



# TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Julián Garzón Barrero, Gonzalo Jiménez Cleves

Universidad del Quindío  
Armenia, Colombia

## Resumen

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) se definen como estructuras de datos numéricas que representan la distribución espacial de la elevación sobre la superficie terrestre. En términos de representación, la solución aparentemente más adecuada hasta el presente ha sido el tratamiento del relieve mediante una estructura vectorial espacial: la Red de Triángulos Irregulares (TIN, por sus siglas en inglés) propuesta por Poiker (1968), pero por su naturaleza, este algoritmo obedece a una función lineal, mientras que la geometría de la naturaleza no lo es, mostrando la mayoría de las veces un comportamiento caótico; una mejor representación de dichas formas se podría lograr con la implementación de otros algoritmos. En este documento se evalúan los algoritmos de interpolación: Ponderación Inverso a la Distancia, Kriging, Vecinos Naturales, Curvatura Mínima, Topogrid y Red de Triángulos Irregulares, permitiendo analizar la variación estadística a diferentes resoluciones a fin de obtener el mínimo error en la elevación estimada para establecer la relación entre la geometría de la superficie y el algoritmo de interpolación, a través de un análisis de varianza (ANOVA) de los Errores Medios Cuadráticos (EMC) extraídos de un DEM proveniente de una imagen de satélite ASTER, a partir de aproximadamente 300.000 datos re-muestreados por la técnica de Validación Cruzada.

**Palabras clave:** modelos digitales de elevación; interpolación; validación cruzada; análisis de varianza; error medio cuadrático

## Abstract

*Digital Elevation Models (DEM) are defined as numeric data structures representing the spatial distribution of elevation above the earth's surface. In terms of representation, the seemingly most appropriate solution to the present has been the treatment of the relief*

by a space vector structure: Triangle Irregular Network (TIN) proposed by Poiker (1968), but by its nature, the algorithm follows a linear function, while the geometry of nature is not showing the often chaotic behavior, a better representation of these forms could be achieved with the implementation of other algorithms. In this paper assesses interpolation algorithms such as Inverse Distance Weight, Kriging, Natural Neighbor, Spline and Topogrid allowing you to analyze statistical variation on different distances and directions and get the minimum error in the estimated elevation to establish the relationship between the geometry of the surface and the interpolation algorithm, through an analysis of variance (ANOVA) of the Root Mean Square Errors (RMSE) extracted from an ASTER GDEM image, from approximately 300.000 data resampled by cross-validation technique .

**Keywords:** digital elevation models; interpolation; cross validation; analysis of variance; root mean square error

## 1. Introducción

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) han sido ampliamente utilizados para modelar, analizar y mostrar los fenómenos relacionados con la topografía y otras superficies (Ai y Li, 2010). Un DEM es una representación numérica de la topografía en función de su ubicación geográfica, por lo general formada por celdas de igual tamaño, cada una con un valor de elevación (Chen y Yue, 2010). Los DEM y sus productos derivados han tenido un protagonismo indiscutible en el ámbito geoinformático los últimos 25 años con diversos propósitos: ingeniería civil (Petrie y Kenzie, 1987), planificación en el manejo de recursos naturales (Fisher, 1996), modelación de procesos erosivos potenciales (Mitasova et al., 1996; Ren et al., 2011), ortorectificación de imágenes satelitales en zonas de montaña (Vassilopoulou et al., 2002), modelación hidrológica (Jana et al., 2007; Wise, 2007), construcción de modelos predictivos multi-variantes de sitios de potencial arqueológico (Vaughn y Crawford, 2009), ingeniería militar (Fleming et al., 2009; Maio et al., 2013), y estudios de impacto climático (Hong et al., 2011; Marquès et al., 2013).

