



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-088

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
**Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017**  
**ISBN 978-84-941695-2-6**  
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Aplicación de drones (RPAS) en la gestión forestal. Resultados de proyectos piloto demostrativos.

M<sup>a</sup> JOSÉ CHECA ALONSO<sup>1</sup>, LUCÍA YAÑEZ RAUSELL<sup>1</sup>, PEDRO MIGUELSANZ<sup>1</sup>, ROSARIO ESCUDERO BARBERO<sup>1</sup>, FRANCISCO LARIO LEZA<sup>2</sup>, ASUNCIÓN ROLDÁN ZAMARRÓN<sup>3</sup>, SERGIO MOLINA BLÁZQUEZ<sup>1</sup>, JULIÁN REJAS AYUGA<sup>1</sup>, JESÚS REDONDO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo Tragsa. Gerencia de SIG, Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. ([mca@tragsa.es](mailto:mca@tragsa.es))

<sup>2</sup> Grupo Tragsa. Vivero Maceda / UT1, Empresa de Transformación Agraria, S.A.

<sup>3</sup> Grupo Tragsa. Subdirección de Soporte Técnico e Innovación, Empresa de Transformación Agraria, S.A.

**Resumen.** Los drones, o RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) constituyen una herramienta idónea para el análisis del territorio, con grandes ventajas de accesibilidad tecnológica, flexibilidad operacional y gran potencial de uso para inventario, modelización y gestión forestal. El Grupo Tragsa trabaja para las Administraciones Públicas cubriendo un amplio rango de actividades, a escala nacional e internacional. Conscientes del gran potencial de la tecnología RPAS, se comenzó en 2015 un proyecto de innovación con el fin de incorporarla a las actividades del Grupo. En 2015 se formó a personal propio en la operación, mantenimiento y procesado de datos RPAS, se adquirió equipamiento que permitiera operar con independencia y rapidez y se obtuvo la habilitación como operadores. Asimismo, se comenzó a diseñar un marco estratégico común de actuación que incluyera los procedimientos necesarios para asegurar la calidad de los resultados. A lo largo de 2016 se han llevado a cabo ensayos piloto entre los que destacan cuestiones de gran interés forestal como son: control fitosanitario de las masas forestales, seguimiento de quemas prescritas, cartografía de diques y caminos, y censos de fauna. Los resultados de los ensayos confirman los beneficios que puede aportar esta tecnología en la gestión forestal.

### Palabras clave

Dron, RPAS, teledetección, territorio, inventario, gestión

## 1. Introducción

Los RPAS son una herramienta idónea para la observación y análisis del territorio. En particular, los que se clasifican como mini o *handheld* son de fácil acceso para profesionales y empresas, resultan económicos, con una enorme flexibilidad operacional y gran potencial de aplicación. Su simplicidad e inmediatez en captura y disposición de información para múltiples propósitos, así como la alta resolución espacial que pueden alcanzar las imágenes obtenidas, han sido factores clave de su gran aceptación en el mercado y del notable incremento de usuarios en los últimos años. (VILLACAÑAS *et al.*, 2015).

Pese a que la tecnología RPAS ha alcanzado un alto nivel de desarrollo en lo que se refiere a las plataformas, sensores y sistemas embarcados, aún hay un largo camino por recorrer en el campo de las aplicaciones, corrección, calibrado y procesado de datos. Estos trabajos están perfectamente implantados para datos capturados con sensores aerotransportados (aviones tripulados) y satelitales, pero las características de los datos procedentes de RPAS hacen necesario un tipo de tratamiento específico. Las imágenes RPAS tienen mayores problemas radiométricos, debido a las características de los sensores, y más ruido que las de satélite, debido entre otros a los efectos causados por las sombras y las zonas iluminadas por el sol (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, abreviado BRDF). Modelizar estos efectos es importante para obtener imágenes de calidad.

La industria de los RPAS está bien establecida en España, como lo demuestran los más de 1900 operadores habilitados para realizar actividades aéreas de trabajos técnicos o científicos (AESA, Registro de Declaración Responsable de Operador de Aeronaves RPAS, 2016), con una expectativa de crecimiento de un 100% en los próximos 4 años. Las técnicas de Teledetección y Fotogrametría pueden aplicarse ahora sin necesidad de complejos programas espaciales o costosos contratos de

53 vuelo. Los RPAS constituyen, además, un campo tecnológico que se encuentra en pleno auge, gracias  
54 a la cada vez más avanzada tecnología y a la existencia de un marco normativo que regula la  
55 actividad. En España se inicia con un reglamento temporal publicado para regular la utilización civil de  
56 los RPAS (artículos 50 y 51 de la Ley 18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes  
57 para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, vigente hasta que el Gobierno determine  
58 reglamentariamente el régimen jurídico de los RPAS, referente a sus operaciones y actividades), en la  
59 que se contemplan como actividades aéreas con RPAS los trabajos técnicos o científicos y los vuelos  
60 especiales, estableciendo las normas y limitaciones operacionales.

61  
62 Cabe también señalar que los RPAS permiten en algunos casos la integración multisensor  
63 (VILLA, G. *et al.*, 2013), lo que abre la posibilidad para la realización de estudios locales en cubiertas  
64 heterogéneas utilizando por ejemplo una cámara térmica que permite extraer índices de estrés  
65 hídrico, junto a un sensor LiDAR (por su capacidad de penetración), para obtener datos de la  
66 estructura de la vegetación. La combinación de todos ellos, operados de forma simultánea en  
67 plataformas RPAS comienza a ser ahora posible. No obstante, grandes retos quedan por delante para  
68 afrontar la complejidad de la integración de los sensores (MOLINA, S. *et al.*; 2010), su sincronización y  
69 calibración, el procesado de la información y el ajuste e integración de los datos.

70  
71 Los datos RPAS pueden aportar información de gran valor y utilidad para aplicaciones  
72 relacionadas con la gestión forestal, entre las que pueden destacarse: cartografía y topografía,  
73 inventarios de vegetación e infraestructuras, seguimiento de incendios, control de plagas y  
74 enfermedades, selvicultura, vigilancia en espacios protegidos, seguimientos de fauna, estudio de  
75 biodiversidad, monitorización de especies exóticas invasoras, biomasa, etcétera.

