

## GENERACIÓN DE UN MDT A PARTIR DE DATOS LIDAR UTILIZANDO PROCESOS ITERATIVOS BASADOS EN LA SELECCIÓN DE ALTURAS MÍNIMAS EN UNA ZONA DE MONTAÑA

J. Estornell, L. A. Ruiz y T. Hermosilla.

*Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia.  
jaescre@cgf.upv.es*

### RESUMEN

En este trabajo se utilizaron datos LIDAR con una densidad media de 8 puntos/m<sup>2</sup> para la generación de un modelo digital del terreno en una zona de montaña con pendiente media del 45% y con presencia abundante de vegetación arbustiva. Para ello, se generó un algoritmo en IDL basado en procesos iterativos con el objetivo de seleccionar puntos de altura mínima. Como datos de entrada se definieron dos alternativas: En la primera, se consideraron todos los puntos y en la segunda, se partió de una imagen de tamaño de celda de 1x1 m, cuyos valores fueron la altura mínima de los puntos incluidos en cada una de ellas. Se estudiaron dos parámetros de cálculo, el tamaño de las ventanas decrecientes y los valores umbrales. La combinación de estos parámetros permitió generar una serie de ensayos, los cuales se evaluaron mediante levantamiento topográfico con un total de 1379 puntos medidos utilizando GPS-RTK. El mejor resultado obtenido fue tras utilizar una imagen de partida, ventanas de 10, 5 y 2.5 m y umbrales a partir de 1.5 m. Se obtuvo un error medio de 0.02 m, desviación típica de 0.19 m y error medio cuadrático de 0.19 m.

### ABSTRACT

In this study LIDAR data was used with a point density of 8 points/m<sup>2</sup> to calculate a MDT on a steep mountain area with an average terrain slope of 45% and mainly covered with shrub vegetation. An IDL algorithm based on iterative processes was developed in order to select points with minimum height. Two different approaches were carried out: the first one, working with all points and the second one, calculating the lowest point for each pixel with size 1x1 m. On the other hand, several input parameters were considered, such as window size, decreasing in each step, and several thresholds. Different tests were done by combining the previous parameters. In order to assess the accuracy of every MDT, 1379 points regularly distributed were measured using RTK GPS. The best result obtained was using an image as input data, window sizes of 10, 5 and 2.5 m and thresholds above 1.5 m. A mean error of 0.02 m, a standard deviation of 0.19 m and root mean square error of 0.19 m were obtained.

**Palabras clave:** LIDAR, digital terrain models (DTM), filtering.

### INTRODUCCIÓN

Los sistemas activos LIDAR (*Light Detection and Ranging*) permiten registrar de manera masiva información de la superficie terrestre en 2 y 3 dimensiones. Se basan en la medición del tiempo de ida y vuelta que transcurre desde la emisión de pulsos de energía de un sensor aerotransportado y su reflexión tras alcanzar la superficie terrestre. Los sistemas LIDAR pueden registrar la señal de retorno de un pulso emitido en diferentes ecos y, con la ayuda de un GPS y de un sistema inercial, pueden calcularse las coordenadas del punto en el que se ha producido la reflexión. Además, si el sistema emite con una frecuencia muy alta (150000 Hz), puede disponerse de una densidad de puntos superior a los 10 puntos/m<sup>2</sup>. Las precisiones en altimetría en zonas óptimas, llanas y sin vegetación, alcanzan los 10 cm con una desviación estándar de 15 cm (Huisin y Gomes

1998). Con esta información es posible transformar los datos registrados en alturas y estudiar su distribución para obtener datos de la cubierta forestal o de cualquier otro objeto por encima de la superficie terrestre. También puede definirse la topografía del suelo calculando modelos digitales del terreno (MDT). Para ello, es necesario aplicar algoritmos que permitan filtrar, del conjunto de todos los puntos registrados, aquellos que no pertenezcan a la superficie del suelo. Existen diferentes métodos para realizar estas operaciones, aunque es muy difícil automatizarlos completamente (Baltsavias 1999). Shitole y Vosselman (2004) desarrollaron un estudio comparativo y una clasificación de los mismos.

Este trabajo se enmarca dentro de una investigación más amplia en la que se utilizará un MDT como base para el análisis de la vegetación arbustiva. Por ello, y aunque existan diferentes

metodologías y programas comerciales que permitan calcular un MDT, es preferible la selección de un algoritmo para el análisis y la selección de los parámetros adecuados que deben usarse en el cálculo del MDT y su adaptación a las características de la zona de estudio. Además, los algoritmos basados en el cálculo superficies locales proporcionan mejores resultados (Sithole and Vosselman 2004). El caso del método basado en la selección de alturas mínimas sería un ejemplo.

