



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA Y  
GEOMÁTICA

Programa de Doctorado: Ingeniería Agraria, Alimentaria,  
Forestal y de Desarrollo Rural Sostenible por la Universidad  
de Córdoba y la Universidad de Sevilla

TESIS DOCTORAL

**Viabilidad técnica de productos cartográficos de  
alta resolución con vehículos aéreos no  
tripulados y sensores livianos aplicados a la  
ingeniería**

***Technical viability of high-resolution  
cartographic products with unmanned aerial  
vehicles and lightweight sensors applied to  
engineering***

Directores: D. Alfonso García-Ferrer Porras

D. Francisco Javier Mesas Carrascosa

Autora: Inmaculada Clavero Rumbao

Septiembre, 2019

TITULO: VIABILIDAD, TÉCNICA DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS DE ALTA  
RESOLUCIÓN CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS Y  
SENSORES LIVIANOS APLICADOS A LA INGENIERIA

AUTOR: *Inmaculada Clavero Rumbao*

---

© Edita: UCOPress. 2019  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

[https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/  
ucopress@uco.es](https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es)

---



**TÍTULO DE LA TESIS: Viabilidad técnica de productos cartográficos de alta resolución con vehículos aéreos no tripulados y sensores livianos aplicados a la ingeniería.**

**DOCTORANDO/A: Inmaculada Clavero Rumbao**

**INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS**  
(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

Esta Tesis Doctoral ha tenido por objeto analizar el potencial de imágenes registradas por sensores embarcados en plataformas aéreas no tripuladas para la generación de productos cartográficos a emplear en distintos sectores de la ingeniería como la ingeniería civil o la agronómica. Se ha estudiado la calidad posicional de ortofotografías generadas por sensores RGB y multiespectrales multi-array atendiendo a distintas configuraciones de vuelo. Además, en el caso de sensores multiespectrales se ha analizado la relación entre la radiometría y los parámetros de vuelo.

Que tanto la metodología como el trabajo de investigación, las conclusiones y los resultados obtenidos son satisfactorios.

El doctorando ha desarrollado un excelente trabajo, incorporando a su formación nuevas disciplinas, demostrando ampliamente la capacidad e independencia en el trabajo que se debe requerir a todo egresado con el grado de doctor.

Sus trabajos de investigación han sido sometidos a una revisión por pares en revistas científicas de alto impacto, todas ellas correspondientes al índice JCR, cuartiles uno y dos.

En definitiva, se trata de una tesis doctoral de una excelente calidad, innovadora y sin duda ha de tener un alto impacto en el sector.

Que derivado de esta Tesis Doctoral se han publicado los siguientes trabajos:

#### **Revistas incluidas en SCI:**

- Mesas-Carrascosa, F., Clavero Rumbao, I., Berrocal, J., & Porras, A. (2014). Positional quality assessment of orthophotos obtained from sensors onboard multi-rotor UAV platforms. *Sensors*, 14(12), 22394-22407.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Torres-Sánchez, J., Clavero-Rumbao, I., García-Ferrer, A., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., & López-Granados, F. (2015). Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management. *Remote Sensing*, 7(10), 12793-12814
- Mesas-Carrascosa, F. J., Clavero Rumbao, I., Torres-Sánchez, J., García-Ferrer, A., Peña, J. M., & López Granados, F. (2017). Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2161-2176.

#### **Aportaciones a congresos**

- Mesas-Carrascosa, F. J., Notario García, M.D., Clavero Rumbao, I., Sánchez de la Orden, M., García-Ferrer, A., (2015). Influencia de parámetros de vuelo en la generación de ortofotografías aplicadas a patrimonio histórico. Libro de actas del XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección (Sevilla). Asociación Española de Teledetección. ISBN 978 – 84-608-1726-0. Pp. 641 – 644.

Que se considera que el trabajo realizado cumple con los requisitos necesarios para su presentación y lectura.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 4 de Septiembre de 2019

Firma del/de los director/es

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alfonso GF', with a long horizontal stroke underneath.

Fdo.: Alfonso García-Ferrer Porras Carrascosa

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Francisco', with a long horizontal stroke underneath.

Fdo.: Francisco Javier Mesas



## *Agradecimientos*

Llegó el momento de agradecer a todas aquellas personas que tanto me han ayudado y apoyado a lo largo de este camino cuya meta ha sido la Tesis Doctoral.

En primer lugar, quisiera agradecer a D. Alfonso García-Ferrer Porras y a D. Javier Mesas Carrascosa por la ayuda recibida, especialmente a Javi por su dedicación, su tiempo y sus empujoncitos de ánimos. Agradecer también a todas las personas (profesores y compañeros) del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría del Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática con las que he compartido esas jornadas de campo y gabinete, en las cuales algún que otro susto nos hemos llevado.

Gracias al equipo del Departamento de Protección de Cultivos del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS) perteneciente al CSIC de Córdoba por participar, trabajar y colaborar en el desarrollo de la Tesis.

No se me olvida el equipo ERSAF – IDAF – ByC. Gracias a todos y cada uno de vosotros (imposible nombraros a todos). Por vuestra ayuda incesante tanto en lo profesional como en lo personal. Por estar siempre ahí, por tender la mano cuando se necesita y por compartir tantos buenos momentos juntos.

A mis suegros, cuñadas, cuñados, sobrinas y a toda la familia Gómez por su ayuda en todo momento y demostrarme que para cualquier cosa puedo contar con ellos.

A mis padres, hermana, cuñado, sobrina y sobrino que estar por nacer. GRACIAS por tener siempre palabras de ánimo, por vuestra confianza, vuestros consejos, vuestra ayuda incondicional, por enseñarme el valor del sacrificio y, sobre todo, por ser como sois.

Y, por supuesto a Paco, mi marido. GRACIAS por tu amor, por estar a mi lado, por todo tu apoyo, tus ánimos y paciencia. Por andar conmigo este camino y mostrarme siempre tu comprensión.

Por último, como no, a mi hija María. GRACIAS por tu sonrisa, tu alegría, tu espontaneidad y, sobre todo, por comprender con tan solo tres añitos que mamá no podía dedicarte el tiempo que requerías porque tenía que trabajar para entregar un trabajo, esta Tesis Doctoral. Seguro que algún día este esfuerzo habrá merecido la pena.

A todos, GRACIAS.

*Aprender no es prepararse para la vida. Aprender es la vida misma.*

*(John Dewey)*



*A mi hija María*



# Índice

---

<b>Abstract .....</b>	<b>11</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 1:.....</b>	<b>13</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Evolución de las plataformas no tripuladas.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. Tipología de las plataformas .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3. Legislación.....</b>	<b>22</b>
1.3.1. Contexto internacional y europeo .....	23
1.3.2. Situación en España.....	24
<b>1.4. Sensores.....</b>	<b>27</b>
1.4.1. Sensores RGB.....	30
1.4.2. Sensores Multi e Hiperespectrales.....	31
1.4.3. Sensores de temperatura.....	33
1.4.4. Sensores con tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging)	34
<b>1.5. Procesamiento de la información e imágenes capturadas .....</b>	<b>34</b>
<b>1.6. Aplicaciones de las plataformas aéreas no tripuladas .....</b>	<b>38</b>
<b>1.7. Evaluación de la calidad de los productos generados a partir del procesamiento de las imágenes .....</b>	<b>39</b>
1.7.1. Test NMAS.....	41
1.7.2. Test EMAS/ASPRS Standard .....	41
1.7.3. Test NSSDA .....	42
1.7.4. Test ASLSM .....	42
1.7.5. Test STANAG 2215.....	42
<b>1.8. Bibliografía.....</b>	<b>43</b>

1.9. Objetivos y estructura de la tesis .....	52
<b>Capítulo 2:.....</b>	<b>55</b>
<b>Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms .....</b>	<b>55</b>
Abstract .....	57
Resumen .....	58
2.1. Introduction.....	59
2.2. Methodology .....	63
2.2.1. Study Site Description and Airborne Campaigns .....	63
2.2.2. Photogrammetric Processing .....	65
2.2.3. Spatial Accuracy Assessment .....	66
2.3. Results and Discussion .....	69
2.4. Conclusions.....	74
2.5. References.....	75
<b>Capítulo 3:.....</b>	<b>81</b>
<b>Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management .....</b>	<b>81</b>
Abstract .....	83
Resumen .....	84
3.1. Introduction.....	85
3.2. Material and Methods.....	89
3.2.1 UAV and sensor description .....	89
3.2.2 Study site and UAV flights .....	90
3.2.3 Photogrammetric processing .....	92
3.2.4 Assessment of spatial resolution .....	93
3.2.5 Assessment of spectral discrimination.....	95

<b>3.3. Results</b> .....	<b>97</b>
3.3.1 Effect of UAV flights parameters on orthophoto spatial resolution .....	98
3.3.2 Effect of UAV flights parameters on orthophoto spectral discrimination. ....	103
<b>3.4. Conclusions</b> .....	<b>109</b>
<b>3.5. References</b> .....	<b>110</b>
<b>Capítulo 4: Accurate ortho-mosaiced six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes</b> .....	<b>119</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>121</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>122</b>
<b>4.1. Introduction</b> .....	<b>123</b>
<b>4.2. Materials and methods</b> .....	<b>126</b>
4.2.1. Study site description and airborne campaign.....	126
4.2.2. GNSS Campaign .....	128
4.2.3. Photogrammetric processing .....	129
<b>4.3. Results and discussion</b> .....	<b>132</b>
<b>4.4. Conclusions</b> .....	<b>139</b>
<b>4.5. References</b> .....	<b>140</b>
<b>Capítulo 5:.....</b>	<b>145</b>
<b>Discusión General</b> .....	<b>145</b>
5.1. Discusión General .....	147
5.2. Bibliografía .....	153
<b>Capítulo 6:.....</b>	<b>155</b>
<b>Conclusiones Generales</b> .....	<b>155</b>
6.1. Conclusiones Generales.....	157



# Lista de Figuras

---

## Capítulo 1: Introducción

<b>Figura 1.1</b> Planeador tripulado de Cayley en 1849 .....	<b>15</b>
<b>Figura 1.2</b> Aeronaves en la década de los sesenta: (a) Ryan Firebee I (b) DASH.....	<b>16</b>
<b>Figura 1.3</b> Aeronaves en la década de los setenta: (a) Lockheed Aquila (b) MBL.....	<b>17</b>
<b>Figura 1.4</b> Aeronave de los años noventa con sistema Gnat .....	<b>17</b>
<b>Figura 1.5</b> Aeronave utilizada en el año 2000 en el sector militar (Predator) .....	<b>18</b>
<b>Figura 1.6</b> Plataformas empleadas en la actualidad, modelo Phantom 4 y ebee respectivamente .....	<b>18</b>
<b>Figura 1.7</b> Espectro electro-magnético .....	<b>27</b>
<b>Figura 1.8</b> Fases del procesamiento de las imágenes capturadas con una plataforma UAV .....	<b>36</b>

## Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms

<b>Figure 2.1</b> Overview of the study site. ....	<b>63</b>
<b>Figure 2.2</b> Distribution of ground control points and check points.....	<b>65</b>
<b>Figure 2.3</b> Comparison check points from GPS and UAV orthophoto: (a) distribution vector error; (b) box-plot graph of errors in coordinates X and Y. ....	<b>70</b>

### **Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management**

**Figure 3.1** Details of TetraCam mini-MCA6: (a) before takeoff and (b) during flight. .... **90**

**Figure 3.2** Details of assessment of spatial resolution: (a) Distribution of ground control check points, (b) sample of distribution over the study site and (c) measurement by GNSS receiver. ....**95**

**Figure 3.3** Details of experiment setup to assess spectral discrimination: Spectralon panel placed in the middle of the study area. ....**96**

**Figure 3.4** Effect of UAV flight over an area with (a) different flights or (b) one flight. ....**98**

**Figure 3.5** Vector error distribution of 6-band multispectral orthophoto taking into account flight mode (cruising and stop mode); (a) 60, (b) 80 and (c) 100 meters altitude AGL; and number of ground control points (GCPs). ....**102**

**Figure 3.6** Distribution of error considering mode of flight (cruising and stop mode); 60, 80 and 100 m altitude AGL; and number of ground control points (GCPs). ....**103**

**Figure 3.7** Spatial (upper figures) and spectral (lower figures) profiles over orthomosaicked images at (a) 60, (b) 80 and (c) 100 m altitude AGL....**105**

**Figure 3.8** NDVI values for the classes of bare soil, weed and crop, considering flights at 60, 80 and 100 m altitude AGL. ....**108**

### **Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes**

**Figure 4.1** Overview of the study site.....**126**

**Figure 4.2** a) and b) UAV flying the study area equipped with the multispectral camera.....**127**

**Figure 4.3** Multispectral sensor TetraCam Mini-MCA: Distribution array of sensors. ....**128**



**Figure 4.4** (a) Overview of orthophoto 90 m-AGL, (b),(c) and (d) partial details. ....**133**

**Figure 4.5** Box and whiskers plots graph of RMSE of orthophotos group by GSD orthophoto: (a) GSD is function of altitude AGL flight, (b) GSD is equal to 5 cm; and overlap-setting: (1): 60%-30 and (2) 70%-40%. ....**136**



## Lista de tablas

---

### **Capítulo 1: Introducción**

**Tabla 1.1** Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación ..... 20

**Tabla 1.2** Elementos de un Sistema Aéreo no Tripulado .....21

**Tabla 1.3** Comparación de los usos profesionales permitidos en los marcos regulatorios. ....26

**Tabla 1.4** Características de los sensores .....29

### **Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms**

Table 2.1 Summary of results for each spatial quality test..... 71

### **Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generatin accurate multispectral orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management**

**Table 3.1** Summary of UAV flights. ....98

**Table 3.2** Results for absolute spatial resolution considering altitude AGL, number and distribution of GCPs, flight mode and area of interest (FA: Full Area; SM: Security Margin 10%). ....100

**Table 3.3** Results for absolute spatial resolution considering altitude AGL, number and distribution of GCPs and flight mode. ....101

**Table 3.4** NDVI statistics for the classes: vegetation (V, including weed and crop), weed (W), crop (C) and bare soil (B).....107

**Table 3.5** M-Statistics between crop and weed, bare soil and weed, bare soil and crop and bare soil and vegetation (including crop and weed)..107

## **Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes**

**Table 4.1** Calibration parameters of master channel TetraCam miniMCA 6. ....**130**

**Table 4.2.** RMSE and ratio RMSE/GSD considering the GSD ortho-mosaicked imagery that was obtained according to the GSD of flight, end and side lap and flight altitude AGL. ....**134**

**Table 4.3** RMSE and ratio RMSE/GSD considering a GSD orthophoto equal to 5 cm for all altitude AGL, end-lap, side-lap and altitude AGL. ....**135**

## Abstract

---

Technological advances in sectors such as agronomy, forestry, archaeology, civil engineering, etc. are assuming a revolution due to the use of new technologies in order to optimize resources and minimize costs. Specifically, the use of unmanned aerial platforms and the advances made in the sensors on board, allow us to obtain updated information, as well as to generate products that help decision making. In this sense, more and more these platforms are becoming tools with which it is possible to obtain information at the time you want and at a lower cost, compared to remote satellites or manned platforms. The choice of using one or the other will depend on the analysis of all the factors that influence the achievement of the objective.

The aim of this PhD thesis is to analyze the viability of high-resolution cartographic products obtained from unmanned aerial platforms with light on-board sensors. Firstly, a tour of the evolution experienced by these platforms and the type of sensors that can be integrated, as well as some of the applications in which they are being used and the photogrammetric procedure to be followed to obtain the final product. Next, the quality was evaluated using different tests or cartographic standards in order to analyze the viability of the product generated. In the same way, several studies have been carried out with different flight configurations and different combinations of parameters that influence the planning of the flight. The objective has been to determine which of them is the most suitable according to the requirements to be satisfied and the positional quality.

Cartographic products generated with unmanned aerial platforms have shown that they can be applied in different branches of engineering (agronomic and civil, in this case) for decision-making that facilitate management and help define the relevant actions to be carried out.

## Resumen

---

Los avances tecnológicos en sectores como el agronómico, forestal, arqueológico, civil, etc. están suponiendo una revolución debido a la utilización de nuevas tecnologías con la finalidad de optimizar recursos y minimizar los costes. Concretamente, el uso de las plataformas aéreas no tripuladas y los avances experimentados en los sensores a bordo de éstas, permiten obtener información actualizada, así como generar productos que ayuden a la toma de decisiones. En este sentido, cada vez más estas plataformas se están convirtiendo en herramientas con las cuales es posible obtener información en el momento que se desee y a menor coste, comparado con los satélites remotos o las plataformas tripuladas. La elección de usar uno u otro dependerá del análisis de todos los factores que influyen para alcanzar el objetivo.

Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo principal analizar la viabilidad de los productos cartográficos de alta resolución obtenidos mediante plataformas aéreas no tripuladas con sensores ligeros a bordo. En primer lugar, se ha realizado un recorrido de la evolución experimentada por estas plataformas y de la tipología de sensores que pueden ser integrados, así como algunas de las aplicaciones en las que se están empleando y el procedimiento fotogramétrico a seguir para obtener el producto final. A continuación, se ha evaluado la calidad a través de diferentes test o estándares cartográficos con el fin de analizar la viabilidad del producto generado. Del mismo modo, se han llevado a cabo varios estudios con diferentes configuraciones de vuelo y distintas combinaciones de parámetros que influyen en la planificación del mismo. El objetivo ha sido determinar cuál de ellas es la más adecuada en función de los requerimientos a satisfacer y de la calidad posicional.

Los productos cartográficos generados con plataformas aéreas no tripuladas han demostrado que pueden ser aplicados en diferentes ramas de la ingeniería (agronómica y civil, en este caso) para la toma de decisiones que faciliten la gestión y ayuden a definir las actuaciones pertinentes a llevar a cabo.

# **Capítulo 1:**

## **Introducción**

---





## 1.1. Evolución de las plataformas no tripuladas

---

La aviación no tripulada es consecuencia de los distintos experimentos llevados a cabo por inventores tales como Cayley, Du Temple y otros pioneros de la aviación en los cuales pretendían diseñar aeronaves de mayor envergadura tripuladas a lo largo del siglo XIX. La primera fecha en la que se desarrolla un biplano no tripulado pre-programado data de 1917 (Colomina and Molina 2014), supervisado por los estadounidenses Orville Wright y Charles F. Kettering. Dicho biplano fue construido en madera y papel maché con una envergadura de 4,5 metros, una longitud de 3,8 metros y una altura de 2,3 metros. Éste pasó a ser el primer vuelo exitoso sin piloto alrededor de la Primera Guerra Mundial. Así, allá por el año 1483 se diseñó una plataforma capaz de mantenerse en el aire muy parecida a lo que hoy sería un helicóptero (Valavanis et al., 2008) denominada tornillo aéreo. A partir de entonces muchos fueron los que, atraídos por la posibilidad de mantener una plataforma en el aire, idearon distintos mecanismos con diferentes configuraciones, apareciendo en 1809 de la mano del inglés Cayley el primer planeador no tripulado y, pasados unos años después (1849) el planeador tripulado (Figura 1.1).



**Figura 1.1 Planeador tripulado de Cayley en 1849**

Sería en Europa durante el siglo XX donde se iniciaría el desarrollo y aplicación de los principios de la aeronáutica a aeronaves y hacer volar modelos que se podrían considerar como las primeras plataformas no tripuladas. La mayor limitación se encontraba en no poder contar con un motor con una relación potencia-peso adecuado para poder mantener la aeronave en vuelo. No sería hasta la Segunda Guerra Mundial cuando se desarrolló y usó en Europa

aviones blanco no tripulados y vehículos aéreos de mayor categoría, siendo muchos de ellos utilizados para la formación y el entrenamiento de las fuerzas de artillería. Ya en la década de los 60, algunas aeronaves fueron equipadas con cámaras para realizar operaciones de vigilancia sobre el territorio, como el Ryan Firebee I (Ryan Aeronautical Company, 1951) (Figura 1.2.a). Algunas de ellas aún se encuentran en servicio después de haberle realizado mejoras a muchos de sus componentes, tales como la incorporación de receptores GNSS y sensores más avanzados, contribuyendo de esta manera al desarrollo tecnológico de los vehículos aéreos no tripulados. Los vehículos Canadair CL-89 y CL-289 fueron desarrollados en los años sesenta y desde entonces han estado experimentando mejoras en cuanto a diseño y tecnología. En esta misma época se diseñó la primera aeronave de ala giratoria. La plataforma DASH (*Drone Anti-Submarine Helicopter*) desarrollada por Gyrodyne Company of America (Figura 1.2.b), presentó un menor desarrollo tecnológico al carecer de autopiloto y sensores de navegación, siendo simplemente radio-controlados (Cuerno et al., 2015).



(a)



(b)

**Figura 1.2 Aeronaves en la década de los sesenta: (a) Ryan Firebee I (b) DASH**

La década de los 70 se caracterizó por el desarrollo de sistemas aéreos no tripulados tanto de corto como de largo alcance y elevada altitud en las misiones de reconocimiento y vigilancia. Entre todos ellos destaca la plataforma de corto alcance Lockheed Aquila (Figura 1.3.a), desarrollada por el ejército de Estados Unidos. Éste supuso un proyecto muy esperanzador para el momento en el que se desarrolló, demostrando su capacidad para la vigilancia y designación láser de objetivos para la artillería si bien presentaba escasa fiabilidad. Otro sistema a destacar en esta década fue el MBL Epervier (*Manufacture Belge De Lampes Et De Matériel Electronique*, Bélgica) (Figura 1.3.b) con capacidad para gestionar mediante su autopiloto cámaras diurnas

e infrarrojos como carga de pago. No obstante, los sistemas no tripulados de tipo HALE (*High altitude-Long Endurance*) presentaron serios problemas por no contar con tecnologías hoy día comúnmente empleadas como las basadas en sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*).



**Figura 1.3 Aeronaves en la década de los setenta: (a) Lockheed Aquila (b) MBL E**

Entre lo más destacado en la década de los 80, se resaltaría el gran desarrollo experimentado en los vehículos de ala giratoria para tareas de reconocimiento de muy corto alcance y vigilancia. Además de ello, hubo un gran avance respecto al desarrollo de las cargas de pago, siendo posible embarcar sensores más avanzados tecnológicamente, aumentando con ellos las aplicaciones.

El desarrollo de las grandes plataformas no tripuladas no se produciría hasta los años 90 debido principalmente a la disponibilidad de los sistemas de navegación por satélite, permitiendo realizar operaciones de reconocimiento de mayor alcance. Es en este periodo cuando se desarrolla el sistema el Gnat (*General Atomic Aeronautical Systems Inc.*, Estados Unidos) (Figura 1.4), precursor de los sistemas de media altitud y gran autonomía (*Medium altitude Long Endurance*; MALE) y elevada altitud/gran autonomía (*High Altitude Long Endurance*; HALE).



**Figura 1.4 Aeronave de los años noventa con sistema Gnat**

Desde el año 2000 hasta la actualidad, el desarrollo y uso experimentado por las plataformas aéreas no tripuladas ha sido muy importante, siendo utilizadas no sólo con carácter militar sino también civil. En el sector militar se destaca el sistema Predator (*General Atomics Aeronautical Systems Inc.*, Estados Unidos) (Figura 1.5).



**Figura 1.5 Aeronave utilizada en el año 2000 en el sector militar (Predator)**

Este sistema de tipo MALE ofrece un alcance de 750 km, alcanzando una altura máxima de operación de 7620 m. En este periodo de tiempo se comienza con la reducción del tamaño de las plataformas de vuelo, disminuyendo por tanto la carga de pago y su coste económico respecto a las grandes plataformas empleadas en el campo militar. La consecuencia es la existencia hoy día en el mercado de multitud de modelos con diferentes prestaciones, diseños y precios para poder ser empleados por usuario de perfiles muy variados (Figura 1.6).



**Figura 1.6 Plataformas empleadas en la actualidad, modelo Phantom 4 y ebee respectivamente**

## 1.2. Tipología de las plataformas

---

En primer lugar, resulta importante clarificar los términos con los que se designan a estos sistemas integrados tanto por la plataforma de vuelo como por otros subsistemas. En este sentido, los términos a destacar son (Cuerno et al., 2015):

- UAS (*Unmanned Aerial System*): Sistema Aéreo no tripulada.
- UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*): Vehículo Aéreo no tripulado. Vehículos capaces de despegar, navegar y aterrizar de forma automática en base a los parámetros previamente establecidos.
- RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*): Sistema de aeronave pilotada remotamente. Este sistema hace referencia tanto a la aeronave como a la estación de control, comunicaciones y cualquier otro elemento requerido para la realización del vuelo.
- RPA (*Remotely Piloted Aircraft*): Aeronave en la que el piloto que se encuentra al mando no está a bordo.

Como se observa, los términos UAS y RPAS hacen referencia a la plataforma de vuelo y al resto de elementos tales como la estación de control, carga de pago, sistema de lanzamiento y despegue, comunicaciones, etc. Según la Asociación Española de RPAS, la principal diferencia es que en el caso de RPAS se hace mención expresa a la existencia de un piloto que opera la aeronave de forma remota, es decir, utilizando un enlace de comunicaciones entre la estación de tierra y la aeronave, mientras que en el caso de UAS no se especifica claramente la existencia de un piloto, solo que, caso de haberlo no está a bordo. Por tanto, de acuerdo con la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) todos los RPAS son UAS pero no todos los UAS son RPAS.

Respecto a la tipología de las aeronaves, son varias las clasificaciones que existen según distintas organizaciones y atendiendo a diferentes parámetros tales como peso-tamaño, altitud máxima de operación de vuelo, tipo de misión, velocidad, tipo de despegue, etc. Atendiendo a la forma en la que las aeronaves consiguen la sustentación en la atmósfera, la Tabla 1.1 muestra una

posible clasificación (Oñate de mora, 2015). De todas ellas, son las plataformas tipo avión y multi-rotor las más empleadas hoy día. Gracias a los avances en las plataformas se han desarrollado un nuevo tipo de plataforma de naturaleza híbrida, la cual presenta características tanto de las plataformas de ala fija como las de tipo ala rotatoria. Una de las características de estas plataformas es que suelen realizar el despegue y el aterrizaje como plataformas de ala rotatoria y en vuelo suelen comportarse como plataformas de ala fija.

**Tabla 1 1 Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación**

<b>AEROESTATO</b>	➤ Globo aeroestático	
	➤ Dirigible	
<b>AERODINO</b>		➤ Avión
		➤ Planeador
	➤ Ala fija	➤ Ala delta
		➤ Parapente
		➤ Paramotor
	➤ Helicóptero	
	➤ Ala rotatoria	➤ Multirrotor
		➤ Autogiro

La diversidad de UAS oscila desde vehículos extremadamente simples, de bajo coste, pequeños y de corto alcance utilizados para aplicaciones de corta duración hasta aviones de varios millones de euros para aplicaciones militares y/o civiles. En cualquier caso, el sistema en general debe constar de dos tipos de segmentos, el de aire y tierra, junto con el enlace de datos, los cuales aparecen resumidos en la Tabla 1.2 (Sánchez, 2014).

**Tabla 1.2 Elementos de un Sistema Aéreo no Tripulado**

<b>SEGMENTO AÉREO</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Plataforma aérea</li> <li>➤ Sistema de misión:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga de pago (sensores)</li> <li>- Computadores de misión</li> <li>- <i>“Sense and Avoid Radar, visual / IR Systems”</i></li> </ul> </li> </ul>
<b>ENLACE DE DATOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mando y control del sistema</li> <li>➤ Datos de la misión</li> </ul>
<b>SEGMENTO DE TIERRA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Estación de Control</li> <li>➤ Lanzamiento y aterrizaje</li> <li>➤ Otros sistemas</li> </ul>

El sistema principal, es decir, la aeronave se encuentra rodeada de otros subsistemas que la caracterizan y de otras infraestructuras necesarias en tierra para controlar la plataforma (Wezeman, 2007), siendo las infraestructuras principales:

- a) Sistemas en la aeronave:
- Sistema de control utilizado para volar la plataforma. Suele ser un enlace bidireccional y/o un ordenador a bordo, conectado a un sistema inercial y un sistema GNSS, capaz de realizar la navegación.
  - Enlace de datos de radio. Utilizado para recibir las señales de control de los sensores, procedentes de la estación base y, para enviar la información que capturan los sensores a la estación base.
  - Sistema de recuperación en el aterrizaje. Paracaídas que se aloja en el interior de la plataforma o el propio fuselaje o tren de aterrizaje.
  - Sensores. Constituyen la carga de pago y existen una gran variedad, desde cámaras RGB a hiperspectrales incluso LiDAR.

- Lanzadera (tierra). Los UAV de tipo avión de tamaño pequeño/medio pueden despegar utilizando como medio de lanzamiento una catapulta o a veces directamente se lanzan con la mano. Las plataformas de despegue vertical (tipo multirrotor) carecen de esta infraestructura.
- b)        Sistemas en el segmento tierra
- Estación de control. Utilizada para el seguimiento y control del vuelo del UAV. El sistema debe tener un enlace bidireccional con el UAV, es decir, para enviar información como por ejemplo la actualización del programa de vuelo a realizar y, por otro lado, recibir información por ejemplo del estado de batería.
  - Enlace de datos radio. Utilizado para transmitir las señales de control a los sensores del UAV y para recibir la información capturada por éstos.
  - Infraestructura de transporte, mantenimiento y repuestos.

### **1.3. Legislación**

---

Con motivo del gran desarrollo y uso que se le está dando a las plataformas pilotadas remotamente, los gobiernos de todo el mundo han comenzado a regular los aspectos particulares y concretos del uso de estos vehículos.

El avance experimentado en las plataformas aéreas y el abanico cada vez más grande de aplicaciones, hace que las compañías reclamen el desarrollo de normativas que se adecuen y sean más flexibles a las distintas situaciones. Por este motivo, debido al interés suscitado, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea de España compartió con todo el sector las ideas que se planteaban con respecto a la normativa de modo que se recogiesen de todos los sectores las necesidades y sugerencias. De todo ello, y después de diferentes reuniones y acuerdos, se publica el Real Decreto-ley 8/2014 de 4 de julio de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, cuyos artículos 50 y 51 contienen esa normativa temporal. Posteriormente este Real Decreto-ley fue tramitado como ley ordinaria, siendo aprobada y publicada en el Boletín Oficial del Estado Núm. 252, del 17 de octubre de 2014, como Ley



18/2014, de 15 de octubre, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia (Ramírez, 2015), permitiendo el desarrollo profesional de una serie de actividades.

