

# Incertidumbre en el análisis multitemporal en terrenos escarpados debido al uso de MDE

*Uncertainty in multitemporal analysis in steep terrain due to the use of DEM*

Joan J. Rodríguez Jordana, M<sup>a</sup> Amparo Núñez Andrés, Felipe Buill Pozuelo

REVISTA **MAPPING**  
Vol. 29, 204, 40-53  
2021  
ISSN: 1131-9100

## Resumen

La calidad de los modelos digitales de elevación (MDE) es fundamental en geomorfología, especialmente en los estudios multitemporales en los que se quiere reconocer los cambios de relieve mediante el cálculo del volumen erosionado o sedimentado. Generalmente, esto se consigue a partir de la comparación de MDE, obtenidos por interpolación de nubes de puntos, cuya exactitud depende de los datos y métodos de interpolación utilizados para construir el modelo. Utilizar diferentes métodos podría introducir un cambio significativo y no real en la comparación multitemporal. En este trabajo comprobaremos cómo el método de interpolación elegido (distancia inversa ponderada, *kriging*, vecino natural y red irregular triangulada), y otros parámetros influyen en la construcción del MDE en diferentes tipos de terreno. Los resultados revelan que el uso de un método u otro, en la generación de archivos ráster, para el cálculo de los cambios de volumen en el terreno, puede dar lugar a diferencias significativas en zonas de pequeña extensión en términos geomorfológicos.

## Abstract

The quality of characterization in digital elevation models (DEM) is fundamental in geomorphology, especially in multitemporal studies in which we want to recognize changes in relief by calculating eroded or sedimented volume. Generally, this is achieved from DEM whose accuracy depends on the data and interpolation methods used to construct the model. Different methods could introduce a significant not real change in multitemporal comparison. In this paper we will check how the interpolation method (inverse distance weighted, *kriging*, natural neighbor and triangulated irregular network), and other parameters, influence the construction of a DEM in different terrains. The results show that, in particular, the interpolation method can have an influence. Moreover, they reveal that the use of one method or another, in the generation of files for the calculation of volume changes in the terrain, can give rise to significant differences in zones of relatively little extension in geomorphological terms.

Palabras clave: análisis multitemporal; MDE; nube de puntos; métodos de interpolación; densidad de la nube de puntos.

Keywords: multitemporal analysis; DEM; point cloud; interpolation methods; point cloud density.

Departamento de Matemáticas,  
Universitat Politècnica de Catalunya  
[juan.rodriguez@upc.edu](mailto:juan.rodriguez@upc.edu)  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,  
Universitat Politècnica de Catalunya  
[m.amparo.nunez@upc.edu](mailto:m.amparo.nunez@upc.edu)  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,  
Universitat Politècnica de Catalunya  
[felipe.buill@upc.edu](mailto:felipe.buill@upc.edu)

Recepción 01/01/2021  
Aprobación 16/02/2021

## 1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la generación de cartografía se basaba en modelos de puntos obtenidos mediante topografía o fotogrametría, según la escala. Se establecía previamente cuántos y qué puntos definían la superficie a representar y las líneas que marcaban los cambios significativos en la misma. En las últimas décadas, la incorporación de sensores aerotransportados como el LiDAR (*Light Detection and Ranging*) o la utilización en fotogrametría aérea de cámaras fotográficas de pequeño formato con posibilidad de trabajar con varias bandas desde un RPAS (*Remote Piloted Aircraft System*), ha determinado un nuevo paradigma en la metodología de captura de datos espaciales para la generación de cartografía y modelos digitales de elevación (MDE). Es importante destacar que con estas capturas masivas de datos espaciales no se discriminan los detalles de la superficie, figura 1. Por otro lado, también ha influido la generalización y automatización del software fotogramétrico de fácil manejo, con algoritmos eficientes (*SIFT*, *SURF*...) para la búsqueda de correspondencias entre puntos homólogos en las distintas fotografías que completan la cobertura del terreno.

Un producto derivado de los puntos y líneas de rotura altimétricas o de captura masiva de datos espaciales, y muy utilizado por su versatilidad y fácil manejo en aplicaciones SIG (Sistemas de Información Geográfica) de análisis para aplicaciones de geomorfología, es el MDE (Schürch et al. 2011) (Prokop y Panholzer 2009) (Lenda et al. 2016) (Chaplot et al. 2006). Generalmente los programas de SIG trabajan con archivos ráster para el análisis de geoprocésamiento; por lo que la nube de puntos tiene que ser transformada en un MDE para obtener una malla regular. En este proceso es necesaria

una interpolación numérica (figura 1).

El uso de métodos de interpolación para obtener MDE, es decir, mapas ráster continuos a partir de mediciones discretas en algunos puntos, tiene aplicación en muchos campos. La calidad y fiabilidad del MDE es fundamental para obtener los resultados más precisos en aplicaciones científico-técnicas relacionadas con la superficie del terreno, como son las aplicaciones geomorfológicas, la detección de desprendimientos de rocas y los modelos de escorrentía-erosión.

La calidad de estos modelos ha cobrado importancia en numerosos análisis: radiación solar global diaria (Jeong et al. 2017), hidrología (Andes y Cox 2017) (Anderson et al. 2006), dispersión de contaminantes (Elumalai et al. 2017), aplicaciones forestales (Montealegre, Lamelas, y De la Riva 2015), estudio de ambientes fluviales y morfología de ríos (Heritage et al. 2009) (Brasington, Vericat, y Rychkov 2012) y, por supuesto, fenómenos y eventos geomorfológicos (Kociuba, Kubisz, y Zagórski 2014) (Domínguez-Cuesta, Jiménez-Sánchez, y Berrezueta 2007). Entre ellos, queremos centrarnos en eventos locales como desprendimientos de rocas y flujos de detritos, que son menos amplios que otros como los deslizamientos. Los datos sobre el terreno se utilizan para entender y analizar los procesos que han dado lugar al cambio morfológico.

En la mayor parte de la literatura, se discuten las técnicas de captura de datos y cómo obtener nubes de puntos densas. Luego, para el análisis de la caracterización del terreno esas nubes de puntos se convierten en un archivo cuadrículado (Wang et al. 2019) (James et al. 2017) (Javernick, Brasington, y Caruso 2014), pero no se menciona, en general, cuál es el método de interpolación utilizado en este paso, información esencial para evitar errores en el análisis multitemporal (Li et al. 2020) como los cambios

posteriores a un fenómeno o por la propia dinámica, como la erosión producida por un río en su curso normal. En las últimas décadas, con los MDE proporcionados por las instituciones oficiales en archivos de malla han aparecido las propuestas de relleno de huecos y reconstrucción de superficies. Por ejemplo, el método de *inpainting* proporciona buenos resultados (Crema et al., 2020) (Ayhan et al., 2020). Sin embargo, estos no son el objetivo de nuestra investiga-

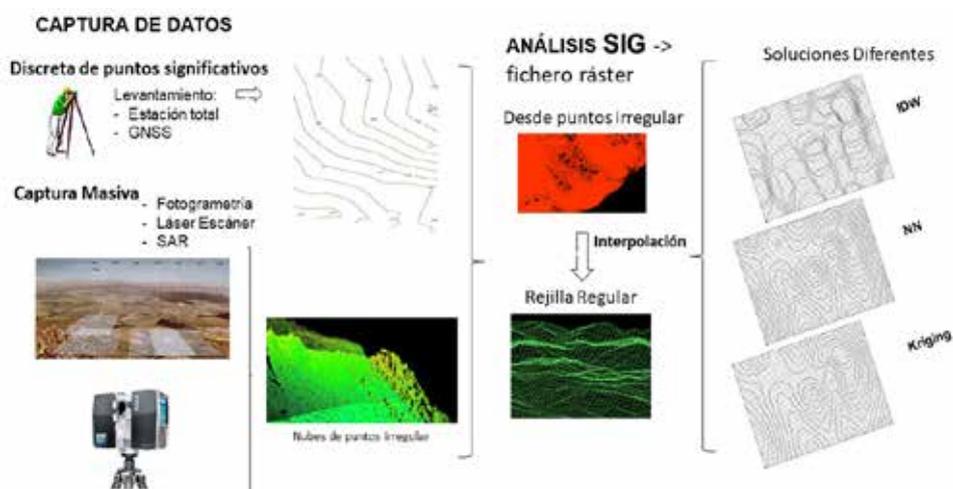


Figura 1. Flujo de trabajo para obtener el MDE a partir de un levantamiento clásico o de sistemas de captura masiva.

ción, que se centra en la generación de *MDE* a partir de datos irregulares.

