

# Modelización 3D de malas hierbas en cultivos de maíz mediante fotogrametría digital automatizada

Dionisio Andújar<sup>1</sup>✉, Mikel Calle<sup>2</sup>, José Manuel Peña<sup>1</sup>, Ángela Ribeiro<sup>3</sup>, César Fernández-Quintanilla<sup>1</sup>, José Dorado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias Agrarias (CSIC), 28006 Madrid

<sup>2</sup> Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), 28006 Madrid

<sup>3</sup> Centro de Automática y Robótica (CSIC), 28500 Arganda del Rey, Madrid

✉ dionisioandujar@hotmail.com

**Resumen:** Este trabajo describe un proceso de fenotipado (i.e. reconstrucción y caracterización de la estructura geométrica de plantas) de *Xanthium strumarium* mediante técnicas de fotogrametría digital automatizada (Structure from Motion, SfM). La captura de imágenes se realizó con una cámara digital orientada en posición cenital y oblicua, ésta última a dos alturas, permitiendo cubrir todos los ángulos alrededor de las plantas seleccionadas. Se muestreó un total de 10 plantas de *X. strumarium* presentes en un campo de maíz, que sirvieron para crear sus respectivos modelos tridimensionales en base a algoritmos SfM y tecnología de reconstrucción 3D multi-vista. Estos modelos fueron validados con los datos reales de biomasa, altura de planta e índice de área foliar. Los resultados mostraron un ajuste satisfactorio entre los parámetros extraídos del modelo y la verdad terreno. Este trabajo demuestra las posibilidades de este método para la caracterización digital de poblaciones de malas hierbas.

**Palabras clave:** fotogrametría, fenotipado, modelos 3D.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de fenotipado permiten medir diversas características de las plantas mediante técnicas no destructivas ni invasivas. El creciente empleo de estas técnicas ha incrementado la demanda de la reconstrucción mediante modelos tridimensionales. Con este objetivo se han adaptado y mejorado métodos existentes y han surgido nuevas metodologías de caracterización digital. La utilización de laser-escáner (Andújar et al., 2013), cámaras de profundidad (Andújar et al., 2016) o sistemas basados en luz estructurada (Rosell-Polo et al., 2015) han creado modelos muy cercanos a la realidad que permiten el estudio detallado de las características morfológicas de cada planta utilizando para ello modelos digitales 3D. La extracción, a partir de dichos modelos, de parámetros tales como volúmenes, área foliar o ángulo de emergencia de nuevas hojas permite ampliar el conocimiento de la morfología de las plantas. Sin embargo, la creación de modelos 3D necesita de una gran capacidad computacional para procesar y modelar la gran cantidad de datos provenientes de los sensores así como de las múltiples combinaciones de datos para la generación del modelo. En la actualidad, la disponibilidad de mayores capacidades de procesamiento unido a cámaras digitales RGB (sigla en inglés de Red, Green, Blue) de alta resolución, permiten la utilización de técnicas fotogramétricas como la visión estereoscópica (multiestereovisión) o fotogrametría digital automatizada (Structure from Motion, SfM) para su utilización en procesos de fenotipado.

La calidad de modelos 3D creados mediante fotogrametría ha incrementado con la mejora en la calidad de imágenes. Estos procesos se utilizan ya en fenotipado y también en caracterización vegetal con objeto de toma de decisiones en el manejo de plantaciones. Estas técnicas han sido utilizadas para caracterizar plantaciones de tomate y apoyar la toma de decisiones en la selección de plantas derivadas de parámetros tales como área foliar o volumen de planta (Aguilar

et al., 2008). También se han extraído parámetros como el ángulo de las hojas o el diámetro del tallo, que permiten caracterizar variedades o el grado de crecimiento adecuado de las plantas (Rose et al., 2015). En todos estos casos, el procesamiento de las imágenes se realizó a través de SfM, utilizando esta técnica para almacenar la posición relativa de cada imagen y para caracterizar múltiples especies vegetales.

