

Uso de Vehículos Aéreos no tripulados (UAV) para la evaluación de la producción agraria

Francisca López-Granados

Instituto de Agricultura Sostenible-IAS/CSIC

Este trabajo se centra en la utilización de **Vehículos Aéreos no Tripulados** (en inglés *Unmanned Aerial Vehicles*: UAV) para el desarrollo de objetivos relacionados con la generación de mapas de diversas variables agronómicas para su aplicación en Agricultura de Precisión para el ahorro de insumos. Dado que el uso civil de los UAV tiene aún una trayectoria muy corta, las publicaciones de temática agrícola en las que son utilizados son hasta el momento muy escasas. Por ello, es relevante destacar que los tres trabajos que se mencionan en este artículo se han realizado tanto en cultivos herbáceos como en leñosos con una amplia distribución mundial y por Grupos de Investigación españoles adscritos al CSIC, uno de los cuales está dirigido por la autora de esta publicación.

Las investigaciones que se exponen a continuación muestran la idoneidad de las imágenes procedentes de UAV para discriminar y cartografiar con éxito parámetros agronómicos de alto impacto en la gestión agrícola. Los resultados logrados muestran su enorme potenciali-

dad para el diseño de estrategias de control de precisión de malas hierbas (en cultivos herbáceos) y de enfermedades (en olivar), así como de riego en viña y otros cultivos leñosos para contribuir a una gestión eficiente y localizada de los cultivos.

AGRICULTURA CONVENCIONAL Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La **Agricultura Convencional** es un sistema de producción en el que los insumos se aplican de forma uniforme en toda la superficie del campo, sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los factores involucrados en el manejo del cultivo. Su principal objetivo es la obtención de las máximas producciones en base de una alta tecnificación prestando nula o escasa atención al manejo localizado y la conservación de los recursos naturales sobre los que se sustenta. Ello conlleva un gasto innecesario y un aumento potencial del deterioro medioambiental por agotamiento de la fertilidad o del agua disponible para riego, y por contaminación de suelos y acuíferos, entre otros problemas. A su vez, generalmente las zonas menos productivas se perpetúan ya que todo el campo de cultivo se

¹ <http://toasprojectwordpress.com>; <http://www.ias.csic.es/precisionmalherbologia/>

maneja de igual modo y no se analizan los motivos por los que el rendimiento en esas zonas es menor. El agricultor que sigue esta forma de agricultura asume sin poner ningún remedio la imposibilidad de mejorar los rendimientos de sus cultivos y de alcanzar los niveles óptimos de producción.

Con el fin de evitar riesgos potenciales, la Comisión Europea publicó el Reglamento (CE) 1107/2009 para la *Comercialización de Productos Fitosanitarios* (herbicidas, fungicidas, insecticidas), dentro del cual se ha definido la Directiva 2009/128/CE para el *Uso Sostenible de Plaguicidas* que recoge legislación específica para su utilización. En ella se destacan como elementos clave “*el fomento del bajo consumo (reducción de las aplicaciones) y la utilización de dosis adecuadas de fitosanitarios*”. Esta Directiva ha sido traspuesta al Real Decreto 1311/2012 (BOE nº 223) en el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios.

Como contrapunto a la Agricultura Convencional, surgió hace ya más una década la **Agricultura de Precisión** o agricultura basada en manejo localizado (en inglés *Precision Agriculture* o *Site-Specific Management*). Esta tecnología agrícola está en plena consonancia con los reglamentos mencionados en el párrafo anterior ya que su finalidad radica en que las explotaciones agrícolas se gestionen dependiendo de las necesidades reales de cada zona del cultivo. Es decir, se persigue solucionar el problema allí donde se localiza y con ello reducir costes y tratamientos innecesarios, optimizar el rendimiento, aumentar la rentabilidad y obtener beneficios económicos y medioambientales. Junto con los fitosanitarios, entre los factores que se pueden manejar de forma localizada cabe destacar por su relevancia en la producción agraria las aplicaciones de fertilizantes así como el riego. El fundamento agronómico de esta tecnología se basa en que cada área del campo puede gestionarse en función de sus peculiaridades, es decir, las decisiones acerca de cómo abordar las tareas agrícolas se toman conociendo la localización exacta de

En la Agricultura Convencional los insumos se aplican de forma uniforme en toda la superficie del campo, sin tener en cuenta la variabilidad espacial de los factores involucrados en el manejo del cultivo. Su principal objetivo es la obtención de las máximas producciones en base de una alta tecnificación prestando nula o escasa atención al manejo localizado y la conservación de los recursos naturales sobre los que se sustenta. Ello conlleva un gasto innecesario y un aumento potencial del deterioro medioambiental por agotamiento de la fertilidad o del agua disponible para riego, y por contaminación de suelos y acuíferos, entre otros problemas

las zonas en las que hay o no infestaciones de malas hierbas, en las que existe o no necesidad de aumentar determinado fertilizante, o en las que se requiere implementar más o menos riego, por mencionar sólo algunos de los parámetros implicados en el manejo de los cultivos.

En términos generales se puede considerar que la gestión localizada de un cultivo está definida por un ciclo de 4 fases:

- 1) **monitorización**, es decir, detección y mapeo de las variables que interesan en cada momento (ej.: infestaciones de las malas hierbas o presencia de zonas infectadas por hongos);

a)



b)



c)



Figura 1. a) y b) Malas hierbas distribuidas únicamente en determinadas zonas del campo de cultivo; c) agricultor aplicando herbicida de forma general aunque no haya emergencia de malas hierbas.

