

# USO DE MODELOS DE ELEVACION DIGITAL COMO ALTERNATIVA PARA MOSTRAR ERRORES EN MAPAS TOPOGRAFICOS

## DIGITAL ELEVATION MODEL USE AS AN ALTERNATIVE TO SHOW ERRORS IN TOPOGRAPHIC MAPS

*Marvin E. Quesada*<sup>1</sup>

*Matt Marsik*<sup>2</sup>

### RESUMEN

Este estudio investiga el uso de Modelos de Elevación Digital (MEDs) como medio para determinar errores en mapas topográficos, usando estadísticas descriptivas y puntos de control de elevación como medidas de error. Se escogió un MED interpolado de curvas de nivel a escala 1:10000 como una fuente independiente de alta precisión, basándose en la propuesta geo-espacial de la Federal Geographic Data Committee, FGDC (1998). El área utilizada para probar el modelo se ubica en un sector de la región Central de Costa Rica, en la cabecera del cantón central de San Ramón en la provincia de Alajuela. Esta región presenta una topografía variada, constituida por colinas, valles, cursos fluviales que se ubican sobre formaciones volcánicas, siendo los principales componentes del paisaje. La exactitud y confiabilidad de los resultados de esos modelos depende de los errores inherentes en los MEDs, así como de los datos originales de elevación

---

1 Msc., Departamento de Ciencias Sociales. Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente. San Ramón, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: marvinqq@hotmail.com

2 Phd, Department of Geography. University of Florida, Turlington Hall, Gainesville, Florida 32611-7315, USA. Estados Unidos. Correo electrónico: mmarsik@gmail.com

Fecha de recepción: 30 de octubre del 2011  
Fecha de aceptación: 12 de diciembre del 2011

y los procesos de elaboración, especialmente aquellos creados con curvas de nivel que incluyen las comparaciones de rangos de elevación y la visualización de errores en superficie, basados en la recolección de datos en el campo.

**Palabras clave:** MEDs, interpolación, abstracción computarizada, *LPLY*, *RBF*, *RMSE*, Sistemas de Información Geográfica, Mapas topográficos.

#### **ABSTRACT**

This study investigates the use of digital elevation models (DEMs) as an alternative to see errors in topographic maps, using descriptive statistical and control points of elevation as references. There was used a DEM interpolated from 1: 10000 contours using universal kriging (UK) according to the geospatial proposal of the Federal Geographic Data Committee, FGDC (1998). The geographical area modeled by the DEMs is located in the central region of Costa Rica, in the central area of the county called San Ramon that belongs to the Alajuela Province. The topography here is quite varied, including hills, valleys, rivers located over volcanically derived; those are the primary controls of landscape creation. The accuracy of the DEMs depends of the data estimation at unmeasured points, which necessitates using statistically chosen weights, optimized to minimize prediction errors, based on existing data points.

**Key words:** Digital elevation model, interpolation, computerized abstraction, *LPLY*, *RBF*, *RMSE*, Geographic Information Systems, Topographic maps.

## **1. Introducción**

Un modelo de elevación digital (MED) provee una fuente idónea de datos de la superficie terrestre, así como medidas del margen de error usando los puntos de control. Por lo tanto, un MED es una abstracción computarizada de elevación, que representa un terreno que es indefinidamente complejo y continuo en extensión. Según Carter (1988), la elevación digital es una superficie matemáticamente continua, que procura representar más de cerca la verdadera forma del terreno. Existen tres formas principales de modelos de elevación digital a saber: una base raster, una estructura matriz con un tamaño de celda fijo y una malla de puntos conectada por facetas triangulares (Red Triangular Irregular).

El terreno real es muy complejo y variado, en el que existen distintas irregularidades en la superficie que van desde formas generales de amplia dimensión hasta aquellas muy pequeñas. En el caso de los MEDs no se preserva la micro-topografía de la superficie de la Tierra, de ahí que sean muy simplificados. Ahora bien, un MED es susceptible a contener errores, son sistemáticos y/o al azar en su naturaleza. Un MED tiene un amplio campo de aplicación, por ello, la detección de estos errores es importante para de-

terminar la exactitud del proceso de modelado. De ahí que el proceso físico que está siendo modelado resulta la simulación más cercana a la realidad.

