancia muestra dichos hallazgos.

Figura 24

Relación entre los diferentes niveles de cobertura



Fuente: Equipo investigador

Tercer ejemplo de análisis estadístico de los resultados

Se utilizó para la agrupación y presentación de los resultados un método denominado k-means, cuya utilidad se puede aprovechar en el proceso de particionar los datos en un número determinado de agrupamientos mutuamente excluyentes, basándose en observaciones reales; cada grupo está definido por sus

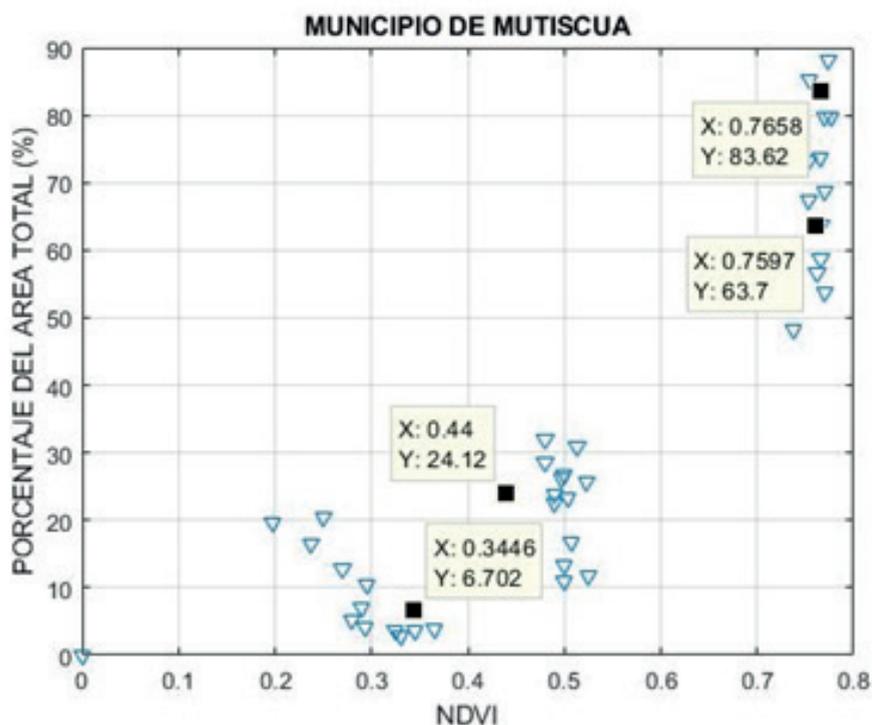
miembros y por el punto en el que se minimizan la suma de las distancias de todos los objetos del grupo con respecto a la medida que especifique. Las agrupaciones generadas representan un acondicionamiento de los datos relacionados como los son el NDVI y porcentaje del área total.

Se obtuvo una aproximación razonable en el análisis del NDVI, ya que se generaron imágenes multiespectrales de los 15 predios; dichas imágenes se encuentran debidamente georreferenciadas para ser observadas con mayor precisión. La información obtenida se representa a continuación como resultado de la agrupación de los clúster que para el caso actual, se discriminan por la cantidad de cobertura vegetal presente en los diferentes terrenos y aplicando el método k-means se identifican dichos clúster de forma clara, se representan los centroides identificados como los posibles escenarios en la relación índice de cobertura y porcentaje de área del mismo que cubren los predios de estudio, en los que se logró establecer además, unas relaciones consecuente y aplicable a el análisis de cada municipio.

En estos resultados se agruparon los datos de los 15 predios en 4 conglomerados con base a la partición de los índices más representativos; el clúster uno representa los índices de vegetación cero con porcentaje de área bajos, el segundo contiene los índices de vegetación bajos y cuyo porcentaje se representan con un centroide del conglomerado de 24,14% y al final los dos conglomerados cuyos valores representativos son los más importantes y con índices altos.

Figura 25

Relación entre NDVI y porcentaje del área total



Fuente: Equipo investigador

En los resultados que se muestran en la figura 25 se agruparon los datos de los 15 predios en 4 conglomerados. Con base en la partición de los índices más representativos, el clúster uno representa los índices de vegetación cero con porcentaje de área bajos; el segundo contiene los índices de vegetación bajos y cuyo porcentaje se representa con un centroide del conglomerado de 24,14% y al final, los dos conglomerados cuyos valores representativos son los más importantes y con índices altos.

CAPÍTULO VI: CONCEPTUALIZACIÓN Y USO DE OTROS ÍNDICES ESPECTRALES (CI – NDRE) UTILIZADOS EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN



CAPÍTULO VI

CONCEPTUALIZACIÓN Y USO DE OTROS ÍNDICES ESPECTRALES (CI – NDRE) UTILIZADOS EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La implementación de nuevas tecnologías en la actividad agrícola es uno de los retos más importantes que ha adquirido el campo, por medio de la inclusión de herramientas de monitoreo remoto como valiosa fuente de información que puede ayudar a motivar el aumento de la producción y la disminución en la inversión de recursos como fertilizantes, pesticidas y aún más importante el uso eficiente de los recursos hídricos con los que se cuenta.

Como hemos visto el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada permite extraer datos exactos sobre la cantidad de material vegetal y la cantidad de suelo desnudo, permitiendo caracterizar por medio de los porcentajes de cobertura, diferentes niveles de presencia de plantas con follaje variables, además, de posible presencia de huella hídrica y la cantidad de suelo desnudo que se encuentre presente en el área muestreada. Con este índice se puede realizar un proceso comparativo que permita realizar un seguimiento apropiado de las posibles necesidades nutricionales y tomar decisiones estratégicas.

Otro de los índices muy utilizados en la actualidad es el Índice de Clorofila (CI) el cual se usa para calcular la cantidad total

de clorofila en las plantas. Las bandas espectrales (CI Verde (GCI), CI del Borde Rojo (RCI)) responden a ligeras variaciones en el contenido de clorofila y son consistentes para la mayoría de los tipos de plantas.

En otras palabras, el CI es un indicador relativamente preciso de la salud de las plantas, ya que al medir la reflectancia espectral de la clorofila en las plantas se puede controlar el estado de los cultivos de forma regular. Las plantas dependen para sobrevivir de la clorofila debido a que absorben la luz solar que posteriormente convierten en azúcares y almidones (fotosíntesis), permitiendo ser utilizado este índice eficazmente en la gestión de los nutrientes durante una temporada. Los datos obtenidos gracias a este índice de vegetación también permiten la planificación de una temporada a otra.

