

Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión

Use of drones for multispectral image analysis in precision agriculture

Berrió M. Viviana A.¹, Mosquera T. Jemay², Alzate V. Diego F.

¹Corpoica

²Universidad de Pamplona, Campus Universitario, km1 vía a Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

³Unidad Agroclimatología, C.I Tibaitata

Recibido 14 de Abril 2015; aceptado 18 de Mayo 2015

RESUMEN

*En el presente artículo se aborda la problemática relacionada con la escasa implementación de alternativas tecnológicas de planificación y los sobrecostos en la atención de enfermedades que estos presentan, así como la importancia de la implementación de herramientas tecnológicas que permitan mejorar la planificación de las actividades agrícolas, predecir daños y tomar decisiones adecuadas ante situaciones que afectan el desarrollo de los cultivos de papa *Solanum tuberosum* variedad Diacol Capiro en Cundinamarca. Para el efecto, se buscó definir los aspectos teóricos y técnicos que enmarcan el trabajo y evaluar los problemas que se presentan en el desarrollo del cultivo de papa a través de su respuesta espectral en imágenes de infrarrojo cercano (NIR) de alta resolución obtenidas con el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (VANT). Los resultados obtenidos demuestran que la respuesta espectral permite identificar características de la vegetación y problemas en el cultivo, (Berrió 2015) de tal forma que se evidencia la viabilidad económica de esta herramienta tecnológica como alternativa para pequeños y grandes agricultores que permite optimizar el desarrollo de los sistemas productivos.*

Palabras clave: *Agricultura de precisión, drones, Imágenes multiespectrales, NDVI*

ABSTRACT

*This article approaches problems related to the lack of planning in agriculture, overcosts in dealing with diseases that crops have, and the need of implement economically viable technological tools to improve agricultural yield, predict damage and take appropriate decisions in situations that affect the development of the potato crop *Solanum tuberosum* variety Diacol caprino in Cundinamarca, Colombia. To this end, was defined the theoretical and, technical aspects*

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia. E-mail: jemay.mosquera@unipamplona.edu.co

surrounding the work and evaluate the problems that arise in the development of the potato crop through spectral response using Near Infrared (NIR) high resolution images obtained with the use of unmanned aerial vehicle (UAV). The results obtained show that the spectral response identifies vegetation characteristics and problems in the crop, (Berrío 2015) so the economic viability of this technology as an alternative tool for small and large farmers to optimize the development of the productive systems is evident.

Keywords: Precision agriculture, drones, multispectral imagery, NDVI

INTRODUCCIÓN

La agricultura tradicional es altamente vulnerable a diferentes acontecimientos de tipo climático como los fenómenos del niño y la niña (ENSO), así como a la presencia de enfermedades y plagas que cada vez son más nocivas y resilientes a agroquímicos tradicionales. Por lo tanto, se plantea la implementación de nuevas tecnologías como alternativas de manejo, monitoreo y control de los cultivos agrícolas en diferentes etapas de su desarrollo, tendientes a mejorar la producción y disminuir los costos. Específicamente, se propuso el uso de drones en la definición de la respuesta espectral de una plantación en imágenes de infrarrojo cercano (NIR) de alta resolución, para lo cual se definió un cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Diacol Capiro, ubicado en el Municipio de Mosquera, Cundinamarca; producto que a la par de ser de gran importancia en la región, es altamente vulnerable a los efectos de la variedad climática, plagas y las enfermedades. Los objetivos estuvieron encaminados a obtener imágenes multiespectrales mediante la implementación de cámaras RGB – NIR (NGB), se procesaron ortofotomosaicos para obtener el área total del cultivo en NGB, aplicar el índice de vegetación de diferencia normalizada o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) al ortofotomosaico NGB obtenido con la cámara NIR, definir sobre el ortofotomosaico NDVI zonas de respuesta espectral diferenciada, y el análisis del estado del cultivo en las zonas de diferente

reflectancia definidas y correlacionarlo con actividades de comprobación en campo para verificar la veracidad de los resultados obtenidos. La captura y análisis de las imágenes multiespectrales de alta resolución por medio de drones fue ajustada a las condiciones propias de la zona de estudio en aspectos tales como, tiempo propicio para realizar los sobrevuelos, identificación de obstáculos, altura del vuelo, número de fotos por punto y delimitación del área en el software respectivo. El desarrollo e implementación de esta herramienta tecnológica facilitó el diagnóstico en un área de 15 hectáreas visualizando los puntos focales de conflictos en el desarrollo de un cultivo que aparentemente se encontraba saludable, lo que permitió evidenciar el impacto positivo en cuanto a la posibilidad de ahorro en tiempo y dinero en el tratamiento de dichos problemas, así como en la toma de decisiones oportunas para evitar la propagación de plagas y enfermedades a zonas saludables del cultivo, tales como: *oomiceto Phytophthora infestans*, *Puccinia pittieriana*, *Fusarium spp.* *Spongospora subterranea*, *Thecaphora solani*. Las imágenes multiespectrales mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados facilita la toma de decisiones tempranas en el desarrollo de diferentes sistemas productivos direccionado hacia una agricultura de precisión en Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El manuscrito es derivado de una investigación finalizada que hace parte de procesos adelantados en el marco de la tesis de maestría denominada “Uso de drones como herramienta de planificación en agricultura de precisión para la detección temprana de problemas en cultivos de papa (*Solanum Tuberosum*)”. El estudio fue realizado con el apoyo de Corpoica y financiado con recursos propios de los investigadores se enmarca en investigaciones desarrolladas en las líneas: Gestión de información geográfica y Hábitat sostenible y solidario del grupo de investigación Gestión Integral del Territorio - GIT, de la Universidad de Pamplona.

El enfoque metodológico descriptivo y el tipo de investigación mixto (Tashakkori & Teddlie, 1998) están soportados en el carácter técnico e interdisciplinar del trabajo y en el uso de drones como herramienta de planificación en agricultura de precisión, para el diagnóstico temprano de problemas fisiológicos en el desarrollo del cultivo de papa en un contexto específico de la realidad colombiana.