El uso de MED es imperativo para la creación de modelos hidrológicos, modelos geomorfológicos, modelos de transporte de sedimentos, zonificación de suelos, modelos de fuentes de contaminación, análisis y modelo del terreno y selección de sitios de análisis locacional. Moore et al, (1991) proveen una revisión temprana de las características, limitaciones y aplicaciones de los datos de elevación digital de muchas aplicaciones modeladas con un énfasis primario en aplicaciones hidrológicas.

Florinsky (1998) ofrece una inspección profunda y actualizada del terreno digital y de los modelos de elevación, detallando las aplicaciones combinadas con datos de sensores remotos en estudios sobre vegetación, geoquímica, uso de la tierra, geología, climatología, glaciaciones y estudios de riesgos socio naturales. La exactitud y fiabilidad de los resultados del modelo dependen de los errores inherentes en el MED, desde los datos de la elevación original y el proceso de creación, especialmente los creados desde las líneas de contorno (Carter, 1988 y Robinson, 1994). Las políticas de decisión que potencialmente afectan a mucha gente dependen de la validez de estos resultados. Por eso, el MED debe estar tan libre de errores como sea posible.

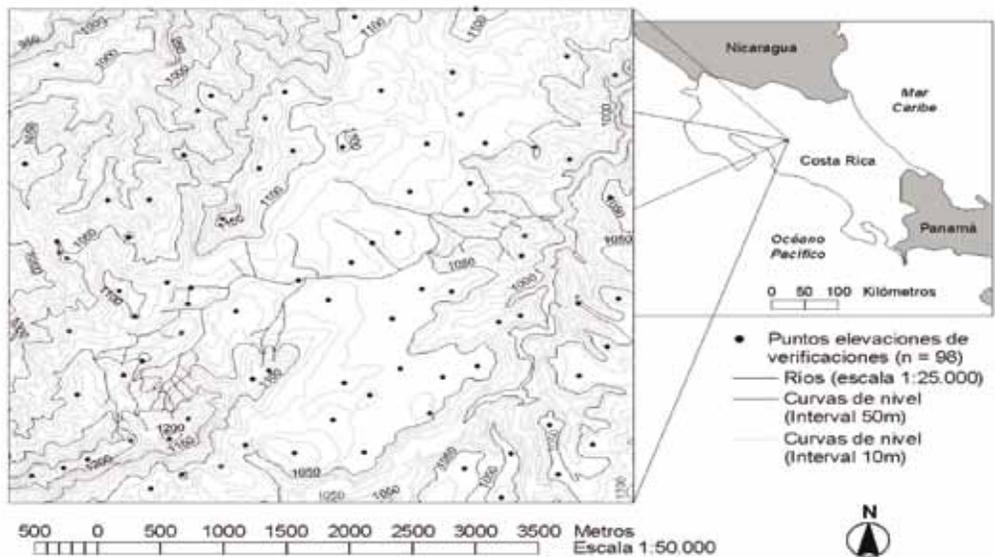
Los contornos son una fuente disponible de datos de elevación, especialmente para países en desarrollo como Costa Rica, los cuales se elaboran fácilmente al usar fotogrametría a partir de fotografías aéreas, o al digitalizarlos desde mapas de varias escalas. Muchos de los estudios previos solían comercializar los MEDs disponibles desde las agencias como USGS (Gao, 1995, Kyriakidis et al. 1999, Holmes et al. 2000, y Kenward et al. 2000) o esos derivados de imágenes de sensores remotos (Bolstad y Stowe 1994, Kenward et al. 2000, y Thompson et al., 2001), ambos no están listos ni disponibles para países en desarrollo o medios tropicales, debido al costo de producción. Por lo general no son útiles, debido a la densa capa de nubosidad que impide ver el uso de la tierra desde las fotografías aéreas. Además, la elevación examinada en el campo al usar GPS o las técnicas de catastro tradicionales (EDM o teodolito), como las probadas por Desmet (1997) y Walker y Willgoose (1999), son difíciles de recolectar, y el terreno quebrado de los trópicos impide el acceso a sitios de compleja topografía, como cumbres, cordilleras, cerros y valles. El uso de puntos de