Por otro lado, la dinámica de acumulación de nitrógeno (N), es un elemento relevante que se considera importante a la hora de realizar una fertilización, ya que a través de este análisis se puede considerar los rendimientos del cultivo, la materia seca total acumulada, y el rendimiento de producto o grano lo que implica directamente en la cosecha, este análisis nos permite identificar la relación entre el rendimiento del cultivo y la acumulación de nitrógeno en la parte aérea del cultivo, con el fin de determinar lo que requerimos de nitrógeno para la producción de cada cultivo. Para ellos se utiliza un índice espectral (NDRE) que es más sensible que el NDVI durante los periodos de maduración del cultivo, principalmente en temporadas medias y tardías de crecimiento que ya han acumulado una gran cantidad de clorofila. El índice de una imagen completa del contenido de clorofila, que es uno de los principales indicadores de nitrógeno ayuda a generar mapas de donde es necesaria la aplicación de fertilizantes.

Es importante conocer a fondo la temática respecto a la herramienta implementada desde el concepto básico del

comportamiento de las ondas electromagnéticas, y cómo estas inciden sobre los objetos, que para el caso particular de este libro, se refiere a la incidencia de dichas ondas en las hojas de las plantas y cómo son reflejadas o absorbidas, desde allí parte el concepto de la adquisición de imágenes multiespectrales y cómo pueden aplicarse como una tecnología útil que permita identificar las características fenológicas de los cultivos o suelos productivos.

El concepto de agricultura de precisión nace de la iniciativa de diseñar e implementar ideas que posibiliten el aprovechamiento de los recursos y el desarrollo de una agricultura sostenible, sin desmeritar el comportamiento de la producción. Estas ideas se desenvuelven en torno a una plataforma de movilidad basada en vehículos aéreos no tripulados, que garantizan el monitoreo no invasivo y la teledetección de las características más generales de los cultivos analizados permitiendo visualizar lo que a simple vista parece imperceptible.

La tecnología descrita anteriormente es muy utilizada, adquiriéndose imágenes en diferentes espectros de luz, para posteriormente, ser procesadas y analizadas permitiendo proporcionar información oportuna de las características del suelo y la densidad de la cobertura vegetal e indirectamente la salud y calidad de esta. Extrapolando esta información se alcanza a observar si las tierras analizadas tienen la capacidad de albergar plantas de calidad e indirectamente observar la fertilidad de las tierras, todo esto por medio del CI Y EL NDRE.

Metodología para la implementación de los índices espectrales CI Y NDRE

Hay múltiples metodologías que permiten implementar de la mejor forma este tipo de tecnologías de monitoreo, en los que no solo se pueden adquirir imágenes en diferentes espectros de luz si no también imágenes RGB con las cuales se pueden

obtener curvas de nivel e imágenes de alto calidad con metadatos, respecto al posicionamiento global en el momento que fueron adquiridas. En el mercado internacional se encuentran diferentes tipos de sensores que se destacan por la calidad de imágenes que adquieren además, que también se puede contar con el monitoreo por medio de satélites de observación terrestre que son de gran utilidad en el sector agrícola.

En cada espacio de campo ya sea de predios o terrenos a analizar se hacen una serie de actividades que permiten realizar un levantamiento multispectral exitoso, ya que gracias a la información recolectada se puede generar ortofotomosaicos en donde se condensan la totalidad de las imágenes adquiridas por predio, siguiendo la misma metodología para la totalidad de los predios.

Una vez se obtienen los ortofotomosaicos multispectrales para cada una de las locaciones, se presentan las imágenes con su debida georreferenciación, además, se agrupan los resultados de los porcentajes de áreas cubiertos en siete intervalos en los cuales se categorizan los índices de Clorofila y los índices NDRE, condensados en una tabla mostrada por predio para luego proceder a realizar el respectivo análisis de cada imagen, presentando la información de forma desglosada y entendible, permitiendo al agricultor y al personal que lo asesora, la toma de decisiones oportunas respecto a las medidas a implementar dentro de su predio y caracterizando en general los suelos.

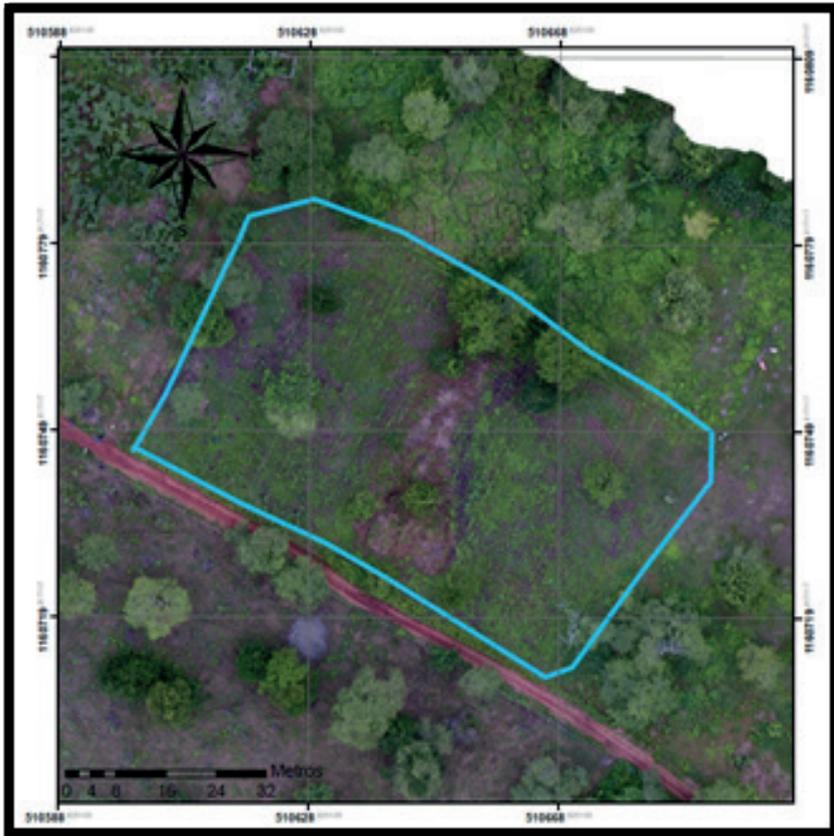
Ejemplo interpretación índices ci y ndre

A modo de ejemplo se presenta un caso práctico de interpretación de un predio referenciando los índices CI Y NDRE.

Como primer paso, se realiza el levantamiento multispectral con el objetivo de identificar los tipos de cobertura presentes en

la zona de estudio tomando como variable el porcentaje de área de las mismas, el estado fitosanitario del material vegetal presente y el porcentaje de área con requerimiento de abonos que aporten nitrógeno.

