



Artículo: COMEII-15039

## I CONGRESO NACIONAL COMEII 2015

### Reunión anual de riego y drenaje

Jiutepec, Morelos, México, 23 y 24 de noviembre

## LOS VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS Y LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

**Waldo Ojeda Bustamante<sup>1</sup>; Azucelli Mauricio<sup>1</sup>; Alberto González<sup>1</sup>; Jorge Flores<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550.

### Resumen

El desarrollo de las tecnologías de información y comunicación empieza también a impactar a los sistemas productivos agrícolas, lo que ha traído nuevas alternativas para la mejora de procesos y tareas agrícolas que demandan grandes volúmenes de información para su mejor planeación, administración, gestión, y evaluación. Con la puesta en órbita de satélites se facilitó el monitoreo de la superficie terrestre al capturar imágenes espectrales e incorporar nuevos métodos de análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés agrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua y de baja resolución. Ante estas limitaciones, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) equipados con sensores multifuncionales pequeños, complementados con sistemas de navegación autónoma, es una alternativa viable de bajo costo para monitorear zonas agrícolas. La agricultura de precisión se basa en efectuar la aplicación correcta de insumos agrícolas, en el momento adecuado, en el lugar preciso, y con la dosis de óptima demandada por los cultivos apoyada con herramientas que facilitan el monitoreo frecuente y la automatización de los procesos requeridos. Siendo las variables de interés agrícola, que definen la producción y desarrollo de los cultivos, de alta variabilidad espacial y temporal, en este trabajo se analiza y documenta la aplicación de los drones o VANTs como una herramienta de apoyo para la agricultura de precisión.

**Palabras clave:** Drones, monitoreo, variables agrícolas, sensores remotos.



## **Introducción**

El monitoreo de variables del sistema agua-suelo-planta-atmósfera, de interés para implantar acciones de agricultura de precisión, consume tiempo y recursos económicos, instrumentales y humanos, por la cantidad de datos que se requieren para tomas de decisiones oportunas y robustas, aunado a la dificultad para acceso a zonas agrícolas, por lo que frecuentemente el monitoreo de variables de interés agrícola es deficiente, disperso y requiere de un tratamiento previo para revisar su calidad y realizar una interpolación espacial.

Diversas técnicas se han usado para compilar y monitorear la información de interés agrícola relacionados con el estado/condiciones de parcelas, cultivos, infraestructura, y ambiente de manera confiable y actualizada. Los sistemas de información geográfica han sido la principal herramienta informática para integrar la información espacial en mapas.

A partir de los 80s con la puesta en órbita de satélites, se ha facilitado el monitoreo de la superficie terrestre con la incorporación de tecnología de sensores remotos que ha sido apoyado con la mejora en métodos para análisis, procesamiento y despliegue de información espacial de variables de interés agrícola. Sin embargo, ante la demanda de información detallada, los satélites tienen la limitante de suministrar información temporal discontinua, un par de imágenes por mes, e información espectral de baja resolución.

Los vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como VANTs, UAVs, o más comúnmente como drones, son una alternativa actual para estimar en forma remota variables de interés agrícola, de alta variabilidad espacial y temporal.

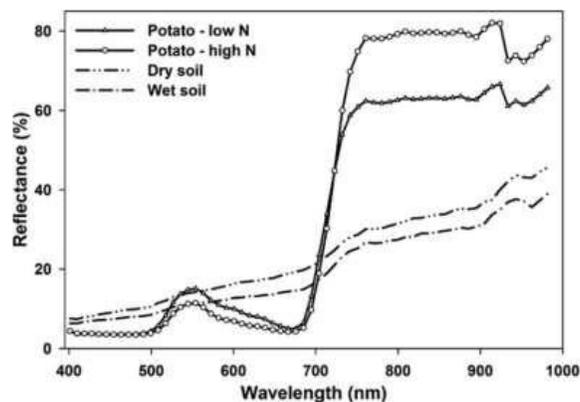
Los VANTs han sido estudiados y aplicados en el mundo desde hace varios años, sin embargo, su aplicación agrícola en México es prácticamente nueva y se requiere su difusión y discusión. Ante la necesidad de documentar la aplicación de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la agricultura de precisión, en este trabajo se presentan diferentes aplicaciones reportadas en la literatura para facilitar su difusión y discusión de este tipo de herramientas.

### **Bases teóricas**

El propósito de los sensores remotos es adquirir información de la superficie terrestre sin estar en contacto con ella, a través de la radiación electromagnética emitida (Chao y Chen, 2012). Como fue comentado por Mulla (2013), la agricultura del futuro es probable que demande mucha más información de alta resolución espacial y temporal que la que se utiliza ahora. Es posible ahora tener un manejo árbol por árbol mediante una colección masiva de datos y su análisis solamente puede realizarse con fines de investigación. Los avances en sensores remotos basados en el uso de satélites, VANTs, sensores portátiles, o robots móviles pueden estimar densidad de malezas, altura del cultivo, reflectancia del

follaje, grado de estrés, humedad del suelo y otras propiedades importantes para la toma de decisiones en el manejo de plagas, enfermedades, riego y fertilización de un cultivo. La aplicación de los sensores remotos en la agricultura está basada en la interacción de la radiación electromagnética con el suelo y el follaje. Este enfoque típicamente requiere de la estimación de la radiación reflejada, en lugar de la radiación transmitida.

