

CALIBRACIÓN DE CÁMARAS TÉRMICAS NO REFRIGERADAS EMBARCADAS EN UAVs PARA APLICACIONES AGRONÓMICAS¹

K. R. Gomes², D. Hernández-López³, J. F. Ortega⁴, R. Ballesteros⁵, T. Poblete⁶, M. A. Moreno⁷

RESUMEN: Las cámaras térmicas no refrigeradas embarcadas en UAVs para obtención de imágenes útiles se postulan como una herramienta para la obtención de datos importantes en la agricultura de precisión. Sin embargo, para que la utilización de esos equipos para fines de teledetección sea adecuada es necesario que estén bien calibrados. En este contexto, el presente estudio tuvo como principal objetivo desarrollar una metodología de calibración de cámaras térmicas no refrigeradas para realización de mediciones de temperatura de cultivo de forma precisa. El trabajo que se presenta consta de dos fases. En una primera se aborda la calibración de una cámara térmica no refrigerada utilizando un cuerpo negro y una cámara térmica no refrigerada. En una segunda fase, se procede a analizar la validez de la calibración obtenida mediante su aplicación a un caso de estudio, concretada en el escenario de una finca productora de viñas. El modelo de calibración empleado fue el polinomial y el basado en redes neuronales artificiales. Los resultados de la calibración se han aplicado a las imágenes adquiridas en un vuelo de prueba en una finca productora de viña dividida en zonas, donde cada zona era regada en distintos días de la semana. Dentro de este estudio, se incluye una metodología de filtrado a las imágenes, usando el filtro de Wallis, para permitir que el software fotogramétrico convencional permita obtener ortoimágenes térmicas con la necesaria precisión geométrica. Para validar las temperaturas derivadas de las imágenes adquiridas, a partir de la cámara embarcada se realizaron medidas en terreno con una cámara térmica FLIR B660 refrigerada, capturando imágenes de puntos de muestreo de plantas y suelo del área sobrevolada. La metodología de calibración de cámaras térmicas además de la aplicación del filtrado de

¹ EL PRESENTE TRABAJO FUE EXTRAÍDO DE LA TESIS DOCTORAL DEL AUTOR PRINCIPAL

² Ingeniera Agrónoma, Estudiante de Doctorado, Centro Regional de Estudios del Agua, ETSIAM, UCLM, Ctra. De Las Peñas, km 3,2, 02071, Albacete – España. Teléfono: (+34)684324048. E-mail: krishnaribeiro@yahoo.com.br.

³ Doctor, Profesor Titular, Instituto de Desarrollo Regional, UCLM, Albacete – España.

⁴ Doctor, Profesor Titular, Centro Regional de Estudios del Agua, ETSIAM, UCLM, Albacete – España.

⁵ Doctora, Investigadora, Centro Regional de Estudios del Agua, ETSIAM, UCLM, Albacete – España.

⁶ Estudiante de Doctorado, UTALCA, Chile.

⁷ Doctor, Profesor Contratado, Departamento de Producción Vegetal, ETSIAM, UCLM, Albacete – España.

imágenes propuesta se mostró eficaz para obtención de imágenes térmicas útiles en agricultura de precisión.

PALABRAS-CLAVE: Imágenes térmicas, filtro de Wallis, UAVs.

CALIBRATION OF UNCOOLED THERMAL CAMERAS ONBOARD UAVs FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS

SUMMARY: Uncooled thermal cameras onboard in UAVs to obtain useful images are postulated as a tool for obtaining important data in precision agriculture. However, in order to the use of such equipment for remote sensing purposes to be adequate, they must be well calibrated. In this context, the main objective of the present study was to develop a methodology for the calibration of uncooled thermal cameras for accurate crop temperature measurements. The work presented has two phases. In the first, the calibration of an uncooled thermal camera using a black body and an uncooled thermal camera is discussed. In the second phase, we proceed to analyze the validity of the calibration obtained through application to a case study, concentered in the scenario of a vineyard production. The calibration model used was the polynomial and another based on artificial neural networks. The results of the calibration were applied to the images acquired on a flight test in a vineyard-producing farm divided in different areas, where each area was irrigated on different days of the week. In this study, a filtering methodology is included in the images, using the Wallis filter, to allow the conventional photogrammetric software to obtain thermal orthoimages with the necessary geometric precision. To validate the temperatures derived from the acquired images, measurements were made on the ground with a cooled FLIR B660 thermal camera, capturing images of sampling points of plants and soil from the overflown area. The calibration methodology of thermal cameras in addition to the application of the proposed image filtering was useful to obtain useful thermal images in precision agriculture.