El objetivo de este trabajo, por tanto, es seleccionar los parámetros más adecuados para el cálculo de un MDT basado en un algoritmo iterativo de búsqueda de puntos con altura mínima. Además, también se analizará la influencia de la presencia/densidad de vegetación y de las pendientes en la precisión del MDT.

## MATERIAL Y MÉTODOS

**Zona de estudio:** La zona de estudio tiene una superficie de 9 km<sup>2</sup> y está situada en el término municipal de Chiva (Valencia). El área de trabajo queda incluida en un rectángulo con coordenadas UTM X<sub>máxima</sub>, Y<sub>máxima</sub>, X<sub>mínima</sub>, Y<sub>mínima</sub> (689800, 4376028, 683800, 4373000) en el huso 30 y sistema de referencia *European Datum 1950*. Se trata de una zona de montaña con predominio de matorral, el cual presenta un porcentaje de ocupación del 60%. La elevación varía entre 442 y 1000 metros y la pendiente media es del 45%.

**Datos:** Los datos LIDAR fueron adquiridos con el sensor Optec ALTM 2050, y con los siguientes parámetros de vuelo: altura de vuelo: 700 m; frecuencia de pulso: 123000 Hz; frecuencia de escaneado: 47 Hz; ángulo de escaneado 36°, obteniendo una densidad media de 8 puntos m<sup>2</sup>. Para la evaluación de los MDT se realizó un levantamiento topográfico con GPS sistema RTK Leica GPS1200. En total, se midieron 1379 puntos distribuidos a lo largo de toda la zona de estudio, presentando en general pendiente elevada y alta densidad de vegetación arbustiva.

**Cálculo del MDT:** Para el cálculo del MDT a partir de datos LIDAR es necesario, en primer lugar, filtrar los puntos que no pertenecen al suelo, esto es, aquellos que se corresponden con vegetación, edificios o cualquier otro elemento por encima de esta superficie. Para ello, se generó un programa en IDL basado en procesos iterativos para la selección de puntos mínimos, cuyo procedimiento es el siguiente (Figura 1): Selección del punto de altura mínima dentro de una ventana inicial que va recorriendo toda la zona de estudio. A partir de estos

puntos se calcula un primer MDT. A continuación, se realiza una nueva búsqueda de puntos mínimos, siempre a partir de los datos originales, pero utilizando esta vez una ventana de tamaño inferior. De entre todos los puntos seleccionados en este segundo paso, se eligen aquellos cuya diferencia respecto al MDT calculado en el paso anterior es inferior a un umbral determinado (1<sup>er</sup> umbral). Los puntos cuyo valor es superior a este umbral se descartan. El proceso continúa una vez más seleccionando puntos mínimos en una ventana de tamaño inferior. De igual modo que en el caso anterior, se eliminan los puntos seleccionados cuya diferencia de valor respecto al MDT calculado en el paso anterior supera un umbral determinado (2<sup>o</sup> umbral). Con los puntos seleccionados se calcula el MDT final.

Siguiendo el proceso anterior, se combinaron los siguientes valores de parámetros para el cálculo de MDT:

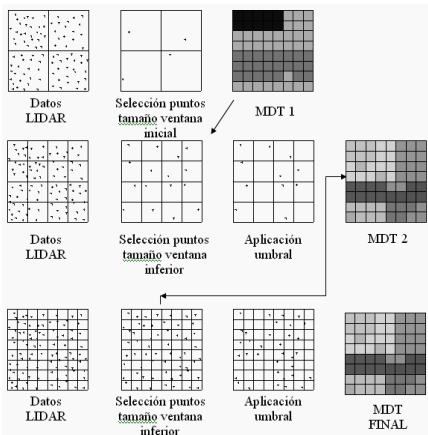
- *Datos de entrada:* (a) todos los puntos originales, o (b) una imagen de tamaño de celda 1x1 m cuyo valor es la cota mínima del total de puntos incluidos en ella. En adelante, estos datos serán referenciados como imagen.

- *Ventanas de búsqueda* (en metros): (a)20,10 y 5; (b)15, 10 y 5; (c)12, 6 y 3; (d)10, 5 y 2.5; (e)8, 4 y 2.

- *Umbrales entre pasos* (en metros): 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5. Estos valores se combinaron, de todas las formas posibles, en los dos umbrales de este algoritmo. De esta manera, para cada grupo de ventanas se calcularon 25 MDT.

