

Estudio de precisión en la aerotriangulación de bloques de imágenes obtenidas con UAV

Study of precision in the images blocks aerotriangulation obtained with UAV

Capitán Miguel Ángel López González

REVISTA **MAPPING**
Vol. 26, 185, 42-54
septiembre-octubre 2017
ISSN: 1131-9100

Resumen

Este artículo trata sobre el uso de plataformas no tripuladas inferiores a los 2 kg de peso para la adquisición de imágenes aéreas, su posterior procesamiento y el estudio de las precisiones alcanzadas en la aerotriangulación, paso previo a la obtención de los productos finales.

Para ello se utiliza un vuelo realizado sobre las ruinas del monasterio de Tom Roden en Höxter, Alemania. Se realiza la aerotriangulación del vuelo con *software* fotogramétrico en diez supuestos distintos con el objetivo de comprobar la calidad de la aerotriangulación de bloques de imágenes capturadas con sistemas fotogramétricos RPAS con cámaras estándar no métricas, se estudia la precisión del procesado de la aerotriangulación sin puntos de control en el campo, se estudia si el uso de cámaras no métricas afecta a la precisión de los productos, se comprueba la calidad de los modelos digitales de superficie generados a partir de la nube de puntos densa y se estudian los ámbitos de uso de los sistemas RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) fotogramétricos. Como principales conclusiones se puede destacar que, con el *software* empleado se obtienen mejores resultados en la aerotriangulación y en los productos finales aumentando el solape al 80 % y que el uso de cámaras no métricas no afecta a la precisión.

Abstract

This article deals with the use of unmanned platforms of less than 2 kg in weight for the aerial image acquisition, its subsequent processing and the study of the precision reached in aerotriangulation, a step prior to obtaining the final products.

This is done using a flight made on the ruins of the monastery of Tom Roden in Höxter, Germany. The aerotriangulation of the flight with photogrammetric software is carried out in ten different assumptions in order to verify the aerotriangulation quality of blocks of images captured with RPAS photogrammetric systems with standard nonmetric cameras, the accuracy of aerotriangulation processing without points of control in the field, it is studied if the use of non-metric cameras affects the accuracy of the products, the quality of the digital surface models generated from the dense cloud of points is checked and the scopes of use of the photogrammetric RPAS systems (Remotely Piloted Aircraft System). As main conclusions can be highlighted that, with the software used, better results are obtained in the aerotriangulation and in the final products increasing the overlap to 80% and that the use of non-metric cameras does not affect the accuracy.

Palabras clave: RPAS, UAV, aerotriangulación, ortofoto, calibración, recubrimiento, punto de control, GCP, GPS/IMU, par estereoscópico, MDS.

Keywords: RPAS, UAV, aerotriangulation, orthophoto, calibration, coating, control point, GCP, GPS / IMU, esterscopic pair, MDS.

Jefe de la Sección de Cartografía General
mlopgon@ea.mde.es

Recepción 05/05/2017
Aprobación 29/06/2017

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados, llamados UAV / UAS (*Unmanned Aerial Vehicle / System*) y actualmente con más frecuencia RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) y de forma coloquial, dron (forma admitida por la RAE procedente del vocablo inglés *drone*), han sufrido en los últimos años una gran expansión tanto en su desarrollo como en sus aplicaciones. Impulsados inicialmente por sus potencialidades en el uso militar, se han extendido sus innumerables aplicaciones al entorno civil donde pueden prestar servicio en campos como las Emergencias y la Seguridad, Agricultura, Ganadería, Medio Ambiente, Deportes, Eventos, Televisión, Cine, Arquitectura, Ingeniería, Arqueología, Infraestructuras y por supuesto también en Fotogrametría.

El uso de sistemas RPAS en el campo de la fotogrametría se ha generalizado en el mundo empresarial civil mientras que apenas está introduciéndose, por ahora, en las unidades con competencias en Sistemas de Información Geográficos de las Fuerzas Armadas. En el mundo especializado se tiene consciencia de que es inevitable que tarde o temprano estos sistemas sean una fuente muy importante de captura de información geoespacial y aunque se conoce cuáles son sus limitaciones y usos adecuados, es necesario hacer un estudio profundo que quizá nos haga cambiar de opinión sobre algún aspecto. Uno de estos aspectos es el uso de cámaras no métricas para trabajos fotogramétricos. ¿Pueden ser sustituidas las costosísimas cámaras fotogramétricas de gran formato por otras cámaras no métricas y mucho más baratas?, es una pregunta difícil de responder sin tener en cuenta para qué se va a emplear esa cámara. Hoy en día, la fotogrametría de grandes extensiones de terreno necesita estas cámaras fotogramétricas, pero más que por su calidad métrica es porque las aeronaves que las utilizan son aeronaves tripuladas de alto coste por kilómetro y las cámaras métricas permiten abarcar grandes extensiones y no necesitan superar el 60% de recubrimiento para obtener resultados de calidad. Sí hay acuerdo sobre que los sistemas RPAS están cerca de eliminar casi totalmente la topografía tradicional, en fotogrametría de corto alcance las cámaras no métricas son calibradas sin ningún problema usando las propias imágenes tomadas, de manera que se eliminan casi totalmente las distorsiones, «*The tremendous development of cheap high quality digital camera and computational power of personnel computers has led, in the past decade, to a very active community of research in photogrammetry and computer vision. According, to the current literature, the «old cartographic dream» of modeling the world in 3D at*

scale one using only photo seems now almost affordable, at least from the algorithmic point of view...». (Pierrot-De-seilligny y Cléry (2011)). En este trabajo estudiaremos si es posible abandonar totalmente el trabajo de campo o todavía hay dependencia de él para comprobar los resultados, estudiaremos si la aerotriangulación sin puntos de control en el terreno es lo suficientemente precisa con algoritmos actuales de correlación de imágenes como para prescindir de ellos.

La Fotogrametría aérea tradicional utiliza aeronaves tripuladas y sistemas de adquisición de imágenes costosos y de gran calidad con cámaras métricas calibradas, con capacidad de toma de imágenes a gran altitud, por encima de los 40 000 pies. Los drones han entrado en el mundo de la Fotogrametría aérea principalmente para intentar reducir costes con respecto a la tradicional. Utilizan vehículos de pequeño tamaño, generalmente de peso inferior a los 25 kg, pero las alturas de vuelo para estos pequeños RPAS están restringidas por ley en España a los 400 pies, por lo que el ámbito en el que son usados abarca escalas grandes y por lo tanto áreas y distancias pequeñas. Los sensores que llevan a bordo pueden ser desde una cámara de un teléfono móvil o una cámara fotográfica tradicional para capturar imágenes en el espectro visible, hasta sensores multiespectrales, hiperespectrales, térmicos o incluso activos como el LiDAR. La única limitación es el peso del sensor, es por ello que no pueden montar cámaras fotogramétricas, grandes y pesadas. El uso de cámaras fotográficas no métricas puede parecer un problema para obtener productos de calidad ya que no se conocen con exactitud los parámetros del objetivo ni sus distorsiones. Esta circunstancia puede afectar a los errores cometidos en la aerotriangulación y en los posteriores productos y se solventa utilizando modelos matemáticos generales de la distorsión de los objetivos y métodos de ajuste que calculan simultáneamente la aerotriangulación y los parámetros de calibración de la cámara. Otro paso adelante en el abaratamiento de costos podría ser la disminución al mínimo o incluso la desaparición del apoyo de campo, que puede pasar por disponer de unos sistemas GPS/IMU a bordo de alta precisión. En este trabajo sólo se dispone de un proyecto en el que se tiene datos de campo pero se desconocen las coordenadas y orientación de los fotocentros, pero se simularán calculándolos en la propia aerotriangulación para después aplicarlos a distintos supuestos de cálculo.

