

Manejo de drones para analizar imágenes multiespectrales en agricultura de precisión

Iván Camilo Díaz Jorge¹
Ing. Marcos Andrés Ramos Castañeda²

^{1,2} Facultad de Ciencias Ambientales – Grupo de Investigación INAM - USTA

Resumen

El texto examina 25 estudios que resaltan el uso de drones equipados con cámaras multiespectrales y tecnología de teledetección para crear mapas detallados del terreno y evaluar el estado de los cultivos. Estas herramientas permiten a los agricultores tomar decisiones informadas sobre fertilización y riego, optimizando los recursos disponibles y reduciendo los costos operativos. Asimismo, los drones promueven la sostenibilidad, consolidándose como una herramienta esencial en la agricultura moderna.

La agricultura de precisión se presenta como un enfoque tecnológico que utiliza datos y herramientas avanzadas, como sensores, GPS e imágenes satelitales, para gestionar eficientemente recursos como agua, fertilizantes y pesticidas. Este enfoque no solo incrementa la productividad de los cultivos, sino que también minimiza los impactos.

Además, las imágenes multiespectrales capturadas por sensores especializados recolectan información en longitudes de onda visibles (rojo, verde, azul) y no visibles (infrarrojo cercano, medio y lejano). Estos datos permiten analizar con precisión la salud de los cultivos y las condiciones del suelo, ya que cada material refleja la luz de

En este marco, el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) se destaca como una herramienta clave para medir la cantidad y el estado de la vegetación. Este índice se calcula utilizando las reflectancias en las bandas rojas (620-700 nm) y de infrarrojo cercano (750-900 nm). Los sensores multiespectrales, dependiendo de su resolución y propósito, proporcionan datos más precisos que las imágenes visibles (Campbell).

Por último, estudios de caso evidencian que el uso de drones mejora la producción de cultivos como el arroz y el café, ya que permite identificar áreas de bajo rendimiento mediante índices como el NDVI, facilitando intervenciones precisas y fomentando una agricultura más eficiente.

.

Palabras clave

Sensores multiespectrales, índices NDVI, teledetección, estrés hídrico, nm (nanómetros).

Abstract

The use of drones in precision agriculture has gained relevance for its ability to optimize agricultural management and increase productivity in a sustainable way. This technology allows monitoring and mapping crops with high precision thanks to multispectral and thermal sensors, which facilitates the early detection of problems such as water stress, pests and nutritional deficiencies. In addition, drones allow the localized application of inputs, reducing the use of agrochemicals and minimizing environmental impact.

The article reviews research that demonstrates how drones, equipped with multispectral cameras and remote sensing technology, generate detailed maps of the terrain and the state of crops. This allows farmers to make informed decisions about fertilization and irrigation, optimizing the use of resources. Although the use of drones presents challenges such as dependence on weather conditions and initial cost, the benefits, including reduced operating costs and improved sustainability, make them a valuable tool in modern agriculture.

Precision agriculture is a technological approach in agriculture that uses data and advanced tools to more efficiently manage resources such as water, fertilizer, and pesticides. This is achieved by using sensors, GPS, satellite images, and other technologies to monitor and optimize crop yield, improving productivity and reducing environmental impacts, Swinton, (2008).

In addition, a multispectral image is a capture made by means of camera sensors that collect data in various wavelengths of light, including visible (red, green, blue) and non-visible (near, mid, and far infrared). These images allow for detailed information on the health of crops and soil, since different materials reflect light differently at different wavelengths, Jensen, (2017).

Multispectral sensors are characterized by their ability to capture data at multiple wavelengths and their spatial resolution, which varies depending on the sensor and platform used. "The choice of a sensor depends on the application, such as agricultural monitoring, environmental assessment, or urban analysis. The combination of several spectral bands allows for detailed information on land surface properties that cannot be obtained with visible color images" Campbell, & Wynne (2011).

Various case studies highlight the effectiveness of drones in improving the health of crops such as rice and coffee, by creating indices such as NDVI, which help detect areas of low yield and plan specific interventions. This technology has proven to be essential for more efficient and precise crop management, contributing to more profitable and environmentally friendly agriculture.

KeyWords

Multispectral sensors, NDVI indices, remote sensing, water stress, nm (nanometers).

Introducción

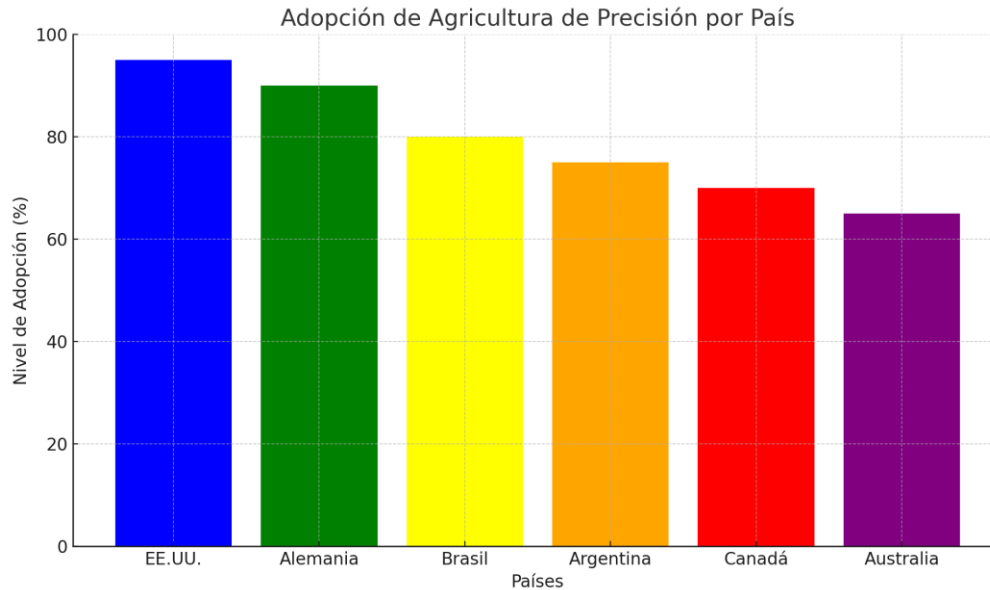
La agricultura de precisión se ha vuelto un campo de estudio cada vez más relevante, ya que busca mejorar la producción agrícola. Se enfoca en la implementación de técnicas y tecnologías para observar, analizar y responder ante las diferentes variaciones dentro y entre parcelas, lo que permite una gestión más exacta y eficiente de los cultivos. (Berrío, 2015; Mosquera, 2015; Camacho, 2024).

El creciente interés de diferentes países tanto desarrollados como en vía de desarrollo como lo son Brasil, Australia, México entre otros, que se han interesado en la agricultura de precisión se sustenta en el incremento del uso de tecnologías como lo son la captura de imágenes multispectrales, optimización del terreno para mejorar la producción, reducir y aprovechar el uso del agua además del número de investigaciones relacionadas con la temática (Augusto & Penha, 2015; Gil, 2019).

Por ejemplo, Brasil ha visto una expansión significativa de la agricultura de precisión, especialmente en sus vastas áreas agrícolas como la región del Cerrado. El país se ha enfocado en la implementación de investigaciones y aplicación de tecnologías para mejorar el uso del agua y los fertilizantes, así como para optimizar la cosecha de cultivos como la soja, el maíz y la caña de azúcar. (Silva; Oliveira, 2021). Es así como estos países dejan ver que el número de investigaciones en el tema ha ido en aumento.

La incorporación de drones en la agricultura de precisión ha generado nuevas oportunidades para mejorar la gestión agrícola y elevar la productividad de manera sostenible. Desde la detección anticipada de enfermedades y plagas hasta la optimización en la aplicación de insumos, los drones ofrecen una variedad de aplicaciones que ayudan a los agricultores a tomar decisiones más informadas y basadas en datos (Otálora, 2020).

La agricultura de precisión se adopta ampliamente en países como Estados Unidos, Alemania y Brasil, líderes en la implementación de tecnologías avanzadas en el campo. En América Latina, Argentina también destaca como un referente global en el uso de esta tecnología, ocupando el tercer lugar a nivel mundial en cuanto a implementación y adopción de prácticas innovadoras. Otros países con avances significativos incluyen Canadá, Australia y varias naciones europeas que integran herramientas como sensores, drones y análisis de datos en tiempo real, en la siguiente grafica se muestra el nivel de adopción de la agricultura de precisión que han tenido algunos de estos países:



Fuente: (AgroNoa, 2023; Banco Interamericano de Desarrollo (BID); AméricaEconomía, 2023)

Una de las principales ventajas en el uso de los drones es su capacidad para mostrar por medio del sensor ubicado en la cámara la combinación de bandas multiespectrales y así mediante algunos comportamientos se logra identificar e interpretar algunas diferencias, cambios, daños o problemas en los cultivos de manera anticipada, incluso antes de que los daños sean visibles. Equipados con cámaras multiespectrales y sensores térmicos, los drones pueden identificar áreas afectadas por estrés hídrico, deficiencias nutricionales o la presencia de plagas. Esta detección temprana permite a los agricultores intervenir rápidamente, reduciendo el impacto en la producción y minimizando el uso de tratamientos innecesarios, lo que no solo mejora la rentabilidad, sino también la sostenibilidad del proceso agrícola.

Además, los drones facilitan la recopilación de datos sobre factores clave como la humedad del suelo, la temperatura y la composición química del terreno. Con esta información, los agricultores pueden crear mapas precisos que ayudan a gestionar de manera más eficiente los recursos, como el agua y los fertilizantes. En lugar de aplicar insumos de manera generalizada, los drones permiten aplicar productos de forma localizada y precisa, lo que no solo mejora la eficiencia en el uso de estos recursos, sino que también ayuda a evitar el desperdicio y a reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente.

La aplicación de insumos es otra área donde los drones aportan ventajas significativas. Gracias a su capacidad para aplicar productos como fertilizantes, pesticidas o herbicidas con alta precisión, los drones aseguran que solo se utilicen las cantidades necesarias en las áreas específicas que lo requieren. Esto no solo reduce el uso de productos químicos, sino que también disminuye el riesgo de contaminación en el suelo y los cuerpos de agua cercanos. Además, al minimizar la exposición de los agricultores a estos productos, se contribuye a su bienestar y seguridad.

Los drones pueden llevar sensores que recopilan datos sobre la composición del suelo, la humedad y otras variables importantes. Estos datos se utilizan para crear mapas detallados del terreno, lo que ayuda en la toma de decisiones sobre la fertilización y el riego. También en la aplicación de Insumos los drones pueden ser utilizados para la aplicación de fertilizantes, pesticidas y herbicidas. Esto no solo reduce el uso de estos productos al aplicar solo las cantidades necesarias en las áreas específicas que lo requieren, sino que también minimiza el impacto ambiental y reduce el riesgo de exposición para los agricultores. Al proporcionar información precisa sobre el estado de los cultivos y del suelo, los drones permiten a los agricultores optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas. Esto no solo aumenta la eficiencia, sino que también reduce los costos y el impacto ambiental.

Además, como se menciona anteriormente los drones facilitan la recopilación de datos sobre factores clave como la humedad del suelo, la temperatura y la composición química del terreno. Con esta información, los agricultores pueden crear mapas precisos que ayudan a gestionar de manera más eficiente los recursos, como el agua y los fertilizantes. En lugar de aplicar insumos de manera generalizada, los drones permiten aplicar productos de forma localizada y precisa, lo que no solo mejora la eficiencia en el uso de estos recursos, sino que también ayuda a evitar el desperdicio y a reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente.

La gestión eficiente del agua es otro aspecto en el que los drones juegan un papel crucial. Equipados con sensores que miden la humedad del suelo, los drones permiten identificar de manera precisa las áreas que necesitan riego, lo que optimiza el uso de este recurso tan valioso y cada vez más escaso. Al aplicar agua solo donde es necesario, se reduce el derroche y se asegura un mejor desarrollo de los cultivos.

Gracias a su capacidad para ofrecer monitoreo en tiempo real, los drones también permiten un control constante de las condiciones de los cultivos. Esta información precisa y actualizada facilita a los agricultores tomar decisiones rápidas y ajustadas a las necesidades específicas de cada momento, lo que contribuye a un manejo agrícola más eficiente y rentable.

Con el avance continuo de la tecnología de los drones, el cual está llevando la eficiencia agrícola a un nuevo nivel, con la capacidad de realizar monitoreos detallados, aplicar insumos de manera precisa y obtener datos valiosos en tiempo real está revolucionando la forma en que los agricultores gestionan sus cultivos. A medida que la tecnología de los drones sigue evolucionando, podemos esperar una mayor integración con otras tecnologías y una mayor accesibilidad para los agricultores, lo que continuará impulsando la sostenibilidad y la productividad en la agricultura. se espera que en el futuro se puedan realizar tareas aún más complejas, como la siembra o la poda, lo que ampliará aún más las posibilidades de la agricultura de precisión. Esto no solo incrementará la eficiencia de los procesos, sino que también permitirá una mayor sostenibilidad, al reducir el impacto ambiental y mejorar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas.

Es así como el uso de drones en la agricultura de precisión ofrece una amplia gama de beneficios que mejoran la eficiencia operativa, reducen costos, aumentan la rentabilidad y, al mismo tiempo, promueven prácticas agrícolas más sostenibles, (Udris, M.; Zhang, Z. 2019).

Además, facilita una gestión más inteligente, que ayuda a los agricultores a tomar decisiones basadas en información precisa y actualizada. Esto es especialmente importante en un contexto donde la demanda de alimentos sigue creciendo y la necesidad de producir de manera más eficiente y responsable se hace cada vez más urgente.

Metodología de análisis y recolección de datos

Se realizó un proceso de revisión documental a través de la búsqueda en tres bases de datos especializadas (Scopus, Web of Science, y Google Scholar) filtrando por el periodo de tiempo (entre 2015 y 2024), también por categorías asociadas con agricultura de precisión, imágenes multiespectrales y tecnologías dron. Lo anterior arrojó en primera instancia un total de cincuenta artículos, los cuales fueron filtrados en base a los criterios de lectura que se tuvieron en cuenta y fueron:

- *Artículos que evaluaran el impacto del uso de drones en la agricultura de precisión.

Que a su vez presentaran aplicaciones específicas de drones, como monitoreo de cultivos, mapeo de suelos, uso eficiente del agua y de plaguicidas o control de plagas.

- *Revisiones y estudios de caso que incluyeran resultados sobre la eficiencia o productividad mejorada mediante drones.

- *Estudios que mostraran la capacidad superior de los drones en la agricultura de precisión frente a la agricultura convencional.

En segunda instancia y mediante los criterios de lectura se logran filtrar treinta artículos excluyendo aquellos que no presentaban datos suficientes o aquellos cuyo enfoque no estuviera relacionado directamente con la agricultura de precisión, además esta selección permitió identificar tres áreas clave como:

- *Monitoreo y mapeo de cultivos: Se destacó que el uso de drones equipados con cámaras multiespectrales y térmicas permite a los agricultores obtener imágenes de alta resolución en tiempo real. Estas imágenes ayudan a detectar problemas como estrés hídrico, plagas y enfermedades, lo que permite un manejo más eficiente de los recursos y una toma de decisiones más rápida.

- *Optimización del uso de insumos agrícolas: Los drones permiten la aplicación localizada de insumos como fertilizantes y pesticidas. Este enfoque de precisión ha mejorado la eficiencia de la aplicación de productos agroquímicos, reduciendo el desperdicio y minimizando el impacto ambiental.

- *Teledetección para análisis del suelo y clima: Los drones también han sido efectivos en la recolección de datos relacionados con la topografía del suelo y las condiciones micro climáticas.

Estos datos son utilizados para optimizar la siembra y mejorar la gestión del riego.