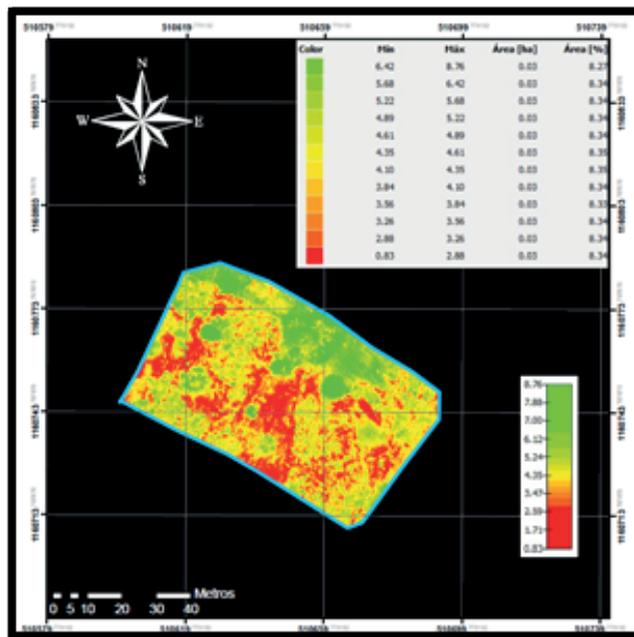
Figura 26
Ortomosaico del predio



Fuente: Equipo investigador

Ahora, definiendo como referencia la evolución de los niveles de clorofila identificados, se toma como variable el porcentaje de la cantidad de clorofila presente en las plantas.

Figura 27
Ortomosaico Índice de Clorofila foliar del predio



Fuente: Equipo investigador

Tabla 5
Clasificación de los intervalos de NDVI

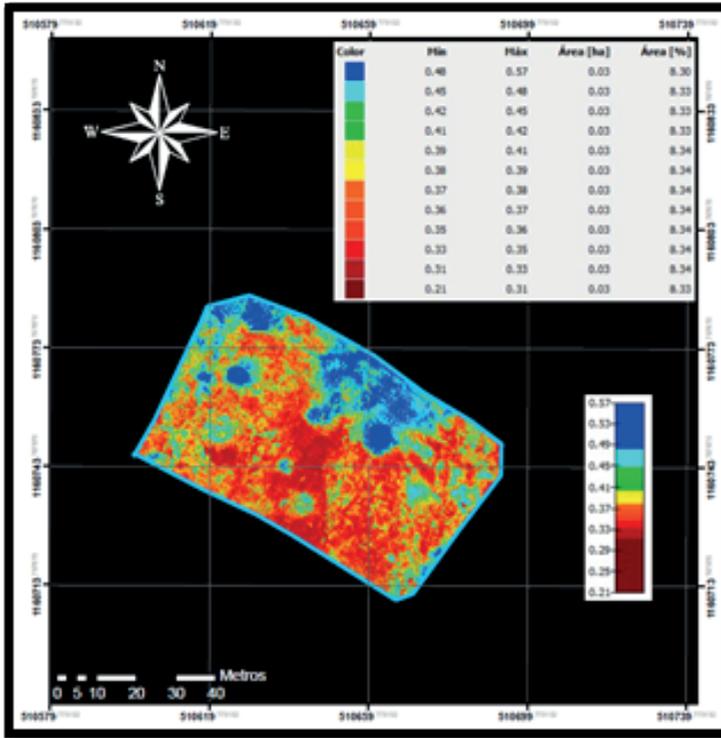
Categoría	Intervalo		Área (%) Sobrevuelo
	Min	Máx	
Vegetación sana	3,10	> 3,1	83,34
Vegetación medianamente saludable	1,71	3,10	16,68
Vegetación enferma	0,00	1,71	0,00
Cero cobertura de vegetación	< 0	0,00	0,00

Fuente: Equipo investigador

Analizando los resultados obtenidos, se puede decir que en un 83,34% del área en estudio debido a su reflectancia presenta un mayor número de células vegetales, es decir, un índice alto de presencia de clorofila en la planta, siendo ello indicador que en esta área se presenta un estado saludable de las plantas, con una presencia de nutrientes deseada o -en otras palabras- una presencia baja de deficiencias nutricionales de la misma. De lo descrito anteriormente también se puede deducir que el material biológico cuenta con condiciones óptimas para iniciar su proceso de siembra y cosecha; de igual forma, la zona de estudio presenta un 16,68% que se pueden asociar a la presencia de bajos niveles de clorofila, por lo tanto, en estas áreas se debería trabajar en la necesidad de mejorar sus condiciones nutricionales o la presencia de algún tipo de patógeno o especie que afecte el crecimiento o estado sanitario, en estas áreas se debería trabajar en la necesidad de vigilar la actividad fotosintética de las plantas para evitar que disminuyan con antelación.

Para el caso del análisis de Índice de Nitrógeno (NDRE), la evolución de estos niveles de clorofila identificados tomando como variable el porcentaje la cantidad de clorofila presente en las plantas y la relación con el nitrógeno, con el objetivo de determinar la estrategia de uso adecuado de fertilizantes.

Figura 28
Ortomosaico Índice de Nitrógeno del predio



Fuente: Equipo investigador

Tabla 6
Clasificación de los intervalos de Índice de Nitrógeno del predi

Categoría	Intervalo		Área (%) Sobrevuelo
	Min	Máx	
Sin requerimiento de N	0,30	0,60	91,67
Requiere N	0,00	0,30	8,33

Fuente: Equipo investigador

Analizando los resultados obtenidos utilizando el Índice de Vegetación NRDE, se puede decir que en un 91,67% del área en estudio debido a su reflectancia presenta un mayor número de células vegetales, representada según la paleta de colores con el color azul; todo ello debido a que la luz de borde rojo atraviesa las hojas mucho más profundo que la luz roja, como el índice da una imagen completa del contenido de clorofila el cual es el principal indicador de nitrógeno, podemos decir que en esta área específica se cuenta con una cobertura vegetal saludable, es decir, un índice alto de presencia de clorofila en la planta con una presencia de nutrientes deseable. Como el estado nutricional del nitrógeno puede determinarse indirectamente por la concentración de clorofila presente en las hojas, ya que está directamente correlacionada con la concentración de nitrógeno, se puede decir que encontramos altos niveles de presencia de nitrógeno allí, por lo que no se hace necesario aplicar estrategias de fertilización altas en esta zona.

Es importante recordar que al tener buenos niveles de clorofila puede ser también un indicador de contaminación de nutrientes; por lo que la clorofila permite medir la cantidad de algas presentes en una zona específica o la posible presencia futura de plagas no deseadas en la planta, por ello es importante hacer un seguimiento a la evolución del periodo de envejecimiento de la cobertura vegetal desde la fecha de siembra hasta la cosecha.