Tres años después, tras el auge del sector, el Ministerio de Fomento impulsó un nuevo marco normativo en el cual se diversificaban las aplicaciones y servicios, siendo el Real Decreto 1036/2017 la normativa vigente en España.

### **1.3.1. Contexto internacional y europeo**

La navegación aérea tiene implicaciones internacionales evidentes. Dicho aspecto fue reconocido por las autoridades de numerosos Estados, que el 7 de diciembre de 1944 firmaron el Convenio de Chicago sobre aviación civil internacional. Ya en el artículo 8 se contemplaba las aeronaves sin piloto, acordándose que: *“Ninguna aeronave capaz de volar sin piloto volará sin él sobre el territorio de un Estado contratante, a menos que se cuente con autorización especial del tal Estado y de conformidad con los términos de dicha autorización. Cada Estado contratante se compromete a asegurar que los vuelos de tales aeronaves sin piloto en las regiones abiertas a la navegación de las aeronaves civiles sean controlados de forma que se evite todo peligro a las aeronaves civiles”*.

A través de dicho convenio se creó la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, [www.icao.int](http://www.icao.int)), organismo especializado de la ONU que desarrolla Normas y Métodos Recomendados que los Estados firmantes se comprometen a cumplir. Esas Normas y Métodos Recomendados se recogen en Anexos al convenio, actualmente se dispone de 19 (Ramírez, 2015).

En 2011 se publicó la Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) (OACI, 2011), con el objetivo de armonizar conceptos y términos que conformaran la normativa. La Unión Europea ha ido asumiendo responsabilidades en diferentes aspectos tales como seguridad aérea, aeropuertos, etc. La normativa sobre seguridad aérea está regulada por el Reglamento (CE) No 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de febrero de 2008, sobre normas comunes en el ámbito de la aviación civil y por el que se crea la Agencia Europea de Seguridad Aérea (AESA). Dicha agencia tiene una serie de misiones entre las que destacan la supervisión, inspección y ordenación del transporte aéreo, la navegación aérea y la seguridad aeroportuaria. De igual modo, trata de garantizar el cumplimiento

de la legislación europea de seguridad aérea; certificar los tipos de aeronavegabilidad y medioambiental de productos aeronáuticos; coordinar programas de seguridad, toma y análisis de datos para mejorar la seguridad aérea entre otros.

Además de la OACI, JARUS (*Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems*; que es el acrónimo en inglés de Autoridades Reunidas para la Regulación de Sistemas no Tripulados) es un foro creado en 2007 de participación voluntaria con el fin de elaborar propuestas de normas para los UAS (en aquel momento) formado por autoridades aeronáuticas de un grupo de países europeos y no europeos.

### **1.3.2. Situación en España**

La Dirección General de Aviación Civil (DGAC) perteneciente al Ministerio de Fomento es la autoridad que define el funcionamiento del sector, así como la responsable de dictar disposiciones reglamentarias de carácter secundario y de contenido técnico y especializado. Dichas disposiciones se conocen como “Circulares Aeronáuticas” cuya finalidad es entre otras asegurar la seguridad de las operaciones aéreas. Por otro lado, adscrito al mismo Ministerio se crea el Consejo Asesor de Aviación Civil (CAAC) como órgano de asesoramiento y consulta en materia de aviación civil.

Como consecuencia de la creación de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), la DGAC ve reducida sus funciones. El objetivo de creación de AESA fue principalmente el de agilizar los procesos al no estar sometidos a contratos administrativos.

El derecho aéreo español queda englobado en (Ramírez, 2015):

- a) Ley de Navegación Aérea (Ley 48/1960, de 21 de julio): contiene la regulación de la responsabilidad del transportista a nivel contractual y extracontractual. Los RPAS quedan introducidos en la Ley 18/2014, de 15 de Octubre. En la Sección 6ª se define el marco de operación de las Aeronaves pilotadas por control remoto.
- b) Ley de Seguridad Aérea (Ley 21/2003, de 7 de julio): determina las competencias en materia de aviación civil, regula la investigación técnica de accidentes e incidentes aéreos, establece el régimen jurídico de la

inspección aeronáutica y de infracciones y sanciones en materia de aviación civil.

- c) Reglamento de Circulación Aérea (RD 57/2002, de 18 enero): Regula la adaptación de las operaciones de vuelo a las innovaciones tecnológicas. De aplicación para aeronaves españolas sujetas a las normas de circulación aérea y a aeronaves extranjeras en espacio aéreo o territorio español.
- d) Circulares aeronáuticas: Serán aprobadas por el Director General de Aviación Civil. Dichas circulares complementan y precisan ciertos aspectos de forma que se asegure la aplicación de las normas y la seguridad aérea. La entrada en vigor requiere publicación en el Boletín Oficial del Estado.
- e) Resoluciones AESA: Emitidas por el Director de dicha Agencia con el fin de que se lleven a cabo los reglamentos y otras normas.

Como se ha comentado anteriormente, en 2017 se publicó el Real Decreto 1036/2017 de 15 diciembre por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea ([www.seguridadaerea.gob.es](http://www.seguridadaerea.gob.es)). Este Real Decreto es de aplicación a: *“las aeronaves civiles pilotadas por control remoto (RPA) cuya masa máxima al despegue sea inferior a los 150 kg o cualquiera que sea su masa al despegue, cuando estén excluidas de la aplicación del Reglamento (CE) 216/2008, por concurrir alguna de las circunstancias que se especifican en su anexo II, que efectúen operaciones aéreas especializadas o vuelos experimentales”* (RD 1036/2017).

El nuevo Real Decreto establece nuevos escenarios de operacionales por lo que amplía las aplicaciones y futuros usos. La Tabla 1.3. muestra una comparativa del nuevo marco con respecto al anterior con respecto a los posibles nuevos usos (Ministerio de Fomento, 2018):

**Tabla 1.3 Comparación de los usos profesionales permitidos en los marcos regulatorios.**

<b>USOS</b>	<b>2016</b>	<b>REAL DECRETO 1036/2017</b>
-Vuelos nocturnos	No permitido	Según condiciones del RD
-Zonas fuera de aglomeraciones de personas y poblaciones	Limitado	Según condiciones del RD
-Sobrevuelo de zonas urbanas y sobre aglomeraciones de personas	No permitido	Según condiciones del RD
-Vuelos en espacio aéreo controlado	No permitido	Según condiciones del RD
-Operaciones de policía, aduanas, CNI y tráfico	No contemplado	Según condiciones del RD

1.3.2.1. Procedimiento para la habilitación en AESA para la ejecución de actividades de carácter técnico o científico mediante RPAS

La AESA, a través de su página Web ([www.seguridadaerea.gob.es](http://www.seguridadaerea.gob.es)) publica toda la documentación y material guía respecto a la obtención de la habilitación así como la libre disposición y descarga de los Apéndices a la Resolución que hay que realizar y conservar para la ejecución de las operaciones.

El procedimiento conlleva una serie de pasos. El primero de ellos consiste en darse de alta como operador y tras la confirmación, presentar la comunicación previa con los datos relativos al operador, actividades, aeronaves y pilotos. A continuación, el operador debe disponer y conservar a disposición de la AESA una serie de documentos, que no se presentarán a la comunicación salvo que fuesen requeridos. Dichos documentos se corresponden con la caracterización de la aeronave, la póliza de seguro, así como las condiciones y limitaciones que se aplican al vuelo para garantizar la seguridad de las personas o bienes. En el caso que se realicen operaciones especializadas, además se ha de disponer del manual de instrucciones, manual de operaciones, programa de mantenimiento y la justificación de los vuelos de prueba. Si se realizaran vuelos experimentales, se deberá de disponer el documento que incluya los perfiles de vuelo a desarrollar y las características de la operación.

El segundo paso es la realización del primer vuelo como operador de forma que se demuestre que las operaciones se realizan con seguridad. Para ello, se deberá realiza y documentar de acuerdo al Apéndice G.

Una vez presentada la comunicación y sus modificaciones se habilita para el ejercicio de las operaciones o vuelos experimentales desde la fecha de la presentación con las condiciones y limitaciones comunicadas (RD 1036/2017)

Cualquier modificación de la comunicación previa debe ser notificada a AESA, mediante el Apéndice A.1.

## 1.4. Sensores

Los sensores son instrumentos que transforman la radiación electromagnética en información perceptible y analizable. Por ello, cada tipo de energía queda caracterizada en función de dos parámetros que son la frecuencia y la longitud de onda. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética suele presentar un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda y frecuencia se denomina espectro electro-magnético (Chuvieco, 1996) (Figura 1.7).

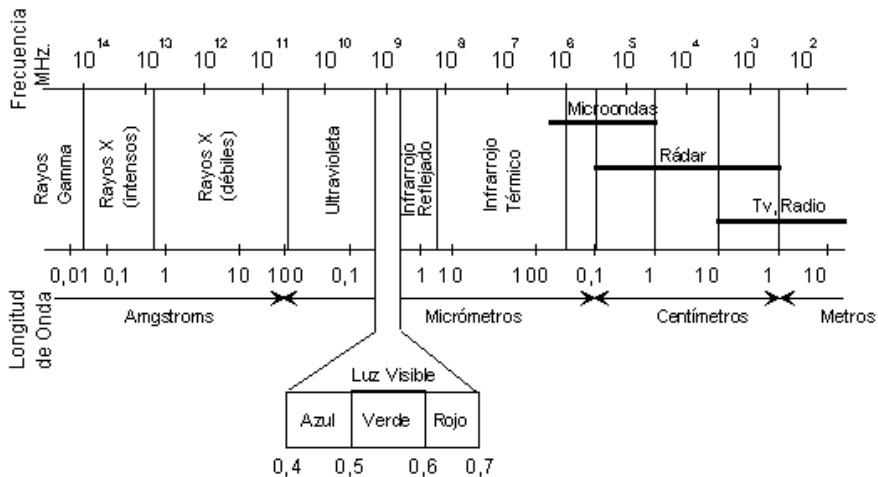


Figura 1.7 Espectro electro-magnético

La radiación ultravioleta, la luz visible y el infrarrojo forman parte de la región óptica del espectro. Concretamente, el espectro visible es una porción pequeña del espectro electromagnético como puede observarse en la figura anterior. Cualquier energía producida en esta estrecha banda producirá la sensación de visión cuando estimula al ojo humano. Cada banda produce una sensación de color diferente. Por otro lado, la zona del infrarrojo no se puede ver, pero sí se puede detectar, por ejemplo, a través de detectores térmicos que simplemente absorben la radiación incidente, el movimiento de los átomos se incrementa y la temperatura del detector aumenta o disminuye hasta llegar a un cuasi-equilibrio con la radiación absorbida. Frecuentemente, el IR se suele subdividir en tres regiones (cercano, medio y lejano), las cuales pueden usarse para estudios de vibraciones armónicas, estructura rotacional vibracional y en espectroscopia rotacional respectivamente (Fontal et al., 2005).

Las mediciones sobre las distintas regiones del espectro aportan un amplio conocimiento sobre diferentes aspectos del medio ambiente. Por ejemplo, la radiación ultravioleta se utiliza para monitorear los niveles de ozono en las capas altas de la atmósfera (Figueroa, 2004). Las bandas visibles e infrarrojas permiten determinar la salud de la cubierta vegetal de cultivos y bosques (Ishtiaque et al., 2016; Lehmann et al., 2015). Por tanto, los sensores de Teledetección son instrumentos que transforman la radiación electromagnética en información perceptible y analizable. Se pueden distinguir dos tipos de sensores en función del procedimiento que tengan de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas (Chuvienco, 1996). Estos sensores pueden ser:

- a) Pasivos: reciben la energía proveniente de un foco exterior a ellos.
- b) Activos: son capaces de emitir su propio haz de energía.

Entre los sensores pasivos se encuentran los sistemas fotográficos, radiómetros multi e hiperespectrales y espectómetros de imagen (Matese y Di Gennaro, 2018; Peña et al., 2014). En cuanto a los sensores activos, el radar y el LiDAR (*Light Detection And Ranging*) son los más representativos. El primero de ellos, se basa en el principio de que las microondas artificiales enviadas en una dirección determinada chocan con los objetos y son dispersadas y, el segundo es análogo, pero con tecnología láser. El sensor LiDAR es muy usado, por ejemplo, para topografía de precisión desde aviones

(Delgado, 2015) así como también en la realización de inventarios forestales (Hooman et al., 2015). Una ventaja de los sensores pasivos es que trabajan en todo el rango espectral y los activos solo trabajan en la región de las microondas. Sin embargo, los segundos atraviesan las nubes y no dependen de la luz solar para capturar la información.

La variedad de sensores a emplear a bordo de una plataforma aérea no tripulada es similar a la existente para las plataformas convencionales, destacando cámaras RGB, multiespectrales, hiperespectrales, térmográficas, LiDAR y de video (Colomina et al., 2014). La gran diferencia se encuentra en la dimensión y peso de los sensores que debido al avance en la miniaturización de los sensores es posible la integración de los mismos en los UAV. En función del tipo de operación que se vaya a realizar y el objetivo que se desee alcanzar será necesario un sensor u otro e incluso simultáneamente si la plataforma lo permite. La Tabla 1.4 muestra las características de los sensores.

**Tabla 1.4 Características de los sensores**

SENSOR	RANGO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	APLICACIONES
RGB	380 – 780 Nanómetros	Inspección, patrimonio
Infrarrojo	500 – 950 Nanómetros	Agricultura, selvicultura
Multiespectral	500 - 950 Nanómetros	Agricultura, selvicultura
Hiperespectral	450 – 950 Nanómetros	Agricultura, selvicultura, patrimonio
Térmico	8 – 12 Micrómetros	Agricultura, inventarios cinegéticos, patrimonio

La elección del sensor no se basa únicamente en la resolución espectral y radiométrica que tenga, hay que tener en cuenta varios factores que resultan indispensables para llevar a cabo la operación con éxito (Mesas-Carrascosa et al., 2015). A continuación, se muestran algunos de estos factores a nivel general:

- a) Dimensión del sensor: Cuanto mayor sea las dimensiones del sensor, mayor será la superficie cubierta por un fotograma.
- b) Peso del sensor: Cuanto menos pese, el tiempo de vuelo será mayor puesto que la plataforma tendrá más autonomía.

- c) Velocidad de almacenamiento: Es necesario conocer cada cuanto tiempo el sensor puede registrar una imagen, y en función de ello se debe disponer de una tarjeta de almacenamiento acorde a dicha velocidad.

Además de ello, también han de considerarse otros aspectos como:

- a) Resolución espacial: mínimo detalle espacial (píxel) que registra el sensor, dependiente del sistema óptico del mismo y la altitud de la plataforma.
- b) Superficie cubierta por un fotograma: La relación entre altura de vuelo y la distancia focal del sensor da lugar a la escala del vuelo. A partir de ello se establecen las siguientes relaciones:
- A mayor altura de vuelo mayor superficie cubierta por un fotograma
  - A mayor altura de vuelo se reduce el número de fotogramas
  - A mayor altura de vuelo mayor tamaño de píxel sobre el terreno (GSD, *Ground Sample Distance*).
- c) Tamaño de las imágenes: Dependerá del sensor. A mayor número de Megapíxeles mayor será el tamaño de la imagen. Este factor no es tan limitante a la hora de la elección del factor ya que actualmente cualquier paquete fotogramétrico es capaz de gestionar un gran volumen de imágenes.

#### **1.4.1. Sensores RGB**

Los sensores RGB embarcados en las plataformas aéreas no tripulada son comúnmente empleados para la inspección de torres de electricidad, plantas fotovoltaicas, puentes, agricultura y silvicultura de precisión entre otros. Uno de los productos que permiten generar son las ortofotografías de gran resolución espacial.



Estos tipos de sensores pueden clasificarse en compactos, bridge o réflex. Los primeros suelen presentar tamaños más reducidos y su manejo no suele ser complicado debido a que presentan modos automáticos o semiautomáticos. Los segundos permiten realizar un mayor control a la hora de tomar las imágenes, a la vez que permiten objetivos de mayor alcance. Los últimos tienen un sensor de mayor tamaño que los compactos, permiten intercambiar objetivos y tienen mayor sensibilidad (García-Ferrer y Mesas-Carrascosa, 2015).

Las ventajas y desventajas de unos sensores respecto a otros radican principalmente en las funcionalidades, características, manejo, peso, coste, etc. que, dependiendo del objetivo a satisfacer, la carga de pago de la plataforma, la velocidad de la plataforma y la calidad final de las imágenes se optará por la elección de un sensor u otro.

#### **1.4.2. Sensores Multi e Hiperespectrales**

Los sensores multiespectrales embarcados en las plataformas aéreas no tripuladas son comúnmente empleados en el sector agroforestal, principalmente para la detección del estado de los cultivos y la vegetación, de forma que se puedan tomar decisiones respecto a la gestión más adecuada a llevar a cabo antes de que empiecen a verse los síntomas de afección.

Estos sensores son capaces de recoger datos espectrales de múltiples bandas discretas del espectro, pudiendo seleccionar bandas específicas en función del objetivo a cubrir (Kelcey et al., 2012). Generalmente, estos sensores suelen registrar información en el *red edge* (0,68 a 0,75 micras) y en el infrarrojo cercano (0,75 a 1,7 micras), muy interesantes para dicho sector.

A partir de las imágenes multiespectrales se pueden calcular una gran variedad de índices de vegetación relacionados con la estructura de la vegetación, la actividad fotosintética y los pigmentos (Zarco-Tejada et al., 2013), los cuales reflejarán el estado en el que se encuentran.

Actualmente, existen en el mercado sensores multiespectrales con distintas configuraciones, dimensiones, pesos y objetivos que pueden ser integrados en las plataformas UAV. La elección del sensor dependerá de la finalidad a alcanzar, las características propias del sensor, la carga de pago y el coste entre otros.

Uno de los primeros modelos que más se han empleado en agricultura de precisión fue el sensor TetraCam MultiCamera Array (TetraCam Inc., Chatsworth, CA, USA). Este sensor ofrece la posibilidad de elegir entre 4, 6 o 12 objetivos. Cada uno de estos objetivos hace referencia a una región concreta del espectro que pueden modificarse con filtros adaptados. Una característica de este modelo es que presenta un sensor máster que es el que realiza el disparo y el resto son los esclavos (García-Ferrer y Mesas-Carrascosa, 2015). Este sensor tiene un peso de aproximadamente 700 gramos por lo que para cierto tipo de plataformas puede ser un inconveniente debido a que por un lado no pueda ser embarcado o, por el contrario, reduzca drásticamente el tiempo de vuelo.

Una alternativa a este modelo son los sensores Micasense Red Edge y Sequoia + de las firmas Micasense y Parrot respectivamente (Micasense Inc, WA, USA; Parrot, Pairs France). El primero de ellos tiene 5 bandas y el segundo tiene 4 más una cámara RGB. El peso de ambas se encuentra comprendido entre los 100 y 200 gramos por lo que supone una gran ventaja respecto al sensor TetraCam Multicamera Array. La integración de estos sensores en los UAV no suele ser complicada por lo que prácticamente se pueden instalar en la gran mayoría.

Estos sensores son ampliamente usados en el sector agroforestal (Lum et al., 2016; Dash et al., 2018; Fraser et al., 2018; Friedrich et al., 2018) debido a que las prestaciones, el manejo y el coste que tienen hacen que se hayan convertido en los más demandados. La elección de uno u otro dependerá del usuario y sus necesidades a satisfacer.

Los sensores hiperespectrales embarcados en las plataformas UAV se emplean igualmente en el sector agroforestal para la detección del estado de la vegetación y la gestión de los recursos naturales.

Estos sensores registran información en ciento de bandas espectrales. El ancho de banda es muy estrecho por lo que la información es continua, en contraposición a los sensores multiespectrales en los cuales no necesariamente lo son. Esta característica les permite detectar y, posteriormente analizar aspectos que cuando el ancho de banda es mayor no se detectan (Colomina y Molina, 2014; Cuerno et al., 2015).

Gracias a las imágenes espectrales se pueden detectar tanto en los cultivos como en las masas forestales situaciones de estrés hídrico, zonas de mayor o menor vigor de la vegetación e incluso enfermedades (Potgieter et al., 2017; White et al., 2012;).

Desde el primer sensor de este tipo desarrollado para ser embarcado en los UAV hasta la actualidad, se ha avanzado en cuanto dimensiones, peso, funcionamiento, características y coste debido a que se tiende a que el sistema sea integral, sincronizando el sensor con la unidad IMU/GNSS (García-Ferrer y Mesas-Carrascosa, 2015).

### **1.4.3. Sensores de temperatura**

Los sensores de temperatura embarcados en las plataformas aéreas no tripuladas son ampliamente utilizados en las inspecciones de las plantas fotovoltaicas, paneles solares, tendidos eléctricos, edificación e igualmente en el sector agroforestal.

Las cámaras térmicas que generalmente se instalan en dichas plataformas suelen estar calibradas para trabajar en el infrarrojo térmico. En el mercado se distinguen entre cámaras termográficas y térmicas. La diferencia existente entre ambas radica en que las primeras son capaces de medir la temperatura absoluta en el píxel. Este aspecto resulta de gran interés porque permite no solo detectar los cambios de temperatura sino saber el rango de temperaturas.

Estos sensores generalmente tienen dimensiones de imágenes muy pequeñas por lo que se necesitan muchas imágenes para cubrir el área de estudio. Además de ello, se encuentra la limitación de la velocidad de la plataforma UAV ya que no puede alcanzar velocidades muy elevadas con el fin de garantizar que la toma de imágenes se realice de forma correcta.

La tecnología respecto a estos sensores ha avanzado rápidamente debido a que se emplean a tiempo real como a posteriori en sectores tan diversos como los comentados con anterioridad. En este sentido, el principal desarrollo de estos sensores ha consistido en la miniaturización y en el almacenado integrado de los datos registrados (García-Ferrer y Mesas-Carrascosa, 2015).

#### **1.4.4. Sensores con tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging)**

Los sensores basados en la tecnología LiDAR embarcados en las plataformas UAVs son utilizados en selvicultura de precisión, inspección de líneas eléctricas, explotaciones mineras y levantamientos topográficos entre otros.

La tecnología LiDAR se trata de un sistema láser que mide la distancia entre el punto de emisión de ese láser hasta un objeto o la superficie. El tiempo que tarde ese láser en llegar al objeto y volver es lo que determina la distancia entre esos dos puntos (Martínez, 2017). Esta tecnología se base en un sensor activo por lo que no depende de las condiciones meteorológicas.

Esta tecnología genera una nube de puntos, los cuales están georreferenciados. Para ello, el sistema precisa de un sistema GNSS diferencial y un sensor inercial de navegación que permite obtener Modelos Digitales de Superficies (Tomé et al., 2014).

Actualmente, existen en el mercado varios modelos para embarcarlos en las plataformas UAVS, la elección dependerá mucho de la finalidad, la capacidad de pago de la plataforma y el coste de adquisición.

Entre las ventajas a destacar de esta tecnología es la rapidez y precisión de la información capturada de forma masiva, recogida de información de lugares de complicado acceso, georreferenciación de cada punto de la nube de puntos global y procesamiento automático.

### **1.5. Procesamiento de la información e imágenes capturadas**

---

El trabajo previo al procesamiento de la información e imágenes capturadas por la plataforma UAV consiste principalmente en la planificación del vuelo en gabinete, la realización del vuelo y apoyo topográfico en campo. Antes de realizar la planificación del vuelo es necesario conocer la aplicabilidad y fin al que va destinado para así elegir la plataforma de vuelo y los sensores a emplear.

La planificación de vuelo consiste en primer lugar, en la definición del área objeto de estudio (localización y superficie a cubrir) y, a continuación, en

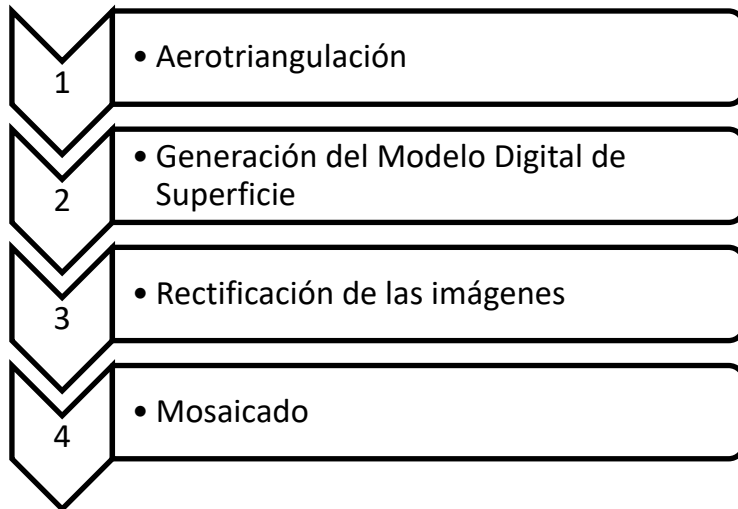
configurar los parámetros dependientes de la plataforma y del producto cartográfico a generar. Los parámetros relativos a la plataforma hacen referencia a la carga de pago, velocidad, autonomía de las baterías, etc. Con respecto a los parámetros del producto cartográfico a generar, se deben tener en cuenta aspectos como (Escalante y Porras, 2016):

- a) GSD (*Ground Sample Distance*): Tamaño de pixel proyectado en el suelo. El GSD depende de la altura de vuelo, la distancia focal y el tamaño del sensor. El GSD se obtiene como el producto de la escala de vuelo y el tamaño del sensor, por lo que a mayor altura mayor GSD (menor resolución) y viceversa.
- b) Solape transversal y longitudinal: El solape transversal se refiere al existente entre pasadas y el solape longitudinal al existente entre las imágenes de una misma pasada.

En las plataformas de tipo multirrotor, dependiendo de los objetivos a alcanzar podrán configurarse diferentes modos de vuelo (stop o cruising mode) (Mesas-Carrascosa et al., 2015). El primero de ellos, se caracteriza porque la plataforma se estabiliza en cada punto de disparo establecido previamente el porcentaje de solapamiento y, en el segundo, la plataforma sigue la trayectoria sin detenerse en ningún punto.

Una vez configurado la planificación de vuelo, se ejecuta éste y se realiza el apoyo topográfico con la finalidad de que el producto cartográfico a generar aparezca correctamente georreferenciado para poder ser operable con el resto de las fuentes de información. La distribución de los puntos de apoyo debe cubrir el área de interés, situándose en las esquinas y un punto en el centro del área de estudio. Las coordenadas de los puntos se han de tomar empleando el equipamiento adecuado que ofrezca una precisión mejor que el GSD de las imágenes, generalmente es suficiente con sensores GNSS bifrecuencia.

Una vez realizado el vuelo, capturada la información y las imágenes se lleva a cabo el procedimiento de procesado. Las fases de las que se compone se muestran en la Figura 1.8 (Eisenbeiss, 2009):



**Figura 1.8 Fases del procesamiento de las imágenes capturadas con una plataforma UAV**

1. **Aerotriangulación:** Esta fase consiste en determinar la orientación individual de cada modelo estereoscópico de un bloque fotogramétrico. Para ello, se localizan automáticamente puntos de unión coincidentes para llevar a cabo la corrección de sus orientaciones y las posiciones relativas (Coello y Ballesteros, 2015). El método más robusto es el ajuste del bloque debido a que permite la orientación absoluta de un bloque con un número ilimitado de imágenes (Aber et al., 2010). Para realizar este ajuste, los algoritmos empleados están basados en la técnica SfM (*Structure from motion*). Esta técnica corrige automáticamente la geometría de la escena, las posiciones de la cámara y la orientación, sin necesidad previamente de puntos de control de coordenadas 3D (Tomás-Jover et al., 2016). Para ello, las ecuaciones de colinealidad se resuelven debido a la gran cantidad de puntos comunes entre las imágenes, las cuales han de tener elevados porcentajes de solape (Martínez-Carricondo et al., 2018; Vasuki et al., 2014; Westoby et al., 2012;). Resultado de ello, son nubes de puntos en un sistema de coordenadas arbitrario y una aproximación inicial al modelo digital de superficie (Escalante y Porras, 2016). Las nubes de puntos están generadas en coordenadas relativa, referidas al sistema de referencia de las imágenes. La georreferenciación se realiza mediante los puntos de apoyos claramente identificables (Martínez-Carricondo et al., 2018).

2. Generación del Modelo Digital de Superficie: A partir de la orientación externa de cada imagen calculada en la fase anterior se puede llevar a cabo la generación del modelo digital de superficies. La nube de puntos previamente generada representa un Modelo Digital de Superficie que tras un filtrado automático de puntos es posible obtener el Modelo Digital de Elevaciones (García-Ferrer y Mesas-Carrascosa, et al., 2015).
3. Rectificación de las imágenes: Esta fase consiste en transformar una imagen en una proyección en el terreno, es decir, corregir las deformaciones debidas al relieve (Escalante y Porras, 2016). La imagen rectificada permite realizar mediciones sobre ella porque tiene métrica. Mediante el proceso de la rectificación se obtiene la ortofotografía que ya es operable con el resto de las fuentes de información.
4. Mosaicado: Esta fase consiste en la unión de varios fotogramas rectificadas en uno solo denominado ortomosaico. La generación de este ortomosaico puede llevar asociadas algunas tareas de edición para obtener un ortomosaico continuo tanto en geometría como radiometría.

Generalmente, todo el proceso fotogramétrico puede llevarse a cabo a través de softwares específicos para ello, tanto *open source* como privado. Uno de los primeros utilizados de carácter comercial para la fotogrametría de imágenes capturadas por UAV fue EnsoMosaic Mill (Mosai Mill Ltd., Vantaa, Finland) pero debido al avance experimentado y a la necesidad de procesamiento fueron apareciendo otros como Agisoft Photoscan (Agisoft, St. Petersburg, Russia) o Pix4D (Pix4D SA, Lausanne, Switzerland), por ejemplo. Cualquiera de ellos permite la realización de las 4 fases, la elección dependerá del usuario.