Cada cultivo y suelo tiene su propia firma espectral, en consecuencia un suelo tiene una región espectral donde la reflectancia es más fuerte dependiendo de sus constituyentes (Ben-Dor, 2010). Diferentes mezclas de suelo desnudo y cobertura de cultivo son captadas por sensores remotos que obligan a usar métodos y equipos para diferenciar las zonas con suelo y cultivo. La Figura 1 muestra diferencias en la reflectancia de una parcela de papa con suelo seco y húmedo, y con presencia de cultivo con dosis de N alta y baja.



**Figura 1.** Variación en la reflectancia de una parcela de papa en función de su estado de desarrollo y fertilización (Ben-Dor, 2010).

Una limitación severa de las imágenes espectrales capturadas por satélites o aviones convencionales es la presencia de nubes (Moran, Inoue, & Barnes, 1997). Por lo que los sensores remotos instalados en plataformas cercanas a la superficie terrestre, como los VANTs, son menos afectados por este factor. Una diversidad de aplicaciones de los sensores remotos en la agricultura se ha reportado en la literatura. Estimación del rendimiento y biomasa (Shanahan et al., 2001), estrés hídrico y nutricional (Bastiaanssen, Molden, & Makin, 2000); grado de infestación de malezas (Lamb & Brown, 2001); insectos y enfermedades (Seelan, Laguette, Casady, & Seielstad, 2003), y las propiedades del suelo como materia orgánica, humedad, contenido de arcilla y pH por Christy (2008), así como salinidad por Corwin & Lesch (2003).

### Origen y aplicación general de los VANTs

En su forma más general, un VANT (o UAV, de Unmanned Aerial Vehicle) es un vehículo aéreo reusable controlado de forma remota, semi-autónomo, autónomo o con alguna combinación de estas capacidades (Eisenbeiss, 2009), que está acondicionada para colocar dispositivos auxiliares operados a distancia o pre-programados para diversos fines. El uso



de los VANTs se remonta al siglo XIX con la utilización de globos aerostáticos no piloteados para bombardear ciudades, como en la guerra de Austria contra Venecia en 1849 (Ronconi, Batista & Merola, 2014). Los VANTs modernos comienzan su historia el 4 de mayo de 1924, cuando Étienne Oehmichen construyó un helicóptero de cuatro rotores con despegue vertical. Posteriormente, la tecnología de radio permitió el surgimiento de objetivos aéreos teledirigidos, los cuales fueron llamados drones, término que se empleó por primera vez en 1936 (Ronconi, Batista & Merola, 2014).

Equipo VANT que consta de:

- Autopiloto. Un autopiloto es un sistema micro-electromecánico usado para guiar al VANT sin asistencia de un operador, consiste de hardware y software de soporte.
- Fuselaje (estructura). La estructura donde todos los dispositivos son montados.
- Carga útil. Es la carga del VANT que pueden ser cámaras de diferentes bandas espectrales u otros dispositivos de emisión como LIDAR.
- Subsistema de comunicación. La mayoría de los VANTs cuentan con más de un enlace inalámbrico. Por ejemplo, enlace RC y WiFi de enlace para compartir datos.

Las principales ventajas de los VANTs son:

- No se arriesgan vidas humanas ante el malfuncionamiento del vehículo.
- Útil para aquellas zonas de difícil acceso geográfico, orden público, volcanes, incendios, concentración de radioactividad, zonas de desastre como deslaves o inundaciones entre otros.
- Posibilidad de obtener fotografías aéreas de alta resolución, en tiempo real si se cuenta con el equipo y accesorios.
- No presenta problemas por condiciones atmosféricas (nubosidad) que impide la utilidad del uso de imágenes de satélite, ya que la altura de vuelo puede ser por debajo de las nubes.
- Bajo costo en la adquisición de imágenes aéreas.
- Adquisición de imágenes aéreas en “casi” cualquier momento.

Las principales desventajas de los VANTs son:

- Dependen de una estación de seguimiento en tierra.
- Vulnerabilidad a varios factores ambientales, aves, aviones, redes eléctricas, etc.

Limitaciones de peso de carga:

- Dificultad de integración en el espacio aéreo.
- Requiere de equipo auxiliar de bajo peso y volumen que generalmente son caros.
- Limitación en la duración y alcance de los vuelos por limitada capacidad de carga de equipo y baterías.
- Sujeto a regulación y normatividad de uso del espacio aéreo. En algunos países se limita su uso debido a la dificultad de obtener permisos de vuelo.