La precisión de cada uno de los MDT calculados se evaluó mediante el conjunto de puntos medidos en campo con GPS-RTK. Un primer análisis consistió en analizar la variación del error medio cuadrático (RMSE) al combinar distintos umbrales entre pasos. A partir de estos resultados, se seleccionaron los umbrales adecuados para el cálculo del MDT.

A continuación, se estudió la influencia del tamaño de las ventanas, en términos de RMSE, considerando también en este caso los MDT calculados a partir de la imagen inicial. Finalmente, se analizó el RMSE en 77 puntos medidos en zonas de vegetación, así como la influencia de la pendiente.



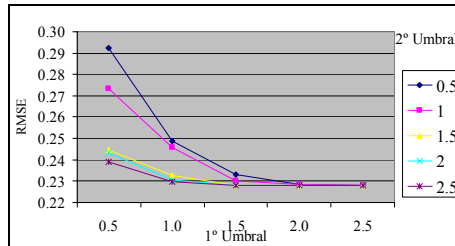
**Figura 1.** Esquema del algoritmo utilizado en el cálculo del MDT (modificado de Estornell y Ruiz, 2007).

**RESULTADOS**

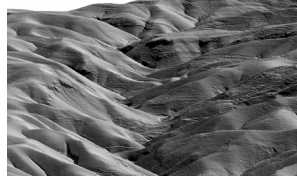
- *Análisis de los umbrales entre pasos:* En estos ensayos se emplearon los puntos originales como datos de partida. El valor del RMSE decrece a medida que aumentan el 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> umbral (Figura 2). Sin embargo, a partir de un valor de 1.5 m para el primer y segundo umbral apenas existen variaciones del RMSE, llegando a un valor mínimo de 0.23 m. Aunque la información de la figura 2 se obtuvo considerando ventanas de 8, 4 y 2 m, puede observarse la misma tendencia para el resto de tamaños de ventana ensayados. El RMSE varía entre un valor máximo de 0.36 m utilizando como 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> umbral 0.5 m y un valor mínimo de 0.23 m cuando se emplean en los dos umbrales valores de 1.5 m. Para el resto de ventanas, el RMSE resulta ligeramente superior, variando de 0.43 m a 0.23 m; 0.67 m a 0.28 m; y 1.09 m a 0.43 m para ventanas de 12, 6 y 3 m; 15, 10 y 5 m; y 20, 10 y 5 m, respectivamente.

- *Análisis del tamaño de ventana y tipo de datos de partida:* En este ensayo y para el resto de los análisis, sólo se estudiaron 10 MDT, calculados a partir del uso de diferentes ventanas y datos de partida, siendo el valor de los dos umbrales de 2.5 m, ya que con este umbral se logró el valor mínimo de RMSE en todas las ventanas. En este ensayo, el valor de RMSE más bajo fue 0.19 m, que corresponde al MDT calculado tomando como datos de partida la imagen inicial y ventanas 10, 5 y 2.5 m (Figuras 3 y 4). Los valores de RMSE más altos se registraron al utilizar ventanas de 15, 10 y 5 m y 20, 10 y 5 m, con valores entre 0.28 y 0.33 m. En

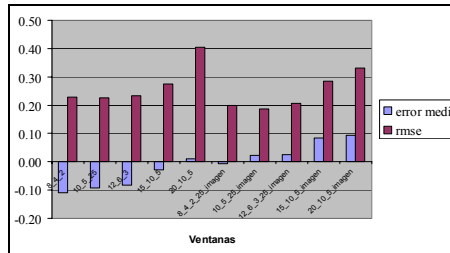
términos de error medio, los valores más bajos corresponden a los casos en los que se utilizan imágenes de partida y ventanas de 8, 4 y 2 m, y 10, 5 y 2.5 m, con un error medio de -0.01 y 0.02 m respectivamente.



**Figura 2.** Valores de RMSE al variar el 1<sup>er</sup> y 2<sup>o</sup> umbral para el caso de ventanas de 8, 4 y 2 m.

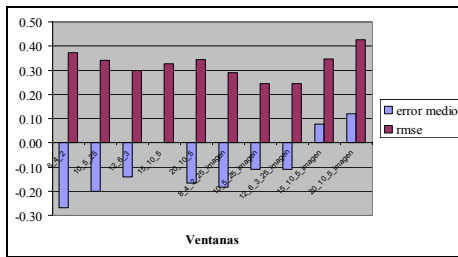


**Figura 3.** Imagen del MDT con los siguientes parámetros: ventanas 10, 5 y 2.5 m; umbrales 2.5 m; datos de partida imagen inicial.



**Figura 4.** RMSE y error medio en los MDT calculados con diferentes ventanas y datos de partida en toda la zona de estudio (n=1397).