76  
77 El Grupo Tragsa trabaja para las administraciones públicas cubriendo un amplio rango de  
78 actividades, tanto a escala nacional como internacional. La tecnología RPAS tiene aplicación en  
79 multitud de campos de actividad de la empresa por lo que, desde hace ya algunos años, se venían  
80 realizando trabajos piloto en distintos ámbitos de aplicación (emergencias, seguimiento y control de  
81 obras en lugares de difícil acceso, control medioambiental...). Siendo conscientes del gran potencial  
82 que ofrece la tecnología RPAS y la importancia de integrarla dentro de la cartera de servicios, se inició  
83 en 2015 el proyecto de innovación GTRPAS1517, financiado por el Grupo Tragsa, cuyo objetivo es  
84 analizar la posibilidad e idoneidad de la aplicación de la tecnología RPAS a diferentes campos de  
85 actividad, así como sus limitaciones.

86  
87 En el ámbito de este proyecto, la empresa (i) ha adquirido plataformas y sensores propios, (ii)  
88 ha formado al personal necesario para la operación, mantenimiento y procesado de datos RPAS, (iii)  
89 se ha habilitado como empresa operadora de RPAS (diciembre de 2015), (iv) ha desarrollado y  
90 contrastado metodologías de trabajo, (v) ha adquirido experiencia en planificación de operaciones,  
91 captura de datos y generación de productos y servicios basados en RPAS y en su uso integrado con  
92 otros tipos de información y (vi) ha comenzado a establecer una cartera de colaboradores para la  
93 realización de distintos trabajos basados en RPAS. Asimismo, dentro del proyecto se ha articulado el  
94 Grupo de Trabajo RPAS, compuesto por expertos en las principales temáticas de aplicación de RPAS,  
95 en el que están representadas todas las unidades territoriales y las principales unidades  
96 organizativas a nivel de empresa.

97  
98 Durante finales de 2015 y 2016 el Grupo Tragsa ha desarrollado diversos ensayos piloto en las  
99 áreas temáticas de sanidad vegetal, incendios y emergencias, censos, reconocimiento y localización e  
100 identificación de individuos, fotogrametría y reportaje. En los siguientes apartados se describen los  
101 casos de estudio considerados de mayor interés: seguimiento de quemas prescritas, censos de fauna,  
102 cartografía de diques y caminos y control fitosanitario de masas forestales, abordando este último  
103 caso con mayor nivel de detalle.

104

105 En 2017, en base a los resultados de los ensayos realizados dentro de la temática de sanidad  
106 forestal, darán comienzo dos nuevos proyectos europeos en consorcio (PLURIFOR-SUDOE y DATABIO-  
107 H2020) en los que se explorarán metodologías y protocolos de análisis de datos combinando  
108 información procedente de campo, análisis de laboratorio y datos capturados con plataformas  
109 basadas en RPAS y satélite para el análisis de algunas de las principales patologías que afectan a  
110 nuestras masas forestales: nematodo del pino, seca de la encina y gorgojo del eucalipto.

111

## 112 2. Objetivos

113

114 **2.1.- Control fitosanitario de las masas forestales.** Se trata de poner a punto metodologías y  
115 protocolos de trabajo específicos para la caracterización y seguimiento del estado fitosanitario de las  
116 masas forestales que combinen los muestreos de variables fisiológicas en campo y los análisis  
117 fitopatológicos de laboratorio, con la correlación de determinados parámetros biofísicos calculados  
118 sobre imágenes multiespectrales, térmicas y visibles capturadas desde satélite y RPAS.

119

## 120 2.2.- Otros ensayos

121

122 **Seguimiento de quemas prescritas.** Se trata de probar las posibilidades que ofrece esta tecnología en  
123 los tratamientos de la vegetación mediante quemas prescritas, para la coordinación en campo de los  
124 retenes y como herramienta para la verificación de la extinción total del fuego en todo el perímetro.

125

126 **Censos de fauna.** Se busca ensayar métodos de muestreo para localización e identificación (especie,  
127 edad y sexo) de grandes ungulados en espacios naturales, montes públicos o fincas cinegéticas con  
128 el fin de ahorrar tiempo y costes con respecto a los censos tradicionales, especialmente para aquellas  
129 zonas de difícil acceso.

130

131 **Cartografía de diques.** Se pretende obtener de forma rápida una caracterización por técnicas  
132 fotogramétricas de diques y acceso a los mismos con el fin de conocer su estado de conservación y  
133 detectar necesidades de reparación o mantenimiento; y comparar los resultados con los obtenidos  
134 mediante inventario tradicional de diques forestales (acceso a pie y toma de datos de forma manual).

135

## 136 3. Metodología

137

### 138 3.1.- Control fitosanitario de las masas forestales.

139

140 Dentro de esta temática se han realizado dos ensayos. En ambos estudios, la hipótesis de  
141 partida fue que los árboles afectados presentarían un menor vigor vegetal manifestado por problemas  
142 de clorosis, defoliación, decaimiento generalizado...que se refleja en distinto comportamiento  
143 espectral. Aunque estos síntomas no son específicos de una patología, lo que obliga a su verificación  
144 en campo, sí permiten cartografiar la extensión de la afección y su evolución en el tiempo. Los  
145 síntomas de estrés que se producen en la vegetación pueden ser detectados mediante el análisis  
146 espectral: (i) en la región del óptico (rango visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético),  
147 a partir de índices de vegetación relacionados con la estructura de la vegetación y la actividad  
148 fotosintética, la concentración de pigmentos y la eficiencia en el uso de la luz y (ii) en la región del  
149 térmico, a partir de la temperatura de las copas.