De acuerdo con Goodchild et al., (1994) y Hunter et al., (1995) el cálculo del error total en los DEM no se puede cuantificar debido a que el valor verdadero para cada accidente geográfico o fenómeno representado en un conjunto de datos geográficos es imposible de determinar. Burrough y McDonnell (1998) afirmaron que la incertidumbre y los errores son intrínsecos a los datos espaciales, por lo que deben ser tratados de forma adecuada y no ocultados tras la deslumbrante apariencia de su visualización. Entre los factores que afectan la precisión de los DEM, se conciben como los más ponderantes: la densidad muestral, la distribución de los datos, el algoritmo de interpolación y su resolución espacial. (Ley, 1986; Li, 1990; Li et al., 2005; Fisher y Tate, 2006).

Según Ackermann (1996) la precisión de un DEM puede ser definida como el promedio de los errores verticales de todos los puntos potencialmente interpolados; esto se logra mediante el cálculo del Error Medio Cuadrático (EMC) que se encarga de medir la dispersión de la distribución de frecuencia de las desviaciones entre la datos de elevación originales y los datos DEM (Weng, 2002), sin embargo, el EMC es una medida

global que al ser aplicada al DEM no revela las características espaciales del error (Wise, 2011).

Kumler (1994) desarrolló una metodología para estudiar la causa del error en estructuras TIN mediante distintos métodos de selección de vértices, Gao (1997) estudió la resolución y la precisión de la representación del terreno por medio de una retícula regular a una micro-escala, Rees (2000) estudió la precisión de los DEM interpolados a altas resoluciones y demostró que la interpolación bilineal simple produce resultados apropiados para aplicaciones DEM. Li et al., (2000) discutieron sistemáticamente la teoría de los DEM especialmente en la precisión del análisis de los modelos y dedujeron la precisión basados en estructuras ráster. Kidner (2003) argumentó que las técnicas de interpolación de orden superior fueron siempre más precisas que las generadas por la interpolación bilineal. Márquez (2004) sustentó que en la representación de superficies la información siempre será imprecisa debido a la simplificación propia de la modelación, por lo tanto es necesario conocer y controlar la incertidumbre del error para conocer la fiabilidad de los resultados obtenidos. Deng et al., (2007) documentaron la variación de los errores en un DEM en términos de la dependencia que presenta la resolución del ráster en función del análisis de las formas del relieve.

## 2. Métodos y materiales

La zona de estudio se encuentra localizada en Colombia entre los Departamento de Cauca y Nariño con latitudes 01° y 02° N y longitudes 77° y 78° W recubriendo alrededor de 263 Km<sup>2</sup> (Figura 1). La zona se caracteriza por poseer elevaciones que van entre los 500 a 1600 metros sobre el nivel medio del mar, con una gran riqueza hídrica, además de albergar vegetación xerofítica y ecosistemas ricos en flora y fauna declarados como reserva de la biósfera por las UNESCO.



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio

Se utilizó el DEM obtenido de la imagen ASTER GDEM con resolución espacial de 30 m, de 541 filas por 541 columnas generando una cobertura de 263 Km<sup>2</sup>, lo que equivale aproximadamente a 300.000 datos puntuales para procesar.