En el Cuadro 1 se hace una comparación entre las aeronaves tripuladas y no tripuladas para usos similares.

**Cuadro 1.** Beneficio de los vehículos no tripulados (VANTs) frente a los aviones tripulados (Díaz et al., 2014).

<b>Característica</b>	<b>VANT</b>	<b>Avión</b>
Permanencia/autonomía	Media	Baja
Velocidad	Baja	Alta
Alcance	Media	Baja
Penetración	Alta	Alta
Maniobrabilidad	Alta	Media
Precisión	Media	Baja
Capacidad de respuesta	Media	Alta
Previsibilidad	Media	Baja
Autonomía	Media	Baja
Restricción de uso	Alta	Media
Coste de adquisición	Alta	Media
Factor humano	Media	Alta
Multiusos	Alta	Alta

La dinámica de un VANT puede ser modelado usando las siguientes variables de estado:

- i. Posición. Longitud, latitud, y altura.
- ii. Velocidad en tres ejes (x,y,z).
- iii. Tasa de giro.
- iv. Aceleración (ax, ay, az).
- v. Velocidad en el aire, en el terreno, ángulo de ataque, ángulo de desplazamiento.

Como lo indicaron Chao y Chen (2012), una de las ventajas de los VANTs sobre el uso de aviones tripulados es el vuelo en bajas altitudes (menos de 100 m sobre la superficie terrestre). Sin embargo, el uso de VANT puede ser afectado por los siguientes factores:

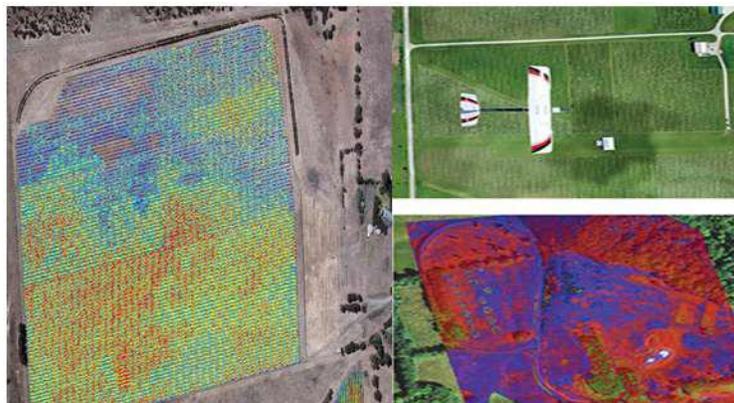
- i. *Viento.* Las ráfagas de viento son un problema en la estabilidad de vehículos aéreos de poca masa.
- ii. *Altura de vuelo.* Dependiendo del tipo de misión, un VANT debe volar a diferente altura para cumplir con su objetivo.
- iii. *Variación de la carga.* Un VANT debe ser capaz de soportar variaciones en su carga, sin afectar su estabilidad y funciones.
- iv. *Variaciones en la construcción.* Pueden existir variaciones en la construcción de los VANTs que afecten sus características.
- v. *Limitación de recursos.* Una de las limitaciones actuales de los VANTs son los recursos que pueden integrarse en sus misiones de vuelo como la resolución de sus sensores, poder computacional, limitado tamaño y peso de los sensores. Una restricción usual es el costo.

## VANTs y la agricultura de precisión

La agricultura de precisión consiste en efectuar la aplicación precisa y oportuna de los insumos agrícolas, en el momento adecuado, en el lugar preciso en un cultivo y con la dosis de insumos óptima (Gil, 2002), mediante el uso de la automatización (Leyva, Alves de Souza & Orlando, 2001) para su monitoreo y aplicación variable en función de la variabilidad espacial y temporal de los factores que limitan el desarrollo y productividad de los cultivos.

Un aspecto importante en la agricultura de precisión es la detección de zonas diferenciadas en función de parámetros o valores específicos, tales como vigor, madurez, o estrés. El uso de VANTs para estas tareas es crucial para definir zonas de intervención diferencial o con problemas de desarrollo. Entre los factores a determinar en aplicaciones agrícolas además de las características del vehículo aéreo, sin duda será el tipo de sensor y cámara que pueda ser montada. Existe una amplia gama de opciones de cámaras a usar dependiendo de lo que se pretenda captar. Esa diversidad contempla el peso del equipo, el tamaño, resolución, versatilidad, etc.

Un VANT se puede equipar con cámaras que pueden tomar imágenes multiespectrales en un rango específico del espectro solar. Por ejemplo el rango infrarrojo además del visual, que se pueden combinar para crear una imagen del cultivo que destaca las diferencias entre las plantas sanas y enfermas que el ojo humano no puede distinguir con facilidad. En la Figura 2 un Dron de la marca PrecisionHawk equipado con múltiples sensores para tomar imágenes de los campos capta la vegetación con luz casi infrarroja para mostrar los niveles de clorofila (Anderson, C. 2014).