De igual forma, las zonas de baja presencia de clorofila representada con un 8,33% y según la paleta de colores de color rojo que son áreas de suelo desnudo y color que van del amarillo al verde son plantas poco saludables, con deficiencias nutricionales o vegetación que esta al principio de su maduración y se pueden asociar a las etapas fenológicas iniciales de los cultivos presentes, donde la cantidad de plantación es menor, por lo tanto, zonas con bajos índices de presencia de **nitrógeno** en las plantas; por lo que se debe trabajar en la necesidad de mejo-

rar sus condiciones nutricionales o la necesidad de vigilar la actividad fotosintética de las plantas para evitar que disminuyan los niveles de nitrógeno con antelación, identificando estas áreas como zonas de cultivo afectado. Siendo necesario realizar una planeación adecuada de fertilización con fines de realizar en los próximos análisis la evaluación de la absorción de los fertilizantes nitrogenados y así hacer una predicción del rendimiento de los cultivos.

CAPÍTULO VII: APLICACIONES DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES



CAPÍTULO VII

APLICACIONES DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES

En los últimos años se ha incrementado el interés de aplicar tecnologías de la información al campo agrícola, con el fin de industrializar el sector primario para hacerlo más productivo, realizando mapeos a cultivos utilizando imágenes multiespectrales y software para el procesamiento de nube de puntos cuyo objetivo principal es el poder realizar adquisición de imágenes de, por ejemplo, diferentes viñedos a través de sobrevuelos con un UAV y por medio de ello verificar el NDVI y además, generar imágenes DEM que son modelos digitales de elevación o también llamadas curvas de nivel.

Observando en diferentes investigaciones en primer lugar, se plasmaron los métodos de adquisición de datos por medio de un sistema multiespectral marca Sequoia; las diferentes experimentaciones realizadas en el cultivo muestran además, del análisis de los índices de NDVI obtenidos, destacan la posibilidad de desarrollar plantación en el que la inversión económica no sea más que la necesaria, aprovechando adecuadamente los recursos. Se presenta la fotogrametría multiespectral como una técnica innovadora que se puede incursionar en el sector primario para ayudar en el proceso de inspección o adquisición de información centrada en reconocer la salud de las plantas dentro de un cultivo, niveles de humedad y otras variables que inciden en el rendimiento y crecimiento de la vegetación.

En otras investigaciones realizadas se generan tareas de comparación de cámaras multiespectrales de banda estrecha y de banda ancha, para verificar los pros y los contras de cada una de ellas, integrándose a un UAV multirotor con el cual se realizó la toma de muestra de cultivos de maíz y en diferentes áreas de muestreo, donde se verificó la precisión de la reflectancia y la efectividad de la predicación de valores a partir del (NDVI). La plataforma UAV utilizada para el estudio fue un modelo de bajo costo, pero con características destacables como una duración de vuelo de 40 minutos y la sensórica normal de cualquier otro modelo como giroscopio, brújula y GPS, permitiendo establecer misiones de vuelo que se pueden programar en el controlador de vuelo a bordo, con posibilidad de guardar los registros de los sensores para un posterior procesamiento. En cuanto a las cámaras multiespectrales utilizadas se encuentran dos marcas importantes, Tetracam que cuenta con sensibilidad a 6 bandas espectrales y que ofrece la posibilidad de filtros intercambiables y la Parrot Sequoia que solo cuenta con 4 bandas espectrales, además, de cámara RGB. Los resultados a los que pudieron llegar son muy dicentes respecto a la precisión de la Tetracam en sus valores de reflectancia, teniendo en cuenta la realización de una calibración rigurosa sin desmeritar las características propias de la cámara de Parrot como la obtención de la radiación solar y la ubicación exacta de la adquisición de data lo que permite considerar los factores ambientales en el posprocesamiento.

Este tipo de estudios se han llevado a cabo también con el fin de observar tempranamente enfermedades, por medio de un software especializado como el pix4D y comparando los datos obtenidos por medio de un algoritmo propio creado en el software Matlab. Los sobrevuelos y adquisición de las imágenes se realizan sobre un cultivo de maíz.

Una de las constantes en cualquier trabajo con este tipo de imágenes, es el uso de cámara de amplio espectro como la

Parrot Sequoia; la cámara más común y fácil de encontrar en el mercado pero que a la hora de presentar resultados no son los mejores, los índices se calculan y analizan de tal forma, que los píxeles encuentran información de -1 a 1 siendo los valores positivos y más cercanos a 1, valores de vegetación saludable y con volumen, y a medida que se van acercando a cero se convierten en valores no deseados o representativos de presencia de material rocoso o de abundancia de tierra con ausencia de cobertura, y a medida que se vuelven negativos los valores se convierten en presencia de agua o humedad del terreno; la validación por medio del software de Matlab concordaron en todas las muestras y se verifica que los índices son los mismos sin presentarse una verificación con una cantidad de muestras o de imágenes para observar que los valores que se ven en los softwares se repiten, se alcanzan a diferenciar zonas donde no son sanas las plantas presentes y otras donde no se encuentra una cobertura vegetal, ayudando a detectar enfermedades o situaciones anormales en el cultivo.

Las cámaras multiespectrales implementadas en un UAV no constituyen la única forma de adquirir imágenes de este tipo; es posible adquirirlas a través de los diferentes satélites destinados a la observación terrestre. Estos astros incluyen dentro de sus estructuras, sensores altamente capaces de identificar los diferentes espectros de luz no visibles tales como los necesarios para la obtención de NDVI; esta herramienta es aprovechada por investigadores del centro interdisciplinario en respuesta al cambio y la variabilidad climática de diferentes universidades por medio de imágenes tomadas de los satélites en diferentes periodos de tiempo, con fines de realizar un análisis multiescalar en el que se puede identificar la disminución del NDVI y con dicha información se puede realizar una mejor gestión de los recursos ambientales con los que se cuenta; la desventaja de esta herramienta de adquisición es que la resolución de los ortomosaicos son de máximo 1,5 metros por píxel lo que imposibilita realizar un análisis confiable de índices normalizados en áreas

pequeñas, como lo son cualquier extensión de cultivos por más grande que sea. Otra desventaja es la periodicidad con la que se actualizan las imágenes dentro de los servidores que ofrecen la capacidad de descarga, ya que el satélite demora más de 15 días para pasar por el mismo lugar debido a la rotación alrededor de la tierra. Además, hay que sumarle el tiempo de procesamiento de estas por parte del equipo de control en tierra.