El uso de cámaras no métricas en los RPAS fotogramétricos requiere de la ejecución de un proceso de calibración previo o posterior al vuelo para minimizar los errores debidos a la distorsión del objetivo y a la falta de conocimiento de la geometría de la cámara. Se expone una breve introducción teórica a la calibración de cámaras y

al tipo de calibración que se emplea en el vuelo que se analiza en este artículo.

1.1. Calibración de la cámara

La calibración se define en Martín et al. (2004) como «el proceso en el que tratan de determinarse los parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y físicos (parámetros de la distorsión radial y tangencial) de la toma de las fotografías. También puede incluirse en éstos últimos la falta de planaridad del plano imagen y del plano focal».

Una de las razones por las que la fotogrametría con RPAS es mucho más barata que la tradicional es que no utiliza cámaras métricas para realizar la toma de imágenes, sino que hace uso de cámaras fotográficas convencionales no profesionales. Estas cámaras, de precio infinitamente menor, adolecen de varias características técnicas que sí cumplen las cámaras métricas:

- Geometría interna de la cámara estable y conocida. La construcción de la óptica de focal fija y foco en el infinito hace que tenga una distancia focal muy estable y que se determina con exactitud a través de calibraciones en fábrica y posteriores. También se determina con exactitud el punto principal sobre el plano focal.
- En la construcción de los objetivos se minimizan las distorsiones de todo tipo que sufren las imágenes tomadas a través de ellos. Las distorsiones radiales y tangenciales que no se pueden corregir en la fase de construcción son calibradas a fin de conocer su magnitud.

El uso de cámaras no métricas requiere pues emplear algún método que permita calcular los parámetros geométricos de la cámara y los parámetros de distorsión de las lentes que son desconocidos.

1.1.1. Modelización de la cámara y lentes

Para calcular los parámetros antes mencionados se emplean modelos matemáticos de la geometría de la

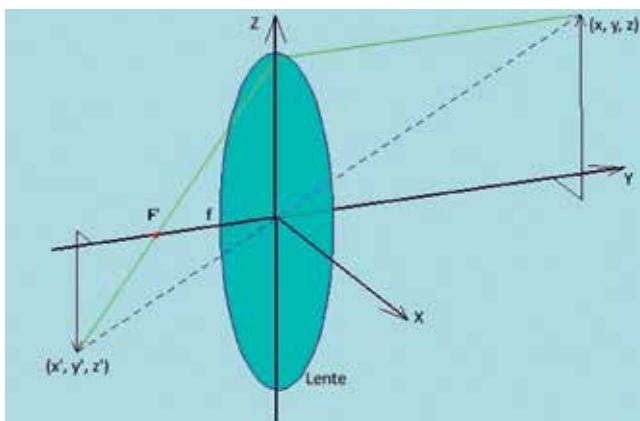


Figura 1.1

cámara y de las distorsiones de las lentes que se aplican en distintos procesos para resolver el problema, como se verá más adelante.

a) Modelo geométrico de la cámara

Se trata de encontrar la transformación que permite obtener a partir de las coordenadas de un objeto fotografiado (x, y, z) las coordenadas de su imagen (x', y', z') o viceversa, basándose en el modelo más básico de cámara fotográfica, que cumple las leyes de la proyección perspectiva.

Siguiendo el razonamiento hecho en Botero (2005), de la figura 1.1 deducimos que se cumplen las siguientes razones:

$$\frac{z}{y} = \frac{z'}{y'}$$

$$\frac{x}{y} = \frac{x'}{y'}$$

$$\frac{z}{f} = \frac{z'}{y' + f}$$

$$\frac{x}{f} = \frac{x'}{y' + f}$$

Despejando x', y' y z' en función de x, y, z y f se obtiene

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{1 - y/f} \\ y' = \frac{y}{1 - y/f} \\ z' = \frac{z}{1 - y/f} \end{cases}$$

«La introducción de coordenadas homogéneas facilita la simplificación de la formulación de las propiedades de las cámaras» Olivier D. Faugeras (2005). Usando coordenadas homogéneas con las que a cada punto en \mathbb{R}^3 se le añade una cuarta coordenada que representa el factor de peso, y que se relacionan de la siguiente manera, siendo w dicho factor de peso

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x/w \\ y/w \\ z/w \\ 1 \end{pmatrix}$$

podemos construir la matriz de transformación homogénea que nos permita obtener las coordenadas imagen a partir de las coordenadas objeto o viceversa. Esta matriz

es de la forma⁽¹⁾

$$T = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escala} \end{pmatrix}$$

así pues, considerando el eje óptico en el sentido del eje Y, como se puede ver en la figura 1.1, dado un punto (x, y, z) la transformación toma la forma

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 - \frac{y}{f} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{f} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

en la que el punto transformado sería

$$\left(\frac{x}{1 - \frac{y}{f}}, \frac{y}{1 - \frac{y}{f}}, \frac{z}{1 - \frac{y}{f}} \right),$$

como se ha visto anteriormente, que depende del valor de la focal f, de aquí la necesidad de conocer su valor con la máxima precisión.

Por otro lado, los objetos situados a distancia mayor que la hiperfocal se transforman siempre, en este modelo, sobre el plano focal, con lo que se utiliza un sistema de referencia bidimensional para el espacio imagen. Este sistema de referencia toma su origen o bien en función del formato del sensor (esquina superior izquierda), o bien respecto a la posición del punto principal (punto de corte entre el eje óptico y el plano focal). De esta manera la posición del punto principal sería el segundo parámetro del modelo a determinar con precisión.

b) Modelo de la distorsión de las lentes

La distorsión de las lentes consiste en que los rayos de luz que llegan desde un objeto al punto nodal incidente con una determinada dirección salen de la lente o conjunto de lentes por el punto nodal emergente con una dirección distinta, de manera que por lo general el rayo incidente y el emergente no son coplanarios (Figura 1.2). Al llegar el rayo al plano focal incide en un punto que se encuentra a una cierta distancia del punto teórico de incidencia para el modelo de cámara oscura (*pinhole*). El vector que une estos dos puntos sobre el plano focal tiene dos componentes, la componente radial ρ , en dirección radial desde el punto de corte entre el eje óptico y el plano focal, y la componente tangencial τ , perpendicular respecto a la dirección radial. El módulo

de estos dos vectores nos proporciona la distorsión radial y la distorsión tangencial en ese punto respectivamente, que son parámetros físicos internos de la cámara a determinar en el proceso de calibración.

Si se quiere obtener las coordenadas no distorsionadas (\hat{x}, \hat{y}) a partir de las coordenadas imagen distorsionadas (x, y) utilizamos la expresión

$$\begin{cases} \hat{x} = x + \rho_x + \tau_x \\ \hat{y} = y + \rho_y + \tau_y \end{cases} \quad (1.1)$$

con lo que es necesario encontrar expresiones que aproximen tanto la distorsión radial ρ , como la tangencial τ .

