

# 3D mapping approach to analyze the evolution of vegetation using multispectral imagery

J.M. Jurado<sup>1</sup>, L. Ortega<sup>1</sup> y F.R. Feito<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Informática Gráfica y Geomática, Universidad de Jaén, España  
{jjurado, lidia, ffeito} @ujaen.es

---

## Abstract

*The 3D simulation for the evolution process of crop types requires the management of large volume of data to make an accurate analysis of functional and structural vegetation characteristics. In fact, current geomatics technologies allow the capture of massive and heterogeneous data with a great spatial resolution. Regarding research advances for precision agriculture applications Unmanned Aerial Vehicles (UAV)-based remote sensing offers great possibilities to acquire field data in a fast and reliable way. The main aim of this paper is twofold: (1) the study of multispectral imaging from UAVs for reflectance maps calculation, (2) 3D mapping and modeling using RGB and multispectral imagery in order to create a 3D NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) point cloud. We are focussed on 4D inspection of olive trees including spatio-temporal data for reflectance change detection in multispectral remote sensing images.*

## CCS Concepts

•**Computing methodologies** → *Image processing; Multispectral imaging; Reflectance modeling;*

---

## 1. Introducción

Los recientes avances en tele-detección sobre agricultura de precisión posibilitan capturas masivas de datos geolocalizados de distinta naturaleza y gran precisión espacial. No obstante, gran parte del análisis sobre la vegetación, su estructura, floración y conservación se lleva a cabo mediante el uso de mapas de índices multispectrales en 2D [CRDG\*15]. Esto supone una importante falta de información sobre todo en la parte lateral e inferior de la vegetación. En el ámbito del olivar, la observación acerca de la evolución de la planta se ha basado en la captura de imágenes satélite. Hasta ahora, la resolución alcanzada permite contar el número de plantas y georeferenciar las parcelas en un SIG (Sistema de Información Geográfica). No obstante, para llevar a cabo un estudio pormenorizado capaz de controlar el crecimiento de la planta, así como, la calidad y madurez del fruto, se requiere la aplicación de otras técnicas de adquisición de datos tales como UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) o escáneres terrestres.

En este trabajo de investigación se aporta un nuevo enfoque que posibilita una documentación 3D integral de la vegetación con información geométrica y radiométrica de carácter espacio-temporal. El objetivo principal consiste en la generación de una nube 3D que almacene en cada punto variables representativas del estado de salud de la vegetación, en este caso para el árbol del olivo. Para tal fin, se ha desarrollado una aplicación de escritorio con la que calcular, visualizar y analizar nubes de índices de vegetación en un

escenario tridimensional. Esta aplicación posibilita la exploración 3D de la vegetación en un intervalo de tiempo y la clasificación del modelo de tal forma que técnicos forestales, agrónomos, entre otros profesionales, sean capaces de detectar y reconocer problemas estructurales de cada planta.

## 2. Estado del arte

La generación de mapas y modelos 3D a partir de imágenes está creciendo constantemente. En este sentido existen técnicas de visión por computador capaces de reconstruir una estructura tridimensional empleando secuencias de imágenes tales como SFM (Structure From Motion) [SCQ16], DMVR (Dense Multi-View 3D Reconstruction) [KVI\*14] o SLAM (Simultaneous Location and Mapping) [Bou18]. El algoritmo Structure From Motion tiene bastante utilidad en diversos campos relacionados en gran medida con la informática gráfica pues la generación eficiente de la componente 3D y su posterior procesamiento está presente en cada desarrollo. En este sentido, se trabaja en soluciones que posibiliten la gestión de extensas nubes de puntos, el emparejamiento óptimo entre imágenes de muy alta resolución, la reducción de la deformación geométrica en la imagen y la corrección de errores en el modelo 3D resultante. El algoritmo SFM se ha extendido a una gran variedad de soluciones software orientadas a la reconstrucción 3D de ciudades, patrimonio cultural, arqueología, etc. Entre las herramientas más utilizadas por el sector, cabe destacar Photoscan de Agisoft,

y Pix4D [KVI\*14]. En líneas generales ambos programas comparten servicios y utilidades frecuentemente utilizadas en proyectos de fotogrametría como puede ser la generación de modelos digitales del terreno, ortomosaicos, mapas y modelos 3D. No obstante, se obtienen resultados no deseados cuando el contenido de las imágenes de entrada es homogéneo, reflectante, dinámico o su geometría es compleja. Además, en lo que respecta al análisis de imágenes espectrales imprescindibles en multitud de proyectos relacionados con la agricultura de precisión, se reduce únicamente a la generación de mapas de índices de vegetación en 2D [LHL17]. En esta línea de trabajo Pix4D y Parrot comparten un desarrollo en curso [pix16] para la generación 3D de modelos de datos espectrales aunque, hasta la fecha, no es una funcionalidad soportada por el software.