- *Análisis de la presencia de vegetación:* Otro de los análisis consistió en el estudio de la influencia de la presencia de vegetación en la precisión del MDT, para lo cual se midieron 77 puntos con GPS-RTK en zonas con vegetación arbustiva densa. Los valores más bajos de RMSE (0.24 m) se obtuvieron para ventanas de 10, 5 y 2.5 m; y de 12, 6 y 3 m, utilizando imágenes como datos de partida (Figura 5). En términos de error medio, los valores más altos se dan con ventanas de 8, 4 y 2 m, con un error de -0.27 y -0.18 m; y los más bajos para ventanas de 15, 10 y 5 m, con valores de 0 y 0.08 m.



**Figura 5.** RMSE y error medio en los MDT calculados con diferentes ventanas y datos de partida en zonas con vegetación (n=77).

- *Análisis de la pendiente:* Para analizar la relación entre el error absoluto y la pendiente se realizó una regresión simple considerando estas variables en los 10 MDT anteriores, obteniéndose valores de coeficiente de correlación (r) entre 0.27 y 0.41 en el caso de utilización de todos los puntos y de 0.06 y 0.24 al utilizar como datos de partida la imagen.

## DISCUSIÓN

El mejor resultado obtenido en los ensayos (RMSE = 0.19 m) se da al utilizar umbrales a partir de 1.5 m, ventanas de 10, 5 y 2.5 m y como datos de partida una imagen. Comparando los errores medios obtenidos por Reutebuch et al. 2003, que emplearon una densidad de 4 puntos/m<sup>2</sup> y en zonas de montaña con arbolado, estos autores obtuvieron un error medio de 0.22 m con una desviación típica de ± 0.24 m. En nuestro caso, con predominio de vegetación arbustiva y una densidad media de 8 puntos/m<sup>2</sup>, se obtuvo un error medio de 0.02 m y una desviación de 0.19 m, considerando los parámetros anteriores. Esta diferencia puede ser debida tanto a la densidad de puntos utilizada (Baltasvias 1999), como a la presencia de arbolado denso (Clark et al. 2004), entre otros factores secundarios. En nuestros ensayos, el RMSE pasa de 0.19 m a 0.24 m en las zonas de vegetación arbustiva densa, lo cual corrobora esa influencia. En cuanto a los umbrales, a medida que aumentan, especialmente el segundo, se consigue disminuir el RMSE, hasta llegar a un valor a partir del cual el error se estabiliza, en nuestro caso a partir de un umbral de 1.5 m. Por lo que se refiere al tamaño de las ventanas, la utilización de tamaños pequeños genera RMSE menores. Por tanto, el uso de ventanas pequeñas sería indicado en los casos de vegetación con pocos huecos que permitieran que un pulso alcanzara el suelo. En cualquier caso, sería necesario establecer el valor de ventana adecuado para no suavizar demasiado el MDT. En cuanto a los datos de partida, los mejores resultados en términos de RMSE, se obtienen al

utilizar la imagen. Al analizar la correlación entre la pendiente y el error medio absoluto, en general existe una relación directa entre ambos, si bien ésta disminuye al emplear la imagen como dato de partida. Si se analiza el efecto de la vegetación sobre la precisión del MDT, la utilización de ventanas intermedias origina RMSE inferiores. Si se utilizan ventanas pequeñas (8, 4 y 2 m) el error medio es negativo y muy alto, lo que indicaría que se estaría sobreestimando el MDT.

Se han analizado y estudiado los parámetros óptimos para reducir el error en el cálculo de MDT en zonas arbustivas de montaña, así como la influencia de factores del medio como la densidad de vegetación y la pendiente. No obstante, los parámetros seleccionados podrían diferir en otros escenarios.

## BIBLIOGRAFÍA

- Baltasvias, E.P. 1999. Airborne laser scanning: Existing systems and firms and other resources. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 54, no. 2-3: 164-198.
- Clark, M.L. Clark, D. and Roberts A. 2004. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. *Remote sensing of environment* 91, no.1: 68-89.
- Estornell, J., Ruiz, L.A., 2007. Generación de MDE y MDS en una zona de vegetación arbórea y arbustiva mediante datos Lidar e imágenes de satélite QB. *VII Semana Geomática*, Barcelona.
- Huising, E.J. and Gomes L.M. 1998. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 53, no.5: 245-261.
- Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.E. and W.W. Carson 2003. Accuracy of a high-resolution LIDAR terrain model under a conifer forest canopy, *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, no. 5: 527-535.
- Sithole, G., Vosselman, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59, no. 1-2: 85-101.