Se han realizado algunos estudios que demuestran que la calidad de los resultados en el análisis geomorfológico depende de la resolución del ráster que se crea, del método de interpolación que se utiliza (Ashraf, Hur, y Park 2017)(Lenda et al. 2016)(Montealegre et al. 2015)(Zhang y Kovacs 2012), de la resolución de los datos originales y de los parámetros de variabilidad del terreno, como la pendiente y la rugosidad (Li et al., 1992) (Crema et al., 2020). Estos análisis cubren amplias zonas mientras que, para estudiar la influencia en eventos como desprendimientos de rocas y pequeños flujos de escombros, la zona suele ser más pequeña. Además, son necesarios datos con alta resolución para cubrir los detalles del cambio de rugosidad en las zonas de depósito debido a los bloques. El primer objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de los métodos de interpolación y de otros parámetros, como la densidad de la nube de puntos y la morfología del terreno (superficie lisa, ondulada o rugosa) en la precisión del *MDE*. Se compararán los métodos de distancia inversa ponderada (*IDW*), *kriging* (*k*), vecino natural (*NN*) y triangulación de malla irregular (*TIN*), por ser de los métodos más extendidos y usados desde hace tiempo. Los resultados muestran que la precisión aumenta con la densidad de la nube de puntos y que, para una densidad determinada, el método de interpolación puede influir.

Por otra parte, al calcular los cambios multitemporales, se suelen tener en cuenta parámetros como la resolución de la nube de puntos, pero no el método de interpolación. En este trabajo comprobaremos cómo el uso de modelos obtenidos con diferentes métodos de interpolación puede introducir un cambio no real significativo en las comparaciones multitemporales. El uso de uno u otro método, en la generación de ficheros para el cálculo de los cambios de volumen en el terreno, puede dar lugar a diferencias importantes en zonas de extensión relativamente pequeña en términos geomorfológicos.

En el apartado 2 describimos los métodos de interpolación objetivo de este estudio y los datos utilizados para su evaluación. En la sección 3 analizamos la calidad del *MDE* obtenido mediante diferentes métodos de interpolación, a partir de varias nubes de puntos reducidas, evaluándolas en un conjunto de puntos de control. Además, describimos la influencia del método de interpolación en un análisis multitemporal del cambio del terreno. En la sección 4 se discuten los resultados y se relacionan con los estudios de otros autores. Finalmente, hay una sección de conclusiones y recomendaciones.

## 2. MÉTODO Y DATOS (MATERIAL)

### 2.1. Métodos de interpolación espacial

Los métodos de interpolación espacial se basan en la premisa de que los puntos más cercanos tienen una mayor influencia que los más lejanos. Sin embargo, la forma de considerar esto difiere de un método a otro. Los métodos de interpolación pueden clasificarse en función de varios parámetros, aunque en general podemos distinguir dos grupos principales. Los métodos locales se basan en el cálculo de un punto desconocido a partir de los valores de los píxeles de la vecindad, como la distancia inversa ponderada (*IDW*) y el vecino natural (*NN*), mientras que los métodos globales consideran la tendencia general, como el *kriging* (*K*). En geomorfología, la elección de un método u otro depende a menudo de la aplicación y de la naturaleza de los datos. Se ha estudiado por varios autores, pero no hay una conclusión clara sobre cuál es la mejor opción para cada tipo de terreno (Chaplot et al. 2006) (Kociuba et al. 2014) (Wheaton et al. 2010).

Los métodos de interpolación que se utilizan tradicionalmente en el *software SIG* para generar *MDE* incluyen: ponderación inversa de la distancia (*IDW*), *kriging* (*K*), vecino natural (*NN*) y red irregular de triangulación (*TIN*). El método *TIN* es el más utilizado cuando la muestra de datos es pequeña y discreta, normalmente para generar curvas de nivel, ya que permite recoger los cambios bruscos de la topografía (Goff y Nordfjord 2008) (Hejmanowska 2007). El método *NN* se utiliza habitualmente cuando se trabaja con una mayor densidad de puntos. Se basa en la construcción de polígonos de *Voronoi* y en la triangulación de *Delaunay*. El valor en una localización es una función del peso medio de los valores en los vecinos naturales (Sibson 1981), Ec. (1):

$$\hat{z} = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (1)$$

donde *z* es la elevación estimada, *n* es el número de vecinos más cercanos, *z<sub>i</sub>* son los valores de elevación conocidos y *w<sub>i</sub>* es el peso, que está relacionado con el área definida por los polígonos de *Voronoi*. Este método funciona igualmente bien tanto si los datos originales son regulares como irregulares. El método *IDW*, con diferentes posibilidades de dar peso a la distancia es, junto con el del vecino más cercano, uno de los métodos más utilizados para datos densos. La interpolación *IDW* con *w=1* es similar a la *TIN* en terrenos suaves. Su premisa es que los puntos cercanos son más parecidos que los que están alejados, por lo que los puntos más

cercanos a la ubicación de la predicción tienen más peso que los lejanos, véase la ecuación (2).

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (2)$$

La altura,  $z$ , en un punto se calcula a partir de  $z_i$  y la distancia  $d_i$  a los puntos conocidos. Un problema del *IDW* es que la superficie resultante es más suave que la real en valles y elevaciones (Ries 1993) (Li y Heap 2008). Por último, el método de *kriging* que consideramos, debido a las características de la variable que tratamos, la elevación, es el de punto ordinario con semivariograma lineal. El estimador  $\hat{z}$  de  $z$  se calcula mediante una expresión lineal del tipo mostrado en la ecuación (1). En este caso, los pesos  $w_i$  se calculan bajo la condición de que la varianza de  $|z - \hat{z}|$  debe ser mínima, pero se establece una distancia por encima de la cual se considera que los datos no están correlacionados y, por tanto, no se utiliza la información de estos puntos en la interpolación. Se basa en la teoría de la variable regionalizada que asume que la variación espacial del fenómeno representado por los valores  $z$  es estadísticamente homogénea en toda la superficie (Guo et al. 2013).

La dependencia de la estimación de la elevación en un punto, en función de su entorno, se establece midiendo la semivarianza entre datos separados por diferentes distancias. La función que relaciona la semivarianza con la distancia  $h$  se denomina semivariograma y muestra la variación de la correlación entre los datos en función de la distancia. La expresión más común para representarlo es (Oliver y Webster 1990):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{p_i} - z_{p_i+h})^2 \quad (3)$$

Donde  $n$  es el número de pares de valores separados por una distancia  $h$ . Cambiando este último valor, se puede crear el semivariograma empírico para la zona de trabajo específica. Así, se establece el número de puntos del entorno que se utilizan en la interpolación. Una de las ventajas de este método es que, además de estimar la elevación en un punto, podemos obtener una estimación de su error. Como inconvenientes en la construcción del *MDE*, la teoría requiere que el semivariograma, utilizado en el cálculo de las ponderaciones, tenga validez general para toda el área del *MDE*. Esto significa que la interdependencia entre los datos debe ser exclusivamente una función de la distancia entre

ellos, si la variación de  $z$  es homogénea, lo que no ocurre en terrenos quebrados.

## 2.2. Datos

Para las pruebas se seleccionaron tres zonas (figura 2): plana, ondulada y abrupta. Todas ellas corresponden a la vertiente norte de la Pala de Morrano, en el Parque Nacional de Aigüestortes y Estany de Sant Maurici (Catalunya, España), con una superficie aproximada de 1 km<sup>2</sup> y un desnivel de casi 200 m (figura 3). La topografía de esta zona en el valle de Dellui está constituida por roca grano-diorítica y presenta un gran volumen de desprendimientos rocosos movilizados. Las zonas presentan no sólo variaciones de pendiente sino también una distribución espacial de la rugosidad muy diferente, tabla 1.