control de elevación se derivó de los mapas topográficos para la validación de precisión vertical, que ofrece una alternativa barata a costosos puntos con GPS, como los usados por Bolstad y Stowe (1994), Kyriakidis et al. (1999) y Holmes et al. (2000).

## 2. Área de Estudio

San Ramón, localizado al oeste de la Depresión Tectónica Central de Costa Rica (figura 1), es el área geográfica modelada por el MED. La topografía es bastante variada, debido a la acumulación de depósitos volcánicos, flujos piroclásticos, y erosión fluvial abundante, como parte de las principales formas de modelado paisajístico. El terreno es ondulado por naturaleza, con una tendencia de cordilleras NE-SO en la esquina Suroeste, y una cordillera N-S a lo largo de la orilla Este con el valle del Río Grande al Oeste de esta cordillera. En la esquina Noroeste, el valle de la Quebrada Bolívar es el aspecto topográfico primario. Por último, la ciudad de San Ramón ocupa un área central suavemente inclinada entre las cordilleras y el valle del Río Grande; esta área se formó por depósitos de sedimentos lacustres.

**Figura 1.** Ubicación del área de estudio



**Fuente:** Elaboración propia con base en Mapa topográfico de San Ramón (HOJA 3346III), Instituto Geográfico Nacional. Costa Rica. 2005.

### 3. Marco Metodológico

Se utilizaron algunos programas de sistemas de Información Geográfica para pre-procesar los datos de contorno y otros como (ArcCatalog, ArcMap, ArcInfo workstation and Geostatistical Analyst) para crear las superficies interpoladas. Similarmente, se aplicó un programa de números estadísticos para conducir las pruebas estadísticas de validación cruzada, obtenidas de la creación de la superficie.

Los datos de contorno, utilizados para crear los MEDs, derivaron del mapa topográfico de San Ramón (HOJA 3346III), el cual se creó utilizando técnicas fotogramétricas, desde fotografías aéreas realizadas por el Instituto Geográfico de Costa Rica (1965), y suministrado al formato de cobertura digital ArcGIS por la Universidad Nacional (UNA), Heredia, Costa Rica. Las líneas de contorno 1:25,000, con un intervalo de 10 metros, tienen un alcance de elevación desde 910 metros a 1230 metros, y describen digitalmente la elevación y la topografía del área. Las 98 elevaciones utilizadas para chequear los MED interpolados también derivaron de la hoja del mapa de San Ramón 1:25,000, y tiene una exactitud vertical de un metro. Ellos son amplia y uniformemente representados por los contornos (figura 1).

Los MEDs se crearon utilizando dos tipos de métodos de interpolación, polinomial local y funciones de la base radial, ofrecidas en el Geostatístico. El método polinomial local (*LPLY*) es un punto inexacto interpolador, que encaja con muchas ecuaciones polinómicas con datos cercanos a la superficie. Debido a la inexactitud del valor observado en cada punto de dato, no encajan con exactitud en los resultados de la superficie. Los datos cercanos se definen por una forma (usualmente circular o elíptica) y la configuración de la región, a lo largo de un número máximo y uno mínimo de puntos de datos utilizados (Johnston et al., 2001).

