

# ambienta



## Teledetección agroforestal: el futuro que ya está aquí



ISSN 1577949-1  
00105  
9781577949105

n.º 105  
Diciembre  
2013  
3 €

# Trabajamos en proyectos como Red-ITAA

chil Innova Inicio | Documentos | Eventos | Fotos | Noticias | Blogs | Prensa | Ayuda Iniciar Sesión

Red-ITAA European Network of Innovation and Technology in the Agricultural and Food Sectors

HOME  
THE PROJECT  
PARTNERS  
ACTIVITIES  
RESULTS

Los miembros del proyecto

El objetivo general del proyecto es: El desarrollo de un portal de conocimiento para la Agroindustria en los tres países con la tecnología Web 2.0 y su uso como herramienta de apoyo a las organizaciones en este sector, con un enfoque de colaboración.

Mapa Satélite Aliviar

France  
Toulouse  
Marsel  
Andorra  
Zaragoza  
Barcelona  
Espana (Spain)  
Porto  
Portugal

SUDOE  
Programa de Cooperación Territorial  
Programme de Coopération Territoriale

RED-ITAA en imágenes

**Para que nuestro sistema agroalimentario  
y el medio ambiente sean más sostenibles:  
Todo es cuestión de conocimiento.**

**Conócelo en**

**<http://www.chil.org/innova/group/red-ita>**

**y piensa lo que puedes hacer con él.  
Verás que es mucho**

**ambienta****105 / Diciembre 2013**

## Edita:

Secretaría General Técnica  
Ministerio de Agricultura,  
Alimentación y Medio Ambiente

## Directora de la Revista:

Maribel del Álamo Gómez

## Portada:

Álvaro López

## Redacción:

Plaza de San Juan de la Cruz, s/n.  
28071 Madrid  
Tel.: 91 597 67 96

## Consejo Asesor:

## Presidente:

Adolfo Díaz-Ambrona  
Secretario General Técnico

## Vocales:

José Abellán Gómez  
Maribel del Álamo Gómez  
Arturo Cortés de la Cruz  
Antonio Gómez Sal  
Esteban Hernández Bermejo  
Carlos Hernández Díaz Ambrona  
Fernando López Ramón  
Eduardo Martínez de Pisón  
Ángel Menéndez Rexach  
Eduardo Moyano Estrada  
Antonio Sáenz de Miera  
Leyre Octavio de Toledo



Depósito Legal: M-22694-2001

ISSN: 1577-9491

NIPO: 280-13-027-6

NIPO WEB: 280-13-028-1

Esta Publicación no se hace necesariamente solidaria con las opiniones expresadas en las colaboraciones firmadas. Esta revista se imprime en papel 100% reciclado.

**02** Escriben en este número de Ambianta . . .

**06** Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y silvicultura  
**Alfonso García Ferrer**

**16** Agricultura de precisión: hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria  
**Juan Agüera y Manuel Pérez Ruiz**

**28** Evaluación de variables agrometeorológicas y su aplicación a la optimización del uso del agua  
**M. Cruz Blanco, C. Santos, J. M. Ramírez-Cuesta e I. J. Lorite**

**40** Uso de Vehículos Aéreos no Tripulados para la evaluación de la producción agraria  
**Francisca López-Granados**

**54** Evolución instantánea del fuego a partir de un sistema integrado de sensores multiespectrales y térmicos  
**José Luis Sáiz Díaz**

**66** Clasificación digital de zonas forestales usando datos LIDAR  
**E. González Ferreiro, Laura Barreiro y David Miranda**

**76** Detectar desde el cielo  
**Rocío Hernández Clemente**

**78** Evaluación de sensores de variables biofísicas mediante teledetección en pinares mediterráneos  
**Rafael M. Navarro-Cerrillo**





### Juan Agüera Vega

Obtuvo el título de Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Córdoba en 1986. Desde hace más de 25 años viene dedicándose a la docencia, investigación y transferencia en materias relacionadas con la mecanización agraria como Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba. Su actividad investigadora principal se desarrolla sobre la aplicación de nuevas tecnologías a la mecanización agraria, tecnologías de distribución variable y control de flotas para parques de maquinaria agroforestal, habiendo dirigido varios proyectos de investigación sobre Agricultura de Precisión. Es autor de más de 70 artículos en revistas científicas o especializadas, y de 4 patentes relacionadas con instrumentación para la medida de parámetros físicos de los suelos agrícolas.



### Laura Barreiro Fernández

Graduada en Ingeniería en Geomática y Topografía por la Universidad de Santiago de Compostela. Es coautora de numerosas publicaciones científicas relacionadas con la tecnología LiDAR aplicada al inventario forestal, a la clasificación de usos del suelo y al control de calidad de los modelos digitales de elevación; entre otros destacan: 5 artículos en revistas internacionales del *Journal Citation Reports*, 1 monografía, 2 capítulos de libros, 6 comunicaciones y 2 pósteres en congresos internacionales y 2 comunicaciones en congresos nacionales.



### María de la Cruz Blanco

Nacida en Badajoz en 1981. Ingeniera Agrónoma por la Universidad de Extremadura, habiendo realizado un máster por la Universidad de Córdoba y diferentes cursos de perfeccionamiento. Desde diciembre de 2010 becaria predoctoral en IFAPA Alameda del Obispo, Córdoba, en el Área de Producción Ecológica y Recursos Naturales. Pasando a Investigadora contratada en diciembre de 2012. Sus estudios se centran en implantar y poner en marcha nuevas técnicas para determinar las necesidades de agua de los cultivos. Por ello, tanto técnicas de teledetección, con la herramienta LSASAF, como medidas con equipos de micrometeorología se han utilizado para conocer la evapotranspiración de los cultivos y la de referencia. Algunos resultados obtenidos se han difundido en artículos y congresos internacionales.



### Alfonso García-Ferrer Porras

Dr. Ingeniero Agrónomo (ETSIA-Univ. Córdoba 1989), comenzó su carrera profesional en la Universidad de Córdoba. Posteriormente fue durante cinco años Director del Dpto. de Agronomía y Sistemas de Información de la firma PROINTEC SA (Madrid), siendo responsable de numerosos proyectos nacionales y europeos. Es Director Técnico de la empresa ENDECAR S.A. (especializada en cartografía y catastro) y representante de GEOPRIN, empresa del grupo, en Tecniberia-Medioambiente. En 1995 se incorpora de nuevo a la Universidad de Córdoba, en el área de Ingeniería Cartográfica Geodesia y Fotogrametría. Ha sido responsable de numerosos proyectos con organismos públicos y privados y pertenece al grupo de investigación AGR124 (CSIC-UCO) especializándose en aplicaciones de sensores remotos a agricultura de precisión. Es experto en aplicaciones geomáticas en el manejo de recursos naturales, habiendo publicado distintos artículos científicos e impartido cursos de postgrado y doctorado en universidades españolas y extranjeras. Dirige un grupo de trabajo que analiza las posibilidades de nuevas tecnologías geomáticas en el sector agroforestal. Es actualmente Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes de la Universidad de Córdoba.



### Eduardo Manuel González Ferreiro

Doctor Ingeniero de Montes, realizó su tesis doctoral en el Área de Ingeniería Cartográfica de la Universidad de Santiago de Compostela. Ha sido Profesor Interino en el Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía y en el Master en Gestión Sostenible de la Tierra y del Territorio de la USC. Su investigación se ha centrado en el uso de datos LiDAR para la estimación de variables dasométricas y variables relacionadas con el riesgo de incendios, acumulación de biomasa y CO<sub>2</sub> en los bosques. Entre otros, es coautor de 9 artículos internacionales (8 de ellos en revistas del *Journal Citation Reports*).



### Rocío Hernández Clemente

Ingeniero Agrónomo superior y doctor por la universidad de Córdoba con mención internacional obteniendo una calificación de cum laude y premio extraordinario de tesis. Su actividad investigadora se ha centrado en el análisis de imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución espacial adquiridas con vehículos tripulados y no tripulados (UAV) para el estudio de los procesos de decaimiento forestal. Los resultados de su actividad investigadora han derivado en 12 artículos publicados en revistas científicas internacionales, así como 1 capítulo de libro, 3 artículos en revistas científicas nacionales, 18 comunicaciones y la participación en 10 congresos nacionales e internacionales.



### Francisca López Granados

Lda. en CC. Biológicas y Dra. en Agronomía por la Universidad de Córdoba (1991). Desarrolla su trabajo como Investigadora Científica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) adscrita al Instituto de Agricultura Sostenible (Dpto. Protección de Cultivos) en Córdoba (<http://www.ias.csic.es/secciones/investigacion.php>). Sus líneas de investigación se centran en la utilización de imágenes remotas procedentes de satélites de alta resolución y de vehículos aéreos no tripulados para la discriminación de malas hierbas y otras variables agronómicas en cultivos leñosos y herbáceos. Es coautora de más de 60 artículos científicos en revistas internacionales. Ha dirigido 5 Tesis Doctorales, ha desarrollado 17 patentes y 6 Registros de Propiedad Intelectual y ha sido miembro del Comité Editorial de la Revista *Weed Research* (Q1) durante 7 años (1995-2011). Ha sido Presidenta de la Sociedad Española de Malherbología (2010-2013). Sus trabajos han recibido varios premios, entre los que destacan: *Mejor artículo publicado* en 2010 en el *Journal of American Society for Horticultural Science*; Premio a la 2<sup>nd</sup> Best Oral Communication 9<sup>th</sup> Congress on Precision Agriculture (2013).



### Ignacio Lorite Torres

Es investigador titular en el departamento de Producción Ecológica y Recursos Naturales del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) de la Junta de Andalucía. Es doctor ingeniero agrónomo por la Universidad de Córdoba y autor de numerosas publicaciones nacionales e internacionales relacionadas con la mejora de la gestión de los recursos hídricos empleando técnicas de modelización y teledetección. Igualmente es coordinador y participante en múltiples proyectos de investigación regionales, nacionales y europeos orientados a la optimización del uso de los recursos hídricos. Ha sido coautor de un trabajo galardonado por la *Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers* (EWRI) como mejor artículo científico del año 2009.



### David Miranda Barrós

Profesor Titular de la Universidad de Santiago de Compostela (USC), Coordinador del Grupo de Investigación G.I – 1934 – T.B (Laboratorio del Territorio) y Coordinador y responsable del Master en Gestión Sostenible de la Tierra y del Territorio de la USC. En relación con la tecnología LIDAR ha sido Director de 2 Tesis Doctorales y coautor de 9 artículos internacionales (8 de ellos en revistas del *Journal Citation Reports*).



### Rafael M. Navarro-Cerrillo

Dr. Ingeniero de Montes por la Universidad Politécnica de Madrid, y actualmente investigador responsable del Grupo de Evaluación y restauración de sistemas agrícolas y forestales cuyas actividades principales están centrada en el estudio de sistemas forestales, selvicultura, restauración y aplicación de nuevas tecnologías al estudio de ambientes Mediterráneos y tropicales. Estas investigaciones las ha desarrollado en colaboración con organismos nacionales e internacionales a través de distintos proyectos. Ha realizado estancias en centros de investigación en la Universidad de Missouri-Columbia, Universidad de Berkeley, Instituto Agronómico Hassan II de Rabat, Land

Development Authority-Israel, Universidad de Murdoch (Australia), y ha participado en varios proyectos europeos. Estas colaboraciones han dado lugar a varias publicaciones en revistas internacionales (*Environmental Management, Journal of Arid Environments, Forest Ecology and Management, Annals of Forest Science, Ecological Engineering, Remote Sensing of Environment, etc.*).



### Manuel Pérez Ruiz

Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Córdoba desde 2007. Actualmente es Profesor Contratado Doctor en el Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, Área de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Sevilla. Mantiene desde hace más de 10 años un trabajo continuado en líneas relacionadas con Maquinaria Agrícola, Agricultura de Precisión y coste de operaciones agrícolas. Centra su actividad investigadora en técnicas de Aplicación Variable de insumos en cultivos arbóreos (olivar) y estrategias no químicas de eliminación de mala hierba en cultivos en línea especialmente en tomate y remolacha. Con esto ha podido adquirir gran experiencia en la utilización de instrumentación y sensores a bordo de vehículos y aperos, habiendo conseguido publicaciones internacionales de impacto y patentes relacionadas con el tema. Mantiene una estrecha colaboración y participación en proyectos de investigación dirigidos por el Prof. David Salughter en la Universidad de California-Davis (USA).



### José Luis Sáiz Díaz

Doctor Ingeniero de Montes (1991) por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid. Master Ejecutivo en Dirección de Sistemas de Emergencias por La Universidad Camilo José Cela de Madrid. Master en Prevención de Riesgos Laborales, especialidad en Seguridad. Director de Innovación de INAER España y Gerente de Nuevas Tecnologías del Grupo AVINCIS. Jefe del Departamento de Gestión de Riesgos y Emergencias de la Empresa Pública Egmasa (Junta de Andalucía) y Director del Grupo de Emergencias de Andalucía (Consejería de Gobernación de la Junta de Andalucía). Director Técnico de la Oficina Técnica para la Recuperación del Guadiamar de La Junta de Andalucía, creada "ex novo" tras la Catástrofe de Aznalcollar. Profesor del Master en Incendios Forestales organizado por las Universidades de Lérida, Córdoba y León. Fue profesor del Master Ejecutivo en Dirección de Sistemas de Emergencias por La Universidad Europea de Madrid y del Master de Gestión Medioambiental de la Escuela de Organización Industrial (EOI) así como profesor de la Facultad de Ciencias Ambientales perteneciente a la Universidad de Gales.



### Cristina Santos Rufo

Nacida en Badajoz (1979).

Doctora Ingeniero de Montes por la Universidad de Córdoba. Desde 2006 trabaja como investigadora contratada en el área de Producción Ecológica y Recursos Naturales del Centro IFAPA Alameda del Obispo de Córdoba, donde desarrolló su tesis doctoral. Sus líneas de investigación principales se centran en la mejora de la gestión de recursos hídricos mediante el uso de técnicas de teledetección y modelos de simulación, donde colabora con investigadores de la Universidad de Idaho (EEUU) y la Universidad de Miyazaki (Japón). Ha participado en numerosos proyectos y publicaciones relacionados con sus áreas de especialización, en el ámbito nacional e internacional.



### Juan Miguel Ramírez Cuesta

Licenciado en Ciencias Ambientales por la Universidad Rey Juan Carlos (2006-2011) y Maestro en Tecnologías de la Información Geográfica por la Universidad de Alcalá de Henares (2011-2012). Actualmente disfruta de una beca predoctoral FPI-INIA, en el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, englobada dentro del proyecto "Aplicación de nuevas técnicas de teledetección para la evaluación de la gestión del riego a nivel de zona regable". Adicionalmente, ha sido nombrado Colaborador Honorario de la Universidad Rey Juan Carlos por el Consejo de Gobierno de la Universidad Rey Juan Carlos (2013).

# RED DE NEGOCIOS VERDES

## PLAN ESTRATÉGICO MULTISECTORIAL PARA LA INTEGRACIÓN DEL EMPLEO VERDE

En una sociedad cada vez más comprometida con el medio ambiente, aumenta la demanda de productos y servicios verdes.

Es el momento de dar respuesta a estas nuevas necesidades a través de la creación de negocios verdes.

SGS junto con la Fundación Biodiversidad dentro del Programa empleaverde, en el marco del Programa Operativo Adaptabilidad y Empleo 2007-2013, desarrolla el proyecto **"RED DE NEGOCIOS VERDES"**.



### Ámbito de actuación:

- Andalucía
- Castilla-La Mancha
- Galicia
- Extremadura

### CONTACTO

Tel: +96 186 89 44

Fax: +96 186 89 71

[es.rednegociosverdes@sgs.com](mailto:es.rednegociosverdes@sgs.com)

[WWW.SGS.ES](http://WWW.SGS.ES)

SGS ofrece un conjunto de soluciones para impulsar la creación y consolidación de empresas o nuevas líneas de negocio verdes:

- La plataforma virtual RED DE NEGOCIOS VERDES, como punto de encuentro para emprendedores, inversores, financiadores y otros interesados en el emprendimiento verde.
- Soporte físico a través de las OFICINAS DE NEGOCIOS VERDES habilitadas para la consulta y el asesoramiento.
- Cursos "CREA TU NEGOCIO VERDE" (modalidad mixta).
- ENCUENTROS DE NEGOCIOS VERDES donde se reunirán emprendedores e inversores.

**SOLICITE LOS DOCUMENTOS DE INTERÉS:** el Manual de consulta para la creación de negocios verdes y la Guía para el inversor de negocios verdes.

## "ACCIONES GRATUITAS COFINANCIADAS POR EL FSE"



UNIÓN EUROPEA  
FONDO SOCIAL EUROPEO  
El FSE invierte en tu futuro



# Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y silvicultura

Alfonso García-Ferrer Porras

Universidad de Córdoba. ETSIAM

Fotos: Álvaro López

El importante desarrollo que ha experimentado la teledetección en el número de sensores, plataformas y software en las últimas dos décadas, ha proporcionado a científicos e investigadores nuevas fuentes de información en áreas tales como la oceanografía, la meteorología, la agricultura y las ciencias ambientales. Dentro de las nuevas oportunidades que ofrecen estas innovaciones, tecnologías como el uso de sensores hiper espectrales o térmicos, LiDAR, etc. han logrado captar la atención de la comunidad científica por la capacidad de proporcionar grandes cantidades de información actualizada, de forma periódica y precisa. Los sistemas agrícolas y forestales son particularmente propicios para la aplicación de estas tecnologías, con un alto potencial de desarrollo, especialmente en los procesos relacionados con la evaluación, seguimiento y aplicaciones de agricultura-silvicultura de precisión. En países como España, donde la actividad agrícola tiene una enorme importancia, existen grupos de investigación pioneros en el uso de productos obtenidos a partir de sensores remotos con fines de investigación. Aplicaciones relacionadas con la clasificación y cartografía de usos del suelo y vegetación, seguimiento de riego, evaluación de estructura y estrés en sistemas forestales,

etc., son nuevas áreas de desarrollo científico, con aplicaciones inmediatas al sector productivo. Este número de *Ambienta* se centra en la revisión de algunos de los trabajos más recientes a nivel nacional, relacionados con el uso de sensores remotos en agricultura y ciencias forestales, con el fin de proporcionar información del estado de las aplicaciones de estas herramientas en España.

## LA TELEDETECCIÓN

La teledetección suministra información periódica y actualizada del territorio a partir de la medición de la intensidad de diferentes longitudes de onda de energía electromagnética que se reflejan desde la superficie terrestre. La intensidad con la que la energía electromagnética es reflejada, varía de acuerdo a la naturaleza física y propiedades ópticas de la superficie sobre la cual la energía incide.

En la década de los 50 se desarrollan los primeros satélites de observación de la Tierra con finalidad militar, que tuvieron un impacto inmediato en aplicaciones civiles, como el sensor de observación meteorológica TIROS (*Television and InfraRed Observation*



Las aplicaciones agrícolas y forestales, son algunas de las áreas de desarrollo de la teledetección más activa en los últimos años, en aspectos tales como la estimación de la producción agrícola.

Los sistemas agrícolas y forestales son particularmente propicios para la aplicación de la teledetección, con un alto potencial de desarrollo, especialmente en los procesos relacionados con la evaluación, seguimiento y aplicaciones de agricultura-selvicultura de precisión

*Satellite*), y los posteriores sensores meteorológicos como el ESSA-1/9 (1966-1969), y NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Con la experiencia adquirida con estos sensores se pudieron desarrollar programas de observación de la Tierra y de evaluación de los recursos naturales, de gran impacto científico y tecnológico. El programa Landsat, que puso en órbita su primer satélite en 1972, ha mantenido su vigencia hasta la actualidad con el sensor Landsat-5 TM (*Thematic Mapper*) todavía operativo, y el Landsat 8-LDCM, lanzado recientemente. Otros países han puesto en marcha programas de teledetección, como Francia (consorcio franco-belga-sueco SPOT), Japón (JERS-1), o la India (IRS-1a, -1b and -1c, *National Remote Sensing Agency-Indian Research and Scientific Organisation*), ofreciendo una gran variedad de datos espaciales. De igual forma, se ha ampliado la oferta de sensores de muy alta resolución espacial, como *Geo-Eye* (1,64 m pixel) y *Quick-Bird* (2,4 m pixel).

Sin embargo, el desarrollo de la teledetección no ha parado ahí, y se han incorporando nuevos sensores que explotan datos en otras regiones del espectro electromagnético, como los sistemas activos radar. Algunos ejemplos son los sistemas radar de apertura sintética SAR (*Synthetic Aperture Radar*), como el instalado en el satélite ERS 1-2 (*European Remote Sensing*)

de la Agencia Espacial Europea (1991-1995) o RadarSat canadiense. Mas recientemente, se ha empezado a sustituir el tradicional análisis multiespectral, basado en los datos de a lo sumo cinco o seis bandas, por sensores hiperespectrales, que suministran información de 200 bandas del espectro simultáneamente, como el sensor hiperespectral Hyperion, montado sobre el satélite experimental EO-1.

El incremento de la resolución espacial y de la utilización de nuevos sensores (radar, hiperespectrales, LiDAR, etc.), así como de plataformas (aviones de pequeña envergadura, aviones no tripulados, etc.) amplían el campo de la teledetección en la observación de la tierra, y suponen un enorme campo de evolución de la teledetección.

El desarrollo de la teledetección solo ha sido posible gracias a una mejora de la capacidad de procesado y análisis de datos, en particular mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), que amplían las posibilidades de tratamiento, la simplificación de los procedimientos, y la mayor potencia y rapidez de las plataformas de proceso que están permitiendo abordar problemas más complejos. Por otro lado, el procesamiento de las imágenes es necesario para convertir la información de los sensores en un documento cartográfico (correcciones geométricas y atmosféricas principalmente), lo que obliga a un cuidadoso preprocesado de la información espectral para obtener como resultado un documento auténticamente cartográfico.

Las aplicaciones agrícolas y forestales, y en general de cubiertas vegetales, son algunas de las áreas de desarrollo de la teledetección más activa en los últimos años, en aspectos tales como la estimación de la producción agrícola, control de superficies de cultivo para el seguimiento de la Política Agraria Comunitaria (PAC) de la Unión Europea, el control de determinadas plagas o enfermedades de las plantas cultivadas y forestales, la evaluación de daños ocasionados por incendios forestales o su seguimiento en tiempo real.

En España, donde la actividad agrícola tiene una enorme importancia, existen grupos de investigación pioneros en el uso de productos obtenidos a partir de sensores remotos con fines de investigación. Aplicaciones relacionadas con la clasificación y cartografía de usos del suelo y vegetación, seguimiento de riego, evaluación de estructura y estrés en sistemas forestales, etc., son nuevas áreas de desarrollo científico, con aplicaciones inmediatas al sector productivo

La respuesta espectral de la vegetación depende de tres factores: la estructura geométrica de la planta, la química foliar y los parámetros agronómicos. La estructura geométrica de la planta influye en la cantidad de energía electromagnética que puede ser reflejada, absorbida o transmitida hacia el sensor. En el caso de la química foliar, la respuesta espectral también es influenciada por los pigmentos presentes en las hojas, como clorofila, caroteno, xantofila y antocianina. Parámetros agronómicos como variaciones en el contenido nutricional, o el contenido hídrico vinculado a prácticas de riego inciden directamente en longitudes de onda específicas. Mediante la medición de la respuesta (en términos de radiancia o de reflectancia) de la vegetación en cada intervalo de longitudes de onda, se identifican firmas espectrales que pueden caracterizar diferentes tipos de cubierta vegetal de acuerdo principalmente a sus propiedades ópticas y estado fisiológico.

El presente trabajo es una revisión de la información científica actualizada relacionada con

la aplicación de sensores remotos en agricultura. Se describe el desarrollo reciente de las aplicaciones en la cartografía y evaluación de recursos agrícolas y forestales: estimación de la producción, identificación de variedades a nivel mundial; y potencialidades y limitaciones dentro del contexto de la agricultura y la selvicultura en España.

## CAMPOS DE APLICACIÓN

La teledetección, tanto en sus aspectos teóricos como aplicados, tiene un número creciente de aplicaciones en campos muy diversos, siendo uno de los más relevantes la observación de sistemas agrícolas y forestales. En este número monográfico se han seleccionado algunos ejemplos que organizados en dos grupos: aplicaciones de la teledetección a la agricultura y a la selvicultura, y que se han considerado de especial interés para profesionales relacionados con esos campos.

## APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN A LA AGRICULTURA

### **Agricultura de precisión: hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria**

La integración de información georeferenciada de alta precisión con imágenes de satélite para obtener mapas de los cultivos, control de la producción, eficiencia de técnicas de cultivo (fertilización y riego), control de vegetación arvense, etc. en el marco de la agricultura de precisión ha sido ampliamente desarrollada en los últimos años. Un ejemplo de ellos son los trabajos realizados por diferentes grupos de investigación orientados al desarrollo de la Agricultura de Precisión. Éste termino engloba una serie de tecnologías de aplicación en la producción agraria, que tienen como factor común el uso de las *Tecnologías de la Información y la Comunicación-TIC* en la racionalización de la toma de decisiones y su precisa ejecución.

La incorporación de Sistemas de Navegación Global por Satélite permite utilizar información georeferenciada orientada a ser usada por otros dispositivos electrónicos con diferentes propósitos, dando lugar a multitud de aplicaciones en agricultura: planificación de labores, mejora de la producción, uso eficiente de agroquímicos; además, de ofrecer mapas y geodatabases a escala de cultivo, información clave para las actuaciones de política agraria, modelización de la producción, o para aplicaciones medioambientales.

### **Evaluación de variables agrometeorológicas mediante teledetección y su aplicación a la optimización del uso del agua**

Por otro lado, los cultivos, en particular aquellos de alta producción, demandan una cantidad creciente de agua en un contexto de mayor escasez de este recurso, lo que exige herramientas y métodos para la planificación hidrológica y gestión del agua, recurso estratégico y escaso sin el cual no existiría el regadío. La teledetección permite conocer la relación entre la demanda hídrica de las plantas, el estado vegetativo de los cultivos y la programación y eficiencia de los riegos. A través de índices se puede conocer la actividad de las plantas y, a partir de ellos, generar mapas de demanda hídrica y estado vegetativo que permiten detectar cambios en el estado del cultivo, programación temporal de riego, deficiencias de riego, plagas y características del suelo. Así, las técnicas de teledetección permiten obtener información precisa de la superficie terrestre y de las condiciones atmosféricas para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos (ETc). La incorporación de modelos complejos que integran datos climáticos y datos procedentes de sensores espaciales permite determinar la ETc tanto en cultivos herbáceos como en cultivos leñosos, con resultados muy satisfactorios, siendo una alternativa muy relevante para establecer las necesidades de agua de los cultivos, lo que permite mejorar la gestión de los recursos hídricos.



### **Uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) para la evaluación de la producción agraria**

Uno de los avances recientes más interesantes en el área de la teledetección es el uso de aviones no tripulados (drones o *Unmanned Aerial Vehicle* UAV), y su aplicación a la estimación de la productividad de cultivos agrícolas. El Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC está



Otra de las aplicaciones de la teledetección es el control de superficies de cultivo para el seguimiento de la Política Agraria Comunitaria (PAC) de la Unión Europea.

utilizando plataformas áreas de gran autonomía y bajo costo, para obtener espectrometría en campo, que analizada a través de índices de vegetación y variables agronómicas colectadas en campo, como índice de área foliar, pigmentos, o estado hídrico permite elaborar modelos de producción. El uso de índices de vegetación, y datos históricos de producción, permite hacer estimaciones de la productividad en un contexto de cambio en la condiciones de cultivos

(variabilidad climática, cambio de métodos de cultivo o variedades, etc.). Los resultados obtenidos hasta el momento, han mostrado valores muy precisos, y permiten evaluar datos acumulados de índice de vegetación en meses previos a la cosecha (predicción de producción), con el fin de permitir a los productores realizar ajustes en sus prácticas agronómicas necesarias en el manejo de cultivos. El uso de sensores sobre plataformas no tripuladas para la estimación de

producción agrícola tiene un alto potencial de aplicación en España. El desarrollar una herramienta capaz de estimar con un alto grado de precisión la producción agrícola, permitiría un mejor manejo de información tanto en la estimación de la producción acumulada, como la capacidad de predicción de la producción.

## APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN A LAS CIENCIAS FORESTALES

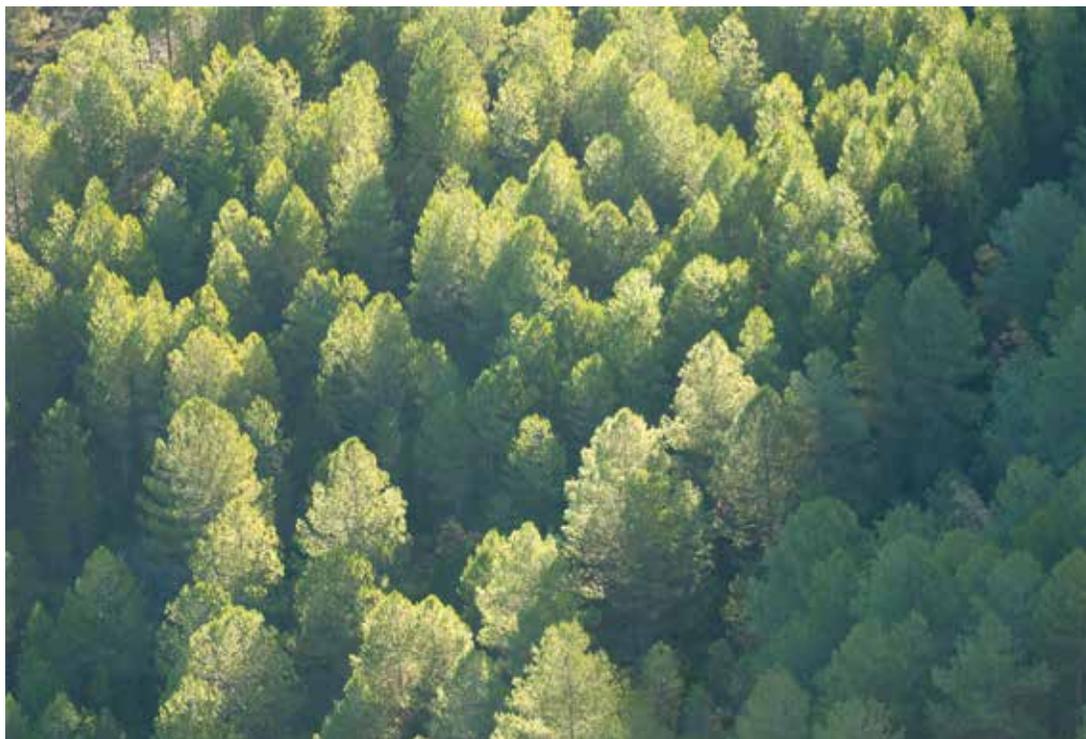
### **Sistema de adquisición a tiempo real del estado de los combustibles y evolución instantánea del fuego a partir de un sistema integrado de sensores multispectrales y térmicos**

La evaluación de grandes incendios a partir de información procedente de sensores espaciales ha sido una de las aplicaciones más frecuentes en los últimos años, tanto para la identificación de los daños producidos por el fuego, cómo para la evaluación de los procesos de restau-

ración. El grupo empresarial INAER coordina desde el año 2010 el proyecto de I+D de mayor envergadura de Europa en materia de lucha contra incendios forestales, PROMETEO. El proyecto PROMETEO, cubre una de las demandas más importantes del sector de la lucha y el control de incendios forestales, con la participación de 15 empresas españolas líderes en su sector. Una de los principales objetivos del proyecto PROMETEO es la incorporación y optimización de herramientas de observación terrestre sobre distintos tipos de plataformas, y su integración en sistemas expertos para la toma de decisiones en emergencias. Un primer desarrollo tecnológico fue la herramienta de observación y tratamiento de la información para la toma de decisiones EINFOREX-DMT (*Decision Making Tool*), que utiliza imágenes gráficas georeferenciadas (EO/IR) en tiempo real acompañadas de pronósticos de simulación, junto con un software específico para la toma de decisiones que se apoya en la información aportada un nuevo sistema multispectral que caracteriza con mayor precisión el riesgo

Aplicaciones relacionadas con el seguimiento de riego, son parte de las nuevas áreas de desarrollo científico, con aplicaciones inmediatas al sector productivo.