Actualmente, en el mercado coexisten cámaras de última generación capaces de tomar imágenes a muy alta resolución y sensores espectrales que capturan una serie de bandas del espectro no visible [JRHC17]. Recientemente, con el uso de drones se ha facilitado la adquisición masiva de datos para detectar anomalías en cultivos, plantaciones y bosques [YYL\*17]. Volar a baja altura reduce significativamente el ruido de las imágenes, al estar menos afectadas por los efectos meteorológicos, y aumenta el GSD (Ground Sampling Distance) distancia en el suelo que separa los centros de dos píxeles adyacentes. Las actuales herramientas geomáticas posibilitan capturas de datos geolocalizados, con una precisión en sus coordenadas del orden del sistema de posicionamiento empleado. Un ejemplo en este sentido es la incorporación del sistema RTK (Real Time Kinematic) al navegador GNSS (Global Navigation Satellite System) en UAVs, que ofrece un posicionamiento 3D a nivel de centímetros.

Hasta nuestro conocimiento no existe ninguna propuesta que aborde el estudio de imágenes multispectrales para el análisis de la vegetación desde un punto de vista tridimensional. En el presente trabajo se ha desarrollado una aplicación gráfica con la que visualizar y analizar una nube 3D, que almacena en cada punto información radiométrica sobre el estado actual de la vegetación que representa. Como resultado, se tiene un inventario espacial, agregando una nueva dimensión, con la que analizar en su totalidad masas forestales y detectar a tiempo posibles daños estructurales y deterioro de la planta.

### 3. Procesamiento de las imágenes multispectrales

Los sensores multispectrales desempeñan un rol esencial en multitud de aplicaciones relacionadas con la agricultura de precisión. Son capaces de capturar distintos valores de reflectancia en varios canales del espectro. La reflectancia espectral se define como la relación entre flujo radiante incidente y el flujo radiante reflejado en una única longitud de onda. En estudios sobre la calidad y conservación de vegetación, la reflectancia es un indicador clave para detectar una posible falta de nutrientes, estrés hídrico o biológico y plagas. La responsable de la reflexión especular en las plantas es la cutícula que cubre las hojas, la cual le confiere un brillo característico. La luz no reflejada penetra en el interior de la hoja y es sucesivamente refractada, reflejada y difractada. Esta dispersión depende de la propia estructura de la hoja, de la composición de sus

células, la presencia de cristales de almidón y su grado de humedad, entre otros factores.

Las imágenes multispectrales se han capturado con el kit Sequoia de Parrot compuesto por un sensor multispectral y un sensor de radiación solar. La cámara es capaz de capturar la luz dispersada por la vegetación en cuatro canales espectrales (NIR, RED, REG, GREEN). Además, cada fotografía en sus metadatos almacena un valor de intensidad de luz incidente registrada por el sensor de luz solar. No obstante, estas imágenes presentan una relevante deformación geométrica, debido al objetivo ojo de pez, y requieren de una calibración radiométrica y correcciones atmosféricas para manejar datos validados de reflectancia.

El cálculo de la reflectancia requiere de una serie de operaciones previas con el fin de obtener medidas cuantitativas y representativas del estado actual de la vegetación. Los herramientas actuales (eg. Pix4D y Photoscan) generan un ortomosaico en cada banda espectral que posteriormente utilizan para el cálculo de la reflectancia. Esto supone una pérdida significativa de información radiométrica. En definitiva, dicho cálculo es un promedio de la reflectancia que corresponde a los píxeles muestreados sobre el ortomosaico. En este trabajo se propone el siguiente método:

1. Calibración radiométrica.
2. Para cada imagen se obtiene:
  - 2.1. La irradiancia solar.
  - 2.2. Para cada pixel se calcula:
    - 2.2.1. La irradiancia emitida.
  - 2.3: Generación del mapa ponderado de reflectancia.