Distorsión radial.

La distorsión de unas lentes perfectamente centradas y cuyo eje es normal al plano fotográfico es simétrica alrededor del punto principal y es, consecuentemente, función sólo de la distancia radial (Brown (1964)), luego

$$\rho = \Delta r = F(r)$$

siendo r la distancia al punto principal, $\rho = \Delta r = r' - r$ la distorsión radial (ver figura 1.3).

La distorsión radial se aproxima generalmente a través del modelo introducido por (Brown (1971))

$$\begin{pmatrix} \hat{x} - x_c \\ \hat{y} - y_c \end{pmatrix} = L(r) \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

donde (x, y) son las coordenadas imagen del punto distorsionado, (\hat{x}, \hat{y}) son las coordenadas imagen no distorsionadas, (x_c, y_c) son las coordenadas del punto principal, $r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$ es la distancia euclídea entre el punto (x, y) y el punto principal, y $L(r)$ es la función que se usa para aproximar el comportamiento de la distorsión radial. La clave, pues, es la selección que se haga de esta función. Entre las más usadas están las siguientes (Lahoz et al. (2003)) (donde k_i son los coeficientes de distorsión radial):

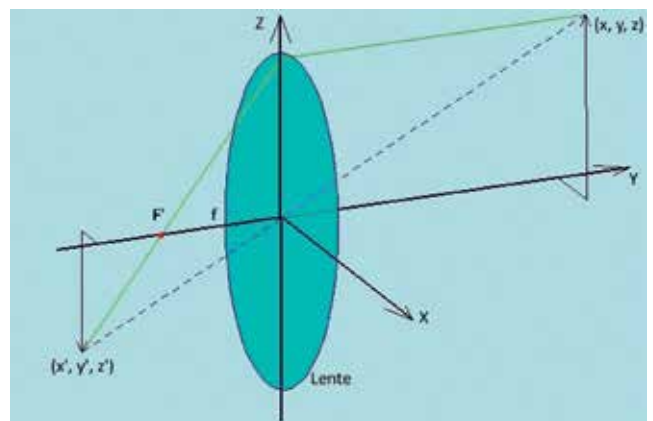


Figura 1.2

⁽¹⁾http://icaro.eii.us.es/descargas/tema_4_parte_2.pdf

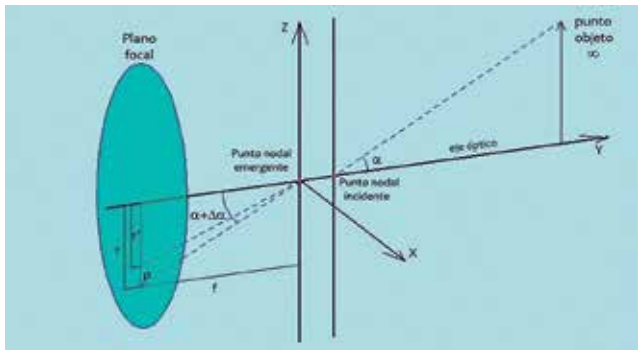


Figura 1.3

Modelo de Brown

$$L(r) = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7$$

Modelo de USGS⁽²⁾

$$L(r) = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7$$

Modelo de la ISPRS⁽³⁾

$$L(r) = k_1 r(r^2 - r_0^2) + k_2 r(r^4 - r_0^4) + k_3 r(r^6 - r_0^6)$$

Otro modelo polinomial usado es el modelo de potencias de orden par (Faisal Bukhari (2013))

$$L(r) = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots$$

Hay objeciones a los modelos anteriores, estos modelos funcionan bien con pequeñas distorsiones, pero no tan bien cuando las distorsiones son importantes, Fitzgibbon (2001) propuso el modelo de división, que es una aproximación más precisa y más adecuada a sistemas con distorsión radial importante:

$$L(r) = \frac{1}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots}$$

Una simplificación de éste último modelo es el modelo de división de parámetro único (*single-parameter division model*), en el que sólo se considera el parámetro k_1 , en este caso el modelo introducido por Brow queda

$$\begin{pmatrix} \hat{x} - x_c \\ \hat{y} - y_c \end{pmatrix} = \frac{1}{1 + k_1 r^2} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix}$$

o lo que es lo mismo

$$\begin{cases} \hat{x} = x_c + \frac{x - x_c}{1 + k_1 r^2} \\ \hat{y} = y_c + \frac{y - y_c}{1 + k_1 r^2} \end{cases}$$

Distorsión tangencial.

Es una distorsión menos importante, en general, que la radial. Se produce cuando el conjunto de lentes no está exactamente centrado con el eje óptico. Brown (1971) modela la distorsión radial mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{cases} \tau_x = P_1(r^2 + 2(x - x_c)^2) + 2P_2(x - x_c)(y - y_c) \\ \tau_y = 2P_1(x - x_c)(y - y_c) + P_2(r^2 + 2(y - y_c)^2) \end{cases} \quad (1.3)$$

en las que τ_x y τ_y son las componentes de la distorsión tangencial o descentrada, (x, y) son las coordenadas imagen distorsionadas, (x_c, y_c) son las coordenadas del punto principal y P_1 y P_2 son los coeficientes de distorsión tangencial.

Finalmente a partir de las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.3) obtenemos una expresión que nos da las coordenadas no distorsionadas de un punto imagen:

$$\begin{cases} \hat{x} = x_c + L(r)(x - x_c) + P_1(r^2 + 2(x - x_c)^2) + 2P_2(x - x_c)(y - y_c) \\ \hat{y} = y_c + L(r)(y - y_c) + 2P_1(x - x_c)(y - y_c) + P_2(r^2 + 2(y - y_c)^2) \end{cases} \quad (1.4)$$

1.1.2. Método de calibración basado en triangulación, Auto-calibración.

Una vez analizados los modelos de cámara y distorsiones hay que aplicar algún procedimiento que mida físicamente o calcule los parámetros internos de la cámara. Se puede consultar una clasificación extensa de técnicas de calibración en Reznicek (2014), pero en el presente artículo nos centraremos en el método de auto-calibración, que es el que emplea el software usado en los cálculos.

La Auto-calibración (*self-calibration*) es el método en el que <<se utiliza la información presente en las imágenes tomadas desde la cámara no calibrada para determinar sus parámetros de calibración a la vez que se determinan sus parámetros de orientación externa>> (Fraser (1997)). Se basa en el método de haces de rayos (*bundle adjustment*) en el que se añaden parámetros adicionales, los parámetros de calibración, a las ecuaciones de colinealidad.

Partiendo de las ecuaciones de colinealidad (Broncano Mateos (2009)):

$$\begin{cases} x_a - x_c = -f \cdot \frac{r_{11}(X_A - X_0) + r_{21}(Y_A - Y_0) + r_{31}(Z_A - Z_0)}{r_{13}(X_A - X_0) + r_{23}(Y_A - Y_0) + r_{33}(Z_A - Z_0)} \\ y_a - y_c = -f \cdot \frac{r_{12}(X_A - X_0) + r_{22}(Y_A - Y_0) + r_{32}(Z_A - Z_0)}{r_{13}(X_A - X_0) + r_{23}(Y_A - Y_0) + r_{33}(Z_A - Z_0)} \end{cases} \quad (1.5)$$

siendo

- Coordenadas imagen $(x_a, y_a, -f)$
- Coordenadas del centro de proyección (X_0, Y_0, Z_0)

⁽²⁾(U.S. Geological Survey) www.usgs.gov

⁽³⁾International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. www.isprs.org

- Coordenadas del punto objeto (X_A, Y_A, Z_A)
- Coordenadas del punto principal (x_c, y_c)
- Matriz de rotación

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

en la que están implícitos los elementos de rotación (ω, φ, κ).