La estructura hermenéutica, representada en orientaciones y criterios creativos que permiten generar principios de acción (Menna, 2014), posibilita la definición de una secuencia lógica para caracterizar, analizar, interpretar y sintetizar aspectos conceptuales y técnicos aplicados a las condiciones agrícolas de Colombia, y sienta las

bases para planificar, supervisar y controlar los cultivos con ayudas tecnológicas basadas en la obtención de imágenes multiespectrales de alta resolución con el apoyo de drones.

El trabajo se desarrolló en dos fases. La primera, relacionada con la definición de los aspectos teóricos, técnicos y normativos que enmarcan el trabajo, y con la identificación de las variables clave del contexto para la realización de los vuelos, obtención y procesamiento de imágenes multiespectrales brutas, considerando aspectos técnicos, de seguridad y meteorológicos; la segunda fase, enfocada a post-procesamiento, análisis de resultados y verificación de los hallazgos obtenidos. Al mismo tiempo, se consideraron cinco actividades metodológicas relevantes que consistieron en la selección del cultivo y el área a estudiar; la programación del vuelo con las cámaras RGB y NIR, y la obtención de los ortofotomosaicos respectivos; el cálculo del índice NDVI e identificación de zonas con mayor o menor actividad fotosintética; el análisis de respuesta espectral NDVI y la selección de puntos de respuesta espectral diferenciada que actuaron como indicativo del estado y nivel de estrés del cultivo y, por último, la supervisión del cultivo directamente sobre los puntos de respuesta espectral seleccionados y la definición de las razones que explican la diferente respuesta espectral obtenida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Antecedentes

La agricultura es uno de los principales motores económicos del medio rural que, con el paso del tiempo y la aparición de mercados competitivos, requiere de innovación y mejora de la producción de sus productos (Martínez-Cebrian, 2012). En la última década, las variaciones climáticas relacionadas con el fenómeno de El Niño y La Niña (Alzate *et al.*, 2015), han traído serios retos para la agricultura colombiana, demostrando que muchos agricultores no tienen la capacidad de manejar efectivamente el riesgo ni de adaptarse a

fluctuaciones climáticas y catástrofes (Lau, 2013). Al mismo tiempo, la mayoría de modelos de cambio climático predice que los daños serán compartidos de forma desproporcionada por los pequeños agricultores del tercer mundo (Nicholls, 2010), lo que aumenta su vulnerabilidad.

Según cifras del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en el 2013, de las 22,1 millones de hectáreas para uso agrícola con las que cuenta el país gracias a su condición tropical y variedad de pisos térmicos, Colombia utiliza 5,3 millones, es

decir, solo el 24,1% de su capacidad y potencial agropecuario. De acuerdo con Perfetti (2013), cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) indican que en 2012, 11.204.685 personas habitaban zonas rurales del país y tenían su sustento en la actividad agropecuaria. Asimismo, de acuerdo con Fajardo-Junco (2013), la mayoría de estos son pequeños productores con prácticas de trabajos tradicionales que implican una baja tecnificación en el desarrollo de los cultivos. De un lado, la disposición de los recursos de naturales, tales como, agua, aire y suelo ha disminuido en calidad y cantidad; mientras que la variabilidad climática, como componente horizontal de todas las actividades desarrolladas alrededor del agro, ha aumentado y generado pérdidas económicas de grandes y pequeños productores agrícolas. En ese panorama, la escasa planificación de los cultivos de gran parte del sector agrícola, y de los sobrecostos asociados a la atención de enfermedades, así como la baja asistencia técnica y la deficiente implementación de nuevas tecnologías en cada una de las fases de desarrollo del sistema productivo, desencadenan efectos que se traducen en una baja competitividad del agricultor y poca inserción del producto en mercados que exigen estándares de calidad relacionados con menor uso de agroquímicos, precio justo al agricultor, manejo sostenible y tecnificación del sistema productivo. Además, el manejo de agroquímicos, fertilizantes y plaguicidas, así como su aplicación directa, no solo sobre las áreas que lo requieren, sino sobre toda la extensión del cultivo, promueve el aumento de la resiliencia de plagas y enfermedades de los cultivos que cada vez demandan un manejo más invasivo, genera mayores inversiones económicas para combatirlas, afecta la calidad de los componentes nutricionales del producto final e influye en la disminución en la calidad de vida de las familias campesinas, en su derecho a la vida y a la alimentación, así como al logro y defensa de la soberanía alimentaria (Flórez & Mosquera, 2013).

Por su lado, Fajardo-Junco (2013), sostiene que el uso de herramientas tecnológicas como las imágenes de satélite propuestas en la agricultura de precisión, ha presentado inconvenientes

relacionados con el tiempo, el costo y la calidad de las imágenes en cuanto a su resolución espectral y espacial, mientras que los estudios realizados en Colombia alrededor del uso de aviones no tripulados han estado, por lo general, enfocados a misiones institucionales (Sánchez, 2014) y aplicaciones militares (Cañón *et al.*, 2011).

Países como Estados Unidos, España y Brasil, han avanzado en su implementación para la planificación y manejo de grandes extensiones de cultivos; por ejemplo, en el mapeo de brotes de hierbas invasoras, riego necesario, zonas de fertilización y anomalías presentes en cultivos de fruta (Herwitz *et al.*, 2004) o en la identificación de la participación de la luz y la transferencia de energía, el enfriamiento y la fotoprotección en la cosecha de vid mediante el uso de imágenes hiperespectrales (Zarco-Tejada *et al.*, 2013), que permiten reconocer las propiedades de la superficie terrestre y la estimación de propiedades geofísicas a partir de la interacción de la radiación electromagnética con el material del suelo o las plantas (Fernández & Chacón-Murguía, 2014).