Análisis de datos

Para abordar el análisis de datos se tuvo en cuenta las tres áreas clave explicadas anteriormente las cuales son monitoreo y mapeo de cultivos, optimización del uso de insumos agrícolas y teledetección para análisis del suelo y clima, en la siguiente gráfica se presentan los resultados obtenidos de la búsqueda en la base de datos Scopus:

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

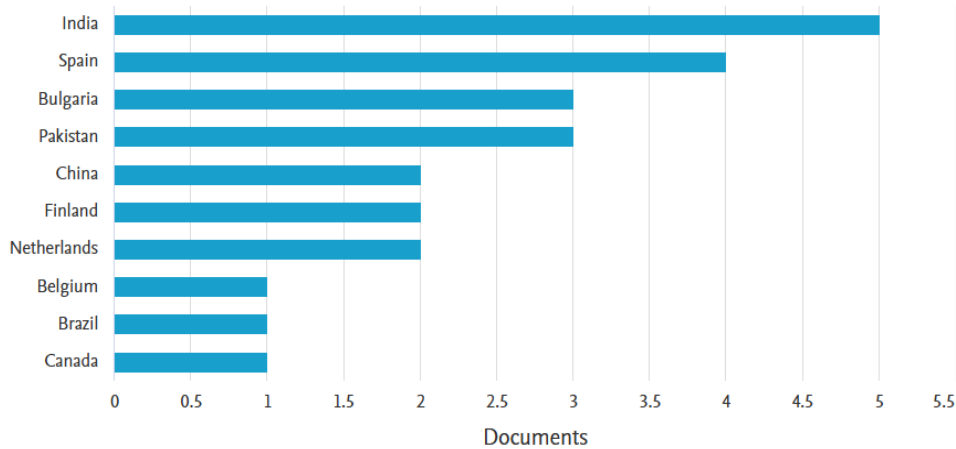


Imagen 1. Documentos encontrados por país
Fuente Scopus

En la imagen 1 se pueden apreciar los diferentes trabajos con respecto al tema, que a su vez se relacionan a los años en los que se ha desarrollado y los países en los que se han realizado más investigaciones, se puede notar que aunque Brasil no tiene un número significativo de investigaciones es uno de los países más relevantes en el uso de la agricultura de precisión con (UAV), por otra parte India aunque tiene bastantes investigaciones, esta implementando apenas gradualmente esta tecnología, allí “los agricultores apenas están comenzando a adoptar estas tecnologías en ciertas regiones y cultivos, especialmente en áreas donde la agricultura intensiva es más común, como en el cultivo de arroz, trigo, caña de azúcar, y algodón” (Mishra; Singh, 2021). lo que deja ver que el número de investigaciones en su mayoría es inversamente proporcional a su implementación real.

En la siguiente grafica se comparan los documentos encontrados por año relacionados con el tema de búsqueda

Documents per year by source

Compare the document counts for up to 10 sources.

[Compare sources and view CiteScore, SJR, and SNIP data](#)

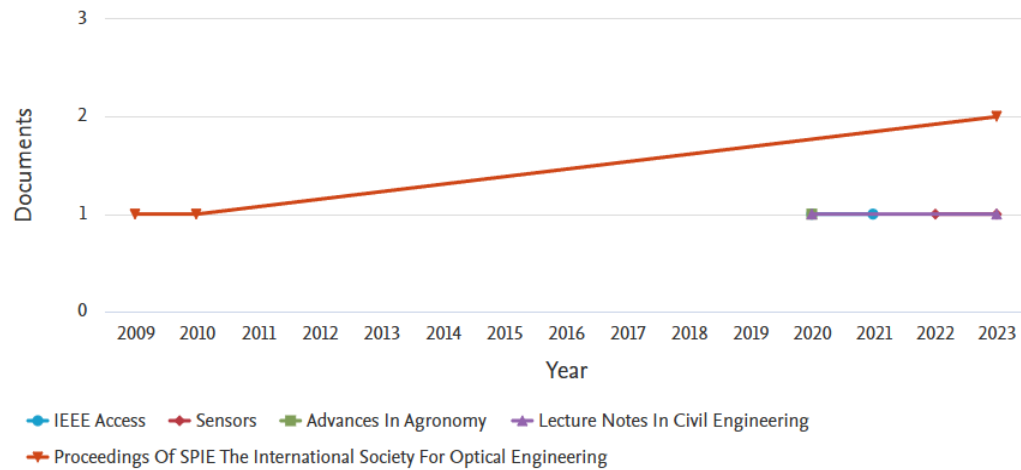


Imagen 2. Documentos por año y tema de búsqueda
Fuente Scopus

En la imagen 2 se puede apreciar como los documentos que son relevantes del año (2015 a 2024) la mayoría provienen de artículos de lectura de ingeniería civil identificado con color morado, avances en agronomía de color verde, sensores multiespectrales (rojo), documentos de clase IEEE en (azul) y estudios provenientes de la sociedad internacional de ingeniería óptica en (naranja), indicando así que en su mayoría los estudios relacionados con el tema han venido en aumento desde el año 2020

Documents by year

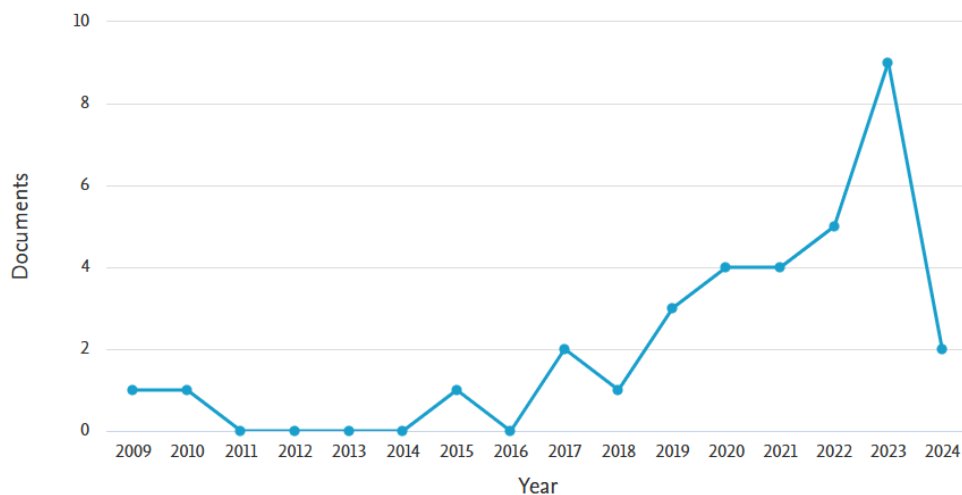


Imagen 3. Documentos encontrados por año

Fuente Scopus

En la imagen 3 se logran identificar los estudios encontrados por año donde se puede ver como ha venido en aumento desde el año 2015 considerablemente de uno hasta cuatro estudios el año 2023.

Para la selección de los diferentes artículos se usó la siguiente ecuación de búsqueda:

“agricultura” AND “drones” AND
“images” AND “multispectral”
(precision agriculture with drones
with multispectral images)

Formula de Búsqueda

A partir de esta ecuación de búsqueda y los cincuenta documentos encontrados inicialmente se tomaron en cuenta los tres criterios de lectura para filtrar los más relevantes con respecto al tema, para tener así un mejor análisis de las áreas clave posteriormente encontradas.

Análisis y discusión

En los veinticinco artículos y con temáticas específicas de monitoreo y mapeo de cultivos, optimización de insumos agrícolas y agua, teledetección para análisis del suelo y el clima, dando así diferentes puntos clave de la agricultura de precisión con el uso de drones equipados con cámaras multiespectrales teniendo en cuenta al máximo el trabajo con diferentes (UAV) como se presenta a continuación

La adopción de tecnologías avanzadas en el ámbito agrícola ha revolucionado la manera en que los productores gestionan sus cultivos, especialmente en la identificación temprana de problemas fitosanitarios. Un ejemplo de esto es un estudio realizado por Berrío, Mosquera y Alzate (2015) en Cundinamarca, donde se evaluó el uso de drones junto con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para detectar problemas que afectan el cultivo de papa. De acuerdo con los resultados de su investigación, el empleo de estas herramientas tecnológicas facilita la identificación de factores críticos como el estrés hídrico, la salinidad del suelo, la presencia de plagas y las deficiencias nutricionales, lo que no siempre es fácil de observar mediante métodos convencionales.

El uso de drones y del análisis multiespectral a través del NDVI ha demostrado ser una alternativa muy efectiva para mejorar la vigilancia de los cultivos. Las imágenes multiespectrales de alta resolución capturadas por drones permiten detectar problemas que no son visibles a simple vista, como el deterioro de la salud de las plantas debido a la falta de agua o nutrientes, o incluso la presencia temprana de plagas. Estas tecnologías ofrecen una ventaja significativa sobre las técnicas tradicionales, como la observación directa o el uso de sensores estándar, ya que proporcionan datos mucho más precisos y detallados. Así, se logra detectar y abordar problemas antes de que se conviertan en amenazas graves para el cultivo.

Un aspecto clave que destaca el estudio es la capacidad de los drones para acceder a áreas difíciles de alcanzar, como terrenos empinados o zonas remotas que complican la inspección manual. A diferencia de las inspecciones tradicionales, que requieren desplazamientos o equipos especializados, los drones pueden sobrevolar estos terrenos, capturando imágenes de alta calidad sin necesidad de intervención humana directa. Además, los drones ofrecen una resolución espacial mucho mayor que los satélites, lo que los convierte en una opción mucho más precisa y económica para obtener datos relevantes sobre los cultivos. Esta capacidad para adaptarse a diversas condiciones de terreno y ofrecer información detallada a un costo relativamente bajo es una de las razones por las que los drones se están consolidando como una herramienta de gran valor en la agricultura moderna.

Otro factor relevante es la integración del NDVI, un índice calculado a partir de las imágenes multiespectrales que ayuda a identificar rápidamente las áreas problemáticas dentro de los cultivos. Gracias a este índice, los agricultores pueden detectar con mayor agilidad zonas afectadas por estrés hídrico, deficiencias de nutrientes o ataques de plagas, lo que facilita la toma de decisiones y la aplicación precisa de tratamientos. Este enfoque no solo optimiza el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, sino que también contribuye a la disminución del empleo de agroquímicos, promoviendo una agricultura más sostenible. Al intervenir solo en las zonas que realmente lo requieren, los agricultores no solo logran mejorar la eficiencia de sus cultivos, sino que también incrementan su rentabilidad.

Sin embargo, algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta al implementar esta tecnología. En primer lugar, el costo inicial de los drones y del equipo necesario para realizar el análisis multiespectral puede ser elevado, lo que representa una barrera para muchos pequeños productores. Además, los drones requieren condiciones climáticas favorables para realizar los vuelos, ya que factores como la lluvia, el viento fuerte o la nubosidad densa pueden interferir con la calidad de las imágenes obtenidas, limitando la efectividad de la tecnología. A pesar de estas restricciones, los beneficios de utilizar drones en la agricultura de precisión parecen superar ampliamente los desafíos.

Aunque la implementación de drones en la agricultura implica una inversión inicial y depende de condiciones climáticas adecuadas, su capacidad para detectar problemas fitosanitarios a tiempo, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y aumentar la rentabilidad del cultivo es innegable. El uso de estas tecnologías no solo facilita una gestión más precisa y eficiente de los cultivos, sino que también contribuye a una agricultura más sostenible, reduciendo el impacto ambiental de la producción agrícola. A medida que la tecnología avanza y los costos se reducen, es probable que más agricultores puedan acceder a estos beneficios, lo que fortalecerá aún más el

papel de la agricultura de precisión en la mejora de la productividad global. Por lo tanto, a pesar de los desafíos, el potencial de los drones y el análisis multispectral en la agricultura es prometedor y ofrece soluciones prácticas para los retos del futuro agrícola, (Berrío et al., 2015).

En los últimos años, la agricultura ha experimentado avances significativos gracias a la incorporación de tecnologías innovadoras, como los drones. Estas herramientas aéreas han permitido transformar las prácticas agrícolas tradicionales, optimizando el uso de los recursos y mejorando la productividad. Un ejemplo de esta aplicación tecnológica se encuentra en Panamá, donde se ha realizado un estudio sobre el uso de drones para monitorear cultivos de arroz. El enfoque principal de la investigación fue identificar zonas con problemas de salud vegetal, utilizando imágenes multispectrales y RGB, junto con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Esta metodología ha demostrado ser útil para detectar áreas con baja densidad de plantas, maleza, clorosis y otros problemas relacionados con la distribución del riego, como las pendientes.

Uno de los beneficios más relevantes de este enfoque es su capacidad para inspeccionar áreas difíciles de alcanzar sin necesidad de intervención manual. Los drones, equipados con cámaras multispectrales y herramientas para crear modelos 3D y mapas de elevación digital (DEM), permiten obtener datos precisos de manera rápida y eficiente. Esto se traduce en un ahorro considerable de tiempo y recursos, ya que los agricultores no necesitan desplazarse físicamente a terrenos complicados o de difícil acceso. Además, esta tecnología también les permite obtener información más detallada, lo que facilita la toma de decisiones.

Otra ventaja crucial de esta innovación es la posibilidad de aplicar un manejo diferenciado de los cultivos. Gracias a los mapas generados por los drones, los agricultores pueden identificar las áreas que necesitan mayor atención, permitiéndoles aplicar insumos, como fertilizantes y agroquímicos, solo en las zonas que realmente lo requieren. Esto no solo optimiza el uso de los recursos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la cantidad de productos químicos que se aplican al suelo y al agua. A largo plazo, esta práctica puede reducir los costos operativos y, al mismo tiempo, mejorar la rentabilidad de los productores.

Los mapas generados por los drones durante diferentes etapas del ciclo de cultivo ofrecen una visión detallada de la salud de las plantas, lo que facilita la planificación de acciones correctivas en momentos clave. Por ejemplo, si se detectan áreas que requieren resiembra o nivelación del terreno para mejorar el riego, los agricultores pueden tomar medidas inmediatas. Esta capacidad de intervención oportuna no solo mejora la eficiencia de la producción, sino que también aumenta la precisión en la gestión del cultivo, lo que se traduce en mejores rendimientos.

Además, la accesibilidad de la información es otro factor que facilita la adopción de esta tecnología. Aplicaciones como Google Earth y plataformas específicas como AgriYttrium permiten a los agricultores consultar los datos obtenidos de manera intuitiva, sin necesidad de ser expertos en tecnología. Esto hace que el uso de los drones sea más accesible para un mayor número de productores, promoviendo la adopción de prácticas agrícolas de precisión en más regiones.

Sin embargo, como ocurre con cualquier tecnología, el uso de drones también presenta ciertos desafíos. Uno de los más evidentes es la frecuencia con la que se pueden realizar los vuelos, ya que las condiciones climáticas, como la lluvia o el viento, pueden interrumpir las operaciones. Además, los costos iniciales de los equipos y la capacitación necesaria para su uso son factores que algunos agricultores pueden considerar como barreras para su adopción. A pesar de estas limitaciones, la efectividad de los drones en la reducción de costos operativos y en la mejora de la gestión de los cultivos ha quedado claramente demostrada. Los datos precisos que proporcionan permiten a los agricultores tomar decisiones basadas en evidencia, optimizando los recursos y mejorando el rendimiento de los cultivos.

Además, esta tecnología fomenta una mayor sostenibilidad al permitir un uso más eficiente de los insumos y reducir el impacto ambiental. Aunque existen desafíos asociados con su implementación, el potencial de los drones para mejorar la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental es indiscutible. En un futuro cercano, es probable que esta tecnología juegue un papel fundamental en la agricultura global, brindando soluciones innovadoras para los productores y contribuyendo a un sector agrícola más eficiente y respetuoso con el medio ambiente., Montilla, & Seijas, C. (2021).