KEYWORDS: Thermal images, Wallis filter, UAVs.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) ofrecen nuevas alternativas para obtener imágenes de alta resolución en tiempo real para aplicaciones agrícolas y ambientales de precisión (Ballesteros et al., 2014; Zhang & Kovacs, 2012). Diferentes tipos de sensores que se

embarcan en los VANTs permiten la extracción de informaciones de gran utilidad, entre estos sensores se puede destacar las cámaras térmicas que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones diferentes y en comparación con los sensores convencionales, como cámaras multiespectrales e hiperespectrales, no dependen de ninguna fuente de energía externa (Gade & Moeslund, 2014).

Las cámaras térmicas infrarrojas refrigeradas tienen un mayor uso en teledetección porque son muy precisas (Sheng et al., 2010). Sin embargo, su uso presenta algunos problemas, como su tamaño, peso y consumo de energía, lo que hace que las cámaras térmicas refrigeradas no sean utilizadas en pequeños VANTs (Jensen et al., 2014; Sheng et al., 2010). Por el contrario, el uso de cámaras no refrigeradas embarcadas en VANTs es viable porque son más ligeras (Berni et al., 2009). Sin embargo, las cámaras térmicas no refrigeradas presentan algunos inconvenientes, como que el microbolómetro no es tan sensible y preciso como en los sistemas refrigerados. En cámaras térmicas no refrigeradas con microbolómetros TEC-less (TEC: thermos-electric cooler), el microbolómetro no se estabiliza a una temperatura constante. Este hecho provoca que la respuesta del sensor varíe con la temperatura de la cámara, lo que debe tenerse en cuenta en el modelo de calibración de la cámara (Budzier & Gerlach, 2015). Para la mayoría de las aplicaciones en teledetección, es necesario determinar la temperatura de la superficie lo que requiere una cámara térmica calibrada (Berni et al., 2009; Jensen et al., 2014). Además, las cámaras no refrigeradas que muestran resultados radiométricos pueden incorporar ruido en las imágenes debido a errores del sistema de sensores o del entorno, lo que hace necesario realizar una adecuada calibración (Jensen et al., 2014; Wang & Myint, 2015).

En este contexto, el presente estudio tuvo como principal objetivo desarrollar una metodología de calibración de cámaras térmicas no refrigeradas para realización de mediciones de temperatura de cultivo de forma precisa.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología desarrollada en el trabajo que se presenta consta de la realización de la calibración de una cámara térmica no refrigerada y de la validación de la metodología de calibración a través del procesamiento de datos obtenidos a partir de esa misma cámara en un vuelo realizado en una parcela productora de viñas.

La calibración de la cámara térmica no refrigerada se realizó en el Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) en Albacete, España. La metodología seguida exige disponer de datos de referencia lo más precisos posible, lo que se concreta en disponer de la medida de la

temperatura de un cuerpo de emisividad conocido (cuerpo negro) a distintas temperaturas, modificando a su vez la temperatura del ambiente y, por lo tanto, la temperatura del sensor. Con los valores de la temperatura del cuerpo negro, la temperatura del sensor y la respuesta del sensor en niveles digitales (dato raw) se ha desarrollado un modelo de regresión basado en redes neuronales artificiales (RNAs) que permite caracterizar las relaciones altamente no lineales entre estas variables. Esta metodología se ha implementado en la cámara FLIR Tau 2-9 mm (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, United States) (Figura 1a), cuyas características se encuentran descritas en la Tabla 1. El cuerpo negro utilizado fue el Hyperion R Modelo 982 (Isothermal Technology Limited, Pine Grove, Southport, Merseyside, England) (Figura 1b).