150

151 **3.1.1.- Detección del grado de afección por el hongo *Armillaria mellea* en masas de *Pinus pinaster* en**  
152 **Dozón (Pontevedra)** (CHECA, M. J. et al., 2015). Esta experiencia es anterior a 2016, y estaba  
153 integrada en el proyecto de I+D+i FORRISK, realizado en consorcio europeo y subvencionado por el  
154 Programa INTERREG IV B SUDOE. El ensayo se llevó a cabo en una parcela de 13 ha (dentro de un  
155 monte vecinal en mano común de 136 ha) ocupada por una masa homogénea de *P. pinaster* en  
156 estado de latizal de 14 años afectada por *Armillaria mellea*. El trabajo se planteó a dos escalas: una  
157 regional, empleando sensores embarcados en satélite, utilizando imágenes multiespectrales

158 (WorldView2) de los años 2010 y 2014, y otra local, a partir de imágenes adquiridas con sensores  
 159 multiespectrales a bordo de RPAS, en 2013.

160  
 161 Los datos proporcionados por el satélite WordView2 incluyen una banda pancromática a 50 cm  
 162 de resolución espacial y ocho bandas multiespectrales a 2 m, localizadas en el visible y el infrarrojo  
 163 cercano del espectro electromagnético (<https://www.digitalglobe.com/about/our-constellation>). Para  
 164 los vuelos RPAS se trabajó en colaboración con ZUMAIN Ingenieros, utilizando dos cuadricópteros  
 165 (MD4-200 y MD4-1000) y dos sensores, cámara compacta (RGB) y multiespectral diseñada  
 166 específicamente para el estudio de la vegetación (Tetracam Mini MCA6).

167  
 168 A partir de las imágenes multiespectrales (tanto satelitales como de RPAS) se derivaron distintos  
 169 índices espectrales relacionados con el vigor vegetal, la biomasa, el contenido en pigmentos y la  
 170 eficiencia en el uso de la luz, que proporcionaron información sobre el estado de la vegetación a nivel  
 171 de dosel vegetal y de individuo. En concreto se calcularon los siguientes índices: ARI (GITELSON et al.,  
 172 2001), CRI (GITELSON et al., 2002), MCARI (DAUGTHY et al., 2000), NDVI (ROUSE et al, 1973), GNDVI  
 173 (GITELSON et al, 1996), GRVI (GITELSON et al, 2002), MTVI (HABOUDANE et al, 2004), NDRE  
 174 (GITELSON et al., 1994). PRI (GAMON et al., 1992), SIPI (PENUELAS et al., 1995) y PSRI (MERZLYAK et  
 175 al., 1999). Estos fueron contrastados con datos de verdad terreno (potencial hídrico, concentración  
 176 de clorofila, biomasa, índice de área foliar, altura del árbol, diámetro normal y altura y diámetro de la  
 177 copa) recopilados en verano de 2014, que complementaban un estudio fitopatológico realizado en  
 178 2013.

179  
 180 3.1.2.- Detección del grado de afección por picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*) en palmeras  
 181 datileras (*Phoenix dactylifera*) en Abanilla (Murcia), mediante imágenes multiespectrales y térmicas  
 182 adquiridas con RPAS. Para ello se sobrevoló una zona del palmeral de Abanilla, próxima al núcleo de  
 183 población de El Partidor (Murcia), que abarca una superficie de 13 ha. La parcela está compuesta por  
 184 una masa de palmera datilera de entre 0,5 y 2 m de altura de estípite. El vuelo se realizó en  
 185 septiembre de 2016, con el octocóptero DJI S1000 equipado con tres sensores integrados (figura 1):  
 186 cámara compacta (RGB, Sony Alpha 5100), termográfica (FlirA65) y multiespectral (Tetracam  $\mu$ MCA6).  
 187 Para su validación se contó con una muestra de palmeras sanas y enfermas (12 pies de cada grupo).

188



189

190 *Figura 1. Plataforma multisensor experimental: multirrotor DJI S1000 y sensores multiespectral (Tetracam  $\mu$ MCA6),*  
 191 *térmico (FLIR A65) y cámara compacta (Sony Alpha 5100).*

192 La primera fase del estudio consistió en generar una máscara de la copa de los árboles. Para  
 193 ello, en el caso de las imágenes adquiridas con RPAS, se combinaron los índices de vegetación y el  
 194 modelo digital de superficies (procedente de la nube de puntos de alta densidad obtenida en el  
 195 proceso de corrección geométrica de estas imágenes). Posteriormente, el análisis a nivel de dosel  
 196 arbóreo se centró en los índices de vegetación derivados de las imágenes multiespectrales ARI  
 197 (GITELSON et al., 2001), GNDVI (GITELSON et al, 1996), NGRDI (TUCKER, 1979), NDVI (ROUSE et al,  
 198 1973), OSAVI (RONDEAUX et al. (1996), TCARI (HABOUDANE et al. 2002) y TCARI/OSAVI  
 199 (HABOUDANE et al. 2002), y de los datos de temperatura y su contraste con los datos de campo.

200

201

### 202 3.2.- Otros ensayos

203

204 **Seguimiento de quemas prescritas.** El ensayo se realizó en noviembre de 2015 en A Gudiña  
205 (Ourense), en una parcela de 1,2 ha ocupada por *Erica* y *Genista tridentata* (modelo de combustible  
206 5). Para los vuelos RPAS se empleó el hexacóptero AibotX6 equipado con cámara RGB (Panasonic  
207 Lumix DMC-GX1) y termográfica (FLIR TAU 336). Se trabajó en colaboración con el grupo ACRE (el  
208 Grupo Tragsa estaba ultimando su proceso de habilitación como empresa operadora de RPAS, que  
209 obtuvo en diciembre de 2015). Se realizaron diferentes vuelos: por un lado se voló en modo manual-  
210 asistido en coordinación con el operativo terrestre para recibir imágenes en tiempo real que sirviesen  
211 al puesto de mando para coordinar la operativa (detección de focos, movimiento de efectivos, etc); y  
212 por otro lado se realizaron vuelos planificados antes y después de la quema, para analizar y  
213 documentar la parcela quemada.