- 2) **toma de decisiones** y elaboración del mapa de tratamientos en función del mapa obtenido de la variable de interés (fase denominada también **planificación de la actuación**: qué aplicar, cómo, cuándo y dónde);
- 3) **actuación** en campo o ejecución del manejo localizado que se ha decidido;
- 4) **evaluación** de la rentabilidad (económica y medioambiental) de las operaciones realizadas en el cultivo para programar acciones el año siguiente.

Una de las herramientas más eficaces para cartografiar las diferentes variables que afectan a un cultivo es la tecnología basada en **Teledetección**. En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos en investigación por parte de las empresas del sector tanto para la obtención de mapas georreferenciados de las áreas afectadas por determinado problema como para desarrollar equipos de aplicación que son capaces de leer dichos mapas y ac-

tuar en consecuencia en el momento oportuno.

TELEDETECCIÓN: DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE A LAS DE UAV

La tecnología basada en la Teledetección se ha mostrado útil y eficaz para abordar la cartografía de numerosas variables agronómicas. Su fundamento consiste en obtener información sobre un objeto, área o fenómeno sin estar en contacto con él. Para ello, un sensor que está alojado en un satélite o en un avión genera imágenes del elemento de interés que permiten su estudio. La base de la teledetección reside en que cada cuerpo presenta un patrón de energía reflejada propio y diferente, conocido como firma espectral, que lo distingue del resto de materiales.

Las imágenes remotas se caracterizan fundamentalmente por su resolución, ya que de esta depende la cantidad y calidad de la informa-

Como contrapunto a la Agricultura Convencional, surgió hace ya más una década la Agricultura de Precisión o agricultura basada en manejo localizado. Esta tecnología agrícola tiene como finalidad que las explotaciones agrícolas se gestionen dependiendo de las necesidades reales de cada zona del cultivo. Es decir, se persigue solucionar el problema allí donde se localiza y con ello reducir costes y tratamientos innecesarios, optimizar el rendimiento, aumentar la rentabilidad y obtener beneficios económicos y medioambientales

ción registrada. La **resolución** de un sensor es, en términos generales, su habilidad para discriminar información de detalle relativa al objetivo del estudio y al entorno geográfico que se está abordando. En la detección de variables agronómicas se destacan principalmente dos tipos de resolución: **espacial** y **espectral**. La *resolución espectral* se refiere al número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, pudiéndose distinguir entre imágenes multispectrales, que generalmente capturan información entre 3 y 7 bandas de unos 100 nm de ancho, e hiperespectrales, que adquieren información en varias decenas o centenas de bandas estrechas con longitudes de onda inferior a 5 nm de ancho. La *resolución espacial*, indica las dimensiones del objeto más pequeño que puede ser detectado. Hengl (2006) determinó que son necesarios al menos 4 píxeles para detectar el objeto más pequeño. Por tanto, si por ejemplo el objeto más pequeño es un rodal de malas hierbas de 1 m² (1 m x 1 m), deberíamos utilizar una imagen con una resolución $\leq 0,5$ m.

Las imágenes aéreas procedentes de *aviones tripulados convencionales* pueden alcanzar resoluciones submétricas (ej.: unos 25 cm píxel) que han permitido mapear las infestaciones de diversas malas hierbas en estado fenológico de floración en cultivos de girasol (De Castro *et al.*, 2012; Peña-Barragán *et al.*, 2007 y 2010) o en trigo (López-Granados *et al.*, 2006). Por otro lado, las imágenes multispectrales del satélite con mayor resolución

espacial disponibles son las de los satélites *Geo-Eye* (1,64 m píxel) y *QuickBird* (2,4 m píxel). De Castro *et al.* (2013) han utilizado con éxito las imágenes de satélite QuickBird para cartografiar a escala comarcal las infestaciones de malas hierbas crucíferas en cultivos de trigo concluyendo unos ahorros herbicidas en torno al 60%. Si por el contrario, se pretenden discriminar las infestaciones de malas hierbas en **estados fenológicos tempranos**, es decir, cuando presentan entre 2-6 pares de hojas (dependiendo de la especie) las resoluciones espaciales requeridas son mucho mayores (1-5 cm/píxel). Como se ha indicado, actualmente no existen satélites ni aviones tripulados convencionales que ofrezcan imágenes con este tipo de resolución espacial, por lo que para esta clase de objetivos habrá que utilizar imágenes procedentes de UAV. En López-Granados (2011) se realiza una revisión exhaustiva de las plataformas actualmente disponibles para fines agrícolas.

De forma similar, la necesidad de una alta resolución espacial también ocurre cuando se trata de cartografiar el estado hídrico de árboles frutales mediante imágenes con rango espectral térmico (8-12 μ m) en las que hay que identificar las coronas puras de un gran número de árboles y separar los píxeles de vegetación de los de suelo desnudo. González-Dugo *et al.* (2013) revisaron las diferentes plataformas para alcanzar este objetivo y concluyeron que la información térmica junto con una elevada resolución espacial actualmente sólo se consi-

que si se utilizan cámaras que operan en dicho rango instaladas en UAV.