Vehículos aéreos no tripulados (VANT), unmanned aerial vehicle (UAV) o Drones

Los VANT son aviones o multirrotores controlados de forma remota o autónoma que siguen una línea de vuelo preprogramada (Torres-Sánchez, 2013), operando fuera del sistema de navegación interno. Los UAV fueron desarrollados inicialmente por el ejército americano y la capacidad de controlarlos a grandes distancias no era muy sofisticada, de tal forma que los primeros drones volaban por senderos preestablecidos, operando fuera del sistema de navegación interno, lo que condujo a denominar dron a cualquier máquina que vuela sin control humano. El uso de drones para la captura de imágenes aéreas de alta resolución presenta diversas ventajas sobre el uso de aviones tripulados y satélites con los mismos fines (ver tabla 1), ya que los UAV pueden proporcionar una calidad mejor en los mapas, operan en el ámbito local y logran penetrar áreas inaccesibles (Krzysztof, 2011). Los UAV se componen normalmente de Fuselaje (normalmente de poliestireno), Telemetría (controlada por radio en

las frecuencias de 2.4 Ghz y 5.8 Ghz, a través de la cual se comunica el dron y se permite la transmisión de videos e imágenes si se usa un sistema de vista en primera persona o first person view (FPV), Receptor o control remoto (con 2 a 8 canales para control de alerones, elevadores y cámara), Computador a bordo (incluye GPS y unidad de medición inercial (IMU) dispositivo que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos), sensor de presión y data log del vuelo (operado por software instalado en la estación de control en tierra), Estación de control en tierra (PC con software que transmitir coordenadas y recibir información del vuelo), Batería (generalmente de polímero de litio (LiPo) con diferente número de celdas y capacidades) y Cámara (funciona en diferentes rangos del espectro electromagnético, desde el visible hasta el infrarrojo cercano).

Tabla 1
Imágenes de aviones tripulados vs imágenes de aviones no tripulados

IMÁGENES DE AVIONES TRIPULADOS	IMÁGENES DE AVIONES NO TRIPULADOS
La altitud vuelo de los aviones tripulados oscila alrededor de 1500 m. El verde es visible en todo el mapa. La resolución es de 10cm/pixel. Las sombras generan un impacto severo en la lectura de los datos	La altitud del vuelo es menor (<300m). Existe mucho menos aire entre el sensor y el objetivo. El color es significativamente mejor y permite diferenciar coberturas y objetos más fácilmente. Mayor información por pixel.
Todos los edificios son uniformemente inclinados por un costado	La distorsión es removida gracias a que el recubrimiento del objetivo abarca todos los ángulos. Menor presencia de sombras.

Fuente: Krzysztof, 2011

Existen dos tipos principales de UAV, modelos de ala fija (Fixed Wing Aircraft) representados mayormente en aviones, multirrotores y helicópteros, cuyo uso depende de factores como el área de estudio (aunque requieren mayores habilidades para su control, los aviones son versátiles, compactos, ligeros y consumen menos energía mientras vuelan, por lo que son aptos para grandes áreas), la precisión del vuelo (los multirrotores son más sencillos de volar y estables durante el vuelo lo que mejora la precisión y la

calidad final de las fotografías) y las habilidades para su operación. En ambos casos, las ventajas de su operación han masificado el uso de drones en el contexto mundial para diversas aplicaciones como creación de mapas a través de imágenes de alta resolución y recolección eficiente de información georreferenciada (ver tabla 2).

Tabla 2
Cuadro comparativo entre aviones y multirrotores

VARIABLE	AVIONES	MULTIRROTORES
Area cubierta	Mayor cobertura por vuelo, hasta 1000 ha con configuraciones promedio > a 250 ha	Menor cobertura por vuelo, hasta 50ha con configuraciones promedio < 20 ha
Duración batería	Mayor, generalmente realiza el vuelo con el 20 al 50% del motor	Menor por mayor número de motores
Resolución fotografías	Depende de la altura de vuelo	Depende de la altura de vuelo
Estabilidad	Menor	Mayor
Costo	Menor	Mayor
Requiere experiencia y habilidades para su operación	Mayor	Menor
Duración del vuelo	Hasta dos horas	Hasta dos horas
Implicación personal	Dos pilotos típicos con calificaciones en bi-motores, CPL (A), IFR, MEP (L)	1 piloto, algunas veces 1 ayudante /observador
Área de cobertura por vuelo	Cientos de kilómetros cuadrados	Alrededor 9km ² (900ha) para mapa rectangular por vuelo, hasta 72km ² (7200ha) para vuelo de línea recta (dependiendo de la resolución).
Resolución	500-250m AGL. Menor altitud limitada por ruido Reglamentos y riesgo en zonas urbanas Requiere tiempo para conectar a tierra	4 cm/pix a 100m AGL – 11 cm/pix a 300m AGL Límite superior de altitud a menudo impuesta por las leyes de tránsito aéreo
Impacto ambiental	Limites de ruido Consumo de combustible.	A 200 metros en su mayoría inaudibles Energía eléctrica recargable.
Preparación retoma de la misión	Sobre cartografía Debe regresar al campo de aviación	En la estación de tierra sobre un software específico Se puede guardar cerca de zona de la misión a la espera de tiempo despejado

Fuente: autores, a partir de Krzysztof, 2011.