El cambio climático supondrá en los próximos años un factor muy importante de perturbación de los sistemas forestales a nivel mundial, siendo los países del Mediterráneo una de las zonas más sensibles. Estos procesos están relacionados con una disminución en el contenido de clorofila y de la fotosíntesis que pueden ser detectados mediante sensores remotos de alta resolución espacial.

potencial de propagación del fuego. Estas nuevas aplicaciones permiten procesar con un alto grado de rapidez información procedente de diferentes sensores (multiespectrales, LiDAR, etc.), y han demostrado un alto grado de precisión en la cuantificación de biomasa, humedad y comportamiento del fuego.

#### **Clasificación digital de zonas forestales usando datos LiDAR, ortofotos y análisis orientado a objeto**

Dentro de la silvicultura, una de las aplicaciones de la teledetección que despierta mayor interés es el uso de información tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging). La posibilidad de obtener información de estructura y variables dasométricas a partir de sensores aerotransportados, permite estimaciones directas de variables de producción en bosques. La Universidad de Santiago de Compostela, a través del Laboratorio del Territorio – Departamento de Ingeniería Agroforestal, lleva años trabajando en aplicaciones LiDAR a modelos de producción. Los trabajos realizados muestran que, incluso utilizando datos de baja resolución

como los suministrados por el Plan Nacional de Observación A (PNOA), es posible obtener valores que se pueden aplicar a la gestión de sistemas forestales, simplificando y abaratando notablemente las técnicas de inventario y la estimación de parámetros selvícolas, como por ejemplo la biomasa, y que pueden mejorar los resultados de estimación de la producción de masas ordenadas. La clasificación digital de zonas forestales, atendiendo a las distintas categorías de cubierta del suelo, combinando información espectral obtenida de una ortofotografía aérea digital con datos LiDAR, permite discriminar clases de usos del suelo, y elaborar mapas temáticos de aplicación inmediata a la gestión de sistemas forestales.

#### **Detección temprana de procesos de decaimiento en bosques de coníferas a partir de información hiperespectral y térmica**

El cambio climático supondrá en los próximos años un factor muy importante de perturbación de los sistemas forestales a nivel mundial, siendo los países del Mediterráneo una de las zonas



Estas nuevas aplicaciones permiten procesar con un alto grado de rapidez información procedente de diferentes sensores (multiespectrales, LiDAR, etc.), y han demostrado un alto grado de precisión en la cuantificación de biomasa, humedad, etc.

mas sensibles. La exposición a largo plazo de estrés hídrico combinado con altos niveles de radiación y altas temperaturas provoca daños sobre los bosques, y procesos de mortalidad. Estos procesos están relacionados con una disminución en el contenido de clorofila y de la fotosíntesis que pueden ser detectados mediante sensores remotos de alta resolución espacial. En los últimos años se han desarrollado numerosos trabajos orientados a la detección temprana de procesos de decaimiento basados en el análisis del estado fisiológico de los árboles y la cartografía del contenido de los principales pigmentos que regulan la eficiencia de la fotosíntesis. En Andalucía, en concreto en la S<sup>a</sup> de los Filabres (Almería), se están estudiando estos procesos a doseles de vegetación heterogéneos como los bosques de coníferas, mediante la medición de parámetros biofísicos en campo, análisis ópticos y bioquímicos foliares de laboratorio, así como el análisis de imágenes hiperespectrales

adquiridas en plataformas tripuladas y de vehículos aéreos no tripulados (UAV).

### **Evaluación de variables biofísicas mediante teledetección en pinares mediterráneos**

En la identificación de la respuesta de sistemas forestales a perturbaciones asociadas con procesos a largo plazo, cómo es el impacto del cambio climático, la resolución espectral juega un papel muy importante, en particular a través de su relación con variables estructurales y biofísicas. Algunos de estos parámetros, como el índice de superficie foliar o el contenido de pigmentos, pueden estimarse mediante el uso de bandas específicas o bien calculando índices de vegetación. Sin embargo, cuando estos procesos son muy complejos (alta heterogeneidad espacial y temporal), puede ser necesario recurrir a sensores hiperespectrales como el sensor AHS o el EO-1 Hyperion, para la identificación

de bandas sensibles a pequeñas diferencias en pigmentación y contenido de agua, entre otros. El Grupo de Evaluación y Restauración de Sistemas Agrícolas y Forestales de la Universidad de Córdoba está realizando desde hace algunos años estudios orientados a discriminar variables biofísicas en sistemas forestales complejos, utilizando sensores de media/alta resolución espectral como Landsat o IKONOS, en combinación con otros sensores hiperespectrales como EO-1 Hyperion o ChrisProba, o datos LIDAR, que permitan identificar bandas sensibles a pequeños cambios fisiológicos dentro de la planta, como contenido de pigmentos o de agua.

## CONCLUSIONES

La mayoría de estudios coinciden en señalar la importancia del uso de la teledetección en numerosas aplicaciones relacionadas con la agricultura y los ecosistemas terrestres, a partir de la experiencia adquirida en los últimos años sobre la respuesta espectral de diferentes tipos de cubierta vegetal. Los avances obtenidos en los estudios relacionados con sistemas agrícolas y forestales, y su relación con los procesos fisiológicos serviría de base para desarrollar modelos precisos que puedan describir criterios para la identificación específica, así como para estimar variables biofísicas. La integración de información espectral con datos fisiológicos puede apoyar nuevos estudios orientados a identificar parámetros que ayuden a evaluar la producción y la respuesta a estreses tanto de sistemas agrícolas como forestales.

Es importante también considerar el desarrollo de las aplicaciones de sensores remotos en ecosistemas análogos, y como estos están sujetos a los avances tecnológicos en materia de generación de nuevos sensores y técnicas de procesamiento de información. Una nueva generación de sensores con mejores resoluciones espaciales, espectrales y temporales, adaptados a las necesidades de los agricultores del mundo, unido a una reducción del costo de adquisición y procesamiento de las imágenes, hará estos productos más accesibles a todo tipo de usuarios.

Los estudios incluidos en éste monográfico ponen de manifiesto las oportunidades de desarrollo, tanto en la investigación como en la aplicación de sensores remotos en agricultura y ciencias forestales. Aunque solamente se han mencionado e incluido en este número algunos ejemplos de las posibles aplicaciones que se visualizan como algunas de las de mayor potencial de desarrollo en nuestro país, es importante mencionar que existen numerosos estudios relacionados con la evaluación del estado fitosanitario, el estado nutricional y la respuesta a estreses llevados a cabo por numerosos grupos de investigación de Universidades y Centros de Investigación en nuestro país. El grado de adopción de las nuevas tecnologías depende de la capacidad de éstas para satisfacer las principales demandas de los sectores productivos en materia de agricultura y selvicultura de precisión. Las herramientas necesarias para su desarrollo como los Sistemas de Información Geográfica y el Sistema de Posicionamiento Global ya son parte integral de muchas actividades agrícolas y forestales, así como la cada vez más sencilla accesibilidad a imágenes de satélite de sensores como Landsat, MODIS o EO-1 Hyperion, que son de acceso gratuito para los usuarios. Lo anteriormente mencionado, aunado al creciente interés científico y técnico por estos temas, hace de los sensores remotos una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura y la selvicultura en España, y más cuando el desarrollo de estas aplicaciones con un alto nivel tecnológico sea ya una realidad en nuestro país. ❀

**Los sensores remotos una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura y la selvicultura en España, y más cuando el desarrollo de estas aplicaciones con un alto nivel tecnológico sea ya una realidad en nuestro país**

# Agricultura de precisión: hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria

**Juan Agüera Vega**

Departamento de Ingeniería Rural. ETSIAM. Universidad de Córdoba

**Manuel Pérez Ruiz**

Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. ETSIA. Universidad de Sevilla

## NUEVAS TECNOLOGÍAS Y PRODUCCIÓN AGRARIA

Un indicador que ha caracterizado a las diferentes culturas que han evolucionado a lo largo de la historia ha sido el grado de desarrollo de la tecnología aplicada a la agricultura y a la actividad militar. En la mayoría de los casos ambos desarrollos han ido de la mano desde la prehistoria, como el manejo de animales domésticos o la metalurgia.

En nuestros días, la historia se repite. Los Sistemas de Navegación Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* o GNSS) y los Sensores Remotos (*Remote Sensors* o RS) usados en Teledetección son claros ejemplos de tecnologías que nacen en el ámbito de la industria militar pero que con el tiempo encuentran su aplicación en la agricultura.

Los cambios tecnológicos han ido conformando poco a poco el comportamiento social de las personas. La revolución industrial del siglo XVIII, propiciada principalmente por la aparición de la máquina de vapor, supuso la primera gran transformación que, en poco tiempo y a gran escala, modificó el devenir de la huma-

nidad. En agricultura, el uso de la máquina de vapor se materializó en el “Locomovil”, precursor del tractor agrícola actual. La posterior aparición del motor de gasolina y Diesel, unido el rápido desarrollo de sus mejoras y aplicaciones a vehículos militares durante la primera guerra mundial, originó otra gran revolución en la agricultura: la mecanización agraria.

El uso de tractores y máquinas en el ámbito agrícola debió suponer un cambio de paradigma para los agricultores de la época. En poco tiempo pasaron de manejar animales domésticos y todo lo relacionado con su alojamiento, alimentación, sanidad, aparejos, herrajes etc., a familiarizarse con el uso de combustibles, filtros, volantes, engranajes etc., necesarios para el manejo y mantenimiento de vehículos motorizados.

Nadie discute actualmente el papel primordial de la mecanización en la agricultura, pero la tecnología sigue avanzando y dando lugar a nuevas oportunidades que terminan en nuevos cambios de paradigma.

La revolución tecnológica que a nuestra generación le ha tocado vivir es la que han pro-

vocado las llamadas “Tecnologías de la Información y la Comunicación” (TIC), lo que nos ha conducido a la “era digital” en la que nos encontramos.

Como ha ocurrido con anterioridad, la sociedad se está transformando como consecuencia de los avances tecnológicos. Surgen nuevas formas de relación, aparecen profesiones inimaginables hace unos años mientras que otras, o desaparecen, o incorporan enfoques muy distintos a los tradicionales. Ni la imprenta, la máquina de escribir o el uso de escuadras, reglas o compases de los delineantes tradicionales han sobrevivido a las TIC.

La “Agricultura de Precisión” (AP) no es ni más ni menos que la consecuencia de la irrupción de las TIC en la agricultura, es decir, la manifestación de la era digital en la Producción Agraria.

Nuevamente los agricultores han de familiarizarse con las herramientas de la época: teclados, pantallas, selección en opciones de menú..., así como conocer las tecnologías que se ponen a su disposición para conseguir una producción agraria con la que alimentar a una población mundial de siete mil millones de personas y en crecimiento, con las restricciones que la seguridad en la sanidad alimentaria, la conservación de los recursos naturales y las leyes de la economía de mercado imponen.

Este capítulo trata de dar una visión general de lo que supone la Agricultura de Precisión y el

papel que juega la teledetección en este contexto.

## AGRICULTURA DE PRECISIÓN. ASPECTOS GENERALES Y CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS QUE LA INTEGRAN

En el término Agricultura de Precisión se engloban una serie de tecnologías de aplicación en la producción agraria, que tienen como factor común el uso de las TIC en la racionalización de la toma de decisiones y su precisa ejecución. Cualquier tarea que forme parte de las operaciones necesarias para la implantación, desarrollo y explotación de un cultivo es susceptible de ser realizado haciendo uso de alguna de las técnicas que integran la AP.

Desde sus inicios en los años 90 del siglo XX, la AP ha ido incorporando nuevos métodos y respondiendo a problemas diferentes, lo que ha hecho que su definición haya ido evolucionando de acuerdo con su carácter dinámico, propio de las nuevas tecnologías.

Con el fin de llevar un orden, y sin pretender ser demasiado exhaustivos, clasificaremos las técnicas de AP en dos grandes apartados atendiendo al objetivo principal que se persigue con ellas:

1. Técnicas orientadas a la gestión de la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y estado de los cultivos.

Los Sistemas de Navegación Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* o GNSS) y los Sensores Remotos (*Remote Sensors* o RS) usados en Teledetección son claros ejemplos de tecnologías que nacen en el ámbito de la industria militar pero que con el tiempo encuentran su aplicación en la agricultura. La “Agricultura de Precisión” (AP) es la consecuencia de la irrupción de las TIC en la agricultura, es decir, la manifestación de la era digital en la Producción Agraria

2. Técnicas orientadas a la ayuda al guiado y a la uniformidad de las operaciones mecanizadas.

El papel de los Sistemas de Navegación Global por Satélite en la AP es clave. Un receptor GNSS no es más que un dispositivo electrónico que proporciona, entre otros datos, las coordenadas latitud, longitud, altitud del punto donde se encuentra su antena. Esta información puede ser usada por otros dispositivos electrónicos con diferentes propósitos, dando lugar a multitud de aplicaciones.

En AP los receptores GNSS se utilizan tanto para la toma de información en campo, con equipos portátiles de mano, como montados en las máquinas que realizan los trabajos agrícolas (tractor, cosechadora o cualquier tipo de máquina autopropulsada), permitiendo que el usuario y otros dispositivos de control de a bordo puedan conocer en cada momento la posición en la que se encuentran dentro de la parcela que trabajan, o en la ruta de transporte hacia/desde ella. La gestión posterior de esta información por parte del usuario y/o los dispositivos de control que la reciben dependerá del objetivo final perseguido.

La precisión de los receptores GNSS en relación a las coordenadas que proporcionan es una de sus características más importantes, debido al antagonismo que existe respecto a su precio. Podemos encontrar en el mercado multitud de modelos con precisiones que van desde 3 metros hasta 3 cm, dependiendo de lo sofisticado de su técnica, el tipo de señal de corrección que utilicen e incluso el estado de la constelación de satélites en la que se basa este sistema. Cada tipo de operación agrícola a realizar con técnicas de AP exigirá una precisión mínima diferente. No es lo mismo realizar una labor de abonado con un ancho de trabajo de 20 metros, donde una desviación del tractor respecto a la trayectoria ideal de 0,2 metros no origina un error significativo, que realizar una labor de siembra en líneas separadas 0,4 metros donde esa misma desviación sí que originaría un error muy apreciable.

## GESTIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS Y ESTADO DE LOS CULTIVOS

Desde muy antiguo se conoce que la cantidad de cosecha recogida en una parcela agrícola no es uniforme en toda ella, a pesar de haber realizado todas las operaciones de cultivo (laboreo, siembra, abonado etc.) de forma homogénea. Existen factores ligados a las propiedades de los suelos, microclimas o agentes patógenos, que afectan de manera selectiva y con distintos grados de intensidad en zonas concretas, dando lugar a lo que se conoce como variabilidad intra-parcelaria.

Ya en la Biblia, la Parábola del Sembrador hace referencia a esta observación como algo bien conocido en la época, sirviendo de símil para facilitar la comprensión de otros conceptos más complejos. La forma original de gestionar esta variabilidad fue la división de la explotación en parcelas de características homogéneas, teniendo en cuenta la experiencia e intuición conseguidas a lo largo de los años.

Con la llegada de la mecanización, la subdivisión en parcelas, muchas veces demasiado numerosas y de tamaño reducido, deja de ser práctica por la cantidad de tiempos muertos que se generan. Como consecuencia, se hace prioritario que las unidades de cultivo sean lo más extensas posible, quedando la variabilidad intra-parcelaria como algo secundario, imposible de tener en cuenta. En esta situación, las máquinas empleadas en la aplicación de los distintos insumos, necesarios en las operaciones de cultivo, son ajustadas para aplicar una dosis constante y homogénea en toda la parcela, calculada en base a un promedio de toda ella.

## MAQUINARIA PARA LA GESTIÓN DE LA VARIABILIDAD INTRA-PARCELARIA

Con la aparición de las TIC, especialmente los GNSS y la teledetección, se presenta la oportu-

tunidad de considerar la variabilidad intraparceldaria en la gestión de las explotaciones. Las máquinas con tecnología de distribución variable (*Variable Rate Technology* o VRT) permiten que la dosis aplicada pueda ser modificada durante la marcha sin intervención del operador.

Atendiendo a este concepto existen dos tipos de máquinas VRT:

- Basadas en sensor.
- Basadas en mapa.

Las **máquinas VRT basadas en sensor** ajustan automáticamente la dosis aplicada en función de la información que recibe de un sensor óptico (teledetección) que analiza el espectro de la luz reflejada por el cultivo.

En el caso de la fertilización, las máquinas abonadoras VRT basadas en sensor poseen de 2 a 4 dispositivos ópticos que exploran la luz que refleja la superficie de cultivo alrededor de la máquina, calculando sobre la marcha la dosis óptima a aplicar mediante un modelo que llevan programado, ajustado a las condiciones generales en que se encuentra. Mediante un servomecanismo, el dispositivo de control modifica la configuración del sistema dosificador de la abonadora para adaptarlo a la dosis calculada en cada momento.

En la aplicación de herbicidas, los sensores ópticos permiten discriminar las malas hierbas del suelo desnudo, lo que posibilita comandar una electroválvula que hace pulverizar el caldo sólo cuando es necesario. Con ello se evitan los tratamientos masivos con el consiguiente ahorro

Abonado nitrogenado con máquina VRT basada en sensor óptico. (Cortesía de Fritzsche Umwelttechnik.)



económico y la reducción del impacto ambiental.

Además del análisis espectral en que se basan los sensores ópticos, existen ensayos a nivel experimental con resultados prometedores que combinan dicha técnica con el empleo de cámaras y análisis de imagen (visión artificial). De esta forma es posible, además, discriminar las malas hierbas de las plantas cultivadas, lo que sería de gran utilidad en tratamientos herbicidas en la línea de cultivo una vez éste se ha establecido.

La **maquinaria VRT basada en mapa** realiza los cambios de dosis según un patrón previamente establecido llamado “mapa de prescripción”, calculado con anterioridad al momento de realización de la aplicación e introducido en el dispositivo de control de la máquina en forma de archivo digital.

La obtención de la información necesaria para realizar el mapa de prescripción, haciendo uso entre otras técnicas de la teledetección, y su

propia confección, constituye toda una rama de la AP que será tratada en el siguiente apartado.

Con este sistema se hace imprescindible el uso de un receptor GNSS a bordo de la máquina con objeto de informar al sistema de control sobre la posición en la que se encuentra, de modo que pueda establecer mediante el mapa de prescripción cargado previamente, la dosis que corresponde a dicha punto. De manera similar a la maquinaria basada en sensor, un conjunto de electroválvulas, servomecanismos y otros tipos de actuadores modifican el sistema dosificador para adaptarlo a la dosis prescrita.

Aunque las tareas más frecuentes llevadas a cabo con la técnica VRT basada en mapa son la fertilización y los tratamientos herbicidas, no están limitadas a ellas. En la actualidad existe la posibilidad de realizar cualquier operación de cultivo aplicando esta técnica, desde laboreo con profundidad variable, siembra a distintas densidades e incluso riego con dosis adaptada



Aplicación selectiva de herbicida mediante sensores ópticos que detectan las malas hierbas. (Weed Seeker de Trimble.)

a las necesidades concretas de cada zona de la parcela.

Cabe mencionar también los ensayos de recolección diferenciada basada en mapa, realizados en viña. En este caso, el mapa de prescripción diferencia dos zonas con calidad de uva distinta, confeccionado mediante teledetección con apoyo de medidas directas sobre el cultivo. Aunque la máquina cosechadora trabaja en continuo, el mapa de prescripción indica a cuál de las 2 tolvas de las que dispone la cosechadora, debe ir la uva recolectada en cada zona. De esta forma puede conseguirse mostos que darán origen a vinos de distinta calidad, aún procediendo de la misma parcela.

Durante la realización de la operación utilizando maquinaria VRT, los equipos de control tienen la posibilidad de grabar en archivos digitales la dosis real aplicada en cada punto constituyendo los llamados “mapas de aplicación”, que pueden ser volcados posteriormente a un ordenador para comprobar el correcto ajuste de la aplicación a la prescripción.

### Generación de mapas de prescripción

Si un agricultor trabaja sobre mapas de prescripciones o aplicación, debe poseer un equipo electrónico apropiado en la cabina del vehículo agrícola, que reciba la posición desde el receptor GNSS y envíe a la unidad de control del apero la información de qué dosis (o profundidad de laboreo si hablamos de laboreo variable) está prevista en la posición que la máquina ocupa en cada momento. La información que conforman los mapas de prescripciones pueden provenir de muchas fuentes (mapas de producción, sensores del terreno, del cultivo, etc.), imposible de manejar mediante sistemas tradicionales. En este caso son los ordenadores, mediante aplicaciones informáticas especiales denominadas Sistemas de Información Geográfica para Agricultura (Ag-GIS), los que intervienen. Estas aplicaciones, además de almacenar ordenadamente toda la información, permiten su visualización así

**Aunque las tareas más frecuentes llevadas a cabo con la técnica VRT basada en mapa son la fertilización y los tratamientos herbicidas, no están limitadas a ellas. En la actualidad existe la posibilidad de realizar cualquier operación de cultivo aplicando esta técnica, desde laboreo con profundidad variable, siembra a distintas densidades e incluso riego con dosis adaptada a las necesidades concretas de cada zona de la parcela**

como su tratamiento estadístico para el cruce de los distintos datos.

La creación de una base de datos de cada parcela es una herramienta fundamental para optimizar la toma de decisiones en un sistema productivo agrícola. Estos datos generan capas de información tales como, propiedades químicas de los suelos, compactación, plagas y enfermedades, humedad, conductividad eléctrica, etc., y posteriormente serán utilizadas para la adecuada interpretación de la variabilidad espacial (dentro de la parcela) y temporal (entre años) de los rendimientos. Algunos de los mapas de variabilidad que se utilizan actualmente en el sector agrícola son: (i) mapas de rendimiento, (ii) mapas de vigor del cultivo, (iii) mapas de conductividad eléctrica (CE), etc.

#### *Mapa de rendimiento*

Basados en nuestra experiencia, coincidente con la opinión de muchos expertos, podríamos

La creación de una base de datos de cada parcela es una herramienta fundamental para optimizar la toma de decisiones en un sistema productivo agrícola. Estos datos generan capas de información tales como, propiedades químicas de los suelos, compactación, plagas y enfermedades, humedad, conductividad eléctrica, etc., y posteriormente serán utilizadas para la adecuada interpretación de la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos

decir que la implantación de la agricultura de precisión comienza con la monitorización del rendimiento de los cultivos. La monitorización del rendimiento es la mejor opción para conocer la productividad potencial de cada cultivo en cada parcela, proporciona gran cantidad de información y a un coste muy reducido. Se realiza durante la operación de cosecha por lo que se reduce mucho el coste y nos permite evaluar qué resultado han tenido las decisiones tomadas.

El objetivo básico del monitor de rendimiento es indicar la cantidad de producto cosechado por cada unidad de superficie que instantáneamente encontramos a medida que vamos cosechando.

Esta información, que varía de unos puntos a otros de la parcela, se actualizará a intervalos de tiempo regulares, normalmente un segundo, dos o tres. Pero la indicación en una pantalla numérica del valor instantáneo de producción no resulta suficiente para un

estudio pormenorizado en comparación con la distribución de otras propiedades. Es necesario que la información tomada quede registrada y pueda ser descargada después de la operación en un ordenador para su posterior análisis. De igual manera resulta básico asignar a cada dato del rendimiento instantáneo unas coordenadas (X,Y,Z) que permitan realizar el mapa de distribución espacial de la producción.

Para el almacenamiento de la información generada, los monitores de rendimiento disponen de tarjetas de memoria extraíbles que pueden ser leídas por los ordenadores o dispositivos de mano, mientras que las coordenadas para la localización se obtienen mediante un receptor GNSS, mejorando la precisión si se emplea tecnología diferencial. Hoy en día algunos sistemas más avanzados de monitorización del rendimiento utilizan sistemas de gestión remota o telemetría para el envío en tiempo real de los mapas de producción a un servidor, esto permite el procesado inmediato por parte de un técnico o de la empresa especializada.

Los principios básicos de medida del rendimiento podemos clasificarlos en volumétricos y gravimétricos, según la medida se realice sobre el volumen o sobre la masa respectivamente, del producto cosechado.

Entre los medidores volumétricos los sistemas más utilizados son dos:

- Conteo del número de veces que un receptáculo de volumen conocido, una vez lleno, vuelca sobre la tolva de la cosechadora.
- Métodos ópticos, donde el flujo de cosecha se hace pasar entre un fotoemisor y un fotosensor, midiéndose la proporción de tiempo en que la luz es bloqueada, lo que resulta un buen indicador del volumen de cosecha entrante.

Los métodos de medida del flujo gravimétrico se basan igualmente en dos principios básicos:

- La fuerza que se genera cuando el flujo de producto impacta sobre una superficie, para lo cual se emplean células de carga que son dispositivos capaces de generar una señal eléctrica variable con dicha fuerza.
- La atenuación que sufre una radiación de rayos gamma o rayos X cuando atraviesa el flujo de cosecha que se hace pasar entre la fuente y el detector de la radiación.

Además del flujo de cosecha que entra en la máquina, es necesario medir la superficie por unidad de tiempo que cubre la cosechadora, resultado del producto de la velocidad a la que se desplaza por el ancho de trabajo. La velocidad de avance puede determinarse mediante un sensor que mide la velocidad de giro de algún eje de la transmisión o de la propia rueda, aunque también puede calcularla el propio receptor GNSS y suministrarla como un dato más al monitor. Por otra parte, el ancho de trabajo es una información que hay que suministrar al monitor en el momento de su configuración para trabajar sobre una determinada máquina.

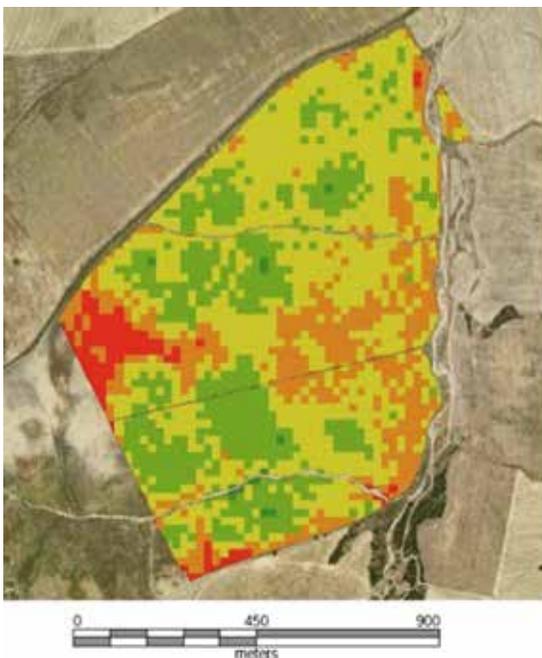
Otra medida que necesitan realizar los monitores de rendimiento es la altura respecto

al suelo a la que se encuentran el cabezal de corte. Este valor resulta fundamental para reconocer los momentos en que la cosechadora sale del borde de la parcela cuando termina una pasada y comienza otra, o las zonas improductivas dentro de la misma. Las medidas de flujo de cosecha y superficie cubierta durante estos momentos no son contabilizadas para no influenciar los valores de rendimiento global y superficie que se van acumulando.

La información referente al rendimiento de cosecha en combinación con otro tipo de información sobre el suelo y el cultivo, reunida de la forma más eficiente posible, son un buen punto de partida.

*Mapa de vigor del cultivo*

Muchos técnicos han utilizado los indicadores visuales como herramienta para evaluar la carencia de nutrientes o estrés hídrico en la planta. Actualmente, gracias a determinados sensores, es posible determinar estados de estrés previamente a que se manifiesten visualmente al ojo humano, de modo que se pueda actuar anticipadamente.



160.001 - 348.564	0.44 ha
120.001 - 160.000	21.39 ha
80.001 - 120.000	40.85 ha
40.001 - 80.000	17.12 ha
6.985 - 40.000	3.39 ha



Mapa de rendimiento (Trigo) en parcela en la provincia de Sevilla. Medidas normalizadas a % sobre la media.



Sensor óptico de mano para obtención del NDVI a nivel de parcela.

Estos sensores ópticos pueden estar montados en satélites (imágenes satelitales), aviones/helicópteros, en el propio tractor o portarlo a mano un técnico agrícola.

Una combinación de la información espectral obtenida por estos sensores nos permite calcular un índice vegetativo para el cultivo, uno de los más utilizados es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice se encuentra relacionado con la cantidad de Nitrógeno del cultivo, por lo que proporciona una información de gran utilidad a nivel de parcela para conocer el estado del cultivo y establecer la aplicación variable apropiada, además de un bajo coste superficial.

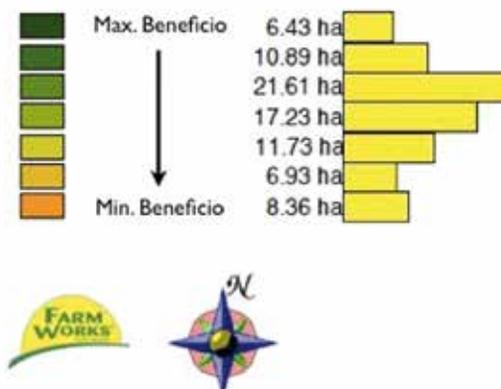
#### *Mapa de conductividad eléctrica (CE)*

El uso de un sensor de inducción electromagnética somero puede ayudar a caracterizar eficazmente propiedades del suelo como humedad, materia orgánica, salinidad, densidad aparente, conductividad eléctrica etc. Esta información es muy útil para diferenciar zonas de manejo dentro de la parcela que tienen características

similares y de las que se espera un comportamiento homogéneo.

Reuniendo toda esta información y teniendo en cuenta los requisitos del cultivo, las preferencias y experiencia del agricultor y cualquier otro dato de interés, se realizan los mapas de prescripción. Éstos serán utilizados bien en los abonados de fondo o posteriormente en cobertera. Aunque debieran ajustarse con la mayor precisión posible a la realidad, veremos que existe una componente muy importante debida a la naturaleza mecánica de la máquina de aplicación, debemos tener en cuenta sus limitaciones: ancho de trabajo, dosis mínimas, máximas y tiempo de ajuste de las válvulas. Otras posibles fuentes de errores son las vinculadas con las características del material aplicado, por ejemplo su densidad y fluidez que pueden cambiar a lo largo de la jornada, por todo ello, es muy importante que los equipos de a bordo estén muy bien regulados.