## **1.6. Aplicaciones de las plataformas aéreas no tripuladas**

---

Las plataformas aéreas no tripuladas se están empleando con éxito en sectores muy diversos tales como en la arqueología (Ilci et al., 2019; Mesas-Carrascosa 2016), en ingeniería civil para la planificación urbanística y la construcción (Chen et al., 2018; Reinoso et al., 2018), en energía para la inspección de plantas fotovoltaicas (Addabbo et al., 2018; Gallardo-Saavedra et al., 2018), en agricultura de precisión (Comba et al., 2018; Deng et al., 2018; Torres-Sánchez et al., 2018), en silvicultura de precisión (Krause et al., 2019) y, por último también en hidrología y gestión de los recursos hídricos (Debell et al., 2015).

Las plataformas aéreas no tripuladas junto con los sensores embarcados en ellas son las herramientas con las que se pueden obtener imágenes de alta resolución espacial y temporal en función del objetivo a satisfacer. En este sentido, en la ingeniería civil y, especialmente, en las tareas de inspección, el uso de estas plataformas está ampliamente extendido debido a que pueden acceder a lugares de difícil acceso, garantizando por tanto la seguridad del operario. Chen et al (2018), a través de reconstrucciones 3D basadas en las imágenes capturadas por el UAV llevaron a cabo la inspección de un puente con el fin de detectar incidencias en el mismo.

Por su parte, en el sector agroforestal los sensores RGB a bordo de dichas plataformas se utilizan en un gran número de aplicaciones (Pádua et al., 2017). Un ejemplo de ello fue el trabajo llevado a cabo por Peña et al. (2014) en el cual con una cámara visible RGB y tomando imágenes a diferentes alturas, detectaron las malas hierbas en cultivos de girasol en época temprana, así como la clasificación de las líneas del cultivo con un 100% de exactitud. Del mismo modo, a partir de imágenes RGB y mediante técnicas fotogramétricas, de Castro et al (2018) desarrollaron un algoritmo para caracterizar en 3D una parcela de viñedo, incluyendo la clasificación de la vid, la estimación de la altura y la detección de huecos. Concretamente, el uso de las cámaras RGB y la cámara en infrarrojo cercano (NIR), permiten a través de diferentes índices apreciar las características de los cultivos (Meneses et al., 2015).

En muchas ocasiones, se suelen emplear varios sensores simultáneos con la finalidad de poder evaluar varios factores al mismo tiempo, siempre y cuando la plataforma lo permita (Rufino y Moccia, 2005; Zarco – Tejada et al., 2012).



Matese y Di Gennaro (2018) equiparon un UAV con tres sensores de forma simultánea (multiespectral, térmico y RGB) para evaluar la variabilidad intra vinícola. El primero de ellos les permitió evaluar el vigor de la viña, con el segundo medir la temperatura de la hoja para evaluar el estrés al que estaba sometido y, con el último, detectar la ausencia de plantas en las líneas. El conjunto de la plataforma con los tres sensores embarcados demostró ser una herramienta muy útil en viticultura de precisión para una monitorización rápida y eficaz del viñedo. Del mismo modo, pero en este caso de aplicación en el sector forestal, las imágenes RGB y multiespectrales se ha utilizado para la identificación de especies en árbol individual (Gini et al., 2014), detección de copas (Panagiotidis et al., 2017) y estimación de atributos de la estructura forestal (Dempewolf et al., 2017). Concretamente, en los inventarios forestales, cada vez son más frecuente realizarlos con el sensor LiDAR a bordo (Wallace et al., 2012) debido a que permiten recoger un gran volumen de información del bosque y con precisión. Por su parte, Santini et al (2019) llevaron a cabo el análisis de la variación genética en los índices de vegetación y la temperatura del dosel arbóreo en plantaciones de *Pinus halepensis*, el área foliar, los pigmentos fotosintéticos, la eficiencia fotosintética y el uso de agua. Para todo ello, equiparon el UAV con sensores RGB, multiespectral y térmico. Sankey et al (2018) fusionaron datos LiDAR e imágenes hiperespectrales para identificar especies individuales y su caracterización en 3D a escala submétrica.

Por consiguiente, los UAVs permiten adquirir datos e información con una alta resolución temporal y espacial lo que se traduce en un ahorro de tiempo y, por tanto, de costes.

### **1.7. Evaluación de la calidad de los productos generados a partir del procesamiento de las imágenes**

---

La calidad del dato geográfico es evaluado atendiendo según distintos elementos y subelementos de calidad tal y como marca ISO 19157:2013 *Geographic information – Data quality*. El elemento de calidad exactitud posicional es por tradición el aspecto de un producto cartográfico más importante, convirtiéndose en un elemento clave para la interoperabilidad de las bases de datos geográficas (Church et al., 1998). La irrupción con fuerza de

los vehículos aéreos no tripulados en el sector de la geomática ha ocasionado la generación de nuevos escenarios donde aumenta considerablemente la exactitud temporal pese a que se degrade en una determinada cantidad la exactitud posicional. Tales productos, a modo por ejemplo de ortofotografías, han de ser evaluados geoméricamente para ver en qué condiciones es adecuado su uso, siendo la estadística la herramienta básica para su evaluación (Atkinson et al., 2007).

Hoy en día existe una gran demanda de información sobre el territorio lo que hace cada vez más importante establecer una garantía de calidad en los datos espaciales (Ariza, 2002). El control posicional de una cartografía es un proceso de evaluación de la calidad que se realiza sobre un producto o proceso con el objeto de decidir si dicho producto cumple con unos requisitos, especificaciones o expectativas (Ariza y Atkinson, 2006).

Las normas actuales sobre el control de calidad posicional de los datos espaciales son conocidas (ASPRS, 1989; FGDC, 1998) y siguen generalmente las mismas pautas (Polo y Felicísimo, 2008):

- a) Evaluar la calidad de los datos originales con otros datos procedentes de fuentes de mayor exactitud.
- b) Realizar la comparación sobre un número mínimo de pares de datos.
- c) Determinar las distancias entre los pares.
- d) Aplicar test estadísticos a estas distancias considerando, a efectos de significación, que se ajustan a una distribución normal.

El control de la calidad posicional de los productos cartográficos se ha venido realizando mediante la estimación de la exactitud posicional de los mismos usando técnicas o métodos de control de base estadística en los que a través de una muestra reducida de puntos bien identificados en la cartografía y en el terreno se realiza una estimación para todo el producto (Mozas, 2007). Las pruebas que se emplean se basan en la comparación del producto cartográfico con una fuente de mayor exactitud o bien datos tomados sobre el terreno con una exactitud superior a la cartografía a analizar. Sobre este último aspecto hay que considerar que el uso de sensores GNSS reduce considerablemente los costes en la fase de proceso (Atkinson, 2005).

Desde el punto de vista de la calidad posicional existen diferentes test o métodos que permiten seguir la exactitud posicional X,Y y/o Z del mapa objeto de estudio. De igual manera existen estándares que complementan el análisis. A continuación, se expone las principales características de los más empleados.

### **1.7.1. Test NMAS**

El test NMAS (*National Map Accuracy Standard*) (USBB, 1947) es un test ampliamente utilizado. El método de comparación se realiza a través de fuentes de mayor exactitud. Este test analiza la componente horizontal y vertical conjuntamente, siendo la clase de elementos puntos. El resultado final es si la cartografía cumple o no cumple el test. Para ello, al menos hay que seleccionar una muestra de 20 puntos, de modo que como máximo, el 10 % de los puntos de la muestra pueden tener un error horizontal mayor a 0.846 mm en escalas mayores a 1/20.000, o de 0.508 a escalas menores de 1/20.000. Una de las ventajas de este test es su simplicidad ya que indica si cumple o no cumple (Atkinson et al., 2001).

### **1.7.2. Test EMAS/ASPRS Standard**

El test EMAS (*Engineering Map Accuracy Standard*) es utilizado para determinar la exactitud de los mapas topográficos a gran escala. El test ha sido desarrollado por la ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) en colaboración de la *American Society of Civil Engineers* y el *American congress on Surveying and Mapping*. Al igual que el test anterior utiliza una fuente de mayor exactitud como método de comparación y se aplica sobre elementos de tipo punto. En este caso, permite el estudio de las componentes X e Y por separado, así como conjuntamente, permitiendo definir los umbrales aceptables de error y el nivel de confianza (Atkinson et al., 2001). Este test se realiza en dos etapas, la primera usa la t-Student para evaluar el sesgo y en la segunda la prueba Chi-cuadrado para determinar si los errores aleatorios son adecuados. Para pasar el test, ambas coordenadas han de superar ambas etapas.

### **1.7.3. Test NSSDA**

El test NSSDA (FGDC, 1988) es un estándar usado norteamericano que se utiliza tanto para datos cartográficos analógicos como digitales. Este test también emplea fuentes de mayor exactitud para evaluar las componentes horizontal, vertical o ambas para elementos de puntos. Este test, a diferencia de los anteriores ofrece un índice de calidad de la cartografía en unidades reales sobre el terreno (Atkinson et al., 2001). Es el propio usuario quien decide si acepta o no la tolerancia. A partir de formulaciones, se determina el umbral de uso del producto que se está evaluando.

### **1.7.4. Test ASLSM**

El test ASLSM (*Accuracy Standards for Large-Scale Maps*) (ASPRS, 1989) se realiza a gran escala. Como los test anteriores, precisa de una fuente de mayor exactitud. Las coordenadas en este caso se evalúan por separado, empleando el error medio cuadrático (RMSE). Los elementos de análisis son puntos. Una característica de este test es que clasifica el producto en diferentes clases, concretamente 3 en función de la proporción de mejora del producto evaluado (López et al., 2010).

### **1.7.5. Test STANAG 2215**

El test STANAG 2215 es utilizado para evaluar la calidad posicional de la cartografía utilizada por los países de la OTAN. El uso de este test implica la utilización de una fuente de mayor exactitud para analizar la componente X e Y por separado. El test clasifica la precisión geométrica en diferentes clases, de mejor a peor precisión. Si no existiesen errores sistemáticos se ha de calcular el error planimétrico como *Circular Map Accuracy Standard* CMAS y, por el contrario, si existiesen se ha de calcular el sesgo (Castro, 2014).

## 1.8. Bibliografía

---

- Aber, J.S., Marzolff, I., Ries, J.B. (2010). Chapter 3 - photogrammetry. In Small-format aerial photography, Ries, J.S.A.M.B., Ed. Elsevier: Amsterdam, 2010; pp 23-39
- Addabbo, P., Angrisano, A., Bernardi, M. L., Gagliarde, G., Mennella, A., Nisi, M., & Ullo, S. L. (2018). UAV system for photovoltaic plant inspection. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 33(8), 58-67.
- Ariza, F.J. (2002): Calidad en la producción cartográfica. Ra-MA, Madrid. ISBN:84-7897-524-1
- Ariza, F.J., Atkinson, A.D.J. (2006). Metodologías de control posicional: visión general y análisis crítico. Informe al CT-148 de AENOR, GIIC, Universidad de Jaén
- ASPRS, (1989). Accuracy standards for large scale maps, PE&RS, vol. 56, nº 7.
- Atkinson, A. D. (2005). Control de calidad posicional en cartografía: análisis de los principales estándares y propuesta de mejora. Universidad de Jaén, Jaén.
- Atkinson, A. D., Ariza, F. J., & García-Balboa, J. L. (2007). Estimadores robustos: una solución en la utilización de valores atípicos para el control de la calidad posicional. GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, (7), 171-187.
- Atkinson A. D., García, J. L., & Ariza, F. J. (2001). Los diferentes test para el control de calidad posicional en cartografía. In XIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica.
- Castro M., (2014). La evaluación de la exactitud posicional de la información geográfica según los estándares en uso. Revista cartográfica. Nº90
- Chen, S., Truong-Hong, L., O'Keefe, E., Laefer, D. F., & Mangina, E. (2018). Outlier detection of point clouds generating from low cost uavs for bridge inspection. In Proc. of The Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018.

- Church, R., Curtin, K., Fohl, P., Goodchild, M., Kyriakidis, P., Noronha, V., (1998). Positional distortion in geographic data sets as a barrier to interoperation. Technical papers ACSM. American Congress on surveying and mapping. Bethesda.
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial (No. 526.982 C564 1996). Ediciones Rialp.
- Coello Romero, A., & Ballesteros Abellán, G. (2015). Fotogrametría de UAV de ala fija y comparación con topografía clásica.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- Comba, L., Biglia, A., Aimonino, D. R., & Gay, P. (2018). Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 84-95.
- Cuerno Rejado C, Ramirez Ciriza J. M., Oñate De Mora M., Ezcurra Talegón A., Díaz Apodaca L., Saez Paredes, D., Beltrán Noguera A., López Jimeno, C., Martín Sánchez D., and Ramos Castro H. (2015). *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Dash, J., Pearse, G., & Watt, M. (2018). UAV multispectral imagery can complement satellite data for monitoring forest health. *Remote Sensing*, 10(8), 1216.
- DeBell, L., Anderson, K., Brazier, R. E., King, N., and Jones, L. (2015). Water resource management at catchment scales using lightweight UAVs: current capabilities and future perspectives. *J. Unmanned Veh. Syst.* 3, 1– 24.
- Delgado Silva, L. (2015). Levantamiento Hidrográfico con Sistema LIDAR.
- de Castro, A., Jiménez-Brenes, F., Torres-Sánchez, J., Peña, J., Borrás-Serrano, I., & López-Granados, F. (2018). 3-D characterization of vineyards using a novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications. *Remote Sensing*, 10(4), 584.

- Dempewolf, J., Nagol, J., Hein, S., Thiel, C., & Zimmermann, R. (2017). Measurement of within-season tree height growth in a mixed forest stand using UAV imagery. *Forests*, 8(7), 231.
- Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., & Yan, Y. (2018). UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 124-136.
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV photogrammetry*; ETH: Zurich, Switzerland.
- Escalante Torrado, J. O., & Porras Díaz, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119-140.
- FGDC. (1998): Geospatial positioning accuracy standards. Minnesota Planning, 1999. FGCDSTD-007-1998. Virginia.
- Figueroa, F. L. (2004). Análisis transdisciplinar sobre la destrucción de la capa de ozono e incremento de radiación ultravioleta y sus efectos sobre el medio ambiente y salud humana. In *Tecnociencia y cultura a comienzos del siglo XXI* (pp. 253-283). Servicio de Publicaciones.
- Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). *El espectro electromagnético y sus aplicaciones*. Reproducción.
- Fraser, B., & Congalton, R. (2018). Issues in Unmanned Aerial Systems (UAS) data collection of complex forest environments. *Remote Sensing*, 10(6), 908.
- Friedrich, J. (2018). Possibilities in UAV monitoring on grassland vegetation. In *Merensky Young Scientist Seminar: Valuation and Evaluation of Forest Resources* (p. 39). by: Department of Forest and Wood Science, Faculty of AgriSciences, Stellenbosch University, Private Bag XI, Matieland, 7602, South Africa.
- Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L., & Duque-Perez, O. (2018). Image resolution influence in aerial thermographic inspections of photovoltaic plants. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(12), 5678-5686.

- García-Ferrer, A., Mesas Carrascosa, F. (2015). El potencial de los vuelos no tripulados en el complejo agroalimentario andaluz. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes. Universidad de Córdoba. Córdoba (España).
- Gini, R., Passoni, D., Pinto, L., & Sona, G. (2014). Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1), 251-269.
- Hooman Latifi, Fabian E. Fassnacht, Jörg Müller, Agalya Tharani, Stefan Dech, Marco Heurich, (2015). Forest inventories by LiDAR data: A comparison of single tree segmentation and metric-based methods for inventories of a heterogeneous temperate forest, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 42, Pages 162-174, ISSN 0303-2434
- Ilci, V., Ozulu, I. M., Bilgi, S., & Alkan, R. M. (2019). The usage of unmanned aerial vehicles (uavs) for 3d mapping of archaeological sites. *Feb-fresenius environmental. Bulletin*, 968.
- Ishtiaque, A., Myint, S. W., & Wang, C. (2016). Examining the ecosystem health and sustainability of the world's largest mangrove forest using multi-temporal MODIS products. *Science of The Total Environment*, 569, 1241-1254.
- ISO, I. (2013). 19157: 2013. Geographic information—Data quality.
- Kelcey, J., & Lucieer, A. (2012). Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *Remote Sensing*, 4(5), 1462-1493.
- Krause, S., Sanders, T. G., Mund, J. P., & Greve, K. (2019). UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. *Remote Sensing*, 11(7), 758.
- Lehmann, J. R. K., Nieberding, F., Prinz, T., & Knoth, C. (2015). Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry—A new perspective to monitor pest infestation levels. *Forests*, 6(3), 594-612.
- Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea. BOE núm. 176, de 23/07/1960.



- Ley 21/2003, de 7 de julio, de Seguridad Aérea. BOE núm. 162, de 08/07/2003.
- López, F. J. A., Atkinson, A. D., Balboa, J. L. G., & Avi, J. R. (2010). Analysis of user and producer risk when applying the ASPRS Standards for Large Scale Maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(5), 625-632.
- Lum, C., Mackenzie, M., Shaw-Feather, C., Luker, E., & Dunbabin, M. (2016). Multispectral imaging and elevation mapping from an unmanned aerial system for precision agriculture applications. In *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture*.
- Martínez, N. (2017). Qué es la tecnología LiDAR y por qué está vinculada con los vikingos o el coche autónomo. Extraído el 18 de junio de 2019 desde <https://www.nobbot.com/futuro/tecnologia-lidar/>
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 72, 1-10
- Matese, A., & Di Gennaro, S. (2018). Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture. *Agriculture*, 8(7), 116.
- Meneses, V.A.B., Téllez, J.M. and Velasquez, D.F.A. (2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. @ limentech, *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1).
- Mesas Carrascosa, J., García-Ferrer A. (2015). Aplicaciones urbanísticas. Pages 242 in Hacienda CdEy, ed. *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Notario García, M., Meroño de Larriva, J., & García-Ferrer, A. (2016). An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaicks to survey archaeological areas. *Sensors*, 16(11), 1838.

- Micasense (2019) <https://www.micasense.com/es/rededge-mx> Acceso 17 Junio 2019
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2018). Plan Estratégico par el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021.
- Mozas, A. T. (2007). Control de la calidad posicional en cartografía por elementos lineales. Tesis doctoral, Universidad de Jaén.
- OACI. Circular 328, (2011). Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS).
- Oñate de Mora, M. (2015). Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto en: Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Hacienda CdEy, ed.
- Pádua, L., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Sousa, J. J., Peres, E., & Morais, R. (2017). UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2349-2391.
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surov, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2392-2410.
- Parrot (2019) <https://www.parrot.com/business-solutions-us/parrot-professional/parrot-sequoia> Acceso 17 Junio 2019
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., & López-Granados, F. (2014). Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista de Teledetección*, (42), 39-48.
- Polo, M.E., Felicísimo, A.M. (2008). Propuesta de metodología para el análisis del error de posición en bases de datos espaciales mediante estadística circular y mapas de densidad. *GeoFocus (Artículos)*, nº 8, p. 281-296.
- Potgieter, A. B., George-Jaeggli, B., Chapman, S. C., Laws, K., Suárez Cadavid, L. A., Wixted, J., ... & Hammer, G. L. (2017). Multi-spectral imaging from an unmanned aerial vehicle enables the assessment of seasonal leaf

area dynamics of sorghum breeding lines. *Frontiers in plant science*, 8, 1532.

- Ramírez Ciriza, J.M. (2015). Aspectos Reglamentarios. Pages 242 in Hacienda CdEy, ed. *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. BOE núm. 17, de 19 de enero de 2002, páginas 2449 a 2450.
- Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de Julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia. BOE núm. 163, de 5 julio de 2014, pp 52544 a 52715
- Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto. BOE núm. 316, de 29 de diciembre de 2017, pp. 129609 a 12964
- Reinoso, J. F., Gonçalves, J. E., Pereira, C., & Bleninger, T. (2018). Cartography for civil engineering projects: Photogrammetry supported by unmanned aerial vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42(1), 91-96.
- Rufino, G., Moccia, A. (2005). Integrated VIS-NIR Hyperspectral/thermal-IR Electrooptical Payload System for a Mini-UAV. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Arlington, VA, USA, pp. 647–664
- Sánchez, R. (2014). *Sistemas Aéreos Pilotados Remotamente y Espacio Aéreo. Una combinación estratégica*. Ministerio de Defensa. Gobierno de España
- Sánchez G, Emilio R. (2011). *Sistemas aéreos no tripulados y espacio aéreo en Europa. Una combinación estratégica*. IEEE. ES Instituto Español de Estudios Estratégicos. Dec;14.
- Sankey, T. T., McVay, J., Swetnam, T. L., McClaran, M. P., Heilman, P., & Nichols, M. (2018). UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(1), 20-33.

- Santini, F., Kefauver, S. C., Resco de Dios, V., Araus, J. L., & Voltas, J. (2019). Using unmanned aerial vehicle-based multispectral, RGB and thermal imagery for phenotyping of forest genetic trials: A case study in *Pinus halepensis*. *Annals of Applied Biology*, 174(2), 262-276.
- Tomás-Jover, R., Guill, A. J. R., Cano, M., Abellán, A. A., & Jordá, L. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. In *Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno: 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica: A Coruña, 19, 20 y 21 de octubre de 2016* (pp. 209-216). Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica.
- Tomé J.L., Pérez R., Cantón J. (2014) Aplicaciones UAV y LiDAR para el análisis de problemas de erosión originados tras incendios forestal. Caso: Fenómenos de formación de cárcavas en el Soto de los Cabllos tras el incendio de Salmerón de 2012. I Congreso Forestal Valenciano. Gestión y restauración de ecosistemas forestales tras los incendios: nuevos retos y avances para el desarrollo rural. Comunicación.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., & Peña, J. M. (2018). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision agriculture*, 19(1), 115-133.
- USBB (1947). *United States National Map Accuracy Standards*". U.S. Bureau of the Budget.
- Valavanis, K. P., Oh, P., & Piegl, L. A. (Eds.). (2008). *Unmanned Aircraft Systems: International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, UAV'08*. Springer Science & Business Media.
- Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P., Micklethwaite, S. (2014). Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: an image analysis approach. *Comput. Geosci.* 69, 22–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing* 4, 1519-1543.

- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wezeman, Siemon, and G. Quille. (2007). "UAVS and UCAVS: Developments in the European Union." European Parliament
- White, J. W., Andrade-Sanchez, P., Gore, M. A., Bronson, K. F., Coffelt, T. A., Conley, M. M., ... & Jenks, M. A. (2012). Field-based phenomics for plant genetics research. *Field Crops Research*, 133, 101-112.
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337.
- Zarco-Tejada, P. J., Guillén-Climent, M. L., Hernández-Clemente, R., Catalina, A., González, M. R., & Martín, P. (2013). Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and forest meteorology*, 171, 281-294.

## 1.9. Objetivos y estructura de la tesis

---

Teniendo en cuenta lo comentado con anterioridad, el objetivo de esta Tesis Doctoral ha sido analizar la viabilidad de los productos cartográficos de alta resolución obtenidos mediante sensores livianos a bordo de plataformas aéreas no tripuladas, a través de varios estándares cartográficos y considerando distintas combinaciones de parámetros y especificaciones en diferentes campos de la ingeniería, como la civil y la agronómica. Este objetivo general se ha desarrollado a través de los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar la evolución y tipología de las diferentes plataformas no tripuladas y los sensores instalados en ellas para la obtención de cartografía de precisión mediante métodos fotogramétricos, así como analizar la viabilidad de las plataformas de tipo multi-rotor y sensores a bordo en distintos campos de la ingeniería.
2. Evaluar la calidad de las ortofotografías generadas a partir de la información tomada por sensores a bordo de las plataformas aéreas no tripuladas de tipo multi-rotor.
3. Definir el conjunto de requisitos o parámetros óptimos en la planificación de un vuelo como solapes, altura de vuelo, tamaño de píxel, autonomía, etc. para el levantamiento de información geográfica destinada a proyectos en diferentes campos de aplicación de la ingeniería.

Esta Tesis Doctoral se ha estructurado en seis capítulos. El **capítulo 1**, capítulo actual, recoge la información referente a la evolución que se ha llevado a cabo en las plataformas aéreas no tripuladas, la legislación a la que están sometidas, así como una revisión de los sensores que pueden ser integrados en dichas plataformas. Además de ello, se analiza el proceso fotogramétrico a seguir para la obtención de ortofotografías y modelos digitales, terminando con un análisis de viabilidad de estas plataformas en diferentes campos de la ingeniería y una revisión de los diferentes test que evalúan la calidad de los productos generados. En el **capítulo 2**, se evalúa la calidad posicional de ortofotografías obtenidas con una plataforma aérea no tripulada a través de cinco test o estándares en un entorno urbano. En el **capítulo 3**, se analiza la configuración óptima de vuelo según diferentes parámetros como distintas alturas de vuelo, modos de vuelo y distribución de los puntos de apoyo para generar una ortofotografía multispectral para la gestión de las malas hierbas

en cultivos agrícolas. El **capítulo 4**, evalúa la calidad de las ortofotografías multiespectrales de alta resolución obtenidas, estudiando diferentes combinaciones de parámetros en la planificación del vuelo, analizando las posibilidades para las aplicaciones en agricultura de precisión. En el **capítulo 5**, se analizan los resultados conjuntos de los capítulos anteriores para extraer en el **capítulo 6** las conclusiones generales acerca de la viabilidad técnica de los productos cartográficos de alta resolución obtenidos por sensores embarcados en plataformas aéreas no tripuladas en diferentes campos de la ingeniería.





# **Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms**

---

Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Inmaculada Clavero Rumbao,  
Juan Alberto Barrera Berrocal and Alfonso García-Ferrer Porras

**Publicado en:**

Sensors 14 (12), 22394-22407, (2014)



## **Abstract**

---

In this study we explored the positional quality of orthophotos obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV). A multi-rotor UAV was used to obtain images using a vertically mounted digital camera. The flight was processed taking into account the photogrammetry workflow: perform the aerial triangulation, generate a digital surface model, orthorectify individual images and finally obtain a mosaic image or final orthophoto. The UAV orthophotos were assessed with various spatial quality tests used by national mapping agencies (NMAs). Results showed that the orthophotos satisfactorily passed the spatial quality tests and are therefore a useful tool for NMAs in their production flowchart.

## **Resumen**

---

En este estudio se analizó la calidad posicional de las ortofotos obtenidas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Se utilizó un UAV multirrotor para obtener imágenes utilizando una cámara digital montada verticalmente. El vuelo se procesó teniendo en cuenta el flujo de trabajo de la fotogrametría: realice la triangulación aérea, genere un modelo de superficie digital, ortorectifique las imágenes individuales y finalmente obtenga una imagen de mosaico u ortofoto final. Las ortofotos del UAV se evaluaron con varias pruebas de calidad espacial utilizadas por las agencias de mapeo nacionales (NMA). Los resultados mostraron que las ortofotos pasaron satisfactoriamente las pruebas de calidad espacial y, por lo tanto, son una herramienta útil para las AMN en su diagrama de flujo de producción.

## **2.1. Introduction**

---

The widespread and growing use of geographic data has led to a high demand for this information, which is reflected in every aspect of our daily life. Technological progress has contributed to “democratize” the cartographic communication processes. Users demand more and more information and governments require good quality data. In the United States, the Federal Geographic Data Committee (FGDC, 2006) reported that 80 to 90% of government information has a geospatial component. To be useful, geographic information requires accuracy in all its components (*i.e.*, spatial, temporal, topological and thematic). In this context, images acquired by unmanned aerial vehicle (UAV) platforms are very useful because of their high spatial and temporal resolution. This makes them interesting for national mapping agencies (NMAs) in their flowchart of geographic data production. Such UAV products are considered useful as long as they meet the technical requirements of NMAs.

One of the most important quality features of cartographic products is positional accuracy, which is the key for interoperability between geodatabases (Church et al., 1998) and is evaluated by NMAs (Jakobsson and Vauglin 2002). Given that positional quality is essential in cartographic production, all NMAs use statistical methods to control it (Ariza et al., 2008). Producers or users can assess the spatial quality of cartographic products using several tests and standards such as the NMAS, STANAG or NSSDA (FGDC, 2013, United States Bureau of the Budget, 1947; Standardization Agreements 2215, 2002). The spatial accuracy of UAV orthophotos is usually reported using the root mean square error (RMSE) (Hashim et al., 2013, Niethammer et al., 2012; Tahar and Ahmad, 2012;). However, it is also interesting to assess the quality of such orthophotos according to standard tests used by NMAs. Cramer *et al.* (2013) provided a state of the art overview on the use of UAV by some European NMAs. They summarize that NMAs are following the most recent developments and are working on a possible integration of UAV in their production lines.

The scenario where geographic data are used has changed in the last decade. Users have easier access to geospatial data and producers have a wide range of platforms and sensors to obtain data with. These changes represent progress as long as users and producers make a good use of geographic information. As regards the quality of data, the ISO 9000 standard defines quality as “the totality of characteristics of an entity that bear on its ability to satisfy stated and implied need”. Juran et al. (1974) defined quality as “fitness for use”. Quality can be understood as the closeness of the agreement between data characteristics and explicit or implicit needs of a user for a given application (Delillers et al., 2005). Therefore, a cartographic product may be useful or not depending of the use that is made of it. It is important to assess the spatial, spectral, radiometric and temporal resolution of the product. Because of this, it is important to know the objectives of a project to decide which platforms, tools and sensors to use. Thus, in cartography obtained with UAVs, as in that obtained with other methodologies or platforms, it is important to assess the quality of all its components, including spatial resolution.

Geographic data can be obtained through different means, ranging from airborne to field devices. Aerial means to obtain data include a broad range of sensors that can be used in three main types of platforms: satellite, manned aerial or UAV platforms. Depending on the intended use of data provided by onboard sensors, such platforms may or may not be adequate because of their different resolutions. Satellite-based products have a limited application to some projects because they have low spatial resolution (Seelan et al., 2003). Conversely, very high spatial resolution images obtained by metric cameras on board aircraft tend to have low spectral resolution. In addition, both aerial and satellite platforms share the problem of having limited temporal resolution. Many applications such as precision farming, fire monitoring or civil engineering require timely availability of data and sometimes even real-time data. In these scenarios, conventional satellite and manned aerial platforms are not adequate because of their low temporal resolution under normal conditions. UAVs provide an alternative to such platforms. NMAs can use UAVs as a tool to update geodatabases, improving the temporal resolution of their products.