Las ventajas mencionadas han hecho que en los últimos años, el uso de drones se ha masificado en

el contexto mundial para diversas aplicaciones como, creación de mapas a través de imágenes de alta resolución, optimización de la eficiencia en la realización de las tareas relacionadas con actividades mineras, mejora de los procesos de ayuda humanitaria y respuesta a emergencias, recolección eficiente de información georreferenciada y detección de áreas que requieren mayor atención en los cultivos. A través de drones se pueden obtener imágenes de alta precisión de áreas cultivadas, abarcando cientos de hectáreas en un solo vuelo, sin los altos costos de contratar personal para esta actividad y con mucha mejor resolución y sin problemas de nubes que si usará imágenes satelitales. Usando software de procesamiento de imágenes, se pueden compilar las imágenes y obtener ortofotomosaicos de los cultivos y fincas y aplicando técnicas y algoritmos a dichas imágenes pueden obtener índices NDVI que permiten tener información de la reflectancia de los cultivos. Como lo mencionan Barreiro y Baguena (2013), uno de los resultados más interesantes en el empleo de drones radica en la disminución del uso de insumos agrícolas como herbicidas y fertilizantes que generalmente no se requieren en toda la extensión del cultivo, lo que reduce el tiempo de tratamiento, la superficie barrida y el consumo de combustible.

Nociones básicas en la implementación de drones en agricultura

En el proceso de implementación de drones en la agricultura, es necesario aclarar aspectos tales como, espectro electromagnético, tipos de cámaras, respuesta espectral de las plantas e índice NDVI (Martínez-Cebrian, 2012). El espectro electromagnético hace referencia a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) un objeto y que sirve para su identificación, tal y como la huella dactilar permite identificar a las personas, dentro de una porción del espectro visible por el ojo humano y el límite del infrarrojo. En cuanto a cámaras, en el uso de aplicaciones agrícolas se ha difundido el uso de cámaras en color o RGB usa el espectro visible por el ojo humano en rojo, verde y azul (RVA) o

RGB – red, green, blue, por sus siglas en inglés y cámaras en infrarrojo cercano (NIR) a través de las cuales y, utilizando combinaciones e índices, se pueden apreciar características de los cultivos. El RGB se usa para inspección visual, modelos de elevación del terreno y conteo de plantas, mientras que el NIR es empleado para detectar propiedades de los suelos y análisis de humedad o estrés por deficiencia de nutrientes en el suelo de los cultivos, manejo del agua, balance hídrico, análisis de erosión y conteo de plantas que permiten tomar decisiones adecuadas para su manejo. Dentro de las cámaras NIR se destacan las opciones NGB y NRG. Las cámaras NGB incluyen un filtro especial que bloquea la luz roja y a cambio permite el paso del infrarrojo cercano por encima de los 700nm. Adicionalmente, permite el paso de las ondas del Verde (G) y Azul (B) con lo cual tiene dos bandas del visible y una del infrarrojo cercano, que permiten realizar análisis básicos del estado fitosanitario de los cultivos: entre más oscuro e intenso el color verde, más densa y saludable es la vegetación. Por su lado, en las cámaras NRG, el infrarrojo cercano, el rojo y el verde se usan para componer una imagen que de manera similar permite realizar análisis básicos del estado fitosanitario de los cultivos: entre más oscuro e intenso el color rojo, más densa y saludable la vegetación. En cuanto a la respuesta espectral de las plantas, cabe mencionar que estas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis que en el marco de un balance con la respiración, permite la producción de materia seca (Foyer & Matthew, 2001). De esta forma, las células vegetales dispersan la radiación solar y usan aproximadamente la mitad de esta en la región espectral del infrarrojo cercano. Debido a que el nivel de energía por fotón en ese dominio (longitud de onda mayor a los 700nm), no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas, una fuerte absorción en este punto sólo causaría en un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos. Por lo tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la región de radiación

fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano (Martínez-Cebrian, 2012). Como lo mencionan Verdin *et al.*, (2003), el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI, es usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base en la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Así, el índice de NDVI cuantifica, a través de la reflectancia, áreas de alto vigor (densidad vegetal) que poseen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano y una menor reflectancia en el rojo, debido a que poseen un mayor índice NDVI. Según Esser *et al.*, (2002), el principio básico del NDVI se basa en el hecho de que las capas esponjosas de las hojas reflejan mucha luz en el infrarrojo cercano, en marcado contraste con la mayoría de objetos no vegetales. Cuando la planta se deshidrata o estresa, la capa esponjosa colapsa y las hojas reflejan menos luz NIR, pero la misma cantidad en el rango visible. La combinación matemática de estas dos señales puede ayudar a diferenciar las plantas de lo no vegetal y plantas saludables de plantas enfermas. Las áreas de alto vigor (densidad vegetal) poseen una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano y una menor reflectancia en el rojo, debido a que poseen un mayor índice NDVI.

Desarrollo práctico del estudio

En la producción de cualquier cultivo, más del 90% del peso seco de la planta está constituido por las sustancias orgánicas que se forman en procesos bioquímicos como la fotosíntesis. El dióxido de carbono fijado y reducido a carbohidratos, es importante para la producción de tubérculos, y otros órganos como: raíces principales y secundarias, tallos primarios, secundarios y hojas (Rodríguez *et al.*, 2013). Por lo tanto, según Castellanos (2010), y Foyer & Matthew (2001), la producción de materia seca es determinada por el balance entre fotosíntesis y respiración. Para la selección del cultivo y el área objeto de estudio se realizó un análisis de los sistemas productivos de mayor importancia en la región (Cundinamarca), así como de los impactos en los rendimientos y productividad