El modelo fotogramétrico se obtuvo mediante fotogrametría aérea desde un hexacóptero puesto que

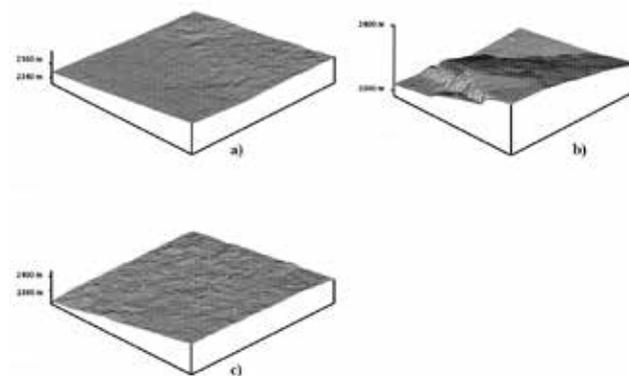


Figura 2. Zonas de estudio (50 x 50 m), a) terreno plano, de pendiente suave y accidentado, b) terreno variable ondulado-montañoso, c) terreno plano, de pendiente moderada y accidentado.

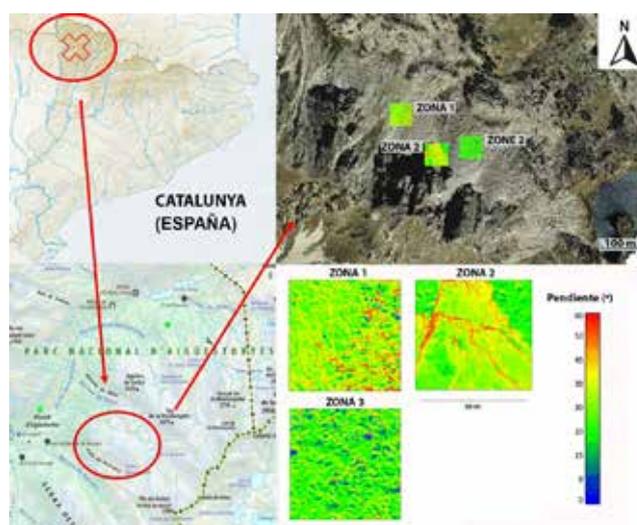


Figura 3. Distribución de las áreas de estudio en la zona de Pala de Morrano. En la parte inferior derecha los mapas de pendientes muestran el terreno abrupto de la zona 2.

Tabla 1. Número de puntos en la nube de puntos original, nivel máximo y mínimo y pendiente en cada área de estudio.

	Resolución media (cm)	nº puntos	Altura máx. (m)	Altura mín. (m)	Pendiente media (°)
zona 1	11	190091	2375,84	2332,42	12,4
zona 2	6	748948	2452,21	2374,19	32,9
zona 3	8	404711	2407,19	2363,04	25,3

la captura terrestre y el uso del escáner láser terrestre (*TLS*) no pueden cubrir toda la superficie. Fue necesario utilizar *RPAS* para capturar imágenes a muy corta distancia del macizo en terrenos de difícil o imposible acceso.

La cobertura fotográfica se realizó de modo que la resolución y el solapamiento se mantuvieran constantes en toda la zona. El solapamiento longitudinal se encuentra entre el 60 y el 90%, y el transversal entre el 20 y el 50%. Para la georreferenciación se utilizaron 8 puntos de control en *3D*, obteniendo un error medio de 0,08 m.

La tabla 1 muestra algunas de las características de estas zonas en cuanto al número de puntos de la nube de puntos original, la elevación máxima y mínima, y la media y mediana de la pendiente. Todas las zonas tienen dimensiones de 50 x 50 m (figura 3). La distancia entre puntos varía entre 6 y 11 cm, y es similar para todos los parches. La mayor densidad se localiza donde la superficie es más variable y tiene mayor pendiente.

La tabla 1 muestra la variabilidad en los valores de pendiente de las superficies, así como el valor medio encontrado para cada zona. Para el cálculo de la pendiente se eligió el plano centrado en cada punto ya que es un modelo robusto con respecto al ruido, aunque es impreciso en los bordes de la zona. La normal a la superficie se calculó estimando la superficie local representada por el punto y sus vecinos. El modelo de superficie local que se eligió fue el plano con un área de influencia de 0,75 m. El proceso de extracción de los vecinos se basó en una estructura *Octree*. La orientación de la normal (es decir, si apunta fuera o dentro del objeto) se determinó a partir de un árbol de expansión mínimo de  $knn = 6$  (*k*-vecino más cercano). La experiencia muestra que los valores más altos reducen el efecto del ruido en la definición de la normal, aunque en las zonas contiguas los valores son similares.

### 3. CALIDAD DEL MDE

Los principales factores que influyen en la calidad de un *MDE* son: la rugosidad de la superficie; el méto-

do de interpolación; y la precisión, densidad y distribución de los datos (Li 1991). Según (Ley 1986) uno de los cuatro enfoques posibles para determinar la precisión vertical de un *MDE* consiste en la evaluación por prueba de diagnóstico. Es decir, cuando se han obtenido los datos para crear el modelo, se mide la altura en un conjunto de puntos que sirven para controlar la calidad. Esta tarea se realiza tanto al final del proceso como en varias fases intermedias.

Para ello, es necesario establecer dos condiciones: el número mínimo de puntos a utilizar y la ubicación de estos puntos.

Como se establece en Li (1991), el número de puntos para un nivel de confianza del 95 % viene dado por la ecuación (4):

$$n = 1.96^2 \left( \frac{\sigma}{s} \right)^2 \quad (4)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar estimada y  $S$  es el grado de precisión especificado para la media estimada. Según Li et al. (2005),  $\sigma = 100$  y  $S = 10$ . Por lo tanto

$$n = 1.96^2 \left( \frac{100}{10} \right)^2 = 384 \quad (5)$$

Así, para la validación de la interpolación, se seleccionó una muestra aleatoria de 400 puntos de la nube de puntos inicial en cada zona.

Para analizar la influencia del método de interpolación relacionado con la resolución en la calidad del *MDE*, seguiremos el procedimiento descrito en la figura 4. Como se ha mencionado anteriormente, para cada zona se diezmó la nube de puntos a 0,2 m, 0,5 m, 1 m y 2 m de distancia, a fin de simular una captura realizada con estas resoluciones. Por lo tanto, se mantiene la distribución irregular de los puntos. Después, utilizando los métodos *TIN*, *IDW*, *NN*, *K* creamos una malla regular con un tamaño de celda de 1 m.

La interpolación se llevó a cabo utilizando el *software Surfer v.11* para todos los métodos. En una primera aproximación utilizamos el *software ArcGIS 10.5*

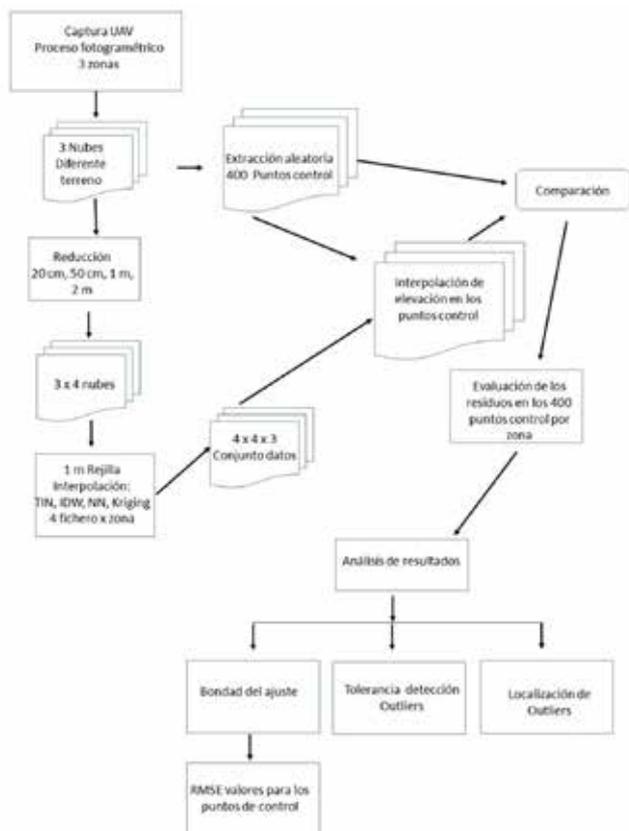


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de análisis.

pero el tiempo de computación para algunos de los procesos aumentó drásticamente, casi triplicando el tiempo con *Surfer*, por lo que se descartó. Los parámetros utilizados para cada método son:

- *K*: lineal, sin transformación y sin tendencia considerada en el cálculo del semivariograma. Sin anisotropía.
- *IDW*: exponente de potencia 2. Sin anisotropía, sin suavizado.
- *NN*, *TIN*: sin anisotropía, sin parámetros.

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de análisis.