Introducimos en la ecuación (1.5) los parámetros adicionales Δx e Δy , siendo

$$\begin{cases} \Delta x = \hat{x} - x_c \\ \Delta y = \hat{y} - y_c \end{cases}$$

donde (\hat{x}, \hat{y}) son las coordenadas no distorsionadas que aparecen en la expresión (1.4) y (x_c, y_c) son las coordenadas del punto principal, con lo que

$$\begin{cases} \Delta x = L(r)(x - x_c) + P_1(r^2 + 2(x - x_c)^2) + 2P_2(x - x_c)(y - y_c) \\ \Delta y = L(r)(y - y_c) + 2P_1(x - x_c)(y - y_c) + P_2(r^2 + 2(y - y_c)^2) \end{cases}$$

donde podemos elegir como función de distorsión radial $L(r)$ el modelo de Brown:

$$L(r) = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7$$

Finalmente obtenemos las ecuaciones de colinealidad con los parámetros adicionales de orientación interna y distorsiones de la cámara:

$$\begin{cases} x_a - x_c + \Delta x = -f \cdot \frac{r_{11}(X_A - X_0) + r_{21}(Y_A - Y_0) + r_{31}(Z_A - Z_0)}{r_{13}(X_A - X_0) + r_{23}(Y_A - Y_0) + r_{33}(Z_A - Z_0)} \\ y_a - y_c + \Delta y = -f \cdot \frac{r_{12}(X_A - X_0) + r_{22}(Y_A - Y_0) + r_{32}(Z_A - Z_0)}{r_{13}(X_A - X_0) + r_{23}(Y_A - Y_0) + r_{33}(Z_A - Z_0)} \end{cases}$$

Se ha empleado el conjunto de parámetros adicionales más comunes para compensar los errores sistemáticos en las cámaras CCD, que son los definidos por Brown (1971), estos parámetros son la distancia principal f , el punto principal (x_c, y_c), así como tres coeficientes de distorsión radial k_1, k_2 y k_3 y dos de la distorsión tangencial P_1 y P_2 . El modelo se puede ampliar con dos parámetros adicionales como son la distorsión dentro del plano imagen del tamaño del pixel en x y en y , B_1 y B_2 , o la falta de planicidad del sensor (Fraser (1997)), estos términos son raramente significativos en las cámaras digitales modernas (Remondino y Fraser (2006)), pero se suelen calcular en los *software* comerciales como PhotoScan de Agisoft u ortoDrone de SRMConsulting.

2. MATERIAL Y MÉTODO

No se dispone de ningún sistema RPAS por lo que la única opción es conseguir un vuelo realizado anteriormente

con las características necesarias para poder estudiar la calidad de la aerotriangulación. La situación ideal es conseguir un vuelo realizado con sistema GPS/IMU del cual obtener coordenadas de los fotocentros así como orientación de la cámara en cada toma, y por otro lado medir en el terreno una serie de puntos de control y de chequeo.

La empresa SRM Consulting⁽⁴⁾ se presta amablemente a colaborar proporcionando un proyecto de vuelo sobre las ruinas del monasterio de Tom Roden en Höxter, Alemania. Este proyecto se realizó colocando dianas sobre el terreno de las que se dispone de coordenadas. El único problema es que las imágenes se tomaron sin GPS/IMU por lo que no tenemos coordenadas ni orientación de los fotocentros. El vehículo aéreo empleado fue un cuadrocóptero con una cámara Sigma DP1 Merrill con un sensor tipo CMOS y formato APS-C (23.5mm x 15.7mm) de 14,8 Mpixel.

Se dispone de una licencia de un mes del software de SRM Consulting sobre dos de sus módulos, ortoDrone para cálculo de aerotriangulación y obtención de nube de puntos y ortoSky para la captura estereoscópica de información vectorial. Se realiza de nuevo la aerotriangulación con PhotoScan de Agisoft, con el fin de tener una confirmación de resultados.

Se han creado planificaciones ficticias a fin de estudiar y comparar los proyectos tradicionales de fotogrametría



Figura 2.1. Vuelo escala 1:30 000 sobre Zaragoza (pasadas en verde). Se representa un vuelo del Gatewing X-100 de Trimble (rojo) de 400 imágenes

⁽⁴⁾<http://srmconsulting.es/>

con aeronaves tripuladas frente al uso de RPAS. Para ello se parte de un supuesto en el que se pretende cubrir un área de 31 km x 34 km aproximadamente, tanto por un vuelo tradicional con un recubrimiento longitudinal del 60 % y transversal del 30 %, como por vuelos con los RPAS Gatewing X-100 y UX5 de Trimble tanto con recubrimiento 60/30 como 80/40. Se ha utilizado el software GSD Calculator V4.23 para realizar la simulación.

En la figura 2.1 están representadas las pasadas realizadas por un vuelo a escala 1:30 000 sobre una zona cercana a Zaragoza, y también se aprecia una pequeña zona que se voló con el Gatewing X-100 en 2013 en el que se realizó un total de 400 imágenes. Se calcula adicionalmente el mismo vuelo con un recubrimiento del 80% para el Gatewing X-100, pues los sistemas RPAS suelen emplear este recubrimiento o superior.

A fin de poder comparar los proyectos volados con aeronaves tripuladas y con RPAS se ha partido de valores de GSD muy bajos, que son los obtenidos con sistemas RPAS volados a 120 metros de altura, máxima actualmente permitida para sistemas RPAS de menos de 25 kg de MTOW según la normativa actual⁽⁵⁾. Estos valores no son aplicables a vuelos con aeronaves tripuladas pues éstas deben volar a una altura mínima de 500 metros sobre el nivel del suelo aproximadamente. Pero con el objeto de comparar ambos sistemas se consideran valores extremos de GSD y, por lo tanto, alturas de vuelo que normalmente no se usan. Se asigna a los sistemas RPAS una velocidad de 80 km/h y a los tripulados 185 km/h.

En la Tabla 2.1 se resumen los cálculos fijando el foco en el número de fotogramas necesarios para cubrir la zona representada en la figura 2.1 con un solape 60/30 y con un tamaño de pixel determinado.

Usando el Gatewing X-100, para cubrir la zona con un GSD de 3,82 cm necesitamos 266 006 fotogramas, 163,3 horas de vuelo, 218 ciclos de batería (lo que requiere rea-

GSD(m)	Gatewing X-100	Gatewing UX5	Ultracam EAGLE UCE80
3,82	266006	164923	10026
5,13	144976	91019	5541
9,55	42102	26238	1613
10,25	36363	22672	1440
14,65	17804	11161	696
23,8	6771	4244	264
31,75	2799	2356	157

Tabla 2.1 Comparación GSD - número de imágenes

⁽⁵⁾http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/cias_empresas/trabajos/rpas/marco/default.aspx

lizar un mínimo de 218 vuelos). Con el modelo Gatewing UX5, modelo posterior al X-100 en el que se mejoran las prestaciones, necesitamos 164 923 fotogramas, 121 horas de vuelo, 161 ciclos de batería. Por último, de realizar este hipotético vuelo con una aeronave tripulada utilizando la cámara Ultracam Eagle UCE80, necesitamos 10 026 fotogramas y 15,6 horas de vuelo.