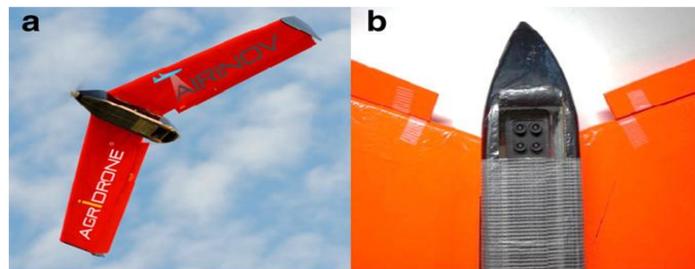
**Figura 2.** Imágenes multiespectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014).

El monitoreo aéreo puede revelar patrones que ponen al descubierto todo tipo de incidencias o anomalías nutricionales, hídricas o sanitarias.

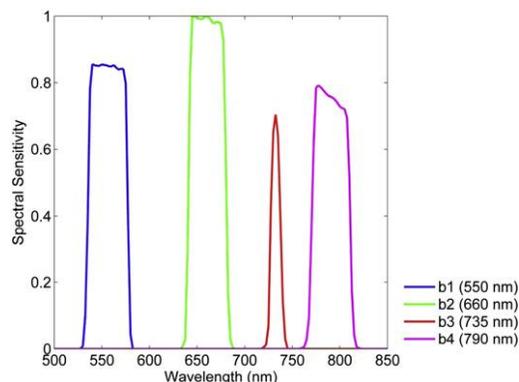
Un VANT puede monitorear las parcelas con alta frecuencia, cada semana, cada día o incluso cada hora. La combinación de estas imágenes para crear una serie temporal,

permite observar los cambios en la densidad y coloración foliar, revelando áreas problemáticas y las oportunidades que hay para gestionar, mejorar o corregir.

Un área de aplicación emergente del uso de VANTs con fines de caracterización de la variabilidad en el estado de los cultivos a una alta resolución y frecuencia es la obtención de índices de verdor de parcelas cultivadas. Varios índices de verdor han sido propuestos para monitorear a través de sensores remotos, a través de variables integrales asociadas al desarrollo y estado de cultivos. Verger *et al.* (2104) describió un algoritmo físicamente basado para estimar el índice de área verde (GAI por sus siglas en inglés) usando un VANT (Figura 3a) equipado con cuatro cámaras (Figura 3b), una para el espectro verde (550 nm), para el rojo (660 nm), borde rojo (735 nm) e infrarrojo (790 nm). La sensibilidad espectral de las cuatro bandas asociadas a las cámaras instaladas en el VANT se presenta en la Figura 4. Los resultados obtenidos del estudio indican una muy buena aproximación de los valores del GAI obtenidos con el VANT con respecto a estimaciones terrestres.



**Figura 3.** a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas (Verger *et al.*, 2104).



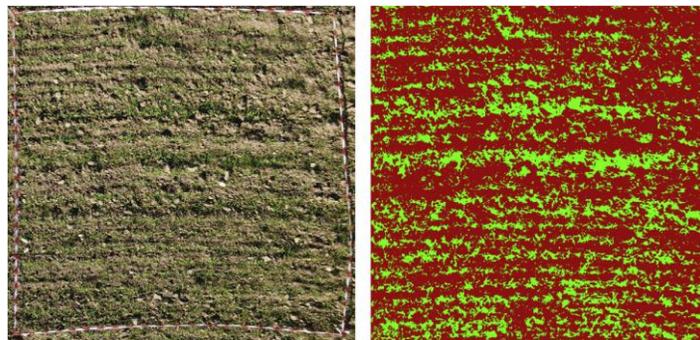
**Figura 4.1** Sensitividad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado (Verger *et al.*, 2104).

Uno de los problemas de las plataformas aéreas tradicionales como aviones y satélites es su baja resolución espacial y temporal. Torres-Sánchez *et al.* (2014) usaron un VANT (Figura 5) equipado con una cámara comercial (espectro visible) para toma de imágenes de alta resolución para detectar el grado de infestación de malas hierbas en una parcela de trigo en sus etapas fenológicas iniciales. Las imágenes se utilizaron para obtener seis índices de vegetación espectral (CIVE, ExG, ExGR, Woebbecke Index, NGRDI, VEG) y dos combinaciones de estos índices para estudiar la influencia de la altura de vuelo (30 y 60 m) y días después de siembra (35 a 75 días) para estimar la fracción de cobertura vegetal. Los

resultados indicaron que los índices ExG y VEG fueron los mejores para estimar la fracción de cobertura vegetal para una altura de 60 m. Lo anterior muestra que las imágenes obtenidas con VANTs pueden ser útiles para control de malas hierbas que requieren de algoritmos precisos de clasificación de cultivo-malas hierbas para generación de mapas precisos de fracción vegetal (Figura 6).