Como el nombre lo dice, *LPLY* muestra como la variación local de una superficie es adecuada para la forma topográfica ondulada del área de estudio: San Ramón. El proceso se da de la siguiente forma: primero, una ecuación de orden polinomial se ajusta a todos los puntos de datos en un lugar determinado, después, se mueve a través de los puntos, adaptando una superficie a ellos, finalmente, una ecuación de regresión se usa para minimizar la diferencia entre cada punto en los lugares y en el centro de

cada lugar, a través del cual cada superficie polinomial pasa y es el valor de la ecuación polinomial (Johnston et al. 2001).

La función de la base radial (**RBF**) es similar a la *LPLY*, en la que pasa una superficie a través de todos los puntos de datos; sin embargo, *RBF* es un interpolador exacto, que preserva las observaciones originales en la superficie resultante. *RBF*, se adecua a una superficie curva muy delgada a través de valores, preservando esos valores y minimizando la curvatura total de la superficie (Johnston et al., 2001). La interpolación *RBF* produce una superficie lisa desde un gran número de muestras, que son variadas y onduladas a diferente elevación. Así como *LPLY*, *RBF* está bien ideado para el tipo de topografía encontrado en esta área de estudio. Sin embargo, *RBF* no maneja bien aquellos lugares con diferentes elevaciones sobre distancias horizontales cortas.

El proceso general de interpolación *RBF* se da de la siguiente forma: una *RBF*, una función matemática que cambia con la distancia desde un punto, se crea en cada punto de datos; para predecir locaciones desconocidas, el promedio de peso es calculado en cada una de las *RBF* más cercanas a la predicción; los pesos de cada una de las *RBF* más cercanas a la predicción, con la predicción hipotéticamente hecha en un punto de datos conocido (Johnston et al., 2001). Cinco tipos de interpoladores *RBF* diferentes en la cantidad de suavidad son ofrecidos en el ArcGIS Analista Geoestadístico: lugares planos, multi-cuadrático, multi-cuadrático inverso, astilla con tensión y astilla completamente regulada (como la citada por Johnston et al. (2001), Bishop (1995), Cressie (1993), y Chiles y Delfiner, (1999) para más descripción sobre *RBF*).

Los métodos de interpolación descritos arriba requieren puntos de datos para interpolar y crear los MEDs. Los datos de contorno utilizados en esta investigación son un juego de datos de rasgo lineal. Por ello, las líneas de contorno se convirtieron en un juego de datos de rasgo puntual con cada vértice desde los contornos representando la elevación de ese contorno en un punto. En otras palabras, a cada vértice, desde el dato de contorno, se le asignó el valor de elevación de su respectivo contorno y se convirtió en un punto que representa ese valor de elevación. Ahora la elevación puede ser interpolada.

Antes de que fueran aplicados los interpoladores *LPLY* y *RBF*, se realizó un análisis exploratorio de datos en los puntos de elevación, para

detectar la presencia de tendencias globales subyacentes que pudieran contactarse en la interpolación, y así producir una mejor superficie de MED. Además, se generaron estadísticas descriptivas e histogramas, para determinar si los datos de elevación seguían una distribución de probabilidad normal.

El Analista Geoestadístico ArcGIS provee los *LPLY* y *RBF* como métodos de puntos de interpolación que crean ecuaciones matemáticas representando la superficie interpolada. De acuerdo a la discusión sobre *LPLY* y *RBF*, cada método especifica un tamaño de lugar, la forma y el número de los puntos de datos a incluir. Para comparar las superficies, se creó primero un modelo por defectos para cada método de interpolación y, subsecuentemente, se depuró con la optimización de los parámetros de interpolación.

Las estadísticas de aprobación global cruzada se calculan, para todos los modelos matemáticos de *LPLY* y *RBF* generados en el Analista Geoestadístico, en forma de un medio de valor de error ( $E\mu$ ) y un valor de *margen de error* (**RMSE**). Estos se calculan al mover un punto de datos a la vez, creando la superficie matemática y probando el punto de datos omitido contra el punto de datos interpolado. Esto produce un valor predicho y real, a partir del cual se calculan los términos de error y su significado es  $E\mu$ . El margen de error real predicho se usa para calcular los **RMSE** (Johnston et al., 2001). Teóricamente,  $E\mu$  debe igualar a cero. Por eso,  $E\mu$  se prueba en cada superficie usando la prueba Kolmogorov-Smirnov de normalidad en NCSS con un intervalo de seguridad (*nivel de error*) con un nivel de significancia del 95% que se crea alrededor de cada  $E\mu$ , para verificar que  $E\mu$  iguala a cero.