214

215 **Censos de fauna.** El ensayo se realizó en noviembre de 2016 dentro de una finca cinegética en Jaén,  
216 en el entorno del monte público de Lugar Nuevo (JA-70060-EP). Se empleó el octocóptero DJI-S1000  
217 equipada con cámara RGB (Sony Alpha 5100) y termográfica (FLIR A65) para la localización e  
218 identificación de individuos de diferentes especies de cérvidos. El diseño del ensayo fue realizado en  
219 colaboración con personal conocedor de la zona y de las especies a censar. La selección de la zona  
220 de estudio, ocupada en su mayoría por formaciones adhesionadas de Quercíneas, se realizó teniendo  
221 en cuenta principalmente: la orografía, la densidad de individuos de la parcela y las posibilidades de  
222 cotejar los resultados del vuelo con datos de censos reales. Se trabajó durante las primeras y últimas  
223 horas de la jornada, ya que es cuando los animales están más activos. Previamente al vuelo, se llevó  
224 a cabo un censo por el método de transectos de anchura variable realizado por personal  
225 especializado, recorriendo en vehículo 4 tramos de una longitud de 7.100 metros y abarcando una  
226 superficie de 623 ha. Los vuelos RPAS se planificaron sobre 3 de los 4 tramos censados con el fin de  
227 poder validar los resultados, lo que supuso 3.800 metros y 150 has barridas por el sensor  
228 termográfico.

229

230 **Cartografía de diques.** El ensayo se realizó en mayo de 2016 en el monte público Pinar y Dehesa del  
231 Río Chíllar (MA-30017-AY), en el Parque Natural de Sierra Tejeda, Almijara y Alhama, junto a la  
232 localidad de Nerja (Málaga). La vegetación está dominada por pinares de *Pinus halepensis*, con  
233 abundante sotobosque en algunas zonas. Se procedió a levantar tres diques forestales, de gravedad y  
234 ejecutados en mampostería hidráulica, que presentaban características óptimas por su  
235 emplazamiento en una cerrada de difícil acceso a pie, pero cercana a pista forestal y con suficiente  
236 visibilidad aérea. Para ello se empleó el hexacóptero AibotX6 equipado con sensor RGB (Sony Alpha  
237 6000) con objetivo de focal fija de 20 mm. Como apoyo para el análisis e interpretación del estado de  
238 los diques, se realizaron vuelos complementarios sobre cada uno de los diques con captura de video.  
239 Ya que el trabajo exigía georreferenciación precisa, se planificó el apoyo del vuelo fotográfico con  
240 puntos de apoyo al inicio y fin de cada pasada (pre-señalizados con dianas de puntería de 20 x 20  
241 cm). Para el procesado de las imágenes capturadas se empleó el software Photoscan de Agisoft. El  
242 flujo de trabajo fue el siguiente: calibración de la cámara; alineación de las imágenes; generación de  
243 la nube de puntos; generación de ortofotografía.

244

## 245 4. Resultados

246

### 247 4.1.- Control fitosanitario de las masas forestales

248

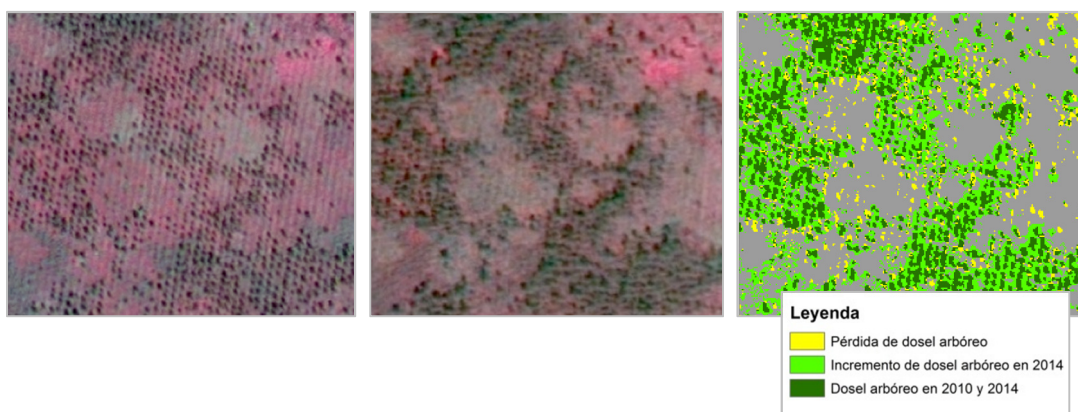
#### 249 4.1.1.- Detección del grado de afección por el hongo *Armillaria mellea* en masas de *Pinus pinaster*.

250

251 El análisis con imágenes de satélite permite obtener una visión global a escala zonal del estado  
252 y la evolución de la masa forestal a lo largo del periodo de estudio, mientras que la alta resolución  
253 proporcionada por las imágenes RPAS facilita la identificación de los árboles individuales, pudiendo  
254 realizarse un análisis detallado de su estado a partir de los distintos índices de vegetación.

255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264

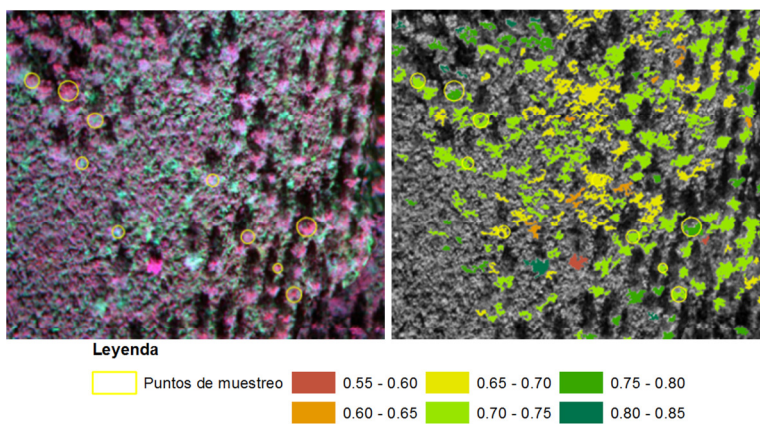
Los resultados del análisis de las imágenes de satélite muestran la gran pérdida de pies de arbolado siguiendo un patrón característico de calveros (figura 2), así como el decaimiento generalizado de la masa forestal, entre los dos años de referencia. A nivel de detalle, a partir de las imágenes RPAS, los índices estructurales, como el NDVI, presentan una respuesta fiable y coherente con lo observado en campo, donde los pies más afectados y con mayores síntomas de estrés (árboles de menor tamaño y mayor defoliación y valores de NDVI más bajos) se localizan en el centro o borde del calvero y los sanos en las áreas de arbolado más compactas (figura 3).