Una vez realizada la aplicación es fundamental recoger los mapas de aplicación grabados en el equipo con los que, además de visualizar las diferencias entre lo planificado y lo realizado,



Mapa de beneficio económico de trigo al final de campaña.

podremos realizar el análisis económico de la campaña haciendo uso de las aplicaciones Ag-SIG.

### AYUDA AL GUIADO. UNIFORMIDAD DE LAS OPERACIONES MECANIZADAS

En este apartado se consideran aquellas tecnologías encuadradas en la AP, cuyo objetivo es garantizar que una determinada operación se realiza de manera uniforme y homogénea en toda la superficie de la parcela.

Una de las causas que originan falta de uniformidad en operaciones mecanizadas que implican distribución de productos sobre el suelo, es la variación de la velocidad de trabajo de la máquina mientras se mantiene constante el caudal de salida del producto distribuido. Este fenómeno origina que las zonas en donde se reduce la velocidad reciban una dosis mayor que las zonas recorridas a mayor velocidad. Antes de la aparición de los receptores GNSS

para agricultura ya aparecieron máquinas (abonadoras y pulverizadores principalmente) con capacidad para modificar el caudal de salida de producto en función de la velocidad de rotación de una rueda que gira a medida que avanza la máquina. Aunque se conseguían buenos resultados, el resbalamiento y el diferente hundimiento de la rueda en el suelo le hacían perder precisión.

Los receptores GNSS, además de proporcionar las coordenadas para la localización de la máquina, también proporcionan la velocidad real a la que se mueve. Este dato es utilizado por los dispositivos controladores que regulan el caudal de salida de producto para adaptarlo al valor adecuado de modo que la dosis aplicada al suelo se mantenga constante, logrando una precisión mayor que los sistemas basados en la rueda.

Otra de las fuentes error por falta de uniformidad está causada por los solapes y huecos que se generan cuando la distancia entre pasadas contiguas no es la correcta. Los sistemas mar-

cadore basados en discos o rejas trazadoras o espuma, utilizados por algunas máquinas sembradoras, han dado paso a los sistemas de ayuda al guiado y guiado automático controlados por receptores GNSS.

Constan básicamente de un monitor que es programado con la distancia entre líneas que se desea mantener, y la línea original de partida. Con estos datos el procesador genera todas las líneas paralelas restantes y compara la situación instantánea del vehículo con la línea más cercana. Como resultado de dicha comparación, el equipo puede actuar de dos formas, dependiendo del sistema utilizado.

En los sistemas de ayuda al guiado, el error resultante de la posición actual de la máquina respecto a la línea en que teóricamente debería encontrarse, es representado sobre una barra horizontal de luces de forma que el conductor pueda corregir para llevarlo a

la posición correcta, en cuyo caso lucirá la luz verde situada en el centro de la barra. En otros modelos se utilizan pantallas de distinto tamaño y tipo donde se representa la posición relativa de la máquina respecto a la línea de trabajo.

Los sistemas de guiado automático, además de indicar el error relativo, actúan automáticamente sobre la dirección del vehículo sin necesidad de intervención por parte del operario. Existen modelos que intervienen sobre el volante y otros, más precisos y robustos, que intervienen sobre el sistema hidráulico de la dirección.

Una alternativa al guiado automático que usan algunas máquinas consiste en intercalar un bastidor entre el tractor y la máquina cuya posición se desea controlar. Este bastidor permite el movimiento lateral de la máquina acoplada respecto al tractor. El sistema de control



Monitor con barra de luces para ayuda al guiado.

corrige las desviaciones laterales del vehículo mediante desviaciones en sentido contrario de la máquina sobre el bastidor, de manera que se mantenga su posición relativa respecto al suelo.

Otros equipos que pueden encuadrarse en este apartado son los denominados “control de tramos”. Se utilizan sobre todo en barras pulverizadoras para evitar los solapes no deseados que se presentan cuando por cualquier razón el tractor debe salir de su línea teórica de trabajo (existencia de postes, árboles etc.) o al realizar curvas en los pases periféricos de las parcelas. Estos equipos detectan las zonas ya trabajadas y cortan la pulverización en los tramos en los que se produciría el solape. También permiten el uso de mapas de prescripción para evitar la aplicación de agroquímicos en zonas sensibles de las parcelas o reforzar la dosis donde sea necesario.

## CONSIDERACIONES FINALES

Como puede deducirse de lo expuesto, el objetivo final de la AP es optimizar el rendimiento de las explotaciones agrarias mediante un preciso conocimiento del medio en el que se desarrollan los cultivos y la ejecución precisa de las decisiones adoptadas.

Esta optimización tiene una repercusión muy favorable en los aspectos medioambientales vinculados con la producción agraria, por la racionalización del uso de productos fitosanitarios que conlleva.

Las TIC han puesto a disposición del sector agrario todo un conjunto de nuevas herramientas que permiten dicha optimización, entre las que se encuentra la teledetección.

Es verdad que en España la adopción masiva de la AP no ha sido tan elevada como se esperaba hace unos 20 años cuando los primeros pioneros empezaron a utilizar los monitores de rendimiento. En otros países, en cambio, esto no ha sido así. El análisis del porqué iría más allá de

**El objetivo final de la AP es optimizar el rendimiento de las explotaciones agrarias mediante un preciso conocimiento del medio en el que se desarrollan los cultivos y la ejecución precisa de las decisiones adoptadas. Esta optimización tiene una repercusión muy favorable en los aspectos medioambientales vinculados con la producción agraria, por la racionalización del uso de productos fitosanitarios que conlleva**

las pretensiones de este capítulo, pero lo que es verdad es que a nivel internacional no dejan de aparecer nuevos productos y nuevas empresas relacionadas con el sector como ha podido apreciarse en la recientemente celebrada feria de tecnología agraria Agritechnica, en Hanover (Alemania).

Los sistemas de ayuda al guiado, guiado automático y control de tramos son los que más aceptación tienen en España. La aplicación variable, en cambio, salvo excepciones, apenas tiene repercusión por el momento. La solución habría que buscarla en la colaboración de todos los implicados en el sector, debido al carácter tan multidisciplinar que tiene esta tecnología. Al usuario final de la AP hay que ofrecerle un producto único y acabado. De nada le sirve al gestor de una explotación agraria un mapa de rendimiento, de conductividad eléctrica o el obtenido con sensores remotos si no tiene la seguridad de que va a disponer de un correcto asesoramiento en su interpretación conjunta y de la maquinaria que le permita la distribución variable, que es lo que en definitiva justifica toda la información previa obtenida. ❀

# Evaluación de variables agrometeorológicas mediante teledetección y su aplicación a la optimización del uso del agua

M. Cruz-Blanco, C. Santos, J. M. Ramírez-Cuesta e I. J. Lorite

Centro IFAPA Alameda del Obispo. Córdoba (España)

En climas áridos y semi-áridos un porcentaje muy significativo de los recursos hídricos disponibles son consumidos por la agricultura de regadío. Así, según diversos autores en España más del 80% de los recursos hídricos se dedican al riego. Sin embargo esta distribución de los recursos disponibles podría variar de forma significativa en las próximas décadas debido al incremento en los requerimientos de otros sectores como el medio ambiental, y la prevista reducción de precipitaciones por los efectos del cambio climático en el Sur de Europa<sup>1</sup>. En este contexto de máxima competitividad por los recursos hídricos, un correcto manejo de los mismos es esencial para asegurar la sostenibilidad de las zonas regables mediterráneas. Para lograr este correcto manejo, la determinación precisa de variables como la evapotranspiración de los cultivos<sup>2</sup>

( $ET_c$ ) o la evapotranspiración de referencia<sup>3</sup> ( $ET_o$ ) es esencial.

La contribución de las técnicas de teledetección<sup>4</sup> en la mejora de la gestión de los recursos hídricos a escala de cuenca o zona regable se ha incrementado significativamente en los últimos años. Estas técnicas permiten obtener información precisa de la superficie terrestre ( $ET_c$ ) y de las condiciones atmosféricas ( $ET_o$ ). La teledetección ha sido empleada con gran éxito por investigadores como Bastiaanssen *et al.* (1998) o Allen *et al.* (2007a, b), desarrollando nuevas e innovadoras metodologías para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos ( $ET_c$ ). Así, herramientas como el modelo METRIC<sup>5</sup> han permitido determinar la  $ET_c$  tanto en cultivos herbáceos (Allen *et al.*, 2007a, b)

<sup>1</sup> Son múltiples los estudios realizados sobre el efecto del cambio climático para las condiciones del sur de España como por ejemplo los trabajos realizados por Christensen y Christensen (2007).

<sup>2</sup> La evapotranspiración de los cultivos es la combinación de dos procesos mediante los cuales se transfiere agua hacia la atmósfera, debido a la evaporación desde el suelo y a la transpiración de las plantas. Con la práctica del riego se pretende cubrir esta pérdida de agua de modo que los cultivos no sufran estrés hídrico.

<sup>3</sup> La evapotranspiración de una superficie de referencia es aquella que se produce con un cultivo herbáceo, como una pradera de gramíneas, con una altura de entre 8 y 15 cm, con un adecuado suministro de agua y nutrientes y en óptimas condiciones de crecimiento. Este término es básico para la programación de riegos como se describe en Allen *et al.* (1998).

<sup>4</sup> Las técnicas de teledetección se refieren a diversas herramientas utilizadas para la observación, el análisis e interpretación de fenómenos terrestres a partir de imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas o espaciales.

<sup>5</sup> Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration.

como en cultivos leñosos (Santos *et al.*, 2012), con resultados muy satisfactorios. Estas metodologías han proporcionado información relevante sobre necesidades de agua de los cultivos permitiendo la mejora de la gestión de los recursos hídricos (Santos *et al.*, 2008) o el seguimiento de la sequía (Sun *et al.*, 2011). Estudios llevados a cabo para la determinación de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) han sido menos numerosos, aunque recientemente De Bruin *et al.* (2010) y Cruz-Blanco *et al.* (2014) han demostrado que información de satélites geoestacionarios<sup>6</sup> como el *Meteosat Second Generation* (MSG), pueden ser utilizados para la determinación precisa de  $ET_0$  a escala regional.

El concepto de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) fue introducido para estimar las necesidades de agua de los cultivos junto con el uso de coeficientes de cultivo<sup>7</sup> (Allen *et al.*, 1998). La metodología de cálculo se basa en la ecuación de Penman-Monteith<sup>8</sup> y es considerada como el procedimiento de referencia para la determinación de la  $ET_0$ , obteniendo resultados muy satisfactorios incluso en condiciones de gran aridez. La limitación del empleo de esta ecuación es la gran cantidad de información necesaria, siendo complicada su aplicación en áreas donde no se cuenta con información meteorológica de calidad (Martínez-Romero *et al.*, 2012). Por ello, se ha potenciado la búsqueda de metodologías alternativas que requieran una menor cantidad de información. Así, para la determinación de la  $ET_0$  se han empleado con gran éxito metodologías que integran técnicas de teledetección y herramientas de previsión meteorológica en distintas zonas semi-áridas (De Bruin *et al.*, 2010; Cristóbal y Anderson, 2012). Sin embargo, la determinación del impacto del uso de estas metodologías sobre la gestión de los recursos hídricos no ha sido estudiada en detalle hasta fechas recientes.

<sup>6</sup> Satélite que permanece inmóvil sobre un determinado punto del planeta.

<sup>7</sup> Es el cociente entre la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y depende fundamentalmente del desarrollo del cultivo.

<sup>8</sup> Ecuación frecuentemente empleada para determinar la  $ET_0$  a partir de datos de temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad del aire (Allen *et al.*, 1998).

En este trabajo se muestran los últimos avances en la mejora de la gestión de los recursos hídricos a nivel de parcela, zona regable y región, empleando diferentes técnicas de teledetección. Estas técnicas han permitido determinar de manera precisa diferentes variables agroclimáticas como la  $ET_c$  y la  $ET_0$ , constituyendo la base para la optimización del uso del agua en regiones mediterráneas.

### ¿CÓMO DETERMINAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CON TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN?

Tradicionalmente la evapotranspiración de referencia se ha determinado por medio de redes de información agroclimática. En Andalucía desde finales de los años 90 se emplea la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA). La RIA forma parte del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) creado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://portal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>). Esta red en Andalucía está compuesta en la actualidad por 100 estaciones meteorológicas automáticas que proporcionan diariamente información agroclimática de forma gratuita (<http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria>). Cada estación está equipada con sensores para medir temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, y lluvia. Con esta información, empleando la ecuación de Penman-Monteith, se obtienen valores de  $ET_0$  de gran calidad que sirven de referencia para la programación de riegos de las grandes zonas regables andaluzas.

El cálculo de la  $ET_0$  se debería realizar en condiciones de referencia muy concretas<sup>9</sup>, pero éstas son muy difíciles de conseguir especialmente en climas semi-áridos como los presentes en el sur de España. A pesar de esta limitación, los valores de  $ET_0$  proporcionados por las redes de esta-

<sup>9</sup> Las condiciones que debe de cumplir una superficie de referencia se describen en Allen *et al.* (1998) y que permiten obtener un valor estandarizado de  $ET_0$ . Algunos de estos requisitos se describen en la nota 3.

ciones meteorológicas presentan una gran calidad como han demostrado trabajos realizados en condiciones semi-áridas descritos en Gavilán *et al.* (2006) y Cruz-Blanco *et al.* (2014). Así, la ecuación de Penman-Monteith ha demostrado su utilidad para generar estimaciones muy precisas al ser comparada con medidas lisimétricas<sup>10</sup> en ambientes mediterráneos.

Aunque los resultados obtenidos con la ecuación de Penman-Monteith han sido muy satisfactorios, su uso se ha visto limitado debido a la necesidad de una gran cantidad de información en condiciones de referencia. Así, a pesar del elevado número de estaciones integradas en la RIA, aún hay zonas en donde la información agroclimática es deficiente por su lejanía a una estación meteorológica. Por este motivo es preciso el desarrollo de metodologías alternativas a la ecuación de Penman-Monteith para el asesoramiento y mejora de la gestión de los recursos hídricos en estas zonas.

EUMETSAT LSA SAF<sup>11</sup> es un grupo especializado en el desarrollo de aplicaciones relacionadas con la teledetección para el estudio de procesos que ocurren sobre la superficie terrestre. LSA SAF determina la radiación solar incidente sobre la superficie por medio de la acumulación de observaciones realizadas cada 30 minutos, proporcionadas por instrumentación a bordo del satélite *Meteosat Second Generation* (MSG). Integrando la radiación medida por LSA SAF con la temperatura del aire obtenida por la predicción meteorológica realizada por el Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico (ECMWF), se obtuvieron valores de  $ET_o$  basados en la ecuación de Makkink<sup>12</sup>. Esta infor-

<sup>10</sup> Medidas realizadas en contenedores que encierran una porción de suelo donde es implantado un cultivo para determinar la evapotranspiración del mismo (Berengena y Gavilán, 2005). Estos contenedores son pesados en intervalos regulares de tiempo, siendo el consumo de agua del cultivo la diferencia de peso entre medidas.

<sup>11</sup> LSA SAF es el acrónimo de Land Surface Analysis Satellite Applications Facility, y EUMETSAT de European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (Trigo *et al.*, 2011).

<sup>12</sup> La ecuación de Makkink fue desarrollada inicialmente por De Bruin *et al.* (1998) para climas del norte de Europa, muy diferentes a los encontrados en las condiciones mediterráneas del sur de Europa. Su uso en España requiere de ajustes específicos para las condiciones climáticas de climas mediterráneos.

mación está disponible en tiempo real (<http://landsaf.meteo.pt>), con una resolución espacial de 3 km cubriendo un área que engloba África, la mayoría de Europa y parte de Sudamérica.

En este trabajo se ha realizado una modificación a la formulación original para tener en cuenta las condiciones atmosféricas de climas semi-áridos como las presentes en Andalucía. El ajuste de esta nueva ecuación se realizó empleando información procedente de un lisímetro de pesada<sup>13</sup> situado en la finca Alameda del Obispo en Córdoba.

Además de la  $ET_o$ , la evapotranspiración real de los cultivos ( $ET_c$ ) es la principal información para estimar las necesidades hídricas de los mismos, y aplicar así el riego en la proporción adecuada. Por ello, una cuantificación precisa de la  $ET_c$  constituye una herramienta fundamental en el manejo del agua, al permitir la realización de múltiples aplicaciones como la programación de riegos o la identificación de situaciones de estrés.

Son múltiples los procedimientos de cálculo de la  $ET_c$ . Algunos de los métodos tradicionalmente empleados son la lisimetría, las medidas meteorológicas a nivel de parcela, o mediante metodologías simples con valores tabulados como las descritas en Allen *et al.* (1998).

Recientemente las técnicas de teledetección han supuesto un avance muy significativo en este campo. Así, el modelo METRIC ha sido desarrollado por la Universidad de Idaho (EEUU) para la estimación de la  $ET_c$  empleando técnicas de teledetección, y ha sido aplicado y validado con éxito en diferentes lugares de todo el mundo. En METRIC, la  $ET_c$  se determina empleando imágenes procedentes de los satélites Landsat, y recientemente ha sido adaptado a condiciones mediterráneas para cultivos herbáceos y leñosos por Santos *et al.* (2008; 2012).

<sup>13</sup> Cuando el cultivo implantado en el lisímetro es una pradera de gramíneas con las características descritas en la nota 3, las medidas realizadas son de evapotranspiración de referencia. Estos valores tienen una gran precisión y son de suma utilidad para el ajuste de ecuaciones más simples a las condiciones climáticas regionales.

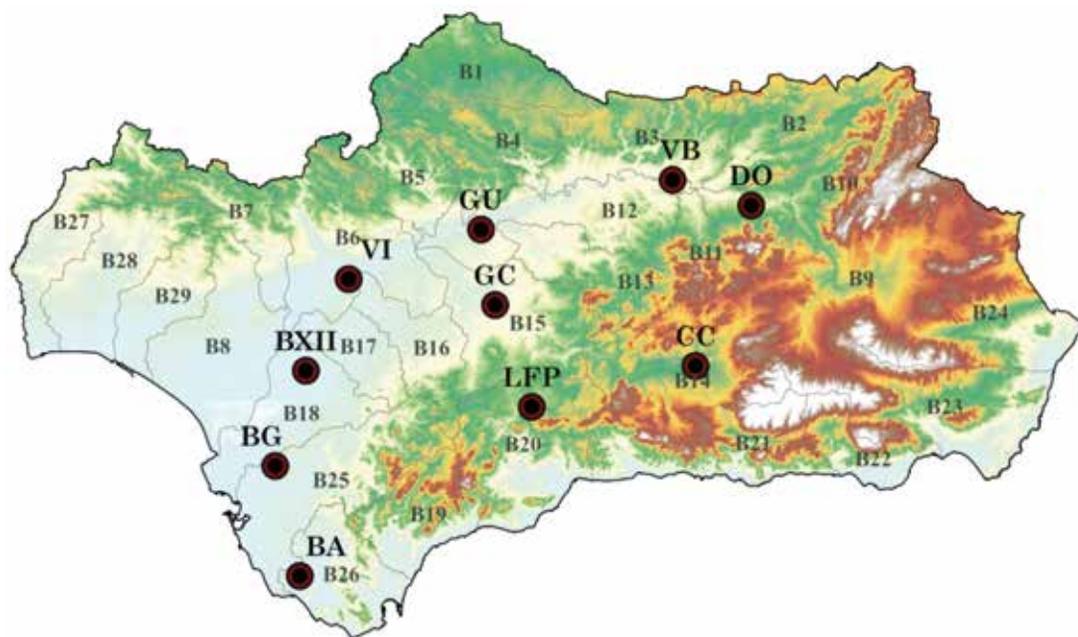


Figura 1. Localización de las 10 zonas regables y de las 29 subcuencas utilizadas en el estudio.

## ¿CÓMO REALIZAR UNA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS O UNA ESTIMACIÓN DE COSECHA?

La determinación del calendario de riegos para un cultivo o la estimación de la cosecha son procesos complejos en los cuales intervienen una gran cantidad de factores, y para cuyo desarrollo se emplean modelos de simulación.

Recientemente FAO<sup>14</sup> ha desarrollado el modelo AquaCrop<sup>15</sup>. Este modelo ha sido usado para diferentes cultivos en todo el mundo bajo diversas condiciones climáticas, teniendo entre otras aplicaciones el diseño de estrategias de riego deficitario y el desarrollo de modelos económicos para apoyo en la toma de decisiones (Geerts *et al.*, 2010; García-Vila y Fereres, 2012).

El modelo AquaCrop permitió evaluar la calidad de la información agrometeorológica proporcionada por las técnicas de teledetección, por medio del análisis de la programación de riegos y la estimación de cosecha para el cultivo

del maíz en 10 zonas regables bajo las condiciones climáticas del sur de España.

La región de Andalucía, situada al sur de España, ha constituido la zona de estudio donde se han desarrollado algunas de las aplicaciones más novedosas usando técnicas de teledetección para la determinación de variables agro-climáticas. Para ilustrar la aplicación de técnicas de teledetección en aspectos hidrológicos, la región ha sido dividida en 29 subcuencas (Figura 1), mientras que para ilustrar el impacto del empleo de las técnicas de teledetección sobre la gestión de los recursos hídricos en el regadío se han seleccionado 10 zonas regables, centrándonos en la zona regable del Genil-Cabra (GC en la Figura 1) para la aplicación del modelo METRIC.

## ALGUNAS APLICACIONES PRÁCTICAS DEL EMPLEO DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE VARIABLES AGROMETEOROLÓGICAS

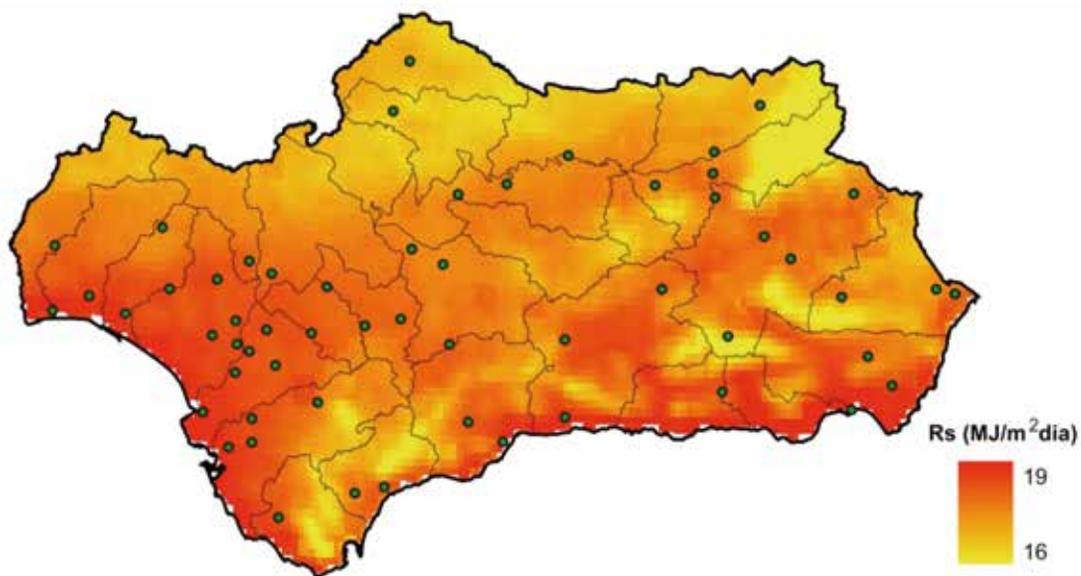
### a) Radiación solar y evapotranspiración de referencia

La radiación solar ( $R_s$ ) es un componente básico para la determinación de las necesidades hídi-

<sup>14</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

<sup>15</sup> Modelo de cultivo que se centra en la simulación de la cosecha en condiciones de limitación de agua (Steduto *et al.*, 2012).

Figura 2. Mapa de radiación solar ( $R_s$ ) media diaria para Andalucía en el año 2007. Los círculos indican la posición de las estaciones meteorológicas disponibles de la red SIAR.



cas de los cultivos al ser la fuente de energía del proceso de la evapotranspiración. La radiación estimada con técnicas de teledetección obtuvo muy buenos resultados en comparación con las mediciones obtenidas por la estación meteorológica de la red SIAR situada en Córdoba. Así los resultados empleando técnicas de teledetección fueron ligeramente inferiores a los observados por la estación meteorológica, con una subestimación media de  $0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , correspondiente a errores relativos por debajo del 10%. Los mapas de  $R_s$  acumulada proporcionados por la nueva metodología permiten realizar estudios sobre la evolución de la radiación a lo largo del año con una resolución espacial<sup>16</sup> muy precisa. Así en la Figura 2 se observa el valor diario medio para Andalucía, donde en las zonas costeras y áridas se encontraron los valores más altos (con valores de  $R_s$  alrededor de  $19,1 \text{ MJ / m}^2$ ). El Valle del Guadalquivir presentó valores máximos en torno a  $17,6 \text{ MJ / m}^2$ , mientras que en las zonas montañosas los valores de  $R_s$  no rebasaron los  $15,9 \text{ MJ / m}^2$ .

La determinación precisa y espacialmente distribuida<sup>17</sup> de la  $ET_0$  es uno de los mayores retos

<sup>16</sup> Se puede definir como el tamaño del objeto más pequeño capaz de ser observado en una imagen. Esta resolución viene fijada por el tamaño del pixel que constituye una imagen. Por ejemplo el satélite Landsat proporciona imágenes con una resolución espacial de 30 metros y el satélite MSG de 3 kilómetros.

<sup>17</sup> Información disponible para la totalidad de celdas en las que puede ser dividido un territorio.

en los ámbitos de la agronomía y la hidrología. Para mostrar la contribución de las técnicas de teledetección, basándose en los mapas de radiación previamente descritos, se determinó la evapotranspiración de referencia a escala diaria para una región semi-árida situada al sur de España. Gracias al empleo de técnicas de teledetección se obtuvieron mapas diarios de  $ET_0$  con una resolución espacial de aproximadamente  $9 \text{ Km}^2$ , siendo agregados estacional y anualmente. En los mapas de  $ET_0$  anual se detectan diferentes zonas con valores claramente diferentes, con los mayores valores de  $ET_0$  localizados en las secciones media e inferior del Valle del Guadalquivir, en las zonas costeras y en las zonas áridas situadas al Este de Andalucía (Figura 3). El valor máximo de  $ET_0$  estimado para el año 2007 en Andalucía fue en torno a  $1390 \text{ mm}$ . En el lado opuesto los valores más bajos de  $ET_0$  se encontraron en las zonas montañosas situadas al Este de la región con valores de  $ET_0$  iguales a  $1000 \text{ mm}$ . Al analizar esta distribución espacial de la  $ET_0$  a escala estacional, la zona de valores máximos se desplazó desde la zona media-superior del Valle del Guadalquivir en verano, hasta las zonas costeras y la sección inferior del Valle del Guadalquivir en invierno.

Las diferencias medias en la estimación de la  $ET_0$  entre Penman-Monteith y el empleo de técnicas de teledetección fueron muy peque-

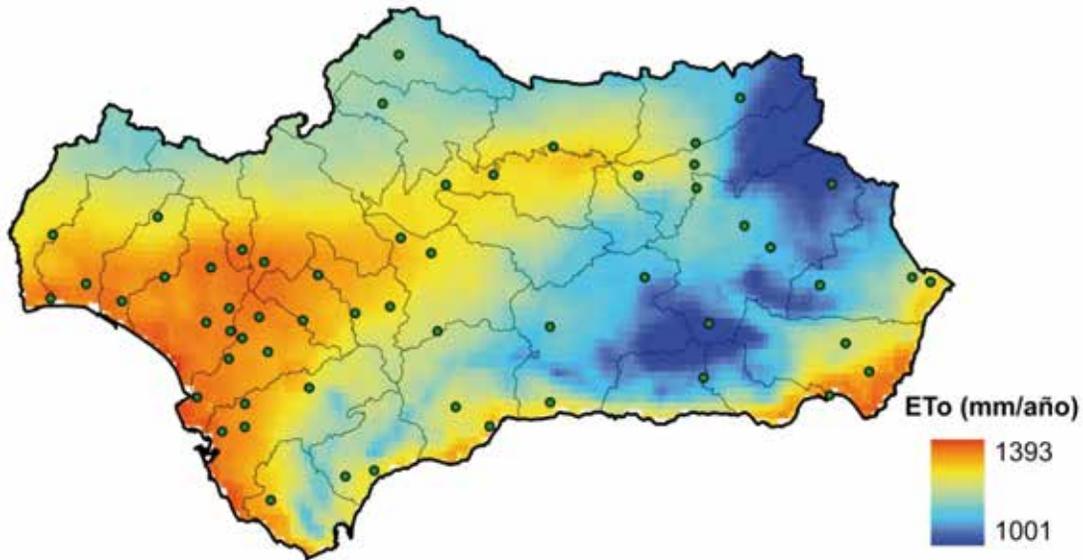


Figura 3. Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) diaria acumulada en Andalucía para el año 2007 utilizando técnicas de teledetección.

ñas, con una subestimación generada con las técnicas de teledetección del 3.3% respecto a la ecuación de Penman-Monteith. Igualmente analizando cada zona de forma individual, las técnicas de teledetección generaron aceptables valores extremos, oscilando entre subestimaciones máximas del 10.2% y sobreestimaciones máximas del 6.9%.

Otra aplicación del empleo de técnicas de teledetección fue la determinación de la variabilidad de la  $ET_0$  en las diferentes subcuencas en las que se dividió el territorio andaluz (Figura 3). Así, algunas cuencas mostraron una gran variabilidad de  $ET_0$ , como la cuenca denominada Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz que varió entre 1000 y 1310 mm. Igualmente se determinó que la variabilidad espacial de la  $ET_0$  fue mayor durante invierno y otoño, comparada con la encontrada durante la primavera y verano. Esta gran variabilidad pone de relieve la gran incertidumbre en el uso de valores de  $ET_0$  proporcionados por redes de estaciones meteorológicas, donde las medidas de  $ET_0$  son puntuales y con frecuencia no representativas de zonas incluso cercanas geográficamente (Figura 3).

Estos resultados muestran el gran potencial del empleo de técnicas de teledetección aplicadas a la determinación de variables agrometeorológi-

cas, permitiendo la obtención de mapas diarios de radiación solar y  $ET_0$  con una resolución espacial precisa a nivel regional.

#### b) Mejora de la programación de riegos

Aunque la programación de riegos está directamente relacionada con la precipitación, la  $ET_0$  también juega un papel importante y por lo tanto el método para determinar la  $ET_0$  afecta de manera significativa a la programación de riegos. Esta circunstancia hace necesaria la búsqueda de métodos alternativos a la ecuación de Penman-Monteith, la cual como anteriormente se expuso, requiere del uso de una gran cantidad de información meteorológica muchas veces no disponible.