En el estudio drones aplicados a la agricultura de precisión, se destaca cómo esta tecnología en particular, permite a los agricultores monitorear grandes áreas de cultivo de forma rápida y efectiva, eliminando la necesidad de inspecciones manuales y reduciendo considerablemente los costos operativos. Esta tecnología permite capturar imágenes detalladas que proporcionan información valiosa para la toma de decisiones, optimizando el uso de recursos y facilitando intervenciones precisas en tiempo real.

Una de las grandes ventajas que los drones aportan es su capacidad para generar datos visuales a través de cámaras multispectrales. Estos dispositivos pueden captar diferentes longitudes de onda, lo que permite a los agricultores analizar el estado de sus cultivos con una precisión sin precedentes. A través de herramientas como el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), se puede evaluar la salud de las plantas, detectar problemas como plagas, enfermedades o deficiencias en el riego, y abordar cada uno de estos problemas de manera localizada. Así, los drones no solo mejoran la productividad de las tierras agrícolas, sino que también permiten una gestión más ecológica y eficiente de los recursos, evitando el uso excesivo de pesticidas o fertilizantes.

El proceso de implementación de los drones en la agricultura de precisión se divide en tres etapas principales. En primer lugar, en la fase de operación, se planifican los vuelos y se seleccionan los sensores adecuados para cada tipo de cultivo o terreno. Esta etapa es crucial, ya que el éxito de la tecnología depende de la correcta elección de los equipos y de la estrategia de vuelo. Posteriormente, en la fase de posprocesamiento, se analizan las imágenes recolectadas para crear mapas multispectrales y mapas NDVI, que proporcionan una visión clara de las áreas que requieren atención. Estos mapas permiten identificar las zonas con mayor o menor vitalidad, lo que facilita la intervención puntual y la asignación eficiente de recursos. Finalmente, en la etapa de aplicación en los cultivos, los datos obtenidos se utilizan para realizar ajustes específicos, como

la optimización del riego o la distribución de fertilizantes, lo que maximiza la rentabilidad y minimiza los impactos ambientales.

Además, en el artículo se destacan algunos de los equipos más avanzados para este tipo de tareas, como el Multispec 4C y el Parrot Sequoia, que permiten capturar imágenes en diferentes bandas espectrales como el verde, rojo e infrarrojo cercano. Estos sensores son fundamentales para obtener una imagen completa de la salud de los cultivos, ya que cada banda espectral ofrece información sobre distintos aspectos de la vegetación. Por ejemplo, la banda infrarroja cercana es muy útil para detectar el contenido de agua en las plantas, mientras que el rojo y el verde proporcionan información sobre la fotosíntesis y la estructura general de la vegetación.

Estudios de caso realizados en diversas plantaciones y bosques muestran cómo los drones no solo sirven para la agricultura, sino también para la gestión forestal. En estos escenarios, los drones ayudan a identificar árboles individuales y a analizar la biodiversidad del ecosistema, lo que ofrece a los responsables de la gestión del medio ambiente datos precisos para tomar decisiones informadas. Sin embargo, la tecnología no está exenta de desafíos. Uno de los problemas más comunes es la autonomía limitada de vuelo. Aunque los drones pueden cubrir grandes áreas, la duración de sus baterías limita el tiempo que pueden estar en el aire, lo que requiere una planificación cuidadosa. Además, la precisión de las imágenes puede verse afectada en terrenos irregulares, lo que puede llevar a ciertos márgenes de error en el análisis de los datos.

Para abordar estas limitaciones, los expertos sugieren que la clave está en el desarrollo de métodos automatizados de análisis de datos. Actualmente, aunque los drones son capaces de generar grandes cantidades de información, el procesamiento de estos datos suele ser un proceso manual y lento, lo que reduce la velocidad de respuesta ante problemas en los cultivos. La integración de sistemas inteligentes de análisis de datos permitiría acelerar este proceso y mejorar la precisión en la toma de decisiones.

A pesar de estas limitaciones, los beneficios que los drones aportan a la agricultura son evidentes. A nivel económico, la eficiencia en el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas puede reducir significativamente los costos operativos. Al intervenir de forma más precisa y localizada, los drones permiten que los agricultores gasten solo lo necesario, evitando el desperdicio y aumentando los rendimientos. Además, en términos ambientales, esta tecnología favorece una agricultura más sostenible, ya que permite realizar intervenciones menos invasivas y más respetuosas con el medio ambiente, protegiendo los ecosistemas cercanos a los cultivos.

Aunque existen desafíos técnicos por superar, como la autonomía de vuelo y la necesidad de análisis más automatizados, el potencial de esta tecnología es indiscutible. Con el tiempo, los avances en inteligencia artificial y el perfeccionamiento de los drones seguirán abriendo nuevas posibilidades para una agricultura más rentable y, sobre todo, más respetuosa con el medio ambiente. De este modo, los drones no solo representan una herramienta moderna para la gestión agrícola, sino también una apuesta por un futuro más sostenible y tecnológicamente avanzado para la agricultura global. González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016).

Por otra parte, en el artículo la agricultura de precisión y protección de cultivos se examinan las oportunidades y retos de la agricultura de precisión en la protección fitosanitaria de cultivos, con un enfoque especial en el uso de drones y sensores para maximizar la eficiencia de insumos y mejorar el control de plagas.

La incorporación de tecnologías avanzadas en la agricultura ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los cultivos. Entre las innovaciones más destacadas se encuentra el uso de drones equipados con sensores multispectrales, que están transformando la manera en que los agricultores gestionan sus tierras. Estos drones, al permitir la recolección de datos detallados sobre la salud y el vigor de las plantas, facilitan la creación de mapas precisos, como los basados en el índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que proporcionan una visión clara de las áreas que necesitan atención especial. Este tipo de tecnología no solo optimiza el uso de los recursos, sino que también permite una adaptación más precisa de los tratamientos fitosanitarios, reduciendo así los costos y mejorando el rendimiento de los cultivos.

Uno de los beneficios más importantes que ofrecen los drones es su capacidad para aplicar tratamientos de manera localizada y eficiente. La aplicación precisa de productos fitosanitarios, a través de técnicas como el patch spraying, reduce el impacto ambiental al minimizar el uso innecesario de químicos. Además, al poder acceder a áreas difíciles de alcanzar, como parcelas pequeñas o terrenos con obstáculos, los drones hacen que el proceso sea más eficiente, evitando la sobreexposición de los trabajadores a sustancias peligrosas. De este modo, no solo se mejora la seguridad en el campo, sino que también se disminuye la cantidad de productos químicos aplicados, lo que beneficia tanto a los ecosistemas como a los consumidores.

Otro aspecto relevante del uso de drones en la agricultura es su capacidad para generar modelos predictivos para plagas y enfermedades. Gracias a la integración de datos climáticos y la información obtenida por los sensores multispectrales, los agricultores pueden anticipar la aparición de enfermedades o infestaciones de plagas antes de que se conviertan en un problema serio. Esto les permite implementar medidas preventivas más eficientes y focalizadas, lo que, a su vez, optimiza el manejo fitosanitario y reduce la necesidad de intervenciones de emergencia. La predicción precisa de estos eventos también disminuye el riesgo de pérdidas económicas y mejora la planificación de las cosechas.

Sin embargo, el uso de drones en la agricultura no está exento de desafíos. Uno de los principales inconvenientes es la limitada autonomía de los drones, ya que la duración de las baterías sigue siendo un factor restrictivo. Esto significa que los drones deben recargarse con frecuencia, lo que puede retrasar las operaciones en grandes extensiones de terreno. Además, la capacidad de carga de los drones, aunque ha mejorado, no siempre es suficiente para transportar grandes volúmenes de productos fitosanitarios o equipos de sensores de alta gama. Otro reto significativo es el riesgo de deriva de los productos aplicados, que puede ser causado por factores como el viento. También existe el peligro de que los drones colisionen con obstáculos en el terreno, lo que hace necesario el desarrollo de regulaciones y protocolos de seguridad más estrictos para garantizar que estas tecnologías se utilicen de manera segura y efectiva.

A pesar de estas limitaciones, la agricultura de precisión, impulsada por los drones y los sensores multiespectrales, presenta claros beneficios tanto económicos como ambientales. Al aplicar los insumos de manera más precisa y localizada, se reduce el desperdicio de agua, fertilizantes y pesticidas, lo que no solo reduce los costos de producción, sino que también disminuye la huella ambiental de la agricultura. Este enfoque no solo mejora la rentabilidad de los productores, sino que también promueve un uso más responsable de los recursos naturales.

Al mejorar la precisión en la protección fitosanitaria, optimizar el uso de recursos y reducir los costos, estas tecnologías están demostrando su valor tanto para los agricultores como para el medio ambiente. Aunque aún existen algunos retos tecnológicos por superar, los beneficios de estas innovaciones son evidentes, y su adopción generalizada podría marcar un paso importante hacia un futuro agrícola más sostenible, eficiente y respetuoso con el entorno. Planas de Martí, S. (2018).

La agricultura moderna enfrenta numerosos desafíos relacionados con la eficiencia en el uso de los recursos, el control de plagas y enfermedades, y la necesidad de maximizar los rendimientos mientras se minimiza el impacto ambiental. La agricultura de precisión ha surgido como una respuesta a estos problemas, gracias a la incorporación de tecnologías avanzadas que permiten un monitoreo más detallado y específico de los cultivos. En este contexto, el uso de drones equipados con cámaras multiespectrales ha revolucionado las prácticas agrícolas, permitiendo a los agricultores obtener información crucial sobre la salud de los cultivos de manera rápida y precisa. Un ejemplo destacado de esta aplicación es el estudio sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones realizado sobre un cultivo de papa, que se centró en cómo el monitoreo mediante drones con imágenes multiespectrales puede mejorar la detección de problemas en los cultivos y optimizar los recursos utilizados en su gestión.

La investigación influyó a mejorar la identificación de problemas en la salud de los cultivos, de forma que se minimice tanto el tiempo como los recursos invertidos en el proceso de análisis. Tradicionalmente, los agricultores recurrían a métodos manuales o a inspecciones visuales para evaluar el estado de sus cultivos, un enfoque que es generalmente lento, costoso y menos efectivo. En cambio, con el uso de drones equipados con cámaras RGB y de infrarrojo cercano (NIR), fue posible capturar imágenes detalladas y realizar un análisis preciso utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice, que refleja el vigor y la salud de las plantas, resulta fundamental para detectar áreas con estrés antes de que los problemas se agraven, permitiendo una intervención más temprana.

Durante la selección del área de cultivo y la planificación de los vuelos de los drones, los vuelos fueron programados en momentos específicos del día, cuando las condiciones de luz eran óptimas para obtener imágenes de alta calidad. Las cámaras multiespectrales capturaron imágenes en diversas longitudes de onda, lo que permitió generar mapas detallados del cultivo. Al analizar las imágenes y calcular el NDVI, los investigadores pudieron identificar con precisión zonas afectadas por diferentes factores de estrés, como la falta de agua, la presencia de malas hierbas o deficiencias nutricionales, lo que facilitó una respuesta rápida y específica a cada situación.

Uno de los mayores beneficios de esta tecnología es su capacidad para identificar problemas de manera temprana, antes de que estos impacten gravemente el rendimiento de los cultivos. El análisis de las imágenes multispectrales permitió detectar áreas con exceso de agua o con la presencia de plantas invasoras, lo que ofreció la posibilidad de aplicar tratamientos más específicos. Esto no solo mejora la efectividad de las intervenciones, sino que también reduce la necesidad de utilizar agroquímicos de manera indiscriminada, lo cual es beneficioso tanto para la salud del ecosistema como para la reducción de costos asociados con el uso de estos productos.

El uso de drones y el análisis de NDVI contribuyen a una gestión más eficiente de los cultivos, al permitir una intervención más precisa y dirigida. Este enfoque no solo es aplicable a grandes explotaciones agrícolas, sino que también tiene un gran potencial para los agricultores a pequeña escala, quienes, en muchos casos, no cuentan con los recursos para implementar sistemas de monitoreo avanzados. El acceso a tecnologías como los drones, que cada vez se vuelven más accesibles y económicos, permite que los agricultores de cualquier tamaño puedan beneficiarse de una gestión más precisa y sostenible de sus cultivos, incrementando la productividad sin necesidad de recurrir a prácticas agrícolas destructivas o costosas.

La importancia de la agricultura de precisión como una estrategia para promover una mayor sostenibilidad en la producción agrícola. Al permitir una mejor administración de los recursos, como el agua y los fertilizantes, y al reducir la dependencia de insumos químicos, esta tecnología ayuda a minimizar el impacto ambiental de las prácticas agrícolas. Además, al aumentar la productividad de los cultivos mediante un manejo más eficiente, los agricultores pueden obtener mayores rendimientos con menos insumos, lo que beneficia tanto a los productores como a los consumidores.

El análisis de NDVI ofrece una solución efectiva y accesible para los agricultores interesados en optimizar sus prácticas agrícolas. Al proporcionar un monitoreo constante y detallado del estado de los cultivos, los drones permiten una detección temprana de problemas y facilitan la toma de decisiones informadas. Con la posibilidad de intervenir de manera más precisa y eficiente, los agricultores pueden mejorar la salud de sus cultivos, reducir el uso de agroquímicos y promover una producción más sostenible. Este enfoque no solo es viable para grandes explotaciones, sino también para pequeños agricultores, lo que convierte a la agricultura de precisión en una herramienta valiosa para la agricultura del futuro. Berrio, V., Alzate, D., & Ramon, J. (2018).

El uso de drones en la agricultura de precisión ha emergido como una de las innovaciones más impactantes en la modernización de las prácticas agrícolas. Con el crecimiento constante de la población mundial y la creciente demanda de alimentos, los agricultores enfrentan una serie de desafíos para maximizar la eficiencia en la producción, hacer un uso más racional de los recursos y garantizar la sostenibilidad de sus cultivos. En este contexto, el artículo fotogrametría con drones, diferentes usos y aplicaciones en la agricultura de precisión, hace relación a que los drones equipados con sensores avanzados y tecnologías de fotogrametría ofrecen soluciones precisas, escalables y adaptables a diversas condiciones agrícolas. Este ensayo sostiene que el uso de drones en la agricultura de precisión no solo mejora los rendimientos de los cultivos, sino que también contribuye a una gestión más sostenible de los recursos y promueve prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente.

Uno de los principales beneficios de los drones en la agricultura es su capacidad para realizar estudios multispectrales que proporcionan un análisis detallado de la salud y las necesidades de los cultivos. A través de sensores especializados, los drones pueden capturar información sobre el vigor de las plantas, la biomasa, el contenido de humedad en el suelo y otros factores cruciales para la gestión eficiente de los cultivos. Estos datos son vitales para tomar decisiones agrícolas informadas y localizadas, ya que permiten identificar con precisión qué áreas del terreno necesitan más atención, ya sea en términos de fertilización, riego o protección contra plagas. Este tipo de monitoreo, basado en datos exactos, hace posible aplicar insumos de manera más eficiente y solo en aquellas zonas que lo requieren, evitando el derroche y reduciendo los impactos ambientales negativos de la agricultura convencional.

Además, una de las características más destacadas de los drones es su capacidad para realizar un seguimiento continuo y en tiempo real de los cultivos. Mientras que los métodos tradicionales de inspección agrícola pueden ser lentos y costosos, los drones permiten obtener imágenes actualizadas de los campos en intervalos regulares, lo que proporciona una visión clara y precisa de la evolución de los cultivos. Esta capacidad de monitoreo en tiempo real es especialmente útil para detectar problemas como plagas, enfermedades o deficiencias nutricionales en sus primeras etapas. Identificar y abordar estos problemas antes de que se agraven puede evitar pérdidas significativas en los cultivos, lo que no solo mejora el rendimiento, sino que también reduce la necesidad de aplicar tratamientos preventivos o químicos, favoreciendo un enfoque más natural y saludable para el manejo agrícola.