En la Figura 2.2 se representan las gráficas que relacionan el GSD con el número de imágenes para estos sistemas y se puede apreciar como aumenta el número de fotogramas en los sistemas RPAS de forma exponencial al disminuir el GSD. Si se tiene en cuenta las limitaciones legales en la altura de vuelo de los sistemas RPAS de menos de 25 kg de MTOW y las limitaciones físicas de las aeronaves tripuladas para bajar de determinada altura de vuelo en función, principalmente, de la capacidad del sistema FMC⁽⁶⁾ de corregir la imagen por el movimiento de la aeronave, se llega a la conclusión de que las escalas de utilización de ambos sistemas son prácticamente disjuntas.

2.1 Procesamiento de las imágenes

Una vez obtenidas las imágenes se tratan con un software de procesamiento disponible. Como se ha indicado anteriormente se han empleado ortoDrone de SRMConsulting y Photoscan de Agisoft.

Con ortoDrone se sigue el siguiente flujo de procesamiento:

- **Paso 0:** se añade una cámara y se introducen los datos básicos de la cámara, tamaño del sensor y distancia focal, o bien se extraen de los metadatos de la imagen a través del formato EXIF (Exchangeable image file format, ver especificaciones en JEI-TA (2002)) o se importan de fuentes externas. Ver figura 2.3. A continuación se cargan las imágenes pinchando en el botón correspondiente en el panel derecho.

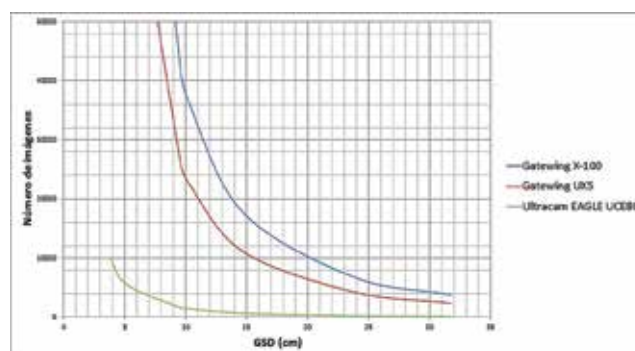


Figura 2.2. Gráficas que relacionan el GSD deseado con el número de imágenes necesarias para abarcar el área de estudio

⁽⁶⁾Forward Motion Compensation: sistema mecánico o digital de compensación del movimiento de la aeronave que asegura que la imagen no salga «movida»

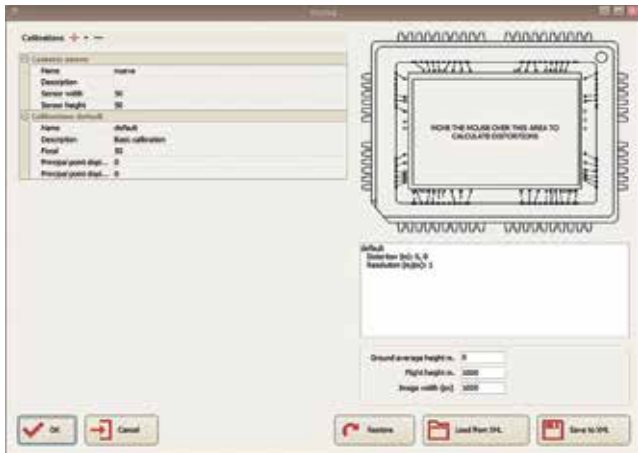


Figura 2.3. OrtoDrone, formulario para introducir datos de la cámara

- **Paso 1:** se abre el formulario de flujo de trabajo en el que aparecen el resto de pasos (Figura 2.4). Se realiza la orientación interna y relativa de las imágenes calculando una nube de puntos de paso. En la figura 2.5 se puede ver el resultado de este proceso por el que se consiguen una mayor o menor cantidad de puntos de paso en función del número de píxeles con el que se trabaje (utiliza algoritmos de la herramienta APERO, *Aérotriangulation Photogrammétrique Expérimentale Relativement Opérationnelle*, Pierrot-Deseilligny y Cléry (2011) que, para la búsqueda de estos puntos, emplea imágenes piramidales).

- **Paso 2:** aerotriangulación, genera las orientaciones absolutas de los fotocentros y una nube de puntos de paso. En esta fase se debe cargar el fichero de coordenadas de los puntos de control en el terreno (GCP) y se deben señalar éstos sobre las imágenes. Tiene tres modos de procesamiento:

1. Utilizando solo GCP. Por lo general se despliegan una serie de dianas sobre la zona a fotografiar de las que se obtienen coordenadas precisas.
2. Utilizando solo fichero de orientación. Se captura en vuelo por el sistema GPS/IMU y se almacena en los metadatos (EXIF) de la imagen.
3. Utilizando fichero de orientación y puntos de control.

- **Paso 3:** obtención de productos

1. Ortofoto de baja resolución.
2. Ortofoto de alta resolución.
3. Nube de puntos densa.

Los pasos 2 y 3 se basan en la utilización de los algoritmos desarrollados por el programa MICMAC (*Multi Image Matches for Auto Correlation Methods*) del laboratorio MATIS, Pierrot-Deseilligny (2015).

Con PhotoScan se sigue el siguiente flujo de procesamiento:

- **Paso 0:** se cargan las imágenes en el menú *Flujo de trabajo/Añadir fotos*, el programa lee del EXIF automáticamente los datos de la cámara (distancia focal, dimensiones del sensor y tamaño de píxel).
- **Paso 1:** orientar las fotos. Si las imágenes traen información de orientación en el EXIF se cargan automáticamente, si se ha obtenido esta información con herramientas externas, como es este caso (se han calculado las coordenadas de los fotocentros y las orientaciones de las imágenes en la prueba 4 con ortoDrone), se carga el fichero de orientaciones y en todo caso se introduce el sistema de coordenadas (Gauss-Kruger zone 3 EPSG: 31467). A continuación se ejecuta el proceso que calcula la calibración de la cámara y la orientación externa de forma simultánea.
- **Paso 2:** crear la nube de puntos densa, que se utilizará posteriormente para generar un Modelo Digital de Superficie (MDS) con el que se construirá la ortofoto.
- **Paso 3:** crear malla de polígonos como paso previo al modelo digital de superficie.