The methods available to obtain data or to produce geomatic products are progressing very fast and there is a great need for updated cartographic products because such products rapidly become obsolete (Aguilar et al., 2007). This has led to a great interest in using UAVs not only for military purposes (Bento, 2008), but also for civil applications (Dalamagkidis and Valavanis, 2008). UAV platforms can also be used in scientific, public safety and commercial tasks such as data and image acquisition of disaster areas (Chou et al., 2010), map building (Roca et al., 2012), search and rescue operations (Doherty and Rudol, 2007), traffic surveillance (Chen et al., 2007), archaeology (Chiabrande et al., 2011; Mozas-Calveche et al., 2012:) and increasingly in forestry and agriculture (Grenzdörffer and Teichert, 2008).

Recent developments in modern navigation have led to the availability of reliable UAV platforms for photogrammetric surveys. Such platforms are not only used for surveillance or to obtain individual images but also to produce geomatic products such as digital surface models or orthophotos (Jaakkola et al., 2010, Lucieer et al., 2014).

The benefits of using UAV platforms over traditional aircraft systems are related to mobilization costs, flexibility, number of operational flying days and very high spatial resolution data (Haarbrink and Eisenbeiss, 2008). Such platforms can also be used in high-risk situations without endangering human lives, in inaccessible areas, at low altitudes and with flight profiles close to objects, where manned systems cannot be flown (Eisenbeib and Zurich, 2009). The advantages of territorial information obtained with UAVs are its lower cost compared to that obtained with conventional flights and the fact that high temporal and spatial resolution can be obtained when needed [Niethammer et al., 2012].

Moreover, advances in processing of data and measurement collected in UAV flights have been the key in the development of UAV services. These advances include calibration and aerial triangulation to produce digital models and orthophotos. Photogrammetric processing of UAV-based images has been described in several research projects (Niethammer et al., 2011; Perez et al., 2013). Regarding calibration, three options are possible (Colomina and Molina, 2014). The first is to calibrate before the

bundle adjustment, this option is used in (Remondino et al., 2011). The second option is to apply self-calibration described in (Cramer, 2013). The combination of both would be the third option reported in (Cramer, 2013) and suggested in (Colomina et al., 2007). Referring to aerial triangulation, proven and traditional software has shown difficulties to process UAV blocks (Quin et al., 2013). New softwares have been developed in consideration of characteristics of UAV blocks. Algorithms used in computer vision for general purposes like SfM (Agarwa et al., 2009), SIFT (Lowe, 2004) and its variations like LDHahh (Strecha et al., 2012) are used by photogrammetric UAV suites. In relation to surface reconstruction, Harwin and Lucieer (Harwin et al., 2012) presents a compilation about techniques and their results for UAV point cloud generation.

The overall objective of the present research was to evaluate spatial accuracy in an orthophoto obtained by a multi-rotor UAV taking into account various standard tests used by NMAs. This study is organized as follows: the materials and methods are described in Section 2.2, the results and discussion are addressed in Section 2.3 and the conclusions are presented in Section 2.4.

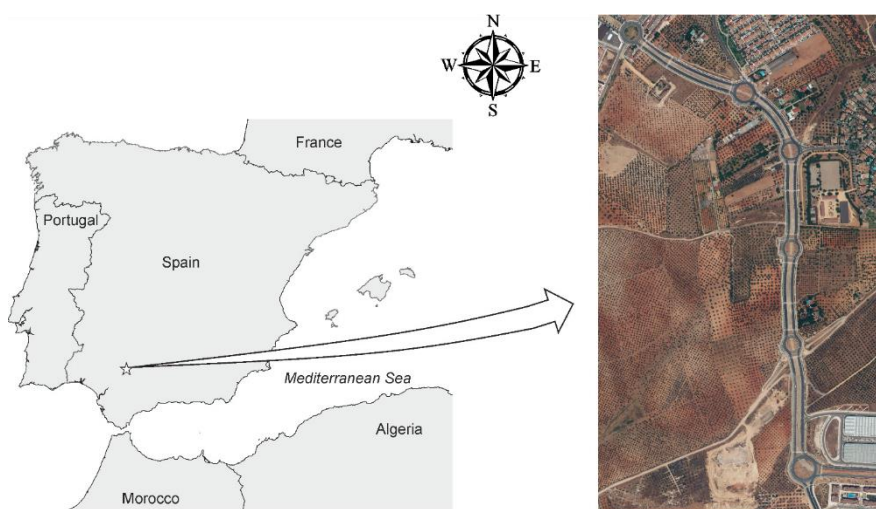


## 2.2. Methodology

---

### 2.2.1. Study Site Description and Airborne Campaigns

The study was performed in Mairena del Aljarafe, in Seville province, southern Spain (37°21'N, 6°04'W). The area comprised a road with a soft slope and a length of 1.6 km between two urban areas. It included many planimetric details of interest to assess the spatial accuracy of the UAV orthophoto (Figure 2.1).



**Figure 2.1 Overview of the study site.**

The unmanned aerial vehicle used for mapping was a MD4-1000 multi-rotor drone (Microdrones GmbH, Siegen, Germany). This UAV is a quadcopter with an entirely carbon design. It has a flying time of about 30 min using a 250 g sensor and an operation range of 500 m with radio control. The system has a maximum payload of 1.2 kg. It uses 4 × 250 W gearless brushless motors and reaches a cruising speed of 15.0 m/s. It can operate from a few meters to a ceiling altitude of 1000 m. The UAV was equipped with a Sony NEX-7 RGB sensor. This sensor provides an image of 23.5 × 15.6 mm, a focal length of 16 mm and an image size of 6000 × 4000 pixels. Its weight is 353 g including the camera body, card and battery.

## *Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms*

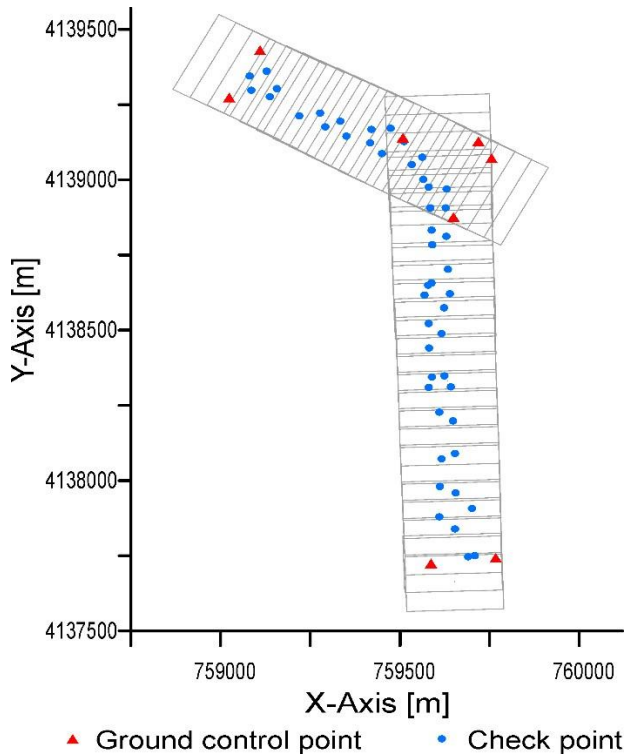
The UAV was flown at an altitude of 200 m above ground level. Ground sample distance (GSD) was 5 cm, taking into account the characteristics of the sensor. The flight had a single strip configuration with two flight lines and an along-track overlap of 70%, providing 43 images. The flight was conducted in May 2013; it had a duration of 25 min and 54 s and a total length of 4.9 km.

### *GPS Campaign*

The GPS campaign had two different objectives: (1) measure ground control points (GCPs) to use in the aerial triangulation phase; and (2) measure check points to assess the spatial accuracy of the resulting orthophoto. Data collection and observation were planned according to the manual of the U.S. Army Corps of Engineers (US Army Corps of Engineers, 2011). The uncertainty of the check point coordinates had to be at least three times better than that of the target validation results [6]. To reach the maximum accuracy in the positioning we used two receivers: a reference station of the GNSS RAP network of the Institute of Statistics and Cartography of Andalusia, Spain, and a Leica GS15 GNSS rover receiver. For a final orthophoto with a scale of 1:500, the circular error is 0.2 m. Taking into account a Gauss distribution with a 95% probability, the root mean square error is 0.041 m. Since the source of higher accuracy (i.e., check points) must be three times more accurate than the product, the mean square error must be 0.015 m. This proves that check point measures taken with this GNSS equipment are adequate.

We used rapid static positioning to obtain the GCPs for use in aerial triangulation. Baseline length was about 15 km. For each point, the observation time was 15 min, with an update rate of one-second intervals. We measured a total of eight GCPs, located on the corners of each strip (Figure 2). We used fifty check points to assess spatial accuracy, measured with the Stop & Go technique for relative positioning with GPS, applying the Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). The check points had a random and well-spaced spatial distribution (Figure 2.2). Twenty percent of the points were located in each quadrant of the working area, and the distance between points was at least 10% of the diagonal distance across the rectangle that enclosed the working area. All the check

points were well-defined points in order to clearly identify them over the orthophoto. Check points were used in an external direct quality evaluation using different tests described below, in Section 2.2.3.



**Figure 2.2** Distribution of ground control points and check points.

### **2.2.2. Photogrammetric Processing**

Processing was divided into three stages. First, we performed the aerial triangulation. Next, we obtained a digital surface model (DSM). Both results made it possible to obtain individual orthorectified images and finally a mosaic image. The aerial triangulation and mosaic image were achieved using EnsoMOSAIC software (Mosaic Mill Ltd., Vantaa, Finland); the DSM was created using Rapid Terrain software (PIEnearing Ltd., Helsinki, Finland).

The sensor calibration was performed using RapidCal software (Mosaic Mill Ltd.) before the flight, taking images of a calibration panel. Next, we adjusted the internal parameters of the sensor (*i.e.*, focal length, principal point and distortion coefficients).

In a previous stage, pyramid images were generated to optimize the image display and calculations. Currently at present, most UAS softwares apply fully automated procedures. However, sometimes it is necessary to measure points manually to improve the results in local areas of the photogrammetric blocks. Taking these circumstances into account we introduced some manual processing with the understanding that they could generate worse results. The images were manually linked to each other to determine the initial orientation of the images in relation to one another. This was achieved by identifying three visible objects in groups of two images, trying to define a triangle as open as possible. After that, we performed automatic aerial triangulation. Automatic tie points were located and used to perform a block adjustment. Three different strategies (*i.e.*, initial, intermediate and final) were used to search for tie points depending on the pyramid level image processed. In the initial strategy, we took into account in-flight collected GPS observations. In the intermediate strategy, we also used in-flight collected orientations. In the last strategy, we transferred the results obtained in the previous stage to the lowest level in the pyramid of images, that is, to the image with the highest spatial resolution.

After that, a DSM was generated using aerial triangulation data calculated in an earlier step. Every single image was orthorectified based on external orientations and the DSM. Finally, individual orthorectified images were mosaicked to obtain the UAV orthophoto of the area of interest. The GSD of the orthophoto was 0.05 m, the same as the GSD of the flight. We did not resample the orthophoto to a higher GSD because our goal was to determine the best scale at which the product can be used.

### **2.2.3. Spatial Accuracy Assessment**

In this section we describe the various positional accuracy assessment methodologies (PAAMs) we applied to assess the orthophoto generated

using the UAV platform. As a general rule, all the PAAMs were based on the assumption of errors with a normal distribution. They all consisted of statistical and testing methods to estimate the positional accuracy of points in digital geospatial data (*i.e.*, an orthophoto) using georeferenced check points with higher spatial accuracy referred to a coordinate reference system. Given that each PAAM assessed positional quality with different means, we used several PAAMs to analyze whether results were similar or not. The PAAMs used were the NMAS, EMAS, ASLSM, NSSDA and STANAG 2215.

From 1941 to the mid-1990s, most public and private sector cartographic organizations accepted the test National Map Accuracy Standards (NMAS) as an industry standard for large- and small-scale photogrammetric mapping. This test was developed in 1941 by the U.S. Bureau of the Budget (United States Bureau of the Budget, 1947). It establishes a percentage of points that must not exceed a certain error. Only products that meet such conditions pass the test. In this study it was decided that a maximum of 10% of total check points could have an error greater than 0.850 m.

The second test we applied was the Engineering Map Accuracy Standard (EMAS), developed by the American Society of Civil Engineers (American Society of Civil Engineers, 1983). This test is conducted in two stages. In the first stage, a t-Student test is used to assess the presence of bias.

To pass the test, each individual coordinate component must meet  $|t_x| \leq t_{n-1,\alpha}$  and  $|t_y| \leq t_{n-1,\alpha}$ , where  $t_{n-1,\alpha}$  is the t-Student value of for  $n-1$  degrees of freedom and a confidence level of  $\alpha$ .  $t_x$  and  $t_y$  are equal to the statistic  $t = \bar{e} \cdot \sqrt{n} / S$ ;  $\bar{e}$  is the mean error for each coordinate component,  $n$  is the number of points used in the test and  $S$  is the standard deviation. In the second step of the EMAS, the Chi-square test is used to determine whether random errors are adequate. It has to be verified that  $\chi_x^2 \leq \chi_{n-1,\alpha}^2$  and  $\chi_y^2 \leq \chi_{n-1,\alpha}^2$ , where  $\chi_{n-1,\alpha}^2$  is the value of Chi-square distribution for  $n-1$  freedom degrees and a confidence level of  $\alpha$ .  $\chi_x^2$  and  $\chi_y^2$  are equal to the statistic  $\chi^2 = S^2 \cdot (n-1) / a^2$ ;  $S$  is the standard deviation,  $n$  is the number of points used and  $a$  is the

maximum expected variance. This evaluation must be passed by both coordinate components simultaneously. Finally, the product is accepted if the results of both tests are satisfactory, so this methodology is more restrictive than the previous test.

The third methodology we used was the Accuracy Standards for Large-Scale Maps (ASLSM), developed by the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (1990). This methodology uses the root mean square error (RMSE) for each coordinate to check the product. Depending of the spatial accuracy of the product, the ASLSM defines three classes or types of products. The class of a product is assigned taking into account how the product has been compiled; the highest spatial accuracy class corresponds to C1, and C2 and C3 are two and three times worse, respectively. The standard defines a RMSE limit for each class depending of the scale. For a 1:500 scale, the RMSE limit is 0.125 m for C1, 0.250 m for C2 and 0.375 m for C3.

The fourth methodology was the National Standard for Spatial Data Accuracy (NSDDA), developed by the Federal Geographic Data Committee [6]. Instead of defining a threshold accuracy value, the NSDDA is a data usability standard in which agencies are encouraged to establish thresholds for their products and users have to determine the acceptable accuracy for their applications. This standard is mandatory for NMAs that produce maps in the United States. The RMSE is calculated for each component coordinate. If the RMSE for coordinate X is equal to the RMSE for coordinate Y, then the value of the NSDDA is calculated as  $NSDDA = 2.4477 \times RMSE_X$ . By contrast, if the RMSE is different for each component coordinate and  $0.6 < (RMSE_X + RMSE_Y) < 1$ , then  $NSDDA = 2.4477 \times 0.5 \times (RMSE_X + RMSE_Y)$ .

Finally, the North Atlantic Treaty Organization (NATO) developed Standardization Agreement 2215 (2002), also known as STANAG. STANAG defines different accuracy ratings for absolute geometric accuracy. Each rate is identified by a letter from A to E, and A is considered the best accuracy rate. For each rate, it defines the maximum differences between any two well-defined points in map units. For a given scale it is possible to calculate the maximum measurement error. The test is conducted by

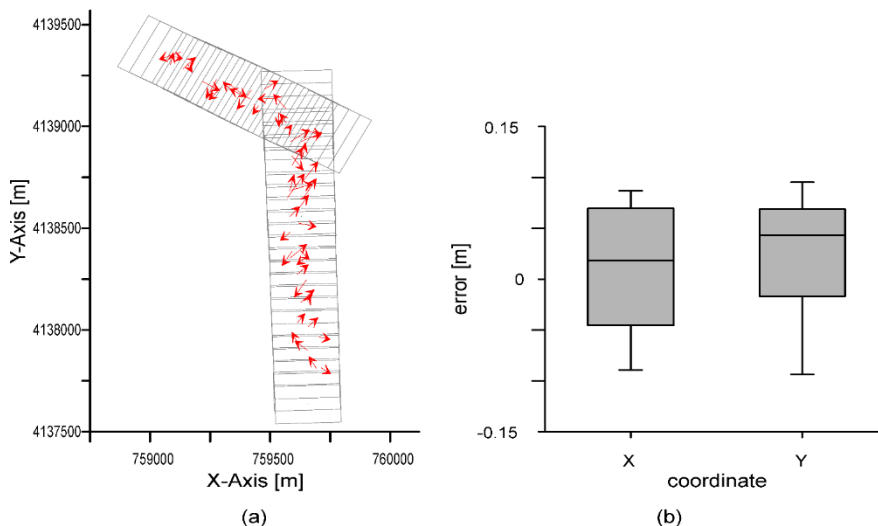
calculating the circular map accuracy standard (CMAS) taking into account the circular standard deviation ( $\sigma_c$ ) as  $CMAC = 2.146\sigma_c$ . The CMAS is compared to the maximum measurement error for a given rate and scale and must be lower than such error. In this case, the product is considered to be valid for a given scale and accuracy rate.

We took into account the different scales used in the tests describe above. Each scale was associated with a specific spatial requirement. Our intention was to determine the highest scale at which we could use our UAV orthophoto.

### **2.3. Results and Discussion**

---

The results of the five methods analyzed are presented in this section. The comparison between the coordinates of points extracted from the UAV orthophoto and their counterparts obtained with the GNSS receiver (i.e., check points) showed a mean error of 0.012 and 0.022 m and a RMSE of 0.058 and 0.056 m for coordinates X and Y, respectively. Therefore, both coordinate components had errors in the same interval. Figure 2.3.a shows the distribution of vector errors for each point. A priori, the spatial distribution of errors showed a random behavior, with no trends in the direction or orientation of the vectors. The magnitude of errors was also similar. Figure 2.3.b shows a box-plot graph of the errors in each coordinate. Maximum and minimum errors in the X and Y axes were similar and did not exceed 0.10 m. This value amounts to twice the GSD of the UAV flight. In a previous stage, we noted that the orthophoto did not have outliers and all the errors passed the interquartile range rule, so all the measurements were used in the various tests we applied.



**Figure 2.3 Comparison check points from GPS and UAV orthophoto: (a) distribution vector error; (b) box-plot graph of errors in coordinates X and Y.**

Table 2.1 summarizes the highest valid scale at which the UAV orthophoto can be used according to each test applied. It should be noted that there were a broad range of scales depending on the test used. Results of the NMAS test were optimistic. For a 1:250 scale, the percentage of points whose error was greater than 0.213 m (0.085 cm at that scale) was 0%. Taking into account that the human limit of visual perception is 0.2 mm, for a 1:250 scale such limit would be 5 cm, the same value as the GSD of the flight. This situation can be considered anomalous: in the cartographic process each stage contributes to increasing the error so it is not possible to produce an orthophoto where the GSD of the flight is the same as the GSD of the final product. Moreover, the manual measurement uncertainty of a coordinate point is at least the same as the GSD. Therefore, this test manifests a tolerant behavior because the defined tolerance is quite high, and the consequence is that producer error is almost zero.

The second test analyzed was the EMAS. In the first stage (*i.e.*, a systematic test), the value of t-Student's test considering a confidence interval of 95% and 49 degrees of freedom was 2.009. Coordinates X and Y passed this test with a value of 1.479 and 1.845 respectively. Therefore, there were no systematic errors in the orthophoto. In the second stage, the reference value for the Chi-square test considering a confidence



interval of 95% and 49 degrees of freedom was 66.338. For a 1:1000 scale, the maximum expected variance ( $a$ ) was 0.082 m. Therefore, the Chi-square value for the X and Y coordinates was 24.9 and 23.1, respectively. The 1:1000 scale was the highest that met the Chi-square test. When we analyzed a higher scale such as 1:500, the test did not pass the Chi-square test for coordinates X and Y. Results showed that this test was more restrictive than the NMAS because it required passing different tests at the same time for the X and Y components.

**Table 2.1 Summary of results for each spatial quality test.**

Test	Result Quality Test
NMAS	1:250
EMAS	1:1000
ASLSM	1:250
NSSDA	0.144 m
STANAG	1:500 RATE A

Taking into account the ASLSM test and considering a 1:500 scale and a Class 1 orthophoto, the standard establishes a value of 0.125 m as a planimetric coordinate accuracy requirement. The standard deviation for each coordinate component, shown at the beginning of this section, was lower than this limit. Therefore, the orthophoto was suitable for use at a 1:500 scale considering this standard.

The NSSDA test showed a result of 0.144 m. For a 1:500 scale, this value can be considered inadequate because this result is higher than the maximum error expected for this scale. It is more advisable to consider a 1:1000 scale to use the orthophoto. However, the result of the test should be displayed in the metadata of the product so that end users can decide how to use the data.

Finally, we applied the STANAG test. The circular map accuracy standard for 49 degrees of freedom was 0.134 m. Considering a measurement error of 0.5 mm for rate A and a 1:500 scale, the limit was 0.25 m, so the product reached rate A for this scale.

Summarizing the results of each test (Table 2.1), the tests covered a broad range of scales, from 1:250 to 1:1000. For a given scale it is possible to calculate the maximum error if we consider the visual perception limit of humans to be 0.2 m. Under normal conditions, the GSD of the orthophoto is usually half of this limit. For a 1:250 scale, such limit is 0.050 m. The GSD of the orthophoto for this scale is 0.025 m. This value was lower than the GSD of the orthophoto so the result of the NMAS test was ruled out. Taking into account 1:500 and 1:1000 scales, the perception limits were 0.1 m and 0.2 m for each scale, respectively. Adequate GSD values for the orthophoto taking into account the limits of 1:500 and 1:1000 scales were 0.05 m and 0.10 m, respectively. In general, the GSD of the flight was lower than the GSD of the final orthophoto. Therefore, it would not be adequate to consider a 1:500 scale as valid because it is necessary to have a margin to take the errors of the process into account. In this case, considering a 1:500 scale, the GSD of the flight was equal to the GSD of the orthophoto, which did not meet the requirements. Therefore, the UAV orthophoto would be adequate to use at a 1:1000 scale.

All the tests used are focused on the spatial resolution of the final product. We applied external direct quality evaluation to check it. These mapping standards do not cover other aspects related with spatial quality. A sample of ground control points probably is not enough because the product can show local errors not detected with them. To assess an orthophoto it is necessary to know the quality of the flight, the digital model surface and the mosaicking. Assessing all the stages in flowchart production we discover the origin of possible errors in the final product. The next paragraphs describe some check controls related with spatial resolution that are not considered in general mapping tests.

Referring to the flight, this check can be divided in geometric and radiometric controls. From a geometric point of view, it is necessary to evaluate if there are overlapped images on the whole area to guarantee stereoscopic vision. Moreover, a critical aspect is that the GSD of the flight planning agrees with the GSD of the flight. If GSD of the flight is higher, it will be possible to produce an orthophoto but not with the expected GSD. This control lets us know the accuracy of the navigation system of the UAV used. Taking into account the radiometric aspect, it is necessary to

evaluate if the images are unfocused or distorted. In addition, depending on the application, it could be necessary to analyze image histograms, saturation, etc.

Taking into account the high density of points of DSM it can be possible to produce a true-orthophoto. This process requires manual editing to define breaklines, for example like in buildings. This process is necessary because orthophotos would show undefined borders in elevated objects, distortion in objects, etc. In this case the quality of DSM is critical to make a visual inspection to detect errors. In an urban scenario, it is necessary to consider it on the flowchart, not being critical in a rural scenario. Another solution could be to use a Digital Elevation Model, filtering the cloud point of DSM. In this case we would produce a classic orthophoto. In the study area, errors cause by problems with DSM where not important because of the type of study area. Problems with seamlines are possible to detect in mosaicking with visual inspection. Therefore, problems with the geometric and radiometric continuity are also located.

In this context, it is evident a sample of points is not enough to asses spatial quality. Standard mapping tests are focused only in coordinates, but it is necessary to check and report other aspects that also affect spatial quality of the product.

According to these results, NMAs can use UAVs in their flowchart of cartographic production, especially in urban maps (scales ranging from 1:500 to 1:2000) rather than in territorial maps (scales of 1:5000 and lower). This is an encouraging result because in the process of updating geographic information in urban maps, working areas can normally be covered by a UAV flight, considering the duration of batteries. In territorial maps, however, areas are larger and quite difficult to cover with multi-rotor UAV flights. Good temporal resolution is required in urban scenarios where the territory is highly dynamic because of human activity. UAVs can be a good alternative for updating geodatabases because of their facility of operation, low cost compared to manned flights and availability.

## **2.4. Conclusions**

---

In this study we used five methods to assess the positional accuracy of an orthophoto obtained from images taken from a multi-rotor UAV. The high resolution and accuracy of the orthophoto required a careful planning of image acquisition. It was necessary to take into account the GSD of the flight and altitude above ground level and to measure ground control points to use in the aerial triangulation.

The tests used by NMAs to assess geomatic products that we applied in this study showed a broad range of valid scales for the UAV orthophoto, ranging from 1:250 to 1:1000, considering an orthophoto GSD of 0.05 m. Taking into account the human limit of visual perception and the GSD of these images, the most appropriate scale to generate the orthophoto was 1:1000. This scale is linked to an orthophoto GSD of 0.10 m. This is more than sufficient to support the error transmission in the flowchart of orthophoto production considering a flight GSD of 0.05 m. Other scales such as 1:500 were ruled out because the GSD of the flight was the same as the GSD of the orthophoto. A slight increase in the flight altitude would increase the GSD of the image, which would therefore be higher than that of the orthophoto, making it invalid for this scale.

The UAV orthophoto obtained positive results in the tests used by NMAs. This proves that UAV platforms can be used as an alternative by these NMAs particularly to update urban maps because of the high temporal resolution required by users and the scale of the product.

## **2.5. References**

---

- Ariza Lopez, F.J.; Atkinson Gordo, A.D.; Rodriguez Avi, J. (2008). Acceptance curves for the positional control of geographic databases. *J. Surv. Eng.*, 134, 26–32.
- Church, R.; Curtin, K.; Fohl, P.; Funk, C.; Goodchild, M.; Kyriakidis, P.; Noronha, V. (1998). Positional Distortion in Geographic Data Sets as a Barrier to Interoperation. In *Proceedings of ACSM Annual Conference, Baltimore, MD, USA*,. 137–142.
- Agarwal, S.; Snavely, N.; Simon, I.; Seitz, S.M.; Szeliski, R. (2009). Building rome in a day. In *Proceedings of 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, 29 September–2 October 2009*; pp. 72–79.
- Aguilar, F.J.; Carvajal, F.; Aguilar, M.A.; Agüera, F. (2007). Developing digital cartography in rural planning applications. *Comput. Electron. Agric.*, 55, 89–106.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (1990). Accuracy standards for large scale maps. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 56, 1068–1070.
- American Society of Civil Engineers (1983). *Map Uses, Scales and Accuracies for Engineering and Associated Purposes*; ASCE Committee on Cartographic Surveying, Surveying and Mapping Division: New York, NY, USA,.
- Bento, M. (2008). Unmanned aerial vehicles: An overview. *Inside GNSS*, 54–61.
- Chen, Y.-M.; Dong, L.; Oh, J.-S. (2007). Real-time video relay for uav traffic surveillance systems through available communication networks. In *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007), Kowloon, Hong Kong*, pp. 2608–2612.

*Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms*

- Chiabrando, F.; Nex, F.; Piatti, D.; Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: Two tests in the piedmont region (italy). *J. Archaeol. Sci.*, 38, 697–710.
- Chou, T.-Y.; Yeh, M.-L.; Chen, Y.; Chen, Y.-H. (2010). Disaster monitoring and management by the unmanned aerial vehicle technology. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38,
- Colomina, I.; Aigner, E.; Agea, A.; Pereira, M.; Vitoria, T.; Jarauta, R.; Pascual, J.; Ventura, J.; Sastre, J.; Brechbühler, G. (2007). The UVISION project for helicopter-UAV photogrammetry and remote-sensing. In *Proceedings of the 7th Geomatic Week, Barcelona, Spain*, 20–23.
- Colomina, I.; Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 92, 79–97.
- Cramer, M. (2013). The UAV@LGL BW project—A NMCA case study. In *Proceedings of 54th Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany*, pp. 165–179.
- Cramer, M. (2013). Rpas im einsatz fr die datenerfassung beim lgl bwin. In *Proceedings of UAV-DACH Meeting, Rostock, Germany*.
- Cramer, M.; Bovet, S.; Gültlinger, M.; Honkavaara, E.; McGill, A.; Rijdsdijk, M.; Tabor, M.; Tournadre, V. (2013). On the use of RPAS in national mapping—The EUROSDR point of view. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XL-1/W2*, 93–99.
- Dalamagkidis, K.; Valavanis, K.P.; Piegl, L.A. (2008). Current status and future perspectives for unmanned aircraft system operations in the us. *J. Intell. Robot. Syst.*, 52, 313–329.
- Devillers, R.; Bédard, Y.; Jeansoulin, R. (2005). Multidimensional management of geospatial data quality information for its dynamic use within GIS. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 71, 205–215.
- Doherty, P.; Rudol, P. (2007). A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization. In *Ai 2007: Advances*

*Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms*

in *Artificial Intelligence*, Orgun, M., Thornton, J., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, Volume 4830, pp. 1–13.

- Eisenbeiß, H.; Zürich, E.T.H. (2009). *UAV Photogrammetry*; ETH: Zurich, Switzerland.
- Federal Geographic Data Committee (FGDC) (2013). *Revision of Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3. National Standard for Spatial Data Accuracy*; fgdc-std-007.3-1998. FGDC standard projects: <http://www.Fgdc.Gov/standards/projects/fgdc-standards-projects/accuracy/part3/nssda-revision-proposal>.
- Federal Geographic Data Committee (FGDC) (2006) *Annual Report*; FGDC: Reston, VA, USA.
- Grenzdörffer, G.; Engel, A.; Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost uavs in forestry and agriculture. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 31, 1207–1214.
- Haarbrink, R.B.; Eisenbeiss, H. Accurate DSM production from unmanned helicopter systems.
- Harwin, S.; Lucieer, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sens.* , 4, 1573–1599.
- Hashim, K.A.; Darwin, N.H.; Ahmad, A.; Samad, A.M. (2013). Assessment of low altitude aerial data for large scale urban environmental mapping. In *Proceedings of 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA)*, Kuala Lumpur, pp. 229–234.
- *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* (2008), 37, 1259–1264.
- Jaakkola, A.; Hyyppä, J.; Kukko, A.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Lehtomäki, M.; Lin, Y. (2010). A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its

feasibility for tree measurements. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 514–522.