Por otro lado, los drones también son esenciales para la creación de mapas tridimensionales que permiten a los agricultores evaluar con precisión la calidad del suelo y la topografía del terreno. Esta información es fundamental para diseñar y optimizar sistemas de riego, un aspecto crítico en regiones donde el agua es un recurso limitado. Mediante el uso de drones, los agricultores pueden identificar zonas de mayor y menor retención de agua, lo que facilita el diseño de un sistema de riego más eficiente, que minimiza el desperdicio y asegura una distribución más equitativa del recurso. Además, un sistema de riego eficiente no solo mejora la productividad de los cultivos, sino que también tiene un impacto positivo en la conservación del agua, un recurso cada vez más escaso en muchas partes del mundo.

En términos de sostenibilidad, los drones ofrecen una manera de reducir significativamente el impacto ambiental de la agricultura. El uso excesivo de pesticidas y fertilizantes ha sido uno de los principales factores responsables de la contaminación del suelo y el agua en la agricultura convencional. Sin embargo, los drones permiten una aplicación precisa de estos insumos, que se distribuyen solo en las zonas que realmente lo requieren, lo que minimiza el uso innecesario de productos químicos y reduce el riesgo de contaminación. Además, la capacidad de los drones para identificar de manera temprana las amenazas a los cultivos, como plagas o enfermedades, permite a los agricultores intervenir de manera más localizada y menos invasiva, lo que contribuye a una agricultura más sostenible y menos dependiente de productos químicos.

Es importante reconocer que el impacto de los drones va más allá de la mejora en la eficiencia agrícola. En un contexto global donde el cambio climático y el crecimiento de la población representan desafíos cada vez mayores para la seguridad alimentaria, la adopción de

tecnologías como los drones puede jugar un papel fundamental en la producción de alimentos de manera más eficiente, rentable y sostenible. Los drones no solo benefician a los grandes productores, sino que también pueden ser una herramienta accesible para pequeños y medianos agricultores, lo que democratiza el acceso a tecnologías avanzadas y permite a los agricultores de diferentes tamaños y condiciones competir en igualdad de condiciones.

Gracias a su capacidad para ofrecer datos detallados y en tiempo real sobre el estado de los cultivos, los drones permiten a los agricultores tomar decisiones más informadas y localizadas, lo que mejora el rendimiento de los cultivos, reduce el uso de insumos y minimiza el impacto ambiental. En un mundo donde los recursos son limitados y las condiciones climáticas son cada vez más inciertas, la agricultura de precisión respaldada por drones representa una solución clave para enfrentar los desafíos de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental en el futuro, Beltrán Nieto, J. R. (2022).

El uso de drones con cámaras multispectrales está transformando la agricultura moderna, particularmente en la gestión de cultivos mediante la agricultura de precisión. Un estudio reciente se centró en evaluar cómo esta tecnología puede mejorar el monitoreo del estado nutricional del café en Colombia, específicamente en plantaciones de la variedad Castillo, utilizando imágenes captadas desde el aire. Este enfoque no solo ofrece una visión detallada del cultivo, sino que también facilita la toma de decisiones más informadas y oportunas, con el potencial de aumentar la productividad y sostenibilidad del sector agrícola.

En este estudio, se empleó un dron DJI Phantom 4, equipado con la cámara MicaSense RedEdge™ 3. Esta cámara tiene la capacidad de capturar imágenes en cinco bandas espectrales (azul, verde, roja, red edge e infrarrojo cercano), lo que permite calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), una herramienta crucial en la agricultura de precisión. El NDVI es un indicador clave de la salud y vigor de las plantas, ya que permite detectar problemas como deficiencias nutricionales o estrés hídrico antes de que se hagan evidentes a simple vista. La medición precisa de este índice mediante tecnología de drones optimiza el monitoreo de los cultivos, permitiendo una intervención temprana y más efectiva.

El proceso de obtención de datos a través de los drones incluye pasos técnicos de calibración y ajuste geométrico, esenciales para asegurar que los resultados sean lo más precisos posible. Es importante destacar que, para validar la exactitud de los datos obtenidos desde el aire, estos fueron comparados con mediciones tomadas directamente en el terreno, utilizando un espectrómetro foliar. Los resultados mostraron una alta consistencia entre ambos tipos de mediciones, lo que refuerza la validez del uso de drones para el análisis de la salud de los cultivos. Sin embargo, el estudio también detectó algunas pequeñas discrepancias en los valores del NDVI, atribuibles a factores como la reflectancia del suelo o la vegetación circundante, lo cual puede generar pequeñas variaciones en los datos.

Para abordar estos posibles errores, los investigadores utilizaron una prueba estadística de Tukey, lo que permitió verificar la fiabilidad de los resultados. Sin embargo, también sugirieron que futuras investigaciones deben centrarse en mejorar las técnicas de calibración y ajustar los procedimientos utilizados para minimizar el impacto de los factores que afectan la reflectancia.

Estas mejoras son cruciales para maximizar la precisión de las mediciones y reducir las variaciones que puedan interferir con el análisis del estado de los cultivos.

A pesar de estos desafíos, los hallazgos del estudio subrayan el enorme potencial de los drones equipados con cámaras multiespectrales en la agricultura de precisión. Los drones no solo permiten detectar de manera temprana problemas en los cultivos, sino que también optimizan el uso de recursos como el agua, fertilizantes y pesticidas, mejorando así la eficiencia de las prácticas agrícolas. Este tipo de monitoreo contribuye a una mejor gestión de los insumos, reduciendo el desperdicio y, al mismo tiempo, aumentando la sostenibilidad y rentabilidad de las cosechas.

Además, la importancia de integrar los datos obtenidos por los drones en sistemas de información geográfica (SIG), que permiten analizar y visualizar grandes cantidades de datos espaciales de manera eficiente. Esta integración facilita la planificación y la ejecución de estrategias de manejo agrícola más precisas. Al tener acceso a información detallada sobre el estado de los cultivos, los agricultores pueden tomar decisiones más informadas sobre aspectos clave como el riego, la fertilización y el control de plagas, lo que contribuye a una mayor productividad y sostenibilidad en el largo plazo.

El uso de drones equipados con cámaras multiespectrales está demostrando ser una herramienta valiosa para mejorar el monitoreo y la gestión de los cultivos, como en el caso del café en Colombia. Aunque existen desafíos técnicos que deben ser superados, como las variaciones causadas por la reflectancia del suelo y la vegetación circundante, estos pueden resolverse mediante el perfeccionamiento de las técnicas de calibración y el uso de análisis estadísticos avanzados. Con el avance continuo de la tecnología, es probable que esta herramienta se convierta en una práctica estándar en la agricultura, permitiendo a los agricultores optimizar el uso de recursos, mejorar la salud de sus cultivos y promover prácticas agrícolas más sostenibles y rentables. Bonnaire Rivera, L., Montoya Bonilla, B., & Obando-Vidal, F. (2021).

En los últimos años, la tecnología ha experimentado un avance significativo en el ámbito agrícola, especialmente en el campo de la agricultura de precisión. Uno de los avances más relevantes en este sector ha sido la incorporación de drones equipados con cámaras multiespectrales y sistemas de información geográfica (SIG). Estas herramientas, cada vez más utilizadas por los agricultores, permiten un monitoreo mucho más preciso y detallado de los cultivos, mejorando la capacidad de respuesta ante problemas como plagas, deficiencias nutricionales o fallos en el riego. Este enfoque innovador ayuda a los agricultores a tomar decisiones más informadas y rápidas, lo que se traduce en una mejor gestión de los recursos y un aumento en la eficiencia de la producción agrícola.

El artículo Índices de Vegetación a partir de Imágenes de UAS/RPAS y Aplicaciones en la Agricultura de Precisión analiza cómo los drones pueden ser utilizados para obtener imágenes de alta resolución, que luego se procesan mediante algoritmos especializados para generar índices de vegetación. Entre estos índices destacan el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del Verde), RVI (Índice de Vegetación de la Relación de la Reflectancia), entre otros. Estos índices sirven para evaluar la salud y el vigor de las plantas, ya que analizan cómo reflejan la luz en distintos rangos espectrales.

La utilización de estos índices es esencial porque permite detectar con antelación problemas que, de otro modo, podrían no ser visibles hasta que ya afecten gravemente el rendimiento de los cultivos.

Además, la importancia de las herramientas de software como PIX4D, que se emplean para procesar las imágenes captadas por los drones. PIX4D genera mapas y modelos en 2D y 3D, lo que facilita tanto el análisis visual como el análisis estadístico de los datos. De este modo, los agricultores pueden interpretar los resultados con mayor claridad y precisión, optimizando el uso de insumos como fertilizantes y agua, y reduciendo costos. Este nivel de detalle y análisis también permite una mayor personalización en la gestión de los cultivos, ya que los índices de vegetación pueden adaptarse a las necesidades específicas de cada tipo de cultivo, lo cual no solo mejora el rendimiento, sino que también promueve prácticas más sostenibles.

Un aspecto relevante del estudio es la correlación entre algunos de los índices de vegetación analizados y el NDVI. Este hallazgo sugiere que ciertos índices pueden ser más efectivos para detectar condiciones particulares en los cultivos, lo que podría facilitar un enfoque más preciso en la monitorización. Por ejemplo, si un índice específico muestra una mayor sensibilidad ante deficiencias de nutrientes, el agricultor podría priorizar su uso para tomar decisiones rápidas y certeras. Esto implica que, más allá de ser herramientas de monitoreo general, los índices de vegetación pueden ser ajustados según el tipo de cultivo y el objetivo del monitoreo, mejorando aún más la precisión y efectividad del proceso.

Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos, el uso de drones en la agricultura enfrenta algunos retos que deben ser considerados. Uno de los principales inconvenientes es la autonomía limitada de los drones, que impide su uso continuo para la cobertura de grandes áreas sin realizar múltiples vuelos. Además, la dependencia de condiciones meteorológicas favorables, como cielos despejados y poco viento, puede afectar la calidad de las imágenes obtenidas, lo que en ocasiones puede retrasar la ejecución de las tareas. A pesar de estos desafíos, los beneficios que los drones ofrecen en términos de precisión y reducción de costos siguen siendo un argumento sólido a su favor. Los avances tecnológicos en la mejora de la autonomía de los drones y en el desarrollo de mejores sensores prometen superar estas limitaciones con el tiempo.

El estudio también incluye un caso práctico realizado en un campo de trigo en Puertollano, España, que demuestra cómo los drones pueden ser utilizados eficazmente en la agricultura. En este caso, los agricultores pudieron detectar rápidamente problemas de salud en los cultivos, como plagas o deficiencias nutricionales, lo que permitió tomar decisiones correctivas antes de que los daños fueran demasiado graves. Esta experiencia práctica resalta la aplicabilidad real de los drones en diferentes tipos de cultivos y climas, lo que confirma su versatilidad y eficacia.

El uso de drones en la agricultura de precisión ha demostrado ser una herramienta poderosa que no solo mejora la gestión de los cultivos, sino que también optimiza el uso de recursos y reduce costos. Gracias a los avances en la tecnología de imágenes multiespectrales y los sistemas de análisis basados en SIG, los agricultores ahora pueden monitorizar sus cultivos de manera mucho más eficiente, detectando problemas en etapas tempranas y actuando de forma más efectiva. A pesar de las limitaciones actuales, como la autonomía de los drones y su dependencia del clima, el potencial de estas tecnologías para transformar la agricultura es innegable. La integración de estas

herramientas tecnológicas en el ámbito agrícola promete no solo mejorar los rendimientos y reducir costos, sino también contribuir a un futuro más sostenible y eficiente en la producción de alimentos, Diaz, J. (2015).

En la aplicación de drones como herramienta tecnológica para la agricultura de precisión explora cómo la incorporación de drones facilita la transición de prácticas agrícolas tradicionales hacia un modelo de precisión. Según el estudio, aplicación de drones como herramienta tecnológica para la transición de la agricultura convencional a la de precisión. La incorporación de drones en la agricultura de precisión ha representado un avance significativo en la manera en que los agricultores gestionan sus cultivos y recursos. Esta tecnología no solo facilita la transición de métodos tradicionales hacia prácticas más modernas, sino que también optimiza diversas actividades agrícolas, promoviendo la sostenibilidad y aumentando la eficiencia en la producción. A través del uso de drones equipados con sensores avanzados, es posible recopilar datos cruciales sobre la salud de los cultivos, lo que permite una toma de decisiones más precisa y oportuna.

Uno de los aspectos más destacados de los drones en la agricultura de precisión es su capacidad para monitorizar el estado nutricional de las plantas, detectar estrés hídrico, identificar la presencia de plagas y enfermedades, y proporcionar información en tiempo real sobre la condición general de los cultivos. Los sensores multispectrales instalados en estos dispositivos ofrecen imágenes detalladas que no son visibles a simple vista, lo que permite a los agricultores detectar problemas antes de que se agraven. Esto no solo favorece una intervención temprana, sino que también permite ajustar las prácticas agrícolas de manera más específica, reduciendo el uso innecesario de pesticidas, fertilizantes y agua, y contribuyendo a una agricultura más sostenible.

El uso de drones también mejora la eficiencia en la distribución de insumos. Con información precisa sobre las necesidades de los cultivos, los agricultores pueden aplicar agua, fertilizantes y productos fitosanitarios de manera localizada, evitando el desperdicio de recursos y reduciendo el impacto ambiental. Esta capacidad de optimizar los insumos no solo tiene beneficios ecológicos, sino que también ayuda a reducir los costos operativos, un factor fundamental en un contexto económico donde la rentabilidad es cada vez más importante para los productores agrícolas.

Además, los drones han demostrado ser herramientas muy eficaces en la fumigación y el control de plagas en terrenos que resultan difíciles de acceder con métodos tradicionales. En áreas rurales, muchas veces los campos de cultivo están en zonas de difícil acceso debido a su localización o el terreno accidentado. Los drones pueden superar estas barreras, ofreciendo un control más preciso y menos costoso. También permiten el uso de biocontroladores, una alternativa más respetuosa con el medio ambiente en comparación con los agroquímicos convencionales. Esto no solo ayuda a controlar las plagas de manera más eficiente, sino que también mejora la salud del ecosistema agrícola en general.

En cuanto a la gestión de la información, la capacidad de los drones para recopilar y procesar datos de manera continua transforma la manera en que los agricultores toman decisiones. Gracias a la visibilidad en tiempo real sobre las condiciones de los cultivos, los productores pueden ajustar rápidamente sus estrategias, desde el riego hasta la aplicación de insumos. Esta agilidad

permite una respuesta más rápida ante situaciones imprevistas, favoreciendo una producción agrícola más eficiente y menos dependiente de prácticas erráticas o generalizadas.

Sin embargo, a pesar de las indudables ventajas de los drones en la agricultura, la transición hacia este tipo de prácticas enfrenta varios obstáculos que deben ser resueltos. Uno de los principales es la necesidad de formación adecuada para los agricultores. La tecnología de los drones, aunque avanzada, requiere que los usuarios comprendan cómo operarla y cómo interpretar los datos que estos dispositivos proporcionan. Esto implica la necesidad de programas de capacitación accesibles y efectivos, así como la infraestructura adecuada, ya que muchas zonas rurales carecen de la conectividad o los recursos para implementar de manera efectiva estos avances tecnológicos.

Otro desafío importante tiene que ver con el impacto social de la automatización en las áreas rurales. La adopción de drones y otras tecnologías avanzadas en la agricultura podría reducir la necesidad de mano de obra en algunas tareas, lo que podría generar un efecto negativo en las comunidades que dependen del empleo agrícola. Si bien la tecnología puede hacer el trabajo más eficiente, es fundamental pensar en cómo se pueden mitigar los efectos económicos que esto podría generar, ya sea a través de políticas públicas que promuevan la capacitación de los trabajadores para nuevas funciones o mediante la creación de nuevos tipos de empleo vinculados al uso de estas tecnologías.