Sin embargo, existen problemas aún por resolver cuando se intentan caracterizar plantas con formas complejas o de escaso tamaño con cámaras convencionales. En el caso de la malherbología y dado que el principal objetivo es el control de las poblaciones de malas hierbas, nuestra propuesta es caracterizar sus plántulas en los primeros estadios de crecimiento, cuando aún son controlables con labores o herbicidas. En este trabajo se ha tomado como ejemplo una de las especies más problemáticas en cultivos de maíz, *Xanthium strumarium* L. En este contexto, se pretende evaluar posibilidades, precisión y errores asociados a la creación de modelos 3D obtenidos en esta especie durante la época temprana de desarrollo, utilizando para ello cámaras RGB y técnicas de reconstrucción SfM para la creación de modelos digitales de plantas.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

**2.1. Sitio de estudio y toma de imágenes.** Este estudio se ha llevado a cabo en la finca experimental La Poveda (Arganda del Rey, Madrid) durante mayo de 2016 en un cultivo de maíz. Para ello se seleccionaron 10 plantas de *X. strumarium* en estado fenológico de 2 a 8 hojas verdaderas, las cuales fueron muestreadas mediante toma secuencial de imágenes desde diferentes ángulos. Las malas hierbas adyacentes a la planta seleccionada fueron eliminadas manualmente con objeto de obtener imágenes aisladas y sin interferencias de otras plantas. Se evitó la alteración del suelo durante la eliminación de estas plantas para no causar cambios en la angulación del tallo o de las hojas. Seguidamente se colocaron tres escalas gráficas de 10 cm en el suelo en forma de triángulo, quedando la planta localizada en el punto central de éste. Las escalas gráficas permiten el posterior escalado en postproceso para asimilar el modelo a los valores de distancia reales.

Para la toma de imágenes se utilizó una cámara digital compacta Nikon D5500 con una resolución de 24 Mp y una distancia focal que oscilaba entre 30 y 35 mm. Para la toma de imágenes se utilizó un sistema de sombreado formado por una estructura metálica que soportaba la tela blanca que eliminaba las sombras y permitía unos niveles de iluminación relativamente constantes durante todo el muestreo. Las imágenes se capturaron de forma secuencial siguiendo una trayectoria concéntrica respecto del eje central de la planta, manteniendo siempre una distancia de 50 cm y utilizando tres ángulos que oscilaban entre la vista perpendicular y la vista cenital (Fig. 1). De esta forma se garantizaba un solape de al menos un 90% entre dos imágenes del conjunto, lo que permitía la creación de un modelo tridimensional con suficiente detalle y escasas áreas sin reconstruir. La separación entre dos puntos vecinos para la toma de imágenes se estableció en función de la resolución deseada del modelo 3D y el desplazamiento necesario para obtener cada imagen al mover la cámara perpendicularmente a la planta seleccionada. De esta forma se adquirieron tantas imágenes como fueron necesarias para hacer un recubrimiento total, lo que precisó de 40 a 50 imágenes para cada modelo (Fig. 1). Al utilizar la técnica SfM, las diferentes posiciones de la cámara en cuanto a escala y orientación no están prefijadas dado que las variaciones entre imágenes pueden ser corregidas por el algoritmo.