Para cuantificar el efecto del método de cálculo de la  $ET_0$ , se procedió a la programación de riegos para el cultivo de maíz con el modelo AquaCrop, basándose en los valores de  $ET_0$  calculados por la ecuación de Penman-Monteith y otras metodologías alternativas, como las técnicas de teledetección o una metodología que tiene en cuenta una práctica habitual de agricultores y técnicos cuando no se dispone de información meteorológica de una estación cercana, y que consiste en utilizar los datos de la estación disponible más próxima.

El uso de Penman-Monteith generó un volumen de riego medio de 520 mm variando desde 442 mm para la zona regable del Bajo Guadalquivir (BG), a 635 mm para la zona regable de Laguna Fuente (LFP) Piedra. Usando como referencia los volúmenes de riego determinados con Penman-Monteith, las técnicas de teledetección generaron una subestimación media muy limitada del 2,6%. Considerando individualmente las zonas regables y campañas de riego, la máxima subestimación fue de alrededor del 14%, mientras que la máxima sobreestimación fue del 12%. Así, aquellas zonas con mayores diferencias en  $ET_0$  al emplear Penman-Monteith frente al uso de la teledetección fueron las zonas con mayores diferencias entre volúmenes de riego (zonas regables de Donadío y Canal del Cacín). Finalmente, utilizando la estación disponible más cercana se generaron volúmenes de riego próximos a los generados con Penman-Monteith, con sobreestimaciones del 0,5%. Sin embargo, al analizar cada zona regable de forma individual se determinaron importantes divergencias, con errores máximos en torno al 13%. Las diferencias específicas para cada zona se compensaron al calcular el valor medio, pero son reveladas al realizar el estudio de forma específica para cada zona y campaña de riegos.

En condiciones semi-áridas caracterizadas por escasas precipitaciones, la producción de maíz es claramente dependiente de la cantidad de riego aplicado, pero también es preciso tener en cuenta el momento de aplicación de ese volumen de riego. De esta forma la cosecha obtenida se convierte en un excelente indicador de la calidad de la programación de riego realizada, puesto que otros factores no asociados al riego como plagas o enfermedades no son considerados para la estimación de cosecha por el modelo AquaCrop.

La cosecha media de maíz estimada por el modelo AquaCrop para las 10 zonas regables consideradas en el estudio (Figura 1) empleando la  $ET_0$  de Penman-Monteith fue de 12,6 t/ha. Usando los calendarios de riego basados en la  $ET_0$  calculada con técnicas de teledetección la

cosecha estimada fue similar (12,3 t/ha), suponiendo una subestimación del 2,2%. Estos valores resaltan la gran calidad de los calendarios generados con técnicas de teledetección. Las pequeñas diferencias en cosecha al emplear técnicas de teledetección en lugar de emplear la ecuación de Penman-Monteith fueron debidas a diferencias en la estimación de la  $ET_0$ , que generaron diferencias en el volumen de riego necesario; así aquellas zonas con mayores diferencias entre volúmenes de riego estimados entre ambas metodologías fueron las zonas con mayores caídas en cosecha (Zonas Regables del Donadío y Canal del Cacín).

Finalmente, los calendarios de riego basados en el uso de la estación meteorológica disponible más cercana proporcionaron valores medios de cosecha satisfactorios, con subestimaciones limitadas al 2,3%. Sin embargo, al analizar específicamente cada zona y campaña de riego los errores generados en los calendarios de riegos produjeron puntuales pero severas caídas en el rendimiento de hasta el 28,9%. Este hecho fue causado por el desajuste de los calendarios de riego a las condiciones meteorológicas locales, generando en determinadas zonas y campañas un significativo estrés en los cultivos. Estos resultados confirman que el uso de información meteorológica de estaciones localizadas lejos de las zonas objeto de estudio puede generar caídas significativas en el rendimiento de los cultivos, y es por ello que su uso debe ser considerado en zonas con un amplio conocimiento de las condiciones meteorológicas, y siempre con cautela.

Considerando estos resultados se ha demostrado la utilidad del empleo de técnicas de teledetección para la generación de calendarios de riego a la hora de mejorar la gestión de los recursos hídricos a escala regional. Sus resultados son comparables a los obtenidos con Penman-Monteith, pero con unos requerimientos de información mucho menores, lo que hace del empleo de las técnicas de teledetección una herramienta de gran utilidad y aplicabilidad a la gestión integral de recursos a nivel de cuenca o región.

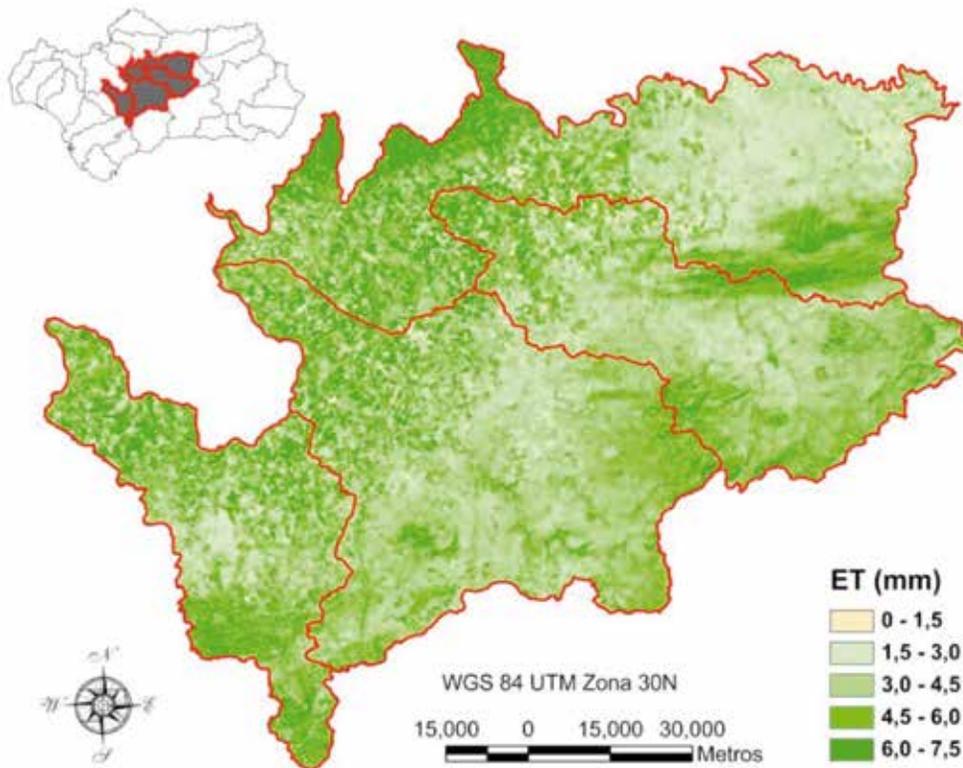


Figura 4. Localización de las subcuencas y mapa de evapotranspiración real diaria de las mismas obtenido con el modelo METRIC para el día 14 de Mayo de 2007.

### c) Evapotranspiración de cultivo aplicada a la gestión del riego

El modelo METRIC fue aplicado al Valle del Guadalquivir con imágenes procedentes del satélite Landsat 5 TM. Las imágenes obtenidas tienen una resolución espacial de 30 m para la información similar a la que percibe el ojo humano, y 120 m para la información de temperatura de la superficie terrestre, permitiendo la realización de análisis a diferentes escalas; desde parcela hasta cuenca. El estudio se ha centrado en diferentes subcuencas del Río Guadalquivir (Guadajoz, Bajo Genil, Corbones y Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz; Figura 4), situadas en Andalucía, sur de España. La Figura 4 muestra la localización de dichas subcuencas y un mapa de evapotranspiración real ( $ET_c$ ) diaria de las mismas obtenido con el modelo METRIC para un día de primavera del año 2007.

Los valores medios de  $ET_c$  diarios de cada subcuenca resultaron semejantes entre sí, con valores cercanos a los 4 mm. Sin embargo,

dentro de cada subcuenca se detectó una gran variabilidad, llegando a alcanzar el 40% en la subcuenca denominada Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz. Esta alta variabilidad fue causada por la diferencia de manejos y cultivos, y justifica la necesidad de realizar análisis espacialmente distribuidos, siendo las técnicas de teledetección herramientas de gran utilidad para este fin. El cociente entre la  $ET_c$  (que caracteriza el estado de los cultivos) y la  $ET_o$  obtenida mediante técnicas de teledetección dio como resultado los llamados coeficientes de cultivo reales ( $K_c$ ) de cada subcuenca, demostrando el gran potencial de la combinación de ambas metodologías descritas en este trabajo. El conocimiento preciso de los coeficientes de cultivo es fundamental para una correcta gestión de los recursos hídricos y son la base para la programación de riegos.

La aplicación de técnicas de teledetección y el modelo METRIC también proporcionó otras variables de gran utilidad a la hora de la caracterización de la superficie terrestre. Así, información

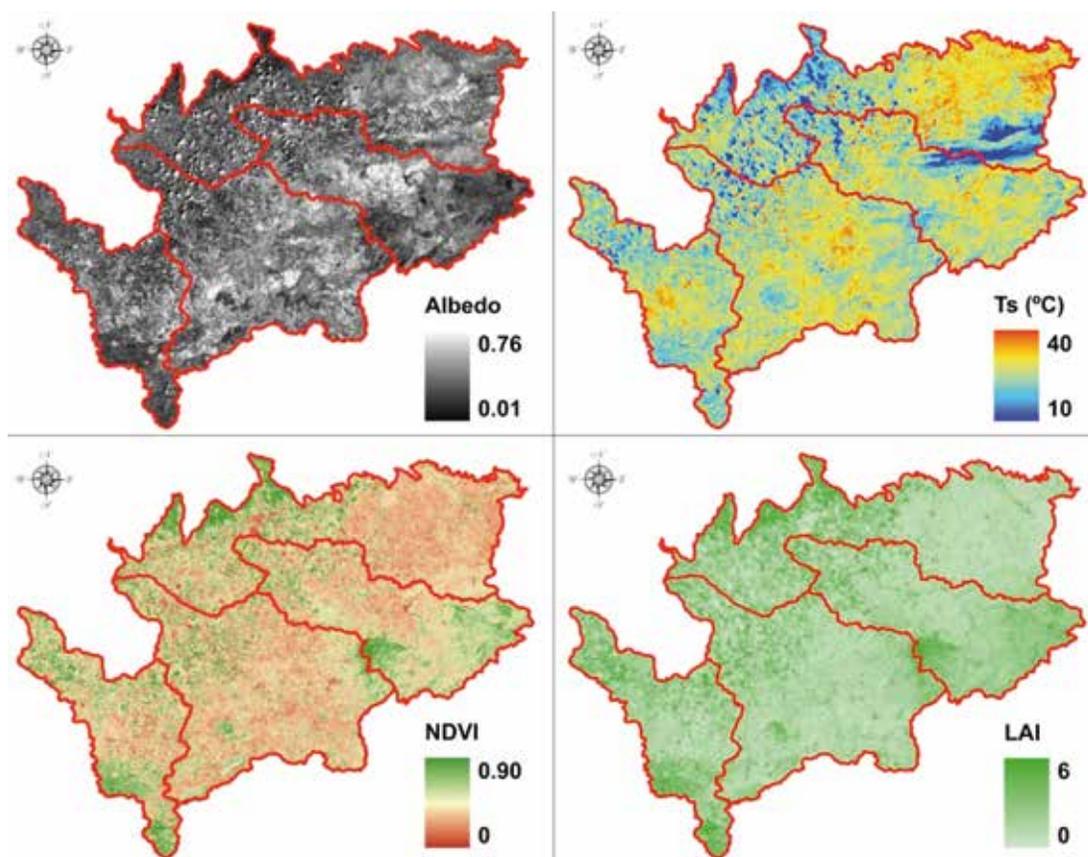


Figura 5. Mapas de albedo, temperatura superficial, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y LAI (*Leaf Area Index*) del día 14 de mayo de 2007 obtenidos con el modelo METRIC.

relativa a albedo<sup>18</sup>, índices de vegetación<sup>19</sup> (como NDVI o LAI), o temperatura de la superficie también fue determinada para las subcuencas consideradas anteriormente (Figura 5).

Estos productos obtenidos con técnicas de teledetección son de suma utilidad para la realización de estudios hidrológicos y evaluación de recursos hídricos subterráneos (Allen *et al.*, 2007b), estudios sobre vegetación de ribera, para la evaluación de cambios de uso de suelo a nivel de cuenca, o para la mejora de la gestión de los recursos hídricos en el regadío (Santos *et al.*, 2008).

Gracias a la resolución espacial del satélite Landsat 5 TM, estos trabajos también han tenido su aplicación a nivel de zona regable y parcela. Así,

<sup>18</sup> Es la relación existente entre la radiación reflejada por un objeto con respecto a la que incide sobre el mismo. Su uso es de gran importancia para conocer la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre.

<sup>19</sup> Son variables que permiten estimar la cantidad, calidad y desarrollo de una cubierta permitiendo conocer el estado general del cultivo.

las técnicas de teledetección han permitido conocer la variabilidad del riego dentro de una zona regable o la uniformidad de aplicación del riego<sup>20</sup> en parcela. Estos análisis permiten evaluar la existencia de problemas derivados de un deficiente manejo del riego por parte del agricultor, que tienen como consecuencia la caída de rendimiento y/o el gasto excesivo de agua. Así, una alta variabilidad del manejo indicará que la gestión del riego en la zona no es óptima. Tradicionalmente esta evaluación se realiza por medio del uso de contadores y entrevistas en campo pero esta labor no es fácil de llevar a cabo debido a la deficiente modernización de las zonas y el gran número de usuarios a analizar. En este punto el empleo de técnicas de teledetección a nivel de parcela es una solución muy satisfactoria. En la Figura 6 se muestra la

<sup>20</sup> Es un indicador de la forma en la que se ha distribuido el riego en la parcela. Cuanto mayor sea esta uniformidad mejor aplicación del riego se ha realizado permitiendo ahorro de agua y mejora en los rendimientos. Valores mayores al 90% son considerados óptimos mientras que valores por debajo del 50% no son aceptables y deben ser corregidos.

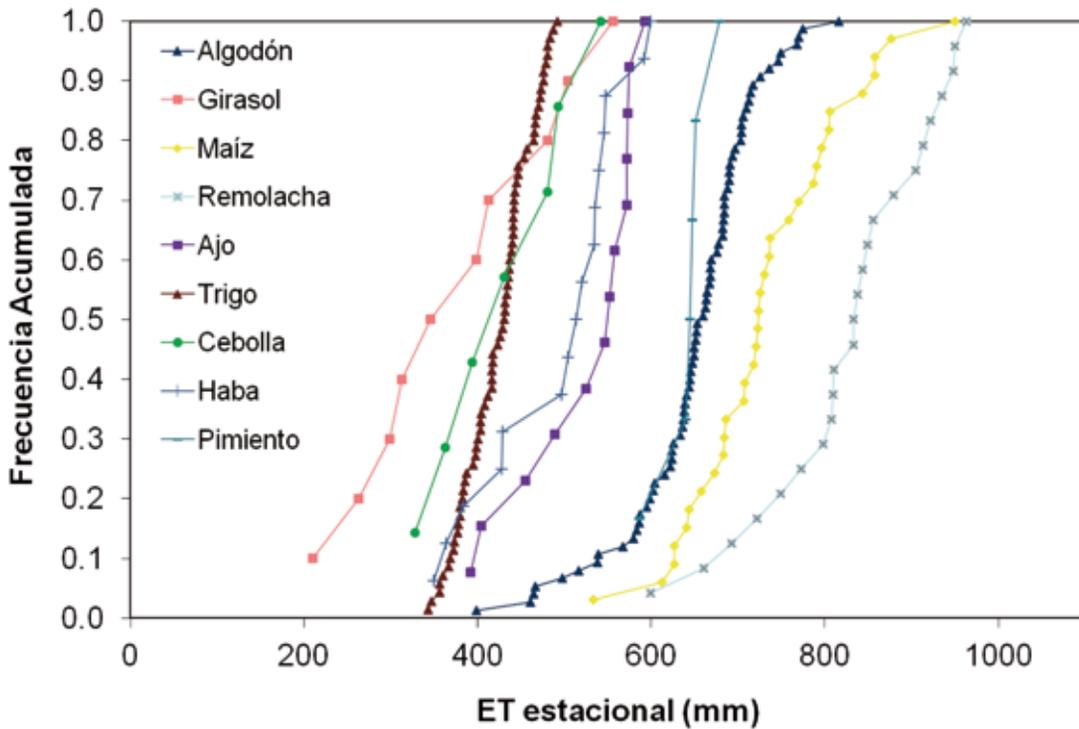


Figura 6. Curvas de frecuencia acumulada de los valores de  $ET_c$  estacional en la Zona Regable del Genil – Cabra para los cultivos más representativos.

evapotranspiración de cultivo determinada por METRIC en cada parcela de la Zona Regable del Genil – Cabra, agrupada por cultivos. Se comprueba la gran variabilidad existente en  $ET_c$ , lo que es indicador de errores en la gestión del riego en un porcentaje muy significativo de las parcelas, y que difícilmente es detectable sin el uso de técnicas de teledetección.

La información proporcionada por METRIC integrada con un modelo de balance de agua<sup>21</sup>, permite obtener un calendario de riegos específico a cada parcela, ajustado a todas las características específicas del cultivo. De esta forma se puede aportar el riego en el momento más conveniente con un menor consumo de agua. Al comparar los calendarios desarrollados con METRIC con aquellos generados según la metodología propuesta por FAO (Allen *et al.*, 1998) las diferencias fueron muy significativas, generándose en la zona regable del Genil – Cabra un importante ahorro de agua para los cultivos de algodón y maíz (alrededor del 20% y

del 10% respectivamente), y evitando pérdidas por estrés en ajo y remolacha (un 10% y un 21% respectivamente). Esto fue causado por la incapacidad de los modelos tradicionales de detectar cambios en la fecha de siembra, en la duración del ciclo de los cultivos o cualquier otra incidencia que afecte a su desarrollo, los cuales son fácilmente detectados con el empleo de técnicas de teledetección.

Además de la programación de riegos, son múltiples las aplicaciones de la determinación de la  $ET_c$  a nivel de parcela que proporciona METRIC. Entre estas aplicaciones destacamos la determinación de la productividad del agua<sup>22</sup>, la eficiencia del riego<sup>23</sup> aplicado en parcela y del volumen de riego empleado por el agricultor.

Para la determinación de la productividad del agua es preciso estimar la cosecha obtenida. Para la aplicación de esta metodología se escogió la Zona Regable del Genil – Cabra (Córdo-

<sup>21</sup> Modelo que contabiliza tanto las entradas (lluvia, riego) como salidas (evaporación, transpiración) de agua de la superficie. Su uso es común en todo el mundo para la realización de calendarios de riego (Allen *et al.*, 1998).

<sup>22</sup> Se define como el cociente entre la producción obtenida y la cantidad de agua de riego aportada. Es un indicador de gran utilidad para la gestión de los recursos hídricos.

<sup>23</sup> Indicador que considera el agua realmente empleada por el cultivo frente al total aplicado.

ba) en la cual se determinó la cosecha empleando técnicas de teledetección y en la que se obtuvieron resultados muy satisfactorios, con un error medio comprendido entre el 8,7% para el algodón y el 16,5% para la remolacha. Igualmente se determinó que el ajo fue el cultivo con mayor productividad del agua de riego (3 €/m<sup>3</sup>), mientras que el maíz fue el menos productivo (0,20 €/m<sup>3</sup>). La determinación precisa de estos valores para cada parcela que compone la zona regable demuestra el potencial de las técnicas de teledetección para el asesoramiento en la mejora de la gestión del riego.

La información sobre  $ET_c$  proporcionada por METRIC también puede ser utilizada para establecer la eficiencia del riego en parcela. Para ello es preciso disponer de registros reales de volúmenes de agua aplicados en parcela. Conocer la eficiencia del riego permite identificar aquellas parcelas que podrían necesitar mejoras en la gestión del riego. Así, la eficiencia media en parcela en la Zona Regable del Genil - Cabra se estimó en 0,77, lo cual puede ser considerado como un valor adecuado, pero se detectaron ciertas parcelas con eficiencias inferiores a 0,6, las cuales requieren de una mejora de la gestión del riego.

Finalmente, empleando los valores de  $ET_c$  de METRIC también es posible realizar una estimación del volumen de riego aplicado por los agricultores en parcela. Para ello es preciso contar con valores aproximados de eficiencia a nivel de parcela. Su aplicación a la Zona Regable del Genil - Cabra proporcionó resultados muy prometedores siendo una herramienta de gran utilidad para la identificación de riegos procedentes de aguas subterráneas o para el seguimiento de restricciones en el suministro a nivel de parcela y zona regable.

## CONCLUSIONES

Las técnicas de teledetección han aportado en los últimos años avances muy significativos en los campos de la agricultura y la hidrología. El empleo de satélites como los de las series Landsat y Meteosat ha supuesto un avance aún ma-

yor, posibilitando el desarrollo de herramientas de gran utilidad para la mejora de la gestión de los recursos hídricos.

El uso de técnicas de teledetección (LSA SAF) junto con herramientas de pronóstico meteorológico (ECMWF) integradas en metodologías ajustadas a las condiciones regionales han permitido determinar la evapotranspiración de referencia a nivel regional. Esta herramienta constituye un avance de gran importancia, en especial para aquellas zonas en las que la disponibilidad de información meteorológica es limitada o de baja calidad. En este estudio se ha mostrado la gran utilidad de esta metodología en la determinación de  $ET_o$  para la región de Andalucía. Este trabajo constituye uno de los primeros estudios a nivel europeo de análisis de la  $ET_o$  a nivel regional, sin la necesidad de contar con una densa red de estaciones meteorológicas, evitando los altos costes asociados y las incertidumbres en la medida causadas por deficientes condiciones de referencia y mantenimiento. Otra aplicación de las técnicas de teledetección ha sido su empleo en la determinación de calendarios de riegos adaptados a las condiciones meteorológicas presentes en la zona específica de estudio, sin necesidad de recurrir a procedimientos con altos requerimientos de información. Así el empleo de técnicas de teledetección frente al uso de la ecuación de Penman-Monteith generó diferencias muy pequeñas en la programación de riegos y en la cosecha simulada para maíz en diferentes zonas andaluzas (diferencias del 2,6 y 2,2% respectivamente).

En el ámbito de la evapotranspiración de los cultivos los avances no han sido menos significativos. Modelos de simulación junto a imágenes del satélite Landsat han permitido realizar estudios para la programación de riegos ajustados a las condiciones locales de cada finca, y para la determinación de incidencias (falta de uniformidad de riego, plagas o enfermedades) que se reflejen en la generación de estrés a los cultivos. Además, el empleo del modelo METRIC para la estimación de la eficiencia del riego aplicado en parcela para la estimación de

volúmenes de riego aplicado o para la determinación de la productividad del agua han contribuido de forma decisiva en la mejora de la gestión de los recursos hídricos.

Este trabajo ha tratado de mostrar algunos de los últimos avances en técnicas de teledetección aplicadas a la mejora de la gestión de los recursos hídricos. Nuevos satélites y metodologías contribuirán en el medio plazo a esta tarea por medio de la mejora en la resolución espacial y temporal de las medidas, siendo capaces de generar herramientas de asesoramiento integral, asegurando la sostenibilidad de los sistemas agrarios y forestales en el futuro. Si bien el estudio se ha centrado en Andalucía, las metodologías aquí descritas son de total aplicación al resto de España y constituyen herramientas de suma utilidad para la mejora de la gestión de los recursos hídricos en la totalidad del estado español.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos P10-EXC10-0036/AGR-6126 y PR.AVA.AVA201301.10 de la Junta de Andalucía y por el proyecto RTA2011-00015-00-00 del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), y ha sido supervisado por EUMETSAT, la Universidad de Idaho, EEUU, y la Universidad de Córdoba. ❀

## REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56. FAO, Roma.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *J Irrig Drain Eng ASCE*, 133 (4), 380-394.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I.J., Robison, C.W., 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. *J Irrig Drain Eng ASCE*, 133(4), 395-406.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J Hydrol*, 212-213, 198-212.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2007. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 81, 7-30.
- Cristobal, J., Anderson, M.C., 2012. Regional scale evaluation of a MSG solar radiation product for evapotranspiration modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 9, 8905-8939.
- Cruz-Blanco, M., Lorite, I.J., Santos, C., 2014. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. *Agric. Water Manage*, 131, 135-145.
- De Bruin, H.A.R., Lablands, W.N., 1998. Reference crop evapotranspiration determined with a modified Makkink equation. *Hydrol. Process*, 12, 1053-1062.
- De Bruin, H.A.R., Trigo, I.F., Jitan, M.A., Temesgen, E.N., van der Tol, C., Gieske, A.S.M., 2010. Reference crop evapotranspiration derived from geo-stationary satellite imagery: a case study for the Fogera flood plain, NW-Ethiopia and the Jordan Valley, Jordan. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 14, 2219-2228.
- Fisher, D.K., Pringle III, H.C., 2010. Effect of reference ET method on irrigation scheduling model. In: 5th National Decennial Irrigation Conference. Paper number: IRR10-9814. Phoenix, Arizona, USA.
- García-Vila, M., Fereres, E., 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron*, 36, 21-31.
- Gavilán, P., Lorite, I.J., Tornero, S., Berengena, J., 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ETo in a semiarid environment. *Agric. Water Manage*, 81, 257-281.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agric. Water Manage*, 98, 213-216.
- Lorite, I.J., García-Vila, M., Carmona, M.A., Santos, C., Soriano, M.A., 2012. Assessment of the Irrigation Advisory Services' recommendations and farmers' irrigation management: a case of study in Southern Spain. *Water Resour. Manage*, 26, 2397-2419.
- Martínez-Romero, A., Ortega, J.F., de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A., 2012. Estimating models of global solar radiation with limiting data and its spatial distribution in Castilla-La Mancha. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, 108 (4) 426-449.
- Pereira, A.R., Pruitt, W.O. 2004. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agric. Water Manage*, 66, 251-257.
- Santos, C., Lorite, I.J., Tasumi, M., Allen, R.G., Fereres, E., 2008. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrig Sci*, 26, 277-288.
- Santos, C., Lorite, I.J., Allen, R.G., Tasumi, M., 2012. Aerodynamic parameterization of the Satellite-Based Energy Balance (METRIC) model for ET estimation in rainfed olive orchards of Andalusia, Spain. *Water Resources Management*, 26, 3267-3283
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., 2012. Crop Yield Response to Water. *FAO. Irrigation and Drainage Paper*, vol. 66. FAO, Rome.
- Sun, Z., Gebremichael, M., Ardö, J., de Bruin, H.A.R., 2011. Mapping daily evapotranspiration and dryness index in the East African highlands using MODIS and SEVIRI data. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 15, 163-170.
- Trigo, I.F., Dacamara, C.C., Viterbo, P., Roujean, J.L., Olesen, F., Barroso, C., Camacho-de-Coca, F., Carrer, D., Freitas, S.C., García-Haro, J., Geiger, B., Gellens-Meulenberghs, F., Ghilain, N., Meliá, J., Pessanha, L., Siljamo, N., Arbolada, A., 2011. The satellite application facility for land surface analysis. *Int. J. Remote Sens*, 32, 2725-2744.

# 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

<sup>1</sup> <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 m<sup>2</sup> (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  $\mu$ 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  $\mu\text{m}$ ; Verde, G: 0.5-0.6  $\mu\text{m}$ ; Azul, B: 0.6-0.7  $\mu\text{m}$ ) al infrarrojo cercano (NIR: 0.7-0.9  $\mu\text{m}$ ). 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)

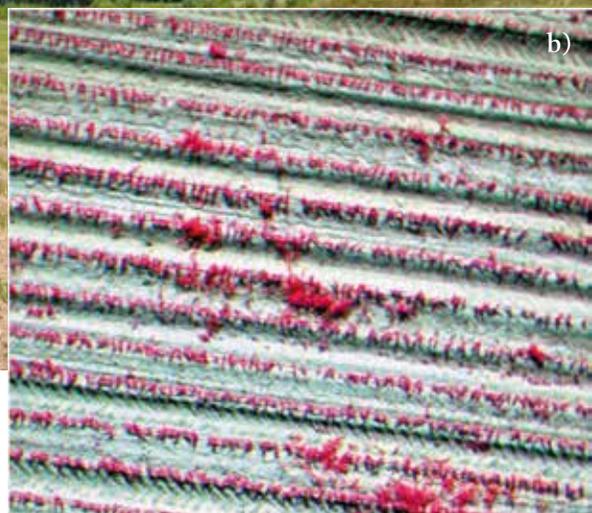


Figura 4. a) UAV equipado con sensor multispectral volando una parcela de maíz infestada de rodales de malas hierbas en época temprana; b) Detalle de la imagen formada por las bandas Verde, Rojo e Infrarrojo Cercano sobre la parcela de maíz estudiada. Se pueden observar las líneas de cultivo y la presencia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

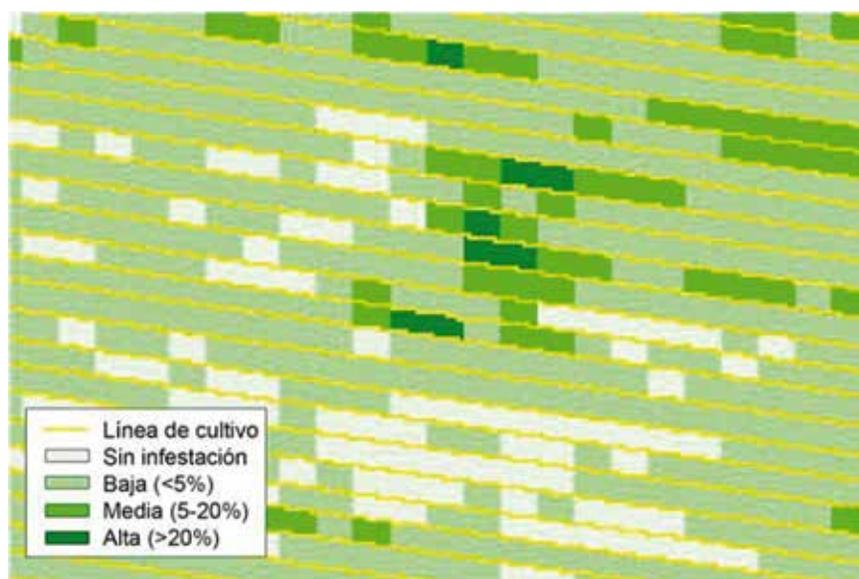
El estrés hídrico provoca en los cultivos el cierre estomático cuyo principal efecto es la disminución de la tasa de transpiración lo que finalmente provoca un incremento de la temperatura de la hoja. Este aumento de temperatura puede monitorizarse mediante imágenes procedentes de UAV con información 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 ( $\Psi_h$ ).