- Jakobsson, A.; Vauglin, F. (2002). Report of a Questionnaire on Data Quality in National Mapping Agencies; CERCO Working Group on Quality, Comité Européen des Responsables de Cartographie Officielle: Marne-la-Vallée, France.
- Juran, J.M.; Gryna, F.M.J.; Bingham, R.S. (1974). *Quality Control Handbook*; McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Lowe, D.G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vis.*, 60, 91–110.
- Lucieer, A.; Turner, D.; King, D.H.; Robinson, S.A. (2014). Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to capture micro-topography of antarctic moss beds. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 27, 53–62.
- Mozas-Calvache, A.; Pérez-García, J.; Cardenal-Escarcena, F.; Mata-Castro, E.; Delgado-García, J. (2012). Method for photogrammetric surveying of archaeological sites with light aerial platforms. *J. Archaeol. Sci.*, 39, 521–530.
- Niethammer, U.; Rothmund, S.; Schwaderer, U.; Zeman, J.; Joswig, M. (2011). Open source image-processing tools for low-cost UAV-based landslide investigations. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38, 1–6.
- Niethammer, U.; James, M.R.; Rothmund, S.; Travelletti, J.; Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the super-sauze landslide: Evaluation and results. *Eng. Geol.*, 128, 2–11.
- Pérez, M.; Aguera, F.; Carvajal, F. (2013). Low cost surveying using an unmanned aerial vehicle. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 40, 311–315.
- Qin, R.; Grün, A.; Huang, X. (2013). UAV project—Building a reality-based 3D model. *Coordinates*, 9, 18–26.



*Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms*

- Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-current status and future perspectives. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38, 25–31.
- Roca, D.; Lagüela, S.; Díaz-Vilariño, L.; Armesto, J.; Arias, P. (2013). Low-cost aerial unit for outdoor inspection of building façades. *Autom. Constr.*, 36, 128–135.
- Seelan, S.K.; Laguette, S.; Casady, G.M.; Seielstad, G.A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sens. Environ.*, 88, 157–169.
- Standardization Agreements, S. Standardization Agreement 2215 (2002). Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data; North Atlantic Treaty Organization: Bruxelles, Belgium.
- Strecha, C.; Bronstein, A.M.; Bronstein, M.M.; Fua, P. Ldahash (2012). Improved matching with smaller descriptors. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 34, 66–78.
- Surveying (2011). EM 1110-1-1003, US Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA,.
- Tahar, K.N.; Ahmad, A. (2012). A simulation study on the capabilities of rotor wing unmanned aerial vehicle in aerial terrain mapping. *Int. J. Phys. Sci.*, 7, 1300–1306.
- United States Bureau of the Budget (1947). United States National Map Accuracy Standards; Bureau of the Budget: Washington, DC, USA.
- US Army Corps of Engineers. Engineering and Design: Navstar Global Positioning System

*Capítulo 2: Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from  
Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms*

# **Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management**

---

Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Jorge Torres Sánchez, Inmaculada Clavero Rumbao, Alfonso García-Ferrer Porras, Jose Manuel Peña, Irene Borra Serrano y Francisca López Granados

**Publicado en:**

Remote Sensing 7, no 10 12793-12814 (2015)



## **Abstract**

---

This study describes the technical specifications and configuration of a multirotor UAV to acquire remote images using a six-band multispectral sensor. For this, several flight missions were programmed as follows: three flight altitudes (60, 80 and 100 m), two flight modes (stop and cruise modes) and two ground control point settings (GCP) to analyze the influence of these parameters on spatial resolution and spectral discrimination of multispectral orthoimages obtained using Pix4Dmapper. In addition, the area to be covered and the duration of the flight according to any scheduled flight mission were also taken into account. The study analyzes the effect of the combination of all these parameters with the aim of analyzing the influence on spatial resolution and spectral discrimination of orthomosaics. Spectral discrimination has been evaluated with a specific agronomic purpose: using remote UAV images for the detection of bare soils and vegetation (crops and weeds) for weed management at the specific site of the station. The results showed that a balance between spatial resolution and spectral discrimination is needed to optimize mission planning and image processing in order to achieve all agronomic objectives. In this way, users do not have to sacrifice low-altitude flight to cover the entire area of interest completely.

## **Resumen**

---

Este estudio describe las especificaciones técnicas y la configuración de un UAV multirrotor para adquirir imágenes remotas utilizando un sensor multiespectral de seis bandas. Para ello, se programaron varias misiones de vuelo de la siguiente manera: tres altitudes de vuelo (60, 80 y 100 m), dos modos de vuelo (modos de parada y crucero) y dos ajustes de puntos de control en tierra (GCP) para analizar la influencia de estos parámetros en la resolución espacial y la discriminación espectral de las imágenes ortométricas multiespectrales obtenidas utilizando Pix4Dmapper. Además, también se tuvo en cuenta el área a cubrir y la duración del vuelo de acuerdo con cualquier misión de vuelo programada. El estudio analiza el efecto de la combinación de todos estos parámetros con el objetivo de analizar la influencia sobre la resolución espacial y la discriminación espectral de los ortomosaicos. La discriminación espectral se ha evaluado con un propósito agronómico específico: utilizar las imágenes remotas de los UAV para la detección de suelos desnudos y vegetación (cultivos y malezas) para el manejo de malas hierbas en el sitio específico de la estación. Los resultados mostraron que se necesita un equilibrio entre la resolución espacial y la discriminación espectral para optimizar la planificación de la misión y el procesamiento de imágenes a fin de alcanzar todos los objetivos agronómicos. De esta manera, los usuarios no tienen que sacrificar el vuelo a baja altitud para cubrir toda el área de interés por completo.

### **3.1. Introduction**

---

Precision agriculture (PA) can be defined as the art and science of using advanced technology to enhance crop production (Srbinosvsha et al., 2015). PA involves better management of farm inputs such as fertilizer, fuel, seed, irrigation, and pesticides, among others, by doing the right management practice at the right place and the right time (Mulla, 2013). PA based on a previous map of any of the variables of interest can be performed by using remote sensing (RS) technology. RS in agriculture is based on the measurement of electromagnetic radiation from soil or plants by sensors on-board satellites and aerial platforms. RS can be used in a wide range of applications and studies such as on crop nutrients (Ge et al., 2011), infestations of weeds (de Castro et al., 2013), soil properties (Abbas et al., 2013; López Granados et al., 2005), rangelands environments (Laliberte et al., 2011), among others. Early Site-Specific Weed Management (ESSWM) involves four steps: (i) weed monitoring, consisting of the detection of weeds, (ii) decision-making, (iii) precision field operation, and (iv) evaluation of the economic profitability, safety and environmental impact of the field operations for the next season (López Granados et al., 2011). To monitor and detect weeds, it is useful to produce prescription maps, obtained from analysis of remote images captured of the field crop. These images have usually been registered by sensors on board of two traditional platforms, satellite and manned aircraft. However, the evolution of PA demands very high spatial and temporal resolution, measuring even the characteristics of individual plants in some applications. These traditional platforms present problems related to temporal and spatial resolution, and the successful use of these platforms is dependent on weather conditions. Currently, UAV are an alternative to acquire remote images at the right moment and repeatedly, making possible the combination of high spatial, spectral and temporal resolutions (Rango et al., 2006, Zhang and Kovacs, 2012).

In most weed control strategies, it is necessary to monitor and detect the weeds at an early growth stage of the crop to avoid the strong competition between weeds and crop in the early phases. The spatial distribution of

weeds within crops consist of small patches, which suggests the use of very high spatial resolution imagery (López Granados et al., 2011). Recent studies on crop-weed discrimination using UAV are based on two steps: (i) to distinguish bare soil and vegetation (crop and weeds) and (ii) to define the crop line to then discriminate crop and weeds (Peña et al., 2013). The combination of flight parameters and types of sensors is critical to obtain an adequate spatial resolution and spectral discrimination on the geomatic products for application to weed detection. Spatial resolution, flight parameters and photogrammetric processing of remote images acquired by metric sensors are considered classic photogrammetry and have been well studied and documented (Markelin et al., 2010; Paparoditis et al., 2006). In addition, the influence of GPS applications in aerial-triangulation and the accuracy of GPS blocks for various cases of overlap and numbers of GCPs (Ackermann, 1991), accuracy assessment of digital elevation models (Muller et al., 2014) and other studies have contributed to the definition of a standardized processing framework. This facilitated the government development of technical specifications for orthophoto production to ensure the quality of spatial and spectral results (ECJRC, 2013). However, data acquisition by UAV platforms for research applications is still at an early stage (Pajares, 2015; Zhang et al., 2011). One of the consequences of this early stage of development is that the operational framework for working with UAV platforms is not defined in some aspects. For traditional platforms, parameters such as altitude Above Ground Level (AGL), mode of flight or number of GCPs, among others, determine the spatial and spectral quality of the orthomosaicked images produced. Moreover, these parameters are dependent on UAV architecture (e.g., rotor-wing, fixed-wing, kite) and the type of sensor used.

Altitude AGL defines the pixel size of registered images, area flown over and the flight duration. Therefore, it is necessary to know the pixel size required to achieve a specific objective (Torres-Sánchez et al., 2013). Hengl (2006) has established that, in general, at least four pixels are required to detect the smallest object in an image. Therefore, the selection of altitude AGL has to guarantee a sufficiently fine spatial resolution and spectral discrimination and to cover as much surface as possible to optimize the



UAV flight (Peña et al., 2015). Regarding the mode of flight using a multi-rotor UAV, it is possible to acquire images considering three modes: (1) manual, (2) stop, and (3) cruising mode (Eisenbeiss and Sauerbier, 2011). The first mode (manual) is used when no flight planning is available, while stop and cruising modes require planning. Both stop mode (Rodríguez-González et al., 2014) and cruising mode (Peña et al., 2015) have been used for multi-rotor UAV. However, flying in cruising mode has a substantial impact on the use of these types of UAV because cruising mode can reduce the flight time required by 75% (Eisenbeiss, 2008). Finally, referring to GCPs and considering traditional piloted platforms, the distribution and number of GCPs affect the spatial accuracy of orthorectified images (Wang et al., 2012). This influence has not been studied and standardized, and therefore, the number of GCPs covers a broad range, from just 4 GCPs (Vega et al., 2015) to 20 GCPs (Turner et al., 2012) or even 130 GCPs (Zhang et al., 2011).

Considering spectral discrimination, remote sensing imagery is usually based on the wavelength reflectance of particular leaves and canopies in the visible range of the spectrum (red, green, blue, RGB) and non-visible as near-infrared (NIR) and on the emission of far-infrared (thermal). Reflectance is measured using visible (Mesas-Carrascosa et al., 2014), multispectral (Primicerio et al., 2012), hyper-spectral (Hruska et al., 2012) and thermal sensors (Möller et al., 2007). Multispectral sensors capture narrow wavelength bands to support defining the spatial variability of conditions, for example, weed infestation, that affect crop production or determining the most effective management strategy. These sensors can have single or multiple objectives. Single objective sensors acquire data in three bands that cover the visible region (RGB). It is possible to adapt single objective sensors to operate over a portion of the visible region and infrared (e.g., red, blue, infrared: RBNIR, or red, green, infrared: RGNIR), but the single objective sensors are not able to capture information in both regions (RGB-NIR) at the same time. RGB sensors have been used to determine the spatial quality of orthomosaics (Gómez-Candón et al., 2014) or vegetation fraction mapping by calculating different visible spectral indices to discriminate vegetation in wheat fields early in the season (Torres-Sánchez et al., 2014). GB-NIR customized sensors can also

be used for crop monitoring by calculating a green normalized difference vegetation index to support site-specific agricultural decision making (Hunt et al., 2010). These single objective sensors are low in weight and compact in size, making them interesting for use in UAV and several agricultural approaches. However, the single sensor does not cover the full region of interest (RGB-NIR) at the same time, reducing the possibilities of its use. Currently, the sensor that covers this region of interest is a multispectral sensor equipped with multiple arrays of sensors. Each band corresponds to a specific sensor, and the specific sensors are higher quality sensors (Laliberte et al., 2011). A multiple array sensor can increase the number and type of vegetation indices to be calculated, being more polyvalent for use in PA. These types of sensors are heavier than a single objective sensor, impacting the UAV flight programming negatively. Huang et al. (2010) reported that the multispectral sensors have a slow imaging speed that limits their application. Furthermore, multi-objective sensors work with an individual sensor per band at the same time (normally, 4, 6 or 12), working with more than one sensor simultaneously. All these aspects highlight that it is necessary to define a framework to optimize multi-array spectral sensor flights.

To our knowledge, no detailed investigation has been conducted regarding the influence of UAV flight parameters such as altitude AGL, mode of flight and number and distribution of GCPs on the spatial resolution and spectral discrimination of multispectral orthomosaics using a multi-array sensor on-board a multi-rotor UAV. This study defines the best technical specifications for working with a multispectral sensor on-board a multi-rotor UAV to obtain the most accurate spatial and spectral orthophoto to be used in precision agriculture tasks.

## **3.2. Material and Methods**

---

### **3.2.1 UAV and sensor description**

A quadcopter, model MD4-1000 (Microdrones GmbH, Siegen, Germany), was used as UAV to perform all flights. It is a vertical take-off and landing aircraft. This platform is entirely carbon design and it is equipped with 4 × 250W gearless brushless motors powered by a 22.2 V battery. The maximum cruising speed is 12.0 m/s and maximum climb speed 7.5 m/s. MD4-1000 can fly by remote control or automatically. Flight radius considering remote control by radio is 500 meters. Remote control is used to start UAV's engines, manage take-off and landing, complete flight in manual mode and start autonomous navigation. The maximum payload mass is 1.2 kg, being a recommended payload mass equal to 0.8 kg. This system can operate from a few meters to a ceiling altitude of 1000 m. MD4-1000 UAV can carry any lightweight sensor mounted in its gimbal. Flying time is function of sensor weight and windy conditions. Considering sensor weight, the range is from 30 to 20 minutes for 250-g to 700-g respectively.

As payload we used a TetraCam mini-MCA6 (TetraCam Inc., Chatsworth, CA, USA) (Figure 3.1.a). It is a lightweight multispectral rolling shutter camera, 700-g, with six individual sensors, one for each band, arranged in a 2×3 array. Each sensor has a focal length equals to 9.6 mm and a 1.3-megapixel (1280 × 1024 pixels) CMOS sensor that stores images on a compact flash card. One of the sensors plays as master channel and the other five as “slaves”. Master channel is used as reference channel. It calculates its own exposure time, defining global settings used for slave sensors to ensure the simultaneity of images acquisition by all of the channels. The camera can store images with 8-bit or 10-bit radiometric resolution, the latter being used in the camera settings. The camera has user-configurable band-pass filters (Andover Corporation, Salem, NH, USA) with a 10-nm full width at half-maximum and centre wavelengths of 450 nm (blue region of the electromagnetic spectrum), 530 nm (green region), 670 and 700 nm (red region), 740 nm (red-edge region) and 780

nm (near-infrared region). These bandwidth filters were selected across the visible and NIR regions with regard to well known biophysical indices developed for vegetation monitoring as described in Kelecey and Lucieer (2012). During the flight the sensor acquires vertical images (Figure 3.1.b). The image triggering is activated by an MD4-1000 autopilot considering flight settings. For each shoot, the UAV autopilot sends a signal to the sensor to register an image and simultaneously records the GPS location, navigation angles (yaw, roll and pitch) and timestamp on an SD-Card. This information will be used as the initial values in photogrammetric processing. Individual images were pre-processed by PixelWrench2 (Tetracam Pixelwrench 2, 2011). Pre-processing consisted of the correct vignette effect, alignment of raw images and generation of multi-band TIFs as explained in (Torres-Sánchez et al., 2013).



**Figure 3.1** Details of TetraCam mini-MCA6: (a) before takeoff and (b) during flight.

### **3.2.2 Study site and UAV flights**

The study was conducted in a wheat field located in Córdoba (southern Spain) approximately 1.12 ha (80 × 140 m) in size. The ground is flat, with a slope of less than 1%. The wheat crop was sown on November 22th, 2014, at 160 kg ha<sup>-1</sup> in rows 0.17 m apart, and emergence of the wheat plants started by 15 days after sowing. The field was naturally infested with the broadleaved weed *Sinapis arvensis* L. (mustard). Wheat crop plants were in the principal stage 2 (tillering), and weed plants were in the principal stage 1 (leaf development, four-six true leaves, codes 14-16) of

the BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie) extended scale (Meier, 2001). Different flight missions were planned, considering sensor and UAV specifications. Flight parameters and their formulas have been widely described, for example, (Kraus, 2007). One of the most important flight parameters is altitude AGL, and three different altitudes were considered: 60, 80 and 100 m. Each altitude AGL showed the following different Ground Sample Distance (GSD) values: 3-, 4- and 5-cm $\times$ pixel<sup>-1</sup>, respectively. All the flights were conducted with an 80% forward-lap and a 50% side-lap. Finally, two acquisition imagery modes were considered: stop mode and cruising mode. In stop mode, the UAV vehicle was programmed to fly to each predefined waypoint and to stop at this position. The UAV vehicle hovered over this position during a small interval of time or until positional accuracy was satisfying. In this mode, flight speed was 5 m $\times$ sec<sup>-1</sup> between waypoints. In cruising mode, images were taken when the UAV vehicle was flying and not stopped for image acquisition. Because both flight modes must have the same flight settings, we set up the flight speed and intervals between images to keep the forward-lap and side-lap equal to 80% and 50%, respectively. For an altitude AGL of 60 m, the flight speed was equal to 2 m $\times$ sec<sup>-1</sup>, while for 80 and 100 m, the flight speed was 3 m $\times$ sec<sup>-1</sup>. The photo interval for all altitudes AGL was 3 seconds.

Subsequently, each UAV flight was processed considering two different GCP settings (Figure 3.2.a): (i) four GCPs (4GCPs) and (ii) five GCPs (5GCPs). These GCPs were used in the aerial triangulation phase to locate the photogrammetric block into a coordinate system. Referring to the 4GCPs setting, a total of eight GCPs were located on the corners of the study area, two for each corner. The 5GCPs setting used the same points as the previous configuration and, in addition, two more GCPs in the centre of the area. Each GCP was measured with the Stop & Go technique as relative positioning by means of the NTRIP protocol (The Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM, for Networked Transfer via Internet Protocol) using two GNSS receivers: one of the receivers was a reference station from the GNSS RAP network from the Institute for Statistics and Cartography of Andalusia, Spain, and the other, Leica GS15 GNSS, was a rover receiver.

### **3.2.3 Photogrammetric processing**

Tetracam mini-MCA6 registers six individual images, one for each individual sensor. Therefore, an alignment process is needed to group individual images taken with each shutter. The alignment was made using Tetracam PixelWrench 2 (PW2) software (Tetracam Inc., Chatsworth, CA, USA). This solution uses a calibration file that contains information about the relative position (translation, rotation and scaling) between master channel and slave channels.

The photogrammetric processing was performed using Pix4Dmapper (Pix4D S.A., Lausanne, Switzerland). Pix4Dmapper is divided into 4 phases: 1) aerial triangulation, 2) Digital Surface Model (DSM) generation, 3) rectification of individual images, and, finally, 4) orthomosaick. All processes are automated except the measurement of GCPs. This automation is based on the use of fundamental principles of Photogrammetry combined with robust algorithms from computer vision (Lowe, 2004; Snavely et al., 2008). Aerial triangulation consists of determining the individual orientation of each stereomodel of a photogrammetric block. One of the most commonly used and most rigorous methods is the bundle adjustment, which permits the absolute orientation of an entire block of an unlimited number of images using a few GCPs (Aber et al., 2010). To perform the bundle adjustment, algorithms are based on 'structure from motion' (SfM) techniques. SfM techniques are tolerant of change in viewpoint and can identify and reject the errors when they occur (Fischer and Bolles, 1981; Lowe, 2004). The first stage of an SfM process is to extract features in individual images that can be matched to their corresponding features in other images from the UAV flight. These matched points are used to establish relative locations of the sensors during the flight and to simultaneously calculate the sensor parameters of each image. The whole process is calculated using an incremental approach in which bundle adjustment of an initial image pair is sequentially repeated, with more images incorporated at each iteration (Bemis et al., 2014). The aerial triangulation for each individual sensor processes simultaneously taking into account its own specific lens distortion. The result of this phase is the determination of position and

orientation for each individual sensor location. With these data, a reconstruction of the surface was produced by a dense point cloud using multi-view stereo matching (Furukawa and Pomce, 2010; Seitz et al., 2006). A DSM was generated using a grid interpolation of the dense point cloud from each individual sensor. Every single image was ortho-rectified using the external orientation and the DSM. Finally, individual ortho-rectified images were combined into a seamless 6-band multispectral orthomosaicked image to obtain the UAV orthophoto of the entire area of interest. Because each spectral band has been processed taking into account their own characteristics and the spatial relation with the others, the band to band alignment is reached.

Two types of orthomosaicked imagery were produced to assess their spatial resolution and spectral discrimination. Referring to spatial resolution, all the UAV flights were processed to generate orthomosaicked images with a unique GSD value equal to 5 cm. This GSD corresponds to the highest GSD value that was obtained in flight (100 m AGL). This degradation of spatial resolution was performed to obtain pixel resolutions of 5 cm in any of the orthomosaicked images independent of the flight altitude, aimed at the objective of studying the effects of UAV flight parameters on spatial resolution. Then, to also assess the quality of the spectral discrimination, the best setting, referring to flight mode and the number and distribution of GCPs was considered. In this context, three orthomosaicked images with a GSD equal to the GSD corresponding to each flight (i.e., GSD ranging from 3- to 5-  $\text{cm} \times \text{pixel}^{-1}$ ) were produced.

#### **3.2.4 Assessment of spatial resolution**

ISO 19157 (2013) defines the spatial accuracy as the accuracy of the position of features in relation to Earth. Spatial accuracy can be described as absolute or relative. Absolute accuracy corresponds to the closeness of reported coordinate values to values accepted as or being true. Relative accuracy is defined as the closeness of the relative spatial positions of features in a dataset to their respective relative spatial positions accepted as or being true. In addition, ISO considers gridded data such as orthomosaicked images. In these cases, gridded data position accuracy is

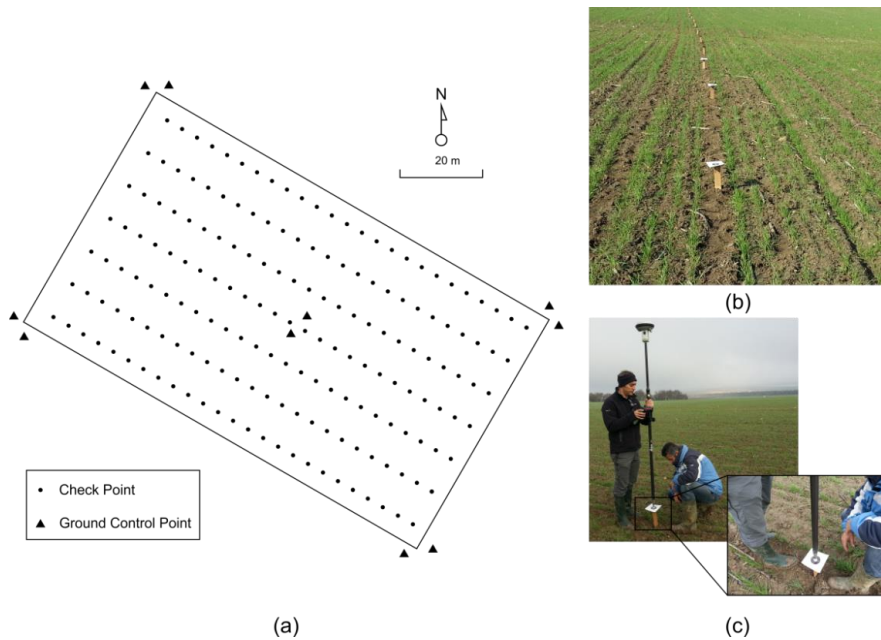
the closeness of the gridded data spatial position values to values accepted as or being true.

Previous to the UAV flights, because user risk is a function of sample size (Ariza et al., 2008), 150 check points were distributed in the area to assess the absolute and relative spatial accuracies. Check points were well-defined points corresponding to targets of 14 x 14 cm (Figure 3.2.b). The check points were placed in a grid distribution of 5 x 11 m (Figure 3.2.a). The coordinates of the check points were obtained using the same methodology described for GCPs (Figure 3.2.c). These coordinates were used as the ground reference values. Check points were digitized, considering each orthomosaicked image produced. These coordinates were obtained using Arcmap 10.1 software (Esri, Redlands, USA). Both sets of coordinates were used to determine the spatial accuracy.

Absolute positional accuracy was assessed considering Root Mean Square Error (RMSE). RMSE is used as an estimator of positional accuracy as developed by the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2014). RMSEs were calculated considering the total area and a security margin of 10% over the perimeter delimited by the GCP located at the corner. The latter configuration corresponds to flight planning for a manned aerial platform, where limit area is extended over the boundary as a security margin to guarantee spatial accuracy (USACE, 2002). This extension will reveal whether the number of GCPs also influences the location with respect to the area of interest flown over in the case of UAV.

As a reference to assess the relative positional accuracy, the methodology developed by the Department of Defense of the United States (1990) was followed, and all the possible check point pair combinations were determined. The absolute errors in the X and Y dimensions of each check point and, subsequently, the relative errors in X and Y for all the check point combinations were calculated. These errors were used to calculate both the relative standard deviations on each axis ( $\sigma_{x\_rel}$ ,  $\sigma_{y\_rel}$ ) and the relative horizontal standard deviation (RHSD).





**Figure 3.2** Details of assessment of spatial resolution: (a) Distribution of ground control check points, (b) sample of distribution over the study site and (c) measurement by GNSS receiver.

### **3.2.5 Assessment of spectral discrimination**

Two types of controls were applied on the orthomosaicked images: (i) multispectral band alignment and (ii) spectral discrimination. Tetracam mini MCA-6 takes the images of each spectral band using an independent sensor. From a photogrammetric point of view, each sensor is independent because each sensor has different internal and external parameters. This approach involves calculating six individual aerial triangulations and, consequently, the band alignment can show some small displacement between bands. The quality of alignment of each orthophoto was evaluated with the help of the spectralon panel placed in the centre of the study area (Figure 3.3). Spatial profiles were taken across the spectralon panel for each orthophoto produced. Each spatial profile represents the spectral values for each band. Data were obtained using the ENVI image processing software (Research System, Inc., Boulder, CO, USA).



**Figure 3.3** Details of experiment setup to assess spectral discrimination: Spectralon panel placed in the middle of the study area.

The spectral discrimination test was focused on the analysis of the potential effect of UAV flight parameters on the discrimination of different soil covers by incorporating a methodology to produce weed mapping based on UAV images. Two phases are required (López-Granados et al., 2011): 1) bare soil and vegetation discrimination and 2) crop and weed discrimination. The first phase produces an image with two classes: bare soil and vegetation (crop and weeds together). The second phase masks crop and weeds. To determine the influence of UAV flight parameters on weed mapping, spectral values of bare soil, crop and weeds were extracted. These spectral values were collected in 15 random samples for each cover from all the orthomosaicked images produced. Then, the NDVI was derived from these spectral values. The potential of NDVI for spectral discrimination was evaluated by applying the M-Statistic (Kaufman and Remer, 1994) (Equation 1), where  $\mu$  and  $\sigma$  are, respectively, the means and standard deviations of class 1 and 2. The M-statistic defines the degree of discrimination between two classes, evaluating the separation between their histograms. A value of M lower than 1 means that histograms overlap significantly, therefore offering poor discrimination. A value of M higher

than 1 means histograms are well separated, providing easier discrimination.

$$M = (\mu_{class1} - \mu_{class2}) / (\sigma_{class1} + \sigma_{class2}) \quad (1)$$

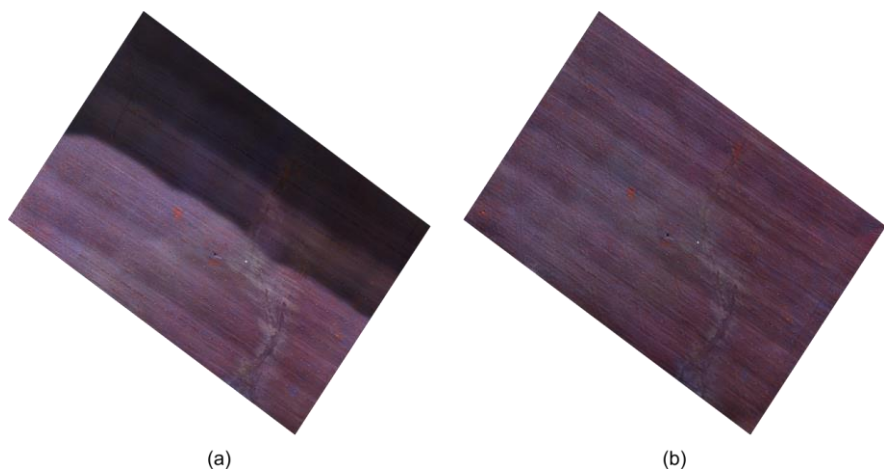
### **3.3. Results**

---

Table 3.1 summarizes the duration, route length and wind speed of each UAV flight considering altitude AGL and mode of flight. Table 3.1 shows how, as altitude AGL increases, duration of flight is reduced because the increased altitude AGL makes it possible to cover more field crop area. Moreover, if the UAV platform flies in cruising mode, the optimization of the battery is even higher than that in stop mode. The duration of flight ratio considering stop and cruising modes shows a ratio of 4:1, considering the same altitude AGL. The longest duration of UAV flight corresponded to 60 m AGL flying in stop mode, with 38 min 11 sec because it was not possible to perform the whole flight mission with one battery, so we divided the mission into two different flights, motivated by the need to change batteries between flights. Under these circumstances, it is possible to show changes in illumination or in the environmental conditions, which would be reproduced on the registered images. As an example, Figure 3.4.a shows results for 60 m AGL using stop mode flight. The two areas corresponding to both flights are well defined. Figure 3.4.b displays the results considering the same altitude AGL flying in cruising mode. In this case, there were no spectral differences because only one flight was conducted. The shortest flight was obtained for 100 m AGL flying in cruising mode, with 3 min 40 sec. Finally, Table 3.1 shows all flights were made under same wind speed conditions. The minimum wind speed was 0,8 m/s corresponding to 60 m AGL and stop mode while maximum value was 1,9 for 100 m AGL in cruising mode. Therefore, the results depend only on the technical parameters.