de tales cultivos en los últimos años, dados por la presencia de enfermedades y plagas, deficiencias nutricionales en los suelos o deficiencias y excesos hídricos, en un contexto de cambio y variabilidad climática. Entre los sistemas productivos evaluados se encuentra zanahoria, pastos de corte, hortalizas y papa, el último de los cuales fue seleccionado teniendo en cuenta su disponibilidad y estado para la evaluación. En lo que respecta a las plantas de papa, estas pueden propagarse por medio sexual o asexual. Por el sistema de propagación sexual (semilla botánica), se genera un sistema radicular muy fibroso, con raíz primaria, hipocótilo, cotiledones y epicótilo, para luego desarrollar el tallo y el follaje (Castellanos, 2010). De acuerdo con Huamán (1986), para cultivos comerciales, el más usado es el sistema asexual, el cual se produce a partir de los tubérculos que desarrollan brotes y raíces adventicias en la base y encima de los nudos, en la parte subterránea de los tallos, de tal forma que la clave radica en que por medio de este sistema de propagación se pueden generar varios tallos por sitio. El ciclo de desarrollo del cultivo de papa está dividido en cinco fases principales: inicio, brotación y emergencia, desarrollo de la hoja, iniciación de tubérculos, llenado de tubérculos, madurez y cosecha. El cultivo de papa es altamente susceptible a los efectos de variabilidad climática y a la presencia de enfermedades; además, se caracteriza por el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas (Espinel & Martínez-Covaleda, 2005), alta demanda de mano de obra rural no calificada que oscila entre 110 y 120 jornales por hectárea (Cevipapa, 2005) y por ser un cultivo disperso, aislado, de pequeños productores con limitado acceso a la tecnología; de la misma manera, el excesivo uso de plaguicidas en aplicaciones tipo calendario de productos en mezclas sin conocer sus ingredientes activos, se traduce en mayores costos y en una mayor contaminación de suelos y aguas por residuos de sustancias tóxicas. En Colombia, las variedades más utilizadas son: tuquerreña o sabanera, parda pastusa, pastusa suprema, rubí, salentina, carriza, diacol capiro-r12, ICA única, ICA nevada, ICA Nariño, milenio-1, diacol Monserrate y yema de huevo (papa criolla). Igualmente, “el cultivo de la papa se destaca en la actividad agropecuaria nacional por los aspectos

directamente relacionados con su explotación y por la variada cantidad de actividades que se generan en torno a este producto.” (Corpoica, 2003). El cultivo de papa seleccionado se encuentra ubicado en el municipio de Mosquera y representa uno de los grandes renglones de su economía. Cuenta con 12ha en etapa de estados fenológicos tardíos (floración) (al mes de marzo de 2015) y pertenece a la variedad Diacol Capiro que es la de mayor uso gracias a su alta calidad industrial, excelente rendimiento, ciclo vegetativo medio de aproximadamente 5,5 meses en condiciones de la Sabana de Bogotá, buena oferta durante una gran parte del año, comportamiento en almacenamiento, transporte y tolerancia a la manipulación. En las áreas colindantes al cultivo se encuentran áreas de suelo desnudo, algunas vías terciarias de acceso al cultivo, zonas cultivadas con Lechuga (*Lactuca sativa* L.), lotes en barbecho y algunas zonas de canales de agua, que son componentes que permiten identificar la reflectancia con los índices NIR y RGB, y el NDVI. En el momento del sobrevuelo y la visita de campo, el cultivo se encontraba en fase de floración madura la cual exige generalmente medidas de manejo o control anticipadas que permitan evitar posibles complicaciones por plagas o enfermedades. Para la preparación del trabajo de campo se realizó un análisis técnico y económico de algunos UAV disponibles en el mercado que permitió elegir al DJI Phantom (cuadricoptero) y al avión MA Skywalker 2015-Meteoagro, para la obtención efectiva de fotografías aéreas. Posteriormente y de acuerdo con Espadas & García-Cortés (2014), se planificaron y realizaron los vuelos, para lo cual se tuvieron en cuenta aspectos generales (alturas permitidas, obstáculos, vientos, puntos de lanzamiento y aterrizaje) y específicos del vuelo (altura, velocidad, coordenadas, características de las cámaras y software para definición del polígono del área de influencia). La realización del vuelo incluyó activación de la ruta, revisión de waypoints, lanzamiento, rutina de vuelo en modo automático o Return To Launch (RTL), captura continua de fotos y aterrizaje (ver figura 1). Para la obtención de mejores resultados, los vuelos se realizaron de las 11:30 hasta las 13:00 horas, ya que es el momento

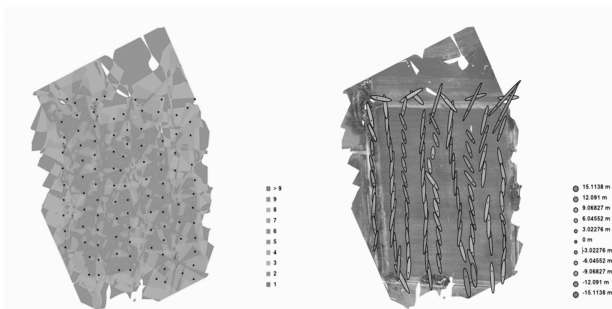
del día con mayor actividad fotosintética debido a la mayor radiación solar incidente.



Fuente: autores

Figura 1. Línea de vuelo, coordenadas de los waypoints y altura del vuelo

En la construcción de los mosaicos RGB y NIR del área de estudio, se georreferenciaron y procesaron las fotografías, detectando zonas con menores fotos (rojo) y mayores fotos (azul), número de fotografías asociadas con cada color y errores registrados en el proceso de captura de fotos por desviaciones posiblemente ocasionadas por ráfagas de viento (ver figura 2), para proceder a la ortorectificación y creación del mosaico de imágenes en RGB y NGB. Además, se incorporaron cinco puntos georreferenciados en campo y se mejoró la precisión de la ortofoto generada; se realizó el Digital Surface Model (DSM) o modelado en 3D del área y el modelo digital de elevación (DEM), que permiten identificar zonas de obstáculos para posteriores vuelos y detección del crecimiento de especies en estadios más avanzados.