265  
266  
267  
268

Figura 2. Imágenes WV2 del 24/07/2010 (izquierda), WV2 del 15/08/2014 (centro) y detalle del mapa de cambios 2010 - 2014, derivado de las imágenes WorldView 2.

271  
272  
273



274

275  
276

Figura 3. Árboles muestreados sobre la imagen en falso color (izda) y valores de NDVI a escala de árbol (dcha).

277  
278  
279  
280  
281  
282  
283  
284  
285

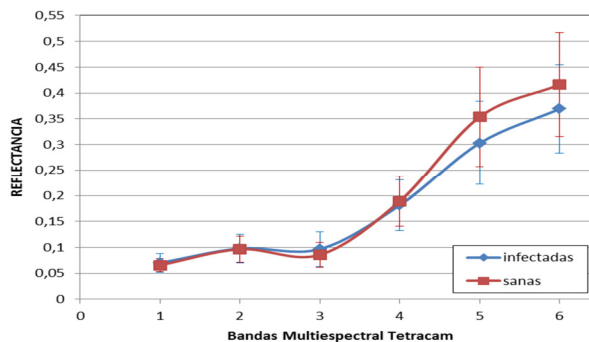
Los resultados de correlación entre los índices estructurales como el NDVI y los parámetros medidos en campo indican que es significativa ( $P < 0.05$ ) en el caso de la concentración en clorofila en acículas, del índice de área foliar y de algunos parámetros dasométricos (tabla 1). Sin embargo, los resultados no son significativos para los parámetros de potencial hídrico, fluorescencia, colorimetría y biomasa, probablemente muy dependientes de las condiciones ambientales del momento.

286 *Tabla 1. Correlación de Pearson y su significación del índice de vegetación (P<0.05), NDVI, con los parámetros medidos en*  
 287 *campo, concentración en clorofila (Chl), índice de Área Foliar (LAI), diámetro del tronco y la copa y altura de la copa y del*  
 288 *árbol.*

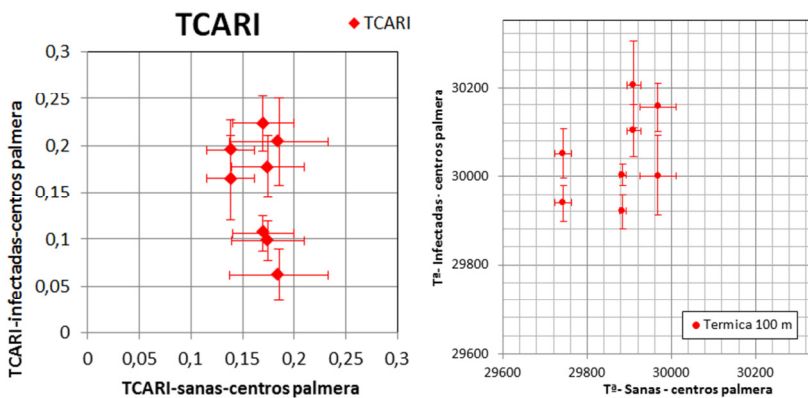
		Chl a	Chl b	Chl ab	LAI 4	LAI 5	Diám. tronco	Diám. copa	Altura árbol	Altura copa
NDVI	Correl.	0,6496	0,6757	0,6591	0,8437	0,8409	0,6896	0,5591	0,6444	0,3775
	valor p	0,0421	0,0320	0,0382	0,0022	0,0023	0,0273	0,0929	0,0443	0,2822

296 **4.1.2.- Detección del grado de afección por picudo rojo en palmeras datileras.**

297  
 298 Los resultados del análisis de las firmas espectrales (figura 4a), índices de vegetación (ejemplo,  
 299 figura 4b) y temperatura (ejemplo, figura 4c) de las palmeras sanas y afectadas por picudo rojo  
 300 presentan una gran dispersión de sus valores, con solapes importantes entre todas ellas (valores  
 301 medios y desviación estándar de las muestras), sin que se aprecien diferencias significativas entre las  
 302 dos poblaciones. Sólo en el caso de las temperaturas, la separación entre las muestras de las  
 303 palmeras sanas y afectadas muestra una tendencia de valores de temperatura más altos para las  
 304 palmeras infectadas respecto a las sanas (figura 4c).  
 305



(a)



(b)

(c)

308 *Figura 4. (a) Media (± desviación estándar) de los valores de reflectancia de la imagen multiespectral para la copa*  
 311 *de las palmeras sanas e infectadas. La numeración del eje X corresponde con las bandas espectrales del azul (1,*  
 312 *490 nm), verde (2, 550 nm), rojo (3, 680 nm), borde del rojo (4, 720 nm), infrarrojo cercano 1 (5, 800 nm) e*  
 313 *infrarrojo cercano 2 (6, 900 nm). (b,c) Ejemplo de media (± desviación estándar) de los valores del índice de*  
 314 *vegetación TCARI (Haboudane et al 2002), derivado de la imagen multiespectral y relacionado con la concentración*  
 315 *de clorofila (b) y de los valores de temperatura (c) para la zona central de la copa de las palmeras.*



## 316 4.2.- Otros ensayos

317

318 **Seguimiento de quemas prescritas** De los datos RGB capturados se obtuvieron ortofotografías del  
 319 antes y después de la quema, con georreferenciación aproximada (los datos GPS se obtuvieron de los  
 320 registrados por el Geobox integrado en AibotX6). De los datos térmicos capturados, se obtuvieron los  
 321 videos de la evolución de la quema con valores de temperaturas (figura 5) y las escenas después de  
 322 la quema para una ortofotografía con valores de temperatura en el interior y perímetro de la parcela.  
 323