Este proceso se itera para cada imagen multispectral, excepto la calibración radiométrica que se realiza tan sólo una vez en cada banda espectral (Fórmula 1). Para trabajar con valores de reflectancia validados se calcula la irradiancia reflejada e incidente sobre una región de reflectancia conocida sobre un panel de calibración radiométrica. Se captura una foto perpendicular al panel de calibración para cada banda del espectro analizada.

$$K = R \left( \frac{I_{ss}}{I_{sq}} \right) \quad (1)$$

Tras obtener un valor de K para las cuatro bandas se debe calcular el valor de irradiancia solar ( $I_{ss}$ ) para cada imagen y la irradiancia reflejada ( $I_{sq}$ ) en cada pixel. Para ello, se aplica la siguiente formulación:

$$I_{ss} = K \left( \frac{v}{g\tau} \right) \quad I_{sq} = f^2 \frac{\rho - B}{A\gamma\epsilon + C} \quad (2)$$

En cuanto al cálculo de  $I_{ss}$  ( $W/m^2$ ), el parámetro  $v$  corresponde al acumulador del canal CHO y el valor  $g$  (dB) al factor de ganancia en cada captura. El valor  $\tau$  es el tiempo de exposición del sensor de luz solar, constante a 100 (s). En la segunda ecuación hay que calcular por pixel su correspondiente valor de  $I_{sq}$  ( $W/m^2$ ). El valor  $f$  es la relación focal o *f-number* que expresa el diámetro de apertura del diafragma, en nuestro caso constante a 2.2. El parámetro  $\rho$  indica la intensidad de color en un pixel. Al tratarse de una imagen en escala de grises con una profundidad de color de 16 bits se

obtienen valores en un rango de 0 a  $2^{16}$  que equivale a un total de 65.536 tonos. Los parámetros A, B y C corresponden a coeficientes de calibración en cada una de las bandas espectrales. Por último, los parámetros  $\gamma$  y  $\epsilon$  expresan la ISO y el tiempo de exposición respectivamente. En cada imagen obtenemos un mapa de irradiancia compuesto por 1.228.800 valores.

Por último, se genera para cada imagen un mapa de reflectancia. Las herramientas actuales (eg. Pix4D y Photoscan) crean un ortomosaico en cada banda espectral a partir del cual generan un mapa de reflectancia. Esto implica una pérdida significativa de información radiométrica pues se trata de un cálculo promedio de reflectancia para aquellos píxeles muestreados en el ortomosaico. En este artículo, se plantea un nuevo método basado en una ponderación de valores de reflectancia en función de la posición del píxel en la imagen. En primer lugar, se calcula en cada píxel un valor de reflectancia aplicando la siguiente fórmula:

$$R = K \left( \frac{I_{sq}}{I_{ss}} \right) \cos(\theta) \quad (3)$$

Como resultado, se obtiene un mapa de reflectancia para cada imagen con valores normalizados entre 0 y 1. Este conjunto de datos es ponderado diferenciando 3 regiones en la imagen (Figura 1). La primera corresponde a los píxeles situados en el centro de la imagen y se ponderan con un peso de 1. La segunda región tiene un peso de 0.7 y recoge aquellos píxeles cuya proyección sobre la reconstrucción 3D (descrita en la sección 4) es menos perpendicular y la deformación geométrica comienza a ser significativa. Por último, los píxeles ubicados en la región 3 tienen una mayor distorsión y deformación por lo que el peso definido es de 0.4. Siguiendo esta ponderación, se calculan todos los mapas de reflectancia que serán proyectados sobre los puntos 3D y así registrar para cada región del árbol  $n$  índices de vegetación en un intervalo de tiempo.

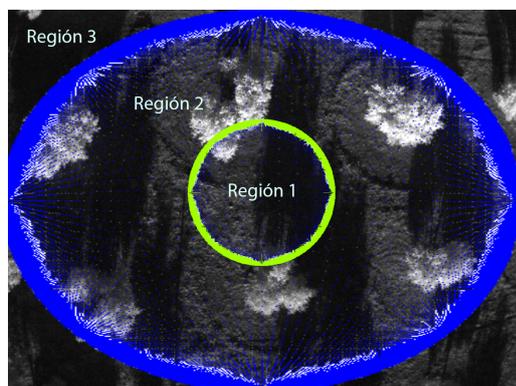


Figure 1: Mapa de reflectancia ponderado en la banda NIR

#### 4. Reconstrucción 3D de la vegetación

En paralelo al procesamiento de las imágenes multispectrales, se ha reconstruido en 3D una plantación de olivar. Para ello, se han realizado dos vuelos con el objetivo de capturar un amplio volumen de imágenes nadir con un solapamiento global del 70%. En total se tomaron 160 fotografías multispectrales y 130 fotografías RGB. El equipamiento utilizado está formado por el dron DJI Mavic Pro y el sensor multispectral Sequoia. Las imágenes en RGB

se han capturado con la cámara interna del dron que alcanza una resolución de 4000 x 3000 píxeles. En cuanto a la cámara multispectral Sequoia se han capturado cuatro canales del espectro no visible correspondientes al infrarrojo cercano (770-810 nm), bordes rojos (730-740 nm), rojo (640-680 nm) y verde (530-570 nm).