Para realizar el análisis del ajuste de los modelos se utilizaron los estadísticos que siguen:

a) Número de observaciones (n); que representa la cantidad de datos a ser evaluados.

b) El coeficiente de determinación (R^2), valor del coeficiente de correlación de Person al cuadrado. Es la magnitud de la varianza del modelo en comparación a la varianza observada (Ecuación 1).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(O-MO)(S-MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O-MO)^2 \sum_{i=1}^n (S-MS)^2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O-MO)^2 \sum_{i=1}^n (S-MS)^2}} \right]^2 \quad (1)$$

donde, R^2 , coeficiente de determinación; O, valores observados; S, valores simulados; MO, valor medio de los n valores observados; MS, valor medio de los n valores simulados; n, número de observaciones.

c) El error cuadrático medio (RMSE), es dado por la Ecuación 2, representa la diferencia entre el valor observado y el valor esperado y evalúa el rendimiento del modelo (Ecuación 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S - O)^2}{n}} \quad (2)$$

donde, RMSE, raíz del error medio cuadrático ($^{\circ}\text{C}$); n, número de observaciones; S, valores simulados; O, valores observados.

d) El error relativo (ER), que es la comparación de lo que se estima frente al valor observado (Ecuación 3).

$$ER = \left(\frac{RMSE}{MO} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

donde, ER, Error relativo (%); RMSE, raíz del error medio cuadrático; MO, valor medio de los n valores observados.

e) El índice de similitud (IS), que representa la igualdad entre datos (Ecuación 4).

$$IS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (S - O)^2}{\sum_{i=1}^n ((S - MO) + (O - MO))^2} \right) \quad (4)$$

donde, IS, Índice de Similitud; n, número de observaciones; S, valores simulados; O, valores observados; MO, valor medio observado de los n valores observados. Se expresa como una medida relativa de la diferencia entre las variables.

La validación de la metodología de calibración se dio mediante su aplicación a un caso de estudio, concretada en el escenario de una finca productora de viñas ubicada en Iniesta (Cuenca, España), que se encuentra ubicada en la Unidad Hidrogeológica (U.H.) 08.29 (Figura 2). Las variedades cultivadas en esta finca son Sauvignon Blanc, Garnacha tintorera y Syrah. El sistema de riego empleado es por goteo, aplicando un promedio $800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, lo que significa un riego deficitario debido a la escasez de agua y la restricción de agua en la zona. El sistema de riego se divide en 12 sectores regados en distintos días de la semana a un intervalo de riego de una semana para cada sector.

Para obtención de las imágenes aéreas de la parcela se embarcó la cámara térmica calibrada en un Microdrone md4-1000 (Microdrones, Inc., Kreuztal, Germany), que es un cuadricóptero VTOL (Figura 3). Los datos obtenidos fueron procesados utilizando el software PhotoScan de Agisoft® donde se aplicó el filtro de Wallis a las imágenes y se realizó la alineación, construcción de la nube de puntos densa y del mallado. Luego se cambiaron las imágenes por las calibradas radiométricamente y se realizó la construcción de la textura. Y se obtuvieron los errores de procesamiento de las imágenes a partir del software.