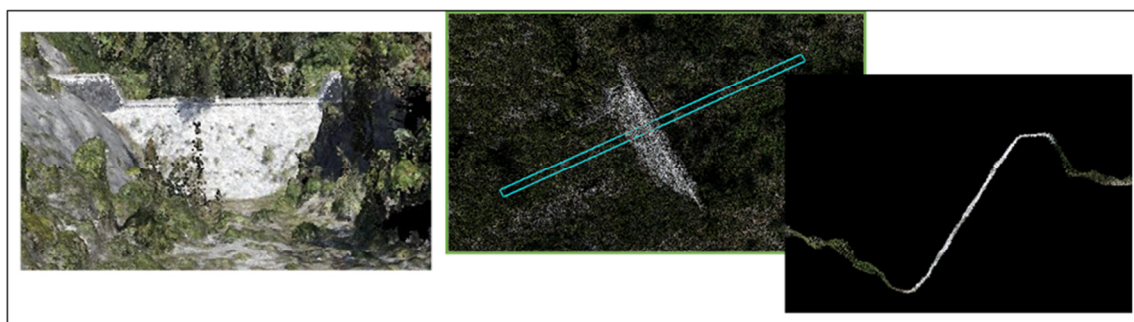
324

325 *Figura 5. El sistema AibotX6 integrado en la operativa de quemas (izquierda); Imagen RGB y térmica de la parcela*  
 326 *durante la quema (dcha).*

327

328 **Censos de fauna.** Con el censo por el método de transectos de anchura variable, realizado entre las  
 329 16h10 y las 17h20 del día anterior al vuelo RPAS se recogieron datos del número de individuos,  
 330 especie, sexo, rango de edad y distancia perpendicular al transecto, observándose 23 individuos en el  
 331 total de los tramos y 20 en los 3 tramos sobre los que se llevó a cabo el vuelo en el día siguiente. Se  
 332 realizaron vuelos para cubrir los 3 tramos planificados, componiéndose cada uno de ellos por una  
 333 pasada de ida y otra de vuelta con un solape longitudinal del 80% y transversal del 30% (aunque en  
 334 los vuelos RPAS se recomienda aumentar el solape transversal, en este caso para acercar el ancho de  
 335 barrido a la máxima longitud medida en el método del transecto de anchura variable (120 m.) se optó  
 336 por rebajarlo al 30%). Se sigue trabajando en el procesado de la información y análisis de resultados.  
 337

338 **Cartografía de diques.** Se generó una nube de puntos densa en formato de más de 200 pto/m<sup>2</sup> y  
 339 una ortofotografía de 2 cm de GSD (Ground Sample Distance) que permitieron obtener una  
 340 caracterización muy completa de los diques levantados (figura 6). El análisis y explotación de la nube  
 341 de puntos permitió la medición de las distintas magnitudes que definen el dique (altura, anchura,  
 342 espesor, pendientes del paramento, obras complementarias), mientras que el nivel de detalle de la  
 343 ortofotografía, así como la realización de un video específico para cada dique, hicieron posible  
 344 identificar las diferentes patologías de los mismos (grietas, descalzamientos, etc.).  
 345



346

347 *Figura 6. Nube de puntos densa del dique (izquierda); perfil transversal del dique (derecha)*

## 348 5. Discusión

349

### 350 5.1.- Control fitosanitario de las masas forestales,

351

352 Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de los datos adquiridos con satélite y RPAS y  
353 de las herramientas de teledetección en el seguimiento espacial y temporal de las masas forestales  
354 afectadas por enfermedades o plagas a distintas escalas de trabajo.

355

356 En el caso de afección por *Armillaria* los resultados permiten detectar el decaimiento y muerte  
357 del arbolado. Sin embargo, no fue posible determinar la causa a partir del estudio fitopatológico de  
358 las muestras tomadas en árbol y suelo. Algunos parámetros medidos en campo son más sensibles a  
359 los cambios en las condiciones ambientales, como potencial hídrico y fluorescencia. La diferencia de  
360 fechas entre el vuelo y el muestreo de campo puede haber influido en las bajas correlaciones entre  
361 estos parámetros y los índices de vegetación derivados de las imágenes. Mientras que las altas  
362 correlaciones con los parámetros dasométricos de altura del árbol y diámetro podrían explicarse por  
363 el efecto acumulado de estrés a lo largo de los años de afección.

364

365 Para la detección de afección por picudo rojo en palmeras datileras, aunque no se observan  
366 diferencias significativas entre palmeras infectadas y sanas, los resultados para la temperatura  
367 presentan potencial para esta aplicación. Sin embargo, hay dos factores que condicionan el resultado.  
368 Por un lado, el tamaño de la muestra es pequeño (8-12 pies). La densidad, complejidad estructural y  
369 diferencia de edades y alturas de las palmeras dificulta la separación de pies individuales, existiendo  
370 superposición de las hojas de palmeras colindantes. Esto obliga a restringir las muestras a la zona  
371 central del estípite de las palmeras o a desecharlas debido a esta superposición. Por otro lado, las  
372 fechas de toma de estos datos en campo (8-11-2016) y del vuelo de RPAS (22-09-2016) difieren. Se  
373 asume que no hay cambios significativos en la respuesta a la infección de las palmeras muestreadas  
374 en este periodo, pero existen características fisiológicas cuyos valores pueden variar en poco tiempo.

375

### 376 5.2.- Otros ensayos

377

378 **Seguimiento de quemas prescritas.** Los resultados respondieron a los objetivos y requerimientos  
379 planteados. Tanto los vuelos como el tratamiento y transmisión de datos no presentaron problemas.  
380 La disponibilidad de imágenes visibles facilita el seguimiento y control de las operaciones y del  
381 trabajo de los efectivos en tiempo real, mientras que los datos térmicos permiten al responsable de  
382 los trabajos seguir la evolución del fuego, de manera que se puede controlar el tiempo que tarda en  
383 enfriarse el perímetro de la parcela tratada e identificar y controlar los puntos calientes presentes en  
384 el perímetro o fuera de éste que son susceptibles de generar un incendio, así como verificar la  
385 extinción total del fuego de forma objetiva antes de retirar los efectivos. Por otro lado, el procesado de  
386 los datos capturados sirve como prueba documental de los trabajos realizados.