Un ejemplo de la implementación de las imágenes multiespectrales la encontramos en el monitoreo de las enfermedades y plagas de los cítricos en sus primeras etapas, esto es fundamental para mantener la eficiencia del control fitosanitario y la sanidad vegetal. Las múltiples enfermedades que son causadas por hongos, bacterias, virus y plagas limitan la producción. Entre las más conocidas encontramos la gomosis, que es causada por el hongo *Phytophthora spp.* La tecnología de detección no destructiva, que se ha utilizado para detectar problemas fitosanitarios en cultivos agrícolas, como los sensores multiespectrales e hiperespectrales a bordo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han aplicado ampliamente en la agricultura. En este estudio, la capacidad para la detección de gomosis cítrica se evaluó en dos conjuntos de datos. El primero consideró imágenes hiperespectrales adquiridas con un sensor de 25 bandas que cubría un rango espectral de 500 nm a 840 nm, y el segundo conjunto de datos fue un sensor multiespectral simulado de 3 bandas. [1]

Los índices de vegetación son piedras angulares en el monitoreo de la vegetación. Sin embargo, estudios de campo previos sobre líquenes y NDVI se han basado en sensores pasivos [2]. En ellos podemos encontrar la cantidad de vegetación y el estado de las plantas o el terreno, estos datos son apreciados gracias a una tabla de colores y a una tabla con el porcentaje que se mueve entre cada color, dándonos los puntos más exactos posibles donde se pueda encontrar suelo desnudo, agua, vegetación objeto de estudio, sus estados y también podría

mostrar los puntos donde se puedan apreciar maleza o rocas, entre otras cosas. La mayoría de las investigaciones sobre la naturaleza y la salud utilizan el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para medir la exposición al verdor. Sin embargo, se sabe poco sobre lo que mide el NDVI en términos de tipos de vegetación. Además, se necesita exploración para comprender cómo interpretar los cambios en la exposición promedio al NDVI (por ejemplo, por incrementos de 0,1) en relación con los cambios en la cantidad y los tipos de vegetación. En este estudio, nuestro objetivo fue explorar qué tipos y cantidades de vegetación explican mejor el NDVI promedio y cómo los cambios en los valores promedio de NDVI indican cambios en las diferentes coberturas de vegetación. [3]

En otras aplicaciones detectadas se logró identificar árboles que presentaban algún grado de deterioro por plagas forestales o que estaban muertos, mediante el uso de fotografías aéreas digitales en color e infrarrojo, lo que permitió obtener imágenes VIR con una resolución aproximada de un metro por pixel y cuatro bandas. Este reconocimiento fue posible gracias a la interpretación visual de las imágenes obtenidas.

Estos resultados fueron muy eficientes para detectar malformaciones o bajo crecimiento en árboles, con una precisión de 98% y presentan una ventaja importante, hablando de costos en la adquisición de información por otros métodos convencionales como el uso de helicópteros.

Una de las características más importantes se da mediante la comparación de vegetación sana y dañada en la que se identificó mediante la reflectancia en las hojas, que las longitudes de onda asociadas al azul y al infrarrojo son los que permiten discriminar entre plantas que se encuentran presentando alguna afección o no. Las herramientas fotográficas utilizadas son las Nikon D2X que permiten tomar imágenes en las bandas visibles y Canon EOS Digital Rebel para la banda no visible, la.

generación del ortomosaico se realiza por medio del software Photoshop.

Se utilizó el software Erdas Imagine para llevar a cabo la técnica de clasificación espectral. En la clasificación asistida se consideraron las propiedades espectrales de cada categoría para la separación en cinco grupos: bosque sano, bosque enfermo, matorral, suelo desnudo y sombras.

La tecnología de imágenes obtenidas en vehículos aéreos no tripulados puede proporcionar información de los cultivos, lo que permite una rápida toma de decisiones. Siendo más específicos, pueden proporcionar imágenes multiespectrales de alta resolución de las áreas de plantación de manera rápida y precisa. Los hongos pueden producir micotoxinas como metabolitos secundarios, que se encuentran ampliamente presentes en muchos alimentos y tienen efectos tóxicos muy fuertes en los seres humanos y los animales.

La zearalenona (ZEN), anteriormente conocida como toxina F-2, es una micotoxina, debido a sus evidentes efectos estrogénicos tanto en humanos como en animales, la ZEN ha sido clasificada como carcinógeno. Empleando la tecnología de imágenes multiespectrales (MSI) en combinación con diversas técnicas de aprendizaje automático se logra la detección de la presencia de zearalenona (ZEN) en el maíz, ya que por el suelo es inevitablemente contaminado con esta sustancia que puede provocar graves consecuencias en la salud humana.

El sistema utilizado en la identificación de ZEN este compuesto por una cámara, fuentes de luz, una esfera integradora y un conjunto de muestras. Las fuentes de luz están equipadas con LED de diversas longitudes de onda, el sistema de adquisición registra los reflejos de la superficie mediante un chip monocromático estándar de dispositivo acoplado de carga, alojado en una cámara puntual.

Se colocaron todas las muestras para obtener 19 imágenes separadas de diferentes longitudes de onda y las imágenes RGB mediante la tecnología de instantáneas. El procesamiento de imagen se realizó utilizando el software VideometerLab que permite eliminar el fondo de la imagen, se utilizó el Análisis Discriminante Canónico (CDA) para eliminar todos los elementos que no fueran las muestras de maíz.

Para mejorar el modelo de detección, se requiere una mayor cantidad de información y una menor cantidad de datos de características. Con este fin, se emplearon técnicas previas como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el Algoritmo Genético (GA) para obtener los datos de características más apropiados. Se aplicaron diversos métodos de aprendizaje automático, tales como mínimos cuadrados parciales (PLS), análisis de discriminación de mínimos cuadrados parciales (PLSDA), Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y redes neuronales de propagación inversa (BPNN), junto con las técnicas de PCA y AG, para desarrollar un modelo de predicción del contenido de ZEN en granos de maíz.

Otras imágenes ampliamente utilizadas son las imágenes multiespectrales satelitales, que se refiere a la adquisición de imágenes en diferentes rangos de longitud de ondas incluyendo las que se encuentran por fuera del espectro visible para el ojo humano permitiendo aplicaciones muy interesantes de adquisición de información con la finalidad de predecir parámetros en tiempo real fortaleciendo la agricultura de precisión (Pu et al., 2015), realizando un tipo de inspecciones no invasivas dentro de los cultivos (Nandibewoor et al., 2015).