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  $\Psi_h$  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  $\Psi_h$  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-

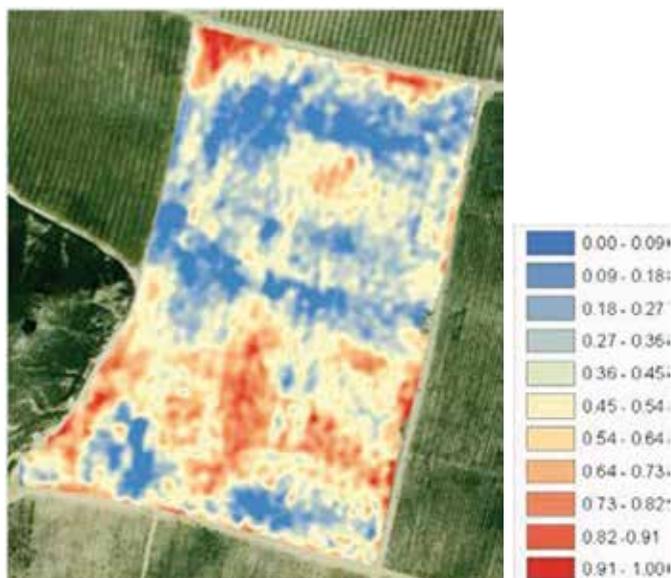
Dado que el aporte de agua tiene influencia en la composición química de la uva y por consiguiente en la calidad del mosto y del vino, los autores se plantearon obtener una cartografía que informara de la variabilidad espacial del estado hídrico de cada cepa con el fin de programar el riego de forma 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  $\Psi_h$  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  $\Psi_h$  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

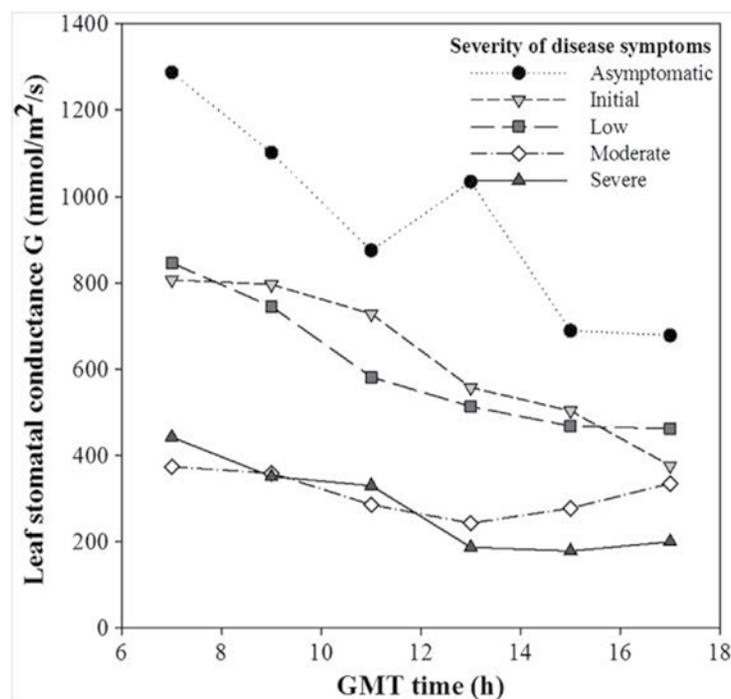


Figura 7. Resultados obtenidos por Calderón *et al.* (2013) de conductancia estomática diaria medida cada dos horas entre las 7:00 y 17:00 h en olivos infectados de Verticilosis con diferentes niveles de severidad.

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.

# Ambienta ya está en la Red

con todos sus contenidos digitalizados

**Puedes disfrutar de la revista  
ambienta gratuitamente  
también desde tu ordenador**



[www.revistaambienta.es](http://www.revistaambienta.es)

# Evolución instantánea del fuego a partir de un sistema integrado de sensores multispectrales y térmicos

**José Luis Sáiz Díaz**

Director de I+D (INAER). Doctor Ingeniero de Montes

En España las competencias en extinción de incendios forestales se han transferido a los gobiernos regionales, por lo que el papel del gobierno central, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, es apoyar con sus medios a los gobiernos regionales.

El sistema EINFOREX fue satisfactoriamente probado en la campaña de incendios de 2008, en medios del gobierno central, quien, en base a dicha experiencia, requirió su puesta en servicio en las campañas de 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013.

A partir de 2009, el sistema EINFOREX también fue implantado en los servicios de incendios de los gobiernos regionales de Extremadura, Castilla La Mancha, Murcia y Aragón, permaneciendo operativos hasta la actualidad.

Posteriormente en el año 2010, INAER fue adjudicataria del proyecto de I+D de mayor envergadura de Europa en materia de lucha contra incendios forestales, PROMETEO. El proyecto PROMETEO cubrió en mayor o menor medida las demandas del sector, con la participación de 15 empresas españolas líderes en su sector, lideradas por INAER, sumando un presupuesto total de 23 millones de euros. Una de las prin-

cipales líneas de desarrollo de PROMETEO han sido las herramientas de observación y los sistemas expertos para la toma de decisiones en emergencias, proyecto que dará continuación a PROMETEO en un nuevo proyecto de desarrollo tecnológico que INAER acaba de iniciar en octubre de 2013 con un proyecto de 4 millones de euros y cuyo objetivo concluirá con el lanzamiento de la nueva versión mejorada del actual sistema EINFOREX-B (Basic), la herramienta de observación y tratamiento de la información para la toma de decisiones EINFOREX-DMT (*Decision Making Tool*). La diferencia entre ambas herramientas radica en que, mientras la primera ofrece al Director de la Emergencia imágenes gráficas georeferenciadas (EO/IR) en tiempo real acompañadas de pronósticos de simulación, el segundo, además, aporta un software específico para la toma de decisiones que se apoya en la información aportada un nuevo sistema multispectral que caracteriza con mayor precisión el riesgo potencial de propagación del fuego.

## DESCRIPCIÓN OPERATIVA

Es de vital importancia la correcta ejecución de los trabajos de observación y reconocimiento

en las diferentes fases (aire y tierra) para optimizar el proceso, especialmente, la toma de imágenes en vuelo para su posterior tratamiento en tierra. Para ello se han establecido protocolos de trabajo, concretando de antemano la actuación ante las distintas instrucciones que el Director de Extinción pueda dar.

Estos protocolos establecen la trayectoria de las pasadas, el sensor que debe emplearse, la escala de trabajo, el grado de solape de las imágenes, etc.

Además de los protocolos de actuación se han elaborado manuales de uso de cada una de las aplicaciones así como del manejo de los equipos instalados en la aeronave que se facilitan al usuario en el correspondiente curso de formación.

Con el objeto de hacer una descripción exhaustiva del esquema operativo del sistema de observación EINFOREX, y teniendo en cuenta que INAER incorporará, en un futuro próximo,

una mejora sustancial del servicio al sustituir el EINFOREX-B por el EINFOREX-DMT, a continuación mostraremos en las figuras 1 y 2 los detalles de funcionamiento de cada uno de los dos sistemas.

### Descripción operativa del sistema EINFOREX-B (Basic)

En el momento en el que se comunica un incendio la aeronave despegua hacia la zona afectada, en la oficina técnica de Inaer se realiza una primera simulación con la que se evalúa una primera posible evolución del incendio y se determina el plan de vuelo para la aeronave. Este plan de vuelo es enviado al piloto de forma que pueda integrarlo.

Una vez en la zona del incendio la aeronave realiza un primer vuelo perimetral con el que se captura la información a partir de la cámara térmica y se envía, de forma redundante, tanto a la oficina técnica de Inaer como al puesto de mando avanzado. En el puesto de mando avan-

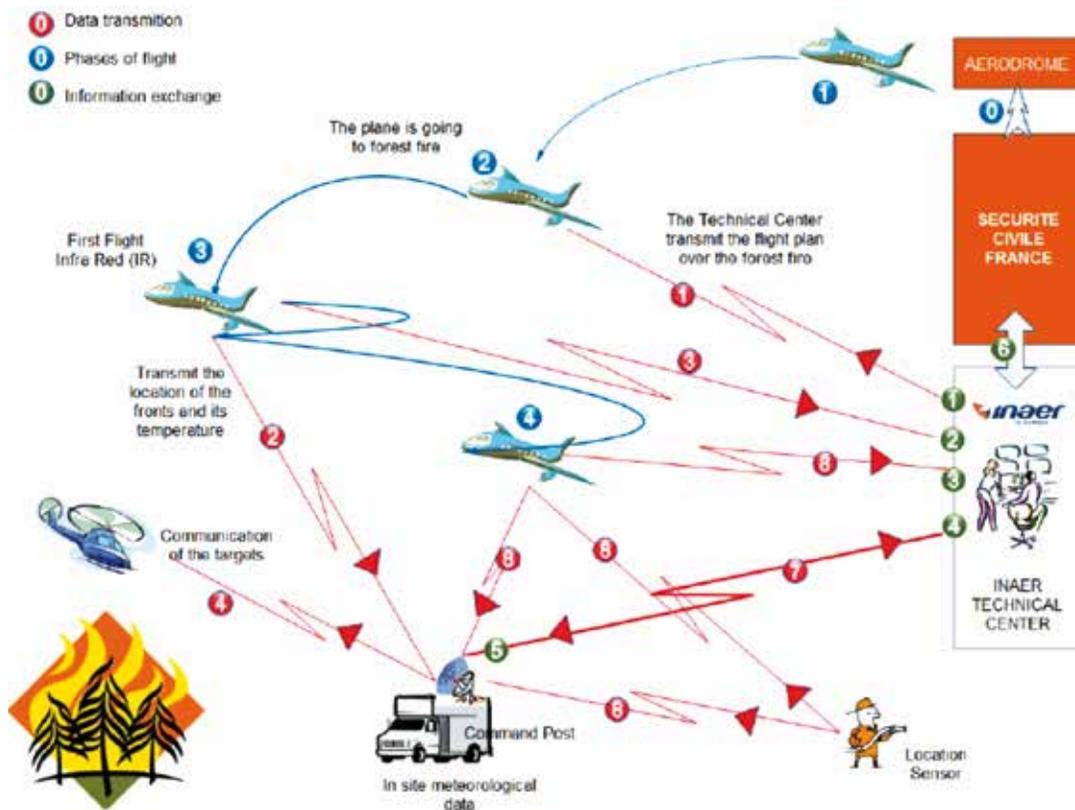


Figura 1. Configuración operativa del Sistema EINFOREX-B (Basic).



Figura 2. Equipos que integran el Sistema Aire, EINFOREX-B.

zado se emplea esta información para asignar y comunicar los objetivos a las aeronaves de descarga. Por otro lado, la información generada en la oficina técnica de Inaer se procesa integrándola en un GIS y suministrando esta información, junto con las simulaciones de la evolución del incendio, al puesto de mando avanzado a través de un visualizador web. Este vuelo perimetral y el consiguiente envío y procesado de información se repite cada 30 minutos.

Posteriormente al vuelo perimetral, la aeronave actúa como relé de comunicaciones de la posición de los brigadistas (aunque esta posición es detectada en todo momento que la aeronave se encuentre en el escenario del incendio) transmitiendo la misma al puesto de mando avanzado que a su vez la transmite a la oficina técnica de Inaer para su integración dentro del visualizador web. Adicionalmente, durante este periodo, la aeronave envía al puesto de mando avanzado información visual capturada a partir de las cámaras de foto y video y a su vez desde el puesto de mando avanzado se transmite a la oficina técnica de Inaer para su integración dentro del visualizador web.

Cabe destacar que toda la información procesada desde la oficina técnica de Inaer e integrada en el visualizar web está disponible para su consulta en tiempo real desde los centros de control provincial, regional o nacional, según se configure.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Arquitectura del sistema EINFOREX-B

El sistema EINFOREX-B cuenta con la siguiente estructura:

#### A) Subsistema aire:

Se realiza la captura y transmisión de imágenes georeferenciadas y parametrizadas. El sistema está constituido por varios elementos:

- *Plataforma externa aerotransportada multisensorizada:*

Dotada de con cámara de video, sensor térmico y fotográfico y controlada desde el interior de la aeronave. Dicha plataforma ha sido diseñada

para permitir total libertad de giro en todas las direcciones del espacio, combinando rotaciones completas de 360° en dos planos (horizontal y vertical) de movimiento independiente. El anclaje de la plataforma permite diferentes configuraciones, adaptables al tipo de aeronave.

- *Unidad de Computación y Control:*

En el interior de la aeronave se aloja el ordenador que actúa como cerebro del sistema, ejecutando las órdenes que recibe del operador a través de los dispositivos periféricos (joystick y pantalla táctil).

- *Dispositivos periféricos:*

El joystick es uno de los dispositivos periféricos que permite la interacción del operador con el sistema. Desde el joystick, el operador inicia o apaga el sistema, controla la orientación de la plataforma externa, selecciona el sensor de trabajo, configura los diferentes parámetros de ajuste de dicho sensor y realiza las capturas.

Al igual que el joystick, la pantalla táctil es otro dispositivo periférico que maneja el operador. A través de la pantalla táctil, el operador visualiza las imágenes del sensor activo junto con el escenario virtual y permite gestionar el módulo de comunicaciones para el envío de imágenes al Centro de Mando.

#### B) *Subsistema de comunicaciones:*

El envío de imágenes fotográficas y clips de vídeo desde la aeronave se realiza mediante dos vías; directamente al puesto de mando avanzado (PMA) o/y al Centro de Control Provincial o Regional (CC).

En cuanto a la transmisión de vídeo en tiempo real se hace directamente al PMA, pudiendo dirigirse igualmente al CC, vía satélite si el cliente lo demanda.

De esta forma, a los PMA se les dota de mayor relevancia, garantizando la llegada de imágenes para ofrecer en el lugar de la emergencia la in-

formación de la manera más rápida y completa. El equipo de recepción de imágenes y vídeo es compacto e incluso permitiría ser aerotransportado.

#### C) *Software asociado:*

La actividad que se realiza se basa en la utilización de dos aplicaciones informáticas; Software Aire y Software Tierra, desarrolladas con la participación de la compañía Heligrafics bajo la denominación Observer.

*El Software Aire*, permite la recepción, consulta y archivado de imágenes georeferenciadas y parametrizadas.

Las imágenes fotográficas llevan asociadas información relativa a la captura como coordenadas GPS, velocidad, altitud o rumbo de la aeronave, permitiendo incorporar, además, información alfanumérica por parte del usuario de tierra.

Los clips de vídeo, de forma análoga a las imágenes fotográficas, también llevan información asociada relativa a los parámetros de captura con georeferenciación de cada frame.

El guardado de las imágenes permite concatenar una secuencia predeterminada por el usuario para facilitar el archivo de las mismas.

*Software Tierra:* Con esta aplicación se realiza el tratamiento de las imágenes (fusión sobre escenario 3D), las mediciones y la posterior exportación de la información. Finalmente, se realiza el almacenamiento de la información bajo diferentes formatos de tipo universal (archivos kmz/kml, tiff, ecw, shapefiles) para permitir la exportación tanto a aplicaciones de uso convencional (Google Earth), como a otras ampliamente extendidas en la gestión de incendios forestales (SIG).

Ambas aplicaciones, Aire y Tierra, permiten una personalización para el cliente, pudiendo incorporar logotipos y marcas de agua, así como elaborar informes automáticos.

### Arquitectura del sistema EINFOREX-DTM

El sistema EINFOREX-DMT cuenta con la siguiente estructura:

#### D) Subsistema aire:

Se realiza la captura y transmisión de imágenes georeferenciadas y parametrizadas. El sistema está constituido por varios elementos:

- *Plataforma externa aerotransportada multisensorizada:*

La plataforma está giroestabilizada en 4 ejes de forma que pueda minimizar el impacto de los movimientos del helicóptero en el proceso de captura de imágenes. De esta forma, el sistema de estabilización compensa tanto los movimientos propios de la aeronave como las vibraciones asociadas a los mismos, obteniéndose una estabilización por debajo de los 25 microradianes. Por otra parte la plataforma permite una rotación continua de 360°. Esta plataforma ha sido diseñada para integrar las cámaras multispectral, térmica y de video. Por otra parte, la plataforma incorpora un sistema de localización basado en GPS y una unidad

de medición inercial que permite asegurar una buena precisión en la georreferenciación de los datos capturados.

- *Sensor multispectral de alta resolución*

La cámara multispectral constituye un desarrollo especial realizado dentro del programa PROMETEO de detección y análisis de incendios forestales. La cámara multispectral posee 5 sensores en paralelo que permiten que exista un solo camino óptico, garantizando que la información de cada canal corresponda al mismo punto. Estos sensores están configurados en longitudes de onda determinantes para la obtención de información del combustible vivo y muerto.

- *Cámara Térmica*

La función principal de la cámara termográfica es la obtención a tiempo real de las temperaturas alcanzadas por el frente de llama. Sin embargo, la aplicación de la información térmica es aún más extensa. La información térmica se utiliza para evaluar el contenido de humedad del combustible y el estado de vigor de la vegetación. Este sensor ha sido seleccionado con



Figura 3. Equipos que integran el Subsistema Aire, EINFOREX-DMT.

una sensibilidad térmica específica para aplicaciones en la lucha contra incendios forestales.

- *Cámara de Video*

La cámara permite la captura de imagen continua, cuenta con un zoom óptico y digital de 120x y permite la grabación tanto en formato HD como SD.

- *Unidad de Computación y Control:*

En el interior de la aeronave se aloja el ordenador que actúa como cerebro del sistema, ejecutando las órdenes que recibe del operador a través de los dispositivos periféricos, en el caso del EINFOREX-DMT la unidad de computación se ajusta a las nuevas tecnologías aportadas por el proyecto PROMETEO.

- *Dispositivos periféricos:*

Mismas aplicaciones que el EINFOREX-B, incorporando un hardware y software tecnológicamente más avanzado.

#### E) *Subsistema de comunicaciones:*

El envío de la información generada se realiza desde la aeronave se realiza mediante dos vías:

- A través de vía GPRS/3G o conexión satelital en banda KU se envían las imágenes a un servidor central que almacena permanentemente la información y que permite la consulta en remoto desde cualquier CC.
- Por otra parte, vía microondas se realiza el envío directo de imágenes (fotográficas o clip de vídeo) a la Unidad Avanzada DMT, situada en las inmediaciones de la emergencia, de forma independiente de las redes generales de comunicación que la tecnología actual permite, asegurando la comunicación entre la aeronave y la unidad terrestre.

Asimismo, desde la Unidad Avanzada DMT se ha ideado un sistema redundante en cuanto a

las comunicaciones, pudiendo enviar las imágenes desde esta unidad al servidor y recibir la información procesada proveniente de la oficina técnica de Inaer vía GPRS/3G o bien vía satélite en banda Ku.

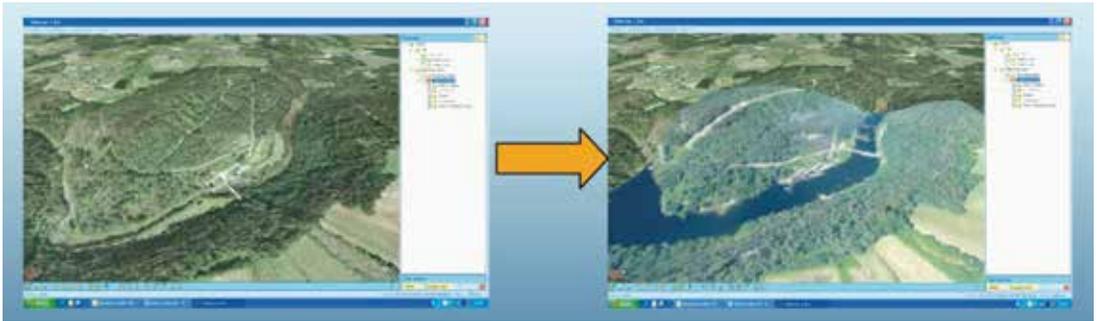
#### F) *Sistemas unidad avanzada DMT y centro de control:*

La actividad que se realiza se basa en la utilización de una aplicación informática: El software procesa la información obtenida mediante las cámaras multispectral y térmica de forma que pueda generar mapas dinámicos del combustible vivo y muerto, su humedad y estructura y las temperaturas a nivel terrestre del escenario del incendio. Esta información es enviada en tiempo real al CC y permite al propio software asistir en la toma de decisiones de tipo táctico tales como movilizar recursos, indicar puntos de (des)carga y generar alarmas asociadas a la seguridad de los intervinientes y de la población.

## RESULTADOS

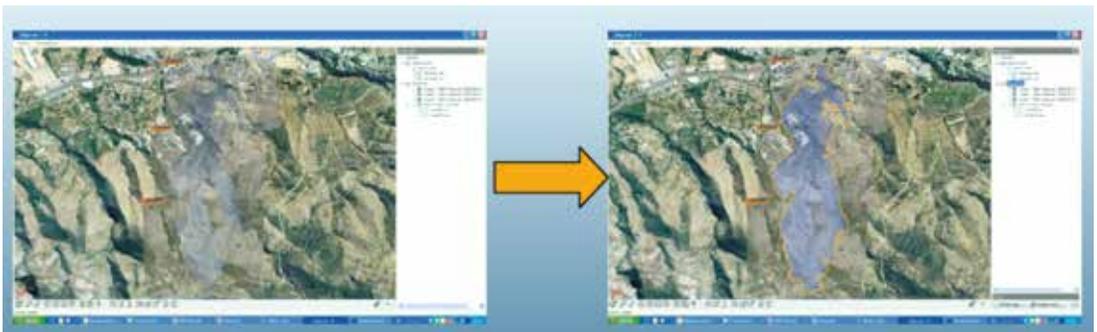
El sistema EINFOREX permite poner a disposición de los responsables de la emergencia la información actualizada de la zona afectada para facilitar la toma de decisiones. Esta información puede ofrecerse tanto "in situ" en un PMA como en remoto en cualquier Centro de Control (CC), ofreciendo:

- REPLANTEO DE LA ZONA AFECTADA EN 3D: Actualización de la cartografía de base (ortofotografía en 3D) mediante la proyección de las imágenes cenitales tomadas por la aeronave de observación. Esta funcionalidad es posible gracias a la georreferenciación de dichas imágenes en el momento de ser capturadas. Así es posible localizar la situación de cortafuegos, analizar cambios en las infraestructuras, visualizar el nivel de agua en un cauce, etc.
- MEDICIONES EN LA ZONA AFECTADA: Mediciones sobre la nueva cartografía a dis-



posición del Responsable de la Emergencia, en las UMMT o bien en el Centro Operativo, evaluando, por una parte, las dimensiones del incendio por la cuantificación del perímetro, realizando la inventariación de recursos activos y pasivos presentes en la zona y la localización de elementos sensibles que pudieran verse afectados.

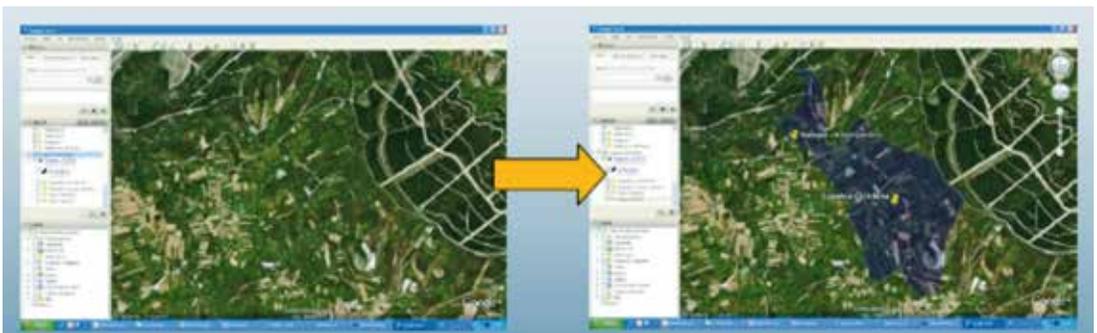
- d) EXPORTACIÓN A APLICACIONES GIS: Cualquier información puede ser exportada; imágenes y capas vectoriales.
- e) IMAGEN CONTÍNUA (VÍDEO): Visualización en tiempo real vía microondas, Transmisión de clip de video y Grabación digital, individual o dual de video térmico y visible.



c) ENVÍO A GOOGLE EARTH: La información (tanto imágenes, como proyecciones sobre el terreno o incluso capas vectoriales) puede remitirse vía e-mail bien desde el propio incendio o desde el Centro de Control Operativo (CC) a cualquier otro lugar para ser visualizada sobre la aplicación Google Earth.

Además el EINFOREX-DMT incorpora las siguientes las siguientes funcionalidades:

El sistema EINFOREX-DMT permite poner a disposición de los responsables de la emergencia la información actualizada de la zona afectada para facilitar la toma de decisiones. Esta



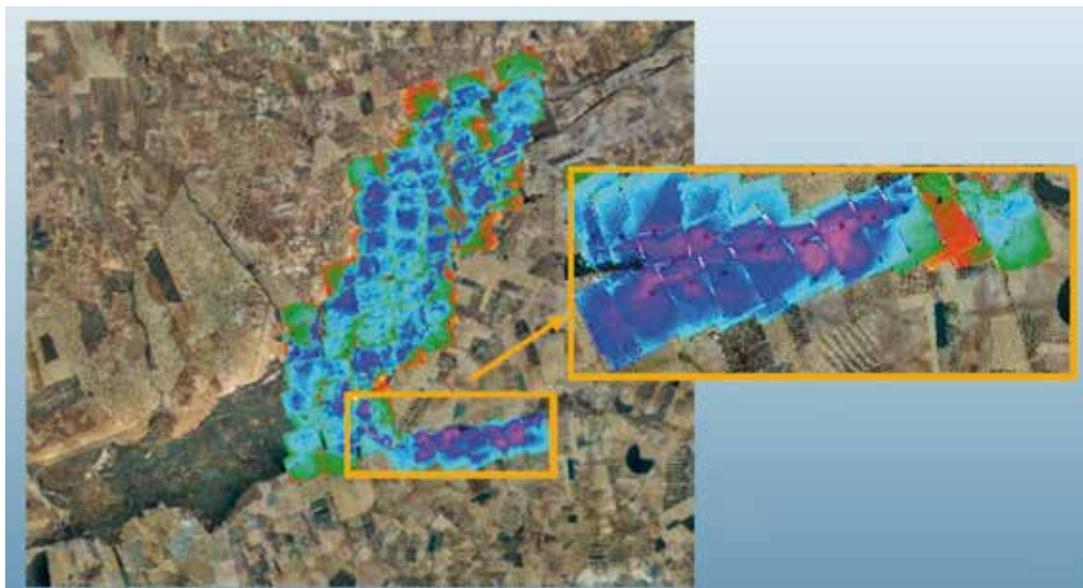


Figura 4. Exportación importación de cartografía dentro de GIS.

información puede ofrecerse tanto “in situ” en el PMA, como en remoto en cualquier Centro de Control Operativo.

El sistema tiene capacidad potencial para la obtención a tiempo real de información multies-

pectral y térmica maximizando las condiciones de estabilidad gracias a la incorporación de los sensores en una plataforma giroestabilizada.

Los sensores están configurados para recoger información espectral en longitudes de onda

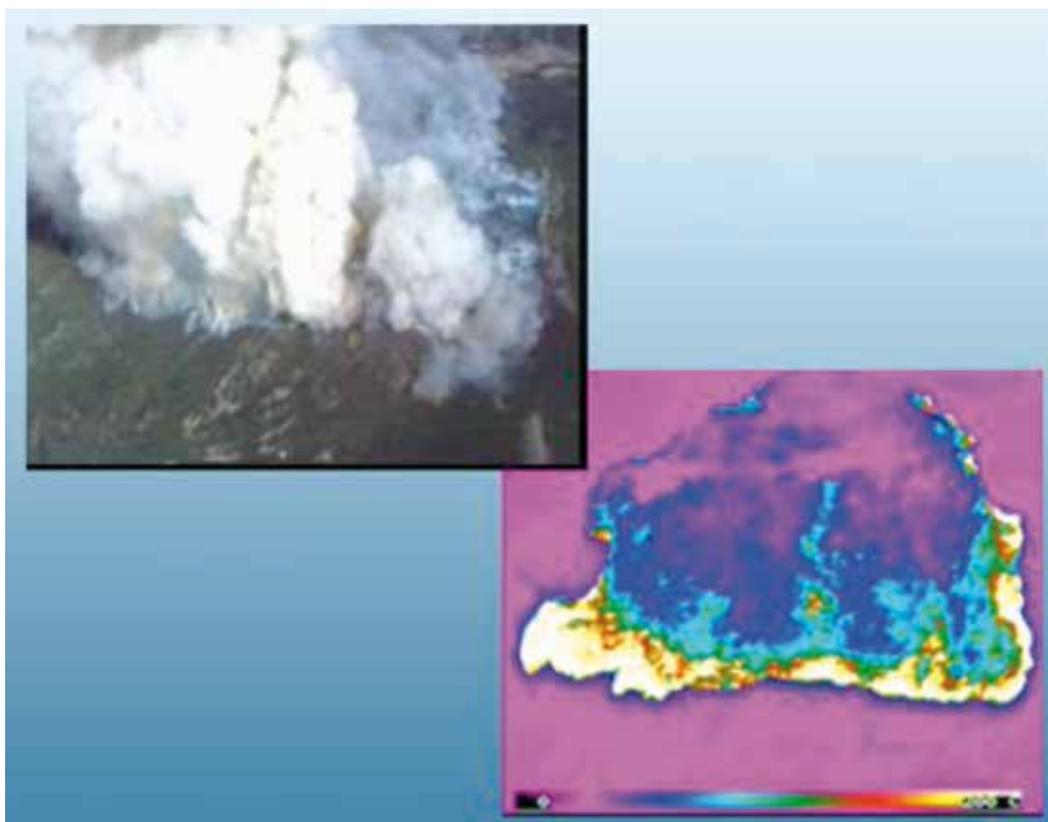


Figura 5. Vista de video visible y térmico.

Figura 6. Clasificación % de fracción de cabida cubierta, Nerva (Huelva).