Después de que las superficies matemáticas se crearon, fueron convertidas en un formato de raster de datos ArcGIS para un futuro análisis. En la creación de los MEDs raster se necesita un tamaño de célula de reja. Esto se determinó al calcular el área de los sitios topográficos más pequeños en la escala 1:10000, en este caso una cumbre y cuatro células de reja escogidas se representaron en la forma de un cuadro, una matriz de células 2x2. Al dividir la medida más pequeña de esta matriz 2x2 a la mitad 13.4 metros, esta medida produjo el tamaño de la célula: 6.7 metros. No es conveniente tener un tamaño de célula decimal impar, por ello se utilizaron en su lugar cinco metros.

Los MEDs raster creados, se puede comparar con los 98 puntos de control de elevación y las redes de arroyo derivadas por cada uno. Una rutina de Arco de Macro Lenguaje (*AML*) fue escrita por la estación de trabajo ArcInfo, para asignar valores de elevación de los MEDs raster a los puntos, calcular los errores entre los puntos de control y los MEDs, y calcular el *RMSE* global de cada MED sobre la base de los errores. El *RMSE* global de los puntos se define así:

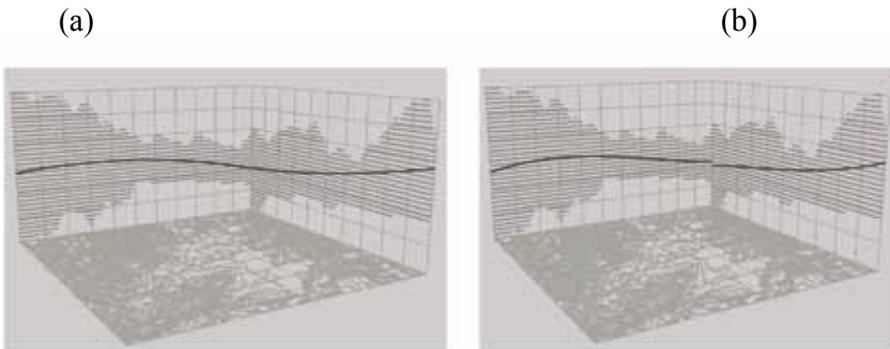
$$RMSE = [(\sum (Z_{pt} - Z_{MED})^2 / n - 1)]^{1/2}$$

- en el que  $Z_{pt}$  es el punto de control de elevación,
- $Z_{MED}$  es la elevación de MED en el punto de control y
- $n$  es el número de puntos de control.

#### 4. Resultados

El análisis exploratorio de puntos de datos de elevación, utilizados para generar los MED, produce información importante sobre la distribución de datos y la presencia de tendencias de datos globales en el terreno. Como se muestra en la figura 2, tanto la segunda como la tercera tendencias de orden se modelaron, con la tendencia de figura y forma resultante casi indistinguible entre ellas. De esta forma, la segunda tendencia de orden se utilizó para simplificar la óptima interpolación de *LPLY*.

**Figura 2.** Análisis de tendencias exploratorias y globales. Segundo orden (a) y tercer orden (b)



Fuente: Elaboración propia con base en Hoja San Ramón, 2005.