A modo de verdad terreno, para validar las temperaturas derivadas de las imágenes adquiridas con la cámara embarcada, y tras aplicarse la calibración obtenida, se ha utilizado una cámara térmica FLIR B660 (FLIR Systems, Inc., Wilsonville, Oregon, United States) (Figura 4) refrigerada y bien calibrada para obtención de temperaturas de la vegetación en cada uno de los sectores de riego. Estos valores de temperatura se compararon con los valores de temperatura obtenidos a partir de las ortoimágenes generadas del procedimiento fotogramétrico empleando las imágenes calibradas radiométricamente. Y se compararon las temperaturas obtenidas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron una serie de datos de 266 imágenes de esta cámara los cuales fueron analizados tal y como fueron capturados con las configuraciones del fabricante, estas mismas imágenes se utilizaron en la comparación de los ajustes del modelo polinomial y de las RNAs. La Tabla 2 muestra los estadísticos que determinan la precisión de medida de la cámara, se puede observar que la precisión de medida con los parámetros por defecto en la cámara es muy baja, con un RMSE de 3,55°C y un ER medio del 8,47 %. Al verificar la precisión de medida al utilizar los modelos de calibración polinomial y RNAs, se puede observar que el RMSE llega a valores de 1,49 y 1,37 °C, respectivamente, siendo valores muy cercanos a la precisión de medida de las cámaras térmicas refrigeradas, que demuestran que tanto las RNAs como el modelo polinomial 2 presentaron un mejor ajuste de los datos, lo que postula ambas utilidades como adecuadas al procedimiento de tratamiento de los datos de calibración de las cámaras térmicas no refrigeradas utilizadas. Los errores obtenidos al utilizar la cámara con la configuración de fábrica ponen en duda la utilidad de la cámara en su configuración original para aplicaciones agronómicas y ponen de manifiesto la necesidad de un adecuado proceso de calibración para incrementar la precisión de medida.

La Tabla 3 ilustra la mejora en términos de precisión en la fase de detección y emparejamiento de imágenes, al utilizar a las imágenes filtradas y no filtradas, pudiendo observarse, por ejemplo, que el error de reproyección pasa de 5,3 píxeles empleando el set de imágenes térmicas originales a 0,14 píxeles empleando el set de imágenes térmicas filtradas, valor este último dentro del umbral óptimo de un tercio de píxel considerado tradicionalmente en fotogrametría.

Con la programación de riegos realizada en la parcela, se procedió a determinar la temperatura media y la desviación estándar de cada uno de los sectores donde se aplicó una máscara para determinar la temperatura la vegetación exclusivamente (Tabla 4). A partir de esta tabla se observa que a pesar del intervalo de riego a que las plantas estaban sometidas la temperatura media obtenida en los diferentes sectores de riego se mantuvo constante. Esto puede estar causado por distintos motivos, como pueden ser: las distintas variedades existentes en la parcela, el distinto vigor de la vegetación en cada sector, el tipo de suelo de cada uno de los sectores, la influencia de la calidad del riego y otras labores y factores ambientales.

CONCLUSIONES

La temperatura del sensor tiene un gran efecto sobre la precisión de medida del sensor térmico, sin calibrar se pueden obtener errores elevados, calibrando con la metodología propuesta se ha podido reducir el error de la medida en alta proporción.

La aplicación del filtro de Wallis en imágenes térmicas mejora de forma significativa la solución fotogramétrica. Los resultados de la comparación de los valores de temperatura han arrojado resultados mejorables. Es necesario seguir trabajando en esta línea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLESTEROS, R., ORTEGA, J. F., HERNÁNDEZ, D., & MORENO, M. A. (2014). Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part II: application to maize and onion crops of a semi-arid region in Spain. *Precision Agriculture*, 15(6), 593–614. <http://doi.org/10.1007/s11119-014-9357-6>
- BERNI, J. A. J., ZARCO-TEJADA, P. J., SUÁREZ, L., & FERERES, E. (2009). Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3), 722–738. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2010457>
- BUDZIER, H., & GERLACH, G. (2015). Calibration of uncooled thermal infrared cameras. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 4(1), 187–197. <http://doi.org/10.5194/jsss-4-187-2015>
- GADE, R., & MOESLUND, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: a survey. *Machine Vision and Applications*, 25(1), 245–262. <http://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>
- JENSEN, A. M., MCKEE, M., & CHEN, Y. (2014). Procedures for processing thermal images using low-cost microbolometer cameras for small unmanned aerial systems. In *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 2629–2632).
- SHENG, H., CHAO, H., COOPMANS, C., HAN, J., MCKEE, M., & CHEN, Y. (2010). Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: Platform, calibration and applications. *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2010*, 38–43. <http://doi.org/10.1109/MESA.2010.5552031>
- WANG, C., & MYINT, S. W. (2015). A simplified empirical line method of radiometric calibration for small Unmanned Aircraft Systems-based remote sensing. *IEEE Journal of*

Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(5), 1876–1885.
<http://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2422716>