La geolocalización precisa de las fotografías, la calibración y alineamiento de las cámaras así como, la corrección de las deformaciones geométricas generadas por la lente son factores determinantes para lograr una adecuada reconstrucción 3D. En cuanto al cálculo de la altura de vuelo, hay que tener en cuenta el concepto *ground sampling distance*. En este estudio, las imágenes multispectrales deben tener relación de muestreo en tierra de 4 centímetros por píxel y así, garantizar un análisis minucioso en cada planta. Para alcanzar esta densidad espacial se define la altura de vuelo en 40 metros. Por consiguiente, con las imágenes RGB al tener mayor resolución se consigue un GSD promedio de 1.3 centímetros por píxel. La aplicación desarrollada recibe como datos de entrada una nube generada por el software Pix4D formada por un total de 3.856.237 puntos (Figura 2). Desde la misma herramienta se realiza una calibración y alineamiento de las imágenes multispectrales que se exporta a un fichero que almacena la posición y la matriz de rotación para cada imagen.



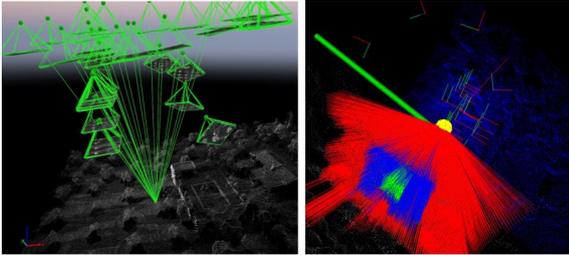
Figure 2: Reconstrucción 3D de una plantación de olivar.

#### 5. Proyección de la información multispectral

Una de las funcionalidades más relevantes de nuestra aplicación consiste en la transformación de los puntos 3D de la nube en coordenadas de imagen [AMHH08]. Este cálculo queda dividido en dos partes: (1) rotación y traslación de la nube de puntos al sistema de coordenadas de la cámara y (2) proyección con distorsión *fisheye* al plano de la imagen.

Las transformaciones geométricas (traslación y rotación) han sido aceleradas en CPU con la librería *boost* de tal forma que el tiempo de cómputo necesario sea mínimo. Para cada punto 3D, se le resta el desplazamiento de la cámara y se multiplica por su matriz de rotación. Así, la cámara está en la coordenada (0,0) y la nube de puntos en su mismo sistema de referencia. Seguidamente se realiza la proyección de los puntos 3D sobre el plano de la imagen. Esta transformación de coordenadas 3D a 2D debe tener en cuenta el modelo de distorsión de la cámara Sequoia. En una lente de ojo de pez se define la fórmula de proyección por los parámetros C, D, E, F que describen una deformación afín de la imagen circular en coordenadas de píxel [BPR17]. La distorsión *fisheye* implementada en OpenCV para la proyección de puntos 3D a coordenadas de imagen es ligeramente diferente al modelo de la cámara utilizada.

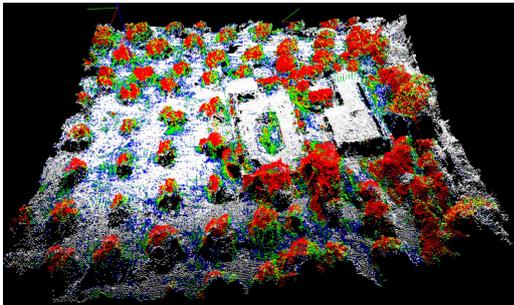
En la aplicación desarrollada se ha implementado esta proyección para la lente multispectral Sequoia (Figura 3). Como se aprecia en la captura de la derecha las proyecciones son ponderadas en función de la posición del pixel en el plano de la imagen. Se muestra en rojo las proyecciones que corresponden a la región 3, en azul a la región 2 y en verde a la región 1. Este método se itera para imagen teniendo como resultado una correspondencia espacial entre punto 3D y pixel.