Figura 2.4. OrtoDrone, formulario del flujo de trabajo

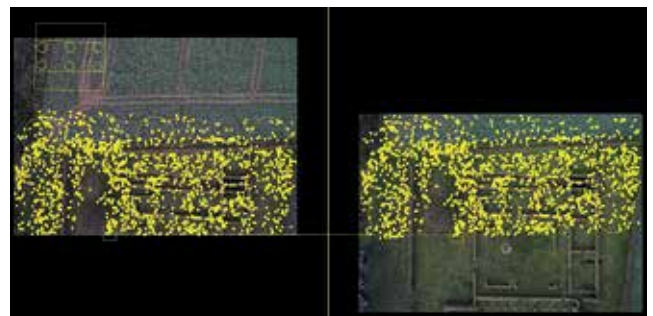


Figura 2.5. Paso 1. Cálculo de la orientación interna y relativa determinando puntos de paso (tie points)

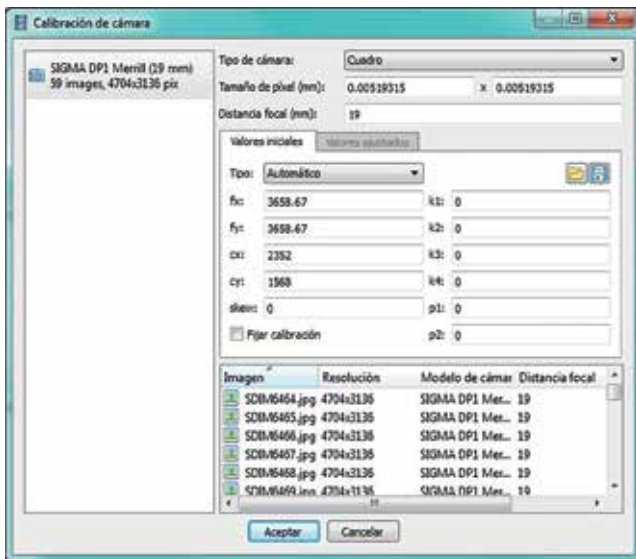


Figura 2.6. Formulario de calibración de la cámara



Figura 2.8. Ortofoto de las ruinas de Tom Roden

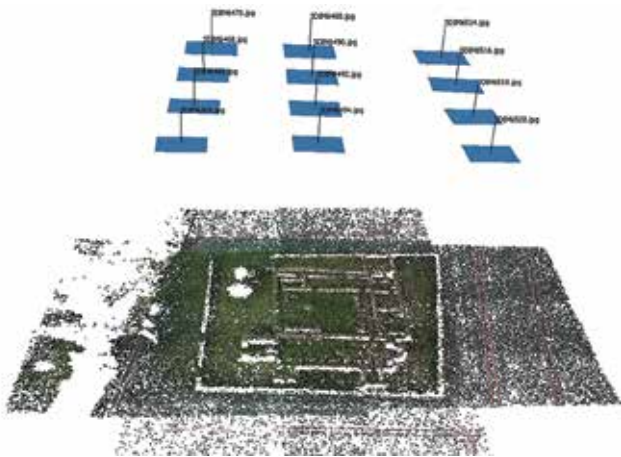


Figura 2.7. Resultado de la orientación de las imágenes con la nube de puntos de paso empleada

- **Paso 4:** exportar la ortofoto y el modelo digital de superficie.

2.2. Metodología de investigación

Se parte de las 59 imágenes ofrecidas por SRM Consulting sobre las ruinas de Tom Roden (Figura 2.8).

En este proyecto se toman las imágenes con una cámara Sigma DP1 Merrill sobre las ruinas en las que previamente se han medido con precisión topográfica sobre el terreno 9 Puntos en la proyección 3-degree Gauss-Kruger zone 3 (EPSG 31467). El proyecto de vuelo tiene un recubrimiento medio tanto longitudinal como transversal superior al 80 %. Se decide hacer pruebas con todas las imágenes y recubrimiento del 80 % y con un subconjunto de ellas con un recubrimiento aproximado del 60 %.

Se harán tres pruebas para cada recubrimiento y con cada software de procesamiento disponible, a

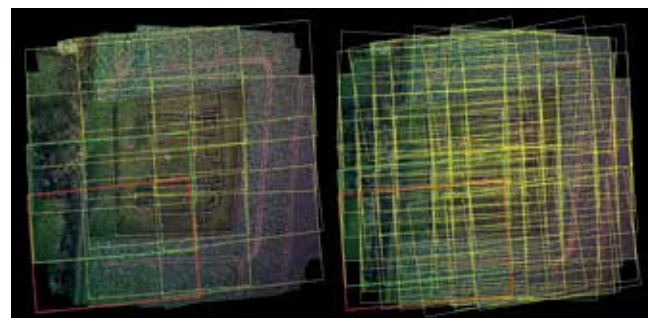


Figura 2.9. Huellas de los dos recubrimientos

saber, ortoDrone de SRM Consulting y PhotoScan de Agisoft. A continuación se especifica cada prueba:

- Pruebas con el software ortoDrone

1. Imágenes con 60 % de recubrimiento y utilizando solo puntos de control en el terreno (GCP).
2. Imágenes con 60 % de recubrimiento y utilizando solo fichero de orientación.
3. Imágenes con 60 % de recubrimiento y utilizando GCP y fichero de orientación.
4. Imágenes con 80 % de recubrimiento y utilizando solo puntos de control en el terreno (GCP).
5. Imágenes con 80 % de recubrimiento y utilizando solo fichero de orientación.
6. Imágenes con 80 % de recubrimiento y utilizando GCP y fichero de orientación.

Posteriormente a cada prueba de este primer grupo se mide en OrtoSky estereoscópicamente los puntos de chequeo, números 104, 106, 108 y 110, y se comparan con los valores tomados en campo a fin de valorar la calidad de la aerotriangulación. También se medirán valores x e y de esos puntos en la ortofoto de

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda					
SDIM6464.jpg	3527621.552	5739181.045	153.93968	-1.05461	-0.469376	-15.349258			
SDIM6466.jpg	3527617.243	5739204.794	153.928143	-0.79164	-0.054734	-14.030042			
SDIM6468.jpg	3527612.63	5739228.467	153.944399	-0.287405	-0.127209	-13.74584			
SDIM6470.jpg	3527608.083	5739251.372	154.262236	0.189232	-0.150382	-14.326465			
SDIM6488.jpg	3527635.755	5739260.768	153.506204	0.923777	0.406143	-14.640175			
SDIM6490.jpg	3527640.671	5739238.071	153.326426	1.037833	0.195279	-13.025776			
SDIM6492.jpg	3527645.774	5739215.115	152.976872	-0.455953	0.364403	-14.632904			
SDIM6494.jpg	3527650.731	5739191.074	153.596329	-0.33229	0.338557	-14.09068			
SDIM6514.jpg	3527674.704	5739269.742	153.137131	1.165924	0.810895	-15.280145			
SDIM6516.jpg	3527680.046	5739246.455	152.791509	0.164958	0.747016	-11.573648			
SDIM6518.jpg	3527685.429	5739222.992	152.742395	-0.026061	0.498837	-16.703265			
SDIM6520.jpg	3527689.913	5739199.718	152.625422	-0.425808	0.347412	-15.443311			

Figura 2.10. Fichero de orientación para las pruebas con solape del 60 %

alta calidad generada. En todos los casos se ejecuta el paso 1 con los parámetros *Detection quality = High* y *Working width (pixels) = Small (1176)*.

- Pruebas con el software PhotoScan
 7. Imágenes con 60 % de recubrimiento y utilizando GCP y fichero de orientación.
 8. Imágenes con 60 % de recubrimiento y utilizando solo fichero de orientación.
 9. Imágenes con 80 % de recubrimiento y utilizando GCP y fichero de orientación.
 10. Imágenes con 80 % de recubrimiento y utilizando solo fichero de orientación.

En cada prueba de este segundo grupo se realizará el modelo digital de superficie (MDS) y la ortofoto de alta calidad, y sobre ellos se medirán los puntos de chequeo haciendo uso del software QGIS Desktop V. 2.12.1, para valorar la calidad de la aerotriangulación. Con este software no es posible realizar la prueba de cálculo solo con GCP sin fichero de orientación.