Los drones se presentan como una herramienta esencial para la modernización de la agricultura, permitiendo un enfoque más preciso y sostenible en la gestión de los recursos y los cultivos. Sin embargo, para que su implementación sea exitosa en las comunidades rurales, es crucial que se aborden tanto los desafíos técnicos como los socioeconómicos. Solo a través de un enfoque integral, que considere tanto los beneficios como los obstáculos de esta tecnología, se podrá asegurar que los drones contribuyan de manera efectiva al futuro de la agricultura, promoviendo un desarrollo más sostenible y rentable para los agricultores. Virgues Rodríguez, T. Y., Zabala Rodríguez, A. K., & Valencia Achuri, P. A. (2022).

En el artículo Levantamiento multiespectral UAV para mapear el suelo y los cultivos para aplicaciones de agricultura de precisión nos resalta de como la agricultura de precisión ha dado un paso adelante en los últimos años gracias a la incorporación de tecnologías avanzadas, como los drones equipados con cámaras multiespectrales. Este tipo de tecnología ha revolucionado la forma en que los agricultores gestionan sus cultivos y recursos, ya que permite obtener información detallada sobre las condiciones del suelo y los cultivos en tiempo real. En particular, los drones capaces de capturar imágenes en espectros VIS-NIR (Visible-Infrarrojo cercano) y TIR (Infrarrojo Termal) son herramientas poderosas para obtener datos cruciales que pueden ser utilizados para optimizar la aplicación de insumos como fertilizantes y agua, mejorando así la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones agrícolas.

Uno de los índices más útiles derivados de estas imágenes multiespectrales es el NDVI, un indicador clave que mide la salud de los cultivos. A través de este índice, los agricultores pueden identificar áreas con deficiencias de nutrientes o estrés hídrico, lo que les permite tomar decisiones informadas sobre las intervenciones necesarias. Al contar con información precisa y en tiempo

real, los productores pueden ajustar las aplicaciones de insumos de manera más eficiente, reduciendo costos y evitando el uso excesivo de recursos, lo que a su vez contribuye a la sostenibilidad y al cuidado del medio ambiente.

Además, el artículo menciona el uso de software especializado, como Agisoft Photoscan y Pix4D, que permite procesar las imágenes obtenidas por los drones y crear modelos digitales de superficie (DSM) y ortofotos de alta resolución. Estos modelos ofrecen representaciones detalladas del terreno y de los cultivos, facilitando la toma de decisiones sobre cómo manejar las áreas agrícolas. Sin embargo, también se señala que, a pesar de los avances tecnológicos, existen retos técnicos que aún deben abordarse, especialmente en cuanto a la resolución espectral de las imágenes y la mejora de los algoritmos de procesamiento. Estos desafíos pueden afectar la precisión de los datos, lo que limita en algunos casos la efectividad de las herramientas de monitoreo en situaciones que requieren alta exactitud.

Un aspecto fundamental de la investigación es la captura de imágenes en diferentes momentos del ciclo de cultivo, como antes de la siembra y antes de la floración, ya que permite realizar un seguimiento más preciso de las fases de crecimiento de los cultivos. Este enfoque temporal ofrece una visión más detallada y dinámica de cómo evolucionan las plantas en momentos clave, lo que es esencial para aplicar las intervenciones correctivas de manera oportuna. Además, la utilización de Unidades de Manejo Específicas (SSMU) para la zonificación del terreno es otra técnica importante que contribuye a una gestión más eficiente. A través de esta zonificación, se pueden identificar áreas homogéneas dentro del campo y realizar aplicaciones localizadas de insumos, lo que reduce el desperdicio y optimiza el rendimiento.

Aunque la investigación resalta las ventajas de integrar drones en la agricultura de precisión, también reconoce que existen desafíos que aún deben superarse. Entre estos, destacan los problemas relacionados con la resolución espectral de las cámaras multiespectrales y la necesidad de mejorar los algoritmos automáticos de procesamiento para aumentar la precisión y eficacia de las imágenes capturadas. Estos problemas técnicos pueden limitar la capacidad de los drones para detectar detalles muy específicos en ciertas situaciones, lo que representa un obstáculo para su implementación más amplia.

A pesar de estos retos, la integración de drones en la agricultura de precisión sigue siendo una de las innovaciones más prometedoras para la gestión eficiente de los recursos agrícolas. La posibilidad de realizar un monitoreo detallado, constante y en tiempo real de los cultivos, además de la capacidad de intervenir rápidamente cuando se detectan problemas, tiene el potencial de aumentar la productividad y reducir el impacto ambiental. Sin embargo, para maximizar los beneficios de esta tecnología, es necesario continuar con el desarrollo y la mejora de sus capacidades técnicas.

Aunque los drones multiespectrales ofrecen grandes beneficios para la agricultura de precisión, su éxito depende de superar los desafíos técnicos relacionados con la resolución espectral y el procesamiento de datos. Con avances en estos aspectos, los drones podrían convertirse en herramientas esenciales para una agricultura más eficiente, sostenible y adaptada a las necesidades del futuro. Facchi, A., Sona, G., Passoni, D., Masseroni, D., Ortuani, B., Pinto, L., & Pagliari, D. (2016).

En el artículo el uso de drones y procesamiento de imágenes multiespectrales como herramientas para el monitoreo de la salud de los cultivos de caña de azúcar en el marco de la agricultura de precisión. El uso de drones equipados con sensores multiespectrales para monitorear la salud de los cultivos es una herramienta emergente en la agricultura de precisión, especialmente en el cultivo de caña de azúcar, esta tecnología permite obtener datos detallados que mejoran la toma de decisiones y optimizan el manejo de los cultivos, resultando en una mayor eficiencia y sostenibilidad. En un análisis reciente, se compararon dos programas de software muy utilizados en el procesamiento de imágenes: Agisoft Photoscan y Pix4D. El estudio concluyó que Pix4D es superior en el cálculo de índices vegetativos, particularmente el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), debido a sus capacidades de corrección radiométrica. Esta característica facilita una evaluación más precisa del vigor de la vegetación, permitiendo detectar áreas que podrían estar enfrentando problemas, como estrés hídrico o deficiencias nutricionales.

La planificación de los vuelos de los drones es esencial para asegurar una cobertura adecuada de las áreas de interés y evitar distorsiones en las imágenes. Para que los resultados sean precisos, es necesario que las imágenes capturadas tengan el solape adecuado, y que los vuelos se realicen a diferentes alturas y velocidades. En este contexto, el sensor multiespectral Parrot Sequoia ha demostrado ser una opción destacada en aplicaciones agrícolas. Este sensor es conocido por su buena relación calidad-precio y su capacidad para capturar tanto imágenes RGB como multiespectrales, lo que lo hace ideal para integrarse con varios modelos de drones. Su uso permite obtener datos precisos sobre la condición de los cultivos y facilita la integración de esta información en sistemas de gestión agrícola.

El NDVI es uno de los índices más utilizados para evaluar la salud general de los cultivos, ya que es muy eficaz para identificar áreas afectadas por estrés hídrico, falta de nutrientes o plagas. Sin embargo, el estudio señala que el NDVI tiene limitaciones, especialmente cuando se trata de diferenciar entre variedades de caña de azúcar sembradas en la misma temporada. A pesar de que el NDVI es útil para un análisis general de la vegetación, no es lo suficientemente preciso para identificar diferencias sutiles entre variedades que podrían tener características genéticas distintas. Esta limitación sugiere que, para una evaluación más detallada, sería necesario utilizar otros índices o tecnologías complementarias que permitan una diferenciación más clara entre las distintas variedades de cultivo.

En términos generales, la incorporación de drones y sensores multiespectrales en la agricultura de precisión no solo permite una mejor gestión de los cultivos, sino que también contribuye a la sostenibilidad. Al contar con información precisa y en tiempo real sobre el estado de los cultivos, los agricultores pueden optimizar el uso de recursos como el agua, los fertilizantes y los pesticidas, reduciendo el impacto ambiental de las prácticas agrícolas. Además, esta tecnología facilita la detección temprana de problemas, lo que permite tomar medidas correctivas más eficaces y oportunas, evitando pérdidas de cosechas y reduciendo costos.

Sin embargo, es importante reconocer que la adopción de esta tecnología no está exenta de desafíos. Aunque las ventajas son evidentes, la inversión inicial en drones y sensores multiespectrales puede ser considerable, lo que limita su acceso a pequeños productores.

Asimismo, es necesario que los agricultores reciban capacitación adecuada para aprovechar todo el potencial de estas herramientas, lo que implica un proceso de adaptación que puede ser complejo, especialmente en zonas rurales con pocos recursos. Además, factores como el clima y las dificultades técnicas (por ejemplo, la falta de cobertura de señal en áreas remotas) pueden afectar la efectividad de los drones en algunas regiones.

La utilización de drones y análisis multiespectrales en la agricultura de precisión presenta algunas limitaciones y desafíos, su potencial para mejorar la gestión agrícola es innegable. La capacidad para monitorear los cultivos de manera más eficiente, optimizar el uso de recursos y reducir costos operativos son factores clave que convierten a esta tecnología en una herramienta valiosa para la agricultura moderna. Sin duda, el uso adecuado de drones puede contribuir a la creación de prácticas agrícolas más sostenibles y rentables, y este estudio subraya la importancia de continuar investigando y mejorando estas herramientas para enfrentar los desafíos de la agricultura del futuro. Mitsikostas, E. (2017).

Un estudio, titulado "Estimación del rendimiento de trigo con imágenes UAV: aplicación en el contexto de la agricultura de precisión", explora el uso de drones equipados con sensores multiespectrales para estimar el rendimiento de los cultivos de trigo. La investigación se centra en cómo estas herramientas pueden optimizar las prácticas agrícolas, ayudando a predecir la producción y, por lo tanto, a tomar decisiones más acertadas que incrementen la eficiencia de los recursos.

Se utiliza un dron de ala fija equipado con sensores multiespectrales que capturan imágenes en diferentes bandas espectrales, como el verde, rojo, Red Edge (banda de borde rojo) e infrarrojo cercano. Con una resolución espacial de 10 cm por píxel, estos sensores permiten obtener imágenes de alta calidad que son esenciales para realizar un seguimiento detallado de parcelas agrícolas, incluso en terrenos de pequeño tamaño. Para analizar los datos obtenidos, se emplean índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), RVI (Índice de Vegetación de Relación), GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de Verde) y NDRE (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de Rojo Extendido), que proporcionan información crucial sobre la salud y el vigor de las plantas, indicadores fundamentales para la gestión agrícola.

Uno de los índices más comunes en este tipo de estudios es el NDVI, utilizado ampliamente para evaluar la biomasa y la salud general de los cultivos. Aunque es muy útil en muchos casos, el estudio resalta una limitación importante de este índice: su tendencia a saturarse en áreas con vegetación densa. Esto significa que, en zonas donde la cobertura vegetal es muy alta, el NDVI pierde capacidad para captar diferencias sutiles en la salud de las plantas, lo que afecta la precisión de las estimaciones de rendimiento. En este sentido, otros índices como el RVI y el GNDVI, que son menos susceptibles a la saturación, resultan más eficaces en determinadas situaciones, especialmente cuando los cultivos están en fases tempranas de crecimiento o cuando la vegetación es menos densa. Por otro lado, el índice NDRE, que se enfoca en el infrarrojo cercano, ha demostrado ser más efectivo para detectar signos de estrés en las plantas, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para evaluar la salud del cultivo a lo largo del ciclo productivo.

Para asegurar la fiabilidad de los resultados, el estudio también implementó metodologías avanzadas de procesamiento de los datos, como la creación de buffers para eliminar píxeles mezclados, el análisis de las trayectorias de la cosechadora y la corrección de fallos en la siembra. Estas técnicas, junto con herramientas estadísticas como la correlación de Pearson y la prueba T de Student, permitieron identificar relaciones significativas entre los índices de vegetación y el rendimiento del trigo, así como los efectos de los tratamientos de fertilización en los cultivos. No obstante, como se observó en los resultados, algunos índices, como el NDVI, presentaron limitaciones en su capacidad para estimar con precisión el rendimiento en áreas con alta cobertura vegetal debido a su saturación.

Pese a estas dificultades, los hallazgos del estudio refuerzan la idea de que el uso de drones equipados con sensores multispectrales, junto con un adecuado análisis de los índices de vegetación, constituye una herramienta poderosa para predecir el rendimiento de los cultivos. Estos avances tecnológicos ofrecen una visión detallada y precisa de la salud de las plantas, lo que permite a los agricultores tomar decisiones más informadas sobre la gestión de sus cultivos. Además, al integrar estas tecnologías en la práctica agrícola, se consigue una mejor utilización de los recursos, como agua y fertilizantes, reduciendo así el desperdicio y promoviendo una agricultura más sostenible.

La capacidad de estimar con precisión el rendimiento de los cultivos tiene un impacto directo en la productividad y en la reducción de costos operativos, lo cual es crucial en un contexto de creciente demanda alimentaria y de desafíos ambientales. Con herramientas como la teledetección por medio de drones, los agricultores pueden optimizar sus prácticas agrícolas, aumentando la producción sin incrementar proporcionalmente el uso de recursos, lo que resulta en un beneficio tanto económico como ambiental. La investigación presentada muestra cómo, al combinar tecnologías de vanguardia con prácticas agrícolas sostenibles, es posible transformar la forma en que se gestionan los cultivos, mejorando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental.

Existe un enorme potencial que tiene la tecnología de drones en la agricultura de precisión, no solo para mejorar los rendimientos de los cultivos, sino también para promover prácticas más responsables y sostenibles. Aunque existen algunas limitaciones en los métodos y en los índices empleados, los avances tecnológicos continúan abriendo nuevas posibilidades para optimizar la producción agrícola y gestionar los recursos de manera más eficiente. Sin duda, el futuro de la agricultura dependerá en gran medida de la integración de estas tecnologías, que permiten a los agricultores tomar decisiones más rápidas, informadas y sostenibles. Parra González, VM (2016).

En otro estudio titulado “Agricultura de precisión para la producción de arroz empleando tecnología para cultivos extensivos, RPAS en el monitoreo y aspersión”, deja entrever como el uso de drones en la agricultura de precisión está marcando un hito en la forma en que se gestionan los cultivos, especialmente en la producción extensiva de arroz. Estas aeronaves no tripuladas, conocidas como RPAS (aeronaves pilotadas a distancia), se están convirtiendo en herramientas clave para el monitoreo de cultivos y la aplicación de insumos. Su capacidad para cubrir hasta una hectárea en apenas 15 minutos es un avance significativo frente a los métodos tradicionales, como las motobombas, que pueden tardar hasta seis horas y requieren la intervención de varios operarios. Esta mejora en la eficiencia no solo optimiza el tiempo, sino que también reduce los costos operativos, lo cual resulta en una agricultura más rentable.

Pero más allá de los beneficios en cuanto a ahorro de tiempo y dinero, los drones también presentan ventajas en términos de seguridad laboral. Los métodos tradicionales de aplicación de pesticidas y fertilizantes suelen implicar la exposición directa de los trabajadores a sustancias químicas, lo que representa un riesgo para su salud. Los drones, al realizar estas tareas de manera remota, eliminan este peligro, lo que mejora la seguridad de los operarios y contribuye a un entorno de trabajo más seguro. Este aspecto es especialmente relevante en un contexto donde la protección de la salud laboral es cada vez más prioritaria.