La comparación se restringe a la resolución de 1 m, ya que la distancia media entre puntos de las observaciones de superficie es insuficiente para justificar interpolaciones a resoluciones mayores (Brasington et al. 2012). Para comprobar la calidad de la malla obtenida se han utilizado los 400 puntos de control seleccionados al azar. A partir del conjunto de diferencias, entre la altura del punto de control y el modelo, se analizará la precisión de cada modelo según el método de interpolación utilizado. Siguiendo los criterios clásicos de detección de valores atípicos de forma más restrictiva, rechazamos aquellos puntos de control cuyo valor del incremento de altura difiere de la mediana en más de 1,5 veces el rango intercuartil. En este pro-

ceso, aparecen dos nuevos parámetros a considerar en nuestro análisis: el radio del intervalo a partir del cual se rechazan los puntos interpolados, a un radio menor le corresponde mayor precisión, y el número de puntos interpolados, en cada caso, para un radio pre-determinado de 30 cm. Hemos fijado este radio límite como umbral de la zona más suave y del paso de malla más fino, ya que representan las condiciones para las que, a priori, se obtendrá una mayor calidad porque permitirá el análisis más homogéneo en todos los casos. También será objeto de estudio la situación de los puntos descartados. Para detectar posibles casos de mala funcionalidad, se realiza un test de normalidad. Por último, se calcula el error cuadrático medio (*RMSE*), Ec. (6), de cada muestra seleccionada se calcula.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{ri} - z_{pi})^2}{n}} \quad (6)$$

donde *n* es el número de puntos, 400 en este caso,  $z_{pi}$  es la elevación obtenida por interpolación en el modelo y  $z_{ri}$  es la elevación real obtenida directamente de la nube de puntos original. Este parámetro es ampliamente utilizado en la validación de *MDE* (Aguilar et al. 2005) (Guo et al. 2013). Debemos precisar que estamos hablando de elevación real cuando, en realidad, estará afectada por los errores de captura y referenciación de los datos fotogramétricos. Sin embargo, en este caso, vamos a dejarlos de lado, ya que el objetivo es evaluar los métodos de interpolación.

### 3.1. Resultados

Como hemos mencionado anteriormente, para evaluar los métodos de interpolación en diferentes muestras y para diferentes resoluciones, consideramos dos tipos de parámetros. Uno relacionado con la usabilidad de la malla resultante, como el número de puntos que se pueden interpolar para la comparación con los puntos de control, y el otro, como el *RMSE*, relacionado con la precisión de dicha malla. Además, evaluamos la influencia del método de interpolación en el cálculo del cambio de volumen en el análisis multitemporal.

#### 3.1.1. Número de puntos interpolados con éxito en los archivos ráster

Una vez calculadas las rejillas regulares de 1m de paso en cada nube de puntos, se obtiene la altura en estos modelos regulares para los 400 puntos de control mediante el método bilineal entre los nodos de la cuadrícula. En la figura 5, podemos observar que el número de puntos interpolados en cada rejilla depende de la resolución de la nube de puntos a partir de

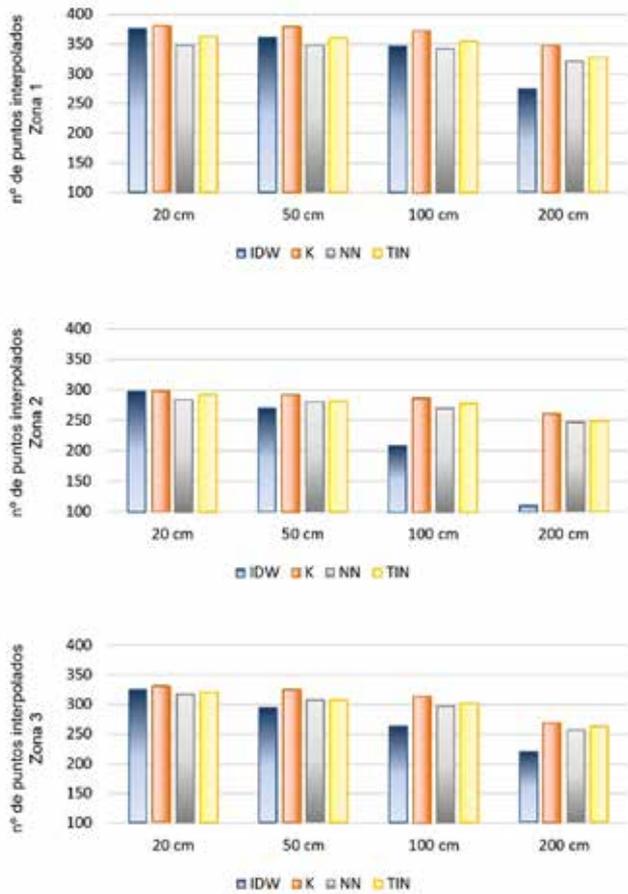


Figura 5. Número de puntos interpolados en cada zona respecto a la resolución de la nube original

la cual se ha calculado esta, pero también del método utilizado en la interpolación.

La figura 5 muestra que, independientemente de la zona (1-3) y de la resolución inicial de la nube de puntos, el número de puntos interpolados es mejor para los métodos *IDW* y *K*, mientras que para los métodos *NN* y *TIN* se puede perder hasta un 8 % de los puntos en el proceso. Esto se debe a que en los métodos *NN* y *TIN*, la interpolación se realiza considerando únicamente el límite establecido por los puntos de muestra, sin sobrepasarlos.

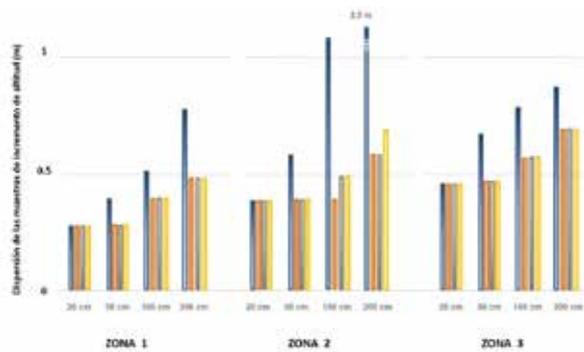


Figura 6. Dispersión de las muestras de incremento de altitud  $\{\Delta z_i\}$

### 3.1.2. Validación de los puntos interpolados

Una vez interpolados la mayoría de los 400 puntos de control de las 3 zonas, para cada una de las 4 rejillas y por los 4 métodos, se obtienen 3 zonas  $\times$  4 resoluciones  $\times$  4 métodos de interpolación = 48 casos para los que se calculan las diferencias de altitud  $\{\Delta z_i\}$  entre la cota original y la interpolada. La tendencia central, tanto si se calcula la media como la mediana, es prácticamente cero en todos los casos. La igualdad entre la media y la mediana es un indicador de la distribución simétrica de esta variable. Su dispersión será un indicador de la bondad de la interpolación en el sentido de que, en una buena interpolación, no debe haber muchos puntos que se alejen del valor central. La figura 6 muestra la dispersión de  $\Delta z_i$ , indicada por el valor de  $1,5R$ , donde  $R$  es el rango intercuartil para los cuatro métodos de interpolación y para cada una de las cuatro resoluciones, en cada una de las 3 zonas. En la figura 6 el máximo se alcanza en la zona 2, resolución 2 m, con el método *IDW* con un valor aproximado de 2,5 m, pero para mantener la escala en la figura, se ha cortado la barra vertical, y se ha reflejado el valor.

Podemos observar que, en una zona dada y para una resolución determinada, las diferencias de cotas en la muestra de dispersión no dependen significativamente del método de interpolación, excepto para el método *IDW*, que se comporta peor en todas las zonas para resoluciones a partir de 0,5 m. En las tres zonas, este parámetro tiende a aumentar cuando disminuye la resolución de la nube de puntos sobre la que se ha construido la malla.

Una vez evaluada la dispersión resultante en las interpolaciones, proponemos seleccionar los puntos «válidos» siguiendo el criterio de que se rechazarán los puntos cuya diferencia de altitud en valor absoluto,  $|\Delta z_i|$ , sea superior a 30 cm. Como hemos visto en el apartado anterior, este valor es igual a 1,5 veces el rango intercuartil en la zona 1 y para la mayor densidad.