**Table 3.1 Summary of UAV flights.**

		Flight Duration		Wind Speed [m/s]	
AGL [m]	Route length [m]	Stop Mode	Cruising Mode	Stop Mode	Cruising Mode
60	1074,0	38 min 11 sec	9 min 28 sec	0.8	1.3
80	804,5	18 min 24 sec	4 min 46 sec	1.3	1.8
100	925,4	11 min 56 sec	3 min 40 sec	1.8	1.9



**Figure 3.4 Effect of UAV flight over an area with (a) different flights or (b) one flight.**

### **3.3.1 Effect of UAV flights parameters on orthophoto spatial resolution**

Table 3.2 summarizes the results of the absolute spatial resolution assessment considering 1) altitude AGL, 2) flight mode and 3) number of GCPs. Figure 5 contains a vector error plot graph for each UAV flight to show the spatial distribution and orientation of errors. Errors presented a broad range of values, from 5 cm flying at 60 m AGL in cruising mode to 28.8 cm at 100 m AGL in stop mode. Considering altitude AGL, error

increases as altitude AGL increases in all the cases. This behavior is constant in all the flights, independent of other factors. Imagery pixel size is proportional to the flight altitude, and as in manned platforms, errors mainly depend on the flying height (Balasavias, 1999). A lower altitude AGL flight allows better geometric accuracy. On Figure 3.5.a, corresponding to 60 m AGL flight, vector errors are smaller than vectors on altitude 80 and 100 m AGL images (Figure 3.5.b and Figure 3.5.c) independently of flight mode.

Referring to flight mode, vector error graphs for cruising mode flights (Figure 3.5 "cruise mode flight") showed smaller vectors than stop mode flights (Figure 3.5 "stop mode flight"). Considering the full area of study, the error range in cruising mode was from 8.3 to 13.5 cm, whereas for stop mode errors were from 14.5 to 28.8 cm. As in (Eisenbeiss, 2008) all individual UAV flights in cruising mode have better results than the corresponding version in stop mode. These better results are achieved because, in stop mode, a multi-rotor UAV has more difficulty in maintaining flight direction and the defined forward-lap and side-lap than flights in cruising mode. This circumstance can cause a reduction in the percentage of forward-lap and side-lap, among other factors. The consequence is that the SfM algorithms used to process UAV flights do not work as well as they should (Ruzgiene, 1999). Moreover, the error range considering altitude AGL is lower flying in cruising mode than in stop mode.

Regarding the GCPs factor, errors showed a better distribution using 5GCPs instead of 4GCPs, being more evident in cruising mode (Table 3.2 columns headed "FA"). A traditional distribution of GCPs in Digital Photogrammetry is to set the GCPs at the corner of the block (Ackermann,1991). This GCP distribution in our UAV flights showed satisfactory results, but this distribution did not present clear improvements when adding a new GCP in the middle of the area of study for all the flights. Figure 3.6 represents the distribution of the spatial error for each check point, showing how the maximum errors are concentrated around the perimeter of the area flown over for all UAV flights independent of flight mode, altitude AGL and number of GCPs. Under

these circumstances, a 10% security margin was defined around the perimeter described by the 4GCPs of the corner. A new area of interest was defined, and a new RMSE was calculated for all the flights considering only check points inside this area (Table 3.2 columns titled "SM"). In this case, the RMSE was lower, especially in those flights where the errors showed high values. Under these conditions, the influence of the number of GCPs was more evident, being motivated by how UAV flights are processed compared with classic Photogrammetry. UAV processing is used at the start of a relative coordinate system, and GCPs are measured at the end of the process to transform from relative to absolute coordinates, similar to, for example, calculating a rigid body transformation (Westoby et al., 2012). In this transformation, the number and spatial distribution of GCPs affect orthophoto accuracy (Orti, 1981). This author concluded that the accuracy of the four corners and some areas of the edges in an image depends on the number of GCPs, which matches with our results.

**Table 3.2 Results for absolute spatial resolution considering altitude AGL, number and distribution of GCPs, flight mode and area of interest (FA: Full Area; SM: Security Margin 10%).**

AGL [m]	Flight mode	4 GCPs RMSE [cm]		5 GCPs RMSE [cm]	
		FA	SM	FA	SM
60	Stop	14.7	11.6	14.5	11.7
	Cruising	9.8	5.1	8.3	5.3
80	Stop	16.6	14.7	16.4	14.3
	Cruising	13.1	9.3	8.5	6.3
100	Stop	28.8	18.2	23.2	16.5
	Cruising	13.5	12.1	9.7	9.2

With respect to relative spatial resolution (Table 3.3), RHSD is stable when the UAV flies in cruising mode, ranging from 9.5 to 14.8 cm (2-3 pixels). In stop mode, RHSD shows values ranging from 10.8 to 22.7 cm (2-5 pixels). RHSD increases as altitude AGL increases in all cases. Referring to GCPs, flying in cruising mode showed no relevant differences compared to stop mode. In this stop mode, considering 5GCPs supposes an improvement of 10 cm (2 pixels) when flying at 80 and 100 m AGL.

**Table 3.3 Results for absolute spatial resolution considering altitude AGL, number and distribution of GCPs and flight mode.**

<b>AGL [m]</b>	<b>Flight mode</b>	<b>4 GCPs RMSE [cm]</b>	<b>5 GCPs RMSE [cm]</b>
60	Stop	19.5	18.5
	Cruising	14.5	11.3
80	Stop	21.0	10.8
	Cruising	11.0	9.5
100	Stop	22.7	14.9
	Cruising	14.8	13.5

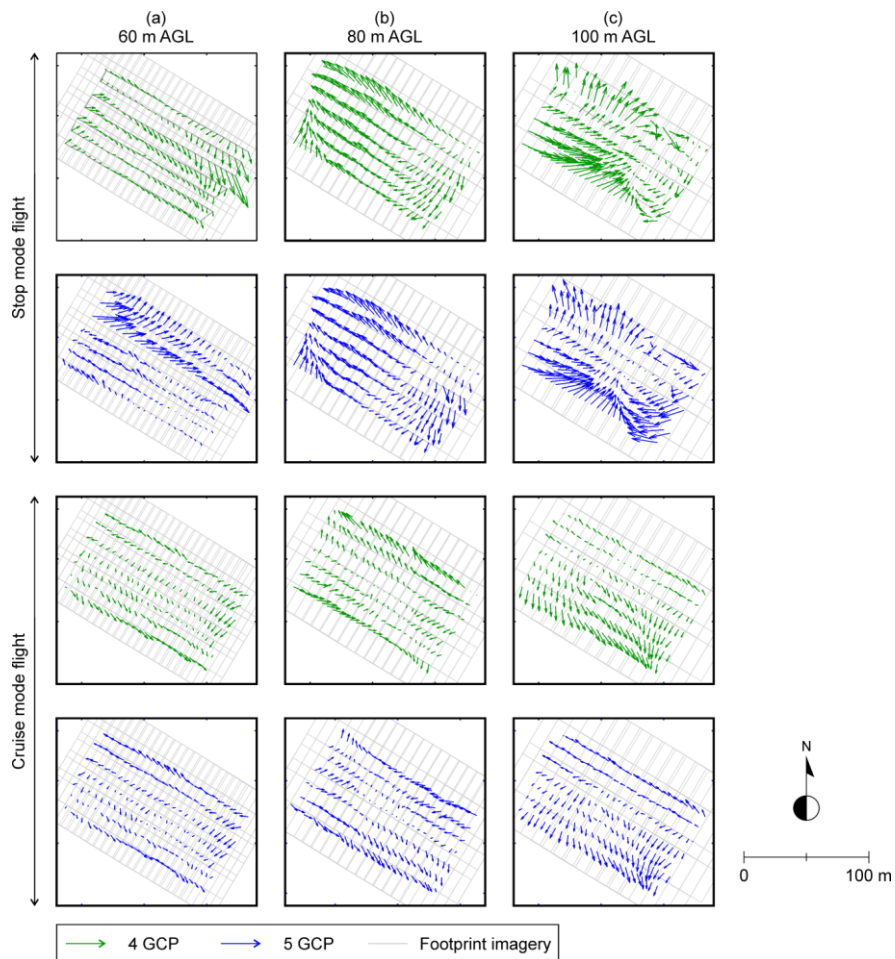
Considering these results, there was a relationship between flight parameters and GCP distribution regarding spatial resolution. For flights in cruising mode, the spatial accuracy of orthophotos was better than that in stop mode. In addition, it was possible to cover more field area. Relative to GCPs, setting 4GCPs at the corner and 1GCP in the centre of the area stabilizes the RHSD in 8-10 cm. If GCPs are distributed covering a 10% wider area, the error in the area of interest is equal to 5-6 cm for 60 and 80 m altitude AGL, indicating 1 pixel of error. Therefore, if there was not an energy (battery) limitation, we would recommend flying at 60 m AGL to achieve the best spatial resolution. In contrast, flying at 80 m AGL, the RMSE would be slightly poorer, but this would not have a relevant impact on spatial resolution under this setting, in addition to making it possible to cover more area.

With this configuration it is possible to cover 12 ha at 60 m AGL or 16 ha at 80 m AGL. Therefore, it would be necessary to make a number of flights to cover larger fields. Nowadays, one focus of work and research related to the UAV platforms is to increase time flight, improving autonomy. For that reason, it is important to define the best flight conditions.

UAV and related technologies are developing quickly with more and more efficiency and currently, the main limitation of UAV multirotor is energy (batteries). However, as the following papers show (Gatti and Giulietti, 2013; Verbeke et al., 2014), these problems are being addressed by several

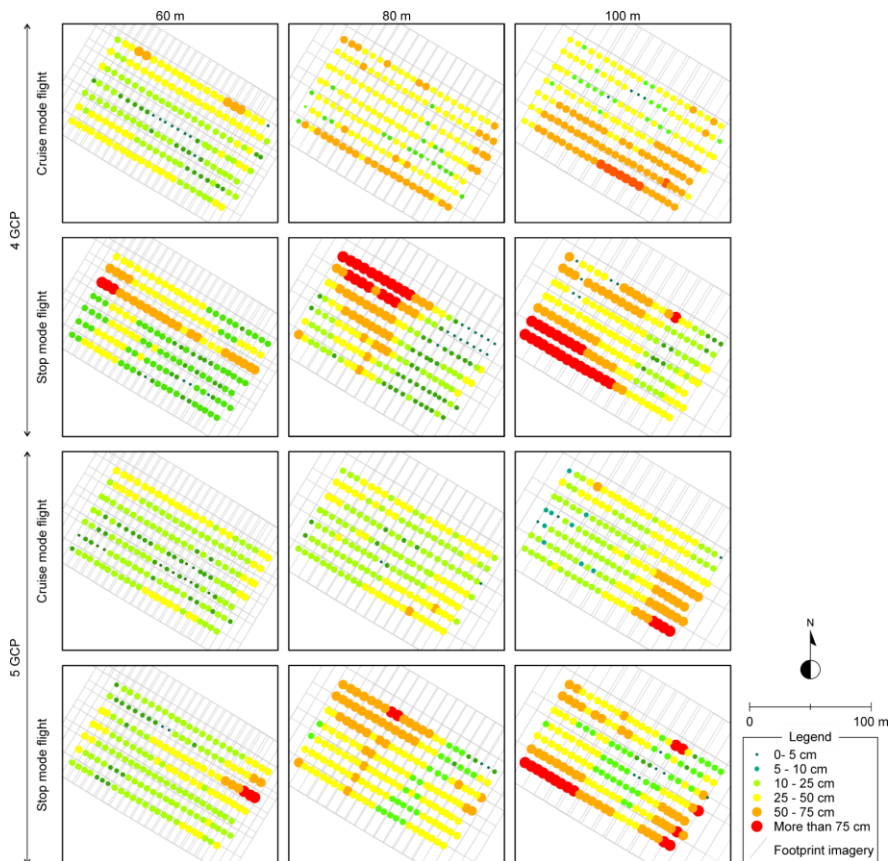
*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

research groups. Our research does not depend on the crop field size. Therefore, it can be applied in the future to UAV equipped with a better energy supplied to fly longer durations.



**Figure 3.5** Vector error distribution of 6-band multispectral orthophoto taking into account flight mode (cruising and stop mode); (a) 60, (b) 80 and (c) 100 meters altitude AGL; and number of ground control points (GCPs).



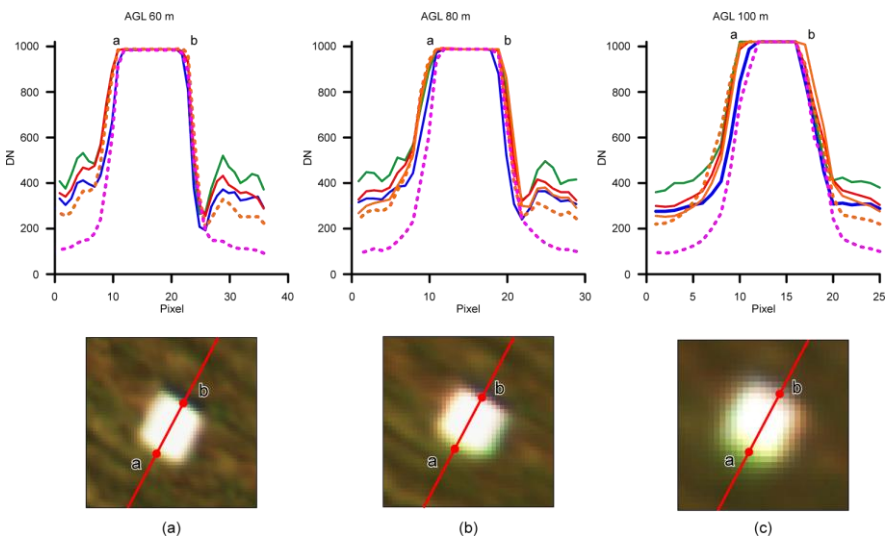


**Figure 3.6** Distribution of error considering mode of flight (cruising and stop mode); 60, 80 and 100 m altitude AGL; and number of ground control points (GCPs).

### **3.3.2 Effect of UAV flights parameters on orthophoto spectral discrimination.**

The influence of altitude AGL on spectral discrimination was studied by considering UAV flights in cruising mode and 5GCPs as the optimum setting to obtain the best spatial resolution. A new orthomosaicked image for each altitude AGL was produced in which the GSD was related to altitude AGL. As a result, the new GSD orthomosaicked image values were 3, 4 and 5 cm×pixel<sup>-1</sup> for 60, 80 and 100 m altitude AGL, respectively. Figure

3.7 shows a subset, including the spectralon panel, of each orthomosaicked image accompanied by an axis (red line) used to extract a spectral profile of each spectral band at 10-bit radiometric resolution. Although the multispectral camera registers each image using six individual sensors, there was no evidence of misalignment between bands in any flight. At 60 m AGL (Figure 3.7.a), the orthomosaicked image showed well defined objects with clear borders. In this case, the transition from shadows to the spectralon panel (point b in the profile) was almost a vertical line. The transition from the spectralon panel to bare soil (point a in the profile) was not a vertical line, as was recorded in the previous point, possibly because the spectral response of each band is different while the above shadow has a constant response. Moreover, considering a visual analysis, crop lines were well defined. At 80 m AGL (Figure 3.7.b), the spectralon panel showed more diffuse borders, and furthermore, the crop rows were more poorly defined, showing a blurred aspect because the response of an individual pixel is a radiometric measurement arising from a two dimensional spatially extended region of the field of view (Forster and Best, 1994). Therefore, as altitude AGL increases, GSD also increases. The increase involves increasing the field of view and, hence, a worse definition of the spectral curves. Altitude AGL equal to 100 m (Figure 3.7.c) showed the worst transition between objects. The spectralon panel exhibited a scattered definition, and crop rows practically disappeared.



**Figure 3.7 Spatial (upper figures) and spectral (lower figures) profiles over orthomosaicked images at (a) 60, (b) 80 and (c) 100 m altitude AGL.**

On a second stage, spectral discrimination between bare soil, crop and weeds was studied. Table 3.4 shows the range and average spectral pixel values of the NDVI of each class considering 60, 80 and 100 m AGL. In ESSWM, a first stage is focused on distinguishing between bare soil and vegetation. Figure 3.8 represents M-statistics values for each class and altitude AGL. At 60 m AGL, the M-statistic showed the best separation between vegetation (crop and weeds) and bare soil ( $M = 2.74$ , Table 5). This result offers a robust separability among classes. At 80 and 100 m AGL, the results ( $M = 1.86$  and  $1.55$ , respectively) were not as satisfactory as at 60 m AGL. The results were higher than 1, so separability of classes is *a priori* adequate, although a higher GSD decreases the M-statistic. Therefore, increasing the altitude AGL affects the separability negatively. Figure 3.8 displays how boxes representing weeds and crop are closer to bare soil boxes at 80 and 100 m AGL than at 60 m AGL. Referring to the separation between crop and weeds, M-values were lower than 1, considering all the altitude AGLs (Table 3.5). Figure 3.8 shows how both boxes were quite similar, and these classes were therefore not well distinguished. The best M-value was obtained at 100 m AGL, one reason being that GSD is higher and pixels of bare soil are mixed, particularly in the case of weeds.

Using this spectral information, it is therefore possible to distinguish between bare soil and vegetation considering all the altitude AGLs, but it was not possible to discriminate between weeds and crop. Once our results demonstrated the generation of high quality orthomosaics, this spectral similarity could be resolved using the object-based image analysis (OBIA) methodology (Orti, 1981). The OBIA methodology uses spectral, textural and hierarchical features after segmentation of imagery acquired for other herbaceous crops such as maize and sunflowers (Peña Barragán et al., 2011). In this context, weed patches can be distinguished from crop plants using the relative position instead of only spectral information. For that distinction, it is necessary to first determine the crop rows, and then, every plant that is not located in these crop lines can be considered a

weed. Altitude AGL can also be a parameter to consider for the results on crop line detection. As part of an overall research programme, which investigates the possibilities and limitations of UAV imagery to support site-specific crop management, it is crucial to explore the potential of generating accurate orthomosaics from UAV flights for proper discrimination of weeds using a multispectral sensor. Such an approach should demonstrate the potential of the orthomosaics generated and their accuracy for further weed discrimination. The ultimate objective of our work is to generate weed maps using these multispectral orthomosaics. These maps, which provide the required georeferenced information, will then be used in the decision-making process to design the site specific herbicide treatment maps which will direct treatment to the weed infested areas only. Therefore, it is necessary to produce the best orthomosaics (mainly in higher spatial resolution) to generate accurate weed maps at early stage for a timely and efficient early post-emergence treatment. For this reason, our research assessed the best setting of UAV flight parameters, i.e. the number and location of GCPs, cruising flight mode and altitude AGL. Following these settings, altitude AGL influences spatial resolution and spectral discrimination of the orthomosaics. Both are key factors in achieving an adequate segmentation of the image. After the segmentation of the orthomosaics, the spatially accurate created object would represent only one class and not a mixture of vegetation (crop or weed) and bare soil. Torres-Sánchez et al. (2015) assessed the accuracy of image classification using OBIA algorithms on single UAV images registered on wheat at 30 m AGL using an RGB camera. Future investigation will be focused on determining how the parameter of altitude AGL affects the OBIA methodology results considering orthomosaicked images and a multispectral sensor on a wheat field.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

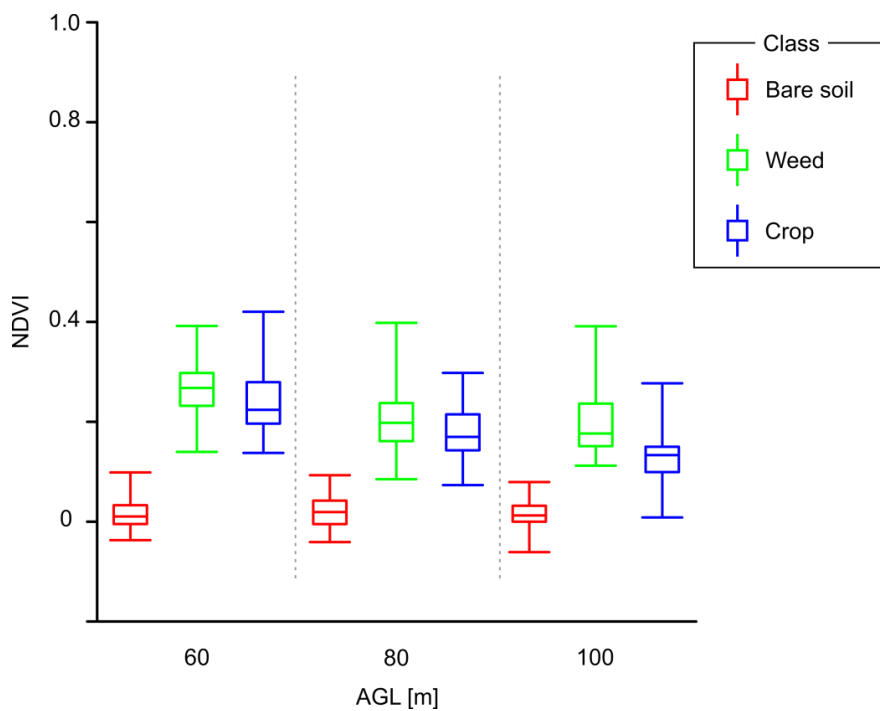
**Table 3.4 NDVI statistics for the classes: vegetation (V, including weed and crop), weed (W), crop (C) and bare soil (B).**

NDVI Statistics	60 m AGL				80 m AGL				100 m AGL			
	V	W	C	B	V	W	C	B	V	W	C	B
Minimum	0,1 4	0,1 4	- 0,13	- 0,03	0,07 0,07	0,08 0,08	0,07 0,07	0,04 0,04	0,01 0,01	0,11 0,11	0,01 0,01	0,03 0,03
Maximum	0,4 2	0,3 9	0,42 0,42	0,09 0,09	0,40 0,40	0,39 0,39	0,29 0,29	0,09 0,09	0,39 0,39	0,39 0,39	0,27 0,27	0,07 0,07
Desviación	0,0 6	0,0 5	0,06 0,06	0,02 0,02	0,06 0,06	0,07 0,07	0,05 0,05	0,02 0,02	0,07 0,07	0,06 0,06	0,05 0,05	0,02 0,02
Mean	0,2 5	0,2 6	0,24 0,24	0,01 0,01	0,20 0,20	0,21 0,21	0,18 0,18	0,02 0,02	0,17 0,17	0,19 0,19	0,13 0,13	0,01 0,01
Median	0,2 5	0,2 6	0,22 0,22	0,01 0,01	0,19 0,19	0,19 0,19	0,17 0,17	0,01 0,01	0,02 0,02	0,17 0,17	0,13 0,13	0,01 0,01

**Table 3.5 M-Statistics between crop and weed, bare soil and weed, bare soil and crop and bare soil and vegetation (including crop and weed).**

Classes	60 m		80 m		100 m	
	Crop	Bare Soil	Crop	Bare Soil	Crop	Bare Soil
Weed	0.23	3.06	0.24	1.88	0.52	1.92
Crop	--	2.51	--	1.94	--	1.38
Vegetation	--	2.74	--	1.86	--	1.55

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*



**Figure 3.8 NDVI values for the classes of bare soil, weed and crop, considering flights at 60, 80 and 100 m altitude AGL.**

### **3.4. Conclusions**

---

The main objectives of this research were to analyze the technical specifications and configuration of a multi-rotor UAV equipped with a multispectral sensor to produce the most accurate ortho-photography considering spatial resolution and spectral discrimination and how these specifications and configuration influence the detection of weeds in a crop. Moreover, to determine the best spatial resolution and spectral discrimination, it was necessary to consider whether UAV platforms were able to cover the whole area of interest. These three conditions were related to UAV flight mission planning, so those parameters must be defined jointly and not isolated.

Considering spatial resolution, flight altitude is an important parameter, not so much for the RMSE obtained as spatial resolution considering other parameters but for the degree of detail achieved in the orthomosaicked image to be processed by further image analysis such as the OBIA methodology. Altitude AGL has a negative impact on the duration of the flight that can be minimized by flying in cruise mode. Therefore, it is possible to fly for less time and cover the full area of interest using only one battery, thus avoiding potential problems related to changing light or weather conditions. Regarding the number and distribution of GCPs, the RMSE is closer to the GSD if a security margin can be considered, so we would recommend covering more than the area of interest and placing the GCPs in that margin. Thus, the study area has an error range lower than the adjacent areas close to the field perimeter. Considering spectral discrimination, flight altitude is an important parameter depending on the type of processing developed for the orthomosaicked image. Considering spectral differences between vegetation (including crop and weeds), all the altitudes AGL showed satisfactory results. At the same time, none altitude AGL let to difference between crop and weeds from a spectral point of view. One solution to improve this classification would be to use OBIA methodology.

Therefore, the best setting to maximize spatial resolution and spectral discrimination is to define a flight planning with 10% of security margin, to fly in cruising mode at 60 m altitude AGL and to use 5 GCPs.

The results and methodology herein presented can be used to configure flight mission using a multiple-array or a single sensor on-board a multi-rotor UAV to maximize the spatial resolution and spectral discrimination of orthomosaicked image to use in precision agriculture.

### **3.5. References**

---

- Abbas, A.; Khan, S.; Hussain, N.; Hanjra, M.A.; Akbar, S. (2013). Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 55–57, 43-52.
- Aber, J.S.; Marzoff, I.; Ries, J.B. (2010). Chapter 3 Photogrammetry. In *Small-format aerial photography*, Ries, J.S.A.M.B., Ed. Elsevier: Amsterdam, pp 23-39.
- Ackermann, F. (1991). Operational rules and accuracy models for gps-aerotriangulation. *Archives of the ISPRS*, XXIX, 691-700.
- Ariza Lopez, F.J.; Atkinson Gordo, A.D.; Rodriguez Avi, J. (2008). Acceptance curves for the positional control of geographic databases. *Journal of Surveying Engineering*, 134, 26-32.
- ASPRS (2014). *Asprs positional accuracy standards for digital geospatial data*.
- Baltsavias, E.P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 83-94.
- Bemis, S.P.; Micklethwaite, S.; Turner, D.; James, M.R.; Akciz, S.; Thiele, S.T.; Bangash, H.A. (2014). *Ground-based and uav-based*



photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69, Part A, 163-178.