En cuanto a la monitorización de cultivos, los drones equipados con cámaras multispectrales tienen la capacidad de proporcionar imágenes detalladas de la vegetación, lo que permite un análisis exhaustivo de su estado de salud, su crecimiento y la presencia de plagas o enfermedades. En el caso del cultivo de arroz en el departamento del Tolima, en Colombia, la combinación de imágenes RGB y multispectrales ha sido una herramienta fundamental para identificar malezas y evaluar el estado nutricional de los cultivos. Este tipo de monitoreo facilita una toma de decisiones más precisa, lo que no solo optimiza el uso de insumos como fertilizantes y pesticidas, sino que también permite reducir el impacto ambiental asociado a la sobreaplicación de estos productos.

Los drones no solo son útiles para monitorear el estado de los cultivos, sino también para detectar problemas fitopatológicos. Gracias a su capacidad para captar variaciones en la reflectancia de distintas longitudes de onda, como el infrarrojo cercano (NIR) o el térmico (TIR), pueden identificar zonas afectadas por plagas o enfermedades antes de que se conviertan en una amenaza grave. Este enfoque preventivo permite tratar solo las áreas específicas que requieren intervención, lo que reduce el uso de agroquímicos y mejora la eficiencia de su aplicación. Este tipo de intervención precisa también contribuye a una reducción significativa de los costos operativos, lo cual es esencial para la sostenibilidad económica de los productores.

Además de optimizar el uso de insumos y reducir el impacto ambiental, el uso de drones en la agricultura tiene un papel crucial en la promoción de una agricultura más sostenible. Al aplicar tratamientos solo en las áreas que lo requieren, se evita la sobreaplicación de fertilizantes y pesticidas, lo que reduce la contaminación del suelo y el agua. Esta precisión en el uso de recursos no solo mejora el rendimiento de los cultivos, sino que también minimiza los efectos negativos sobre el entorno natural, lo cual es un factor clave en la agricultura moderna.

El uso de drones en la agricultura de precisión está demostrando ser una herramienta transformadora para mejorar la eficiencia, reducir costos y garantizar prácticas más sostenibles. Al ofrecer una alternativa más precisa y menos invasiva a los métodos tradicionales, los drones contribuyen a una mayor seguridad laboral y a una optimización de los recursos, lo que favorece tanto a los agricultores como al medio ambiente. A medida que la tecnología continúa avanzando, se espera que los drones jueguen un papel cada vez más importante en la evolución hacia una agricultura más inteligente, rentable y sostenible. Bonilla Mora, KV, Cubillos Varón, JG y Valencia Achuri, PA (2023).

En la actualidad, la incorporación de tecnologías avanzadas en la agricultura está cambiando radicalmente las prácticas tradicionales de cultivo. Un estudio llevado a cabo en la

vereda San Miguel, ubicada en Cundinamarca, sobre el cultivo de café, ilustra cómo el uso de drones y sensores multispectrales puede transformar la forma en que se gestionan los cultivos, especialmente en términos de eficiencia, productividad y sostenibilidad. Este tipo de innovación tecnológica no solo optimiza los procesos agrícolas, sino que también mejora la toma de decisiones y minimiza los costos de producción.

El uso de un dron Parrot Bluegrass, equipado con una cámara multispectral Parrot Sequoia+, es esencial para capturar imágenes de alta precisión en diversas bandas espectrales, como el verde, rojo, infrarrojo cercano y borde rojo. Este tipo de análisis permite a los investigadores evaluar aspectos clave de los cultivos, tales como la salud de las plantas, el nivel de clorofila, la tasa de fotosíntesis y el estrés vegetal. Con esta información, se pueden identificar posibles deficiencias nutricionales o problemas de manejo que afectan el crecimiento del café, facilitando la intervención oportuna y la implementación de medidas correctivas.

El procesamiento de las imágenes capturadas por el dron genera índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), GNDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde) y RVI (Índice de Vegetación de Reflectancia Roja). Estos índices proporcionan una visión precisa de la salud general del cultivo, permitiendo detectar áreas problemáticas antes de que los daños sean visibles a simple vista. De este modo, los agricultores pueden intervenir de manera localizada, mejorando la eficiencia de los insumos y optimizando los recursos de manera más inteligente.

Además, el uso de un espectroradiómetro portátil ASD Field Hand Held 2, que complementa el análisis realizado por los drones al proporcionar firmas espectrales detalladas de las plantas y el terreno. Este instrumento mide con precisión la reflectancia de la superficie del suelo y las plantas, permitiendo obtener datos más detallados sobre el estado físico del terreno y la salud de los cultivos. La combinación de esta tecnología con el análisis espectral de los drones amplía la capacidad para diagnosticar las condiciones de los cultivos de manera integral, lo que resulta en una gestión más precisa de los recursos.

Una de las herramientas clave es el software Pix4Dmapper, que permite crear ortomosaicos de alta resolución. Estos ortomosaicos permiten visualizar con claridad el estado de las plantas a nivel de detalle, lo que facilita la identificación de variaciones en la salud de los cultivos. Los mapas generados proporcionan una representación visual precisa que permite a los agricultores tomar decisiones informadas sobre qué áreas requieren atención especial, ya sea en términos de riego, fertilización o protección contra plagas. De esta manera, se optimizan los recursos y se minimizan los costos de producción, al mismo tiempo que se maximiza la eficiencia en el uso de insumos.

Posteriormente, los datos obtenidos se procesan utilizando programas como ArcGIS, que permiten clasificar y analizar los resultados con precisión. Con este software, se generan mapas detallados que muestran las variaciones en la salud del cultivo en función de las imágenes espectrales, ayudando a identificar las zonas que necesitan intervenciones específicas. Este análisis detallado también facilita la implementación de prácticas agrícolas diferenciadas, donde las áreas con problemas reciben atención personalizada, mientras que las zonas saludables continúan con su manejo habitual.

La incorporación de tecnologías de teledetección y drones en la agricultura de precisión resalta el gran potencial que tienen para mejorar la gestión de los cultivos. Este enfoque no solo optimiza el uso de los recursos, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad de la agricultura. Reducir el uso innecesario de insumos, como fertilizantes y pesticidas, no solo mejora la rentabilidad de los cultivos, sino que también minimiza los impactos ambientales derivados de su uso excesivo, como la contaminación del suelo y el agua.

El estudio en San Miguel demuestra cómo las tecnologías avanzadas, como los drones y los sensores multiespectrales, ofrecen grandes beneficios a los agricultores. La posibilidad de obtener datos precisos sobre el estado de los cultivos permite tomar decisiones más acertadas y personalizadas, lo que resulta en un manejo agrícola más eficiente, una mayor productividad y un menor impacto ambiental. Este enfoque innovador no solo mejora los procesos agrícolas, sino que también promueve la sostenibilidad y la rentabilidad a largo plazo en la producción de café. Sin duda, la agricultura de precisión, apoyada por la tecnología, es el futuro de la producción agrícola responsable y eficiente. Lozano Mayorga, SE y Torres Forero, CA (2019).

El uso de tecnologías avanzadas, como los drones y las cámaras multiespectrales, ha revolucionado la manera en que se gestionan los cultivos agrícolas, permitiendo a los productores optimizar sus recursos y mejorar la productividad. En particular, el estudio de la aplicación de estos dispositivos en cultivos de palta en la región de Mollepata, Cusco, revela el potencial de estas herramientas para abordar desafíos críticos como el estrés hídrico y la escasez de agua, un problema creciente en muchas áreas agrícolas. Este análisis, que emplea un sistema UAV DJI Matrice 600 Pro equipado con una cámara Parrot Sequoia, muestra cómo la digitalización y la monitorización remota pueden ofrecer soluciones innovadoras para una agricultura más eficiente, sostenible y rentable.

Uno de los principales desafíos en la agricultura moderna es la gestión eficiente del agua, un recurso que se ha vuelto cada vez más escaso debido a fenómenos como el cambio climático y la sobreexplotación. En el caso específico de los cultivos de palta en Mollepata, Cusco, la sequía representa una amenaza significativa para la productividad de estos cultivos, que requieren una cantidad considerable de agua para su desarrollo. Tradicionalmente, los agricultores han dependido de métodos manuales para determinar las necesidades hídricas de los cultivos, lo cual no solo es costoso, sino también ineficaz, ya que no siempre refleja con precisión el estado real de las plantas.

La incorporación de drones equipados con cámaras multiespectrales ha cambiado esta dinámica. Estos dispositivos permiten una monitorización constante y precisa del estado de los cultivos, utilizando imágenes que capturan información en diferentes longitudes de onda, como el rojo, el infrarrojo cercano y el RGB. El análisis de estas imágenes proporciona datos sobre la salud de la vegetación y, en particular, sobre el estrés hídrico que puedan estar experimentando las plantas. A través de índices de vegetación, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), es posible identificar de manera precisa las áreas del cultivo que requieren atención, permitiendo a los agricultores aplicar agua solo en las zonas que realmente lo necesitan, optimizando el uso del recurso.

El análisis del uso de drones y cámaras multiespectrales en los cultivos de palta en Mollepata, Cusco, demuestra cómo estas tecnologías emergentes pueden transformar la agricultura moderna. Gracias a su capacidad para detectar de manera precisa el estrés hídrico y optimizar el uso del agua, se puede mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. Además, este enfoque contribuye a una gestión más sostenible de los recursos naturales y se alinea con los principios de la agricultura de precisión, ofreciendo una solución viable y práctica para los desafíos actuales del sector agrícola. Con la continua evolución de estas tecnologías, el futuro de la agricultura parece estar cada vez más orientado hacia la innovación y la sostenibilidad. Castillo Guevara, (2019).

En el artículo La Agricultura de Precisión: Innovación con Drones y Sensores Multiespectrales en el Cultivo de Arándano. Relaciona al igual que varios artículos anteriores como la tecnología ha transformado significativamente varios sectores en los últimos años, y la agricultura no ha quedado atrás. En este contexto, los drones y los sensores multiespectrales han surgido como herramientas esenciales para mejorar la eficiencia y la precisión en la gestión agrícola. Especialmente en cultivos de alto valor como el arándano, estos avances tecnológicos están permitiendo a los productores optimizar tanto la productividad como la sostenibilidad de sus fincas. La combinación de plataformas aéreas como el eBee X Sensefly, junto con sensores avanzados como el RedEdge-MX, ha abierto nuevas posibilidades para monitorear los cultivos con una precisión que antes era impensable.

Uno de los mayores beneficios de esta tecnología radica en su capacidad para capturar imágenes en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, incluyendo el azul, verde, rojo, rojo cercano e infrarrojo. Esta variedad de bandas permite a los sensores obtener información detallada sobre la salud de las plantas, algo vital para el manejo eficiente de los cultivos. Un indicador clave en este proceso es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que evalúa el vigor de las plantas y ayuda a identificar áreas específicas que puedan estar enfrentando estrés debido a plagas, enfermedades o deficiencias nutricionales. Este índice ofrece una visión clara de las zonas que necesitan intervención, lo que facilita que los agricultores actúen rápidamente y con precisión.

El uso de drones en combinación con estos sensores no solo mejora el diagnóstico de las condiciones de los cultivos, sino que también permite la implementación de estrategias de manejo mucho más focalizadas. Por ejemplo, con los datos recolectados, los agricultores pueden gestionar el riego de manera más eficiente, asegurando que las plantas reciban la cantidad exacta de agua que necesitan. Además, la aplicación de fertilizantes y fitosanitarios se puede realizar de forma más precisa, reduciendo así el uso innecesario de productos químicos y optimizando los costos. De esta manera, no solo se mejora la rentabilidad, sino que también se avanza hacia un modelo de agricultura más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Para procesar los vastos volúmenes de datos que los drones recopilan, los agricultores recurren a plataformas especializadas como Pix4D y RaptorView, que permiten crear mapas detallados y realizar un seguimiento temporal de los cultivos. Estas herramientas hacen posible

que se pueda monitorear la evolución de los cultivos a lo largo de la temporada, facilitando decisiones estratégicas en tiempo real. Este tipo de monitoreo continuo asegura que los problemas se detecten en etapas tempranas, lo que evita pérdidas significativas y mejora la capacidad de respuesta frente a cualquier imprevisto.

Además de estos beneficios operativos, el uso de drones responde a una tendencia más amplia hacia la automatización en la agricultura, especialmente en un contexto de creciente escasez de mano de obra. Los drones permiten a los productores gestionar grandes áreas de cultivo de manera mucho más rápida y eficiente que los métodos tradicionales. Esto resulta particularmente importante en cultivos como los arándanos, que requieren cuidados detallados y oportunos para garantizar una cosecha de calidad. La automatización de tareas como el monitoreo aéreo y la recopilación de datos también reduce la necesidad de intervención manual, lo cual es una ventaja en un mercado laboral cada vez más limitado.

A pesar de sus numerosas ventajas, la adopción de drones y sensores multispectrales no está exenta de desafíos. La planificación de los vuelos debe ser minuciosa, ya que factores como el clima, la topografía del terreno y las regulaciones locales pueden afectar la calidad y la precisión de los datos. Asimismo, el procesamiento de los grandes volúmenes de información generados por los sensores exige una infraestructura tecnológica adecuada y personal capacitado. En algunos casos, estos requisitos pueden ser un obstáculo para los pequeños productores que no cuentan con los recursos necesarios. Además, las normativas que regulan el uso de drones en muchas regiones pueden ser restrictivas, lo que plantea un desafío adicional para su implementación masiva.

A pesar de estos obstáculos, los beneficios a largo plazo de los drones y sensores multispectrales superan ampliamente los retos iniciales. Esta tecnología no solo mejora la gestión agrícola, sino que también promueve una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. El uso de drones en el monitoreo de cultivos de arándano, por ejemplo, permite a los agricultores tomar decisiones más informadas, reducir el uso de insumos y mejorar la calidad de la cosecha. Además, al facilitar el manejo preciso de los recursos, estos avances contribuyen a una agricultura más sostenible y menos dependiente de prácticas intensivas.

La integración de drones y sensores multispectrales en la agricultura de precisión está revolucionando la forma en que se gestionan los cultivos, haciendo posible un monitoreo más eficiente, sostenible y rentable. A pesar de los desafíos que presenta su implementación, la tecnología continúa demostrando que es una herramienta invaluable para enfrentar los retos de la agricultura moderna, ayudando a los productores a optimizar la producción, reducir costos y gestionar los recursos de manera más responsable. Con el tiempo, es probable que el uso de drones en la agricultura se convierta en una práctica común, mejorando tanto la productividad como la sostenibilidad del sector agrícola en su conjunto. Acuña Huaraca, DS (2023).

En el estudio de uso de aeronaves pilotadas a distancia en la agricultura de precisión ha emergido como una herramienta innovadora que está transformando la manera en que los agricultores gestionan sus cultivos. Estos sistemas aéreos no tripulados (UAV) son capaces de recopilar una variedad de datos esenciales, como el índice de vegetación (IV), la altura y el volumen de las plantas, lo cual mejora significativamente el monitoreo de los cultivos. A través de estos datos, los agricultores pueden optimizar la distribución de los recursos agrícolas, logrando

una gestión más eficiente y precisa de insumos como el agua, los fertilizantes y los pesticidas. Este enfoque contribuye no solo a un mayor rendimiento de los cultivos, sino también a la sostenibilidad en las prácticas agrícolas.

Una de las principales ventajas de utilizar drones en la agricultura es la capacidad de detectar problemas en los cultivos en etapas tempranas. Gracias a los sensores avanzados que equipan los drones, es posible identificar signos de estrés hídrico, deficiencias nutricionales o la presencia de enfermedades en las plantas antes de que estos problemas se vuelvan visibles a simple vista. Esta detección temprana permite a los agricultores tomar decisiones más informadas y adoptar medidas correctivas de manera oportuna, lo que a su vez evita pérdidas significativas en la producción y reduce el uso innecesario de productos químicos.