**Figura 5.** Microdron MD4-1000 volando sobre la zona de estudio (Torres-Sánchez *et al.*, 2014).



**Figura 6.** Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen después del proceso de clasificación de vegetación Torres-Sánchez *et al.* (2014).

La aplicación de VANTs con fines de estimación del índice de área foliar ha sido reportado por Córcoles *et al.* (2013) para una parcela comercial de cebolla regada por pivote central. Las fotografías fueron tomadas con un cuadricóptero y procesadas con un software para estimar la cobertura de follaje. La relación lineal entre CC y LAI tuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.837.

Los VANTs se han usado en el monitoreo remoto usando imágenes áreas espectrales. Imágenes aéreas de alta resolución Rojo-Verde-Azul (RGB por siglas en inglés) han sido procesadas para definir el periodo de cosechas en vid (Johnson *et al.*, 2003) como se muestra en la Figura 7. El uso de VANTs también ha sido reportado para detectar la maduración del café (Johnson, *et al.*, 2004).

Fernández-Pacheco *et al.* (2014) estimaron el coeficiente de cultivo (Kc) de la lechuga en función del porcentaje de cobertura (PGC) obtenido de fotografías digitales. En la Figura 8 se presentan los diferentes pasos usados para validar el modelo propuesto. Con la ayuda

de una estación tipo relación Bowen y una estación meteorológica se obtuvieron los valores de la evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tr}$ ) y de la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) para así obtener experimentalmente el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Se obtuvo una relación para estimar la altura ( $h$ ) en función de PGC. Finalizando con la derivación de una relación para estimar  $K_c$  en función de PGC. La Figura 9 muestra una serie de imágenes sin y después de procesamiento con los valores estimados de ( $K_c$  y  $h$ ) con el procesamiento. Este método tiene un gran potencial de ser aplicado usando un VANT para la obtención de imágenes digitales.



Figura 7. VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson et al., 2003).

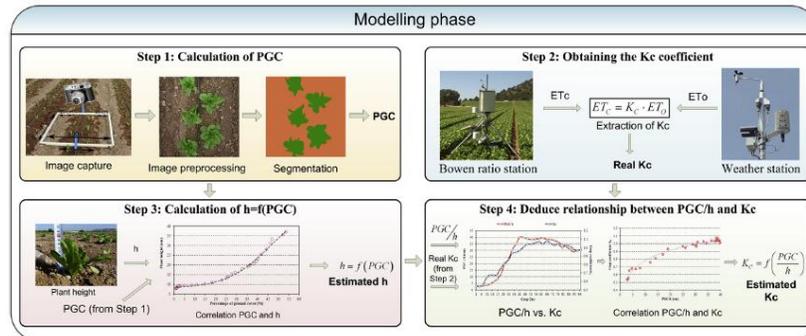
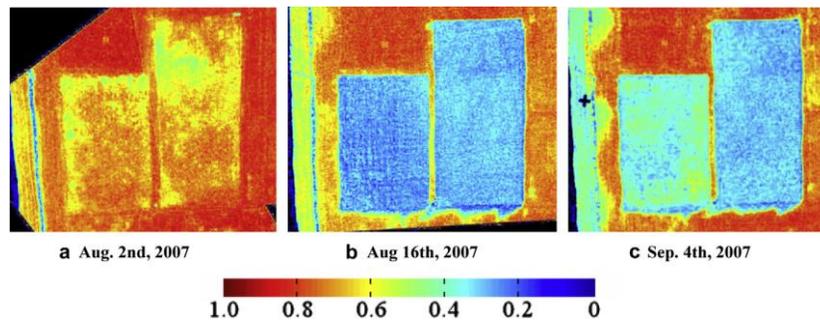


Figura 8. Etapas del estudio para calibrar el modelo para estimar el  $K_c$  (Fernández-Pacheco et al., 2014).



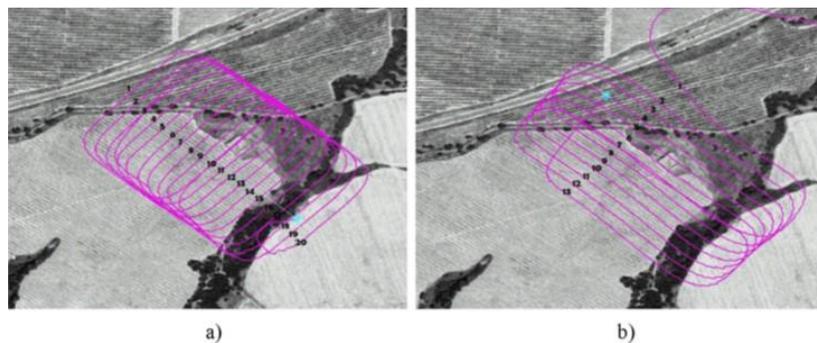
Figura 9. Resultados obtenidos ( $K_c$  y  $h$ ) con el procesamiento de imágenes (Fernández-Pacheco et al., 2014).