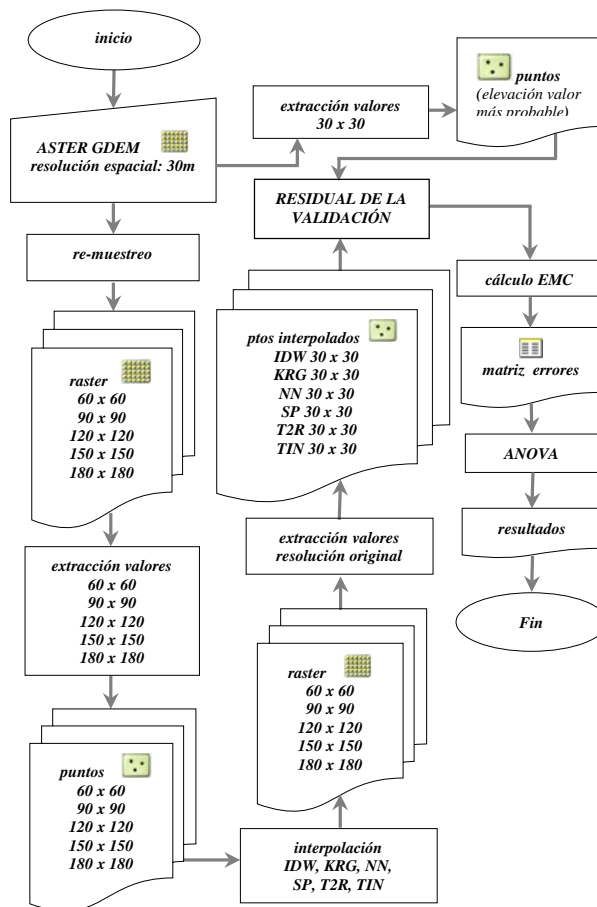
La metodología propuesta es adaptada de Rees (2000) y Kidner (2003), quienes remuestrearon un DEM que originalmente tuvo una resolución espacial de 50 m, a una serie

de resoluciones mayores con los que se produjeron nuevos DEM, que fueron interpolados nuevamente a la resolución inicial (50 m), para comparar los valores interpolados con el DEM original.

El objeto de la metodología es la implementación de un modelo experimental que permita en función de una muestra considerable de elevaciones provenientes de la imagen ASTER correspondiente a la zona de estudio, determinar cuál de los algoritmos representa mejor la superficie del área de estudio (Figura 2), sin comprometer la calidad altimétrica de la representación de la superficie en los DEM evaluados.

El primer paso consiste en la extracción de las elevaciones del DEM proveniente de la imagen de satélite ASTER. Posteriormente, se aplicó el procedimiento de re-muestreo para determinar nuevos valores de las celdas del ráster en función de un tamaño determinado (Kidner, 2003). En la Tabla 1 se presenta el nivel de re-muestreo empleado, el tamaño de celda correspondiente y el número de datos procesados para cada caso.

Figura 2. Flujo metodológico



La intención de este procedimiento es re-muestrear el DEM original hasta un punto tal que los datos de baja densidad generen errores en los DEM interpolados. En todos los casos se incluyeron las cuatro esquinas de la zona de estudio como puntos del conjunto de datos del re-muestreo, con el fin de evitar que algunos puntos se estimaran mediante extrapolación en lugar de interpolación (Wise, 2011). De esta manera se seleccionó un área de estudio con casi 300.000 de puntos en X y Y, lo que permitió que el DEM se re-muestreara por potencias de 3 y de esta forma se conservara un conjunto razonable de datos con los cuales interpolar.

Posteriormente se aplicaron los algoritmos de interpolación: Ponderación Inversa a la Distancia (IDW), Kriging (KRG), Vecinos Naturales (NN), Curvatura Mínima (SP), Topogrid (T2R) y Red de Triángulos Irregulares (TIN).

### 3. Discusión

Las características generales del error del DEM mostraron que éste fue gravemente afectado por el grado de variabilidad de la pendiente del terreno, que incide en la fiabilidad con la que se puede estimar el EMC, así como la de todos los errores en los diferentes niveles del re-muestreo. El error de representación altimétrico del DEM ocasionado por los interpoladores evaluados mostró un fuerte vínculo con la pendiente, este se incrementó a medida que los valores de la pendiente aumentaron, las zonas con mayores errores coincidieron con el rango montañoso (pendientes mayores a 25°), y las zonas clasificadas como planas (menores que 2°) presentaron los menores errores; esto es un indicador útil en la detección de los niveles de error para aquellos productos derivados de la pendiente usados en la modelación digital de elevaciones. Este hecho fue coincidente con resultados presentados por Márquez (2004) y Gorokhovich y Voustianiouk (2006), quienes luego de analizar distintos modelos de interpolación en zonas de diferente relieve concluyeron que el error altimétrico aumentó a medida que lo hizo la pendiente de la zona.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, el patrón de los errores de elevación mostró un claro y enérgico enlace entre la geometría del terreno, pendiente y curvatura, exponiendo sub-estimación para zonas cóncavas y sobre-estimación para zonas convexas, así mismo se comprobó que existe un alto índice auto-correlación espacial del error a medida que la resolución del ráster se hizo menos densa.