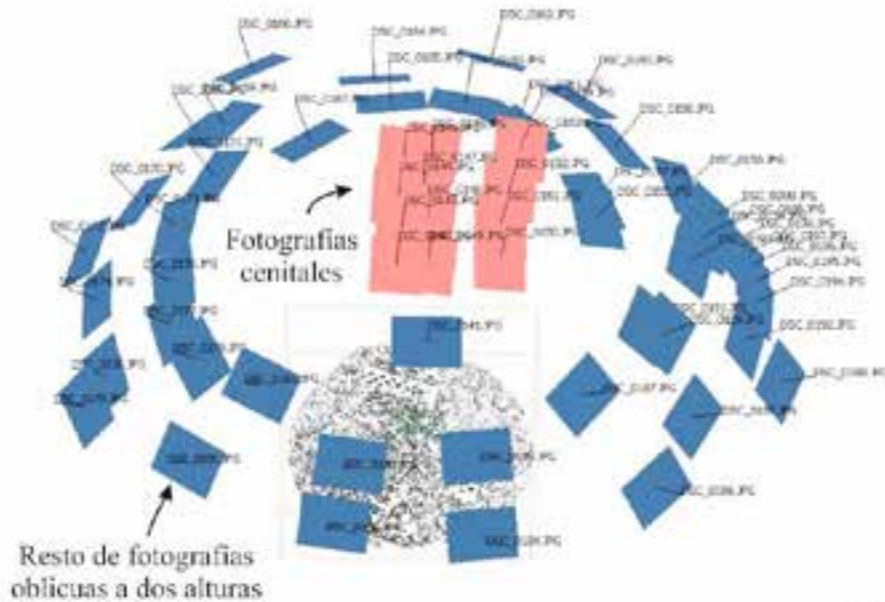


Figura 1. Posiciones de la cámara respecto de una planta de *Xanthium strumarium* durante la captura de imágenes.

**2.2. Creación y análisis de modelo.** De las imágenes obtenidas se desecharon aquellas que estaban desenfocadas antes del proceso de reconstrucción del modelo mediante Agisoft Photoscan®. El objetivo del procesamiento de las imágenes es construir un modelo 3D escalado con textura. El procesamiento de imágenes comprende cuatro pasos principales: alineación de la cámara, creación de la nube de puntos, construcción de la malla y texturización.

En un primer proceso, el programa detecta puntos singulares bajo diferentes puntos de vista y con variaciones de luz generando un descriptor para cada punto basado en localización, un descriptor que sirve para asociar correspondencias en las imágenes siguientes. La localización de estos puntos singulares en más de una imagen se emplea para el posicionamiento de las cámaras en el espacio. De esta forma, mediante la técnica SfM no es necesario una toma de imágenes estandarizada, ya que mediante el algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transformation) se pueden identificar las características invariantes (escala, rotación e iluminación) de forma automática en cada imagen.

Sobre las imágenes posicionadas, un segundo proceso consiste en generar una nube de puntos densa, la cual puede ser editada antes de la creación de modelos de malla 3D. Este proceso requiere un elevado tiempo de procesamiento, el cual depende de la precisión y el número de puntos a generar. Dado que en este estudio nos limitamos a extraer parámetros tales como la superficie, no fue necesario llegar al detalle de otros procesos de fenotipado donde se identifican otros parámetros como nerviación, órganos florales, etc. La nube de puntos es entonces transformada a una malla poligonal 3D que representa la superficie de la planta que finalmente es texturizada. En el último paso, se re-escala el modelo utilizando las escalas gráficas presentes en las imágenes para así exportar el modelo tridimensional escalado y listo para el análisis de cada una de las plantas seleccionadas (Fig. 2).

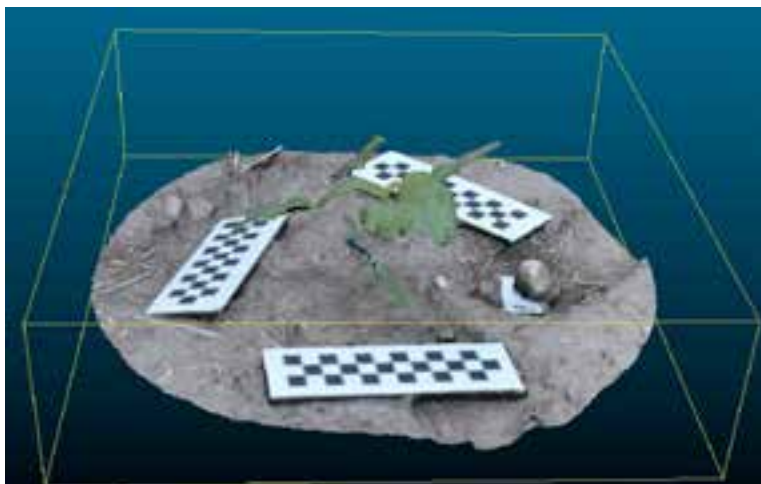


Figura 2. Ejemplo de un modelo 3D de una planta de *Xanthium strumarium*.