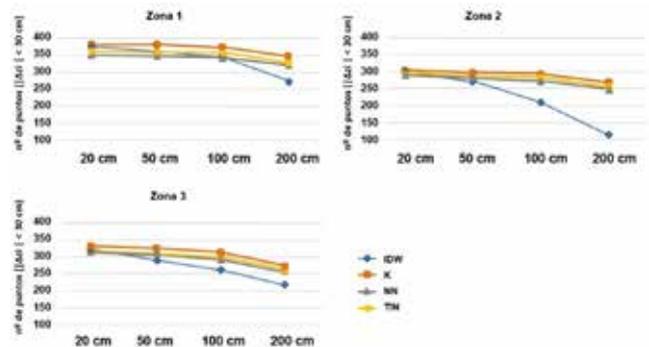


Figura 7. Número de puntos seleccionados para todas las zonas, métodos y resoluciones

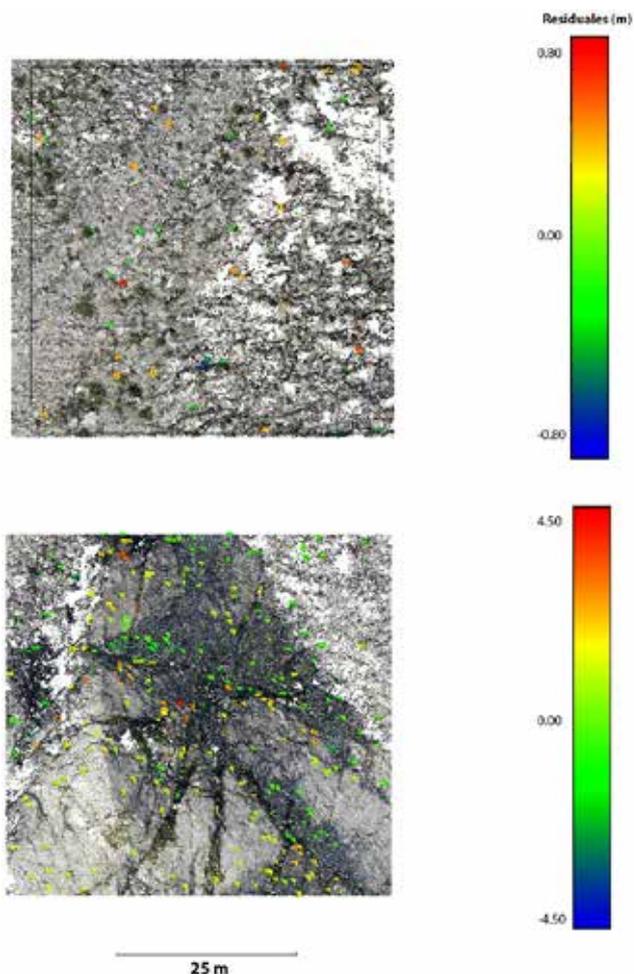


Figura 8. Puntos descartados, a) zona 2, abajo, con interpolación TIN y b) zona 3, arriba, con interpolación IDW. La nube de puntos original se muestra como fondo con color.

Hemos querido ser un poco más estrictos que en la detección clásica de *outliers*. Así, la muestra de puntos rechazados será más numerosa y mejor para el estudio de su situación en cada zona. La figura 7 muestra el número de puntos seleccionados para todas las zonas, métodos y resoluciones.

Para cada zona y método, el número de puntos seleccionados disminuye con la densidad de la nube

de puntos sobre la que se ha calculado la cuadrícula. Sin embargo, cuando se han establecido una zona y una densidad, el método *K* destaca ligeramente en cuanto al número de puntos seleccionados.

La figura 8 muestra los puntos descartados simbolizados respecto a sus residuos en una escala de colores que va del azul (mínimo -80 cm) al rojo (máximo 80 cm) sobre la nube de puntos en gris. La mayoría de los puntos rechazados se encuentran en los límites de las zonas de estudio y en los cambios de pendiente. En algunos casos, especialmente cuando se trabaja con las cuadrículas interpoladas a partir de una mayor densidad de puntos, estos puntos pueden detectarse en zonas donde no se ha eliminado la vegetación.

Hemos destacado dos casos: la figura 8 a) muestra los puntos descartados en el mejor caso, correspondiente al método *TIN* y una resolución inicial de 20 cm. En ella, los residuos se distribuyen de forma homogénea con un valor máximo de aproximadamente 80 cm en valores absolutos. La figura 8 b), muestra la interpolación mediante el *IDW* en la zona 3, que corresponde al peor de los casos, los residuos alcanzan un máximo de aproximadamente 4,5 m en valores absolutos. Estos valores se pueden explicar porque en esta zona es donde se producen más cambios de rugosidad debido a la existencia de bloques.

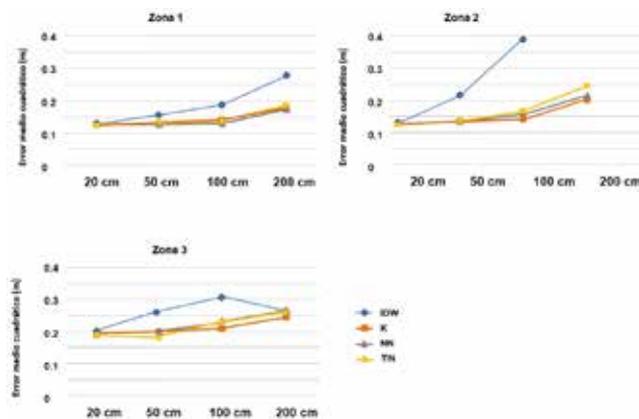


Figura 9. Error medio cuadrático para cada método de interpolación y zona.

Tabla 2. Resultados del test de normalidad para las 3 zonas.

	P-valor Zona 1				P-valor Zona 2				P-valor Zona 3			
	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m
IDW	0,70	0,85	0,88	0,67	0,19	0,00	0,01	0,11	0,35	0,21	0,69	0,55
K	0,59	0,11	0,22	0,12	0,14	0,03	0,03	0,17	0,84	0,39	0,88	0,86
NN	0,28	0,67	0,81	0,28	0,06	0,01	0,01	0,00	0,48	0,8	0,97	0,48
TIN	0,20	0,62	0,94	0,30	0,39	0,04	0,00	0,01	0,37	0,42	0,51	0,92

### 3.1.3. Test de normalidad y error medio cuadrático

Una vez rechazados los puntos con mayor dispersión, proponemos estudiar la distribución de la variable  $\Delta z_i$  en los puntos seleccionados. Como ya hemos señalado, la igualdad entre la media y la mediana indica una distribución simétrica. Ahora comprobaremos si alguno de los métodos de interpolación produce una distribución de esta variable que se aleje de la normalidad. La muestra se divide en diez intervalos de clase y se aplica una prueba de bondad de ajuste a una distribución normal. Como debemos estimar los dos parámetros de la ley normal, el estadístico de contraste sigue una ley  $\chi^2$  con 7 grados de libertad. Un *P*-valor más alto corresponderá a una muestra más normal. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

En las zonas suaves 1 y 3, que no presentan irregularidades notables, las diferencias de altitud se distribuyen de forma normal para todos los métodos de interpolación y todas las resoluciones, como podemos esperar según Li et al. (2005). Sin embargo, en la zona irregular 2, la prueba de normalidad puede considerarse negativa,

incluso para baja significación, a partir de una resolución de la nube de puntos de 0,5 m.

Otro parámetro que se ha estudiado en las muestras de puntos seleccionados es el error medio cuadrático (*RMSE*). Un valor más bajo para este parámetro corresponderá a una mejor interpolación. Los siguientes gráficos muestran los resultados para las 3 zonas, los 4 métodos de interpolación y las 4 resoluciones (figura 9).

Vemos que los errores medios cuadráticos tienden a aumentar ligeramente cuando la resolución de la nube de puntos disminuye. En lo que respecta al método de interpolación, este parámetro tiene valores más altos en el método *IDW* a partir de una resolución de 0.5 m.

### 3.1.4. Influencia del método de interpolación en cálculos volumétricos

El método más común para comparar *MDE* y calcular los volúmenes de erosión / acumulación de procesos geomorfológicos consiste en superponer archivos ráster en un *SIG*. En esta tarea, las nubes de puntos iniciales deben transformarse en archivos ráster, lo que

generalmente conduce a una pérdida de información y una reducción de la calidad. Como hemos visto anteriormente, este proceso implica un método de interpolación. Para estudiar su influencia, se seleccionó un área de prueba de la nube de puntos creada a partir de un vuelo *RPAS*, con una superficie de 28 800 m<sup>2</sup> (120 m x 240 m) y situada en la parte superior de una zona escarpada abierta, donde están presentes todos los rasgos morfológicos típicos como arroyos, grandes bloques y pendientes pronunciadas (figura 10).