IMÁGENES PROCEDENTES DE UAV Y SUS VENTAJAS EN AGRICULTURA

En sintonía con lo expuesto anteriormente, los UAV (Figura 2) ofrecen un enorme potencial en agricultura debido a que:

- 1) trabajan con total autonomía e incluso en días nublados, por lo que se pueden programar los vuelos a demanda y con una gran flexibilidad en momentos críticos del cultivo;
- 2) pueden llevar a bordo sensores con diferente tipo de rango espectral dependiendo del objetivo que se persiga; y
- 3) generan imágenes con una elevada resolución espacial con tamaño de pixel desde varios cm a pocos mm dependiendo del sensor y de la altura del vuelo, todo ello en función de las necesidades del usuario y la finalidad del estudio.

Estos tres factores son muy limitantes en otro tipo de plataformas comerciales ya que además hay que sumar que las imágenes de satélite o las provenientes de aviones convencionales se deben ordenar con bastante antelación. Ello puede ocasionar problemas que se agudizan

Figura 2. Ejemplo de UAV equipado con el sensor en rango visible volando una parcela de trigo.



por la naturaleza cambiante del pronóstico meteorológico y por la particularidad propia del seguimiento de los cultivos ya que los estados fenológicos cambian con el tiempo y son con frecuencia determinantes al abordar con éxito un estudio basado en teledetección. Existe aún escasa bibliografía de la utilización de UAV para aplicaciones en agricultura. No obstante, recientemente Huang *et al.* (2013), Yue *et al.* (2013) y Zang & Kovacs (2012) han revisado los diferentes diseños de plataformas y de sensores, así como la estandarización de los procedimientos de análisis y de extracción de información de las imágenes que ofrecen.

OBJETIVO

Como ejemplo de los avances realizados en los últimos años con técnicas de teledetección fundamentadas en la utilización de UAV, el objetivo de este artículo es describir varios trabajos sobre tres de los principales problemas que pueden afectar al rendimiento de los cultivos en diferentes escenarios agrícolas: 1) detección de áreas infestadas por malas hierbas en cultivos herbáceos; 2) detección de zonas que necesitan mayor o menor riego en frutales; y 3) detección de zonas infectadas por hongos en olivar. Todos estos trabajos persiguen la cartografía de dichas variables para una posterior gestión localizada de fitosanitarios y riego. Las investigaciones que se presentan de forma resumida se pueden considerar representativas de cómo abordar un estudio agronómico utilizando UAV para objetivos de gran interés agro-económico y científico. Se detallan los modelos de sensores utilizados ya que esta información es muy relevante en este tipo de estudios dada la amplia disponibilidad de que hay en el mercado.

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV): APLICACIONES EN MALHERBOLOGÍA Y TRATAMIENTOS LOCALIZADOS DE HERBICIDAS

Para realizar tratamientos localizados de herbicidas (en inglés **SSWM**: *Site-Specific Weed*

Management) sólo en las zonas infestadas por malas hierbas y poder adaptar la dosis y la clase de herbicida al tipo de malas hierbas presentes es necesario detectar y cartografiar dichas emergencias. En la mayor parte de cultivos, se realizan tratamientos de post-emergencia en fases tempranas, justo cuando malas hierbas y cultivo están en estado fenológico de plántula (por ej.: hasta 2-6 hojas verdaderas dependiendo de la especie). Si ese tipo de tratamiento se pretende que sea localizado según composición y densidad de malas hierbas (monocotiledóneas vs dicotiledóneas, malas hierbas resistentes, o malas hierbas de difícil control), es necesaria la discriminación de las plántulas de malas hierbas de las del cultivo teniendo en cuenta que en dicho estado de crecimiento tienen firmas espectrales y apariencia muy similares (Figura 3).

El Grupo de investigación dirigido por Francisca López-Granados ha utilizado un UAV (<http://toasproject.wordpress.com>; <http://www.ias.csic.es/precisionmalherbologia>) de despegue y aterrizaje vertical, modelo quadrotor md4-1000 que, dependiendo del objetivo perseguido, puede estar equipado con sensores en rango visible o visible e infrarrojo cercano (Torres-Sánchez *et al.*, 2013) (Figura 4 a). En este caso se pretendía mapear malas hierbas en maíz en fase temprana con el fin último de optimizar el uso de herbicidas. Este cultivo se eligió en base a:

- 1) su elevado impacto agro-económico en España y otros países;

- 2) se debe tratar en varias ocasiones con herbicidas en post-emergencia (dado que se riega semanalmente); y
- 3) la posible extrapolación de los resultados a otros cultivos igualmente importantes que se siembran en hilera ancha.

A bordo del UAV se instaló una cámara multispectral (modelo TetraCam mini-MCA, resolución de 1,3 megapíxeles) dotada de seis canales que abarcaban del rango visible (Rojo, R: 0.4-0.5 μm ; Verde, G: 0.5-0.6 μm ; Azul, B: 0.6-0.7 μm) al infrarrojo cercano (NIR: 0.7-0.9 μm). Las imágenes fueron mosaicadas siguiendo la metodología descrita en Gómez-Candón *et al.* (2013). Posteriormente fueron analizadas aplicando un método completamente automático de análisis de imágenes mediante técnicas basadas en objetos (OBIA, por las siglas en inglés de *Object-based Image Analysis*). La utilización de técnicas OBIA se ha potenciado recientemente por ser más precisas que las basadas sólo en píxeles ya que tienen la ventaja de incorporar en los algoritmos de clasificación, además de la información espectral, la posición de las malas hierbas con respecto a las líneas de cultivo y otros parámetros adicionales como la forma y tamaño de las plantas o parámetros de textura de los objetos presentes en la imagen (Castillejo-González *et al.*, 2009; Peña-Barragán *et al.*, 2011).