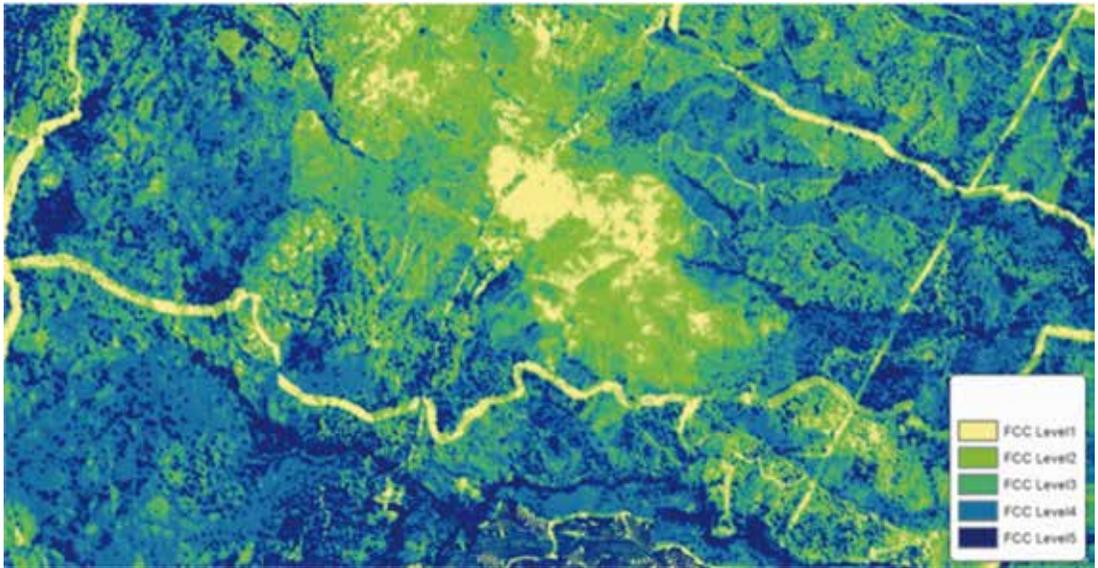
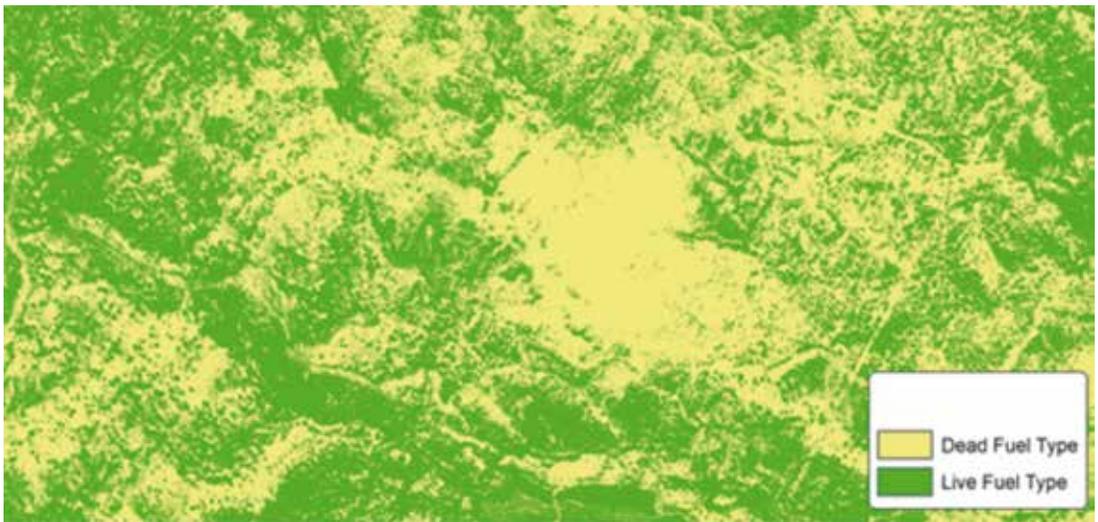


Figura 7. Clasificación en porcentaje combustible vivo y combustible muerto (Huelva).



específicas con las que se puede obtener información biofísica de las siguientes variables:

- Fracción de cabida cubierta
- Biomasa
- Clorofila
- Combustible vivo y combustible muerto
- Medida indirecta de la cantidad de humedad del combustible

La generación de esta información en conjunto con el software ofrece las siguientes funcionalidades:

- a) GENERACIÓN DE MAPAS 3D DINÁMICOS DE COMBUSTIBLES Y TEMPERATURAS: Esta funcionalidad permite poder predecir la evolución del incendio con mayor exactitud e incluso emplear la información para la alimentación de un simulador de evolución del fuego. Por otra parte, el mapa de temperaturas permite localizar el frente de llama así como los focos secundarios que puedan originarse. Así es posible localizar zonas de alto riesgo o zonas donde la probabilidad de propagarse el incendio (o generarse focos secundarios) es muy elevada y asistir en la toma de decisiones para la extinción del incendio.

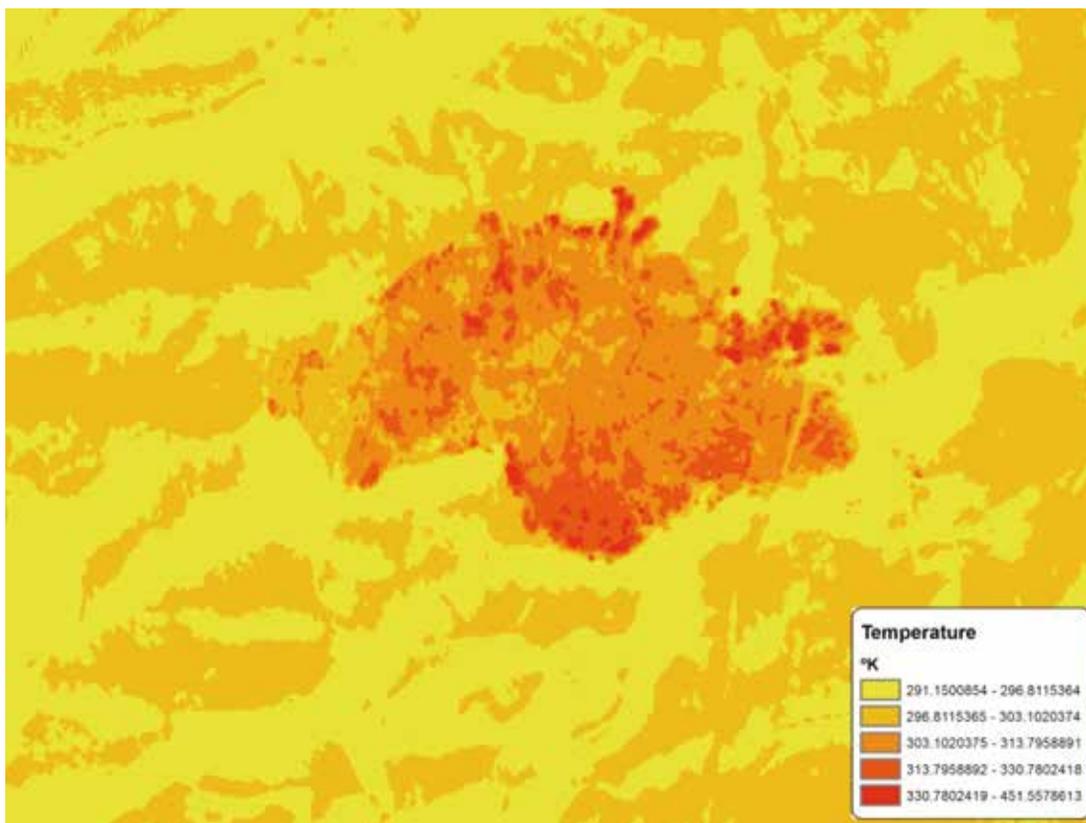
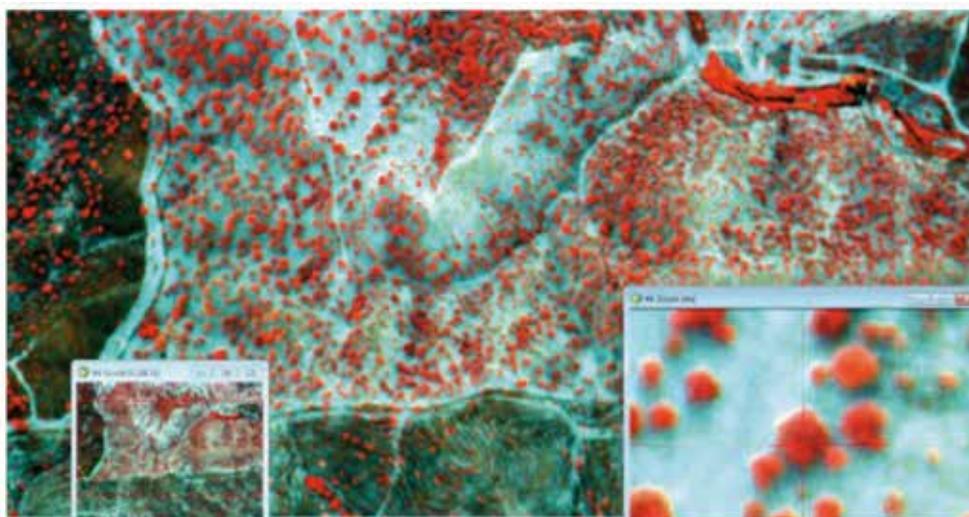


Figura 8. Imagen térmica de incendio en Nerva (Huelva).

b) APOYO EN LA TOMA DE DECISIONES MEDIANTE EL SOFTWARE/HARDWARE PROMETEO DMT: A partir de la información generada el sistema será capaz de suministrar un apoyo al director de extinción en la toma de decisiones. De esta forma, a partir de las isócronas de propagación a

3 horas, permitirá marcar objetivos en cuanto al control y corte de carreteras y el control de la evacuación de la población que potencialmente pueda verse afectada. A partir de la información de los vuelos perimetrales con la cámara IR térmica podrán establecerse puntos de descarga, así como medir la



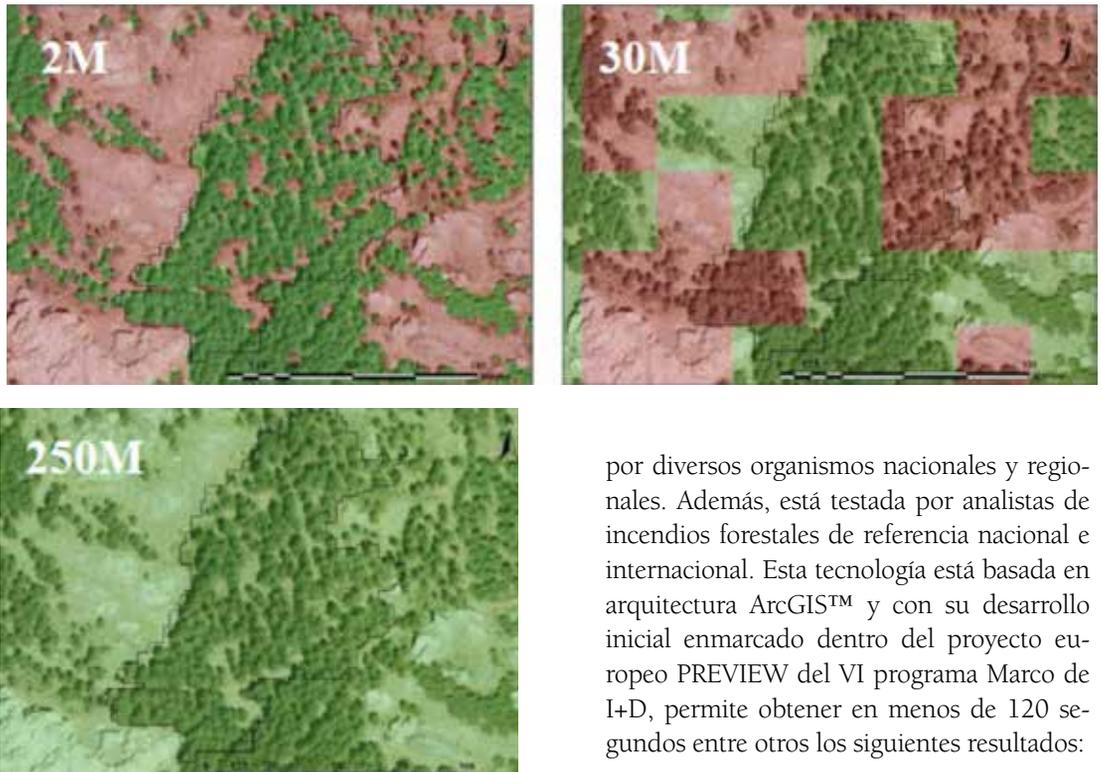


Figura 9. Clasificación de combustible a diferentes escalas de resolución espacial.

eficacia de los mismos y evaluar potenciales situaciones de riesgo para las brigadas. Además a partir de esta información y de los mapas dinámicos de combustible el sistema apoyará en la decisión de acciones tácticas preventivas (contrafuegos).

c) SIMULADOR OPERACIONAL: SIMULADOR OPERACIONAL: Wildfire Analyst es el módulo para la simulación operacional de incendios forestales. La herramienta ha sido desarrollada por Tecnosylva y es empleada

por diversos organismos nacionales y regionales. Además, está testada por analistas de incendios forestales de referencia nacional e internacional. Esta tecnología está basada en arquitectura ArcGIS™ y con su desarrollo inicial enmarcado dentro del proyecto europeo PREVIEW del VI programa Marco de I+D, permite obtener en menos de 120 segundos entre otros los siguientes resultados:

- Propagación del fuego.
- Análisis de la capacidad de extinción.
- Reconstrucción de incendios.
- Ajuste automático de la velocidad de propagación.
- Cálculo de tiempos de evacuación.

Los resultados tanto en forma de informes como en capas cartográficas dentro del propio simulador y con ficheros estándar como KML de Google Earth son una herramienta altamente eficaz y útil para el analista de incendios a la hora de difundir sus resultados.

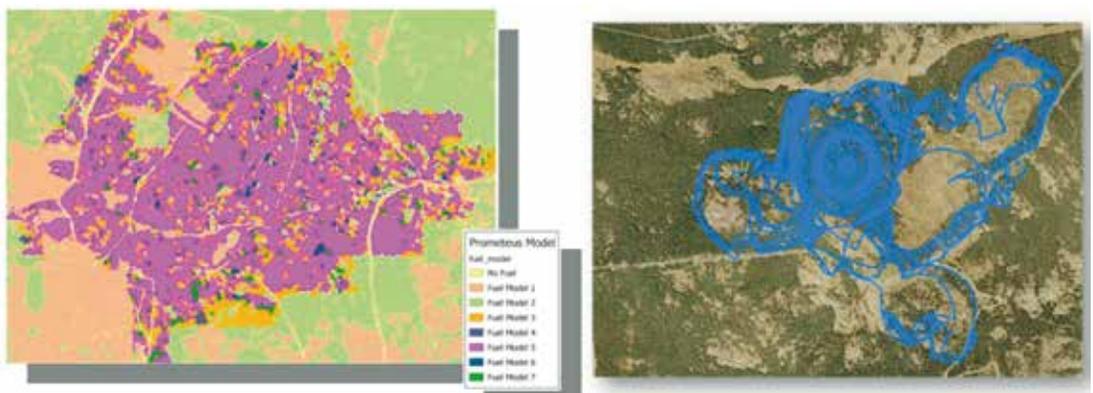


Figura 10. Cartografía de combustibles y simulación del comportamiento del fuego.

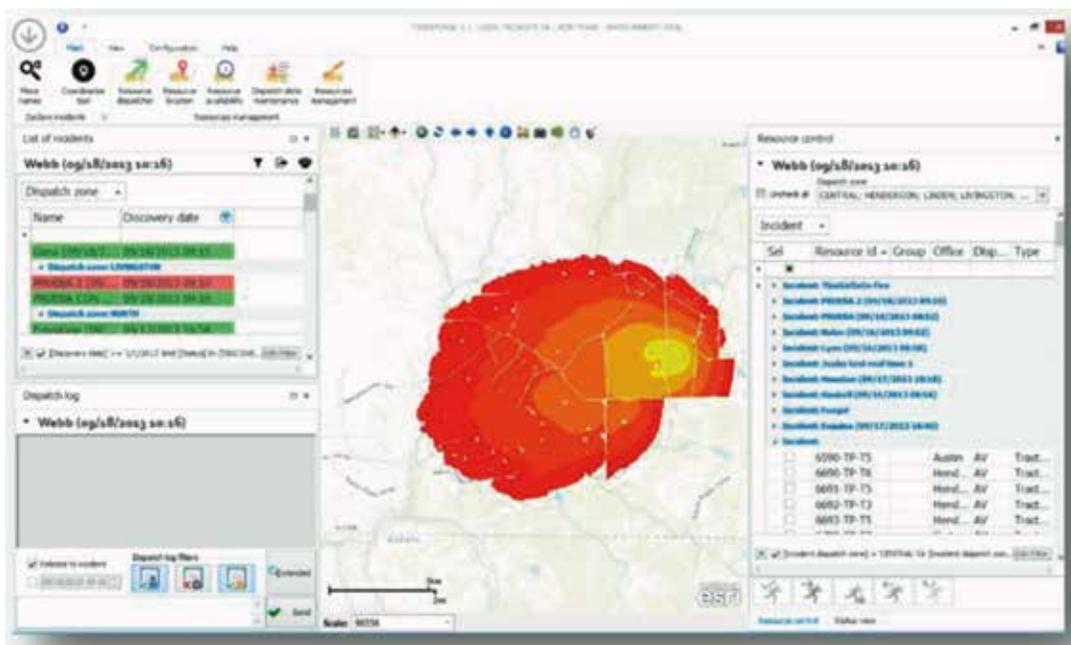


Figura 11. Visor de simulación.

d) VISUALIZADOR GIS: El visualizador GIS permite la gestión de toda la información generada y procesada mediante el sistema EINFOREX-DMT. En función de los distintos usuarios que pueden consultar la información y sus capacidades/necesidades asociadas se definen tres módulos distintos dentro del visualizador.

#### Cliente WEB

El cliente web da soporte multisistema y múltiples navegadores. Se trata de un Common Operational Picture completo, configurable en función de perfiles y roles de usuario. Esta versión ligera tiene acceso a determinadas funcionalidades del cliente de escritorio como la declaración de incendios y el cambio de estado de medios.

#### Visor ejecutivo

Esta versión del cliente web reducida para gestores permite el acceso en tiempo real al estado de los incendios y tener una visión global de los medios y su tiempo de actuación a través de una interfaz simple y sencilla y con una rápida integración sobre implantaciones existentes.

#### Cliente Móvil

Esta aplicación sencilla y ligera se presenta como multidispositivo (web móvil) o bien como una aplicación nativa de Android. Es adaptable y permite el filtro de funcionalidades por usuarios. Su configuración facilita una rápida implantación.

#### CONCLUSIÓN

En el marco de los proyectos EINFOREX y PROMETEO, se ha desarrollado un sistema capaz de capturar información espectral a tiempo real con la que podemos cuantificar y caracterizar el estado instantáneo de los combustibles situados en zonas perimetrales a un incendio. El sistema está diseñado para el envío y procesamiento a tiempo real de la información y por lo tanto, para suministrar datos de vital importancia en la toma de decisiones facilitando las labores de extinción de incendios forestales y en situaciones de emergencia. Toda la información adquirida por medio de los sensores (multiespectral, térmico y video), y procesada posteriormente en el centro de control constituye una pieza clave para abordar el tema de la modelización desde un punto de vista empírico que se acerca más a la realidad que los modelos teóricos aplicados hasta el momento. ❀

# Clasificación digital de zonas forestales usando datos LiDAR, ortofoto y análisis orientado a objetos

**Eduardo González-Ferreiro, Laura Barreiro-Fernández y David Miranda**

Laboratorio del Territorio – Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela.  
Escuela Politécnica Superior

Los ecosistemas forestales poseen características inherentes particulares a su situación geográfica (condiciones climáticas, composición del suelo, régimen de aprovechamiento, etc.), que las convierten en zonas con características únicas en el mundo. Por lo tanto, la existencia de información espacial precisa y actualizada para cada área forestal es de vital importancia para una gestión forestal adecuada. La planificación y gestión de las zonas forestales, así como de sus recursos, necesita un conocimiento previo de la superficie de análisis, con el fin de dotar a sus gestores de información suficiente que permita establecer políticas apropiadas a la realidad existente. Los mapas temáticos son una fuente importante de información, y generalmente se obtienen con técnicas automáticas o semiautomáticas de clasificación digital.

La clasificación digital es un proceso que permite categorizar una imagen concreta, reduciendo los niveles digitales detectados por el sensor a clases categóricas u ordinales, no siendo su objetivo buscar definiciones de cubiertas absolutas o universales aplicables a otras imágenes. Como resultado se obtiene una imagen temática donde cada píxel u objeto contiene un valor

que define la clase asignada. Nada tiene que ver este valor temático con el nivel digital que contiene cada píxel antes de la clasificación.

Las fuentes de información más habitualmente empleadas en las clasificaciones digitales son aquellas provenientes de sensores remotos aerotransportados o satelitales. Los sensores remotos permiten resolver algunas carencias de la visión humana, ampliando la perspectiva visual e informativa que percibimos del entorno. Con ellos obtenemos información a distancia de objetos situados en la superficie terrestre y somos capaces de explorar zonas del espectro electromagnético no visible, información ajena al ojo humano, amplificado de este modo el conocimiento que percibimos del medio que nos rodea. Los sensores fotográficos aerotransportados, como los empleados en el vuelo del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN) para la ejecución del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea de España – Ministerio de Fomento, 2013), proporcionan imágenes que recogen información espectral. Sin embargo, esta información no siempre es suficiente en la discriminación de cubiertas forestales, debido a que numerosas especies presentan un comportamiento espectral similar.

La planificación y gestión de las zonas forestales, así como de sus recursos, necesita un conocimiento previo de la superficie de análisis, con el fin de dotar a sus gestores de información suficiente que permita establecer políticas apropiadas a la realidad existente. Los mapas temáticos son una fuente importante de información, y generalmente se obtienen con técnicas automáticas o semiautomáticas de clasificación digital

Las fuentes de información más habitualmente empleadas en las clasificaciones digitales son aquellas provenientes de sensores remotos aerotransportados o satelitales. Los sensores remotos permiten resolver algunas carencias de la visión humana, ampliando la perspectiva visual e informativa que percibimos del entorno. Con ellos obtenemos información a distancia de objetos situados en la superficie terrestre y somos capaces de explorar zonas del espectro electromagnético no visible

Así por ejemplo, Álvarez (2005) realizó un inventario de la superficie ocupada por *Pinus radiata* D. Don en el Bierzo (Noroeste de España) empleando una imagen Landsat, que contiene siete bandas espectrales: azul, verde, roja, infrarrojo próximo, dos bandas de infrarrojo medio e infrarrojo térmico. Incluso con toda esta información espectral, la complejidad del estudio hizo que el mejor resultado alcanzado mostrase confusión entre las clases coníferas, frondosas, matorral y raso. Se obtuvieron valores del indicador de precisión KIA (*Kappa Index of Agreement*) modestos, especialmente en estas dos últimas categorías.

Es en este tipo de clasificaciones donde aparece la necesidad de combinar información procedente de diversas fuentes para obtener resultados más aproximados a la realidad. Diversos estudios apuntan que, el empleo de la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) aerotransportada en la clasificación de zonas forestales, mejora los resultados obtenidos (Holmgren y Persson, 2004; Antonarakis *et al.*, 2008; Gonçalves *et al.*, 2008;. Ørka *et al.*, 2009).

Los sistemas LiDAR aerotransportados son sensores remotos activos que han sido principalmente utilizados para la realización de levantamientos topográficos, pero cada vez más en la extracción de información del medio forestal. Su ventaja competitiva en el medio forestal radica en el comportamiento “semipermeable” que presentan las copas de los árboles respecto a la penetración de los pulsos LiDAR. Así, en zonas cubiertas de vegetación, la mayor parte de los pulsos LiDAR son reflejados de vuelta al sensor desde las hojas y ramas del dosel, sin embargo una cierta fracción de pulsos LiDAR llega al suelo debajo de las copas a través de pequeños huecos en las mismas. Los datos LiDAR pueden, por tanto, proporcionar información tridimensional acerca del tamaño y la estructura del dosel de copas y del terreno bajo las mismas. A partir de estos datos es posible generar Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Digitales de Copas (MDC), que recogen una gran cantidad de información sobre la vegetación por tratarse de representaciones tridimensionales y georreferenciadas de la realidad. Además, los datos LiDAR proporcionan valores de intensidad, que

Las capas empleadas en la clasificación procedentes de datos LiDAR y de ortofotografía aérea, junto con la clasificación orientada a objetos proporcionaron un alto grado de acuerdo entre la realidad y la clasificación. La validación de los resultados ha demostrado la eficacia de esta metodología de clasificación digital para entornos forestales en el noroeste de España. Este estudio demuestra que es posible clasificar de una forma sencilla y ágil coníferas, frondosas, matorral y zonas rasas

es un constituyente radiométrico de los mismos (Singh *et al.*, 2010). La intensidad es registrada por el sensor como la cantidad de energía retrodispersada por la tierra o los objetos situados sobre la misma. Por tanto, LiDAR reconoce la variabilidad estructural de las masas en términos de distribución, altura y valores de intensidad, es decir, se pueden obtener una amplia variedad de capas de información para su uso en las clasificaciones digitales.

Voss y Sugumaran (2008) obtuvieron mejoras de entre un 9% y un 10% en la discriminación de coníferas y frondosas frente a otros tipos de cubiertas, en comparación con una clasificación que sólo empleaba imágenes multiespectrales, al añadir un MDC y una capa de intensidad generados a partir de datos LiDAR. El MDC separó correctamente la vegetación alta de la vegetación baja y la intensidad se empleó para discriminar entre coníferas y frondosas. Arroyo *et al.* (2009) discriminó las seis clases vegetales más significativas de las sabanas tropicales de Australia, obteniendo valores muy

precisos (Precisión Global da clasificación del 88%) a partir de datos LiDAR y de una imagen QuickBird, concluyendo que la integración de ambas fuentes de información produce un mapa de coberturas del suelo preciso, a pesar de la gran complejidad de la zona de estudio.

Por lo tanto el resultado de una clasificación es dependiente de las capas de información entrantes, pero este no es el único factor influyente, ya que la elección de uno u otro método de clasificación también tiene influencia en el resultado final. Las clasificaciones orientadas a objetos (*Object Based Image Analyst – OBIA*) se están imponiendo sobre los métodos tradicionales de clasificación, que interpretan de forma independiente cada píxel sin tener en cuenta a los vecinos. El paradigma de la clasificación OBIA consiste en agrupar los píxeles primitivos en entidades significativas y consistentes (objetos - imagen), que recogen información espectral, variables de contexto y variables de forma. Estos objetos - imagen o segmentos se adaptan mejor a las distintas geometrías de los diferentes tipos de cubiertas. Su superioridad quedó reflejada en el estudio de Gonçalves *et al.* (2008), que comparó los resultados obtenidos a partir de varios métodos de clasificación.

La última fase de cualquier clasificación es la verificación de los resultados. Es necesaria para comprobar la calidad de los mismos y la validez del método empleado, permitiendo al usuario valorar el grado de acuerdo entre el resultado y la realidad, o dicho de otro modo, el riesgo que asume el usuario al tomar decisiones de gestión en base a la información generada. La verificación de resultados incluye las siguientes fases (Congalton y Green, 1998): (i) Diseño de muestreo, señalando cuantas parcelas, píxeles u objetos - imagen de validación deben medirse y como se seleccionan; (ii) toma de los datos de referencia; (iii) comparación de los datos de referencia con el resultado, mediante la generación de las matrices de confianza y la aplicación de varios test estadísticos y (iv) análisis de los errores encontrados.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología sencilla y ágil para la clasificación di-



Figura 1. Localización de la zona de estudio en Europa y Península Ibérica (a), CCAA de Galicia (b) y Provincia de Lugo y Municipio de Guitiriz (c).

gital de zonas forestales, a partir de un estudio piloto en una zona de marcado carácter forestal, atendiendo a las distintas categorías de cubierta del suelo (coníferas, frondosas, matorral y zona rasa), combinando información espectral obtenida de una ortofotografía aérea digital con datos LiDAR y aplicando una posterior verificación de los resultados de la clasificación.

#### DATOS LiDAR, ORTOFOTOGRAFÍA Y ZONA DE ESTUDIO

Los datos LiDAR se adquirieron en septiembre de 2007, usando un sensor Optech ALTM3025 (Optech Inc., Toronto, ON, Canada), que operó con una longitud de onda 1064 nm, con una frecuencia de repetición láser de 25 kHz, una frecuencia de escaneado de 200 Hz, un ángulo máximo de escaneo de  $\pm 17^\circ$  y altura de vuelo de 1300 m sobre el nivel del mar. La superposición de las pasadas fue del 60% y la densidad máxima de muestreo fue de 8 pulsos  $m^{-2}$ .

La ortofotografía pertenece al vuelo del IGN para el PNOA del año 2007, con un tamaño de píxel de 0.25 m de lado e información espectral de las bandas del rojo, verde, azul e infrarrojo próximo.

Se eligió como zona de estudio piloto un recuadro de 25 ha dentro del Término Municipal de Guitiriz (Figura 1c), que representaba de forma suficientemente amplia las diferentes tipologías de cubierta que se querían estudiar. La localización exacta de la zona de estudio es

el recuadro definido por las siguientes coordenadas UTM huso 29N: 591.000-4.784.500 y 591.500-4.785.000.

#### ELABORACIÓN DEL MDE Y EL MDC

Se utilizaron varias herramientas implementadas en el LTK (LiDAR *ToolKit* de FUSION – McCaughey, 2012) para la generación del MDE. Los pasos fueron los siguientes: Primero, se separaron los primeros retornos de los últimos retornos de la nube de datos LiDAR con las herramientas *FirstLastReturn*; los últimos retornos serán los usados en la generación del MDE. En segundo lugar, se extrajeron los datos pertenecientes al terreno utilizando la herramienta *GroundFilter*, que implementa un algoritmo de filtrado adaptado de Kraus y Pfeifer (1998) y basado en predicción lineal (Kraus y Mikhail 1972). Por último, se utilizó la herramienta *GridSurfaceCreate* para generar una malla regular de datos, que representase el terreno en formato ráster. Esta herramienta calcula la elevación de cada celda de la malla como la media de todos los puntos LiDAR clasificados como terreno dentro de la celda, y si la celda no contiene ningún punto, genera un dato por interpolación a partir de las celdas vecinas. En la Figura 2 se puede ver el MDE resultante.

En el caso del MDC se utilizaron únicamente los datos pertenecientes a los primeros retornos. La nube de puntos LiDAR normalizada se obtuvo restando la altura elipsoidal del MDE

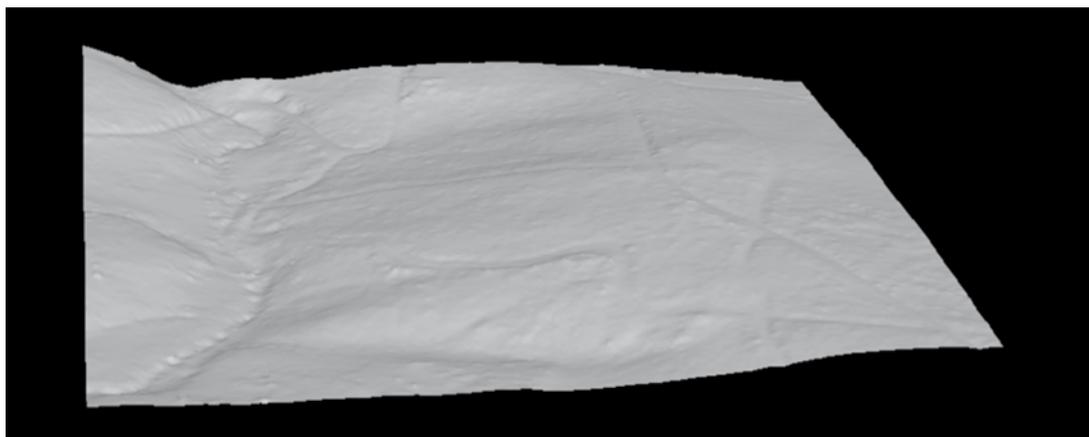


Figura 2.  
MDE  
resultante

de la coordenada Z de cada retorno LiDAR con la herramienta *ClipData*. A continuación se utilizó la herramienta *GridSurfaceCreate* para la interpolación de los datos normalizados. Otra alternativa posible sería utilizar la herramienta *CanopyModel* igualmente implementada en el LTK de FUSION (McGaughey, 2012), pero se prefirió la combinación de las dos primeras por ofrecer un mayor abanico de posibilidades. En la Figura 3 se puede ver el MDC resultante.