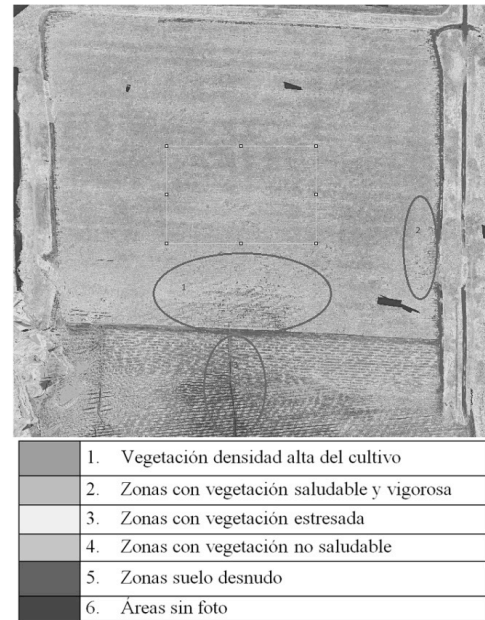


Fuente: autores

Figura 2. Localización y dirección de la foto

Para obtener la imagen en 3D del cultivo se procesó la nube de puntos en programa agisoft-photo-scan, tomada en el sobrevuelo del cultivo con la cámara (RGB) cámara visible, se realizó la densificación de los puntos proyectada en tres dimensiones (X, Y, Z) en la malla y se activó la función de textura para homogenizar los colores y formas. Por medio de la imagen observa el microrelieve de la zona del cultivo, los arboles (pinos y eucaliptos) que bordean el área del cultivo y los cultivos colindantes, lo que permitió identificar zonas de obstáculos para posteriores vuelos y crecimiento de especies en estados más avanzados.

El mosaico obtenido fue analizado y procesado para la aplicación del índice NDVI e identificación puntos de respuesta espectral específica en el cultivo. La imagen de la ortofoto permitió observar la respuesta espectral del cultivo en etapa de floración e, identificar surcos con suelo desnudo o con déficit de plantas. La imagen tomada con la cámara NIR-NGB (que suprime el rojo y permite el paso del infrarrojo por este canal) permitió visualizar y analizar estados del cultivo imperceptibles al ojo humano; por ejemplo, las zonas en color negro representan áreas sin información, las zonas con mayor densidad de cultivo se pigmentan de un tono naranja, mientras que aparecen en rojo aquellas zonas del cultivo saludables y vigorosas, y en café o marrón aquellas que se encuentra estresadas, enfermas o sin vegetación. De esta forma, a partir de la imagen NDVI obtenida del ortofotomosaico NIR y de la reflectancia específica encontrada, se seleccionaron tres zonas con posibles problemas para el cultivo de papa, objeto de estudio (ver figura 3). Para la verificación de las características del cultivo en los puntos de respuesta espectral definidos, se realizó una visita de campo en la que se observó desde el lindero del cultivo un estado presuntamente saludable, en tanto la tonalidad y el crecimiento (con presencia de ocho a nueve entrenudos), parecían uniformes. La supervisión de las tres zonas seleccionadas contó con el apoyo de un ingeniero agrónomo del Centro de Investigación Tibaitatá de CORPOICA.



Fuente: autores

Figura 3. Ortofotomosaico NDVI del área del cultivo de papa

Cabe resaltar, que el manejo que dado al cultivo durante el estudio estuvo caracterizado por una aplicación de herbicidas antes de la siembra y por la aplicación de desarrolladores en diferentes etapas del cultivo para prevenir la presencia de plagas y enfermedades; sin embargo, se pudo visualizar que en algunos puntos el suelo se encontraba afectado por la aplicación de estos agroquímicos, lo que permite considerar una posible sobrecarga química del producto final (tubérculo) y los sobrecostos que conlleva la aplicación constante de estos químicos. En la Zona 1, se encontró exceso de agua en cada uno de los surcos de esta área del cultivo, suelo con evidente saturación hídrica y plantas que a pesar de haber emergido al mismo tiempo que las demás, presentaban un crecimiento tardío de dos a tres entrenudos, así como fragmentos de suelo desnudo y mínima cobertura de follaje, en comparación otras área del cultivo. Bajo estas condiciones, aumenta la susceptibilidad del cultivo a enfermedades causadas por *Phytophthora infestans* o rizoctaniasis (*Rhizoctonia solani*) que se propagan fácilmente en suelos con condiciones de humedad del suelo mayor del 90% (ver figura 4). De la misma manera, entre los surcos y calles del cultivo se encontró la

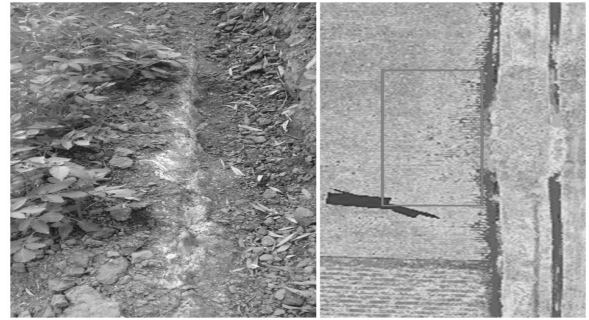
presencia de gramíneas como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), que según Pérez & Forbes (2011) compite por luz, agua y nutrientes; puede actuar como hospedantes de otras plagas; puede provocar diferentes anomalías en el cultivo y afectación en todo el desarrollo vegetativo por enfermedades. El manejo del kikuyo implica rotación de cultivos, preparación del terreno, uso de variedades competitivas, distanciamiento adecuado de siembra, cobertura viva de cultivos, manejo de riego, desyerba en forma manual o con herramientas, mayores labores de cultivo y uso de herbicidas.