- de Castro, A.; López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M. (2013). Broad-scale cruciferous weed patch classification in winter wheat using quickbird imagery for in-season site-specific control. *Precision Agric*, 14, 392-413.
- Eisenbeiss, H. (2008). The autonomous mini helicopter: A powerful platform for mobile mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 37, 977-983.
- Eisenbeiss, H.; Sauerbier, M. (2011). Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26, 400-421.
- European Commission Joint Research Centre, J. (2013). Inspire data specification for the spatial data theme orthoimagery.
- Fischler, M.A.; Bolles, R.C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24, 381-395.
- Forster, B.C.; Best, P. (1994). Estimation of spot p-mode point spread function and derivation of a deconvolution filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49, 32-42.
- Furukawa, Y.; Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions* 32, 1362-1376.
- Gatti, M.; Giulietti, F. (2013). In Preliminary design analysis methodology for electric multicopter, RED-UAS 2013, 2nd IFAC Workshop Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, November 20-22, pp 58-63.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

- Ge, Y.; Thomasson, J.A.; Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Front. Earth Sci.* 5, 229-238.
- Gómez-Candón, D.; De Castro, A.I.; López-Granados, F. (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (uav) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agric.* 15, 44-56.
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32, 1283-1298.
- Hruska, R.; Mitchell, J.; Anderson, M.; Glenn, N.F. (2012). Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 4, 2736-2752.
- Huang, Y.; Thomson, S.J.; Lan, Y.; Maas, S.J. (2010). Multispectral imaging systems for airborne remote sensing to support agricultural production management. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3, 50-62.
- Hunt, E.R.; Hively, W.D.; Fujikawa, S.; Linden, D.; Daughtry, C.S.; McCarty, G. (2010). Acquisition of nir-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing* 2, 290-305.
- ISO (2013). *Geographic information -- data quality*.
- Kaufman, Y.J.; Remer, L.A. (1994). Detection of forests using mid-ir reflectance: An application for aerosol studies. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 32, 672-683.
- Kelcey, J.; Lucieer, A. (2012). Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for uav remote sensing. *Remote Sensing*, 4, 1462-1493.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry - geometry from images and laser scans*. Goettingen, Germany, p 459.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

- Laliberte, A.S.; Goforth, M.A.; Steele, C.M.; Rango, A. (2011). Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: Image processing workflows and applications for rangeland environments. *Remote Sensing* 3, 2529-2551.
- López-Granados, F. (2011). Weed detection for site-specific weed management: Mapping and real-time approaches. *Weed Research* 51, 1-11.
- López-Granados, F.; Jurado-Expósito, M.; Peña-Barragán, J.M.; García-Torres, L. (2005). Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *European Journal of Agronomy* 23, 279-289.
- Lowe, D.G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60, 91-110.
- Markelin, L.; Honkavaara, E.; Hakala, T.; Suomalainen, J.; Peltoniemi, J. (2010). Radiometric stability assessment of an airborne photogrammetric sensor in a test field. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 409-421.
- Meier, U. (2001). Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Bb monograph. . Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. Available at: <http://www.bba.de/veroeff/bbch/bbcheng.pdf>.
- Mesas-Carrascosa, F.J.; Clavero Rumbao, I.; Barrera Berrocal, J.A.; García-Ferrer Porras, A. (2014). Positional quality assessment of orthophotos obtained from sensors onboard multi-rotor uav platforms. *Sensors* 14, 22394-22407.
- Möller, M.; Alchanatis, V.; Cohen, Y.; Meron, M.; Tsipris, J.; Naor, A.; Ostrovsky, V.; Sprintsin, M.; Cohen, S. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 58, 827-838.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

- Mulla, D.J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering* 114, 358-371.
- Müller, J.; Gärtner-Roer, I.; Thee, P.; Ginzler, C. (2014). Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation models in a high mountain environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 98, 58-69.
- Orti, F. (1981). Optimal distribution of control points to minimize landsat image registration errors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 47, 101-110.
- Pajares, G. (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (uavs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 81, 281-330.
- Paparoditis, N.; Souchon, J.-P.; Martinoty, G.; Pierrot-Deseilligny, M. (2006). High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60, 400-412.
- Peña, J.M.; Torres-Sánchez, J.; de Castro, A.I.; Kelly, M.; López-Granados, F. (2013). Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (uav) images. *PLoS One* 8, e77151.
- Peña, J.M.; Torres-Sánchez, J.; Serrano-Pérez, A.; de Castro, A.I.; López-Granados, F. (2015). Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (uav) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution. *Sensors* 15, 5609-5626.
- 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 of Environment* 115, 1301-1316.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

- Practice, D.o.D.S. (1990). Mapping, charting and geodesy accuracy.. URL [http://earth-info.nga.mil/publications/specs/printed/600001/600001\\_Accuracy.pdf](http://earth-info.nga.mil/publications/specs/printed/600001/600001_Accuracy.pdf) (archived on 25 September 2015)
- Primicerio, J.; Di Gennaro, S.; Fiorillo, E.; Genesio, L.; Lugato, E.; Matese, A.; Vaccari, F. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agric* 13, 517-523.
- Rango, A.; Laliberte, A.; Steele, C.; Herrick, J.E.; Bestelmeyer, B.; Schmutge, T.; Roanhorse, A.; Jenkins, V. (2006). Using unmanned aerial vehicles for rangelands: Current applications and future potentials. *Environmental Practice* 8, 159-168.
- Rodriguez-Gonzalvez, P.; Gonzalez-Aguilera, D.; Lopez-Jimenez, G.; Picon-Cabrera, I. (2014). Image-based modeling of built environment from an unmanned aerial system. *Automation in Construction* 48, 44-52.
- Ruzgienė, B.; Berteška, T.; Gečyte, S.; Jakubauskienė, E.; Aksamitauskas, V.Č. (2015). The surface modelling based on uav photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement* 73, 619-627.
- Seitz, S.M.; Curless, B.; Diebel, J.; Scharstein, D.; Szeliski, R. (2006). In A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms, *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on 17-22 June 2006*, pp 519-528.
- Snavely, N.; Garg, R.; Seitz, S.M.; Szeliski, R. (2008). Finding paths through the world's photos. *ACM Trans. Graph.* 27, 1-11.
- Srbinovska, M.; Gavrovski, C.; Dimcev, V.; Krkoleva, A.; Borozan, V. (2015). Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production* 88, 297-307.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

- Tetracam. Pixelwrench 2.  
[Http://www.Tetracam.Com/pdfs/pw2%20faq.Pdf](http://www.Tetracam.Com/pdfs/pw2%20faq.Pdf). 2011.
- Torres-Sánchez, J.; López-Granados, F.; De Castro, A.I.; Peña-Barragán, J.M. (2013). Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (uav) for early site specific weed management. *PLoS One*, 8, e58210.
- Torres-Sánchez, J.; López-Granados, F.; Peña, J.M. (2015). An automatic object-based method for optimal thresholding in uav images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 114, 43-52
- Torres-Sánchez, J.; Peña, J.M.; de Castro, A.I.; López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from uav. *Computers and Electronics in Agriculture* 103, 104-113.
- Turner, D.; Lucieer, A.; Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (uav) imagery, based on structure from motion (sfm) point clouds. *Remote Sensing* 4, 1392-1410.
- USACE. (2002). Engineering and design. Photogrammetric mapping. Washington DC.
- Vega, F.A.; Ramírez, F.C.; Saiz, M.P.; Rosúa, F.O. (2015). Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosystems Engineering* 132, 19-27.
- Verbeke, J.; Hulens, D.; Ramon, H.; Goedeme, T.; De Schutter, J. (2014) In The design and construction of a high endurance hexacopter suited for narrow corridors\*, *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2014 International Conference on, 27-30 May 2014, pp 543-551.
- Wang, J.; Ge, Y.; Heuvelink, G.B.M.; Zhou, C.; Brus, D. (2012). Effect of the sampling design of ground control points on the geometric

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific crop management*

correction of remotely sensed imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18, 91-100.

- Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. (2012). 'Structure-from-motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300-314.
- Zhang, C.; Kovacs, J. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agric* 13, 693-712.
- Zhang, Y.; Xiong, J.; Hao, L. (2011). Photogrammetric processing of low-altitude images acquired by unpiloted aerial vehicles. *The Photogrammetric Record*, 26, 190-211.

*Capítulo 3: Assessing optimal flight parameters for generating accurate  
multispectral orthomosaics by UAV to support site-specific  
crop management*



# **Capítulo 4: Accurate ortho-mosaiced six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes**

---

Francisco Javier Mesas-Carrascosa, Inmaculada Clavero Rumbao, Jorge Torres Sánchez, Alfonso García-Ferrer Porras, Jose Manuel Peña y Francisca López Granados

**Publicado en:**

International Journal of Remote Sensing, 38 (8-10), 2161-2176 (2017)



## **Abstract**

---

Weed mapping at very early phenological stages of crop and weed plants for site-specific weed management requires ultra-high spatial and high spectral resolution imagery provided by multispectral sensors on-board an unmanned aerial vehicle (UAV). These UAV images cannot cover the whole field, resulting in the need to take a sequence of multiple overlapped images. Therefore, the overlapped images must be oriented and ortho-rectified to create an accurately ortho-mosaicked image of the entire field for further classification.

Because the spatial quality of ortho-mosaicked image mainly depends on the flight altitude and percentage of overlap, this study describes the effect of flight parameters using a multirotor UAV and a multispectral camera on the mosaicking workflow. The objective is to define the best configuration of the mission planning to generate an accurate ortho-image. A set of flights with a range of altitudes above ground level (AGL) from 30 to 90 m (10-m increase ratio) and two end-lap and side-lap settings (60%-30% and 70%-40%) were studied. The spatial accuracy of ortho-mosaicks was evaluated considering the ASPRS test. The results showed that the best flight setting to keep the spatial accuracy in the bundle adjustment was 70-40% overlap and an AGL ranging from 60 to 90 m. At these flight altitudes, the spatial resolution was quite similar, making it possible to optimise the mission planning, flying at a higher altitude and increasing the area overflow without decreasing the orthomosaick spatial quality. This study has relevant implications for further use in detecting weed seedlings in crops.

## **Resumen**

---

El mapeo de malas hierbas en etapas fenológicas muy tempranas de plantas de cultivo y malezas para el manejo de malezas específicas de un sitio requiere imágenes espaciales ultra altas y de alta resolución espectral proporcionadas por sensores multiespectrales a bordo de un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Estas imágenes UAV no pueden cubrir todo el campo, por lo que es necesario tomar una secuencia de múltiples imágenes superpuestas. Por lo tanto, las imágenes superpuestas deben estar orientadas y ortorrectificadas para crear una imagen ortogonal precisa de todo el campo para su posterior clasificación.

Debido a que la calidad espacial de la ortofotografía depende principalmente de la altitud de vuelo y el porcentaje de superposición, en este trabajo se describe el efecto de los parámetros de vuelo, utilizando un UAV multirotor y una cámara multiespectral en el flujo de trabajo del mosaicado. El objetivo se centra en definir la mejor configuración de la planificación de la misión para generar una ortofotografía precisa. Para ello, se estudió un conjunto de vuelos con un rango de altitudes sobre el nivel del suelo (AGL) de 30 a 90 m (relación de aumento de 10 m) y dos configuraciones de solape longitudinal y transversal (60%-30% y 70%-40%). La precisión espacial de los orto-mosaicos se evaluó considerando la prueba ASPRS. Los resultados mostraron que el mejor ajuste de vuelo para mantener la precisión espacial en el ajuste del fardo era un solape del 70-40% y un AGL que oscilaba entre 60 y 90 m. A estas altitudes de vuelo, la resolución espacial era bastante similar, lo que permitía optimizar la planificación de la misión, volando a mayor altitud y aumentando el desbordamiento de la zona sin disminuir la calidad espacial del ortomosaico. Este estudio tiene implicaciones relevantes para su uso posterior en la detección de plántulas de malas hierbas en cultivos.

## **4.1. Introduction**

---

Over the last decade, significant changes have occurred in the field of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), which has increased general interest for civil and research purposes, such as the detection and monitoring of fires (Merino et al., 2012), civil protection (Maza et al., 2011) and precision agriculture for site-specific management (Garcia-Ruiz et al., 2013). This interest is due to UAVs ability to provide an alternative to the low temporal and spatial resolutions of satellite and manned aerial platforms. The benefits of using UAV platforms over satellite or traditional aircraft systems are related to mobilisation costs, flexibility in flight scheduling at the right moment and repeatedly (high number of operational flying days) making possible the combination of high spatial, spectral and temporal resolutions (Rango et al., 2006). The result is that UAVs are often being used in photogrammetry because a geo-referenced product can be obtained with satisfactory accuracy, and any geographic phenomena can be measured and mapped (Link et al., 2013). This ability is particularly interesting for precision agriculture approaches due to the development of on-board sensors, which make these approaches an alternative that can reduce operational costs and acquire images to obtain high spatial and spectral resolution (Hunt Jr et al., 2005) for the timely mapping of the variable of interest. For example, most weeds must be controlled early post-emergence. As a consequence, for developing site-specific weed management strategies based on weed maps in a very early phenological crop stage, weed plants require ultra-high spatial (e.g., centimetres, as provided by low-altitude flights) and high spectral (supplied by a multispectral camera covering visible and near-infrared range) resolution imagery because the spectral and appearance characteristics of the crop and weeds are similar in the early growth stages, thus imposing an additional handicap for their detection (Torres-Sánchez et al., 2013).

As a result of their intrinsic characteristics, UAV images taken at low altitude (e.g., 120 m AGL according to Spanish Regulations) cannot cover the entire study plot, resulting in the need to take a sequence or series of multiple images. To avoid geometric distortion due to low altitude, image overlapping (end-lap and side-lap) is usually used so that a larger number

of UAV images have to be acquired for each field. These multiple overlapped images must be oriented by calculating the bundle adjustment and ortho-rectified throughout an aerial-triangulation procedure to create an accurately geo-referenced ortho-mosaicked image of the entire field. Aerial triangulation involves the transformation of image coordinates to ground coordinates through a set of ground control points (GCPs) that must be clearly visible in the set of images (Gómez-Candón et al., 2014).

The primary UAV platforms that are used in agriculture are fixed (Hunt Jr et al. 2005) and rotary (Primicerio et al., 2012) wing in general four- or multi-rotor systems. The manner of acquiring imagery is different for both platforms. Rotary wings are able to stabilise the sensor, making it possible to adjust the sensitivity and integration time during the flight, while for fixed wings, the UAV has to set up the shutter speed of the sensor very fast to reduce image motion. In addition, rotary-wing UAVs can be operated closer to the ground than can fixed-wing UAVs, increasing spatial resolution and being very useful for weed patch monitoring (Peña et al., 2013). In contrast, fixed-wing UAVs move faster than do rotary wing UAVs, covering several kilometres per flight, albeit generating scarce spatial resolution. Therefore, limitations are also related to sensors on-board and flight-setting programming.

Previous studies have detected and mapped weeds at late phenological stages in winter crops and sunflower (e.g., flowering) using imagery in the visible and near-infrared range from piloted aircrafts and QuickBird satellite platforms (López-Granados et al., 2006; Castillejo-González et al., 2014; de Castro et al., 2012) and also at very early phenological stages in maize crops using non-mosaicked UAV imagery (Peña et al., 2013). Therefore, the process of weed mapping should ideally be performed using a multispectral sensor covering that spectral interval. However, these sensors present a lack of vertical adjustment or unknown interior orientation that affects the consistency of image spatial accuracy. The interior orientation can be particularly critical for multispectral sensors, which collect blue, green, red and near-infrared spectral data of an array-setup sensor with a progressive shutter. In other words, an image is taken with different sensors at the same time working within the camera, and as an unavoidable consequence, some multi-unknown interior orientations

take part in the process, complicating the bundle adjustment of the aerotriangulation process.

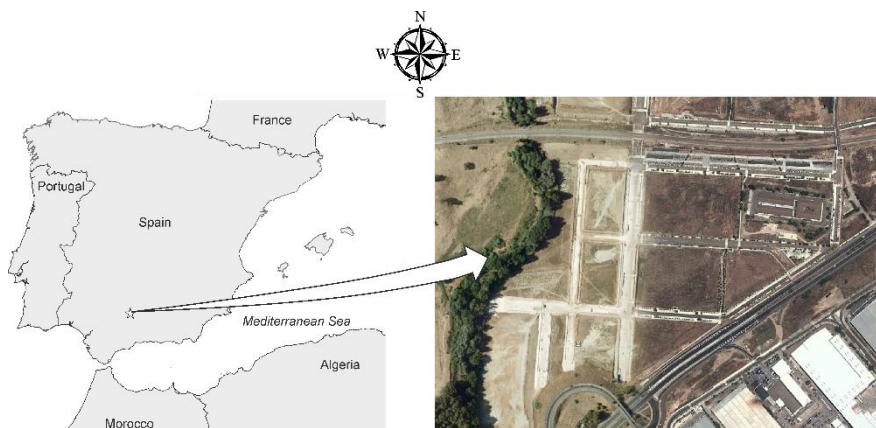
The other factor is the flight setting, which is directly related to the quality of the photogrammetric processes; high values of end-lap (longitudinal-lap) and side-lap (lateral-lap) could improve the accuracy of block photogrammetric adjustment, although these values increase the UAV flight length and decrease the area overflow (Torres-Sánchez et al., 2013). To optimise the acquisition of imagery from the UAV, it is necessary to determine the quality of the image data when using a multispectral sensor and to balance the flight project to maintain steady spatial quality results and flight duration. This study defines the best configuration of the mission planning to generate an accurate ortho-image using a six-band multispectral camera (TetraCam) on-board a multi-rotor UAV. The work was performed in an urban parcel using local invariant features and GCP to perform the aerotriangulation (which is the first phase of the mosaicking process) because the development of this procedure in an herbaceous crop at early stages with the highly repetitive pattern of these fields presents serious difficulties. Once the mission planning was developed and an accurate georeferenced six-band multispectral orthomosaicked image was created, the proposed procedure would be subsequently used in UAV imagery taken for weed seedling mapping.

## **4.2. Materials and methods**

---

### **4.2.1. Study site description and airborne campaign**

The work was performed in an urban parcel on the University of Córdoba campus (southern Spain, coordinates 37.909°N, 4.728°W, datum WGS84). The study site had an area of approximately 1 ha and included two small streets and some unbuilt land. This location was selected to perform the UAV flights and to develop the procedure because of its abundance of invariant elements, such as street lamps, zebra crossings, floor sinks or sidewalks, whose coordinates could be registered for use in the evaluation of the ortho-mosaicked image quality (Figure 4.1).



**Figure 4.1 Overview of the study site.**

The UAV that was used was an MD4-1000 multi-rotor drone (Microdrones GmbH, Siegen, Germany). This UAV is a quadcopter with an entirely carbon design. The UAV operation range is approximately 500 m with radio control. The system has a maximum payload of 1.2 kg, uses 4 × 250-W gearless brushless motors and reaches a cruising speed of 15.0 m/s. This system can operate from a few meters to a ceiling altitude of 1000 m and has a flying time of approximately 30 minutes using a 250-g sensor or approximately 20 minutes using a 700-g sensor (Detailed information about the specifications of the UAV can be found in (Mesas-Carrascosa et al., 2014). The UAV was equipped with a TetraCam mini-MCA camera



(TetraCam Inc., Chatsworth, CA, USA) (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).



**Figure 4.2 a) and b) UAV flying the study area equipped with the multispectral camera**

The TetraCam camera (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**) is a multispectral rolling shutter camera with six individual objectives, each consisting of a CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor sensor). Each channel has a focal length of 9.6 mm and a 1.3-megapixel (1280 × 1024 pixels) CMOS sensor that stores images on a compact flash card. The camera has user-configurable band-pass filters (Andover Corporation, Salem, NH, USA) with a 10-nm full width at half-maximum and centre wavelengths of 450 nm (blue region of the electromagnetic spectrum), 530 nm (green region), 670 and 700 nm (red region), 740 nm (red-edge region) and 780 nm (near-infrared region). The selection of this strategic and specific band of the spectrum was based on previous studies of our research group that established the relevance of visible and near-infrared range for detecting weeds (Gómez-Casero et al., 2010; Gutiérrez et al., 2008; López-Granados et al., 2006). The software PixelWrench2 was supplied with the camera to provide full camera control and image management (Tetracam, 2011), including correction of the vignette effect, alignment of the RAW image sets and building of multi-band TIFs, as explained in (Torres-Sánchez et al., 2013). The camera objectives are arranged in a 2 × 3 array, with one of them called “*master*” and the other 5 called “*slaves*”. The slave channels are labelled from “1” to “5”, while the sixth master objective is used as a reference channel to define the

global settings that are used by the slave channels. In other words, the master channel calculates its own exposure time, which is used for the slave objectives to ensure the simultaneity of image acquisition by all of the channels.



**Figure 4.3. Multispectral sensor TetraCam Mini-MCA: Distribution array of sensors.**

The coordinates of each corner of the experimental site were collected with GPS to prepare the flight routes. The UAV was flown considering the different settings of AGL and overlap. Therefore, each flight route was programmed into the UAV software to allow the UAV to reach every programmed AGL and required degree of image overlap. The AGL considered a range of altitudes from 30 to 90 m (with an increase ratio of 10 m), which provided a GSD from 1.6 to 4.9 cm for 30 to 90-m AGL. Two different end-lap and side-lap settings were studied: 60%-30% and 70%-40%, with a longitudinal overlap of 60 and 70% and a lateral overlap of 30 and 40%.

#### **4.2.2. GNSS Campaign**

A GNSS (Global Navigation Satellite System) campaign consisting of GCPs and check points was performed with two objectives: (1) to measure the coordinates of a set of GCPs for use in the aerial-triangulation phase and (2) to measure the coordinates of check points in order to assess the spatial accuracy of the resulting orthophotos. Data collection and observation were planned according to the manual of the U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2011). The GCP and check points RMSE has to be at

least three times more precise than GSD orthophotos for use as a geometric reference in photogrammetric processing and ground truth in the validation process (FGDC 1998, 2003). To reach the maximum spatial accuracy, two receivers were used: one of the receivers was a reference station from the GNSS RAP network from the Institute for Statistics and Cartography of Andalusia, Spain, and the other, Leica GS15 GNSS, was a rover receiver. A total of six GCPs, which were located on the corners and in the centre of the working area, were georeferenced using a rapid static positioning to obtain the GCPs coordinates for use in aerial triangulation. The baseline length was approximately 7 km. For each GCP, the observation time was 15 minutes, with an update rate of one-second intervals. A set of 150 check points were used to reduce the user risk (Ariza et al., 2008). These check points were measured with the Stop & Go technique as relative positioning by means of the NTRIP protocol (The Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM, for Networked Transfer via Internet Protocol). The check points had a random and well-spaced spatial distribution. All of the check points were well-defined points (streetlamps, zebra crossings, floor sinks, electrical boxes or sidewalks) in order to clearly identify them over the orthophotos.

#### **4.2.3. Photogrammetric processing**

Photogrammetric processing was divided into three stages. The exterior position and orientation parameters of the UAV, referring to the roll, pitch and yaw angles of every overlapped image, were provided by the UAV inertial system. These parameters were used as input data to the Agisoft PhotoScan software (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) photogrammetric processing. To determine the individual orientation of each stereomodel of a photogrammetric block, an aerial triangulation technique was used. One of the most commonly used and most rigorous methods is the bundle adjustment, which permits the absolute orientation of an entire block of an unlimited number of images using a few GPCs (Aber et al., 2010). The mathematical model used collinearity conditions, in which the exposure position of the sensor, any object point in the ground coordinate system and its position on the image all lay on a straight line (Lillesand et al., 2008). Next, we obtained a digital surface model (DSM). These results made it

possible to obtain individual orthorectified images and finally an ortho-mosaicked image. This processing was also performed using the Agisoft PhotoScan software. The sensor calibration was performed with the Agisoft Lens software (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia) using Brown-Conrady's distortion model before the flight, taking images of a calibration panel of known geometric properties. Next, the internal parameters of the sensor (i.e., focal length, principal point and distortion coefficients) were adjusted. The calibration parameters of the Master channel are shown in Table 4.1.

**Table 4.1 Calibration parameters of master channel TetraCam miniMCA 6.**

<b>Parameters</b>	<b>Master Channel*</b>
Focal Length (x)	1877.63 pixels
Focal Length (y)	1873.48 pixels
Principal point (x)	673.945 pixels
Principal point (y)	449.137 pixels
Skew	2.24492
Radial K1	-0.147974
Radial K2	-0.163914
Radial K3	0.70123
Tangential P1	0.000730161
Tangential P2	0.00165047

In a previous stage, pyramid images were generated to optimise the image display and calculations. To calculate the aerial triangulation, tie points were collected fully automatically, and GCP were measured manually. These tie points are common points in pairs of the overlapped single images that the PhotoScan software identifies. PhotoScan detects tie points in the source images and generates a descriptor for each point based on its location. In this way, PhotoScan carries out a feature matching across the image, similar to the SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004) approach (Chiabrando et al., 2014). Simultaneously, the six GCPs that were located in the corners and in the centre of the working area were manually identified. Once the tie points and GCP were collected, we performed automatic aerial triangulation. This procedure was required to determine the position and orientation-corrected parameters of each

image in the series of images. Then, the DSM was generated using aerial triangulation data that were calculated in earlier previous step. Every single image was orthorectified based on the external orientation and the DSM. Finally, individual orthorectified images were combined into a seamless 6-band multispectral orthomosaicked image to obtain the UAV orthophotos of the entire area of interest.

Two types of ortho-mosaicked imagery were produced considering the flight parameter settings that were described in section 2.1. The first type was generated with GSD equalling the imagery GSD taken for each flight (i.e., GSD ranging from 1.6 to 4.9 cm pixel<sup>-1</sup>), while the second type had a unique GSD of 5 cm, independent of the altitude AGL. This GSD orthophoto corresponds to the highest GDS value that was obtained in flight (90 m AGL). This degradation of spatial resolution was performed to obtain pixel resolutions of 5 cm in any of the orthomosaicked imagery independently of the flight altitude, with the objective of studying the effects of image resolution on both the generation of orthomosaics and the quality of the orthophotos as a function of the input pixel size.

The resultant orthomosaicked images must show a high-quality landscape metric and an accurate matching between consecutive images in order to guarantee good performance of the subsequent classification analyses. To assess the spatial quality of ortho-mosaicked imagery, we used a positional accuracy assessment methodology based on the assumption of error with a normal distribution. The estimation of positional accuracy was based on American Society for Photogrammetry and Remote Sensing methodology (ASPRS, 1990) that was developed for the accuracy standard for large-scale maps (ASLSM). We used the RMSE expressed in centimetres to determine the geometric accuracy of each orthophoto because the RMSE is a global indicator of the quality of the mosaic and is based on the residuals of the image coordinates and the ground coordinates of the 150 check points. The RMSE was calculated as follows: once every six-band orthomosaicked image was generated, the coordinates of the 150 check points in the working area were compared to the coordinates of these check points in the mosaicked image using Arcmap 9.3 software (Esri, Redlands, USA). Finally, the differences between the coordinates were used to calculate the RMSE. In addition, the RMSE/GSD ratio was

calculated (Sampatha et al., 2010). This ratio shows whether the error is consistent between the error and spatial resolution. A ratio smaller than one indicates no significant systematic bias in the product.

### **4.3. Results and discussion**

---

**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** summarises the results of photogrammetric processing. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a shows one of the orthophotos that were obtained at 90-m AGL. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**b, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**c and **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**d show an illustration of part of the area, considering that the GSD function of AGL is equal to 5 cm.



**Figure 4.4 (a) Overview of orthophoto 90 m-AGL, (b),(c) and (d) partial details.**

The results of the set of flights and the different ortho-mosaicked images are presented in this section. The results are shown considering different settings: flight altitude AGL, percentage of overlap, GSD of orthophotos and RMSE. Table 4.2 shows the accuracy results for the ortho-mosaics according to GSD equal than GSD link to each flight altitude AGL. Flights with a 60%-30% overlap have an RMSE with random behaviour. Higher values of altitude AGL do not always generate a higher RMSE. In contrast, flights with 70%-40% overlap show a more consistent value for RMSE, close to 3.0 cm from 90 to 60 m of AGL. The RMSE value begins to increase when the AGL decreases from a 50 to 30-m flight altitude when a decrease would be expected (Jacobsen, 2011). Considering the ratio between RMSE and orthophoto GSD, this behaviour is more pronounced, and flights with

greater overlap show a lower ratio than for the lower overlap, except for the 30-m flight altitude. In addition, from 90 to 60-m AGL, the ratio is lower than 1, indicating that the accuracy is at the sub-pixel level. This ratio increases when the altitude AGL decreases, and with a 50-m AGL, the ratio is higher than 1.

**Table 4.2. RMSE and ratio RMSE/GSD considering the GSD ortho-mosaicked imagery that was obtained according to the GSD of flight, end and side lap and flight altitude AGL.**

Altitude AGL [m]	GSD orthophoto [cm]	Overlap 60%-30%		Overlap 70%-40%	
		RMSE [cm]	RMSE/ GSD	RMSE [cm]	RMSE/ GSD
90	4.9	7.2	1.479	2.4	0.483
80	4.3	3.7	0.862	2.9	0.680
70	3.8	4.0	1.046	3.0	0.779
60	3.3	9.0	2.768	2.8	0.873
50	2.7	5.5	2.039	3.5	1.283
40	2.2	4.7	2.168	4.4	2.032
30	1.6	6.3	3.859	7.3	4.467

Table 4.3 shows the accuracy results for orthophotos with a GSD equal to 5 cm independent of the altitude AGL setting. Again, the best results appear for higher overlapping settings, corresponding to 70%-40%. When the overlapping settings equal 60%-30%, the RMSE value decreases from 90 to 70 m AGL, but its behaviour is random. For these overlapping settings, the ratio RMSE/GSD is higher than 1; therefore, the error is higher than 1 pixel, i.e., it is higher than the GSD of the orthophoto. In contrast, in general, when overlapping equals 70%-40%, this ratio is lower than 1, and the accuracy level is sub-pixel, except for at 40- and 30-m AGL. From 90 to 60-m AGL, the RMSE is consistent and begins to increase once the AGL is lower than 60 m. Summarising the results from Table 4.2 and Table 4.3, one of the primary results of this study is that the RMSE that was obtained for flight altitudes of 90-60-m AGL and overlapping of 70-40% were less than 1 pixel for both of the studied scenarios, e.g., the GSD according to the flight altitude and the GSD equal 5 cm at any altitude.

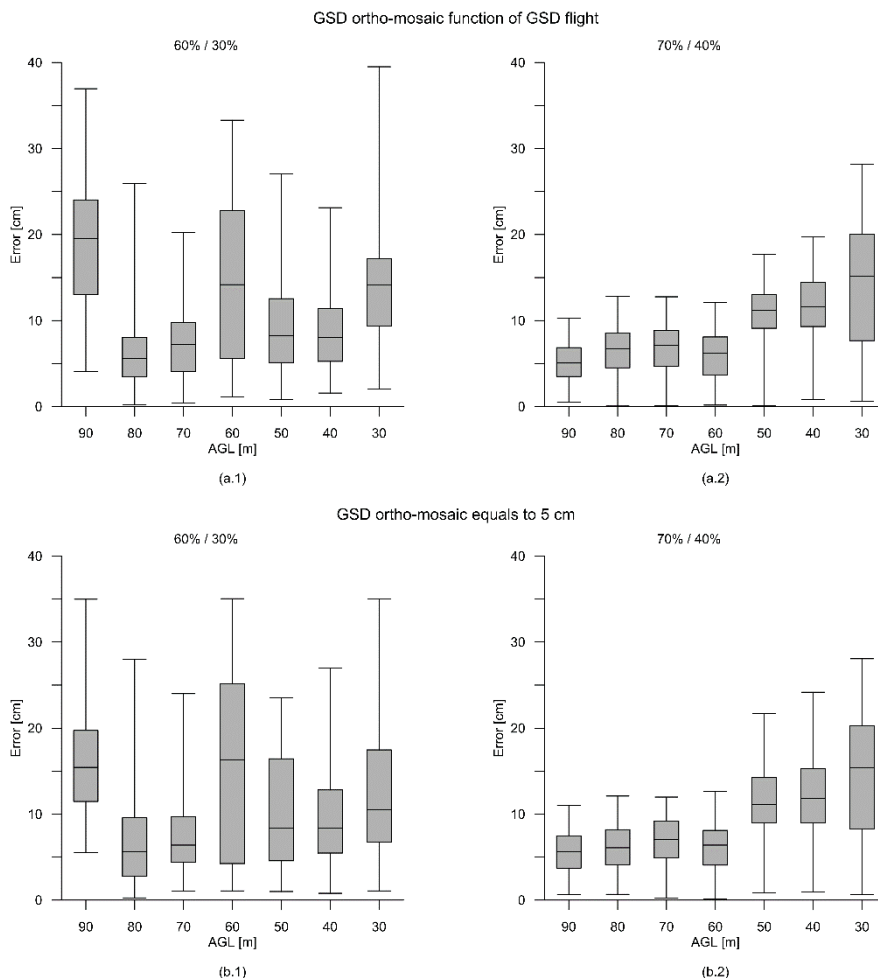


**Table 4.3 RMSE and ratio RMSE/GSD considering a GSD orthophoto equal to 5 cm for all altitude AGL, end-lap, side-lap and altitude AGL.**

<b>Altitude AGL [m]</b>	<b>Overlap 60%-30%</b>		<b>Overlap 70%-40%</b>	
	<b>RMSE [cm]</b>	<b>RMSE/GSD</b>	<b>RMSE [cm]</b>	<b>RMSE/GSD</b>
90	8.3	1.665	2.5	0.508
80	5.6	1.124	2.8	0.552
70	4.8	0.959	2.9	0.575
60	0.7	2.133	2.9	0.579
50	7.1	1.425	4.1	0.825
40	7.1	1.414	5.1	1.014
30	7.2	1.433	7.2	1.437

**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** shows the box and whisker plots of RMSE for both of the overlapping settings, altitude AGL and GSD of the ortho-mosaic. Apart from maximum errors (whiskers) around 0.4 m that were achieved for 60-30% overlap, box-plots for this overlapping were higher than for 70-40% overlapping, indicating that lower overlap produces poorer results.

*Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes*



**Figure 4.5** Box and whiskers plots graph of RMSE of orthophotos group by GSD orthophoto: (a) GSD is function of altitude AGL flight, (b) GSD is equal to 5 cm; and overlap-setting: (1): 60%-30 and (2) 70%-40%.

Comparing a 60%-30% overlap (Figura 4.5.a1 and Figura 4.5.b1) with a 70%-40% overlap (Figura 4.5.a2 and Figura 4.5.b2), an increase in overlap indicates the stable behaviour of RMSE and that increasing end- and side-laps improve the spatial accuracy of orthophotos. However, this result is valid only if altitude AGL is within the range of 90 to 60 m. Although it would be expected that a reduced-altitude AGL would mean a reduction in RMSE, the results indicate that from 50-m AGL, the RMSE begins to increase. According to Jacobsen (2011), the lower the AGL is, the lower is the RMSE; however, as previously stated, this trend

is not shown in our results. This discrepancy may be due to the equipment that was used to georeference both the coordinates of the GCPs for the aerial triangulation and the check points to assess spatial accuracy of the orthomosaicked images. Dual frequency GNSS receivers working in a GNSS network showed an accuracy approximately of 2.5 cm in the horizontal positioning (Garrido et al., 2011). Comparing this 2.5-cm GNSS accuracy with the GSD according to each flight altitude from 50 to 30-m AGL, the pixel size is smaller than the accuracy of the GNSS receiver. Kapnias et al. (2008) reported that GCPs should be at least three times more precise than the target specification for the orthophoto. These points are the geometric reference in the processing, linking pixel coordinates system with ground coordinate reference system. Therefore, in this situation, it should be better to georeference GCPs using other equipment, such as total stations, because we can get more precise coordinates through measurement survey methods.

Considering an overlap setting of 70%-40% as the best solution for this parameter (Fig. 5a2 and Fig. 5b2) and a range of altitude AGL from 90 to 60 m, it can be seen how RMSE shows a mean value equal to 3.0 cm; therefore, the altitude AGL does not seem to be a relevant parameter when working with overlap.

The progress of UAV-based projects requires a balance between data quality with end-and-side overlapping and the duration of the flight. Higher overlapping values increase the flight length. If the UAV type is a multi-rotor, the consequence is that one flight must be divided into different individual flights due to battery limitations. This division is more pronounced when the payload is heavy, as occurs when the multispectral sensor TetraCam mini-MCA 6 is embedded. According to a previous study from our group, the number of images per hectare and the flight length decreased from 117 images ha<sup>-1</sup> and 27 min at a 30-m flight altitude to 12 images ha<sup>-1</sup> and 6 min at a 100-m altitude (Torres-Sánchez et al., 2013). The first flight must be divided, while the second one can be performed completely with one battery. Therefore, the operation timing for flights is affected by the UAV battery duration because it would be necessary to change the UAV battery frequently. If waiting to change the battery were necessary, the illumination conditions could change within that time

interval, which could harm the bundle adjustment and eventually affect further image analysis. In addition, a very large number of images affect the computational cost of the mosaicking process because the number of images per hectare greatly increased at very low altitudes. These variables have strong implications in the configuration of the optimum flight mission. According to results presented herein, an increase in the altitude AGL would be a better option because the RMSE does not change consistently, and the optimum flight mission should be to acquire the imagery at the highest altitude.

As part of an overall research program to investigate the opportunities and limitations of UAV imagery in mapping early weeds in narrow crop rows (e.g., wheat, crop rows: 15-17-cm wide) and wide crop rows (e.g., maize or sunflower, crop rows: 70-75-cm wide), the obtained RMSE of 2.5-3.0 cm for 70%-40% overlap at 90-60 m AGL, would not break the crop line continuity of mosaics, and further crop-weed discrimination could potentially be achieved. In other words, regarding the potential crop misalignment, our results indicate that the overall errors were less than the spatial resolution, which would not break the crop line continuity of the main plants, such as winter or summer cereals (wheat and maize), or other crops, such as sunflower, at the studied spatial resolutions (pixels from 3.3 to 4.9 cm for 60 to 90-m flying altitudes). Gómez-Candón et al. (2014) previously demonstrated that a misalignment of wheat crop rows around 4.6 cm did not break the crop line continuity, although these authors used a low-cost-visible camera with different mosaicking conditions.

This result is relevant in weed seedling monitoring for site-specific weed management because the definition of crop row structure and row-to-row correspondence is critical for the further identification of weeds, which are usually located between crop rows, and the position of each plant relative to the crop line is the crucial feature to discriminate between weed and crop plants (Peña et al., 2013; Torres-Sánchez et al., 2014). According to (Laliberte et al., 2010), an RMSE of 1 pixel or less is desirable when working with aerial imagery from a piloted aircraft that provides a pixel size usually of greater than 50 cm, although such an RMSE is difficult to achieve for UAV imagery. These authors reported that accuracy with errors of 1.5 to 2

pixels of imagery with 8 cm spatial resolution could be acceptable for UAV flying at 214-m AGL equipped with a low-cost visible camera for rangeland monitoring. Although our RMSE results are on this threshold, there were important differences between that study (low cost visible-camera, lower spatial resolution and much higher flight altitude) and ours. These differences are crucial parameters for development using UAV and must be considered to define the range of acceptable errors in order to generate robust quantitative studies.

#### **4.4. Conclusions**

---

Because the spatial accuracy of UAV ortho-mosaicked images that are obtained using a camera with six individual objectives mainly depends on the percentage of overlap, this study describes a procedure to generate fine-scale spatial resolution ortho-mosaics considering the flight parameters. This procedure would be subsequently used in multispectral UAV imagery taken on crops for weed seedling mapping, which requires an ultra-high spatial resolution and a very-high spatial accuracy of the ortho-mosaicked image. In this study, increasing end and side laps from 60-30% to 70-40% provided an improved spatial accuracy of the orthophoto, although higher end and side laps increased the flight duration. This effect can be reduced increasing altitude AGL if the range is from 60 to 90 m. It is therefore important to assess the necessary balance among the aimed objective, costs, accuracy improvements and duration of the flight due UAV energy limitations. These results would recommend using GNSS receivers to measure GCPs when the GNSS accuracy is better than the GSD of the registered images.

In conclusion, the mosaicking procedure and studied flight setting accurately generated a six-band multispectral georeferenced orthoimage that would be appropriate for crop row detection and further weed discrimination. Therefore, our subsequent hypothesis will be focused on testing whether 70-40% overlap and a GSD orthophoto of 5 cm for a flight at 90-m AGL produce an RMSE of 2.5 cm, which would be sufficient for our

final objective of weed seedling monitoring in narrow crop rows (rows 15-17 cm apart) and wide crop rows (rows 70-75 cm apart) because the crop row continuity would not break. Research to validate this methodology on crops is currently being developed.

## 4.5. References

---

- Aber, James S., Irene Marzloff, and Johannes B. Ries. (2010). Chapter 3 Photogrammetry. In *Small-Format Aerial Photography*, edited by James S. Aber, Irene Marzloff, Johannes B. Ries, 23-39. Amsterdam: Elsevier.
- Ariza Lopez, Francisco Javier, Alan David Atkinson Gordo, and Jose Rodriguez Avi. (2008). Acceptance curves for the positional control of geographic databases. *Journal of Surveying Engineering* 134 (1):26-32.
- ASPRS. (1990). Accuracy standards for large scale maps. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56 (7):1068-70.
- Castillejo-González, Isabel Luisa, José Manuel Peña-Barragán, Montserrat Jurado-Expósito, Francisco Javier Mesas-Carrascosa, and Francisca López-Granados. (2014). Evaluation of pixel- and object-based approaches for mapping wild oat (*Avena sterilis*) weed patches in wheat fields using QuickBird imagery for site-specific management. *European Journal of Agronomy* 59 (0):57-66. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.009>.
- Chiabrando, F, A Lingua, F Noardo, and A Spanò. (2014). 3D Modelling of trompe L'oeil decorated vaults using dense matching techniques. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Volume II-5.
- de Castro, Analsabel, Montserrat Jurado-Expósito, JoséM Peña-Barragán, and Francisca López-Granados. (2012). Airborne multi-spectral imagery for mapping cruciferous weeds in cereal and legume crops. *Precision Agriculture* 13 (3):302-21. doi: 10.1007/s11119-011-9247-0.

*Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes*

- FGDC. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. Revision of geospatial positioning accuracy standards, Part 3. National Standard for spatial data accuracy, FGDC-STD-007.3-1998. FGDC standard projects <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/nssda-revision-proposal>. 26 December 2013.", Accessed 26 December 2013. FGDC standard projects <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/nssda-revision-proposal>.
- Garcia-Ruiz, Francisco, Sindhuja Sankaran, Joe Mari Maja, Won Suk Lee, Jesper Rasmussen, and Reza Ehsani. (2013). Comparison of two aerial imaging platforms for identification of Huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture* 91 (0):106-15. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.002>.
- Garrido, Ma Selmira, Elena Giménez, Ma Clara de Lacy, and Antonio J. Gil. (2011). Testing precise positioning using RTK and NRTK corrections provided by MAC and VRS approaches in SE Spain. *Journal of Spatial Science* 56 (2):169-84. doi: 10.1080/14498596.2011.623341.
- Gómez-Candón, D., A. I. De Castro, and F. López-Granados. (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture* 15 (1):44-56. doi: 10.1007/s11119-013-9335-4.
- Gómez-Casero, M.T., I.L. Castillejo-González, A. García-Ferrer, J.M. Peña-Barragán, M. Jurado-Expósito, L. García-Torres, and F. López-Granados. (2010). Spectral discrimination of wild oat and canary grass in wheat fields for less herbicide application. *Agron. Sustain. Dev.* 30 (3):689-99.
- Gutiérrez, P. A., F. López-Granados, J. M. Peña-Barragán, M. Jurado-Expósito, M. T. Gómez-Casero, and C. Hervás-Martínez. (2008). Mapping sunflower yield as affected by *Ridolfia segetum* patches and elevation by applying evolutionary product unit neural networks to remote sensed data. *Computers and Electronics in Agriculture* 60 (2):122-32. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2007.07.011>.

*Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes*

- Hunt Jr, E. R., M. Cavigelli, C. S. Daughtry, J. E. McMurtrey III, and C. L. Walthall. (2005). Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture* 6 (4):359-78.
- Jacobsen, Karsten. (2011). Geometric property of large format digital camera DMC II 140. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 2011 (2):71-9.
- Laliberte, Andrea S., Jeffrey E. Herrick, Albert Rango, and Craig Winters. (2010). Acquisition, Orthorectification, and Object-based Classification of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Rangeland Monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76 (6):661-72. doi: 10.14358/pers.76.6.661.
- Lillesand, T., R. Keifer, and J. Chipman. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Edited by Inc. John Wiley & Sons. 6th ed. New Delhi, India.
- Link, J., D. Senner, and W. Claupein. (2013). Developing and evaluating an aerial sensor platform (ASP) to collect multispectral data for deriving management decisions in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 94 (0):20-8. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.03.003>.
- López-Granados, F., J.M. Peña-Barragán, M. Jurado-Expósito, and L. García-Torres. (2006). Using remote sensing for identification of late-season grassy weeds patches in wheat (*Triticum aestivum* L.) for precision agriculture. *Weed Science* 54:346-53.
- Lowe, David G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60 (2):91-110. doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- Maza, I, F Caballero, J Capitán, J R Martínez-de-Dios, and A Ollero. (2011). Experimental Results in Multi-UAV Coordination for Disaster Management and Civil Security Applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 61 (1-4):563-85. doi: 10.1007/s10846-010-9497-5.



*Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes*

- Merino, Luis, Fernando Caballero, J. Ramiro Martínez-de-Dios, Iván Maza, and Aníbal Ollero. (2012). An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *Journal of intelligent & robotic systems* 65 (1-4):533-48. doi: 10.1007/s10846-011-9560-x.
- Mesas-Carrascosa, Francisco, Inmaculada Clavero, Juan Barrera, and Alfonso García-Ferrer. (2014). Positional Quality Assessment of Orthophotos Obtained from Sensors Onboard Multi-Rotor UAV Platforms. *Sensors* 14 (12):22394-407.
- Peña, JM, J Torres-Sánchez, Al de Castro, M Kelly, and F López-Granados. (2013). Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. *PLoS ONE* 8 (10). doi: 10.1371/journal.pone.0077151.
- Primicerio, J., S. F. Di Gennaro, E. Fiorillo, L. Genesio, E. Lugato, A. Matese, and F. P. Vaccari. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture* 13 (4):517-23.
- Rango, Albert, Andrea Laliberte, Caiti Steele, Jeffrey E. Herrick, Brandon Bestelmeyer, Thomas Schmutge, Abigail Roanhorse, and Vince Jenkins. (2006). Using Unmanned Aerial Vehicles for Rangelands: Current Applications and Future Potentials. *Environmental Practice* 8 (03):159-68. doi: doi:10.1017/S1466046606060224.
- Sampatha, Aparajithan, Don Moea, Jon Christophersona, and Gregory Stensaasb. (2010). Geometric Evaluation and Validation of Aerial and Satellite Data using Sioux Falls Geometric Test Range. In *ASPRS 2010 Annual Conference*. San Diego, California.
- Tetracam. (2011). PixelWrench 2. <http://www.tetracam.com/PDFs/PW2%20FAQ.pdf>.
- Torres-Sánchez, J., F. López-Granados, A. I. De Castro, and J. M. Peña-Barragán. (2013). Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS ONE* 8 (3):e58210.

*Capítulo 4: Accurate ortho-mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes*

- Torres-Sánchez, J., J.M. Peña, A.I. de Castro, and F López-Granados. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture* 103 (0):104-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>.
- USACE. (2011). *Engineering and design: NAVSTAR Global Positioning System Surveying*. Edited by Engineering and design, Engineering manual: EM 1110-1-1003. US Army Corps of Engineers, Washington, DC.

# **Capítulo 5:**

## **Discusión General**

---



## 5.1. Discusión General

---

Las plataformas aéreas no tripuladas junto con los sensores a bordo han experimentado grandes cambios en esta última década, ampliando con ello el abanico de aplicaciones en las que pueden emplearse para obtener información actualizada y de precisión. Las ventajas a destacar de estas plataformas son su muy alta resolución espacial y temporal que presentan respecto, por ejemplo, a plataformas espaciales o aéreas tripuladas. Además de ello, destacan por el bajo coste de adquisición y en operación y la posibilidad de usarse en ambientes de cierta peligrosidad y de difícil acceso (Escalante y Porras., 2016).

Las plataformas aéreas no tripuladas son empleadas en el campo de la Geomática para registrar imágenes mediante sensores embarcados en ellas. Estas imágenes, procesadas mediante técnicas fotogramétricas, permiten obtener productos georreferenciados con una calidad posicional adecuada para poder realizar mediciones y obtener información actualizada del territorio. En este sentido, según Mozas (2007), la calidad posicional de un producto cartográfico se realiza mediante la estimación de la exactitud posicional utilizando técnicas estadísticas de una muestra de puntos bien identificados en la cartografía generada y en el terreno. Los test o estándares utilizados para analizar la exactitud posicional utilizan una fuente de mayor exactitud que la que se va a evaluar, basándose principalmente en medidas puntuales.

La calidad posicional de un producto cartográfico obtenido mediante fotogrametría aparece directamente relacionada con la planificación del vuelo, las características de la plataforma y de los sensores. Estos factores hacen referencia principalmente a la altura de vuelo, los solapes entre imágenes y pasadas, el GSD, el modo de vuelo y la distribución de los puntos de apoyo.

En el **capítulo 2** de esta Tesis doctoral se evaluó la calidad posicional de las ortofotografías obtenidas empleando un sensor RGB embarcado en una plataforma aérea no tripulada de tipo multi-rotor. La evaluación se realizó

a través de los cinco test o estándares más utilizados por distintas agencias de cartografía. El estudio se llevó a cabo en un entorno urbano, concretamente una carretera situada entre dos áreas urbanas. La metodología llevada a cabo supuso trabajo de campo (realización de los vuelos y la toma de puntos de apoyo y de control) y trabajo de gabinete (planificación de vuelos, procesamiento y obtención de productos fotogramétricos y evaluación de la calidad de las ortofotografías).

Las ortofotografías generadas, según los resultados obtenidos con los diferentes test podrían ser usadas para un rango de escala desde 1:250 a 1:1000, siendo esta última la más adecuada, considerando el margen de error del proceso de producción, al tiempo que cumplió positivamente con todos los test considerados. Estos resultados son mejores que los obtenidos por Galván (2017). En este trabajo, el control posicional realizado de productos fotogramétricos UAV en una explotación minera resultó como escala más adecuada, una escala igual a 1:3000, debido principalmente a los cambios bruscos de escala.

Estos estándares se basan en observaciones puntuales, determinando la resolución final espacial del producto. Además, en este capítulo se describieron factores que se han de tener en cuenta a lo largo del flujo de trabajo de obtención de una ortofotografía generada por plataformas UAV como fueron la calidad del vuelo, el modelo de superficie y el procedimiento de mosaicado. Por consiguiente, de cada uno de estos factores se analizaron otros parámetros que influyen intrínsecamente como fueron el solape longitudinal y transversal, el modo de captura de las imágenes y la densidad de puntos del modelo digital entre otros.

En el **capítulo 3** de esta Tesis doctoral se establecieron las especificaciones técnicas y la configuración de la plataforma más adecuada con un sensor multispectral embarcado para generar ortofotografías precisas para la gestión de las malas hierbas en cultivos. Para ello, se tuvo en cuenta la resolución espacial y espectral.

Las especificaciones evaluadas fueron la altura de vuelo (60, 80 y 100 metros), el modo de vuelo (cruce y estático) y distribución de los puntos de apoyo (dos tipos de configuraciones). La metodología seguida, al igual que en el capítulo anterior se dividió en un trabajo de campo y de

gabinete. En el trabajo de campo se realizaron todas las posibles combinaciones, de forma que cada altura de vuelo fue realizada con los diferentes modos de vuelo y con las distintas distribuciones de los puntos de apoyo. En el trabajo de gabinete, se realizó la planificación de los diferentes vuelos realizados y se llevó a cabo todo el procesado fotogramétrico, la evaluación de la resolución espacial a través del error medio cuadrático para el análisis de la calidad posicional, así como la evaluación de la discriminación espectral.

Una de las especificaciones más relevantes y que influyeron directamente en el resto de los parámetros fue la altura de vuelo. Los resultados obtenidos mostraron que a medida que la altura de vuelo aumentaba, la duración de vuelo era menor ya que se cubría mayor superficie. Además de ello, la calidad posicional mejoró cuando el modo de vuelo era de crucero, siendo además el ratio de duración de vuelo 4:1 debido a la ausencia de parada en los puntos de toma de imágenes como ocurre en el modo estático.

Atendiendo a los distintos parámetros que intervienen en la planificación de un vuelo UAV, en primer lugar, la altura igual a 60 m AGL fue la que ofreció una mejor calidad posicional. Además, según el modo de vuelo, el modo crucero fue el que mostró los errores de los vectores menores frente al modo estático. El rango de error en modo crucero estuvo comprendido entre 8,3 cm a 13,5 cm, mientras que para el modo estático fue entre 14,5 y 28,8 cm. Por último, respecto a la configuración de los puntos de apoyo, una distribución de 5 GCP en lugar de 4 GCP mejoraba la calidad, debido a que el número y la distribución de los puntos afectan a la precisión de las ortofotografía, tal y como se resalta en el trabajo de Orti (1981). Estos resultados se hacen más evidentes cuando el modo de vuelo empleado fue de tipo crucero.

Por tanto, los resultados mostraron que existe una relación entre los parámetros de vuelo y la distribución de los puntos de apoyo con respecto a la resolución espacial. La precisión espacial en todos los casos fue mejor en el modo crucero y, considerando una distribución de 5 GCP con un 10% de margen de seguridad, el error fue de igual al tamaño de un pixel para los vuelos entre 60 y 80 metros AGL, siendo más recomendable el vuelo a

60 metros debido a la mejor resolución espacial que se obtuvo. Esta altura de vuelo quedó comprendida en el mismo intervalo que Torres-Sánchez et al (2013) definieron para vuelos con esta misma plataforma y sensor para el manejo temprano de las malas hierbas

La altura de vuelo fue también determinante en la discriminación espectral. Los resultados obtenidos demostraron que a mayor altura de vuelo peores fueron las definiciones de las curvas espectrales de las distintas cubiertas presentes en la zona de estudio. Respecto a la discriminación entre suelo desnudo, cultivo y malas hierbas, se obtuvieron diferencias significativas en el valor de índice NDVI entre el suelo desnudo y vegetación (cultivo y malas hierbas), siendo el valor del test M-Statistic igual a  $M=2,74$  el valor más elevado para el vuelo de menor altura. Los resultados obtenidos coincidieron con los obtenidos en el trabajo de Torres-Sánchez (2013) en el cual obtuvieron el valor más elevado ( $M=8,9$ ) para el vuelo de menor altura evaluado (30 metros AGL).

Los resultados obtenidos de diferenciación entre cultivos y malas hierbas no fueron tan satisfactorios debido a que se obtuvieron valores de M menores a 1. Esta limitación espectral podría solventarse complementando con la implementación de algoritmos más avanzados a través de la metodología de análisis de imágenes basa en objetos (Torres-Sánchez et al., 2015).

Tal y como se ha ido evaluando a lo largo de esta Tesis, la calidad espacial de una ortofotografía depende de diferentes factores que influyen en la planificación de vuelo y, por tanto, en los resultados finales. En el **capítulo 4**, se evaluaron diferentes combinaciones de la planificación de vuelo a través de la realización de vuelos a distintas alturas (desde 30 m AGL hasta 90 m AGL en incrementos de 10 m) y diferentes solapes (60%-30% y 70%-40%), obteniendo aquella con la que se alcanzaron los mejores resultados útiles para la detección de malas hierbas en cultivos.

En este capítulo, se realizó de igual manera trabajo de campo y de gabinete para la obtención de la información y datos, así como el análisis y procesado de éstos. En este caso, para todas las posibles combinaciones se establecieron puntos de apoyo en las esquinas y en el centro del área de estudio. Respecto a los puntos de chequeo, fueron medidos en puntos



reconocibles de terreno de modo que fueran fácilmente reconocibles en la ortofoto. Los resultados obtenidos respecto al RMSE fueron inferiores a un pixel para los vuelos realizados entre 90-60 metros y con solape de 70%-40%, lo que indicaron que la precisión espacial aumentaba cuando aumentaba el porcentaje de solape tanto longitudinal como transversal, coincidiendo estos resultados con los obtenidos en el estudio posterior realizado por Mesas-Carrascosa et al (2016) en el cual obtuvieron los valores más bajos de RMSE cuando los solapes eran mayores. Estos resultados fueron válidos para el rango de alturas comprendido entre 60 y 90 m AGL ya que a 50 m AGL y a alturas inferiores el RMSE se incrementaba al contrario de lo que cabría esperar según Jacobsen (2011). Esta discrepancia pudo estar causada por el equipamiento empleado en la toma de puntos en campo que podría no haber sido el adecuado ya que el tamaño de pixel fue menor que la precisión del receptor GNSS. Mesas-Carrascosa et al (2016) emplearon para solventar esta situación estaciones totales en la medición de puntos en terreno debido a que la precisión y la exactitud de las coordenadas de los puntos debe ser mayor que los GSD de los vuelos.

En este contexto, resulta importante destacar que cuando se realizan proyectos con este tipo de plataformas, dependiendo del objetivo a satisfacer, los parámetros y la propia configuración de vuelo son susceptibles de modificación hasta lograr aquella que cumple con los requisitos técnicos del usuario final. Por tanto, es necesario llegar a un equilibrio entre la calidad de los productos generados y las diferentes combinaciones de parámetros y configuraciones. En este estudio, el aumento de solape incrementaba la duración de vuelo, factor que fue limitante debido al peso del sensor multiespectral embarcado. Por ello, el aumento de la altura de vuelo supuso una alternativa, no produciendo prácticamente variaciones en el valor del RMSE.

Por tanto, el RMSE obtenido de 2,5-3 cm para un solape de 70%-40% a 90-60 m AGL de altura de vuelo fue satisfactorio para la detección de malas hierbas ya que se pudo evaluar alguna diferenciación de las mismas y los propios cultivos. Los resultados obtenidos mostraron errores globales menores que la resolución espacial por lo que no se rompía la continuidad de la línea de cultivo principal a las resoluciones estudiadas (3,3 a 4,9 cm).

Estos resultados fueron acordes con los obtenidos por Gómez-Candón et al (2014) en los cuales demostraron que un desalineamiento de 4,6 cm no rompía la continuidad de los cultivos.

En esta Tesis Doctoral se han llevado a cabo diferentes estudios en los cuales se han analizado diferentes configuraciones, especificaciones técnicas de las plataformas, parámetros óptimos de vuelo y diferentes sensores (RGB y multiespectral) que han permitido evaluar que las ortofotografías generadas en cada escenario han resultado viables en los distintos campos de actuación.

## 5.2. Bibliografía

---

- Escalante Torrado, J. O., & Porras Díaz, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119-140.
- Galván Rangel, J. M. (2017). Control posicional estadístico de productos fotogramétricos de la explotación minera de La Parrilla (Bachelor's thesis).
- Gómez-Candón, D., A. I. De Castro, and F. López-Granados (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture* 15 (1):44-56. doi: 10.1007/s11119-013-9335-4.
- Jacobsen, Karsten (2011). Geometric property of large format digital camera DMC II 140. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 2011 (2):71-9.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Notario García, M., Meroño de Larriva, J., & García-Ferrer, A. (2016). An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas. *Sensors*, 16(11), 1838.
- Mozas, A. T. (2007). Control de la calidad posicional en cartografía por elementos lineales. Tesis doctoral, Universidad de Jaén.
- Orti, F (1981). Optimal distribution of control points to minimize landsat image registration errors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47, 101-110.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., De Castro, A. I., & Peña-Barragán, J. M. (2013). Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PloS one*, 8(3), e58210.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., & Peña, J. M. (2015). An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV

images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 43-52.

# **Capítulo 6:**

## **Conclusiones Generales**

---



## 6.1. Conclusiones Generales

---

Esta Tesis Doctoral ha abordado la viabilidad de la generación de ortofotografías de alta resolución en diferentes campos de la ingeniería, centrándose en la civil y en la agronómica con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

1. Analizar la evolución y tipología de las diferentes plataformas aéreas no tripuladas y sensores para la obtención de cartografía a través de procedimientos fotogramétricos (capítulo 1).
2. Evaluar la calidad de las ortofotografías generadas en un entorno urbano a través de la aplicación de diferentes test de control posicional empleados en cartografía (capítulo 2).
3. Definir el conjunto de requisitos técnicos y parámetros óptimos a emplear para la obtención de ortofotografías multispectrales de muy alta resolución espacial para aplicaciones en el sector de la ingeniería agronómica (capítulos 3 y 4).

Tras los estudios realizados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Las plataformas aéreas no tripuladas junto con los sensores a bordo han experimentado un gran avance tecnológico en la última década. Los avances experimentados han permitido que estas plataformas y los sensores puedan emplearse en una gran cantidad de aplicaciones y sectores como el agroforestal, la arqueología, energía, civil, entre otros. En este sentido, estas plataformas han demostrado su viabilidad en muchos campos debido a que se han convertido en herramientas con las que es posible capturar información del territorio y, a partir de la información en tiempo real o procesada, tomar decisiones de gestión, organización y seguimiento.

2. Las principales ventajas de estas plataformas aéreas no tripuladas junto a la variedad de sensores que pueden integrarse son la muy alta resolución espacial y temporal que presentan, comparándolas con las plataformas tripuladas o con los satélites. Esto no significa que un tipo de plataformas concreto vaya a desplazar al resto en el futuro. Dado a que todas ellas permiten generar productos cartográficos, la interoperabilidad geométrica queda garantizada entre ellos. De este modo, las plataformas UAV permiten obtener información geográfica de pequeñas áreas a incorporar en el proceso de toma de decisiones junto con otras fuentes de información.
3. La aplicación de los diferentes estándares para analizar la calidad de los productos cartográficos obtenidos a través de las plataformas aéreas no tripuladas ha permitido demostrar que dichas plataformas pueden ser empleadas como una alternativa por las Agencias de Cartografía, particularmente para actualizar mapas urbanos de pequeñas áreas debido a la alta resolución temporal que se requiere, así como a la escala del producto. La escala 1:1000 resultó la más adecuada para emplear la ortofotografía generada en un entorno urbano.
4. El uso de estas plataformas junto con sensores multiespectrales para el manejo de las malas hierbas y, por tanto, en la agricultura de precisión, queda justificado por la muy alta resolución espacial y espectral ofrecida por cámaras multiespectrales para este tipo de aplicaciones. Estas resoluciones junto con la capacidad de poder volar justo en la fase del cultivo de interés han despertado un gran interés en el campo de la agricultura, haciendo que el interés por el público en general en la Geomática se esté incrementando con el paso del tiempo.
5. Los estándares de calidad de productos cartográficos se centran en la resolución espacial. Ésta aparece relacionada con la planificación del vuelo y se refieren principalmente a la altura, solapes, modo de vuelo y distribución de los puntos de apoyo en campo. La configuración y especificaciones obtenidas en un entorno urbano/rural arrojaron



resultados útiles para la agricultura de precisión, concretamente en la evaluación de malas hierbas. El RMSE obtenido de 3 cm para un solape del 70%-40% a 90-60 m AGL de altura de vuelo no rompía la continuidad de la línea de cultivo de las plantas principales.

6. A la hora de realizar un vuelo resulta muy importante establecer un equilibrio entre el objetivo a perseguir, los costes, las mejoras de precisión, la superficie a volar y la autonomía de la que se dispone. El procedimiento llevado a cabo para obtener ortofotografías de alta resolución espacial según diferentes combinaciones de alturas de vuelo y solapes entre otros, ayudan a la hora de definir la mejor configuración para lograr el objetivo y alcanzar resultados satisfactorios.