## CLASIFICACIÓN

La clasificación se realizó en dos etapas: una clasificación inicial a nivel de píxel en la que se utilizó el MDC como información de entrada y una clasificación final orientada a ob-

jetos en la que se usó el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e información procedente de la clasificación inicial. *Definiens® Developer 7.0* (*Definiens Developer*, 2008) fue el software utilizado tanto en la clasificación inicial como en la clasificación final.

### Clasificación inicial

El MDC, que representa la altura normalizada (respecto al nivel del terreno) de la vegetación para cada píxel de 1 m de lado, representa información muy útil para discriminar diferentes tipos de vegetación.

La segmentación previa a la clasificación inicial se realizó con el algoritmo *Chessboard Segmen-*

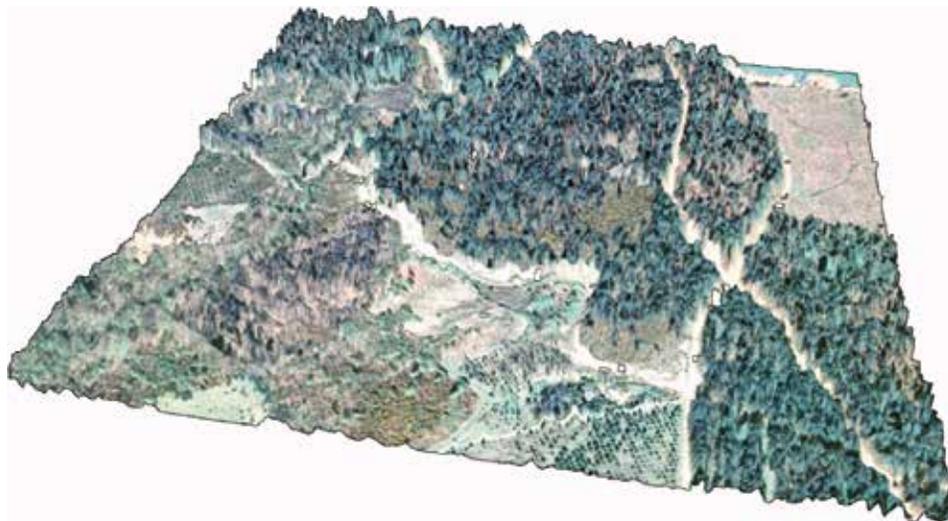


Figura 3.  
MDC con la  
ortofotografía  
digital  
superpuesta.

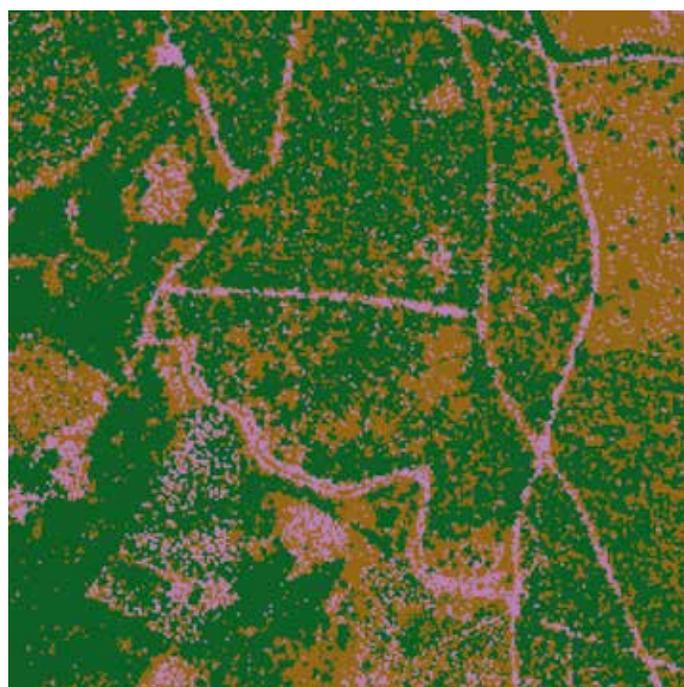


Figura 4.  
Modelo Digital  
de Copas  
clasificado.

tation (Definiens Developer, 2008), que dividió el MDC en objetos - imagen de tamaño definido por el usuario y de forma cuadrada. En este caso, el tamaño de los objetos fue de 1 m de lado, de igual tamaño que los píxeles del MDC, por lo que se puede decir que esta clasificación inicial fue orientada a píxel.

El MDC fue reclasificado en tres intervalos de altura (m):  $[0 - 0,2]$ ;  $(0,2 - 2,0]$  y  $(2,0 - h_{máx})$ , siendo  $h_{máx}$  la altura máxima de la vegetación en la zona de estudio. Los umbrales fueron determinados empíricamente a partir de observación en campo y de pruebas de ensayo - error. Para clasificar cada objeto imagen en función de los anteriores intervalos de altura se empleó el algoritmo *Classification* (Definiens Developer, 2008), de forma que el MDC ráster quedó categorizado en las clases Raso, Matorral y Arbolado. Por último, se creó una capa temática en formato TIFF (Figura 4) con una tabla de atributos asociada que se empleará en el posterior análisis OBIA.

### Clasificación final

Los índices de vegetación permiten discriminar cubiertas que tienen un comportamiento reflectivo distinto en dos o más bandas del espectro

electromagnético, entre otras aplicaciones. Para la identificación de zonas de vegetación se emplean de forma habitual las bandas del rojo e infrarrojo próximo, debido al particular comportamiento radiométrico de la vegetación sana, que presenta un gran contraste entre estas dos bandas. En este contraste espectral se basan la mayoría de los índices de vegetación. El NDVI (Rouse *et al.*, 1973) fue el empleado en la clasificación, elegido por su facilidad de cálculo e interpretación. Este índice toma valores en el rango  $[-1, +1]$ ; en general, valores de NDVI en torno a 0,1 indican presencia de vegetación, que será densa y vigorosa con valores de 0,5 o superiores. La definición de este índice se realiza con reflectividades, pero cuando no se pretende conceder un valor físico a los resultados, son varios los autores que emplean los niveles digitales (Chuvieco, 2007). Teniendo en cuenta esto, y que la finalidad del estudio es la de discriminar de forma automática las clases Coníferas, Frondosas, Matorral y Zona rasa para una zona de estudio en concreto, se emplearon los niveles digitales directamente proporcionados por la ortofotografía. En la zona de estudio se observó que un valor de  $NDVI = 0,41$  resultaba crítico, permitiendo discriminar las clases Coníferas ( $NDVI \geq 0,41$ ) y Frondosas ( $NDVI < 0,41$ ).

Tabla 1. Valor adoptado en cada parámetro del algoritmo *Multiresolution Segmentation*

Parámetros		Valor
Peso en la segmentación	Banda del rojo	1
	Banda del infrarrojo próximo	1
	MDC reclasificado	1
Criterio de homogeneidad	<i>Shape</i>	0,1
	<i>Compactness</i>	0,5
Resolución	<i>Scale Parameter</i>	70

La segmentación previa a la clasificación, que permite generar los objetos - imagen, se realizó con el algoritmo *Multiresolution Segmentation* (Definiens Developer, 2008). Este algoritmo parte de un tratamiento independiente de cada píxel y una posterior agrupación en función de criterios de homogeneidad (*Shape* y *Compactness*) y de resolución (*Scale Parameter*). Los valores adoptados son descritos en la Tabla 1.

Para la clasificación de los objetos - imagen se empleó un clasificador en árbol (*Decision Tree Classifier* – Definiens Developer, 2008). Este algoritmo discrimina secuencialmente a cada clase basándose en valores espectrales, variables texturales o información auxiliar que la definen, pudiendo ser considerado como un sistema experto sencillo (Skidmore, 1989). En este caso la información de partida proviene del NDVI. Por último, con el algoritmo *Classification* (Definiens Developer, 2008) se procedió a clasificar cada objeto - imagen de la zona de estudio según las reglas establecidas en el árbol de decisión. La Figura 5 muestra un diagrama de flujo que describe la lógica de la clasificación inicial y de la clasificación final. La Figura 6 muestra el resultado de la clasificación final y una comparación visual con la ortofotografía de la zona de estudio.

## VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

La verificación de los resultados permite conocer el grado de ajuste entre la clasificación obtenida y la realidad, comparando la categoría real de un objeto - imagen con la asignada en el proceso de clasificación. Para tal fin se siguieron los pasos descritos por Congalton y Green (1998).

El primer paso fue seleccionar las muestras de validación sobre la ortofotografía digital. Para cada clase de cubierta se seleccionaron 20 objetos - imagen siguiendo un diseño de muestreo aleatorio. Algunos autores recomiendan un mínimo de 50 píxeles de validación por clase (Congalton, 1991), pero debido a que cada objeto - imagen está formado por un conjunto de píxeles, se consideró que 20 objetos - imagen proporcionarían un tamaño de muestra suficiente para la verificación de los resultados. Los objetos - imagen de validación seleccionados se muestran en la Figura 7. Con el fin de asignar de forma fidedigna una clase de referencia a cada una de las muestras, se realizó una interpretación visual de la ortofotografía y una posterior comprobación en campo.

En el siguiente paso se compararon las muestras con el resultado de la clasificación, generándose varias medidas del error cometido y de la fiabilidad de la clasificación descritas en Chuvieco (2007): Matriz de confusión, Fiabilidad del usuario y del productor y Estadístico Kappa. Los resultados de la validación pueden verse resumidos en la Tabla 2.

Las confusiones más importantes se observaron entre las clases Coníferas y Matorral y en las clases Coníferas y Frondosas. En el primer caso 3 de las muestras seleccionadas para verificar la clase Coníferas se clasificaron erróneamente como Matorral. Probablemente este error se debe a que estas muestras se corresponden con coníferas de pequeño tamaño procedentes de repoblaciones recientes y que por lo tanto no superan los 2 m de altura (valor establecido como límite entre las clases Matorral y Conife-

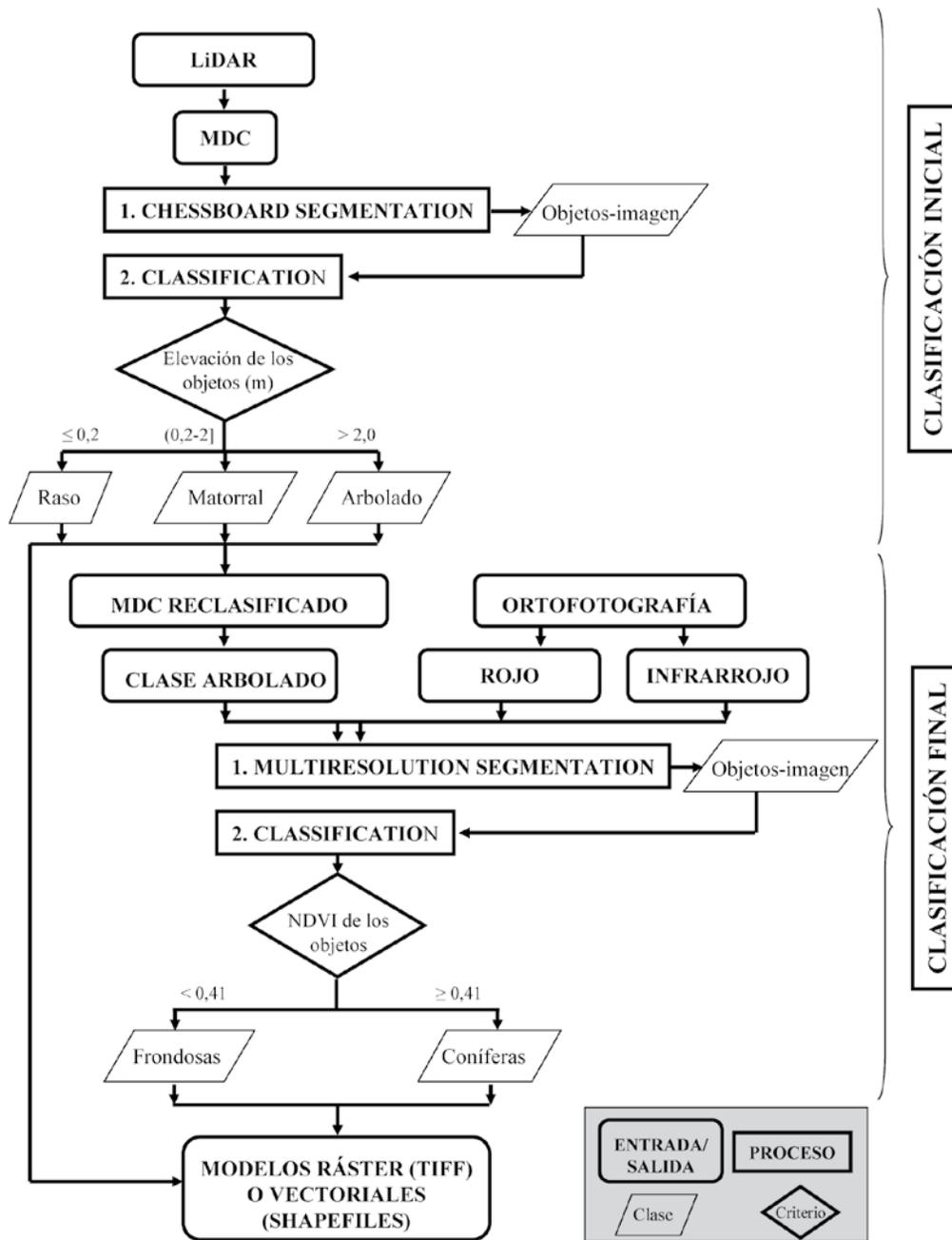


Figura 5. Diagrama de Flujo.

ras). En el segundo caso, de los 20 objetos de validación para la clase Frondosas, 1 objeto se clasificó erróneamente como Coníferas.

La Fiabilidad global mostró que el 95,2% de los objetos de validación se clasificaron correctamente y el valor del Estadístico Kappa indicó que los resultados obtenidos son un 93,6% mejores que los resultados esperados si la clasificación se hiciese por azar.

## CONCLUSIONES

La validación de los resultados ha demostrado la eficacia de esta metodología de clasificación digital para entornos forestales en el noroeste de España. Las capas empleadas en la clasificación, procedentes de datos LiDAR y de ortofotografía aérea, junto con la clasificación orientada a objetos proporcionaron un alto grado de acuerdo entre la realidad y la clasificación. Este

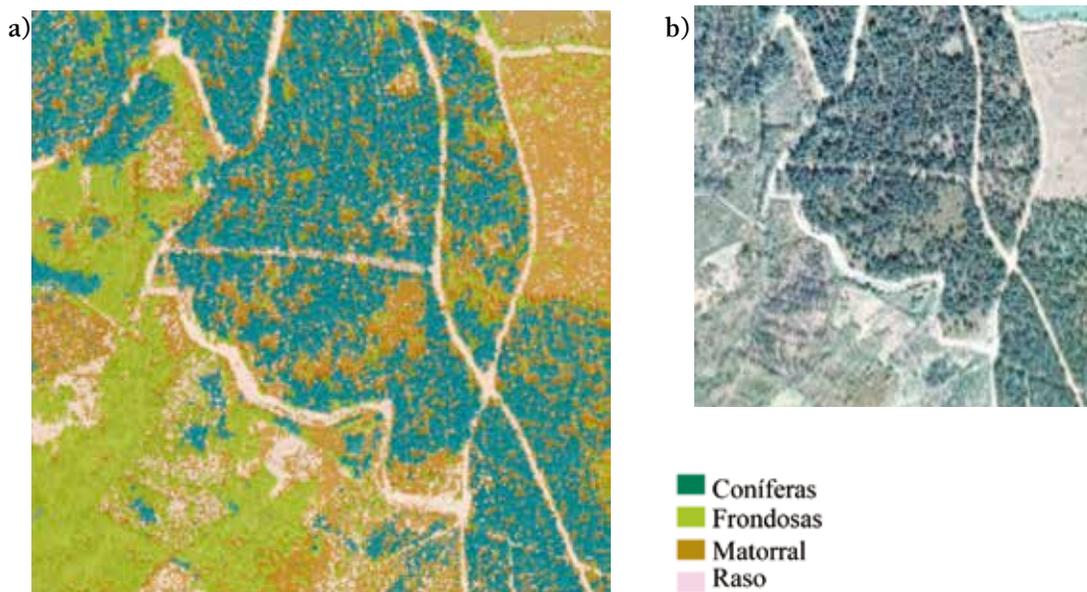


Figura 6. Zona de estudio clasificada y ortofotografía de referencia.

estudio demuestra que es posible clasificar de una forma sencilla y ágil coníferas, frondosas, matorral y zonas rasas.

La metodología aquí presentada u otras similares basadas en las mismas fuentes de datos poseen un gran potencial de uso, sobre todo teniendo en cuenta que el PNOA (Ministerio de Fomento, 2010) proporciona productos fotogramétricos con una cobertura periódica (dos a tres años) para el conjunto de España y

que en la actualidad ya incluyen vuelos LiDAR de baja densidad (0,5 primeros retornos m<sup>-2</sup>), para la generación de los MDE. Esto resuelve uno de los principales problemas asociados tradicionalmente a la teledetección aérea, es decir, la pobre cobertura espacial y temporal. Por lo tanto, la metodología aquí presentada podría usarse para generar mapas temáticos para una descripción periódica de las zonas forestales cada vez que el PNOA proporcione nuevos datos. ❀



Figura 7. Muestras de validación seleccionadas.

Tabla 2. Matriz de confusión y medidas de precisión derivadas

Clases	Coníferas	Frondosas	Matorral	Raso	Total
Coníferas	20	1	0	0	21
Frondosas	0	20	0	0	20
Matorral	3	0	20	0	23
Raso	0	0	0	20	20
Total	23	21	20	20	84
Precisión por clases					
Fiabilidad del productor	0,870	0,952	1	1	
Error de omisión	0,130	0,048	0	0	
Fiabilidad del usuario	0,952	1	0,870	1	
Error de comisión	0,048	0	0,130	0	
Estadístico Kappa por clase	0,826	0,937	1	1	
Precisión global					
Fiabilidad global			0,952		
Estadístico Kappa			0,936		

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, F. 2005. Inventariación de las masas de *Pinus radiata* D. Don en El Bierzo (León) empleando teledetección con imágenes multispectrales y clasificadores orientados a objetos. Trabajo final de Postgrado y Máster Internacional a distancia en SIG (Programa UNIGIS). Disponible en: <http://www.cartesia.org/article.php?sid=183> (Acceso: 19/11/2013).
- Antonarakis, A., Richards, K. y Brasington J. 2008 Object-based land cover classification using airborne Lidar. *Remote Sensing of Environment*. 112: 2988-2998.
- Arroyo, L., Johansen, K., Armston, J. y Phinn, S. 2009. Integration of LiDAR and QuickBird imagery for mapping riparian biophysical parameters and land cover types in Australian tropical savannas. *Forest Ecology and Management*. 259: 598-606.
- Chuvieco, E. 2007. *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio* (3ª edición). Barcelona: Editorial Ariel. 586 pp.
- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*. 37: 35-46.
- Congalton, R. y Green, K. 1998. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (1st edition). London: Taylor & Francis (CRC Press). 160 pp.
- Definiens Developer. 2008. *Developer User Guide*, Version 7. Munich: Definiens AG.
- Gonçalves, G., Seco, L., Reyes, F., Miranda, D. y Coimbra, P. 2008. Land cover classification of rural areas using LiDAR data: a comparative study in the context of fire risk. *Silvi-Laser 2008*, Sept. 17-19, 2008 - Edimburgo. Pp. 427-436.
- Holmgren, J. y Persson, A. 2004 Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*. 90: 415-423.
- Kraus, K. y Mikhail, EM. 1972. Linear least squares interpolation. *Photogrammetric Engineering*. 38: 1016-1029.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 53: 193-203.
- McGaughey, R. (Ed.). 2012. *FUSION/LDV: Software for LiDAR data analysis and visualization*. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. (Seattle, WA), 167 pp. Disponible en: [http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION\\_manual.pdf](http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf) (Acceso: 19/11/2012).
- Ministerio de Fomento (2013) *Plan Nacional de Ortofotografía aérea. Especificaciones Técnicas para vuelo fotogramétrico digital con vuelo LiDAR*. (Ministerio de Fomento: Madrid) Disponible en: <http://www.ign.es/PNOA/> (Aceso: 07/nov/2013).
- Ørka, H., Næsset, E. y Bollandsås, O. 2009 Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*. 113: 1163-1174.
- Rouse, JW, Haas, RH., Schell, JA. y Deering, DW. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *3rd ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, pp. 309-317.
- Singh, KK., Vogler, JB. y Meentemeyer, RK. 2010. Estimation of land use in an urbanized landscape using lidar intensity data: A regional scale approach. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 38: 1-4.
- Skidmore, A. 1989. An expert system classifies eucalypt forest types using Thematic Mapper data and a digital terrain model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55: 1449-1464.
- Voss, M. y Sugumaran, R. 2008. Seasonal effect on tree species classification in an urban environment using hyperspectral data, LiDAR, and an object-oriented approach. *Sensors*. 8: 3020-3036.

# Detectar desde el cielo

R. Hernández-Clemente

Universidad de Córdoba

La Universidad de Córdoba, a través del laboratorio de teledetección forestal, desarrolla conocimientos de gran innovación en la aplicación de información sobre recursos forestales desde el cielo.

El laboratorio de teledetección forestal *Trees-atlab*, perteneciente al grupo de investigación “Evaluación y Restauración de Sistemas Agrícolas y Forestales-ERSAF” de la UCO lleva a cabo actualmente una gran innovación en el campo de la aplicación de información remota a la evaluación y gestión de los recursos forestales. El laboratorio formado por el profesor Rafael M<sup>a</sup> Navarro Cerrillo y los investigadores doctorales Rocío Hernández Clemente e Inmaculada Clavero Rumbao trabaja en colaboración estrecha con los departamentos de la universidad de Córdoba

de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría y el de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales y otros grupos de investigación como el Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC.

En este momento desarrollan varias líneas de investigación entre las que destaca la evaluación de parámetros estructurales y fisiológicos asociados a estados de estrés en masas forestales en decaimiento a partir de imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Se trata de detectar a tiempo, en una fase temprana, el estrés forestal, antes de que se produzcan daños irreversibles en las plantas. Esta medida preventiva se define, por lo general, como pre-visual y es una información crítica necesaria para la evaluación temprana de daños en los bosques.

Cartografía de daños obtenida a partir de una imagen de alta resolución de pinares en la Sierra de los Filabres (Almería) adquirida para el seguimiento del estado de los bosques mediante un sensor montado sobre un avión no tripulado (adquirida en 2009 por el QuantaLab-IAS-CSIC).





Cartografía de contenido de clorofila en repoblaciones de pino silvestre en la Sierra de los Filabres (Almería) a partir de una imagen hiperespectral del sensor AHS adquirida en 2008 por el INTA.

Además, tratan de evaluar también el estrés hídrico, proponiendo nuevos índices que tienen en cuenta las condiciones de luminosidad y la estructura de la vegetación. En este apartado, *Treesatlab* ha mostrado los avances realizados en la aplicación de imágenes hiperespectrales de alta resolución espacial para la detección temprana de niveles de estrés en coníferas mediterráneas sometidas a decaimiento forestal.

La segunda línea de investigación es la aplicación de tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) en el inventario de recursos forestales. Se trata de una herramienta emergente en el campo de los sensores láser capaz de generar con gran rapidez alta densidad de datos georeferenciados con una precisión al menos igual que la obtenida por los métodos tradicionales sobre el terreno, pero de forma significativamente más rápida. Aunque los métodos de campo son generalmente más precisos, la relación entre el error y la eficacia en la adquisición hace que los datos LiDAR sean considerados una alternativa real a los métodos tradicionales. Se trata de equipos formados por sensores activos montados sobre una plataforma aerotransportada que emiten un pulso láser que permite medir distancias, y generar una

nube de puntos que dan la altura del suelo y la vegetación de forma muy precisa y especialmente densa. Esto se consigue con la combinación de tres tecnologías: un láser, un sistema de referencia inercial de alta precisión y un sistema de posicionamiento global por satélite.

Por último, destaca también entre los trabajos de investigación del Laboratorio, la aplicación de la geoestadística a la gestión de recursos genéticos de la flora silvestre. En ella, se busca elaborar modelos de idoneidad de hábitat de especies mediterráneas partiendo de la distribución actual y la potencial de especies de interés para la conservación. A partir de estos modelos de hábitat se puede evaluar el impacto que sobre las poblaciones de estas especies pueden tener perturbaciones como los incendios forestales, el cambio climático o los cambios de los usos del suelo, con la finalidad de establecer criterios científicos para la restauración ecológica o la conservación de la especie y de su diversidad genética.

La financiación de estos proyectos de investigación procede de varias fuentes y convocatorias de investigación promovidas por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, EG-MASA, y el Ministerio de Ciencia y Tecnología. ❁

# Evaluación de variables biofísicas mediante teledetección en pinares mediterráneos

Rafael M<sup>a</sup> Navarro-Cerrillo

Departamento de Ingeniería Forestal-Universidad de Córdoba

El estrés de la vegetación en el Mediterráneo se relaciona en muchos casos con el estado hídrico de la vegetación, lo que condiciona procesos como el balance energético, el ciclo hidrológico, o el riesgo de incendio (Chuvieco *et al.*, 2002; Deshayes *et al.*, 2006).

El índice de área foliar (expresado por su acrónimo en inglés LAI, *leaf area index*) es una variable clave para estudiar los procesos fisiológicos en ecosistemas forestales (Asner *et al.*, 2003; Le Maire *et al.*, 2008), tales como pronosticar el crecimiento, la productividad o el intercambio gaseoso (Reichstein *et al.*, 2003). El concepto de LAI hace referencia al conjunto de masa foliar de una cobertura vegetal y, por tanto, a su capacidad de fotosíntesis, relacionado con el contenido de pigmentos (i.e., clorofila), la transpiración de la planta y el intercambio de CO<sub>2</sub>. Estas funciones son importantes para los intercambios entre la vegetación y la atmósfera (Nemani *et al.*, 1993). Por otro lado la clorofila (Chls; clorofila a y b) es posiblemente el pigmento más importante de las plantas, ya que controla la cantidad de radiación solar que el árbol absorbe y, por lo tanto, la capacidad fotosintética y la producción de los sistemas forestales, suministra un cálculo aproximado del estado nutritivo de la planta o permite evaluar diferentes niveles de estrés (Balckburn, 2007).

Es muy frecuente encontrar que los ecólogos y los forestales demanden cartografías de distribución espacial de estos parámetros para su aplicación en trabajos de gestión (evaluación de estrés, selvicultura preventiva, secuestro de C, etc.). Sin embargo, esta cartografía no puede ser elaborada mediante procedimientos de campo (Reich *et al.*, 1999), debido a los problemas instrumentales y operativos que esto supone (Gower *et al.*, 1999). Por esa razón, la mejor alternativa para obtener cartografías de parámetros ecofisiológicos en grandes superficies es la combinación de datos de campo con imágenes procedentes de sensores remotos, mediante modelos más o menos complejos (Ej. índices de vegetación, modelos físicos, etc.), que permiten invertir los datos y extrapolarlos a escala de bosque (Cohen *et al.*, 2003).

Por estas razones, el LAI y el contenido de clorofila son los parámetros ecofisiológicos que mayor interés han despertado en los estudios de teledetección aplicados a estrés. La mayoría de los estudios hasta el momento han utilizado índices de vegetación obtenidos a partir de sensores multispectrales (en particular Landsat TM 5, ETM+, y SPOT) (Peddle *et al.*, 1999; Le Maire *et al.*, 2008; Main *et al.*, 2011), aunque también se han utilizado modelos de



reflectancia del dosel (Kuusk, 1998). Los sensores hiperspectrales (CASI, AHS, Hyperion, etc.), que disponen de un elevado número de bandas, tienen el potencial de medir características de la vegetación difíciles de medir, a priori, por los sensores multispectrales convencionales (Zarco-Tejada *et al.*, 2001; Moorthy *et al.*, 2008; Main *et al.*, 2011; Hernández Clemente *et al.*, 2011). Las ventajas de estos sensores son el mayor número de bandas disponibles, y el ancho de dichas bandas, ya que la estimación de LAI y de clorofila es más sensible a la reflectancia en las regiones espectrales de bandas más estrechas.

Los datos radiométricos adquiridos por los diferentes sensores se pueden convertir o no en índices espectrales de vegetación (acrónimo en inglés SVI), los cuales son dependientes del sensor, lo que dificulta la capacidad de comparar los resultados entre sensores debido a las diferencias entre sus características espectrales y espaciales (Steven *et al.*, 2003). En este caso, resulta conveniente una normalización entre los índices calculados a partir de sensores homólo-

gos cuando se pretende hacer una comparación de los valores obtenidos. Teillet *et al.* (1997) evaluaron el índice de vegetación normalizado (NDVI *Normalized Difference Vegetation Index* en su denominación en inglés) para diferentes sensores (Landsat TM, AVHRR, MODIS, MERIS), y observaron que los valores de ese índice estaban significativamente afectados por las diferencias en el ancho de las bandas espectrales, especialmente en el comportamiento de las bandas del *Red Edge* y del infrarrojo cercano.

Por todo lo anterior, es difícil inferir de los estudios existentes que los sensores hiperspectrales disponibles tengan alguna ventaja comparativa frente a los sensores multispectrales. Hay trabajos que parecen indicar una mejora de los resultados a partir de sensores hiperspectrales, aunque a veces miden otras variables distintas del LAI (Lefsky *et al.*, 2001). Además deben tenerse en cuenta los modelos de corrección de las imágenes, así como el tipo y calidad de los datos de campo. Todo lo anterior pone en evidencia que el número creciente de sensores disponibles requiere de trabajos específicos

En este trabajo se compara la aplicabilidad de diferentes sensores multispectrales e hiperspectrales para la estimación del LAI y del contenido de clorofila en masas artificiales de pinar en Andalucía.

La mejor alternativa para obtener cartografías de parámetros ecofisiológicos en grandes superficies es la combinación de datos de campo con imágenes procedentes de sensores remotos, mediante modelos más o menos complejos que permiten invertir los datos y extrapolarlos a escala de bosque

*al.*, 2011). Por otro lado, existen pocos trabajos realizados en condiciones mediterráneas, lo que hace difícil generalizar los resultados procedentes de otros tipos de biomasa.