Hace casi 20 años se colocó en órbita el primer astro artificial con las capacidades de captar imágenes de alta resolución, con el propósito de investigar los cambios generales que se presentan en la superficie terrestre (Pahlevan et al., 2017), derivándose de la tecnología aplicaciones que permiten obtener mapas

completos de regiones o países, actualizados con una periodicidad constante. Actualmente los satélites de teledetección brindan gran volumen de información a gran escala (Ramzi, 2018).

Los satélites de observación de la tierra (EOS), están sujetos a una serie de tratamientos digitales de imagen que pueden causar pérdida de información y posteriormente, son sometidas a un proceso de transmisión de información a largas distancias (ZHOU et al., 2017), dicha transmisión se realiza con un alto nivel de cifrado en los datos que contribuyen a evitar que amenazas externas interfieran en la integridad de la transferencia de las imágenes recolectadas (Bensikaddour et al., 2018).

En la actualidad, dichas imágenes están siendo de gran ayuda cuando se desea realizar estudios de salud forestal con el cual se puede determinar los servicios que prestan las grandes extensiones de bosques a la conservación de flora y fauna (Clark et al., 2017), reservación de recursos hídricos y mitigación de los efectos de los cambios grandes y frecuentes de temperatura (Walshe et al., 2020). Otra de las interesantes aplicaciones que se pueden desarrollar con las imágenes satelitales multiespectral es el seguimiento a los efectos adversos de los fenómenos atmosféricos violentos sobre la agricultura y los productos cosechables en amplias áreas donde se concentran huertos jóvenes y adultos (Prabhakar et al., 2019).

Las imágenes multiespectrales proporcionadas por los diferentes EOS ayudan a desarrollar detecciones o mostrar el comportamiento general de grandes extensiones de tierra que se encuentren albergando cualquier tipo de agricultura con el fin de identificar cambios significativos en el uso de la tierra, entre los inconvenientes que se tienen con dicha herramienta se encuentra la imposibilidad de comparar el rendimiento de las señales proporcionadas por los satélites y las configuraciones limitadas de los sensores que se encuentran instalados en los mismos, proporcionando resoluciones de 2 m en escenas de 10 x 10 km² (Sicre et al., 2020).

La tele-observación realizada por medio de imágenes multispectrales satelitales tienen el potencial de mejorar la recolección de datos y realizar análisis temporal de los cambios forestales, permitiendo realizar la evaluación y comprensión de los cambios y tendencias para identificar patrones. Es importante tener acceso a datos históricos precisos y fiables, así como a herramientas de análisis y visualización de datos adecuados. También es importante tener en cuenta factores externos que pueden influir en los patrones y tendencias históricas. A partir de las imágenes multispectrales, se estableció un modelo para describir el estado espacio-espectral de la vegetación forestal. El modelo se compone de un conjunto de variables que se utilizaron para llevar a cabo la segmentación del área cubierta por la vegetación forestal. Como resultado de la segmentación, se obtuvo un mapa de bits que consiste en una imagen binaria.

Dentro de las características más importantes que se pueden identificar en las imágenes multispectrales satelitales, se encuentra la posibilidad de poder identificar o extraer la información relevante. Permitiendo brindar la solución necesaria para la teledetección, monitoreo y seguimiento a cultivos de amplias extensiones de tierra, la identificación de problemas agrícolas o ambientales, entre otros. Pero la precisión de los algoritmos de clasificación utilizados para este fin no son lo suficientemente precisos, razón por la cual, se pueden encontrar en la literatura múltiples investigaciones en la que se propone como objetivo general la implementación de algoritmos de inteligencia artificial. De igual forma, se presenta la oportunidad de investigar los mejores métodos de preprocesamiento de las imágenes, dada la necesidad seleccionar el conjunto de datos correctos para la extracción de características por medio de redes neuronales convolucionales.

Las imágenes multispectrales satelitales tienen 5 diferentes características de información, resolución espacial, resolución espectral, resolución temporal, resolución radiométrica y resolución geométrica.

Las imágenes multiespectrales satelitales de resolución parcial se refieren a imágenes capturadas por satélites que contienen información en varios rangos de longitud de onda (bandas) y que no tienen una resolución espacial completa.

La resolución parcial significa que los píxeles en la imagen no se muestran en su máxima capacidad y, por lo tanto, puede haber detalles que se pierden. Por ejemplo, una imagen multiespectral satelital puede tener una resolución espacial de 30 metros, lo que significa que cada píxel en la imagen representa un área de 30 metros por 30 metros en la superficie terrestre. Sin embargo, estas imágenes pueden ser muy útiles para ciertas aplicaciones como el monitoreo de grandes áreas de tierra o de fenómenos atmosféricos, ya que proporcionan información valiosa sobre diferentes características y propiedades de la superficie terrestre, como la vegetación, la temperatura, la humedad del suelo, la presencia de agua, entre otros.

La resolución espectral se refiere a la capacidad de un sensor para medir la intensidad de la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Una imagen multiespectral de alta resolución espectral puede capturar información en un amplio rango de longitudes de onda, lo que permite identificar y caracterizar diferentes tipos de materiales y fenómenos en la superficie terrestre. Por ejemplo, una imagen multiespectral satelital de alta resolución espectral puede tener información sobre la reflectancia de la superficie en diferentes bandas, como el infrarrojo cercano, el rojo y el verde. Esto permite diferenciar y caracterizar distintos tipos de vegetación, suelos, cuerpos de agua, entre otros elementos. Las imágenes multiespectrales satelitales de resolución espectral son muy útiles para una amplia variedad de aplicaciones, como la cartografía, la agricultura, la gestión de recursos naturales, la detección de cambios ambientales, entre otras.

La resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que se toman las imágenes en una misma área de la superficie terrestre. Las imágenes multiespectrales de alta resolución temporal son muy valiosas para realizar análisis a largo plazo de los cambios en la superficie terrestre, como la evolución de la vegetación, la urbanización, la dinámica de los cuerpos de agua, entre otros. Por ejemplo, una imagen multiespectral satelital de alta resolución temporal puede tener datos diarios o semanales de una misma área de la superficie terrestre, lo que permite hacer un seguimiento de los cambios en la vegetación a lo largo de las estaciones del año o monitorear el crecimiento de los cultivos en una determinada región.

La resolución radiométrica se refiere a la capacidad de un sensor para medir con precisión, las diferencias en la intensidad de la radiación electromagnética en cada banda. Cuanto mayor sea la resolución radiométrica, más detalles se pueden distinguir en las imágenes, lo que permite una mayor precisión en la caracterización de diferentes elementos de la superficie terrestre. Por ejemplo, una imagen multiespectral satelital de alta resolución radiométrica puede distinguir con precisión las diferencias en la reflectancia de la vegetación en diferentes bandas, lo que permite identificar áreas de vegetación saludable, áreas de sequía, áreas afectadas por enfermedades o plagas, entre otros. Las imágenes multiespectrales satelitales de alta resolución radiométrica son muy útiles para una amplia variedad de aplicaciones, como la agricultura, la gestión de recursos naturales, la detección de cambios ambientales, la identificación de áreas afectadas por desastres naturales, entre otras.