Las diferencias del EMC logrado por los algoritmos de interpolación evaluados, indicaron que el algoritmo *Curvatura Mínima* posee el patrón de variación más regular en todos los niveles de re-muestreo, este algoritmo retuvo características a pequeña escala que ninguno de los otros interpoladores evaluados pudo mantener, esto fue coincidente con hallazgos de Wise (2011) quien sostiene que los métodos basados en *Spline* son los que mejor ajustan los puntos del muestreo a la representación de la superficie que modelan, ya que exponen una mayor auto-correlación espacial que aquellos algoritmos que basan su estimación en función de la cercanía de puntos, siendo nuevamente coincidente esta afirmación con los resultados obtenidos por el algoritmo *Ponderación Inverso a la Distancia* (IDW) que mostró los mayores errores inducidos por la interpolación.

El algoritmo *Kriging* produjo resultados aceptables cuando hubo suficientes datos para estimar el semi-variograma, debido a que trata el ruido como parte de la señal. De cualquier forma, la precisión de la interpolación por este método fue mejor que la presentada por el método de *Ponderación Inverso a la Distancia*, aunque al modelar la superficie tuvo tendencia a generar patrones concéntricos alrededor de los puntos originales, lo cual lo convierte en el interpolador con mayor EMC del estudio, esto se argumenta por el peso que se le da a la variación particular del valor de un punto del muestreo sobre los que están a su alrededor. Zimmerman et al., (1999), coincidieron en que el algoritmo *Kriging* produce mejores estimaciones de la elevación que el *Método de Ponderación Inverso a la Distancia* (IDW) independientemente de la forma del terreno y del patrón de re-muestreo, atribuyendo este resultado a la capacidad que tiene *Kriging* de ajustarse a la estructura espacial de los datos.

El algoritmo *Red de Triángulos Irregulares* produjo una superficie no suavizada lo que causó pendientes discontinuas en los bordes de la triangulación, este algoritmo solo tiene en cuenta la distribución espacial de los puntos originales y no la forma de la superficie generada y da cabida a la creación de triángulos que alteran la geometría de la superficie esperada, esto se debe a que es un interpolador lineal y las formas de la superficie terrestre por lo general no corresponden a modelos lineales, sin embargo, TIN ha sido el interpolador por excelencia para la representación de formas topográficas, pues se considera un método local y exacto basado en la triangulación de Delaunay. De acuerdo a la relación entre contrastes, no existió diferencia significativa entre *Red de Triángulos Irregulares* y *Vecinos Naturales* que a pesar de operar en forma muy similar al método de *Ponderación Inverso a la Distancia* (IDW), utiliza un ajuste local que reduce el efecto de círculos concéntricos, pues tiene un parámetro de suavizamiento, además de tener en cuenta la anisotropía otorgando diferentes pesos a lo largo de los ejes de búsqueda. Bater y Coops (2009) argumentaron que en la valoración del error, los modelos de interpolación *Curvatura Mínima*, *Vecinos Naturales* y *Red de Triángulos Irregulares* presentaron comportamiento similar en sus precisiones tanto en términos estadísticos como en su relación con la pendiente y la densidad de puntos. Así mismo, sostienen que el método de *Ponderación Inverso a la Distancia* (IDW) no presentó un buen desempeño comparado con los otros algoritmos, y las superficies creadas con este interpolador fueron las menos realísticas en la representación del terreno.