En cuanto a la tecnología utilizada en estos drones, las cámaras multiespectrales juegan un papel fundamental en la recolección de datos precisos. A diferencia de las cámaras tradicionales, que solo capturan imágenes en el espectro visible, las cámaras multiespectrales pueden captar longitudes de onda adicionales, como el infrarrojo cercano (NIR), lo que permite obtener una visión más completa de la salud y el vigor de los cultivos. Estos datos son especialmente útiles para cultivos específicos como el trigo, el café o la uva, donde el monitoreo detallado del vigor y la biomasa es esencial para maximizar el rendimiento. Por ejemplo, el uso de índices como el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) puede ofrecer una imagen precisa de la densidad y la salud de las plantas, lo cual resulta invaluable para los agricultores.

No obstante, a pesar de los avances que los drones han traído a la agricultura, también existen ciertos desafíos técnicos que deben abordarse. Uno de los principales inconvenientes es la duración limitada de las baterías de los drones, lo que restringe su capacidad para cubrir grandes áreas en una sola misión. Además, el costo elevado de los sensores multiespectrales, necesarios para obtener imágenes de alta calidad, puede ser un impedimento para pequeños productores o para aquellos con presupuestos limitados. Las condiciones climáticas también juegan un papel crucial, ya que factores como el viento, la lluvia o la nubosidad pueden afectar la calidad de las imágenes capturadas, lo que, a su vez, podría comprometer la precisión de los datos obtenidos.

Otro aspecto importante en la utilización de drones para la agricultura es la planificación de los vuelos y el procesamiento de las imágenes. La correcta configuración de la ruta de vuelo y la superposición de imágenes en ortomosaicos son fundamentales para generar mapas detallados y precisos que permitan un análisis más exhaustivo del estado de los cultivos. La capacidad de obtener datos de alta resolución y a gran escala facilita la toma de decisiones estratégicas y permite una intervención más puntual y eficaz. Este tipo de análisis es esencial para implementar un sistema de gestión de cultivos basado en datos, lo que optimiza la utilización de recursos y maximiza los rendimientos.

Pese a las limitaciones tecnológicas, el potencial de los drones en la agricultura es innegable. La posibilidad de realizar aplicaciones localizadas y precisas, como la fertilización o el tratamiento de plagas, contribuye a una reducción significativa en el uso de insumos, lo que no solo representa un ahorro económico, sino que también favorece una agricultura más sostenible. Al reducir el uso de productos químicos, los drones ayudan a minimizar el impacto ambiental y promueven prácticas agrícolas más responsables.

Aunque existen ciertos desafíos, como el costo de los sensores y las limitaciones en la duración de las baterías, los beneficios de utilizar esta tecnología son indiscutibles. Los drones permiten a los agricultores realizar intervenciones más precisas y oportunas, mejorando tanto la productividad como la sostenibilidad de los cultivos. A medida que la tecnología avanza y los costos disminuyen, es probable que el uso de UAVs en la agricultura de precisión se convierta en una práctica común, beneficiando tanto a los productores como al medio ambiente. Santos, LM, Ferraz, GAS, Barbosa, BDS y Andrade, AD (2019).

En el estudio de análisis de imágenes multiespectrales de cultivos de arroz el uso de tecnologías avanzadas en la agricultura está desempeñando un papel transformador, particularmente mediante la aplicación de imágenes multiespectrales y el uso de algoritmos de aprendizaje automático. Este enfoque, que se enmarca dentro de la agricultura de precisión, está optimizando la forma en que los agricultores gestionan sus cultivos, permitiéndoles tomar decisiones más informadas y eficaces. Un ejemplo claro de este tipo de innovaciones lo encontramos en el análisis de cultivos de arroz, que se realiza mediante drones equipados con cámaras multiespectrales y el uso de técnicas computacionales avanzadas como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y redes neuronales convolucionales (CNN). Estas herramientas permiten una detección temprana de problemas en los cultivos, lo que tiene un impacto directo sobre la productividad y la sostenibilidad de la agricultura.

Uno de los componentes esenciales en este enfoque es el uso del NDVI, un índice calculado a partir de imágenes multiespectrales que proporciona una evaluación precisa de la salud de las plantas. El NDVI clasifica las áreas de cultivo según la condición de las plantas, identificando aquellas que están saludables, aquellas que requieren atención o las que están gravemente afectadas por alguna enfermedad o plaga. Este tipo de monitoreo permite la detección temprana de problemas, lo que a su vez posibilita la intervención rápida y adecuada antes de que los daños se agraven. En el sistema descrito en el análisis, se utilizan herramientas de software como Matlab para segmentar las imágenes, analizar el NDVI y generar alertas visuales que orienten las acciones del agricultor, facilitando la toma de decisiones rápidas y acertadas en el campo.

Sin embargo, la verdadera fortaleza de este sistema radica en la combinación de imágenes multiespectrales con algoritmos de aprendizaje automático, como las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). Las CNN son eficaces para reconocer patrones complejos y han demostrado ser capaces de detectar anomalías en los cultivos con una precisión del 91%. Por su parte, las SVM, que son especialmente útiles para tareas de clasificación binaria, lograron una precisión aún mayor, alcanzando un 93.5%. Este nivel de exactitud es fundamental para la identificación de problemas específicos, como deficiencias nutricionales o infecciones, lo que permite un manejo más específico y dirigido. Estos algoritmos pueden analizar grandes volúmenes de datos recogidos por drones, lo que facilita el monitoreo de grandes extensiones de cultivos de forma rápida y eficiente.

El impacto de estas tecnologías en la agricultura de precisión es notable, ya que ayudan a reducir el uso excesivo de recursos como agua, fertilizantes y plaguicidas, lo que no solo disminuye los costos, sino que también promueve una agricultura más sostenible. La capacidad para realizar diagnósticos tempranos y precisos permite aplicar los insumos de manera más eficiente y

localizada, reduciendo así el impacto ambiental y mejorando la rentabilidad de las cosechas. Además, la precisión de estas tecnologías puede ser crucial en el contexto de la escasez de recursos y los desafíos impuestos por el cambio climático, ya que permiten una adaptación más ágil y eficiente a las condiciones cambiantes del entorno.

No obstante, el estudio también señala algunas áreas que requieren optimización, como la necesidad de ampliar las bases de datos y ajustar los algoritmos para obtener modelos aún más precisos. A medida que se desarrollen más datos y se realicen ajustes finos en los algoritmos, es probable que la efectividad de estas tecnologías aumente aún más. Además, la integración de estas herramientas en aplicaciones móviles o plataformas accesibles podría permitir que los agricultores de todos los niveles tecnológicos utilicen estas soluciones avanzadas. La facilidad de acceso a estas herramientas no solo aumentaría la adopción de la agricultura de precisión, sino que también abriría nuevas posibilidades para los pequeños y medianos productores, democratizando así el acceso a tecnologías que, hasta ahora, estaban fuera de su alcance.

En definitiva, la combinación de drones, imágenes multiespectrales y aprendizaje automático está marcando un cambio fundamental en la agricultura moderna. Esta sinergia de tecnologías no solo permite una gestión más precisa de los cultivos, sino que también promueve prácticas agrícolas más responsables y respetuosas con el medio ambiente. Al mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y permitir una detección temprana de problemas, estas herramientas están ayudando a aumentar la productividad y a reducir el impacto ambiental. Además, la accesibilidad y escalabilidad de estas tecnologías sugieren que, en el futuro, podrán ser utilizadas de manera masiva, transformando la agricultura en un sector más inteligente, sostenible y resiliente frente a los retos globales. Ortiz González; Hernández Medina, E. (2022).

En otro estudio como lo es el Análisis de Cultivo de Maíz para Ensilaje utilizando Imágenes desde un UAV, el uso de drones en la agricultura ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a sus ventajas frente a los métodos tradicionales de monitoreo y manejo de cultivos. Esta tecnología proporciona herramientas valiosas que mejoran la eficiencia en diversas prácticas agrícolas, reducen costos operativos y permiten una gestión más precisa de los recursos. Una de las principales fortalezas de los drones es su capacidad para capturar imágenes de alta resolución, tanto en términos espaciales como temporales, lo que facilita un monitoreo continuo y detallado de los cultivos. Esta precisión mejora la toma de decisiones agronómicas, permitiendo a los agricultores actuar con rapidez y de manera más informada para optimizar la salud y el rendimiento de sus cosechas.

El procesamiento de las imágenes capturadas por los drones es un aspecto clave para obtener el máximo beneficio de esta tecnología. Herramientas especializadas como Agisoft PhotoScan y QGIS permiten convertir estas imágenes en productos digitales, como ortomosaicos y modelos digitales de elevación, que proporcionan una visión más completa del terreno y los cultivos. Estos productos permiten detectar de manera temprana problemas como deficiencias

nutricionales, enfermedades o plagas, y optimizar el uso de insumos, como fertilizantes, pesticidas y agua. Al utilizar esta información, los agricultores pueden tomar decisiones más precisas sobre la gestión de sus campos, reduciendo así el desperdicio de recursos y mejorando la eficiencia en su explotación agrícola.

Un ejemplo concreto de cómo los drones pueden transformar la agricultura es el caso de la finca Montelindo en Colombia. En esta finca, se ha implementado el uso de drones para la monitorización de cultivos, lo que ha resultado en mejoras sustanciales en la calidad y productividad de las cosechas. Gracias a la combinación de imágenes multiespectrales y el análisis detallado de los datos, los agricultores han podido ajustar de manera precisa la cantidad de insumos aplicados, lo que ha reducido el uso innecesario de fertilizantes y pesticidas. Además, al contar con información en tiempo real sobre el estado de los cultivos, se han podido tomar medidas rápidas para corregir cualquier deficiencia detectada, mejorando así el rendimiento por hectárea.

La eficiencia en el uso de recursos no es el único beneficio que aportan los drones. Estos dispositivos también ayudan a promover prácticas agrícolas más sostenibles. Al permitir una aplicación más precisa de los insumos, los drones contribuyen a minimizar el impacto ambiental asociado con el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas. Además, la capacidad de monitorizar las condiciones del suelo y del agua permite a los agricultores gestionar de manera más responsable los recursos hídricos, algo fundamental en zonas donde este recurso es escaso. La agricultura de precisión, impulsada por drones, se alinea con los principios de sostenibilidad, ya que promueve una explotación más racional y responsable del medio ambiente.

Este tipo de tecnología tiene el potencial de ser replicada en diferentes contextos agrícolas, no solo en Colombia, sino en diversas regiones del mundo. Los drones pueden ser utilizados tanto por grandes productores como por pequeños agricultores, proporcionando herramientas accesibles para mejorar la competitividad y la sostenibilidad de las explotaciones agrícolas. Además, el análisis multiespectral y los modelos digitales que generan facilitan una planificación agrícola más eficiente y personalizada, adaptada a las condiciones específicas de cada campo.

A medida que esta tecnología se siga desarrollando y ampliando, su impacto positivo en la agricultura será cada vez más evidente, ofreciendo a los agricultores herramientas poderosas para enfrentar los retos del sector en el siglo XXI. Moreno Toro y Salgado Polo (2018).

En el estudio del diseño de un modelo de agricultura de precisión utilizando drones y un sistema de captura para la detección en la pudrición de cogollo, es claro resaltar como la agricultura de precisión ha emergido como una solución tecnológica clave para enfrentar los desafíos que enfrentan los cultivos en diferentes partes del mundo. Un estudio reciente propone un modelo innovador para la detección y el control de la Pudrición del Cogollo (PC), una enfermedad que afecta a los cultivos de palma de aceite en los departamentos de Bolívar y Santander, en Colombia. Este modelo se basa en el uso de drones equipados con cámaras de alta resolución y sensores multiespectrales, una tecnología que ha demostrado ser efectiva para monitorear grandes extensiones de terreno. La propuesta surge como respuesta a la alta incidencia de la enfermedad, que ha causado pérdidas económicas considerables en zonas como Puerto Wilches, donde algunas plantaciones han perdido hasta el 80% de su producción.

La Pudrición del Cogollo es una de las enfermedades más perjudiciales para la palma de aceite, y su rápida propagación puede tener un impacto devastador si no se detecta a tiempo. Tradicionalmente, el monitoreo de los cultivos se ha realizado a través de inspecciones manuales, lo que consume tiempo y recursos, o mediante imágenes satelitales, que a menudo carecen de la resolución necesaria para identificar los primeros signos de la enfermedad. En este contexto, el uso de drones con tecnología avanzada ofrece una alternativa mucho más precisa y eficiente. Los drones, equipados con sensores multiespectrales y cámaras de alta resolución, tienen la capacidad de capturar imágenes detalladas que permiten obtener mapas de reflectancia y ortomosaicos, los cuales se utilizan para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice es fundamental para evaluar el estado de salud de las plantas, ya que detecta variaciones en la vegetación que podrían indicar la presencia de enfermedades.

Una de las principales ventajas de este enfoque es la reducción de costos y tiempos de inspección. Las inspecciones manuales requieren gran cantidad de mano de obra y son lentas, mientras que las imágenes satelitales, aunque útiles, no siempre ofrecen la resolución necesaria para un diagnóstico temprano y preciso. Los drones, por su parte, permiten realizar monitoreos de forma más ágil y con mayor precisión, lo que posibilita detectar problemas antes de que se conviertan en una amenaza seria para el cultivo. Además, los drones son capaces de operar en condiciones climáticas diversas, lo que aumenta su versatilidad y eficacia, ya que no dependen de la luz solar directa, como ocurre con los satélites.

Aunque el uso de drones presenta muchas ventajas, el estudio también señala que hay aspectos del monitoreo que requieren mediciones directas en el campo. Por ejemplo, factores como la calidad del suelo o la presencia de plagas pueden no ser completamente evaluados a través de imágenes aéreas. Sin embargo, se reconoce que la combinación de imágenes multiespectrales obtenidas desde el aire y la recolección de datos en el terreno puede proporcionar una visión mucho más detallada y precisa de la salud del cultivo, permitiendo una gestión agrícola más eficiente.

El uso de drones con sensores multiespectrales es no solo una herramienta técnica viable, sino también una solución económicamente rentable. Detectar las enfermedades en sus primeras etapas permite a los agricultores tomar medidas correctivas a tiempo, evitando pérdidas significativas y optimizando la producción. A largo plazo, esta tecnología podría reducir el uso de pesticidas y fertilizantes, promoviendo un modelo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

El modelo propuesto con drones y tecnología de imágenes multiespectrales representa un avance sustancial en la gestión de los cultivos de palma de aceite. No solo ofrece una herramienta eficaz para la detección y control de enfermedades como la Pudrición del Cogollo, sino que también contribuye a mejorar la eficiencia de las prácticas agrícolas. La integración de esta tecnología en la agricultura de precisión puede ayudar a enfrentar los desafíos actuales de la palma de aceite, un cultivo fundamental en muchas economías, y garantizar un futuro más sostenible tanto para los agricultores como para el medio ambiente. Medina, PA, & Niño, JC (2017).

Como se a mencionado varias veces anteriormente el uso de drones en la agricultura de precisión está abriendo nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector agrícola. Un ejemplo de esto lo ofrece un estudio titulado "Estimación de la biomasa del cultivo

de cebada mediante teledetección de imágenes multiespectrales", que demuestra cómo los vehículos aéreos no tripulados (drones) pueden optimizar el monitoreo de cultivos y facilitar una gestión más eficiente de los recursos agrícolas. Este estudio, realizado en el altiplano de Bolivia, subraya la capacidad de los drones para generar datos precisos y útiles que ayudan a los agricultores a tomar decisiones informadas, incrementando la productividad de los cultivos y reduciendo su impacto ambiental.

Se utilizó un dron DJI Phantom 4 con una cámara multiespectral para capturar imágenes de cultivos de cebada. A lo largo de 17 vuelos programados, realizados a intervalos de 7 a 10 días, se obtuvo información sobre el estado de los cultivos que permitió calcular el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Este índice es una herramienta ampliamente utilizada para medir la salud de las plantas, ya que proporciona datos sobre su vigor y biomasa. En este caso, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,94, lo que indica que la relación entre el índice NDVI y la biomasa de las plantas es altamente confiable.