Uno de los usos más recurrentes de los VANTS es el seguimiento del estado de los cultivos. Xiang y Lei (2011) mostraron la Figura 10, imagen en pseudocolor, para indicar la variación del índice de verdor NDVI en tres fechas que contrastan el manejo del cultivo de pasto. El color rojo representa el pasto con el mayor valor de NDVI asociado a un cultivo con gran follaje. La primera imagen fue tomada un día después de aplicar un herbicida en las dos parcelas internas. La segunda imagen muestra que el pasto de las dos parcelas ha sido prácticamente eliminado y solamente el suelo desnudo permanece. La parcela interna izquierda fue resembrada, como se muestra en la tercera imagen tomada 20 días después de siembra.

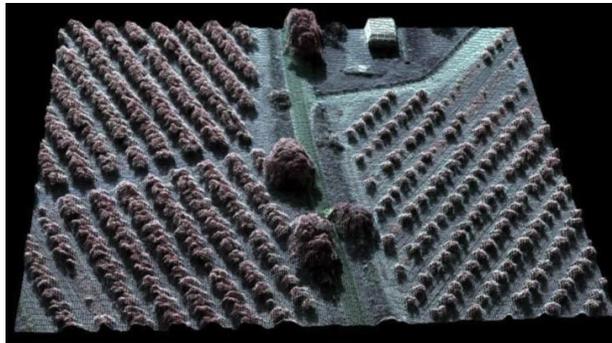


**Figura 10.** Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007 (Xiang y Lei, 2011).

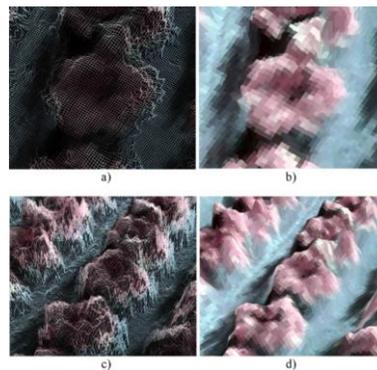
Uno de los retos actuales en la gestión de cultivos es la estimación de su altura a lo largo de su ciclo fenológico. Zarco-Tejada et al. (2014) realizaron un estudio para estimar la altura de un follaje discontinuo (huerta) usando un VANT equipado con una cámara de bajo costo. El VANT de ala fija usado tuvo una envergadura de 2 m con una plataforma de 5.8 kg de carga y una velocidad terrestre de 63 kmh<sup>-1</sup>. El VANT usado fue capaz de obtener imágenes en una zona de estudio de 158 ha en una sola misión de vuelo. Se definió la trayectoria de vuelo para generar gran traslape entre imágenes (Figura 11). Se obtuvieron imágenes de alta resolución VHR (5 m pixel<sup>-1</sup>) para generar orto-mosaicos y modelos digitales de superficie usando métodos automáticos de reconstrucción 3D (Figura 12). Los autores indican que la metodología usada fue robusta para estimar la altura del árbol y detalle de su corona (Figura 13).



**Figura 11.** Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes (Zarco-Tejada et al., 2014).

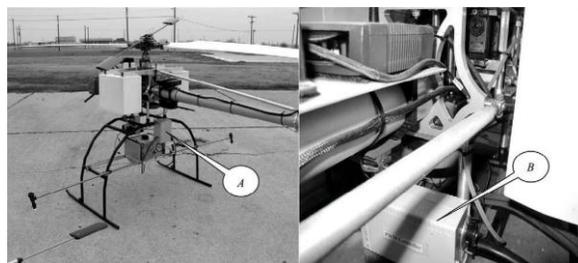


**Figura 12.** Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANTs (Zarco-Tejada et al., 2014).



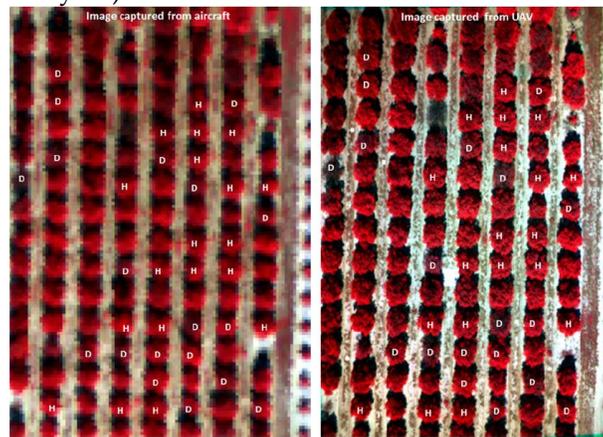
**Figura 13.** Foto-reconstrucción de un árbol obtenida de un VANT (a y c) así como obtenidas con ortomosaicos usando DSM (b y d) para detallar la corona de los árboles (Zarco-Tejada et al., 2014).