El algoritmo de clasificación desarrollado por Peña *et al.* (2013) para la cartografía de malas hierbas en fase temprana en maíz se basó en



Figura 3. Vista general de parcelas de girasol y maíz en época temprana de desarrollo con infestaciones de malas hierbas: a) *Convolvulus arvensis* (correhuela), b) *Sorghum halepense* (sorgo).

a)



b)

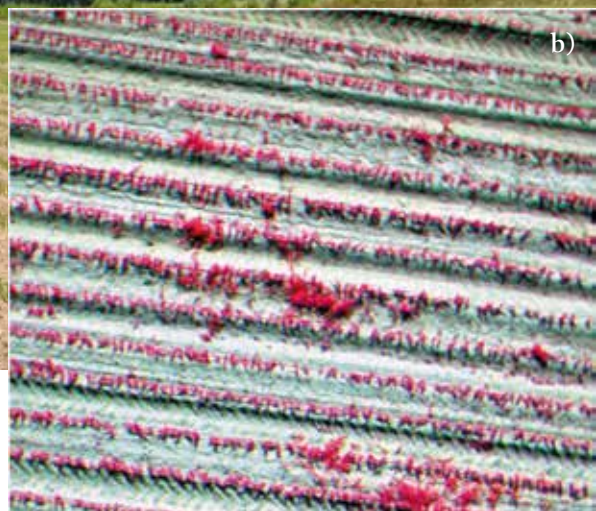


Figura 4. a) UAV equipado con sensor multiespectral volando una parcela de maíz infestada de rodales de malas hierbas en época temprana; b) Detalle de la imagen formada por las bandas Verde, Rojo e Infrarrojo Cercano sobre la parcela de maíz estudiada. Se pueden observar las líneas de cultivo y la presencia de malas hierbas entre las líneas.

que toda la vegetación que emerge fuera de la hilera de siembra es un rodal de malas hierbas. El procedimiento de análisis de imagen consta de las siguientes fases:

- 1) Alineación de cada banda espectral e importación de las imágenes al programa de análisis;
- 2) Segmentación de la imagen en objetos formados por vegetación (cultivo y mala hierba) y suelo desnudo;
- 3) Discriminación de los objetos de vegetación mediante umbrales del índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, por sus siglas en inglés);
- 4) Cálculo de la orientación de las líneas de cultivo a partir de la dirección principal media de todos los objetos presentes en la imagen;
- 5) Clasificación de las líneas de cultivo mediante los objetos de vegetación de forma alargada que siguen la orientación del cultivo;
- 6) Discriminación de malas hierbas, cultivo y suelo desnudo en base a la información espectral, morfológica y de posición con respecto a las líneas de cultivo;
- 7) Segmentación de la imagen formando un estructura de malla adaptada a las dimensiones de la maquinaria de tratamiento (p.ej., separación de boquillas de aplicación de herbicida);
- 8) Generación de un mapa de cobertura de malas hierbas basado en la superficie infestada en cada unidad de malla; y
- 9) Exportación de resultados en formatos de imagen y de tabla para su posterior análisis e integración en la maquinaria de tratamiento.

El algoritmo de análisis de imagen desarrollado se evaluó comparando los resultados de las clasificaciones obtenidas (porcentaje de infestación de malas hierbas) con una serie de datos verdad-terreno adquiridos el mismo día en que se tomaron las imágenes remotas. El muestreo de campo consistió en distribuir regularmente por toda la parcela de maíz una serie de marcos de aluminio blanco de 1m × 1m, que fueron georreferenciados con GPS para su posterior localización en las imágenes y en los que se determinó la infestación de malas hierbas.

El procedimiento desarrollado clasificó el 100% de las líneas de cultivo presentes y las zonas sin presencia de malas hierbas y las zonas infestadas en tres categorías: 1) Baja (<5%); 2) Moderada (5-20%); y 3) Alta (>20%). Las zonas que requerían tratamiento herbicida eran únicamente las que superan el umbral económico de tratamiento que en este cultivo estaban constituidas por moderada y alta infestación. El número de categorías consideradas y los umbrales indicados son configurables por el usuario y adaptables a los requerimientos de la maquinaria o sistema de tratamiento que se utilice para el control localizado de las malas hierbas. La exactitud del método de clasificación y la superficie ocupada por cada categoría de cobertura de infestación se indican en la Tabla 1.

Según los resultados, el 70% del campo estudiado no necesitaba tratamiento de herbicidas en post-emergencia y por lo tanto solamente el 30% sí presentaba infestación de malas hierbas y requería tratamiento herbicida. Una vez determinada la superficie del campo a tratar, en la Figura 5 se muestran las zonas en las que se

podría llevar a cabo un tratamiento localizado de herbicidas.

Además de lo anterior, este procedimiento genera información alfanumérica y tabulada de la parcela completa, y calcula las coordenadas y porcentaje de infestación de cada unidad de la malla para la toma de decisiones del control localizado de las malas hierbas emergidas. Actualmente se están realizando estudios en otros cultivos estando muy avanzados en trigo (Torres-Sánchez *et al.*, 2013) y en fase de inicio en girasol.

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV): APLICACIONES EN LA DETERMINACIÓN DE ESTADO HÍDRICO PARA RIEGO LOCALIZADO

El estrés hídrico provoca en los cultivos el cierre estomático cuyo principal efecto es la disminución de la tasa de transpiración lo que finalmente provoca un incremento de la temperatura de la hoja. Este aumento de temperatura puede monitorizarse mediante imágenes procedentes de UAV con información en el rango espectral del térmico. El trabajo que se presenta en este apartado ha sido desarrollado por Bellvert *et al.* (2013) para mapear el estado hídrico en viñedo utilizando un UAV e imágenes térmicas.