387

388 **Censos de fauna.** Pese a que los resultados aún se están analizando, parece que las imágenes  
389 térmicas capturadas por el RPAS permiten detectar con bastante precisión la presencia de ungulados  
390 en su entorno natural, ya que su temperatura corporal contrasta claramente con la de la vegetación.  
391 El apoyo de las imágenes visibles es importante a efectos de fotointerpretación. La captura y el  
392 procesado de datos RPAS no revistieron especial complejidad pero, sin embargo, el posterior trabajo  
393 de fotointerpretación y el contraste con los datos de campo es bastante complejo y necesita de un  
394 conocimiento experto. En base a la metodología aplicada en este ensayo parece improbable que  
395 puedan identificarse de forma fiable la especie, edad y sexo de los individuos.

396

397 **Cartografía de diques.** Los productos finales se obtuvieron en un plazo muy reducido, cumpliendo con  
398 los requerimientos exigidos por los gestores de la zona. Tanto los vuelos como la planificación y el  
399 procesado no presentaron problemas. La elección de equipos y sensores no resultó la más adecuada  
400 debido, por una parte, a la complejidad de la toma de puntos de apoyo sobre el terreno y la cobertura

401 GPS para el levantamiento de los mismos por el relieve de la zona, y por otra, a la necesidad de  
402 clasificar los puntos de la vegetación. En este sentido sería muy recomendable emplear sistemas  
403 embarcados de posicionamiento en tiempo real que eliminaran la dependencia de puntos de apoyo, y  
404 cámaras color infrarrojo modificadas que permitan una mejor discriminación de la vegetación.

405 Una vez analizados los productos: ortofotografías (formato TIFF), nube de puntos (formato LAS) y los  
406 vídeos del vuelo, se identifican las posibilidades de explotación de los datos en relación al inventario  
407 de diques forestales mediante levantamiento a pie. La nube de puntos generada permite, siempre  
408 que la vegetación existente no oculte los elementos constructivos, la medición de las distintas  
409 magnitudes que definen el dique (altura, anchura, espesor, pendientes del paramento, obras  
410 complementarias). El nivel de detalle de la ortofotografía generada, así como la realización de un  
411 video específico para el dique, hace posible la identificación de patologías del mismo (grietas,  
412 descalzamientos). No obstante, es difícil distinguir mediante la ortofotografía pequeñas grietas y  
413 sifonamientos o tubificaciones entre el terreno y el cuerpo del dique, que siempre serán mejor  
414 apreciados en una inspección *in situ* del mismo.

## 415 6. Conclusiones

416

### 417 6.1.- Control fitosanitario de las masas forestales,

418

419 El análisis de datos adquiridos con satélite y RPAS supone un útil apoyo para el seguimiento  
420 espacio-temporal de masas forestales afectadas por enfermedades o plagas a distintas escalas de  
421 trabajo. En concreto, los RPAS, trabajando en correcta combinación con un muestreo de campo,  
422 presentan un enorme potencial para la detección temprana y seguimiento de dichos procesos, dada  
423 su flexibilidad y facilidad operacional, así como su capacidad de integración con otros sensores.

424

425 La metodología utilizada en ambos casos de estudio, consistente en la extracción de copas  
426 para su posterior análisis con índices espectrales y temperatura, y su comparación con datos de  
427 campo, se considera adecuada para abordar estudios de caracterización y seguimiento del estado  
428 fitosanitario de masas arbóreas. En cualquier caso, se considera crucial disponer de una muestra de  
429 campo suficientemente amplia y representativa, adquirida de manera simultánea a los datos de  
430 teledetección que, en algunas ocasiones, puede ser necesario completar con análisis de laboratorio.

431

432 En el análisis espectral se recomienda la utilización de índices con el fin de minimizar las  
433 posibles diferencias en las condiciones de adquisición de las imágenes (iluminación y ángulo de  
434 elevación solar, principalmente) y, especialmente, el uso de índices que minimicen la influencia de las  
435 características estructurales de la cubierta vegetal. En cuanto a los datos térmicos, el estudio sólo ha  
436 permitido una primera aproximación al análisis de este tipo de datos, con potencial en la  
437 discriminación de situaciones de estrés que, aunque normalmente se vinculan a situaciones de  
438 sequía, pueden ser el reflejo de otras patologías.

439

440 Pese a que se trata de un campo de aplicación con un elevado componente científico y de  
441 innovación tecnológica, posee un alto potencial de desarrollo a medio plazo. En la actualidad su  
442 aplicación está todavía en fase experimental dentro de proyectos de I+D+i, pero la permanente  
443 mejora de los sensores ligeros embarcables en plataformas RPAS y las posibilidades de uso  
444 integrado, así como la rápida disponibilidad de los resultados para su explotación, permiten esperar  
445 su incorporación a proyectos productivos en los próximos años. En base a los trabajos expuestos, en  
446 2017 darán comienzo dos nuevos proyectos europeos en consorcio (PLURIFOR-SUDOE y DATABIO-  
447 H2020) para el seguimiento y detección temprana del nematodo del pino, la seca de la encina y el  
448 gorgojo del eucalipto.

449

450

451

452  
453  
454  
455  
456  
457  
458  
459  
460  
461  
462  
463  
464  
465  
466  
467  
468  
469  
470  
471  
472  
473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481  
482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492  
493  
494  
495  
496  
497

## 6.2.- Otros ensayos

**Seguimiento de quemas prescritas.** En este campo los RPAS pueden jugar un buen papel, ya que suponen una herramienta muy potente para labores de coordinación, que permite realizar un seguimiento del desarrollo de los trabajos y aporta información objetiva para garantizar la extinción total del fuego antes de retirar los efectivos, con lo que se gana seguridad y se ahorran tiempo y costes de personal. Es necesario tener siempre muy en cuenta las condiciones de operación según normativa, la seguridad y la coordinación con el operativo desplegado.