El control de insectos y enfermedades de los cultivos es un factor crucial en su manejo óptimo. La aplicación de agroquímicos es frecuentemente requerida en función de condiciones específicas, tal como etapa fenológica, condición ambiental, localización y dosis. Estas aplicaciones son realizadas típicamente con el uso de aspersoras portátiles, fumigadoras o equipo de aplicación aérea. Sin embargo, este tipo de aplicación es recomendable para grandes sistemas de producción, y puede ser ineficiente cuando las aplicaciones son realizadas en áreas pequeñas de una parcela. Zhu *et al.*, (2010) presentaron un VANT (Figura 14) equipado con un controlador PWM para aspersiones de agroquímicos de alta precisión, el cual mejoró la eficiencia en la aplicación para el control de plagas agrícolas.

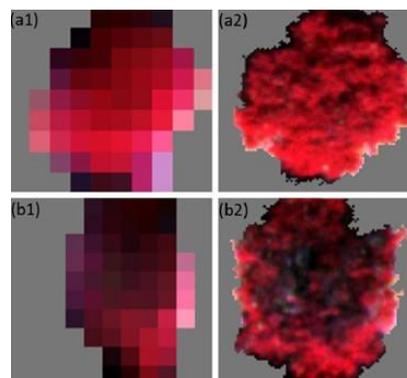


**Figura 14.** VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador (Zhu *et al.*, 2010).

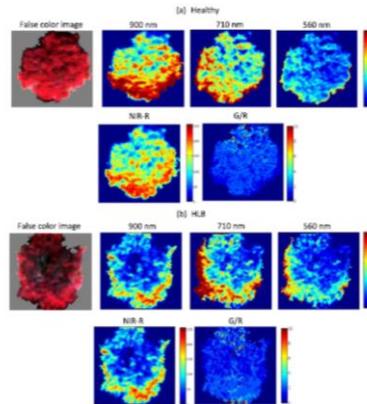
Otra aplicación de los VANTs ha sido orientada a detectar la presencia de la enfermedad Huanglongbing (HLB) o enverdecimiento de los cítricos, que es una de las enfermedades que afectan los cítricos en USA, México y varias regiones del mundo. Sin embargo, su control óptimo depende de su detección y diagnóstico oportuno. Garcia-Ruiz *et al.* (2013) presentaron una metodología exitosa para su detección remota basada en el uso de VANTs. Se usaron seis bandas espectrales (de 530 a 900 nm) y siete índices de vegetación derivados de una mezcla de bandas. Los valores de los índices NIR-R y reflectancia a 710 nm fueron estadísticamente diferentes para diferenciar entre árboles sanos e infectados. Imágenes espectrales de árboles de cítricos fueron adquiridas a dos alturas usando un plataforma basada en el uso de VANTs. Se usaron imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano y con un VANT para detectar árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) como se muestra en la Figura 15. Los resultados indican que las imágenes en falso color (R = 900 nm, G = 690 nm y B = 560 nm) provenientes del VANT generan mayor resolución y detalle de los árboles (Figuras 16 y 17).



**Figura 15.** Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) (Garcia-Ruiz *et al.*, 2013).



**Figura 16.** Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Imágenes izquierda obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT (Garcia-Ruiz *et al.*, 2013).



**Figura 17.** Imágenes adquiridas con VANTs en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados (García-Ruiz *et al.*, 2013).

### Aplicaciones potenciales de los VANTs

- Detección oportuna de problemas que puedan limitar el rendimiento potencial de los cultivos.
- Seguimiento a la aplicación de riegos usando detección de la variabilidad espacial del humedecimiento del suelo y estrés hídrico en las parcelas agrícolas, posiblemente relacionadas a la falta de nivelación adecuada o diferencias en tipos de suelo, además de malas prácticas de riego.
- Monitoreo temporal y espacial del grado de desarrollo de los cultivos, para detectar el momento adecuado para la cosecha y tiempos de actuación para aplicación de insumos o tareas, así como la necesidad de aplicaciones de fertilizantes en partes específicas de las parcelas, donde se detecta un desarrollo deficiente. Se puede realizar un ahorro de tiempo importante, ya que permite cubrir superficies mucho más grandes de lo posible si se tuviera que recorrer el campo a pie.
- Detección del estado fitosanitario de las plantas, ya que un mapa de colores contrastantes puede mostrar la variación espacial de cuanta luz solar absorbe el follaje de las plantas. Lo anterior se utiliza para la detección y monitoreo de plagas y enfermedades de los cultivos a nivel regional, así como el monitoreo temporal y de la extensión espacial de malezas (plantas invasoras) en las parcelas, para la planeación de prácticas de campo como aplicaciones de herbicidas o tratamientos orgánicos, o cultivación manual para eliminar dichas malezas.
- Supervisión del estado de funcionamiento de las redes de canales y regadíos, con sobrevuelos programados periódicamente, a lo largo de los canales, para detectar fugas o losas en mal estado de reparación, y para detectar aplicaciones de riegos no autorizadas.
- Creación de DEMs mediante fotogrametría y SIGs para cuencas agrícolas (todavía falta mejorar la precisión para eliminar errores).