Figura 10. a) Área de estudio de los métodos de interpolación, b) Nube de puntos con información fotográfica del modelo UAV, c) Mapa de ángulos de pendiente del MDE ráster 2x2 m

Los archivos ráster se crearon mediante los cuatro métodos de interpolación analizados en las secciones anteriores (*K*, *TIN*, *NN* e *IDW*), utilizando un tamaño de celda de 0,5 m y 2,0 m. La calidad de los archivos ráster resultantes se analizó mediante comparaciones cuantitativas, calculando las diferencias de volumen (Tabla 3). Usamos el ráster, interpolado mediante *kriging*, como modelo del terreno porque es el método que, a priori, en nuestro caso, ofrece resultados más realistas ya que se dispone de nubes de puntos muy densas. A partir de esta referencia, se calcularon las diferencias en elevación y volumen (figura 11).

El nivel de detalle (*LoD*) se estableció, de la forma más sencilla y directa (Whea-

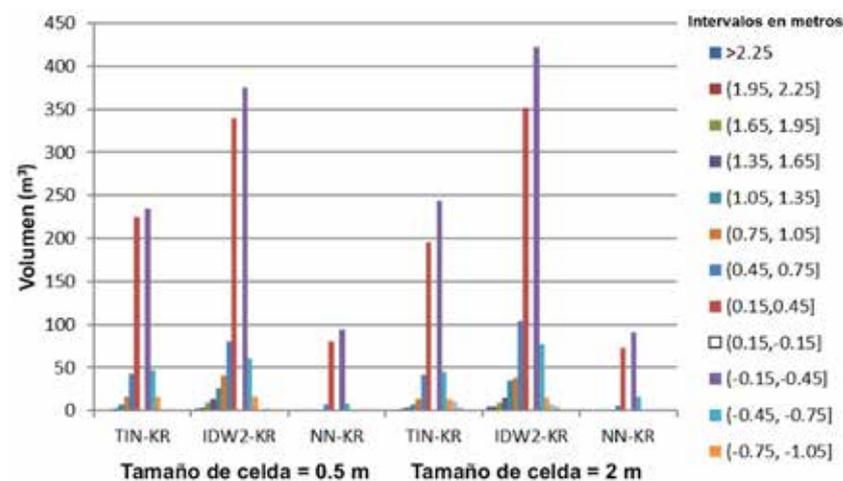


Figura 11. Comparación de métodos de interpolación. Intervalos en metros.

Tabla 3. Evaluación cuantitativa de diferencias entre los archivos ráster obtenidos por IDW, NN y TIN, tomando K como modelo de referencia. Cuadrícula de 2 m y 0.5 m. Volumen entre superficies considerando todos los datos y los datos filtrados.

Intervalos (m)	S=0,5 m						S=2 m					
	TIN-K		IDW-K		NN-K		TIN-K		IDW-K		NN-K	
	n° de celdas	Vol. (m³)										
>2,25	8	0,60	28	2,10	0	0,00	1	1,20	4	4,80	0	0,00
(1,95. 2,25]	3	0,20	52	3,90	0	0,00	0	0,00	4	4,80	0	0,00
(1,65. 1,95]	10	0,75	122	9,15	0	0,00	2	2,40	8	9,60	0	0,00
(1,35. 1,65]	30	2,25	188	14,10	0	0,00	3	3,60	12	14,40	0	0,00
(1,05. 1,35]	95	7,12	348	26,10	0	0,00	6	7,20	29	34,80	0	0,00
(0,75. 1,05]	212	15,90	539	40,42	9	0,67	11	13,20	32	38,40	0	0,00
(0,45. 0,75]	570	42,75	1070	80,25	88	6,60	35	42,00	87	104,40	5	6,00
(0,15.0,45]	2996	224,70	4534	340,05	1072	80,40	163	195,60	293	351,60	61	73,20
(-0,15.-0,45]	3133	234,97	4999	374,92	1255	94,12	203	243,60	352	422,40	76	91,20
(-0,45.-0,75]	623	46,72	813	60,97	108	8,10	37	44,40	64	76,80	13	15,60
(-0,75.-1,05]	218	16,35	217	16,27	16	1,20	11	13,20	12	14,40	0	0,00
(-1,05.-1,35]	0	0,00	1	0,07	0	0,00	9	10,80	6	7,20	0	0,00
(-1,35.-1,65]	24	1,80	36	2,70	1	0,07	3	3,60	4	4,80	0	0,00
(-1,65.-1,95]	14	1,05	19	1,42	0	0,00	0	0,00	1	1,20	0	0,00
(-1,95.-2,25]	4	0,30	7	0,52	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
< -2,25	3	0,22	10	0,75	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
TOTAL		595,72		973,72		191,15		580,80		1089,6		186,00

ton et al. 2010), como el componente cuadrático del error en cada uno de los modelos.

$$\sigma_{dif} = \sqrt{\sigma_{DEM\_new}^2 + \sigma_{DEM\_old}^2}$$

Los cambios no se consideran significativos si las discrepancias entre ambos no superan el LoD. Teniendo en cuenta la desviación estándar de los modelos fotogramétricos 3D valorados, ésta se establece en 15 cm. Se considera esta discrepancia comparable al ruido y no se contabiliza como volumen ganado o perdido. Por tanto, no se muestran los intervalos centrales entre [0, 0,15) y [-0,15, 0).

Las diferencias para tres comparaciones se representan mediante histogramas de las diferencias de elevación en las celdas ráster (figura 11). Los resultados muestran que la mayoría de las celdas tienen una pequeña variación de elevación de  $\pm 0,15$  m, pero la

diferencia de volumen final es grande cuando sumamos todas las celdas.

Independientemente del tamaño de la celda, el método IDW tiene los valores más discrepantes, seguido del TIN. Estos valores extremos se dan principalmente en presencia de bloques o en áreas de mayor pendiente cerca de las crestas de los barrancos, ya que estos métodos, como ya se mencionó, tienen un efecto suavizante. Las diferencias entre NN y K son las más pequeñas. Así, para las zonas donde se dispone de una alta densidad de puntos, el primero se puede utilizar con total garantía, aunque el tiempo de cálculo sea más corto. En cualquier caso, si utilizamos cuadrículas de diferentes interpolaciones, podemos obtener diferencias absolutas en volúmenes cercanos a los 1000 m³, un depósito sobreestimado de aproximadamente 550 m³ y una erosión de 450-530 m³, dependiendo de la resolución de la cuadrícula, independientemente de lo que ocurra en el campo.

## 4. DISCUSIÓN

Como ya hemos comentado, existen múltiples estudios sobre métodos de interpolación, pero ninguno de ellos arroja conclusiones claras sobre la idoneidad de un método sobre otro, debido a la cantidad de parámetros que intervienen. Algunos (Ali 2004) (Declercq 1996) (Aguilar et al. 2005) muestran que métodos como el *IDW* darían los mejores resultados. En morfología fluvial, por ejemplo, algunos autores encontraron que los *TIN* son más confiables (Butler, Lane y Chandler 1998) (Vallé y Pasternack 2006) (Rumsby et al. 2008), pero algunos otros encontraron que la elección del algoritmo de interpolación no es tan importante como la estrategia de la observacional. Hoy en día, la calidad de los resultados observacionales, tanto los que resultan de técnicas discretas como las capturas masivas, es bastante similar. La diferencia más importante entre las técnicas de captura, con el fin de proporcionar *MDE* con suficiente precisión para diferentes aplicaciones, podría ser la resolución de los datos originales. En nuestro caso, a la vista de los resultados, podemos concluir que el método *kriging* presenta un resultado ligeramente mejor en todos los casos, en teniendo en cuenta terrenos diferentes y diferentes resoluciones originales de la nube de puntos, mientras que el *IDW* tiene los peores resultados. Esto corrobora el resultado mostrado por Zimmerman et al. (1999) en su comparación de *IDW* versus *kriging*, en el que el *kriging* arrojó mejores estimaciones de altitud que *IDW*, independientemente del tipo de relieve y patrón de muestreo.