El manejo de riego en viticultura se programa según modelos de balance hídrico que no tienen en cuenta la heterogeneidad espacial de los viñedos lo que limita el manejo eficiente del agua de riego. Ello implica que se riega de forma uniforme todo el campo ocasionando aplicaciones excesivas en unas zonas y escasas en otras. Dado que el aporte de agua tiene in-

Tabla 1. Exactitud de clasificación y superficie ocupada para cada categoría de cobertura de malas hierbas considerada

Cobertura de mala hierba	Exactitud de la clasificación	Superficie ocupada
Sin mala hierba	98%	23%, zona sin tratar
Baja (< 5%)	89%	47%, zona sin tratar
Moderada (5-20%)	84%	23%, zona a tratar
Alta (> 20%)	89%	7%, zona a tratar

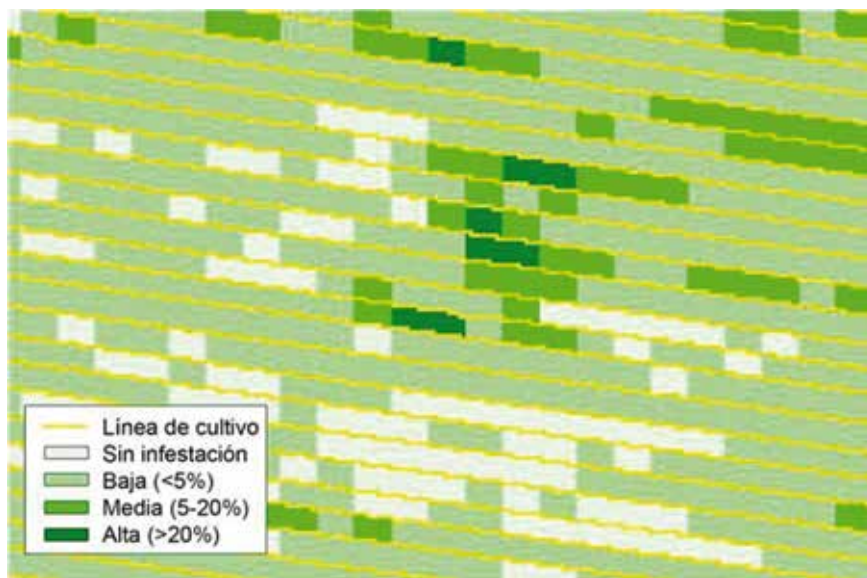


Figura 5. Mapa obtenido de las infestaciones de las malas hierbas. Sólo se tendrían que tratar con herbicidas las zonas de media y alta infestación.

fluencia en la composición química de la uva y por consiguiente en la calidad del mosto y del vino, los autores se plantearon obtener una cartografía que informara de la variabilidad espacial del estado hídrico de cada cepa con el fin de programar el riego de forma racionalizada. Ello tendría relevantes implicaciones en numerosas zonas ya que es el cultivo leñoso con más amplia distribución mundial.

La determinación del estado hídrico se realizó en dos campañas agrícolas en un viñedo situado en Raimat (Lérida) mediante imágenes procedentes de un UAV de ala fija de 5 m equipado con un sensor (modelo Miricle 307K) que genera imágenes térmicas así como con el cálculo del Crop Water Stress Index (CWSI, Idso *et al.*, 1981) y su relación con el potencial hídrico foliar (Ψ_h).

El CWSI requiere medir:

- 1) la temperatura de la hoja;
- 2) la temperatura del aire; y
- 3) el déficit de presión de vapor, mientras que el Ψ_h se mide con una cámara de presión Scholander.

Con el fin de determinar la temperatura de la cubierta vegetativa de las cepas bajo distintos

estados hídricos, en una zona del viñedo se realizaron dos tratamientos de riego: 1) cepas control: 100% de sus necesidades hídricas; y 2) cepas estresadas: se regaron únicamente cuando el Ψ_h a mediodía fue menor de un intervalo de -1.2 a -1.6 MPa según el año del ensayo. Asimismo, se instalaron cuatro sensores de tem-

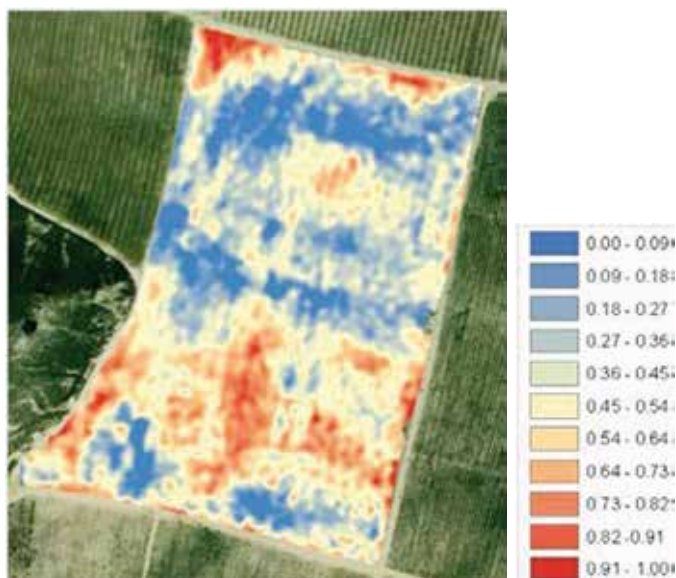
Dado que el aporte de agua tiene influencia en la composición química de la uva y por consiguiente en la calidad del mosto y del vino, los autores se plantearon obtener una cartografía que informara de la variabilidad espacial del estado hídrico de cada cepa con el fin de programar el riego de forma racionalizada. Ello tendría relevantes implicaciones en numerosas zonas ya que es el cultivo leñoso con más amplia distribución mundial