**Censos de fauna.** El empleo de RPAS puede ser un buen complemento para la realización de censos, reconocimiento y localización e identificación de individuos, pese a que se considera necesario profundizar en la metodología a aplicar. Los trabajos se pueden poner en práctica sin mayores complicaciones en cuanto a los equipos a emplear y la realización del vuelo, pero requieren de una planificación detallada a definir en cada caso, acompañada de tomas de datos en campo para contraste de resultados. Requieren, asimismo, un análisis e interpretación experto de las imágenes capturadas muy específico y que puede revestir bastante complejidad.

**Cartografía de diques.** El empleo de RPAS mejora enormemente los productos obtenidos (modelos digitales y ortofotos de gran precisión) frente a los procedentes de inventarios a pie (visita de visu y medición directa con distanciómetro), y supone una importante ventaja en las condiciones de seguridad de los trabajos de inventario, ya que el acceso a los diques a pie puede ser peligroso por el emplazamiento en el que suelen situarse este tipo de obras, generalmente cauces con gran pendiente, en zonas forestales con terrenos inestables objeto de restauración hidrológico-forestal. Los RPAS abren grandes posibilidades en la documentación de obras y realización de inventarios e inspección de infraestructuras y reportajes aéreos.

## 6.3.- Conclusiones generales

Los RPAS son una herramienta que se puede introducir en la cartera de productos y servicios del Grupo Tragsa, mejorando la calidad y en ocasiones el rendimiento y que permite un amplio abanico de nuevas aplicaciones. El diseño de un plan de implantación, canalizado en nuestro caso a través del proyecto de innovación GT RPAS, nos ha permitido disponer de los elementos necesarios para su evaluación, detectando los puntos críticos para obtener buenos resultados, permitiéndonos pasar a la fase de implantación o puesta en producción prevista para 2017-2018 a través de un nuevo proyecto de innovación.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen a los componentes del Grupo de Trabajo RPAS, pilotos y técnicos de distintas Unidades (todos ellos compañeros del Grupo Tragsa) su dedicación e implicación en este proyecto de I+D+i, especialmente en las fases de propuestas, análisis y selección de ensayos, planificación y ejecución de los vuelos, y explotación de los resultados. El ensayo de sanidad forestal relativo a *Armillaria mellea* ha sido financiado por el proyecto en consorcio FORRISK (SOE3/P2/F523), subvencionado por el Programa INTERREG IV B SUDOE.

## 8. Bibliografía

- 498  
499  
500 CHECA, M<sup>a</sup> J.; LARIO, F.J.; PORCEL, P.; ESCUDERO, R.; NAVARRO, R.M.; 2015. Aplicación de los datos  
501 de observación de la Tierra al seguimiento fitosanitario de masas forestales. *Actas del XVI Congreso*  
502 *de la Asociación Española de Teledetección "Teledetección, humedales y espacios protegidos"*. 633-  
503 636.
- 504  
505 MOLINA S.; VILLA, G.; SERRANO, C.; VALDEPÉREZ, M.; DOMENECH, E.; 2010. A polynomial Approach  
506 for Radiometric Aerial Triangulation. *Actas del EuroCow2010*.
- 507  
508 MOLINA, S.; SERRANO, C.; VILLA, G.; MARTÍNEZ, J.; OJEDA, J.C.; DOMENECH, E.; 2012.  
509 Aerotriangulación Radiométrica Polinomial. *Actas del X Congreso TOPCART 2012 - I Congreso*  
510 *Iberoamericano de Geomática y C.C. de la Tierra, A2-26*.
- 511  
512 MOLINA S.; ESCUDERO R.; ROLDÁN A.; REJAS J.; REDONDO J.; CHECA M.J.; MIGUELSANZ P.; 2016.  
513 Implantación de RPAS en las actividades del Grupo Tragsa. Resultados de proyectos piloto  
514 demostrativos. Aplicación práctica en el vertedero de Seseña. *XI Congreso TOPCART 2016 - Congreso*  
515 *Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra*. 176 – 187.
- 516  
517 VALDÉS I.; ESCUDERO, R.; RUBIO, A.; FERNÁNDEZ, P.; CHECA, M.J.; SANCHEZ, B.; IGLESIAS, S.; 2016.  
518 Desarrollo de un servicio experimental de teledetección en los riegos del Porma (León) para el cálculo  
519 ajustado de necesidades hídricas y mejora en la gestión del regadío. *XXXIV Congreso Nacional de*  
520 *Riegos, A-09*.
- 521  
522 VILLA G.; MORENO J.; CALERA A.; AMORÓS-LÓPEZ J.; CAMPS-VALLS G.; DOMENECH E.; 2013. Spectro-  
523 temporal reflectance surfaces: a new conceptual framework for the integration of remote-sensing data  
524 from multiple different sensors. *International Journal of Remote Sensing*. 34 (9-10): 3699-715.
- 525  
526 VILLACAÑAS D.; MOLINA, S.; ESCUDERO, R.; ROLDÁN A.; 2015. Una estrategia de innovación para la  
527 implantación de la tecnología RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) en el sector forestal. *Revista*  
528 *Montes*. Número 120 (2º Trimestre 2015). 26-30.
- 529  
530 ZARCO-TEJADA, P. J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J. A. J.; 2012. Fluorescence, temperature and  
531 narrow-band indices acquired from a UAV for water stress detection using a hyperspectral imager and  
532 a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337.
- 533  
534 CALDERÓN, R.; NAVAS-CORTÉS, J.A.; LUCENA, C.; ZARCO-TEJADA, P. J.; 2013. High-resolution airborne  
535 hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticilliumwilt of olive using fluorescence,  
536 temperature and narrow-band spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 139. 231–245.
- 537  
538 RAMÍREZ RAMÍREZ, J. A.; 2015. Evolución y seguimiento, mediante una red de trampeo de la plaga de  
539 picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*) en el palmeral histórico de Abanilla. *Proyecto del Ciclo*  
540 *Formativo de Gestión forestal y del Medio Natural*.