El fichero de orientación es un fichero de texto que contiene el nombre de la imagen, las coordenadas de los fotocentros y los valores de ω , φ y κ (Figura 2.10). Estos valores son obtenidos con el sistema GPS/IMU del sistema RPAS o bien, como en este caso, calculados en la Prueba 4 con ortoDrone.

Los puntos de control (GCP) se proporcionan también como un fichero de texto. Están numerados desde el 102 al 108. En todos los casos en los que se utiliza GCP se toman como puntos de control los GCP número 102, 103, 105, 107 y 109, distribuidos como se puede ver en la figura 2.11 y el resto de puntos de control, es decir, el 104, 106, 108 y 110, distribuidos como se ve en la figura 2.12 se usan como puntos de chequeo o independientes para poder controlar la calidad de la aerotriangulación. El fichero de orientación debe contener las coordenadas aproximadas de los fotocentros y la orientación de cada imagen obtenidas de los sistemas GPS/IMU a bordo del sistema RPAS. Como se ha comentado anteriormente no disponemos de estos datos por lo que se propone simularlos a partir del resultado de la aerotriangulación obtenida con los GCP.

El intento de abarcar grandes superficies y con un recubrimiento superior al 60% hace que se eleve de forma exponencial el número de imágenes y por consiguiente el tiempo de procesamiento, que en muchos casos se haría

inabordable o como mínimo requeriría dividir el área en zonas más pequeñas que se puedan procesar por separado. Se ha reflejado en la tabla 2.2 el tiempo de procesado para cada una de las pruebas que se especifican en esta sección realizadas con el software PhotoScan. Puede constatarse como se eleva el tiempo de proceso significativamente aumentando el recubrimiento del 60 % al 80 %.

3. RESULTADOS

En la tabla 3.1 se presenta un resumen de los resultados de cada una de las pruebas, La prueba 6 no



Figura 2.11. Localización de los puntos de control



Figura 2.12. Localización de los puntos de chequeo

Prueba	Orientación	Nube densa	Malla poligonal	Ortofoto
Prueba 7	8	220	3	8
Prueba 8	8	63	4	8
Prueba 9	56	1806	7	24
Prueba 10	58	1470	8	25

Tabla 2.2. Tiempo de procesamiento de las pruebas realizadas con PhotoScan (minutos)

aparece en la tabla debido a que no se ha podido terminar pues el software sufre un error en la ejecución de la segunda calibración y detiene el proceso. Se presentan los errores en X, Y y Z, el error absoluto en metros y en pixeles. Estos mismos errores se presentan de forma visual en la figura 3.1. Se han colocado en ella a la izquierda las pruebas en las que se emplea para el cálculo GCP o GCP más fichero de orientación de las cámaras y a la derecha las pruebas en las que solo se emplea fichero de orientación. Se aprecia claramente como las pruebas realizadas usando puntos de control en el terreno son las que mayor calidad han conseguido. Solo hay dos pruebas que hayan obtenido unos errores inferiores al tamaño de pixel de 0,02 m, la prueba 7 y la prueba 9 realizadas con el software de Photoscan, pero hay que recordar que para realizar estas pruebas se intentó mejorar el fichero de orientación que se calculó en la prueba 4, por lo que quizá ha influido en un mejor resultado. Las pruebas con ortoDrone no se han realizado con este fichero mejorado pero aun así obtienen errores ligeramente por encima del pixel que pueden considerarse válidos con calidad topográfica teniendo en cuenta que la precisión de los puntos de control es aproximadamente el tamaño de pixel. La prueba 3 obtiene unos errores extrañamente altos sobretodo en Z que pueden ser debidos a la influencia en el cálculo de la mala calidad de los datos

del fichero de orientación.

En las pruebas en las que sólo se ha empleado fichero de orientación se observa que se han obtenido mejores resultados con ortoDrone a pesar de emplear el fichero sin modificaciones (el calculado en la prueba 4), sin embargo ninguna prueba ha alcanzado resultados satisfactorios, los errores han sido muy elevados salvo para

la prueba 5, realizada con el 80 % de solape con ortoDrone con un error total de 6,1 cm que está por encima del píxel pero que para muchas aplicaciones podría considerarse válido (aunque sin el uso de puntos de chequeo se mantendría la incertidumbre sobre la calidad). Analizando con mayor profundidad la prueba 5 vemos que los errores en X y en Y se mantienen por debajo del pixel con desviación típica pequeña y es en la coordenada Z donde se comete mayor error. Otra observación que se puede hacer sobre estas pruebas es que el aumento del solape desde el 60% al 80% ha disminuido mucho los errores en las pruebas en ambos software, como se puede apreciar en la Figura 3.2.

Entre los productos obtenidos a partir de la aerotriangulación cabe destacar la nube de puntos densa que sirve para realizar un modelo digital de superficie de una elevada calidad. Para cada una de las pruebas con PhotoScan se ha calculado una nube de puntos densa y obtenido el modelo poligonal correspondiente comprobando visualmente la capacidad de reproducir los objetos situados sobre el terreno en el momento de las tomas. Los objetos sólidos como muros, vehículos, montículos en el terreno, etc son bien detectados por la correlación de imágenes, sin embargo le cuesta detectar elementos menos sólidos como árboles o arbustos poco frondosos (Figura 3.3).

	X (m)	Y (m)	Z (m)	Total (m)	Total (pix)
Prueba1 - GCP 60%	-0,0127	-0,0203	-0,0249	0,0346	1,7285
Prueba 2 - ORI 60%	-0,0696	0,2103	-0,4697	0,5193	25,9668
Prueba 3 - GCP + ORI 60%	0,0300	-0,0017	0,2581	0,2598	12,9904
Prueba 4 - GCP 80%	0,0302	0,0282	0,0323	0,0525	2,6229
Prueba 5 - ORI 80%	-0,0176	0,0139	0,0567	0,0610	3,0503
Prueba 7 - GCP + ORI 60%	-0,0025	0,0011	0,0113	0,0116	0,5806
Prueba 8 - ORI 60%	-0,0157	-0,2264	-1,4062	1,4243	71,2172
Prueba 9 - GCP + ORI 80%	-0,0004	0,0009	0,0048	0,0049	0,2462
Prueba 10 - ORI 80%	0,0024	-0,2374	-0,0700	0,2475	12,3734