## Conclusiones

La tecnología VANT está actualmente en pleno desarrollo y cada vez es más frecuente su aplicación en una diversidad de tareas de interés para la agricultura de precisión. Es una herramienta que será de uso cotidiano, en apoyo a actividades de planeación, supervisión y estimación de parámetros.

Los VANTs facilitan el monitoreo frecuente de variables que demanda la agricultura de precisión para ejecutar procesos eficientes con menor costo y tiempo y mayor resolución que los métodos convencionales.

El uso de VANTs en la agricultura de precisión mejora la toma de decisiones agrícolas a través la adquisición de imágenes y análisis de datos espacio-temporal de características/propiedades de una parcela cultivada.

El uso de VANTs tiene como principales problemas el alto coste inicial, demanda de preparación especializada de operadores; sin embargo se espera un abatimiento de los costos devenido a la tendencia sobre su uso cada vez más frecuente y gran competencia.

## Referencias

- Anderson, C. 2014. Relatively cheap drones with advanced sensors and imaging capabilities are giving farmers new ways to increase yields and reduce crop damage. *Technology Review*, MIT. URL: <http://www.technologyreview.com>.
- Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., & Makin, I. W. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*. 46:137-155.
- Ben-Dor, E. (2010). Characterization of soil properties using reflectance spectroscopy. Ch. 22. In P. S. Thenkabail, J. G. Lyon, & A. Huete (Eds.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation* (pp. 705). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Chao, H., & Chen, Y. (2012). *Remote sensing and actuation using unmanned vehicles*. Wiley. 198 pp. New Jersey, USA.
- Christy, C. D. 2008. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*. 61:10-19.
- Córcoles, J. I., J. F. Ortega, D. Hernández, M. A. Moreno. 2013. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems engineering*. 115:31-42
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95, 455-471.
- Diaz-Varela, R.A, P.J. Zarco-Tejada, V. Angileri, P. Loudjani. 2014. Automatic identification of agricultural terraces through object oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle. *Journal of Environmental Management* 134 (2014) 117-126.



- Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. Ph.D. Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, p. 235.
- Fernández-Pacheco, D. G., D. Escarabajal-Henarejos, A. Ruiz-Canales, J. Conesa, J. M. Molina-Martínez. 2014. A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems engineering*. 117:23-34.
- García-Ruiz, F., Sindhuja Sankaran, Joe Mari Maja, Won Suk Lee, Jesper Rasmussen, Reza Ehsani. 2013.
- Gil, E. (2002). "Situación actual y posibilidades de la agricultura de precisión". Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Johnson, L. F., S. R. Herwitz, B. M. Lobitz, S. E. Dunagan. 2004. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 20(6): 845-849
- Johnson. L.F., S. Herwitz, S E. Dunagana, B. Lobitza,b, D. Sullivan, R. Slyea. 2003. Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment*. November 2003.
- Lamb, D. W., Brown, R. B. 2001. Remote-sensing and mapping of weeds in crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 78:117-125.
- Leyva, R. L. Z., Alves de Souza, C. M. & Orlando, R. C. (2001). Agricultura de precisión. *Ciencias Técnicas agropecuarias*, X (3), pp. 7-11.
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M. 1997. Opportunities and limitations for imagebased remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*. 61:319-346.
- Mulla, D. J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. 114:358-371.
- Ronconi, G. B. A., Batista, T. J., & Merola, V. (2014). The utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for military action in foreign airspace. *UFRGSMUN/ UFRGS Model United Nations Journal*. v.2, 2014, p. 137-180.
- Seelan, S.K., Laguette, S., Casady, G.M. y Seielstad, G.A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88, 157-169.
- Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., et al. (2001). Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal*, 93, 583e589. doi: 10.2134/agronj2001.933583x
- Torres-Sánchez, J., J.M. Peña, A.I. de Castro, F. López-Granados. 2014. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103:104-113.
- Verger A., N. Vigneau, C. Chéron, J. Gilliot, A. Comar, F. Baret. 2014. Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*. 152:654-664.



- Xiang, H., & Lei, T. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*. 108:174-190. doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3Dphoto-reconstruction methods. *Europ. J. Agronomy* 55:89–99. doi: 10.1016/j.eja.2014.01.004
- Zhu, H., Lan, Y., Wu, W., W. Clint Hoffmann, Y. Huang, X. Xue, J. Lian, B. Fritz. 2010. Development of a PWM Precision Spraying Controller for Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Bionic Engineering*. 7:276–283.