peratura infrarrojo (modelo PC151LT-0, Pyrocouple series) de forma que se colocaron dos en cada tratamiento de riego a 1.5 m de la cubierta vegetal de las cepas. Los vuelos se realizaron a las 9.30, 11.30 y 14.30 (hora local) a una altura de 200 m sobre el suelo generándose imágenes de 30 cm-píxel. Esta resolución espacial permitió obtener píxeles puros de vegetación con el fin de analizar con precisión cada cepa. Posteriormente, las imágenes se procesaron realizando un remuestreo del tamaño del píxel hasta obtener píxeles de 60, 80, 100, 120, 150 y 200 cm para determinar la resolución espacial óptima para detectar el estado hídrico.

Los resultados de la relación de CWSI y Ψ_h muestran que los coeficientes de determinación R^2 obtenidos en los vuelos de las 9.30 h en los diferentes tamaños de píxeles generados fueron no significativos (siempre menores a 0.46). Sin embargo, en los vuelos de las 14.30 h (12.30 hora solar) cuando el tamaño de píxel fue de 30 cm, R^2 fue más elevado (0.71). Ello indica que el momento del día más adecuado para determinar el estado hídrico mediante imágenes térmicas es alrededor del mediodía. Sin embargo, cuando el tamaño del píxel aumenta de 30 a 60 cm, en la relación entre CWSI y Ψ_h se obtuvo un $R^2 = 0.38$ que fue significativamente menor que el alcanzado con imágenes de píxel = 30 cm.

Por lo tanto, para discriminar el estado hídrico del viñedo es necesario utilizar imágenes generen resoluciones espaciales elevadas. A su vez, con los cálculos de CWSI se puede elaborar mapas de CWSI en cada cepa o por sectores de riego. Si estos mapas se obtienen semanalmente, se puede contar con una herramienta altamente precisa para diferenciar subzonas en función de su estado hídrico que originarán cosechas de elevada calidad ya que el riego se realizará según se establezca de acuerdo con los mapas.

Trabajos similares se han realizado por González-Dugo *et al.* (2013) utilizando imágenes procedentes de UAV equipado con sensor térmico para obtener mapas del estado hídrico de plan-



taciones de varios tipos de frutales de hueso y de cítricos. Por otra parte, Zarco *et al.* (2009) trabajaron en olivar utilizando UAV y sensores en rango térmico y visible-infrarrojo cercano para detectar la fluorescencia clorofílica con el fin de estudiar el funcionamiento fotosintético y su potencial para su aplicación en detección de estrés hídrico.

Figura 6. Mapa de Crop Water Stress Index (CWSI: escala de mínimo y máximo) obtenido en un viñedo por Bellver *et al.* (2013).

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV): APLICACIONES EN PATOLOGÍA VEGETAL PARA ESTRATEGIAS DE CONTROL LOCALIZADO

En este apartado se expone el trabajo realizado por Calderón *et al.* (2013) cuyo objetivo fue detectar los cambios fisiológicos que la enfermedad de la Verticilosis causa en el olivar con el fin de obtener imágenes de los daños ocasionados en estados tempranos. Con esta información se podrían programar medidas de control ya que éstas tienen efecto cuando los primeros olivos están afectados y la enfermedad está aún localizada en focos y no afecta al conjunto de la parcela. La Verticilosis del olivar está causada por el hongo del suelo *Verticilium dahliae* y está considerado como el factor más limitante para el cultivo del olivar (Jiménez-Díaz *et al.*, 2012). Su modo de infección empieza por la raíz y después coloniza el sistema vascular pro-

Mediante UAV se pueden detectar los cambios fisiológicos que la enfermedad de la Verticilosis causa en el olivar con el fin de obtener imágenes de los daños ocasionados en estados tempranos. Con esta información se podrían programar medidas de control ya que éstas tienen efecto cuando los primeros olivos están afectados y la enfermedad está aún localizada en focos y no afecta al conjunto de la parcela

duciendo un bloqueo del flujo de agua lo que finalmente induce estrés hídrico en el olivo. Ello implica que se produce cierre estomático que disminuye la evapotranspiración e incrementa la temperatura de la hoja.

La metodología para detectar los olivos infectados consistió en utilizar imágenes procedentes de dos UAV, uno de ala fija de 2 m equipado sensores multiespectrales en rango térmico (modelo Miricle 307K) y visible e infrarrojo cercano (modelo TetraCam mini-MCA), y otro de ala fija de 5 m en el que se instaló un sensor hiperespectral (modelo Micro-Hyperspec VNIR) en rango visible e infrarrojo cercano. Los estudios se realizaron en un olivar afectado con diferentes niveles de severidad de infestación de Verticilosis. Para confirmar la infección por la enfermedad se tomaron muestras de las ramas nuevas con síntomas siguiendo el método descrito en Navas-Cortés *et al.* (2008) y los aislados de *V. dahliae* se estudiaron en base a la morfología de conidióforos y microesclerocios confirmando posteriormente mediante análisis con PCR (Mercado-Blanco *et al.*, 2003).