**Figure 3:** Proyección de un punto 3D sobre el plano de la imagen multispectral

## 6. Resultados

En este trabajo se ha desarrollado una aplicación en C++ que integra las librerías OpenCV 3.4 y PCL 1.8 para llevar a cabo la gestión e integración de imágenes procedentes de UAVs en un entorno gráfico. El estudio de las imágenes multispectrales y la proyección del conjunto de valores espectrales sobre el modelo 3D posibilita un estudio detallado de la vegetación, desde una perspectiva 3D. Como resultado de esta línea de investigación, se han combinado la banda del infrarrojo y rojo para realizar una clasificación de la nube de puntos en base al cálculo del índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).



**Figure 4:** Nube de puntos clasificada por el índice NDVI

El índice NDVI es ampliamente utilizado para estimar la vigorosidad, calidad y crecimiento de la vegetación teniendo en cuenta la intensidad de la radiación que la planta emite o refleja. Como se ve en la anterior imagen (Figura 4) la nube de puntos es clasificada según la siguiente escala de color: azul, verde, amarillo, rojo y blanco. Los puntos con un índice NDVI más altos se muestran en color azul y se corresponde con la hierba creciente entorno a la planta del olivo. La vegetación alta queda fundamentalmente coloreada de color rojo. Para este rango de NDVI, se identifican cada uno de los individuos, su volumen y follaje. También aparecen regiones en la planta con un mayor índice NDVI identificadas con el

color verde y amarillo. Por último, los puntos correspondientes al terreno y edificios se muestran en color blanco y su valor NDVI es negativo.

## 7. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha reconstruido en 3D una plantación de olivar sobre la que se ha proyectado valores radiométricos extraídos de las imágenes multispectrales, capturadas desde UAVs. Además, se ha propuesto un algoritmo para el cálculo ponderado de la reflectancia cuyo resultado es asociado a cada punto 3D de la nube. De esta forma, para cada región volumétrica de la planta se registran distintos índices de vegetación en un intervalo de tiempo. Esta representación supone un avance científico para la teledetección de respuestas biológicas en la planta, posibilitando una exploración completa de su estructura y crecimiento. Este modelo de información forma parte de un proceso iterativo que posibilita un análisis 3D de la evolución que tiene la vegetación en el tiempo.

Como trabajo futuro, se propone la implementación en GPU del cálculo de reflectancia y proyecciones de coordenadas y así, paralelizar en cada núcleo las operaciones asociadas a una imagen. Además, la solución propuesta se retroalimentará de futuras capturas de imágenes multispectrales sobre el área de estudio.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto TIN2017-84968-R.

## References

- [AMHH08] AKENINE-MOLLER T., HAINES E., HOFFMAN N.: *Real-time rendering*. AK Peters/CRC Press, 2008. 3
- [Bou18] BOURKE P.: Automatic 3d reconstruction: An exploration of the state of the art. *GSTF Journal on Computing (JoC)* 2, 3 (2018). 1
- [BPR17] BARAZZETTI L., PREVITALI M., RONCORONI F.: Fisheye lenses for 3d modeling: evaluations and considerations. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci* (2017), 79–84. 3
- [CRDG\*15] CANDIAGO S., REMONDINO F., DE GIGLIO M., DUBBINI M., GATTELLI M.: Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from uav images. *Remote Sensing* 7, 4 (2015), 4026–4047. 1
- [JRH17] JHAN J., RAU J., HAALA N., CRAMER M.: Investigation of parallax issues for multi-lens multispectral camera band co-registration. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42 (2017), 157. 2
- [KVI\*14] KOUTSOUDIS A., VIDMAR B., IOANNAKIS G., ARNAOUTO-GLOU F., PAVLIDIS G., CHAMZAS C.: Multi-image 3d reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage* 15, 1 (2014), 73–79. 1, 2
- [LHL17] LU B., HE Y., LIU H. H.: Mapping vegetation biophysical and biochemical properties using unmanned aerial vehicles-acquired imagery. *International Journal of Remote Sensing* (2017), 1–23. 2
- [pix16] Pix4d and parrot explore vegetation research with 3d ndvi, dec 2016. URL: <https://pix4d.com/3d-ndvi/>. 2
- [SCQ16] SMITH M., CARRIVICK J., QUINCEY D.: Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography* 40, 2 (2016), 247–275. 1
- [YYL\*17] YUE J., YANG G., LI C., LI Z., WANG Y., FENG H., XU B.: Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. *Remote Sensing* 9, 7 (2017), 708. 2