De cada uno de los modelos se calculó el área foliar y la altura máxima, utilizando para ello el programa CloudCompare®. Estos valores se compararon con los siguientes valores reales obtenidos en cada planta: biomasa seca determinada tras 48 horas en estufa a 78°C, altura máxima medida en campo y área foliar calculada mediante fotografía plana. Para esto se deshojó cada una de las plantas y las hojas obtenidas se colocaron sobre una base plana para su fotografía con la cámara antes mencionada, instalándose a su vez un cuadrado de dimensiones conocidas para su escalado. Estas imágenes fueron segmentadas por combinación de planos RGB ( $R=-0,884$ ,  $G=1,262$ ,  $B=-0,311$ ). Estos coeficientes fueron calculados mediante algoritmos genéticos para la obtención de la imagen gris segmentada. Seguidamente se aplicó el método del valor umbral (Otsu, 1979) para separar el fondo (blanco) de las plantas (negro) y calcular la superficie foliar (Fig. 3).

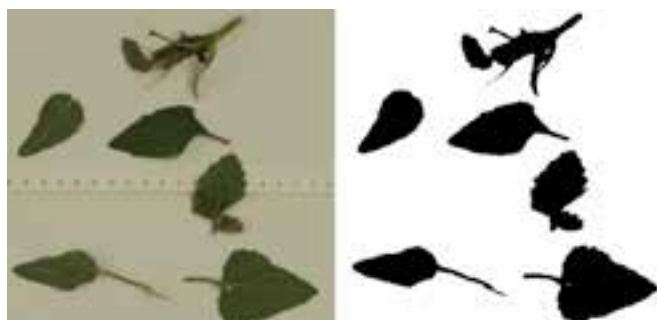


Figura 3. Ilustración del proceso de cálculo del área foliar de las muestras tomadas en imagen plana.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos creados representaban con gran exactitud los detalles de las plantas de los que se podían extraer parámetros fisiológicos tales como número de hojas, ángulos de tallos y ramificaciones (Fig. 2). En los modelos puede apreciarse que las hojas más cercanas al suelo presentan ángulos más abiertos que aquellas nuevas que surgen de la parte apical de la planta. Es decir, tras la emergencia de las hojas, éstas van abriéndose hasta presentar una posición paralela al suelo. Cuando se comparan las dimensiones de la planta medidas manualmente con respecto a aquellas estimadas sobre el modelo digital 3D, se han encontrado errores de  $\pm 3$  mm tanto en la altura de planta como en su anchura obtenida en los dos ejes perpendiculares (datos no mostrados). Esta precisión de los modelos podría permitir su uso en el establecimiento de las bases del crecimiento vegetal y su evolución a lo largo del tiempo.

Por otro lado, se ha encontrado un alto grado de correlación entre el índice de área foliar (LAI) estimado en el modelo 3D y dos parámetros medidos en planta (Fig. 4). En lo que respecta al área foliar, el modelo se mostró estable y con un buen grado de acuerdo para la estimación de este parámetro con respecto a métodos tradicionales y destructivos basados en fotografía plana ( $R^2=0,951$ ). Igualmente, el LAI estimado en el modelo 3D estuvo relacionado con la biomasa seca medida en planta ( $R^2=0,963$ ). Además, se ha podido comprobar la validez de los modelos contrastando otras dimensiones de la planta, por ejemplo su altura, donde se ha obtenido un buen ajuste entre los valores estimados y reales ( $R^2=0,998$ ).