Al utilizar la información de la exploración de datos, la tendencia apropiada se puede modelar y las superficies *LPLY* y *RBF* pueden crearse. *LPLY 01*, *RBF01*, *RBF07*, y *RBF10*, todas emplean los parámetros por defecto, mientras que otros modelos tienen parámetros de perfección. Para los modelos *LPLY* (tabla 1), *LPLY01* y *LPLY02* se aceptaron los valores por defecto por el número de datos adyacentes a incluir y el número mínimo de éstos datos, pero *LPLY02* tiene un peso perfeccionado. Para *LPLY03*, el número mínimo de lugares a incluir y los puntos mayores y menores se cambiaron manualmente para producir mejores modelos y pesos perfeccionados. Para los modelos *RBF* (tabla 1), el número de lugares a incluir y el número mínimo de lugares utilizados se mantuvieron constantes para ambos modelos. Sin embargo, para los modelos perfeccionados las medidas de longitud de los ángulos menores y mayores se cambiaron, así como la forma de los lugares y, por ende, el poder de perfeccionamiento automático.

**Tabla 1.** Ejemplo de parámetros especificados por interpolación *LPLY* y *RBF*.

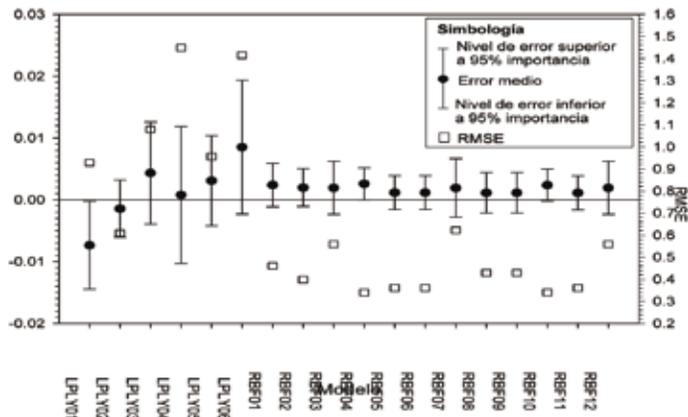
Modelo	Peso	Potencia	Datos anexos	Anexos mínima	Forma del Anexos †	Eje mayor	Eje menor
LPLY1	22.020297	1	65661	10	1 región	33.802	33.802
LPLY2	37.681832	2	65661	10	1 región	33.802	33.802
LPLY3	37.681832	2	15	5	4 regiones, 45°	500	500
LPLY4	47.077227	2	15	5	8 región	100	100
LPLY5	37.681832	2	15	10	4 regiones, 45°	33.802	33.802
LPLY6	46.105657	2	15	10	8 región	33.802	33.802
Modelo	Modelo secundario	Parámetro	Datos anexos	Anexos mínimos	Forma del Anexos †	Eje mayor	Eje menor
RBF1	CompRegSpline	0.24465	15	10	1 región	1730.4	1730.4
RBF2	CompRegSpline	0.16228	15	10	4 regiones, 45°	1730.4	1730.4
RBF3	CompRegSpline	0.11148	15	10	4 regiones, 45°	500	500
RBF4	Spline w/Tension	0.0036407	15	10	1 región	1730.4	1730.4
RBF5	Spline w/Tension	0.0072747	15	10	4 regiones, 45°	1730.4	1730.4
RBF6	Spline w/Tension	0.0072747	15	10	4 regiones, 45°	500	500
RBF7	Multiquadric	0	15	10	1 región	1730.4	1730.4
RBF8	Multiquadric	4.0059	15	10	4 regiones, 45°	1730.4	1730.4
RBF9	Multiquadric	4.0095	15	10	4 regiones, 45°	500	500

Modelo	Peso	Potencia	Datos anexos	Anexos mínima	Forma del Anexos †	Eje mayor	Eje menor
RBF10	ThinPlateSpline	1.00E+20	15	10	1 región	1730.4	1730.4
RBF11	ThinPlateSpline	1.00E+20	15	10	4 regiones, 45°	1730.4	1730.4
RBF12	ThinPlateSpline	0.11148	15	10	4 regiones, 45°	500	500

Fuente: Elaboración propia con base en el modelo de elevación digital.