En este trabajo se compara la aplicabilidad de diferentes sensores multiespectrales e hiperespectrales para la estimación del LAI y del contenido de clorofila en masas artificiales de pinar en Andalucía (Navarro Cerrillo *et al.*, 2007). Se utilizan un conjunto de imágenes de distintos sensores: Hyperion, ChrisProba, Landsat TM5 y Quickbird, con diferentes resoluciones espaciales y espectrales, para generar cartografía de variables ecofisiológicas a distintas escalas.

para valorar y normalizar los datos de cada sensor (Bricaud *et al.*, 2002), y profundizar en la integración de sensores para la determinación de parámetros de vegetación tales como la cobertura (Asner *et al.*, 2003), la química de dosel (Johnson *et al.*, 1994), o la estructura y composición de las hojas (Hernández-Clemente *et*

#### SELECCIÓN DE SENSORES E ÍNDICES PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS EN PINARES

De todos los sensores disponibles, en esta investigación se utilizaron imágenes de dos sensores multiespectrales (Tabla 1) y tres sen-

**Tabla 1. Características de los sensores utilizados en el estudio de integración de sensores para la cartografía de variables ecofisiológicas en pinares en la Sierra de los Filabres (Almería)**

Sensor	Bandas (rango)	Resolución espectral	Resolución espacial	Fecha de adquisición
<b>Sensores hiperespectrales</b>				
Hyperion	220 (0.4 – 2.5 $\mu\text{m}$ )	10 nm	30 m	28/08/08
CHRIS	63 (0.4 – 1 $\mu\text{m}$ )	2 nm	~ 35 m	29/07/08
AHS	VIS/ NIR 20 (0.4 – 1 $\mu\text{m}$ )	28 nm	2.5 – 10 m	23/07/08
	NIR 1 (1.55 -1.65 $\mu\text{m}$ )	90 nm		
	SWIR 42 (1.9 – 2.6 $\mu\text{m}$ )	18 nm		
	MIR 7 (3 – 5.5 $\mu\text{m}$ )	30 – 40 nm		
	TIR 10 (8 - 13 $\mu\text{m}$ )	0.4 – 0.5 $\mu\text{m}$		
<b>Sensores multiespectrales</b>				
Landsat TM	VIS (3)	~ 0.07 $\mu\text{m}$	30 m	21/07/08
	NIR (1)	~ 0.14 $\mu\text{m}$		
	SWIR (2)	~ 0.22 $\mu\text{m}$		
	TIR (1)	~ 2 $\mu\text{m}$		
Quickbird	VIS (3)	~ 0.07 $\mu\text{m}$	~ 2.4 m	18/07/08
	NIR (1)	~ 0.14 $\mu\text{m}$		

**Tabla 2. Índices propuestos para la determinación de LAI y clorofila en el estudio de integración de sensores en la Sierra de los Filabres (Almería)**

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
<b>LAI</b>		
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
Simple Ratio Index (SR)	$SR = R_{NIR} / R_{red}$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
Modified Simple Ratio Index (MSR)	$MSR = ((R_{NIR} / R_{red}) - 1) / ((R_{NIR} / R_{red}) + 1)^{0.5}$	Chen <i>et al.</i> (1997)
<b>Clorofila</b>		
Índice de Gitelson	$GM1 = R_{750} / R_{350}$ , $GM2 = R_{750} / R_{700}$	Gitelson & Merzlyak (1997)
Índice de Vogelmann	$VogI = (R_{740}) / (R_{720})$	Vogelmann <i>et al.</i> (1993);

\* Ri corresponden a las diferentes bandas utilizadas NIR=infrarrojo cercano, red=banda del rojo, o ancho de banda.

sores hiperespectrales. Los procedimientos de corrección se adecuaron a cada imagen, procediendo a su georeferenciación y corrección radiométrica.

En este estudio se utilizaron los índices de vegetación que han mostrado los mejores resultados con sensores multi e hiperespectrales para el cálculo del LAI y del contenido de clorofila (Tabla 2). Posteriormente, se calcularon las regresiones entre los datos de campo y los valores

de los índices, maximizando la correlación entre cada variable y conjunto de datos.

#### RELACIONES ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y PARÁMETROS ECO-FISIOLÓGICOS

En la tabla 3 se observan los resultados obtenidos para *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* en comparación con los obtenidos con el sensor

**Tabla 3. Coeficientes de determinación y error medio cuadrático obtenidos en las estimaciones de LAI y clorofila (N=36) en pinares de *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra* en la S<sup>a</sup> de los Filabres (Almería) a partir del sensor hiperespectral AHS, y multispectral Quick Bird**

Parámetro	Index	AHS				QuickBird			
		<i>Pinus sylvestris</i>		<i>Pinus nigra</i>		<i>Pinus sylvestris</i>		<i>Pinus nigra</i>	
		R <sup>2</sup> (%)	RSME* (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	RSME* (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	RSME* (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	RSME* (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )
LAI	MSR	60,23	0,51	55,76	0,70	47,82	0,57	18,79	0,94
	SR	56,83	0,53	57,69	0,68	47,62	0,57	16,48	0,96
	NDVI	53,24	0,23	51,31	0,22	37,42	0,27	26,07	0,27
Ch <sub>a+b</sub>	Vogelmann	52,77	7,06	69,95	3,60	–	–	–	–
	Gitelson	50,21	7,27	68,50	7,69	32,54	8,37	68,72	1,67
	NDVI	30,66	8,58	59,58	4,18	26,71	8,70	39,99	6,09

\* R<sup>2</sup> coeficiente de determinación, RSME= error cuadrático medio.

AHS y la imagen QuickBird (de similar resolución espacial). Los coeficientes de determinación entre las medidas de campo y los índices de vegetación seleccionados fueron muy variables en función del índice y del sensor empleado, aunque sólo para el sensor AHS las correlaciones presentaron valores aceptables ( $R^2 > 0,50$ ). En el caso de la estimación de LAI en *P. sylvestris*, los coeficientes de determinación fueron ligeramente inferiores a las obtenidas con AHS, mientras que en *P. nigra* se alejaron mucho de los valores de AHS. En ambos casos el índice que mejores resultados dio fue el *Modified Simple Ratio Index* (MSR). Las regresiones entre la clorofila y los distintos índices ensayados para *P. sylvestris* fueron significativamente menores, mientras que para *P. nigra* el valor del índice de Gitelson fue del mismo orden que el obtenido con AHS y el NDVI un 10% inferior.

Entre los sensores de media resolución espacial (Landsat TM, Hyperion y ChrisProba) se obtuvieron resultados muy similares para LAI ( $R^2 > 0,55$ ) (Tabla 4), aunque los coeficientes de determinación para clorofila fueron muy bajos. Por término medio, usando el criterio del valor del error cuadrático medio (RMSE), los índices *Simple Ratio Index* (SR) y *Modified Simple Ratio Index* (MSR) muestran la misma

capacidad para estimar los valores de LAI en bosques de pino, y pueden considerarse mejores que el NDVI.

El NDVI (y su homólogo SR) han sido los índices de vegetación espectral más ampliamente usados para calcular el LAI (Cohen *et al.*, 2003). Por lo tanto, es importante, en un estudio de integración de sensores, contrastar los resultados de otros índices con los obtenidos para el NDVI. Los resultados indican que el NDVI es, en general, menos sensible a los valores de LAI (Tabla 3 y 4). En el caso de los sensores hiperespectrales los valores de NDVI fueron más altos que para la imagen Landsat TM, lo cual puede deberse a los efectos atmosféricos en las bandas visibles del sensor Landsat TM. La dispersión del componente rojo de la relación del NDVI, reduce el contraste entre el IR y el rojo, y disminuye los valores de NDVI en las bandas del visible (Turner *et al.*, 1999).

La baja correlación entre el NDVI y el LAI se ha mostrado en numerosos estudios (Chen & Cihlar, 1996; Turner *et al.*, 1999; Cohen *et al.*, 2003). El NDVI ha sido durante casi tres décadas el índice más popular para calcular el LAI en diferencias biomas, pero nuestros resultados y los de otros autores indican que hay otros ín-

**Tabla 4. Coeficientes de determinación y error medio cuadrático obtenidos en las estimaciones de LAI y clorofila (N=36) en pinares de *Pinus spp* en la S<sup>a</sup> de los Filabres (Almería) a partir de los sensores hiperespectrales ChrisProba e Hyperion, y multiespectral Landsat TM**

Parámetro	Index	ChrisProba		Hyperion		Landsat TM	
		R <sup>2</sup> (%)	RSME (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	RSME (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	R <sup>2</sup> (%)	RSME (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )
LAI	MSR	63,16	0,57	66,33	0,48	55,65	0,60
	SR	67,27	0,54	76,41	0,40	57,43	0,59
	NDVI	57,11	0,21	58,25	0,17	51,72	0,22
Clh <sub>a,b</sub>	Vogelmann	13,92	7,00	0,77	7,82	–	–
	Gitelson	17,75	6,84	8,63	7,50	6,71	7,94
	NDVI	11,23	7,11	8,18	7,52	7,70	7,90

\* R<sup>2</sup> coeficiente de determinación, RSME = error cuadrático medio.



indices que pueden ser más apropiados (Stenberg *et al.*, 2004). Esto se ve apoyado por el hecho de que numerosos estudios han confirmado la importante contribución de las bandas del infrarrojo cercano (SWIR, *Short Wave Infra Red* en su denominación en inglés) a la estimación del LAI (Nemani *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 2004). Es interesante destacar que además de las regiones del infrarrojo cercano y del *Red Edge*, donde se fundamenta la mayoría de los índices de vegetación de uso común en la actualidad, y de uso frecuente en estudios forestales, donde se han utilizado con bastante éxito, se puede ver como en sistemas naturales complejos se pueden incluir índices que utilicen bandas de otras regiones como SWIR, que también han mostrado

su aplicación a los estudios de parámetros eco fisiológicos.

En los resultados de este trabajo se observa que en el caso del LAI, existe una mejora significativa de las relaciones obtenidas entre los índices calculados a partir de sensores hiperspectrales, sobre las obtenidas a partir de sensores multiespectrales. Para los sensores de media resolución esta diferencia alcanza valores cercanos al 20% para el índice SR. Mientras que entre los sensores de alta resolución espacial esta diferencia es muy variable, dependiendo del índice utilizado y de la especie estudiada, siendo en todos los casos superior al 10%.

La clorofila es posiblemente el pigmento más importante de las plantas, ya que controla la cantidad de radiación solar que el árbol absorbe y, por lo tanto, la capacidad fotosintética y la producción de los sistemas forestales, suministra un cálculo aproximado del estado nutritivo de la planta o permite evaluar diferentes niveles de estrés.

En lo que respecta al contenido en clorofila, los sensores de media resolución presentaron coeficientes de determinación con los índices calculados muy bajos, por lo que no parece que sean los más adecuados para elaborar cartografía de este parámetro. Por otro lado, en el caso de los sensores de alta resolución espacial, los coeficientes de determinación entre los índices considerados y el contenido de clorofila presentaron valores aceptables en el caso de AHS y muy variables en el caso de QuickBird. En este sentido, a la luz de los resultados puede afirmarse que la determinación del contenido de clorofila parece estar más influenciada por la resolución espacial de los datos que por la resolución espectral, por lo que no puede decirse que los sensores hiperespectrales presenten ventajas comparativas sobre los multiespectrales para el cálculo de esta variable ecofisiológica.

Los resultados parecen indicar que, en función de que parámetro se esté estudiando, los sensores hiperespectrales pueden suponer una ventaja comparativa frente a los sensores multiespectrales. En la estimación de valores de LAI en ecosistemas forestales los coeficientes de determinación más altos se obtuvieron para sensores hiperespectrales (Hyperion  $R^2=76,4$ , índice SR frente a Landsat  $R^2=57,4$ , índice SR). Por el contrario, la estimación de la contenido de clorofila presentó valores del coeficiente de determinación bajos para todos los sensores ( $R^2<17,7$ ).

### CARTOGRAFÍA DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS

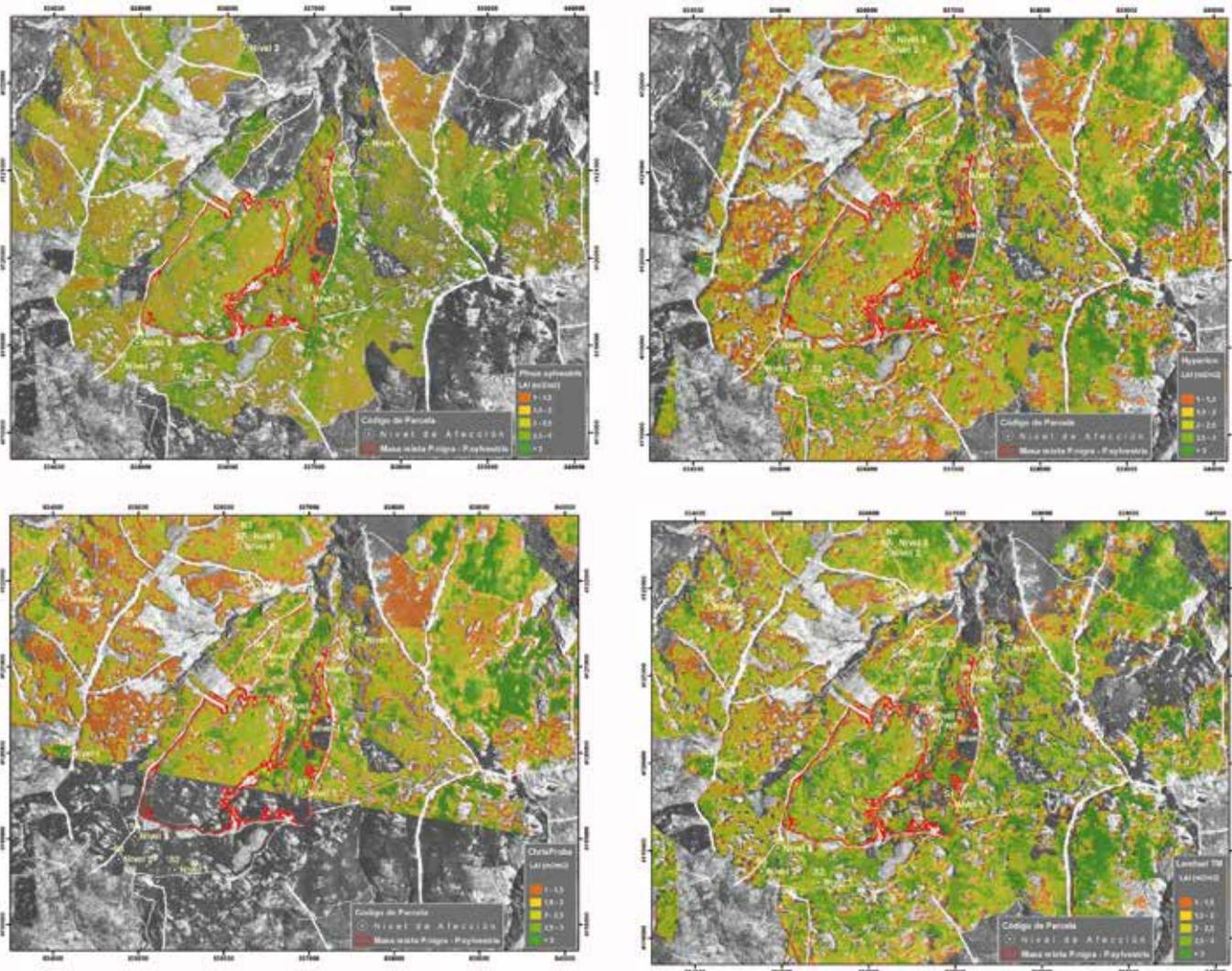
El producto final que se pretende obtener a partir del análisis de la información procedente de sensores es una cartografía de parámetros biofísicos en grandes superficies. En el caso de este estudio se utilizaron sensores de media resolución espacial ChrisProba, Hyperion y Landsat TM, y el índice *Modified Simple Ratio Index* (MSR) para del cálculo de LAI y, el índice Gitelson para el contenido de clorofila.

La cartografía de valores de LAI obtenida a partir del índice MSR utilizando los sensores AHS, ChrisProba, Hyperion y Landsat TM, resultan bastante coherentes entre sí, siendo este hecho más destacable entre los sensores hiperespectrales. La variabilidad espacial del rango de valores y la coherencia en su distribución apoya la consistencia de las cartografías obtenidas. El patrón de distribución de los valores más altos coincide con los fondos de valle y las laderas con orientación norte que son las áreas con mayor densidad y vigor del arbolado. Por otro lado, en algunos casos son apreciables las fajas de repoblación. En el caso de la cartografía del contenido de clorofila, obtenidas mediante el índice Gitelson para AHS, ChrisProba, Hyperion y Landsat TM, la variabilidad espacial es mucho mayor, y no puede observarse la misma coherencia entre los productos obtenidos a partir de los distintos sensores, por lo que son poco reconocibles patrones lógicos de distribución espacial.

### APLICACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE SENSORES PARA LA CARTOGRAFÍA DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS EN MASAS ARTIFICIALES DE PINAR EN ANDALUCÍA

Las relaciones obtenidas entre los valores de LAI y los índices de vegetación seleccionados son similares a las obtenidas en estudios previos. Estas relaciones han sido verificadas muchas veces y ampliamente discutidas (Deshayes *et al.*, 2006; Le Maire *et al.*, 2008).

Las dificultades de aplicar los índices de vegetación a la estimación de LAI parecen estar relacionadas con el comportamiento espectral de la hoja, en particular de las coníferas, por la forma de la acícula (Roberts *et al.*, 2004). A nivel del dosel, el componente estructural del bosque también influye en la capacidad de estimación del LAI, al intervenir árboles que ocupan espacios distintos dentro de la masa, por ejemplo árboles dominados, que contri-



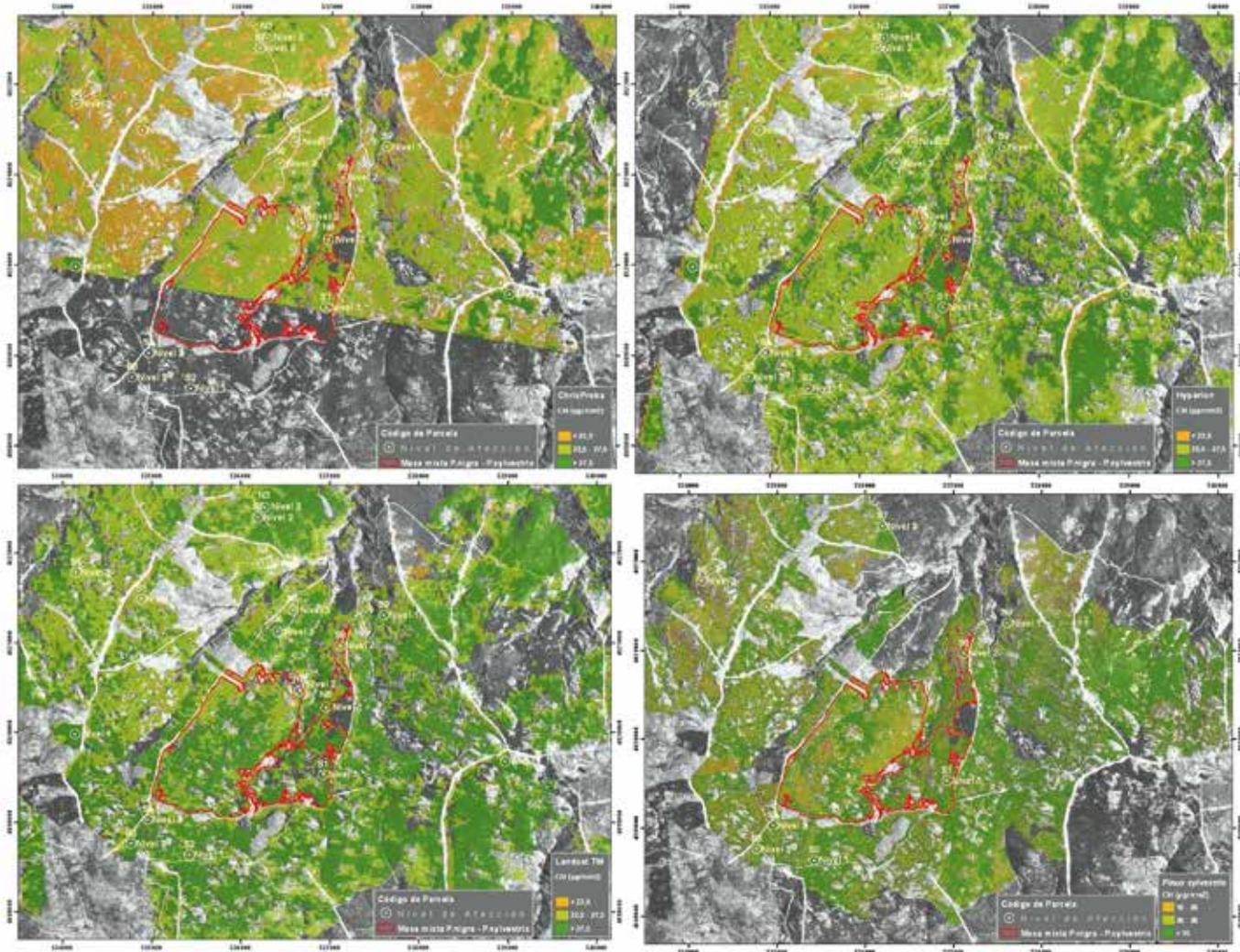
buyen de manera significativa al valor de LAI en campo, pero que el índice de vegetación no recoge de forma adecuada (Soudani *et al.*, 2003).

Las relaciones entre el LAI y los índices de vegetación estudiados muestran que los tres sensores de resolución espacial media se pueden aplicar para elaborar cartografía en pinares, aunque la fiabilidad de los modelos es mayor para los sensores hiperespectrales. Entre los tres índices estudiados, *Simple Ratio Index* (SR) puede ser considerado el mejor para la elaboración de cartografía de LAI en masas artificiales de pinar de *Pinus sylvestris* y *P. nigra* en las condiciones de estudio. Los

valores obtenidos para el sensor QuickBird fueron mucho más bajos que aquellos calculados con los sensores de resolución espacial media, lo que pone bajo cuestión el uso de este sensor para elaborar cartografía de LAI a escalas de detalle, aunque los resultados obtenidos requieren mayor estudio. No obstante, estos resultados pueden estar relacionados con el efecto de las bandas de QuickBird en el cálculo de los índices (Thenkabail *et al.*, 2004), así como el aparente efecto de las especies estudiadas.

En conjunto las diferencias entre sensores pueden deberse a las distintas condiciones de iluminación del dosel durante la adquisición

Cartografías de LAI obtenidas a partir del índice SR calculado para Quickbird.



Cartografías del contenido de clorofila, obtenidas mediante el índice Gitelson para ChrisProba, Hyperion y Landsat TM.

de cada una de las imágenes, a las diferencias estructurales y químicas del dosel (variaciones de LAI a lo largo del perfil vertical del dosel, densidad, contenido de clorofila), y a los efectos atmosféricos. Por ejemplo, el intervalo de adquisición de las imágenes fue de un mes entre Chris-Proba, Landsat, QuickBird y AHS (julio de 2008), y la imagen procedente del sensor Hyperion (agosto de 2008). Sin embargo, este último sensor presentó valores de los índices de vegetación similares a la Chris-Proba, y las diferencias mayores se observaron para los sensores multispectrales, en particular para QuickBird. Durante el período de tiempo entre la adquisición de las imágenes se puede suponer que las diferencias temporales de LAI fueron pequeñas,

y por tanto no explican las diferencias de los resultados entre sensores, aunque algunos estudios en bosques de coníferas indican que el LAI cambia ligeramente durante la estación vegetativa desde el final de julio al final de agosto (Gond *et al.* 1999). La suposición de que el LAI pudo cambiar durante el periodo vegetativo no está respaldada por nuestras observaciones fenológicas durante el periodo de estudio. Creemos que pueden tener más importancia las variaciones en las características estructurales de la masa, tales como la densidad (área basimétrica), y la distribución espacial de los pies, en un estrato claramente dominante y un estrato dominado, con numerosos árboles que contribuyen de manera significativa al valor total de LAI de

la parcela, pero que los valores de los índices no reflejan de forma adecuada, por lo que el efecto de la diferencia en la resolución espacial entre los sensores; sin embargo, parecen ser insignificantes.

## CONCLUSIONES

Los sensores hiperespectrales se han empezado a utilizar para estudiar ecosistemas mediterráneos recientemente. Como muchos otros sensores sobre plataformas espaciales, su uso va en aumento en detrimento de los sensores multiespectrales, por lo que es necesario realizar estudios comparados entre estos tipos de sensores. Este estudio fue diseñado para explorar si los sensores hiperespectrales pueden mejorar la estimación del LAI y de contenido de clorofila en comparación con los sensores multiespectrales. Los resultados más importantes de este trabajo pueden resumirse en lo siguientes:

1. El número de bandas parece ser una ventaja importante de los datos hiperespectrales sobre los multiespectrales para medir LAI en masas artificiales de pinar, por lo que puede disponerse de cartografía de esta variable a un costo razonable.
2. El NDVI no parece ser el índice más adecuado para estimar LAI en este tipo de sistemas forestales, mostrando mejores resultados los índices SR y MSR. Esto indica que el uso generalizado del NDVI en trabajos de cartografía de LAI debería ser reconsiderado, utilizando preferentemente índices basados en las bandas del infrarrojo.
3. Los sensores e índices utilizados no han permitido una adecuada estimación del contenido de clorofila en los bosques de pinar estudiados, por lo que se descarta, con estos resultados, su aplicación para elaborar cartografía fiable de esta variable en masas de pinar.

4. La integración de sensores hiperespectrales de resolución espacial media con otro tipo de sensores como LiDAR (acrónimo del inglés *Laser Imaging Detection and Ranging*) abre nuevas perspectivas para el análisis espacial y temporal de variables fisiológicas en bosques. ❀

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asner, G. P., Scurlock, J. M., & Hicke, J. A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 91-205.
- Blackburn, G. A. 2007. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 58, No. 4, pp. 855-867.
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., & Plummer, S. 1997. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 102, 429-443.
- Chuvieco, E., Riano, D., Aguado, I., Cocero, D., 2002. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (11), 2145-2162.
- Cohen, W. B., Maierpserger, T. K., Gower, S. T., & Turner, D. P. 2003a. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 84, 561-571.

La integración de sensores hiperespectrales de resolución espacial media con otro tipo de sensores como LiDAR (acrónimo del inglés *Laser Imaging Detection and Ranging*) abre nuevas perspectivas para el análisis espacial y temporal de variables fisiológicas en bosques

- Deshayes, M., Guyon, D., Jeanjean, H., Stach, N., Jolly, A., & Hagolle, O. 2006. The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. *Annals of Forest Science*, 63 (6) 579-595.
- Gitelson, A., Merzlyak, M. 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2691-2698.
- Gower, S., Kucharik, C., & Norman, J. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, PAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70, 29-51.
- Green, R. O., Eastwood, M. L., & Williams, O. 1998. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 65, 227- 240.
- Hernández-Clemente, R., Navarro-Cerrillo, R. M., Suárez, L., Morales, F., & Zarco-Tejada, P. J. 2011. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2360-2375.
- Johnson, L. F., Hlavka, C. A., & Peterson, D. L. 1994. Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect. *Remote Sensing of Environment*, 47, 216- 230.
- Kuusik, A. 1998. Monitoring of vegetation parameters on large areas by the inversion of a canopy reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2893-2905.
- Le Maire G., François C., Soudani K., Berveiller D., Pontailleur J., Bréda N., Genet H., Davi H., Dufrêne E., 2008. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112 3846–3864
- Lee, K-S., Cohen, W. B., Kennedy, R.E., Maiersperger, T. K., & Gower, S. T. 2004. Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment*. Volume 91, Issues 3-4, 30 June 2004, Pages 508-520.
- Lefsky, M., Cohen, W., & Spies, T. 2001. An evaluation of alternative remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 31, 78-87.
- Main, R., Cho, M. A., Mathieu, R., O'Kennedy, M. M., Ramoelo, A., & Koch, S. 2011. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 751-761
- Moorthy I., Miller J. R., & Noland T. L. 2008. Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: An assessment at the needle and canopy level. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2824-2838.
- Navarro-Cerrillo, R.M., Varo, M.A., Lanjeri, S., Hernández-Clemente, R. 2007. Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold) en la Sierra de los Filabres. *Ecosistemas*, 16, 163-171.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., Band, L., 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: sensitivity to remotely sensed leaf-area index estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (13), 2519-2534.
- Peddle, D. R., Hall, F. R., & LeDrew, E. F. 1999. Spectral mixture analysis and geometric-optical reflectance modelling of boreal forest biophysical structure. *Remote Sensing of Environment*, 67, 288-297.
- Reichstein, M., Tenhunen, J., Rouspard, O., Ourcival, J. M., Rambal, S., Miglietta, F., Peressotti, A., Pecchiari, M., Tirone, G., and Valentini, R. 2003. Inverse modeling of seasonal drought effects on canopy CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O exchange in three Mediterranean ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 10 108 (D23), 4726.
- Roberts, D. A., Ustin, S. L., Ogunjemiyo, S., Greenberg, J., Dobrowski, S. Z., Chen, J., 2004. Spectral and structural measures of Northwest forest vegetation at leaf to landscape scales. *Ecosystems*, 7, 545-562.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C. (1974). Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD.
- Soudani, K., Trautmann, J., & Walter, J. -M. N. 2003. Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3605-3618.
- Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P., & Smolander, Heikki 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. *Silva Fennica*, 38(1), 3-14.
- Teillet, P. M., Staenz, K., & Williams, D. J. 1997. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote Sensing of Environment*, 61, 139- 149.
- Thenkabail, P. S., Enclona, E. A., Ashton, M. S., Legg, C., & Jean De Dieu, M. 2004. Hyperion, IKONOS, ALL, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment*, 90, 23-43.
- Turner, D., Cohen, W., Kennedy, R., Fassnacht, K., & Briggs, J. 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*, 70, 2 - 68.
- Vogelman, T.C., Rock B.N., Moss, D.M. 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *Remote Sensing of Environment*, 14, 1563–1575.
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Mohammed, G. H., Noland, T. L., & Sampson, P. H. 2001. Scaling-up and Model Inversion methods with narrow-band Optical Indices for Chlorophyll Content Estimation in closed Forest Canopies with Hyperspectral Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 1491-1507.

# RED-VERDE

## Transporte Sanitario Sostenible



La Federación Nacional de Empresarios de Ambulancias (ANEA) junto con la Fundación Biodiversidad dentro del

Programa **Empleaverde**, en el marco del Programa Operativo Adaptabilidad y Empleo 2007-2013, y con la colaboración de la Fundación Nacional de Transporte Sanitario para la educación, cooperación y desarrollo (FNTS), pone en marcha el proyecto **"Red-Verde del Transporte Sanitario Sostenible"** que contempla 8 acciones interrelacionadas:

-Cuatro **cursos presenciales** en Comunidad Valenciana, Andalucía, Cataluña y Extremadura. "Estrategias para el Ahorro y Eficiencia Energética en el Sector del Transporte Sanitario".

-I Congreso Nacional del Transporte Sanitario Sostenible, en Madrid.

-Guía de Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética para el Sector Transporte Sanitario.

### Red-Verde del Transporte Sanitario

**Sostenible** es una plataforma on-line donde se promueve la interacción de los profesionales y emprendedores del transporte sanitario, eco-inversores, proveedores de tecnologías y servicios ambientales (autogas, vehículos híbridos...).

Dicha plataforma se integrará en Red **emprenverde**

[www.redemprenverde.es](http://www.redemprenverde.es)

-**Asesoramiento técnico** para el cálculo y minimización de la huella de carbono y la elaboración de planes de movilidad en pymes de transporte sanitario.

"Acciones gratuitas cofinanciadas por el FSE"

Acciones gratuitas cofinanciadas por el FSE:



UNIÓN EUROPEA  
FONDO SOCIAL EUROPEO  
El FSE invierte en tu futuro



Con la colaboración de:

# Orgullosos de lo nuestro

Alimentos con garantía de origen y tradición



Denominación  
de Origen  
Protegida



Indicación  
Geográfica  
Protegida



Especialidad  
Tradicional  
Garantizada



Europa los distingue ¿y tú?



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE,  
Y MEDIO RURAL Y MARINO

alimentación.es