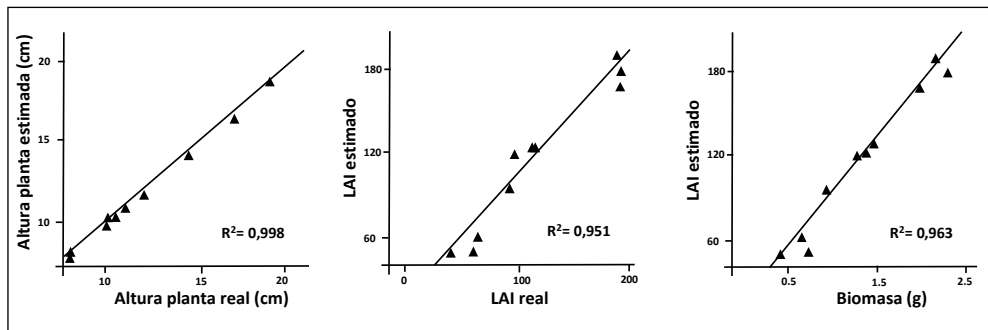


Figura 4. Análisis de regresión comparando valores reales de plantas de *Xanthium strumarium* (eje X) y valores estimados en el modelo tridimensional (eje Y).

La utilización de estos modelos ha mostrado una gran exactitud con respecto a las medidas reales de la planta así como con otros parámetros únicamente medibles mediante métodos destructivos como la biomasa. Por otra parte, estos modelos permiten estimar otros parámetros de interés biológico tales como el número de hojas, la superficie de cada una de ellas o el ángulo de inserción de estas sobre el tallo. Estas estimaciones pueden mejorar su precisión tan solo aumentando el número de imágenes y optimizando los procesos de reconstrucción utilizando procesadores más potentes o mayores tiempos de procesado.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por MINECO a través del proyecto AGL2014-52465-C4-1R.

#### 5. REFERENCIAS

- Aguilar M, Pozo J, Aguilar F, Sanchez-Hermosilla J, Páez F and Negreiros J (2008). 3D Surface Modelling of Tomato Plants Using Close-Range. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVII, 139-144, Beijing, China.
- Andújar D, Escola A, Rosell-Polo JR, Fernández-Quintanilla C and Dorado J (2013). Potential of a terrestrial LiDAR-based system to characterise weed vegetation in maize crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 92, 11-15.
- Andújar D, Fernández-Quintanilla C, Dorado J and Ribeiro A (2016). An approach to the use of depth cameras for weed volume estimation. *Sensors*, 16, 972, 11pp.
- Otsu N (1979). A threshold selection method from grey level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 62-66.
- Rose JH, Paulus S and Kuhlmann H (2015). Accuracy analysis of a multi-view stereo approach for phenotyping of tomato plants at the organ level. *Sensors*, 15, 9651-9665.
- Rosell-Polo JR, Auat F, Gregorio E, Andújar D, Puigdomenech JM and Escola A (2015). Advances in structured light sensors applications in precision agriculture and livestock farming. *Advances in Agronomy*, 133, 71-112.

---

#### Weed modeling in maize crops using photogrammetric range imaging techniques

**Summary:** This work describes a phenotyping process (i.e. reconstruction and characterization of the geometric structure of plants) for *Xanthium strumarium* using automated digital photogrammetry (Structure from Motion, SfM) techniques. The images were taken using a digital camera oriented in a zenith and lateral position, the latter at two heights, allowing to cover all the angles around the selected plants. A total of ten *X. strumarium* plants present in a maize field were sampled, which served to create their respective three-dimensional models based on SfM algorithms and multi-view 3D reconstruction technology. These models were validated with the actual data of biomass, plant height and leaf area index. The results showed a satisfactory adjustment of the parameters extracted from the model with the ground truth. This work demonstrates the possibilities of this method for the digital characterization of weed populations.

**Keywords:** photogrammetry, phenotyping, 3D models.