Tabla 3.1. Errores absolutos obtenidos en cada prueba

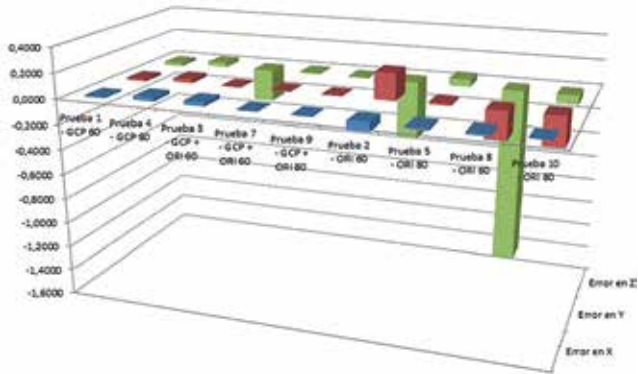


Figura 3.1. Errores cometidos en X, Y y Z en cada una de las pruebas

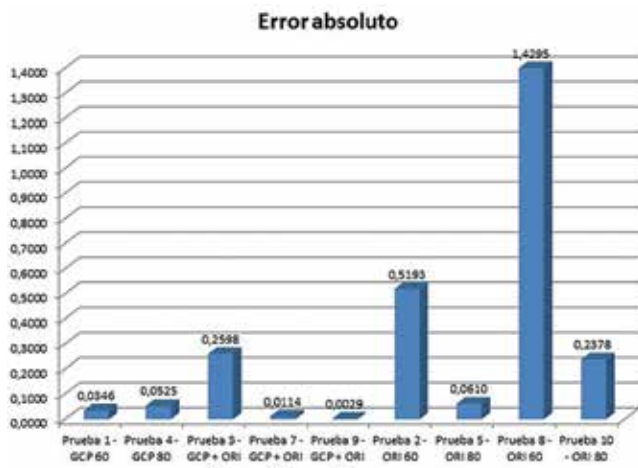


Figura 3.2. Error total cometido en cada prueba



Figura 3.3. La nube densa no detecta árboles sin hojas

3. CONCLUSIONES

Atendiendo a los objetivos marcados, las conclusiones son las siguientes:

- Las pruebas realizadas con PhotoScan usando para el cálculo de la aerotriangulación tanto los puntos de control como el fichero de orientación (pruebas 7 y 9) son totalmente satisfactorias obteniendo un

error inferior al píxel con una desviación típica pequeña. Las pruebas realizadas con ortoDrone usando para el cálculo solo puntos de control (pruebas 1 y 4) han obtenido unos errores ligeramente superiores al tamaño de píxel, puede considerarse válido siempre que estos errores sean aceptables para el objetivo del trabajo. Se podrían mejorar aumentando el número de píxeles con los que se calculan los puntos de paso en el paso 1 de orientación de las cámaras. En los casos en los que solo se usa fichero de orientación la precisión aumenta al aumentar el solape pero no se alcanzan valores aceptables salvo para la prueba 5 que obtiene un error de 6 cm, que es superior al píxel solo en Z. Por último la prueba 3 con ortoDrone en la que se emplean tanto puntos de control como fichero de orientación el resultado no ha sido satisfactorio debido probablemente a la poca precisión de éste último.

- El uso de cámaras no métricas no ha afectado a la precisión de la aerotriangulación pues se compensa con los actuales algoritmos de ajuste empleados.
- Los modelos digitales de superficie generados a partir de las nubes densas de puntos obtienen resultados muy precisos para estructuras sólidas del terreno pero son poco fiables para representar vegetación poco frondosa.
- Actualmente los sistemas RPAS de menos de 25 kg de MTOW son útiles para zonas poco extensas como apoyo o sustitución de la topografía clásica, en primer lugar porque la ley no permite superar los 120 metros de altura de vuelo a estos sistemas y por consiguiente, como se ha visto en la sección 2, hacer una planificación de vuelo sobre un área extensa requiere una cantidad de imágenes muy grande difícil de procesar con el software comercial, y por otro lado son sistemas con poca autonomía lo que implica dividir la zona a fotografiar en muchas pequeñas zonas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Teniente Coronel Carlos Javier Broncano Mateos, destinado como profesor en el Departamento de Geodesia de la Escuela de Guerra del Ejército, el apoyo que me ha brindado para la realización de este trabajo. También quiero agradecer a la empresa SRM Consulting y específicamente a José Santiso, Luis Murat y Luis Izquierdo que me acogieran en sus oficinas y gastaran parte de su valioso tiempo en explicarme el software OrtoDrone y OrtoSky y me

proporcionarán una licencia temporal y un proyecto fotogramétrico para poder hacer el estudio expuesto en este trabajo.

REFERENCIAS

- Botero, A. J. (2005). Robótica, capítulo Descripciones y Transformaciones Espaciales, páginas 28–30. Obtenido en mayo de 2016 en www.wag.caltech.edu. (http://www.wag.caltech.edu/home/ajaramil/libro_robotica/transformaciones_espaciales.pdf)
- Broncano Mateos, C. J. (2009). Apuntes de Fotogrametría. Curso de Geodesia. Escuela de Guerra del Ejército de Tierra. Mando de Adiestramiento y Doctrina.
- Brown, D. C. (1964). An advanced reduction and calibration for photogrammetric cameras. Informe técnico, Defense Documentation Center. Obtenido en mayo de 2016 en <http://dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD0431886>.
- Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. Photogrammetric engineering. Obtenido en mayo de 2016 en http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/Brown71.pdf, vol. 37(8), páginas 855–866.
- Faisal Bukhari, M. N. D. (2013). Automatic radial distortion estimation from a single image. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. Obtenido en mayo de 2016 en http://vgl-ait.org/mdailey/uploads/publication_file/filename/89/Bukhari-RadialDistortion.pdf.
- Fitzgibbon, A. (2001). Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. En *Proceedings / CVPR, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Obtenido en mayo de 2016 en <https://www.researchgate.net/publication/3940560>.
- Fraser, C. S. (1997). Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. Obtenido en mayo de 2016 en https://www.researchgate.net/publication/223175665_Digital_camera_selfcalibration, (52), páginas 149–159.
- JEITA. (2002). Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif version 2.2, obtenido el 20 de abril de 2017 en <http://www.exiv2.org/Exif2-2.PDF>. Informe técnico, Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
- Lahoz, J. G., Méndez, O. C. y Rubio, J. M. (2003). Lens distortion simulation. An application for understanding geometric distortion. *Proceedings of the XIXth International CIPA Symposium*, 30 September–4 October 2003, Antalya (Turkey), pp. 1–7. Obtenido el 22 de junio de 2016 en ria.asturias.es, 2003. (http://ria.asturias.es/RIA/bitstream/123456789/5741/1/CIPA2003_94.pdf)
- Martín, N. S., B., A. P., D., G. A. y J., G. L. (2002). Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos. VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía Obtenido en mayo de 2016 en <http://www.cartesia.org/geodoc/topcart2004/conferencias/38.pdf> Informe técnico, Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
- Olivier D. Faugeras, Q.-T. L. (2005). The fundamental matrix: theory, algorithms, and stability analysis. *International Journal of Computer Vision*, accedido el 22 de junio de 2016 en <http://www.researchgate.net>.
- Pierrot-Deseilligny, M. y Cléry, I. (2011). Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of a set of images, accedido el 15 de junio de 2016 en http://recherche.ign.fr/labos/matis/pdf/articles_conf/2011/pierrot_clery.pdf En *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology*.
- Pierrot-Deseilligny, M. (2015). Micmac, apero, pastis and other beverages in a nutshell!, obtenido el 15 de junio 2016 en <http://logiciels.ign.fr/img/pdf/docmicmac-2.pdf>. Informe técnico, IGN France.
- Remondino, F. y Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*. Accedido el 22 de junio de 2016 en www.icsd.aegean.gr.
- Reznicek, J. (2014). Method for measuring lens distortion by using pinhole lens.
- The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5 Obtenido en mayo de 2016 en www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net.

Sobrel el autor

Capitán Miguel Ángel López González

Capitán del Cuerpo General Escala de Oficiales del Ejército del Aire, diplomado en Geodesia Militar y Licenciado en Ciencias Matemáticas, especialidad en Ciencias de la Computación, por la Universidad Complutense de Madrid. Jefe de la sección de Cartografía general del CECAF.