*Topogrid* se caracterizó por presentar un excesivo suavizamiento de la superficie así como la omisión de gran cantidad de detalles de la misma, lo cual hizo que se perdiera precisión planimétrica en la disposición de las formas que no corresponden a redes de drenaje, de acuerdo con la Figura 16-b el comportamiento de las sub-estimaciones con este interpolador, se debió a que el algoritmo tiene como función principal la continuidad en la red hidrológica y es precisamente en las zonas de mayor depresión donde el error presentó sus máximas magnitudes. De acuerdo con los resultados del análisis de significancia entre contrastes, no existió diferencia estadísticamente significativa entre los algoritmos *Topogrid* y *Kriging*, así como tampoco entre *Vecinos Naturales* y *Red de Triángulos Irregulares*, según Giménez (2008) en la evaluación del error altitudinal de los DEM, no existieron diferencias significativas en una misma resolución del ráster entre los interpoladores que evaluó (T2R, IDW, KRG, TIN, SPL, Shepard),



posiblemente esto se debió a que los modelos no se analizaron en función de los rangos de pendiente como sucedió en la metodología del presente trabajo (Tabla 2).

Gran cantidad de investigadores (Fisher, 1992; Felicísimo, 1994; Goovaerst, 1997; López, 1997; Holmesa et al., 2000; Pebesma, 2004; Temme et al., 2008) han modelado la propagación del error en los DEM realizando simulaciones con el método de *Monte Carlo* donde se asume el error bajo un comportamiento Gaussiano deduciendo a partir de allí las características de su propagación. Este trabajo mostró que los errores producidos por las estimaciones en el DEM no se comportaron bajo una Distribución Normal sino una Logística, especialmente en los re-muestreos de mayor densidad de puntos, con valores de curtosis muy altos, implicando una mayor varianza ocasionada por las desviaciones infrecuentes en las largas colas de la distribución; en muchos casos el valor de datos re-muestreados a 180x180 no se encontró muy lejos del valor 0 de una Distribución Gaussiana, esto sugiere que a medida que disminuye la cantidad de puntos del re-muestreo, el comportamiento de los errores tiende a normalizarse, según Jeffrey et al. (2001) a pesar de la amplia utilización de la validación cruzada para evaluar los algoritmos de interpolación, se debe ser consciente de sus limitaciones, específicamente se suele sobre-estimar el error de interpolación ya que la predicción se calcula en lugares donde los datos están disponibles, por lo tanto la estimación de la validación cruzada puede ser alterada por la eliminación del punto validado, en la práctica estos problemas son inevitables, pero al aumentar el número de puntos de entrada se tiene un menor impacto en el resultado.

#### 4. Conclusiones

Este trabajo ha introducido un método alternativo para estudiar algunas de las características del error en los DEM, mediante una técnica de re-muestreo a diferentes resoluciones. La metodología reveló algunas características interesantes del error producido por una variedad de métodos de interpolación aplicados al DEM, dando así una luz sobre la distribución de frecuencias y propiedades espaciales de la auto-correlación del error, que apunten a determinar el patrón de propagación de su comportamiento en la modelación de superficies terrestres.

La elección del algoritmo de interpolación en la construcción de un DEM debe estar fuertemente vinculada con el empleo final al cual éste vaya destinado, así mismo esta selección exige el conocimiento del tipo de estructura que almacena la información altimétrica, la resolución espacial (en el caso de estructuras ráster), la densidad de los puntos (en caso de las estructuras vectoriales), los descriptores topográficos del área que se quiere modelar, la tolerancia en la magnitud del error final de representación, y finalmente la forma de medir este error.

Para redondear la idea de la afectación que se da la selección del algoritmo de interpolación en la representación de una superficie, es un hecho que no existe un método de interpolación ideal para todos los fines, pues cada uno fue creado para la estimar información que caracterice el fenómeno de la mejor forma limitado a las

asunciones inherentes en: el diseño del algoritmo, el tipo de superficie, su estructura de representación, y la tolerancia de los errores esperados.