Finalmente, la resolución geométrica se refiere a la capacidad de un sensor para capturar detalles finos en la imagen. Cuanto mayor sea la resolución geométrica, mayor será el nivel de detalle en la imagen. La resolución geométrica se mide en términos de píxeles por unidad de área y se expresa en metros. Por ejemplo, una imagen multiespectral satelital de alta resolu-

ción geométrica puede distinguir con detalle los límites entre diferentes tipos de cobertura del suelo, como áreas urbanas, bosques, campos de cultivo, cuerpos de agua, entre otros. También puede detectar características individuales como edificios, carreteras, puentes, y árboles individuales. Las imágenes multi-espectrales satelitales de alta resolución geométrica son muy útiles para una amplia variedad de aplicaciones, como la cartografía, la planificación urbana, la monitorización de la biodiversidad, la gestión de recursos naturales, la identificación de áreas afectadas por desastres naturales, entre otras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akatsu, T., Takiguchi, Y., Shinoda, Y., Wakai, F., & Muto, H. (2022). Optical transmittance and electrical conductivity of silica glass with biserial and hierarchical network structures made of carbon nanofibers. *Ceramics International*, 48(24), 36515–36520. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.08.211>

Alabi, T. R., Abebe, A. T., Chigeza, G., & Fowobaje, K. R. (2022). Estimation of soybean grain yield from multispectral high-resolution UAV data with machine learning models in West Africa. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100782. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2022.100782>

Almeida, P. A. D., & Gregorio-Hetem, J. (2022). Aspectos do Sol observados em diferentes faixas espectrais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 44, e202100405. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2021-0405>

Alvarenga, C. B., Mundim, G. S. M., Santos, E. A., Gallis, R. B. A., Zampiroli, R., Rinaldi, P. C. N., & Prado, J. R. (2023). Normalized difference vegetation index for desiccation evaluation with glyphosate + 2,4-D in magnetized spray solution. *Brazilian Journal of Biology*, 83, e246579. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.246579>

Atia, A., Bouabdallah, S., Ghernaout, B., Teggat, M., & Benchatti, T. (2023). Investigation of various absorber surface shapes for performance improvement of solar chimney power plant. *Applied Thermal Engineering*, 235, 121395. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMAL-ENG.2023.121395>

Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., & Makin, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management research and possible applications. Agricultural Water Management*, 46(2), 137–155. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00080-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00080-9)

Bendig, J., Malenovsky, Z., Gautam, D., & Lucieer, A. (2020). Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Measured From an Unmanned Aircraft System: Sensor Etaloning and Platform Motion Correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(5), 3437–3444. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2956194>

Bonnaire Rivera, L., Montoya Bonilla, B., & Obando-Vidal, F. (2021). Procesamiento de imágenes multispectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578

Bourgeon, M.-A., Paoli, J.-N., Jones, G., Villette, S., & Gée, C. (2016). Field radiometric calibration of a multispectral on-the-go sensor dedicated to the characterization of vineyard foliage. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 184–194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.019>

Bouvet, M. (2014). Radiometric comparison of multispectral imagers over a pseudo-invariant calibration site using a reference radiometric model. *Remote Sensing of Environment*, 140, 141–154. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.08.039>

Cao, S., Danielson, B., Clare, S., Koenig, S., Campos-Vargas, C., & Sanchez-Azofeifa, A. (2019). Radiometric calibration assessments for UAS-borne multispectral cameras: Laboratory and field protocols. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 132–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.016>

Castro Sardiña, L., Irisarri, G., & Texeira, M. (2023). Climate factors rather than human activities controlled NDVI trends across wet meadow areas in the Andes Centrales of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 214, 104983. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDEN-V.2023.104983>

Chaminda Bandara, W. G., Kasun Prabhath, G. W., Sahana Chinthana Bandara Dissanayake, D. W., Herath, V. R., Roshan Indika Godaliyadda, G. M., Bandara Ekanayake, M. P., Demini, D., & Madhujith, T. (2020). Validation of multispectral imaging for the detection of selected adulterants in turmeric samples. *Journal of Food Engineering*, 266, 109700. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.109700>

Cui, Z., Wang, Y., Gao, X., Li, J., & Zheng, Y. (2016). Multispectral image classification based on improved weighted MRF Bayesian. *Neurocomputing*, 212, 75–87. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j-neucom.2016.03.097](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.03.097)

Davidson, C., Jaganathan, V., Sivakumar, A. N., Czarnecki, J. M. P., & Chowdhary, G. (2022). NDVI/NDRE prediction from standard RGB aerial imagery using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107396. <https://doi.org/10.1016/J.COM-PAG.2022.107396>

Davis, Z., Nesbitt, L., Guhn, M., & van den Bosch, M. (2023). Assessing changes in urban vegetation using Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) for epidemiological studies. *Urban Forestry & Urban Greening*, 88, 128080. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2023.128080>

de Abreu Fontes, J., Anzanello, M. J., Brito, J. B. G., Bucco, G. B., Fogliatto, F. S., & Puglia, F. do P. (2021). Combining wavelength importance ranking to the random forest classifier to analyze multi-class spectral data. *Forensic Science International*, 328, 110998. <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2021.110998>

Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., & Yan, Y. (2018). UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 124–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>

Doering, D., Vizzotto, M. R., Bredemeier, C., da Costa, C. M., Henriques, R. V. B., Pignaton, E., & Pereira, C. E. (2016). MDE-based Development of a Multispectral Camera for Precision Agriculture. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 24–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.117>

Duan, T., Chapman, S. C., Guo, Y., & Zheng, B. (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>

González Bosquet, L. (2003). Los efectos nocivos de la radiación solar y la forma de combatirlos. *Offarm*, 22(5), 68–76.