Fuente: autores

Figura 4. Zona 1 - Vista del cultivo con estrés hídrico e imagen desde el ortofotomosaico NDVI

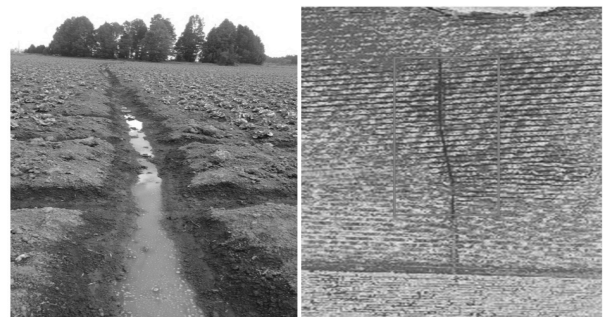
En la Zona 2, se evidenció escasez de humedad y exceso de sales en la capa superficial del suelo y, por consiguiente, las plantas de papa presentaron un desarrollo menor que en el resto del cultivo con un crecimiento de tres a cuatro entrenudos en promedio e indicios de clorosis que, según (Rodríguez, 2013) afecta la absorción de nutrientes y la actividad microbiana del suelo (ver figura 5). También se encontró la Lengua de Vaca (*Rumex crispus*), una especie invasiva y altamente resiliente, que al competir por nutrientes genera estrés en el cultivo y lo vuelve vulnerable a la aparición de plagas y enfermedades (Bates *et al.*, 2008). Al realizar una comparación de las plantas de papa que se encontraban en zonas de mayor vigorosidad del cultivo y las que se encontraban en la Zona 2, se evidenció una clara diferencia en la fisiología de las plantas de papa, en cuanto a nivel de crecimiento, pigmentación, floración, número de entrenudos y presencia de floración.



Fuente: autores

Figura 5. Zona 2 - Suelo con evidente sequía, compactación y salinización e imagen NDVI

En la Zona 3, se observa un canal de desagüe del predio que desemboca a la Zona 1 analizada previamente. Dicho canal, aunado al micro-relieve del terreno, genera una zona de exceso hídrico con encharcamiento que afecta negativamente el desarrollo y calidad del cultivo de papa. Al respecto, la coloración vinotinto de la imagen NDVI que refleja zonas con poca o nula actividad fotosintética, es consecuente con los encharcamientos existentes (ver figura 6). Además, se observa que este canal puede ser un factor de propagación de enfermedades en el cultivo de papa y el cultivo colindante de lechuga, ya que el exceso hídrico puede facilitar en las horas más cálidas del día la propagación de microorganismos o la colonización de insectos perjudiciales para el cultivo, tales como la chisa o mojoy *Abcognata scarabaeoides*, *Alternaria solani* Gota o tizón tardío *Phytophthora infestans*, Cenicilla *Eypisiphe cichoracearum*.



Fuente: Autores

Figura 6. Zona 3 - Exceso hídrico e imagen NDVI

CONCLUSIONES

Se evidencia que tanto el cambio climático y la variabilidad climática, como las prácticas tradicionales no tecnificadas, han desencadenado una alta vulnerabilidad en los sistemas productivos del país. La baja aplicación de tecnologías alternativas en la planificación de agricultura para el manejo de problemas en los cultivos, conduce al desarrollo de prácticas relacionadas con la aplicación excesiva de agroquímicos (insecticidas y fungicidas), como medida alternativa para hacer frente al riesgo que genera la presencia de plagas y enfermedades, pero que a su vez hace que dichos flagelos sean más resilientes a diferentes agroquímicos. Teniendo en cuenta que, según Mosquera & Gómez (2012), la política ambiental para la gestión urbano-regional en Colombia prioriza aspectos relacionados con la planificación, el monitoreo, la asistencia técnica y la capacitación, el uso de drones es una opción viable para monitorear y diagnosticar de forma ágil las condiciones de desarrollo del cultivo de papa, ya que a través de la teledetección, el uso de cámaras multiespectrales y el índice NDVI, se identificaron cuatro tipos diferentes de respuestas espectrales: zonas con vegetación saludable y vigorosa, zonas con vegetación estresada por exceso de sales minerales y exceso de humedad en el suelo, zonas con vegetación no saludable y zonas con suelo desnudo. La ortofoto NDVI generada a partir de las fotografías de la cámara NGB permitió la selección de tres zonas para inspección en campo y evidenció que la respuesta espectral sí permite identificar problemas en el cultivo, en tanto tonalidades cafés y rojizas indican un índice NDVI bajo y se asocian a un suelo desnudo, problemas

de crecimiento o presencia de plantas invasoras; tonalidades amarillas representan zonas de menor desarrollo del cultivo y tonalidades verdes expresan zonas con mejor desarrollo del cultivo, cuyo crecimiento se caracterizó por la presencia de ocho a nueve entrenudos. De esta manera, los aviones no tripulados representan una excelente herramienta por la facilidad de montar cámaras multiespectrales y obtener imágenes de alta resolución representadas en 5,0cm/pixel, las cuales permiten identificar problemas y tomar medidas en áreas puntuales de los cultivos que se encuentran enfermos. Con ellos, se pueden hacer análisis y censos puntuales de alta precisión, con fotografías de 5,0cm/pix a 100,0m lo que puede disminuir el tiempo y trabajo no solo en zonas de difícil acceso, sino también en grandes extensiones. Además, el uso de la cámara NIR y análisis del índice NDVI permiten identificar fácilmente problemas de cultivos que podrían no ser visibles a partir de una observación convencional, dado que las plantas en estado saludable reflejan gran cantidad de energía en el rango del infrarrojo cercano, mientras que las plantas enfermas reflejan mucha menos energía en el infrarrojo cercano y mucho mayor en el rojo. Al mismo tiempo, con el fin de mejorar los resultados obtenidos en las zonas cultivadas, se observa la necesidad de realizar estudios complementarios que incorporen variables, tales como, análisis de suelos que soporten la identificación de zonas de respuesta espectral específica, monitoreo en diferentes periodos de tiempo y monitoreo de la evolución de las zonas detectadas según las medidas correctivas aplicadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alzate, D.; Rojas, E.; Mosquera, J; Ramón, J. Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, Norte de Santander, (2015). Colombia. *Rev. Luna Azul*. N° 40. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, p.127-153.

Berrio V.A. (2015). Uso de drones como herramienta de planificación en agricultura de precisión para la detección temprana de problemas en cultivos de papa (*Solanum tuberosum*). *Trabajo de grado para optar por el título de magister en ingeniería ambiental de la Universidad de Pamplona*. 88 p.