## 5. Referencias

- BALCE, A. E. (1987). Determination of optimum sampling interval in grid digital Elevation models (DEM) data acquisition. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53: 323-330.
- BATER, C. W. y COOPS, N. C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers and Geosciences*, 35, 289-300. doi:10.1016/j.cageo.2008.09.001
- FELICÍSMO PÉREZ, A.M. (1994). Modelos digitales de terreno. Oviedo, Pentalfa Ediciones.
- FISHER, P. F. (1992). 1st experiments in View shed uncertainty—simulating fuzzy Viewsheds. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58(3), 345-352.
- FISHER, P. F. (1998). Improved Modeling of elevation error with geostatistics. *Geoinformatica*, 2, 215-233.
- GIMÉNEZ, MARTÍN. Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos Rusle y Usped. Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España) (tesis doctoral). Madrid España: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Proyectos y Planificación Rural; 2008.
- GOOVAREST, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York: Oxford University Press.
- GOROKHOVICH, Y. y VOUSTIANIOUK, A. (2006). Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104 (4), pp. 409-415. doi:10.1016/j.rse.2006.05.012
- HOLMESA, K.W., CHADWICKA, O.A., y KYRIAKIDIS P.C. (2000). Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology* 233: 154-173.
- KYRIAKIDIS, P. C., SHORTRIDGE, A. M., y GOODCHILD, M. F. (1999). Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 13, 677-707.
- LEY, R. (1986). Accuracy assessment of digital terrain models. *Auto-Carto London*, 1: 455-464.
- LI, ZHILIN. (1993). Theoretical models of the accuracy of digital terrain models: an evolution and some observations. *Photogrammetric record*, 14(82): 651-660.
- LI, ZHILIN. *Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling* (tesis doctoral). Scotland, UK: The University of Glasgow; 1990.
- LI, Z., Q. ZHU y C. GOLD. (2005). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*, CRC Press, Boca Raton, London, New York, and Washington, D.C.
- LÓPEZ, C. (1997) Locating some types of random errors in Digital Terrain Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 677-698.
- LOPEZ, C. (2000). Improving the elevation accuracy of digital elevation models: a comparison of some error detection procedures. *Transactions in GIS* 4 (1), 43-64.



- MÁRQUEZ, JOAQUÍN. Modelos digitales de elevaciones, métodos de interpolación y parámetros morfométricos del relieve (tesis doctoral). Sevilla España: Universidad de Sevilla, Facultad de Geografía e Historia, Departamento de geografía física y análisis geográfico regional; 2004.
- REES W. G. (2000). The accuracy of digital elevation interpolated to higher resolution. *International Journal of Remote Sensing*, (1), 7-20.
- TEMME, A., HEUVELINK, G., SCHOORL, J. y CLAESSENS, L. (2008). Geostatistical simulation and error propagation in geomorphometry. En: Hengl, T., Reuter, H. (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, and applications*. (pp. 121-140). Vol 33 of *Development in Soils Science*. Amsterdam: Elsevier.
- WISE, S. M. (2011). Cross validation as a means of investigating DEM interpolation error. *Computers and Geosciences*, 37(8), 978-991. doi:10.1016/j.cageo.2010.12.002
- ZIMMERMAN, D., PAVLIK, C., RUGGLES, A., ARMSTRONG, M., (1999). An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Math. Geol.* 31, 375–390.

### Sobre Los autores

- **Julián Garzón Barrero:** Ingeniero de Sistemas, Tecnólogo en Topografía, Especialista en Geomática, Magister en Sistemas de Información Geográfica. Profesor Asistente. [juliangarzonb@uniquindio.edu.co](mailto:juliangarzonb@uniquindio.edu.co)
- **Gonzalo Jiménez Cleves:** Topógrafo, Especialista en Computación, Magister en Ingeniería de sistemas. Profesor Asociado. [gjcleves@uniquindio.edu.co](mailto:gjcleves@uniquindio.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2015 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)