<https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-los-efectos-nocivos-radiacion-solar-13047747>

Gregg, J. F., Anderson, B. E., & Remillieux, M. C. (2020). Electromagnetic excitation technique for nonlinear resonant ultrasound spectroscopy. *NDT & E International*, 109, 102181. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2019.102181>

Hoffmann, H.-J. (2001). Optical Glasses. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 6426–6441. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01137-2>

Invernizzi, D., & Lovera, M. (2018). Trajectory tracking control of thrust-vectoring UAVs. *Automatica*, 95, 180–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.05.024>

Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Franceschini, M. H. D., Kramer, H., van Loo, E. N., Roman, V. J., & Finkers, R. (2019). UAV based soil salinity assessment of cropland. *Geoderma*, 338, 502–512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.046>

Kaljahi, M. A., Shivakumara, P., Idris, M. Y. I., Anisi, M. H., Lu, T., Blumenstein, M., & Noor, N. M. (2019). An automatic zone detection system for safe landing of UAVs. *Expert Systems with Applications*, 122, 319–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.024>

Lan, Y., Huang, Z., Deng, X., Zhu, Z., Huang, H., Zheng, Z., Lian, B., Zeng, G., & Tong, Z. (2020). Comparison of machine learning methods for citrus greening detection on UAV multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105234>

L'Annunziata, M. F. (2023). Electromagnetic Radiation: photons. *Radioactivity*, 709–746. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90440-7.00005-3>

Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152–164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>

Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Hartling, S., Esposito, F., & Fritschi, F. B. (2020). Soybean yield prediction from UAV using multi-modal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111599. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111599>

Mikhail, I. E., Hemida, M., Lebanov, L., Astrakhantseva, S., Gupta, V., Hortin, P., Parry, J. S., Macka, M., & Paull, B. (2023). Multi-wavelength deep-ultraviolet absorbance detector based upon program-controlled pulsing light-emitting diodes. *Journal of Chromatography A*, 1709, 464382. <https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2023.464382>

Nanda Kumar, K., Vijayan Pillai, A., & Badri Narayanan, M. K. (2021). Smart agriculture using IoT. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.474>

Nandibewoor, A., Hebbal, S. B., & Hegadi, R. (2015). Remote Monitoring of Maize Crop through Satellite Multispectral Imagery. *Procedia Computer Science*, 45, 344–353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.158>

Orlando, S., Minacapilli, M., Sarno, M., Carrubba, A., & Motisi, A. (2022). A low-cost multispectral imaging system for the characterisation of soil and small vegetation properties using visible and near-infrared reflectance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107359. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2022.107359>

Pelaez Carrillo, D. A., & Gualdrón Guerrero, O. E. (2020). Caracterización de suelos con potencial productivo en el departamento de Norte de Santander usando cámara multiespectral en un vehículo aéreo no tripulado [Universidad de Pamplona]. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/3330>

Pelaez, D. A., Gualdrón, O. E., & Castellanos, L. (2020). Analysis of the intensity of electromagnetic radiation for the estimation of vegetation cover. *Journal of Physics: Conference Series*, 1704, 12008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1704/1/012008>

Pelaez, D. A., Gualdrón, O. E., & Torres, I. (2020). Soil characterisation through remote acquisition of electromagnetic radiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1587, 12033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1587/1/012033>

Pu, H., Kamruzzaman, M., & Sun, D.-W. (2015). Selection of feature wavelengths for developing multispectral imaging systems for quality, safety and authenticity of muscle foods—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 86–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.05.006>

Rahiche, A., Hedjam, R., Al-maadeed, S., & Cheriet, M. (2020). Historical documents dating using multispectral imaging and ordinal classification. *Journal of Cultural Heritage*, 45, 71–80. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2020.01.012>

Rodríguez, J. M. (2018). Polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(4), e4310. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0024>

Ruiz-Arias, J. A. (2022). Spectral integration of clear-sky atmospheric transmittance: Review and worldwide performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112302. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112302>

Shafiee, S., Mroz, T., Burud, I., & Lillemo, M. (2023). Evaluation of UAV multispectral cameras for yield and biomass prediction in wheat under different sun elevation angles and phenological stages. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210, 107874. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2023.107874>

Singh, P. J., & Silva, R. de. (2018). Design and implementation of an experimental UAV network. 2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), 168–173. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2018.8350739>

Sun, B., Bi, L., Yang, P., Kahnert, M., & Kattawar, G. (2020). Fundamentals. Invariant Imbedding T-Matrix Method for Light Scattering by Nonspherical and Inhomogeneous Particles, 7–56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818090-7.00002-4>

Suomalainen, J., Oliveira, R. A., Hakala, T., Koivumäki, N., Markelin, L., Näsi, R., & Honkavaara, E. (2021). Direct reflectance transformation methodology for drone-based hyperspectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112691. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2021.112691>

Talaviya, T., Shah, D., Patel, N., Yagnik, H., & Shah, M. (2020). Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 58–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002>

Verrelst, J., Rivera, J. P., Gitelson, A., Delegido, J., Moreno, J., & Camps-Valls, G. (2016). Spectral band selection for vegetation properties retrieval using Gaussian processes regression. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 554–567. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.016>

Walshe, D., McInerney, D., Kerchove, R. Van De, Goyens, C., Balaji, P., & Byrne, K. A. (2020). Detecting nutrient deficiency in spruce forests using multispectral satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 101975. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101975>

Wang, B., Ren, M., Xia, C., Li, Q., Dong, M., Zhang, C., Guo, C., Liu, W., & Pischler, O. (2022). Evaluation of insulator aging status based on multispectral imaging optimized by hyperspectral analysis. *Measurement*, 205, 112058. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.112058>

Xu, L., Ming, D., Zhang, L., Dong, D., Qing, Y., Yang, J., & Zhou, C. (2023). Parcel level staple crop type identification based on newly defined red-edge vegetation indices and ORNN. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, 108012. <https://doi.org/10.1016/J.COM-PAG.2023.108012>

Yavru, C. A., Kaleli, M., Üncü, İ. S., Koç, M., & Aldemir, D. A. (2022). Solar and infrared light sensing comparison of Yb/CIGS photodiode. *Sensors and Actuators A: Physical*, 347, 113973. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2022.113973>

Yu, Y., Shi, F., Zhang, Y., Li, F., & Han, J. (2024). Optical sensor array for the discrimination of liquors. *Journal of Future Foods*, 4(1), 48–60. <https://doi.org/10.1016/J.JFUTFO.2023.05.004>

Yue, J., & Tian, Q. (2020). Estimating fractional cover of crop, crop residue, and soil in cropland using broadband remote sensing data and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89, 102089. <https://doi.org/10.1016/J.-JAG.2020.102089>

Zhang, L., Shi, J., Zhu, Y., Zhang, C., Zhang, Z., & Zheng, J. (2023). An experimental study on monitoring wave profiles with LiDAR. *Ocean Engineering*, 285, 115436. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2023.115436>

Zhang, T., Guan, H., Ma, X., & Shen, P. (2023). Drought recognition based on feature extraction of multispectral images for the soybean canopy. *Ecological Informatics*, 77, 102248. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102248>



UNIVERSIDAD
DE PAMPLONA

ISBN: 978-628-7656-11-6