En el olivar de estudio se monitorizaron árboles con 4 diferentes niveles de severidad de in-

fección establecidos visualmente en cada olivo dependiendo del porcentaje de hojas afectadas con los síntomas de la enfermedad. Estos niveles iban de 0 a 4, siendo 0 = 0%; 0.2-0.5%: síntomas iniciales; 1 = 1-33%; 2 = 34-66%; 3 = 67-100%; 4 = árbol muerto. En los olivos afectados se realizaron, entre otras, las siguientes mediciones:

- 1) temperatura de las copas de los árboles (sensor modelo IRP-P);
- 2) conductancia estomática con un porómetro (modelo SC-1); y
- 3) fluorescencia clorofílica con un fluorómetro (modelo PAM-2100).

Los resultados obtenidos con estas medidas en campo permitieron la diferenciación de árboles sin síntomas y árboles en estadios tempranos de la enfermedad.

Los vuelos se realizaron durante tres años en primavera y verano y se generaron imágenes con resolución espacial de 20 cm (cámara térmica y multiespectral) y 40 cm (sensor hiperespectral, 260 longitudes de onda). Las imágenes térmicas del verano permitieron estimar los valores de *Crop Water Stress Index* (CWSI, Idso *et al.*, 1981). Estos valores eran menores en los árboles asintomáticos con una tendencia ascendente según el nivel de afectación lo que facilitó la identificación de árboles afectados de forma temprana. Por otro lado, los índices obtenidos en la imagen hiperespectral ($B, BGI = R400/R550, BRI = R400/R690$) posibilitaron la detección de la Verticilosis en estadios tempranos de la enfermedad, mientras que el índice $NDVI = (R800 - R670)/(R800 + R670)$ mostró ser un buen indicador para la detección de la enfermedad en fases avanzadas (daño moderado o severo).

A partir de los resultados mencionados de forma resumida anteriormente, Calderón *et al.* (2013) han demostrado que es viable la detección de la infección temprana por *V. dahliae* en olivar así como la diferenciación entre niveles de severidad de la enfermedad mediante imágenes térmicas, multiespectrales e hiperespectrales. Ello supone un gran avance en el control

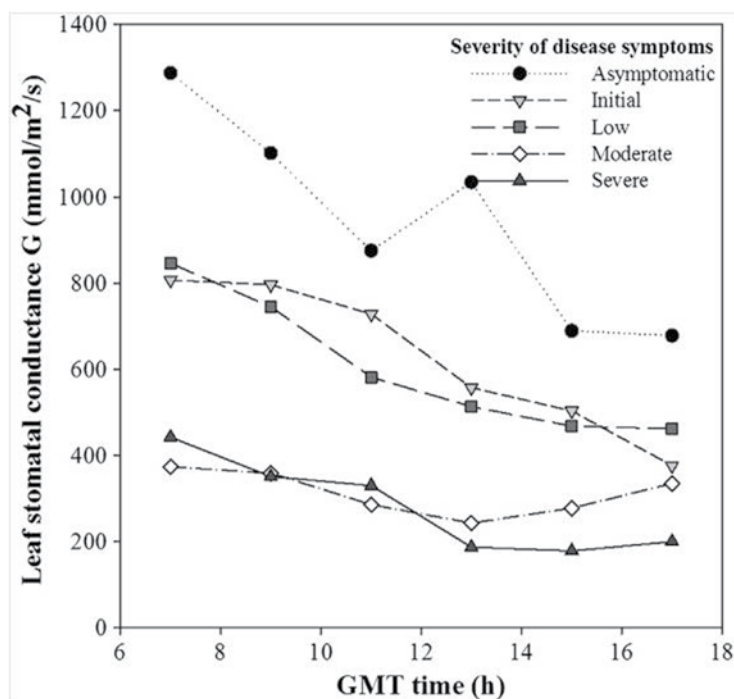


Figura 7. Resultados obtenidos por Calderón *et al.* (2013) de conductancia estomática diaria medida cada dos horas entre las 7:00 y 17:00 h en olivos infectados de Verticilosis con diferentes niveles de severidad.

integrado de esta enfermedad cuando aún está en sus fases iniciales y abre las puertas a la solución de un serio problema en amplias zonas de olivar.

Además de la investigación descrita, García-Ruiz *et al.* (2013) han obtenido resultados satisfactorios utilizando UAV en la detección de la enfermedad Huanglongbing que causa clorosis en los cítricos. Se trata de una enfermedad bacteriana cuyo vector es el insecto psílido asiático (*Diaphorina citri*) que afecta severamente los árboles reduciendo la producción, apariencia, valor económico y sabor de la fruta y del zumo. En fases muy avanzadas de la enfermedad puede ocasionar la muerte del árbol.

CONCLUSIONES

De las investigaciones presentadas en este artículo se puede concluir que mediante el análisis de las imágenes de muy alta resolución espacial obtenidas con diversos tipos de UAV equipado con sensores en diferente rango espectral se pueden generar mapas georreferenciados de:

- 1) cobertura de **malas hierbas** en época temprana, justo en el momento más adecuado para la aplicación de medidas de control localizado de malas hierbas en el cultivo de maíz;
- 2) estado hídrico del viñedo para programas **riego** allí dónde hace realmente falta; y
- 3) olivos infectados por **Verticilosis** para mapear los árboles afectados de forma temprana y proceder a realizar las medidas de control necesarias.