Para realizar una estimación precisa del peso seco de las plantas, se utilizó un modelo de regresión polinomial de tercer grado, que correlacionó los valores del NDVI con el peso seco de la cebada. Este tipo de modelado estadístico no solo fue eficaz, sino también no invasivo, lo que es crucial para evitar alterar las condiciones de los cultivos mientras se recogen los datos. De esta forma, se logró obtener una visión detallada de la biomasa de las plantas sin necesidad de procedimientos invasivos que podrían dañar los cultivos.

Uno de los puntos más importantes que resaltar es la mejora en la gestión de los recursos agrícolas. Al utilizar imágenes multiespectrales, los drones permiten a los agricultores monitorear el estado de sus cultivos con una precisión notable. Esto tiene un impacto directo en el uso eficiente de recursos como el agua y los fertilizantes, lo cual es especialmente relevante en zonas agrícolas de difícil acceso o con condiciones climáticas adversas. La capacidad de obtener información precisa y en tiempo real sobre el estado de los cultivos permite a los agricultores tomar decisiones más informadas sobre el riego, la fertilización y el manejo general de sus tierras, lo que no solo mejora la productividad, sino que también contribuye a la sostenibilidad.

Además, este tipo de tecnologías tiene aplicaciones más allá de los cultivos de cebada. Los drones equipados con cámaras multiespectrales pueden adaptarse a una variedad de cultivos, lo que los convierte en herramientas versátiles en diferentes tipos de terrenos y condiciones. En regiones donde la agricultura es fundamental para la economía y la seguridad alimentaria, como en muchos países en desarrollo, el uso de drones puede marcar una diferencia significativa. Los agricultores, al poder acceder a información precisa y detallada sobre sus cultivos, pueden tomar decisiones que optimicen el uso de los recursos y aumenten la rentabilidad.

La implementación de drones en la agricultura también tiene un impacto positivo en el medio ambiente. Al permitir una gestión más precisa de los insumos, los drones contribuyen a la reducción del uso de fertilizantes y pesticidas, minimizando el impacto negativo en los ecosistemas. Además, al mejorar la eficiencia en el uso del agua, los drones pueden ayudar a conservar este recurso tan valioso, especialmente en regiones donde el acceso al agua es limitado.

Los drones son una herramienta esencial para el futuro de la agricultura, especialmente en regiones con desafíos climáticos y recursos limitados. La adopción generalizada de esta tecnología tiene el potencial de transformar la forma en que se cultiva, gestionando los recursos de manera más eficaz y reduciendo el impacto ambiental, lo que resulta crucial para asegurar un futuro más sostenible y productivo para la agricultura global. Vigabriel Navarro, LM, Osorio Leyton, JM, Quezada Lambertin, CE, & Benavides López, JP (2024).

Recomendación y objetividad de la revisión

Promuevo a la investigación para lograr un desarrollo inclusivo en la agricultura de precisión con imágenes multiespectrales para que la información acerca de esta tecnología sea más clara y precisa para que así pueda llegar a más agricultores y personas del común en especial en Colombia, para sacar el máximo provecho a las aeronaves no tripuladas en la agricultura de precisión.

Se sugiere:

- *Fomentar programas de capacitación: Se recomienda implementar iniciativas que capaciten a los agricultores en el uso de drones y en la interpretación de los datos obtenidos. Esto garantizará una adopción más efectiva y sostenible, especialmente entre pequeños y medianos productores.

- *Incentivar la inversión pública y privada: Los gobiernos y el sector privado deben colaborar para facilitar el acceso a drones y sensores multiespectrales mediante subsidios, créditos accesibles o programas de financiamiento.

- *Promover la investigación y desarrollo: Es fundamental continuar investigando tecnologías avanzadas que mejoren la autonomía de vuelo, reduzcan costos y optimicen la precisión de los sensores utilizados en la agricultura de precisión.

- *Optimizar la eficiencia de recursos: Es necesario emplear drones para un monitoreo constante que permita una distribución localizada de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas, minimizando el impacto ambiental y el desperdicio.

- *Integrar tecnologías complementarias: Combinar drones con herramientas de inteligencia artificial y sistemas de información geográfica (SIG) para mejorar el análisis y la toma de decisiones en tiempo real.

- *Promover el uso de biocontroladores: Sustituir el uso excesivo de agroquímicos por soluciones más naturales, facilitadas por la precisión que ofrecen los drones.

Accesibilidad y mitigación de barreras

- *Reducir la brecha tecnológica: Establecer alianzas con organizaciones internacionales para que los drones sean accesibles incluso en comunidades rurales con pocos recursos.

- *Adaptar la tecnología a condiciones locales: Desarrollar drones que sean más resistentes a condiciones climáticas adversas y que puedan ser utilizados en diferentes tipos de terreno.

- *Implementar políticas regulatorias claras: Asegurar el uso responsable y seguro de los drones mediante normativas específicas que incluyan estándares técnicos, éticos y de seguridad.

La objetividad del documento se refleja en su enfoque equilibrado al abordar el uso de drones en la agricultura de precisión. Por un lado, presenta de manera clara y fundamentada los

beneficios de esta tecnología, como su capacidad para optimizar recursos, mejorar la productividad agrícola y fomentar prácticas más sostenibles. Por otro lado, no omite las limitaciones, incluyendo los costos iniciales elevados, la dependencia de las condiciones climáticas y los desafíos asociados con la capacitación técnica necesaria para su implementación.

El análisis está respaldado por estudios científicos y casos prácticos, lo que añade credibilidad al contenido y refuerza la validez de las afirmaciones realizadas. Además, el documento incorpora ejemplos de aplicaciones en diferentes regiones y cultivos, lo que enriquece la perspectiva global y evita una visión limitada o sesgada. Esta diversidad de enfoques contribuye a una comprensión más completa de los alcances y retos de la tecnología en distintos contextos.

Sin embargo, hay áreas en las que la objetividad podría fortalecerse aún más. Aunque se mencionan los impactos socioeconómicos, como las barreras económicas para pequeños productores, sería valioso profundizar en cómo estas limitaciones afectan específicamente a las comunidades rurales. Asimismo, una mayor exploración de los posibles riesgos ambientales asociados al uso de drones, como el manejo de residuos electrónicos, aportaría un análisis más completo. Por último, incluir una comparación con otras tecnologías complementarias en la agricultura de precisión ayudaría a contextualizar mejor las ventajas y desventajas de los drones.

En general, el documento mantiene un enfoque objetivo al equilibrar los aspectos positivos y negativos del uso de drones, presentando un panorama fundamentado y realista que destaca su potencial transformador en la agricultura moderna. Con una mayor profundización en las áreas mencionadas, podría alcanzar un nivel de análisis aún más robusto y detallado.

Conclusión

En conclusión, el uso de drones equipados con sensores multispectrales y cámaras avanzadas ha transformado la agricultura de precisión, ofreciendo a los agricultores herramientas capaces de gestionar cultivos con un nivel de detalle sin precedentes. Estas tecnologías permiten detectar problemas como estrés hídrico, plagas y deficiencias nutricionales de manera temprana, lo que optimiza la producción, reduce pérdidas y fomenta prácticas más sostenibles.

La incorporación de drones en este sector representa un avance significativo hacia una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Entre las principales ventajas de los drones se destaca su capacidad para recolectar datos clave, como humedad del suelo, temperatura y composición química, que permiten generar mapas de alta precisión. Estos mapas facilitan la aplicación localizada de insumos como fertilizantes y pesticidas, minimizando el desperdicio de recursos y el impacto ambiental. Su capacidad de sobrevolar terrenos complicados y realizar monitoreos constantes en tiempo real convierte a los drones en herramientas versátiles y adaptables, incluso en condiciones desafiantes.

Los estudios revisados en el documento demuestran que los drones han sido esenciales para mejorar la gestión en cultivos clave como arroz, café y caña de azúcar. La implementación de

índices como el NDVI ha permitido un monitoreo detallado de la salud de las plantas, asegurando intervenciones rápidas y precisas. Este enfoque no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también contribuye a una mayor rentabilidad y sostenibilidad en la agricultura.

Sin embargo, la adopción de drones no está exenta de retos. Entre las principales limitaciones se encuentran los altos costos iniciales, la dependencia de condiciones climáticas favorables y la necesidad de capacitación técnica para aprovechar todo su potencial. Estas barreras pueden dificultar su implementación, especialmente entre pequeños productores. A pesar de estas limitaciones, los beneficios superan ampliamente los desafíos, posicionando a los drones como una herramienta clave en la modernización agrícola.

El futuro de esta tecnología es prometedor, especialmente con la integración de inteligencia artificial y sistemas de información geográfica (SIG). Estas innovaciones permitirán ampliar aún más las capacidades de los drones, con posibilidades como la siembra y la poda automatizada. A medida que los costos disminuyan y se desarrollen programas de acceso y formación técnica, es probable que esta tecnología se adopte de manera masiva, revolucionando aún más la agricultura de precisión.

Los drones representan una solución innovadora para enfrentar los desafíos de la agricultura moderna, contribuyendo a una gestión más eficiente y sostenible de los cultivos. Su capacidad para optimizar el uso de recursos, reducir costos y minimizar el impacto ambiental es clave en un contexto de creciente demanda alimentaria y presión sobre los ecosistemas. La combinación de avances tecnológicos y estrategias de implementación inclusivas garantizará que los beneficios de esta tecnología alcancen a un mayor número de agricultores, promoviendo un desarrollo agrícola más equilibrado y sostenible.

En el futuro, se espera que los avances tecnológicos amplíen aún más las aplicaciones de los drones, permitiendo realizar tareas más complejas, como la siembra y la poda, consolidando así su rol en la agricultura.

Referencias

* Acuña Huaraca, DS (2023). Uso de sensor multiespectral en arándano *Vaccinium corymbosum* L. y sus aplicaciones en agricultura de precisión. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/edee52ed-8a21-4caf-bbcc-9a485d069881>

* AgroNoa. (2023). *Argentina, uno de los países más avanzados en Agricultura de Precisión*. Recuperado de <https://agronoa.com.ar>

* AméricaEconomía. (2023). *Argentina se ubica entre los países con mayor agricultura de precisión*. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com>

* Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (s.f.). *Agricultura de precisión: tecnología para enfrentar el cambio climático*. Recuperado de <https://blogs.iadb.org>

* Beltrán Nieto, J. R. (2022). Fotogrametría con drones, diferentes usos y aplicaciones en la agricultura de precisión. Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias. <https://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/13192/E-UTB-FACIAG-ING%20AGRON-000449.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

* Berrio, V., Alzate, D., & Ramon, J. (2018). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. Espacios, 39. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n45/18394518.html>

* Berrío, V. A., Mosquera, J. T., & Alzate, D. F. (2015). *Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión*. Revista @limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria, 13(1), 28-40.

* Bonnaire Rivera, L., Montoya Bonilla, B., & Obando-Vidal, F. (2021). *Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo*. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 22(1), e1578. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578

* Bonilla Mora, KV, Cubillos Varón, JG y Valencia Achuri, PA (2023). Agricultura de precisión para la producción de arroz empleando tecnología para cultivos extensivos, RPAS en el monitoreo y aspersión. Universidad de Cundinamarca. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/4933>

*Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to remote sensing (5th ed.).

* Castillo Guevara, M. A. (2019). *Análisis de imágenes multiespectrales aéreas de una parcela de cultivo de palta* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/4765/253T20190694_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

* Diaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, 26. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/8f785b6f-2e22-4d29-a2d2-1e6aae847cd8/content>

* Facchi, A., Sona, G., Passoni, D., Masseroni, D., Ortuani, B., Pinto, L., & Pagliari, D. (2016). Levantamiento multiespectral UAV para mapear el suelo y los cultivos para aplicaciones de agricultura de precisión. Archivos internacionales de fotogrametría, teledetección y ciencias de la información espacial. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLI-B1/1023/2016/>

* González, A., Amarillo, G., Amarillo, M., & Sarmiento, F. (2016). Drones aplicados a la agricultura de precisión. Revista Especializada en Ingeniería, 10, 23-36. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/1585>

* Lozano Mayorga, SE y Torres Forero, CA (2019). Implementación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de café Castillo “Coffea arabica L.” presente en la finca La Portada, vereda San Miguel, Pandi-Cundinamarca. Universidad. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2937>

*Medina, PA, & Niño, JC (2017). Diseño de un modelo de agricultura de precisión utilizando drones y un sistema de captura, almacenamiento y análisis de datos que permite identificar a tiempo la generación de la pudrición del cogollo en cultivos de palma de aceite que se encuentran en los departamentos de Bolívar y Santander. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/37610d79-205d-4b24-a456-1ace3367e3ee/content>

*Meneses, V. A. B., Téllez, J. M., & Velasquez, D. F. A. (2015). USO DE DRONES PARA EL ANALISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN. *Limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1). <https://doi.org/10.24054/16927125.v1.n1.2015.1647>

* Mitsikostas, E. (2017). Monitorización y optimización de tierras con drones y fotogrametría aérea para aplicaciones de precisión en agricultura. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/86353/MITSIKOSTAS%20-%20Monitorizaci%3%b3n%20y%20optimizaci%3%b3n%20de%20tierras%20con%20drones%20y%20fotogrametr%3%ada%20a%3%a9rea%20para%20apli....pdf?sequence=4&isAllowed=y>

* Montilla, R., Montilla, G., Pérez, E., Frassato, L., & Seijas, C. (2021). Agricultura de precisión para cultivos de arroz con énfasis en áreas con bajo índice de salud. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(1), 9383-9393. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.85310>

* Moreno Toro y Salgado Polo (2018), Análisis de Cultivo de Maíz para Ensilaje utilizando Imágenes desde un UAV. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3406>

*M, V. A. B., T, J. M., & Alzate, D. F., V. (2015). Uso de drones para el analisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. *ojs.unipamplona.edu.co*. <https://doi.org/10.24054/limentech.v13i1.1600>

* Ortiz González, B. A., & Hernández Medina, E. (2022). *Análisis de imágenes multiespectrales obtenidas en cultivos de arroz para la determinación de anomalías*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/10974>

* Parra González, VM (2016). *Estimación del rendimiento de trigo con imágenes UAV: Aplicación en el contexto de la agricultura de precisión*. <https://zaguan.unizar.es/record/58585#>

*Planas de Martí, S. (2018). Agricultura de precisión y protección de cultivos. Revista de Ingeniería, 47, 10-19. <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/view/7456/7823>

*Santos, LM, Ferraz, GAS, Barbosa, BDS y Andrade, AD (2019). Utilización de sistemas de aeronaves no tripuladas en agricultura de precisión: una revisión . Revista DYNA <https://doi.org/10/dina.v>

* Silva, J. A., & Oliveira, J. L. (2021). Precision agriculture in Brazil: Innovations, challenges, and future perspectives. Agricultural Systems. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102766>

* Udris, M., & Zhang, Z. (2019). *Sustainability through precision farming: The role of drones and UAVs in modern agriculture.* Agricultural Systems. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.05.006>

*Virgues Rodríguez, T. Y., Zabala Rodríguez, A. K., & Valencia Achuri, P. A. (2022). Aplicación de drones como herramienta tecnológica para la transición de la agricultura convencional a la de precisión. Revista de Ciencias Agropecuarias, 1(2), 10-20. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/4681/APLICACI%c3%93N%20DE%20DRONES%20COMO%20HERRAMIENTA%20TECNOL%c3%93GICA%20%20PARA%20LA%20TRANSICI%c3%93N%20DE%20LA%20AGRICULTURA%20CONVENCIONAL%20A%20LA%20%20DE%20PRECISI%c3%93N.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

*Zarco-Tejada P.J., Guillén-Climent M.L., Hernández-Clemente R., Catalina, A., González M.R., Martín, P. (2013). Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). Agric. for. Meteorol.