Para zonas planas, los métodos *TIN*, *NN* y *kriging* tienen valores de *RMSE* similares, aunque para áreas más abruptas, el último método produce mejores resultados. Por otra parte, se ha corroborado que, en la zona de mayor pendiente, el número de puntos que superan el umbral fijado para el incremento de altitud es superior. Hodgson, Michael E. y Bresnahan (2004) estimaron que el error en pendientes superiores a 25° es hasta dos veces superior al correspondiente a áreas prácticamente planas. Esto se puede observar en la zona 2, con una pendiente promedio de 33°, utilizando el método *IDW*.

Asimismo, se ha verificado que, a mayor resolución, mejores resultados, como se explica en (Aguilar et al. 2005) (Hu et al. 2009) (Guo et al. 2013). Esta diferencia en la dependencia de la resolución se aprecia principalmente, en nuestro caso, con el método de interpolación *IDW*, aunque otros autores como Reuter (Reuter et al., 2007) encuentran buenos resultados con el método *IDW* para alta resolución. Cuando los datos

originales provienen de una captura discreta, tradicionalmente se ha utilizado el método *TIN* con líneas de corte, obteniendo buenos resultados. Sin embargo, cuando se parte de nubes densas, con puntos de 20 cm a 2 m, los resultados son similares a las obtenidas con el método de *kriging*, incluso en el costo de cálculo.

Ha quedado claro que el método de interpolación puede afectar al cálculo de cambios geomorfológicos en el análisis multitemporal. En general, se dispone de una cuadrícula para la que se conoce la resolución y el método de captura, pero no el método de interpolación utilizado para generarla. ¿Cómo afectan realmente los diferentes métodos de interpolación en los volúmenes estimados?

En el análisis volumétrico multitemporal, los resultados muestran la importancia del método de interpolación seleccionado durante la creación de modelos ráster. Se recomienda aplicar los mismos métodos de interpolación para todos los modelos durante un estudio. Por tanto, se debe solicitar información detallada sobre este tema respecto a los archivos ráster existentes, antes de utilizarlos para calcular diferencias en elevaciones o volúmenes.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la influencia de diferentes factores en la precisión altimétrica de un *MDE*, construido a partir de una nube de puntos obtenida mediante un sistema de captura de datos masivo. Se han considerado las características del terreno, la resolución de la nube de puntos sobre la que se construye el *MDE* y el método de interpolación utilizado. Se han evaluado diversos parámetros, como el error cuadrático medio, la dispersión de las muestras de diferencias de altitud entre puntos de control y puntos interpolados, el umbral de aceptación de puntos considerando estas diferencias de altitud, la normalidad de estas muestras y la diferencia volumétrica entre *MDE* calculados mediante diferentes métodos de interpolación. Todos estos parámetros se han evaluado en los *MDE* construidos para diferentes terrenos, densidades y métodos de interpolación.

Se pueden sacar diferentes conclusiones: La normalidad de las muestras de diferencias de altitud se ve afectada por los cambios de pendiente. La densidad de la nube de puntos influye en la calidad del *MDE* resultante. En la evaluación de todos los parámetros, una mayor densidad permite mejores resultados. En cuanto a los métodos de interpolación, fijada una

densidad, el método *IDW* se comporta peor con respecto a la dispersión de las diferencias de altitud y los errores cuadráticos medios. En la zona más irregular, el método *K* destaca levemente en cuanto al número de puntos seleccionados para un umbral de diferencias de altitud, y en la normalidad de las muestras de estas diferencias. Finalmente, en la comparación volumétrica para diferentes métodos de interpolación, cuando se toma el método *K* como base, el método *NN* da los mejores resultados.

Por tanto, aunque los datos no nos permiten concluir, de forma clara, cuál es el mejor método de interpolación en la construcción de *MDEs*, se puede destacar un resultado importante. Es fundamental conocer el método de interpolación utilizado en la construcción de las redes si se va a realizar un análisis multitemporal pues, si los diferentes modelos se han calculado mediante diferentes métodos de interpolación, podemos concluir que se ha producido un cambio de volumen cuando en realidad se debe al proceso de cálculo.

## REFERENCIAS

- Ayhan, B., Kwan, C., Larkin, J., Kwan, L. M., Skarlatos, D. P., & Vlachos, M. (2020). *Performance comparison of different inpainting algorithms for accurate DTM generation*. 17. <https://doi.org/10.1117/12.2557824>
- Crema, S., Llena, M., Calsamiglia, A., Estrany, J., Marchi, L., Vericat, D., & Cavalli, M. (2020). Can inpainting improve digital terrain analysis? Comparing techniques for void filling, surface reconstruction and geomorphometric analyses. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(3), 736–755. <https://doi.org/10.1002/esp.4739>
- Reuter, H. I., Nelson, A., & Jarvis, A. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9), 983–1008. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
- Aguilar, Fernando J., Francisco Agüera, Manuel a. Aguilar, and Fernando Carvajal. 2005. "Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71(7):805–16.
- Ali, Tarig A. 2004. "On the Selection of an Interpolation Method for Creating a Terrain Model (TM) from LIDAR Data." Pp. 1–18 in *Proceedings of the American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference*. Nashville.
- Anderson, Eric S., James A. Thompson, David A. Crouse, and Rob E. Austin. 2006. "Horizontal Resolution and Data Density Effects on Remotely Sensed LIDAR-Based DEM." *Geoderma* 132(3–4):406–15.
- Andes, L. C., and A. L. Cox. 2017. "Rectilinear Inverse Distance Weighting Methodology for Bathymetric Cross-Section Interpolation along the Mississippi River." *Journal of Hydrologic Engineering* 22(7):04017014.
- Ashraf, Imran, Soojung Hur, and Yongwan Park. 2017. "An Investigation of Interpolation Techniques to Generate 2D Intensity Image from LIDAR Data." *IEEE Access* 5(July):8250–60.
- Ayhan B, Kwan C, Larkin J, et al (2020) Performance comparison of different inpainting algorithms for accurate DTM generation. 17. <https://doi.org/10.1117/12.2557824>
- Brasington, J., D. Vericat, and I. Rychkov. 2012. "Modeling River Bed Morphology, Roughness, and Surface Sedimentology Using High Resolution Terrestrial Laser Scanning." *Water Resources Research* 48(11):1–18.
- Butler, J. B., S. N. Lane, and J. H. Chandler. 1998. "Assessment of DEM Quality for Characterizing Surface Roughness Using Close Range Digital Photogrammetry." *Photogrammetric Record* 16(92): 271–91.
- Chaplot, Vincent, Frédéric Darboux, Hocine Bourenane, Sophie Leguëdois, Norbert Silvera, and Konngkeo Phachomphon. 2006. "Accuracy of Interpolation Techniques for the Derivation of Digital Elevation Models in Relation to Landform Types and Data Density." *Geomorphology* 77(1–2):126–41.
- Crema S, Llena M, Calsamiglia A, et al (2020) Can inpainting improve digital terrain analysis? Comparing techniques for void filling, surface reconstruction and geomorphometric analyses. *Earth Surf Process Landforms* 45:736–755. <https://doi.org/10.1002/esp.4739>
- Declercq, Franky Albert Noël. 1996. "Interpolation Methods for Scattered Sample Data: Accuracy, Spatial Patterns, Processing Time." *Cartography and Geographic Information Systems* 23(3):128–44.
- Domínguez-Cuesta, María José, Montserrat Jiménez-Sánchez, and Edgar Berrezueta. 2007. "Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): Geomorphological Features, Conditioning Factors and Methodological Implications in Susceptibility Assessment." *Geomorphology* 89(3–4):358–69.
- Elumalai, Vetrimerugan, K. Brindha, Bongani Sithole, and Elango Lakshmanan. 2017. "Spatial Interpolation Methods and Geostatistics for Mapping Groundwater Contamination in a Coastal Area." *Environmental Science and Pollution Research*