Actualmente hay tecnología y equipos agrícolas que pueden llevar a cabo tratamientos fitosanitarios o programas de riego en base a los mapas que definen las zonas a las que hay que prestar atención.

Agradecimientos

Los trabajos que se mencionan en este artículo referentes al uso de un Vehículo Aéreo no Tripulado para cartografía de malas hierbas han sido parcialmente financiados por el Proyecto AGL2011-30442-CO2-01 (Fondos FEDER, MINECO). ❀

BIBLIOGRAFÍA

- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Girona, J. and Fereres, E. 2013. Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-013-9334-5.
- BOE nº 223 del 15 de septiembre de 2012, páginas 65127-65171. Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios.
- Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Lucena, C. and Zarco-Tejada, P.J. 2013. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of *Verticillium* wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 139: 231-245.
- Castillejo-González, I.L., López-Granados, F., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., Sánchez De La Orden, M. and González-Audicana, M. 2009. Object and pixel based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 68: 207-215.
- De Castro, A.I., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J.M. and López-Granados, F. 2012. Airborne multi-spectral imagery for mapping cruciferous weeds in cereal and legume crops. *Precision Agriculture*, 13: 302-321.
- De Castro, A.I., López-Granados, F., Peña-Barragán, J.M. and Jurado-Expósito, M. (2013). Broad-scale cruciferous weed patches classification in winter wheat using Quick-Bird imagery for in-season site-specific control. *Precision Agriculture*, 14: 392-417.
- García-Ruiz, F., Sankaran, S., Maja, J.M., Lee, W.S., Rasmussen, J and Eshani, R. 2013. Comparison of two aerial imaging platforms for identification og Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91: 106-115.
- Gómez-Candón, D., De Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2012. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes. *Precision Agriculture*, DOI 10.1007/s11119-013-9335-4.
- González-Dugo, V., Zarco-Tejada, P.J., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S. and Fereres, E. 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assessthe variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*, 14: 660-678.
- Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32: 1283-1298.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. 1981. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45-55.
- Jiménez-Díaz, R.M., Cirulli, M., Bubici, G., Jiménez-Gasco, L.M., Antoniou, P.P. and Tjamos, E.C. 2012. *Verticillium* wilt, a major threat to olive production: Current status and future prospects for its management. *Plant Disease*, 96: 304-329.
- López-Granados, F., Jurado-Expósito, M., Peña-Barragán, J.M. and García-Torres, L. 2006. Using remote sensing for identification of late-season grass weed patches in wheat. *Weed Science*, 54: 346-352.
- López-Granados F., Jurado-Expósito M., Peña-Barragán, J.M. and García-Torres L. 2005. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *European Journal of Agronomy*, 23:279-289.
- López-Granados, F. 2011. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real time approaches. *Weed Research*, 51:1-11.
- Mercado-Blanco, J., Rodríguez-Jurado, D., Parrilla-Araujo, S. and Jiménez-Díaz, R. M. 2003. Simultaneous detection of the defoliating and nondefoliating *Verticillium dahlia* pathotypes in infected olive plants by duplex, nested polymerase chain reaction. *Plant Disease*, 87: 1487-1494.
- Navas-Cortés, J. A., Landa, B. B., Mercado-Blanco, J., Trapero-Casas, J. L., Rodríguez-Jurado, D. and Jiménez-Díaz, R. M. 2008. Spatiotemporal analysis of spread of infections by *Verticillium dahliae* pathotypes within a high tree density olive orchard in southern Spain. *Phytopathology*, 98: 167-180.
- Peña-Barragán, J.M., López-Granados, F., Jurado-Expósito, M. and García-Torres, L. 2007. Mapping *Ridolfia segetum* patches in sunflower crop using remote sensing. *Weed Research*, 47: 164-172.
- Peña-Barragán, J.M., López-Granados F., García-Torres L., Jurado-Expósito M., Sánchez De La Orden M. and García-Ferrer A. 2008. Discriminating cropping systems and agri-environmental measures by remote sensing. *Agronomy for Sustainable Development*, 28: 355- 362
- Peña-Barragán, J.M., López-Granados, L., Jurado-Expósito, M. and García-Torres, L. 2010. Sunflower yield related to multitemporal aerial photography, land elevation and weed infestation. *Precision Agriculture*, 11: 568-585.
- Peña-Barragán, J.M., Ngugi, M.K., Plant, R.E., Six, J. 2011. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing and Environment*, 115: 1301-1316.
- Peña-Barragán, J.M., Torres-Sánchez, J., De Castro-Magjás, A.I. and López-Granados, F. 2013. Generating weed maps in early-season maize fields by using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and object-based image analysis. *PLoS One*, e77151.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., de Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2013. Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLoS ONE* 8, e58210.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., de Castro-Megías, A.I. and López-Granados, F. 2013. Multi-temporal mapping of vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. Submitted.
- Huang, Y., Thomson, S.J., Hoffmann, W.C., Lan, Y. and Fritz, B.K. 2013. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6: 1-10.
- Yue, J.W., Lei, T.J., Li, C.C. and Zhu J.Q. 2012. The application of unmanned aerial vehicle remote sensing on quickly monitoring crop pests. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 18: 1043-1052.
- Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., Suárez, L., Sepulcre-Cantó, G., Morales, F. and Miller, J.R. 2009. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 113: 1262-1275.
- Zhang, C. and Kovacs, J.M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13: 693-712.