- Barreiro P. y Baguena E. x Drones en la agricultura. (2015). Dossier, Universidad Politécnica de Madrid. Rev. *Tierras de Castilla y León: Agricultura*, Vol. 220, 36-42.
- Bates B.C., Z.W. Kundzewicz S.W y Palutikof J.P. (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 p.
- Cañón E.B.; Parra-Villamarín J.E. y Murcia-Piñeros J. x La Industria aeronáutica en Colombia a partir del desarrollo e innovación de vehículos aéreos no tripulados (VANT). (2015). *Perfiles Libertadores*. ISSN 2248-5724 N°7, p. 34-71.
- Castellanos, M.S. Evaluación del crecimiento, desarrollo y componentes de rendimiento de cuatro cultivares de papa criolla en dos localidades del Departamento de Cundinamarca. (2010). *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía*, 113 p.
- Cevipapa. Censo nacional del cultivo de la papa. Colombia. En: Centro virtual de investigación de la cadena agroalimentaria de la papa (Cevipapa), (2005). Disponible en <http://www.cevipapa.org.co/estadisticas/estadisticas.php> Consultado: 11.10.2005.
- Corpoica Manual de papa para productores. 1ª Ed. Corpoica, Bucaramanga: Litografía La Bastilla Ltda. (2003). 103 p.
- Esser A, Ortega R, Santibáñez O. Nuevas Tecnologías para Mejorar la Eficiencia Productiva en Viñas. (2002). *Revista Agronomía y forestal*. Vol. 1 (15). Centro de Agricultura de Precisión, Universidad de Chile, p. 4-9. Disponible en http://www.puc.cl/agronomia/c_extension /Revista/Ediciones /15 /tecnologia.pdf Consultado: 20.02.2015.
- Espadas C. y García-Cortés S. Planificación de vuelos fotogramétricos para U.A.V sobre cliente Qgis. (2014). Universidad de Oviedo, España, p.1-38.
- Espinel G. y Martínez-Covaleda H. (2005). La cadena de la papa en Colombia, Una mirada global de su estructura y Dinámica. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - Observatorio Agrocadenas Colombia, p.1-15.
- Fajardo-Junco J.C. (2013). Support for precision agriculture in Colombia using images acquired from Unmanned Aerial Vehicles (UAV's). Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, p.1-7.
- Fernández L.G. y Chacón-Murguía, M. Adquisición y registro de imágenes aéreas multiespectrales para generación de omagenes NDVI. (2014). *Electro*, p.7-102.
- Flórez C. y Mosquera J. La relación ser humano – naturaleza frente a los derechos fundamentales en el territorio. (2013). *Rev. Alimentos Hoy. Asociación Colombiana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. ISSN 2027-291X, Vol. 21(28), p.79-96.
- Foyer C. y Matthew P. Sink relationships. (2001). En: *Encyclopedia of Life Sciences. Nature Publishing Group. United Kingdom*. p.11.
- Herwitz S., Johnson L.F., Dunagan S.E., Higgins R., Sullivan D.V., ZHENG, J. & Huamán Z. (2004). *Botánica sistemática y morfología de la papa. Boletín de información técnica 6. Centro Internacional de la Papa Lima*, 1-22.
- Huamán Z. Botánica sistemática y morfología de la papa. (1986). *Boletín de información técnica 6. Centro Internacional de la Papa (CIP)*. Lima, p.1-22.
- Krzysztof B. Secrets of UAV photomapping. Presented satellite maps CNES/Spotimage. (2011). Disponible en http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf Consultado: 16.01.2015.
- Lau, C. (2013). *Agricultura Colombiana: Adaptación al Cambio Climático. Decisión and Policy Analysis Program DAPA CIAT*, p. 1-4.
- Martínez-Cebrian M.C. Incorporación de tecnologías de información territorial en una explotación agraria de secano ante la práctica de agricultura de precisión. (2012). *Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA)*, p.25-132.
- Menna S. Heurísticas y metodología de la ciencia. (2014). *Mundo Siglo XXI (México)*. Vol. 9(32), 67-77
- Mosquera J.; Gómez E. Bases conceptuales para la gestión integral del riesgo. (2012). Luna Azul. N° 34, Universidad de Caldas. Manizales, Colombia, p.148-169.

- Nicholls M.A. (2010). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. Universidad de California, Berkeley USA, p 1-15.
- Pérez W. y Forbes G. Guía de identificación de plagas que afectan a la papa en la zona Andina. (2011). *Centro Internacional de la Papa CIP*, p. 1-48.
- Perfetti J.J. Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. (2013). Centro de Investigación Económica y social de Fedesarrollo. Universidad Javeriana, p. 1-23.
- Rodríguez V. L., Beltrán-Fonseca M.D., Lerma-Molina J.N.; Licón-Trillo L.P. (2013). Aplicación de Acido Sulfúrico en el Riego Corrige la Clorosis Férrica de los Cultivos en (Berrío 2015) Sánchez A. COHA Report: Drones in Latin America. (2014). COHA Policy Memo, pp.1-9
- Tashakkori, A. y Teddlie, C. Mixed methodology: Combining the qualitative and quantitative approaches. Thousand Oaks, CA: Sage. (1998). *Educational Researcher* October 2004 Vol.33, p14-26.
- Torres-Sánchez, J. P. Puesta a punto de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para detección de malas hierbas en fase temprana: resolución especial y latura de vuelo. (2013). *XIV Congreso de la Sociedad Española de Malherbología*, Valencia-España p. 43-47
- Verdin J., Pedreros D., Eillerts G. Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI), FEWS - Red de alerta temprana contra la inseguridad alimentaria, Centroamérica. (2003). *USGS/EROS Data Center*, p.1-12.
- 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*, p. 171,172, 281, 294.

AGRADECIMIENTOS

Lo autores agradecen al Magister Luis Lizcano de Corponor, por sus aportes en el desarrollo del estudio.