- 24(12):11601–17.
- Goff, J. A., and S. Nordfjord. 2008. "Interpolation of Fluvial Morphology Using Channel-Oriented Coordinate Transformation: A Case Study from the New Jersey Shelf." *Math. Geol* 36(6):643–58.
- Guo, Qinghua, Wenkai Li, Hong Yu, and Otto Alvarez. 2013. "Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76(6):701–12.
- Hejmanowska, B. 2007. "Analysis of NMT in the Form of GRID and TIN on Example of Data from OKI. Archives of Photogrammetry." *Cartography and Remote Sensing* 17(a):281–89.
- Heritage, George L., David J. Milan, Andrew R. G. Large, and Ian C. Fuller. 2009. "Influence of Survey Strategy and Interpolation Model on DEM Quality." *Geomorphology* 112(3–4):334–44.
- Hodgson, Michael E. and Bresnahan, Patrick. 2004. "Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(3).
- Hu, P., X. Liu, and H. Hu. 2009. "Accuracy Assessment and of Digital and Elevation and Models Based on Approximation and Theory." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75(1):49–56.
- James, M. R., and S. Robson. 2012. "Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117(3):1–17.
- James, M. R., S. Robson, S. d'Oleire-Oltmanns, and U. Niethammer. 2017. "Optimising UAV Topographic Surveys Processed with Structure-from-Motion: Ground Control Quality, Quantity and Bundle Adjustment." *Geomorphology* 280:51–66.
- Javernick, L., J. Brasington, and B. Caruso. 2014. "Modeling the Topography of Shallow Braided Rivers Using Structure-from-Motion Photogrammetry." *Geomorphology* 213:166–82.
- Jeong, D. I., A. St-Hilaire, Y. Gratton, C. Bélanger, and C. Saad. 2017. "A Guideline to Select an Estimation Model of Daily Global Solar Radiation between Geostatistical Interpolation and Stochastic Simulation Approaches." *Renewable Energy* 103:70–80.
- Kociuba, Waldemar, Waldemar Kubisz, and Piotr Zagórski. 2014. "Use of Terrestrial Laser Scanning (TLS) for Monitoring and Modelling of Geomorphic Processes and Phenomena at a Small and Medium Spatial Scale in Polar Environment (Scott River - Spitsbergen)." *Geomorphology* 212:84–96.
- Lenda, Grzegorz, Marcin Ligas, Paulina Lewińska, and Anna Szafarczyk. 2016. "The Use of Surface Interpolation Methods for Landslides Monitoring." *KSCE Journal of Civil Engineering* 20:188–96.
- Ley, R. 1986. "Accuracy Assessment of Digital Terrain Models." Pp. 455–64 in *Auto-Carto Londo*.
- Li, J., and A. D. Heap. 2008. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. edited by G. A. Department of Resources, Energy and Tourism. Canberra.
- Li, Li, Mark A. Nearing, Mary H. Nichols, Viktor O. Polyakov, D. Phillip Guertin, and Michelle L. Cavanaugh. 2020. "The Effects of DEM Interpolation on Quantifying Soil Surface Roughness Using Terrestrial LiDAR." *Soil and Tillage Research* 198(October 2019).
- Li, Zhilin. 1991. "Reliability of DTM Accuracy" *PERS* 57(10):1333–40.
- Montealegre, Antonio Luis, María Teresa Lamelas, and Juan De La Riva. 2015. "Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications." *Remote Sensing* 7(7):8631–54.
- Oliver, M. A., and R. Webster. 1990. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems." *International Journal of Geographical Information Systems* 4(3):313–32.
- Prokop, A., and H. Panholzer. 2009. "Assessing the Capability of Terrestrial Laser Scanning for Monitoring Slow Moving Landslides." *Natural Hazards and Earth System Science* 9(6):1921–28.
- Reuter HI, Nelson A, Jarvis A (2007) An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *Int J Geogr Inf Sci* 21:983–1008. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
- Ries, L. 1993. "Areas of Influence for IDW-Interpolation with Isotropic Environmental Data." *Catena* 20(1):199–205.
- Rumsby, B. T., J. Brasington, J. A. Langham, S. J. McLelland, R. Middleton, and G. Rollinson. 2008. "Monitoring and Modelling Particle and Reach-Scale Morphological Change in Gravel-Bed Rivers: Applications and Challenges." *Geomorphology* 93(1–2):40–54.
- Schürch, Peter, Alexander L. Densmore, Nicholas J. Rosser, Michael Lim, and Brian W. Mcardell. 2011. "Detection of Surface Change in Complex Topography Using Terrestrial Laser Scanning: Application to the Illgraben Debris-Flow Channel." *Earth Surface Processes and Landforms* 36(14):1847–59.
- Shi WZ, Li QQ, Zhu CQ (2005) Estimating the propagation error of DEM from higher-order interpolation algorithms. *Int J Remote Sens* 26:3069–3084. <https://doi.org/10.1080/01431160500057905>

- Sibson, R. 1981. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation." Pp. 21–36 in *Interpolating Multivariate Data*, edited by V. Barnett. New York: John Wiley & Sons.
- To, T., D. Nguyen, and G. Tran. 2015. "Automated 3D Architecture Reconstruction from Photogrammetric Structure and Motion: A Case Study of the 'One Pilla' Pagoda, Hanoi, Vietnam." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 40(7W3):1425–29.
- Vallé, Brett L., and Gregory B. Pasternack. 2006. "Field Mapping and Digital Elevation Modelling of Submerged and Unsubmerged Hydraulic Jump Regions in a Bedrock Step-Pool Channel." *Earth Surface Processes and Landforms* 31(6):646–64.
- Wang, Siyu, Zhikun Ren, Chuanyong Wu, Qiyun Lei, Wenyu Gong, Qi Ou, Huiping Zhang, Guangxue Ren, and Chuanyou Li. 2019. "DEM Generation from Worldview-2 Stereo Imagery and Vertical Accuracy Assessment for Its Application in Active Tectonics." *Geomorphology* 336:107–18.
- Wheaton, Joseph M., James Brasington, Stephen E. Darby, and David A. Sear. 2010. "Accounting for Uncertainty in DEMs from Repeat Topographic Surveys: Improved Sediment Budgets." *Earth Surface Processes and Landforms* 35(2):136–56.
- Zhang, Chunhua, and John M. Kovacs. 2012. "The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review." *Precision Agriculture* 13(6):693–712.
- Zimmerman, Dale, Claire Pavlik, Amy Ruggles, and Marc P. Armstrong. 1999. "An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting." *Mathematical Geology* 31(4):375–90.

## Sobre los autores

### María Amparo Núñez Andrés

Profesora contratada doctor en el departamento de ingeniería civil y ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Ingeniera técnica en topografía por la Universitat Politècnica de València (UPV) (1996), Ingeniera en geodesia y cartografía por la UPV (1998) y doctora por la UPC (2006).

Desarrolla su actividad investigadora en el grupo de investigación EGEO (Ingeniería Geomática) del que es coordinadora desde 2014 en el campo de la monitorización y aplicación de técnicas geomáticas: topografía, GNSS, LIDAR y Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico y evaluación de riesgos naturales debidos a desprendimientos a escala local y regional.

Desde sus inicios en la universidad ha participado en un total de 7 proyectos de investigación nacionales, siendo en la actualidad responsable de otro proyecto del mismo ámbito relacionado con la evaluación de riesgo por desprendimientos rocosos del Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación. También ha participado en 2 proyectos europeos relacionados con el estudio de deslizamientos y la calibración de sensores altimétricos, y 2 proyectos regionales para la modelización de patrimonio arqueológico. Para más información: <https://futur.upc.edu/MariaAmparoNunezAndres>

### Felipe Buill Pozuelo

Profesor titular de universidad, doctor por la UPC, Ingeniero Técnico en Topografía (UPM) y Licenciado en Geografía (UB). Tiene una experiencia de más de 30 años en proyectos de transferencia, investigación y docentes relacionados con el ámbito geomático, en especial en levantamientos fotogramétricos y levantamientos con láser escáner terrestre de objetos a gran escala, para gestión y explotación de la información 3D y en la documentación gráfica del patrimonio. Pertenece al grupo de investigación EGEO – Ingeniería Geomática de la UPC.

En los últimos 5 años ha colaborado en 6 proyectos de I+D+i financiados en convocatorias competitivas de Administraciones o entidades públicas y privadas, y 2 contratos, convenios o proyectos de I+D+i no competitivos con Administraciones o entidades públicas o privadas. Para más información: <https://futur.upc.edu/FelipeBuillPozuelo>

### Juan Rodríguez Jordana

Licenciado en Ciencias Físicas y Doctor en Física por la Universidad de Barcelona. Profesor Titular de Universidad en Departamento de Matemáticas de la Universitat Politècnica de Catalunya. Su campo de interés es el de las Matemáticas aplicadas a la Geomática, en el que ha publicado diversos trabajos, así como en el campo de la innovación docente en éste y otros ámbitos. Para más información: <https://futur.upc.edu/JuanRodriguezJordana>