ZHANG, C., & KOVACS, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712.
<http://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>

LISTA DE FIGURAS



Figura 1. Cámara térmica y cuerpo negro utilizados

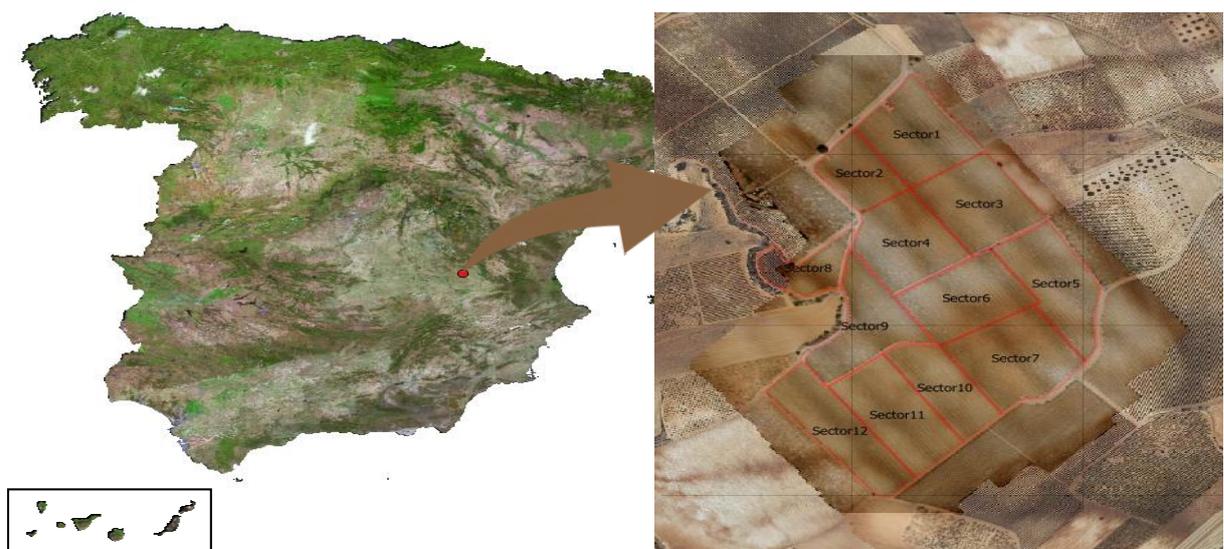


Figura 2. Unidad Hidrológica (U.H.)



Figura 3. Vehículo aéreo no tripulado utilizado



Figura 4. Cámara térmica FLIR B660

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales características de la cámara térmica no refrigerada FLIR Tau 2-9 mm

Tipo de sensor	Microbolómetro no refrigerado de 324 (H) x 256 (V)
Rango espectral	7,5 – 13,5 μm
Focal	9 mm
Rango de temperatura de funcionamiento	-40 °C hasta +80 °C
Tamaño de pixel	17 μm

Tabla 2. Estadísticos de precisión de medida de la cámara FLIR Tau2-9 mm con la configuración de fábrica.

	n	R ²	RMSE, °C	ER, %	IS
Configuración de fábrica	266	0,96	3,55	8,47	0,99
Polinomial 2	95	0,99	1,49	4,59	1,00
RNA	95	0,99	1,37	4,22	1,00

Tabla 3. Resultados del proceso de matching

Point Cloud	Imágenes sin filtrar	Imágenes filtradas
Puntos	58.259 de 73.581	107.231 de 131.758
Error de reproyección	16,8657 pix	0,470393 pix
Error de reproyección Max	27,6092 pix	13,2698 pix
Tamaño medio del key point	3,7827 pix	3,27169 pix
Superposición efectiva	5,67796	5,08275

Tabla 4. Temperatura de la vegetación en los distintos sectores evaluados

Sectores de riego	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Días desde el último riego	2	2	1	1	7	7	6	3	6	5	4	3
Media	26,6	27,4	26,0	27,9	26,9	28,0	27,5	28,5	28,4	28,4	28,4	28,5
Desviación estándar	1,6	1,3	2,0	1,1	1,5	1,0	1,3	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7