Los resultados de las estadísticas de aprobación global cruzadas se dan en la figura 3. Los intervalos de seguridad alrededor de los valores  $E\mu$  se muestran para todos los modelos excepto para *LPLY01*, que al 95% de seguridad ese  $E\mu$  de hecho iguala a cero. Sin embargo, la prueba Kolmogorov-Smirnov de normalidad se rechazó con un nivel de 5% con valores de pruebas entre 0.111 y 0.280 y un valor crítico de 0.009; por eso, los intervalos de seguridad son aproximadamente correctos y la predicción de errores puede tener alguna influencia en ellos (Johnston et al., 2001). La interpolación *LPLY* busca minimizar la variación entre los valores predichos y observados al utilizar los cuadros menos pesados y la prueba para normalidad fue rechazada. Al analizar los valores *RMSE* se encontró que fue el modelo que mejor se ajustó al modelo.

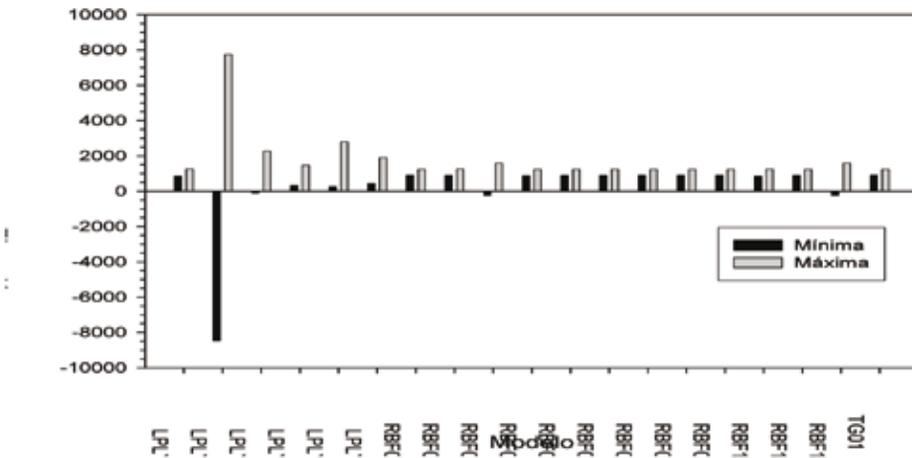
**Figura 3.** Estadística de Exactitud Global de  $E\mu$ , intervalos de seguridad para  $E\mu$  y *RMSE*



Fuente: Elaboración propia con base en cálculos estadísticos del modelo de elevación digital

Los valores  $RMSE$ , para los modelos  $RBF$ , indican que el modelo por defecto puede ser superior a los modelos por perfección para el grupo Spline w/Tensión ( $RBF04$  a  $RBF06$ ) y el grupo Thin Plate Spline ( $RBF10$  a  $RBF12$ ). Como los modelos  $LPLY$ , los valores  $E\mu$  para los modelos de perfección  $RBF$  identificados arriba son menores que los respectivos modelos por defecto. Lo contrario es verdad para el grupo Multicuadríc ( $RBF07$  a  $RBF09$ ), en el que los modelos de perfección tienen menores  $RMSE$  y valores  $E\mu$  que los modelos por defecto. Para el grupo CompRegSpline ( $RBF01$  a  $RBF03$ ), un modelo de perfección,  $RBF02$ , tiene un  $RMSE$  y  $E\mu$  menores que  $RBF01$ , por defecto. Por último,  $RBF03$  tiene un  $E\mu$  menor y un  $RMSE$  más alto que  $RBF01$ . Estas estadísticas dan una indicación preliminar sobre cuál modelo produce un mejor MED. Dado que estas estadísticas son medidas globales de exactitud. Por ello es necesario que en investigaciones futuras se utilicen valoraciones espacialmente explícitas.

**Figura 4.** Rango de elevación para los MED LPLY y RBF



**Fuente:** Elaboración propia con base en el modelo de elevación digital.

El análisis de estadísticas, mostrado en la figura 4, puede dar una visión de la exactitud de los MEDs resultantes. Como se puede ver en la descripción de los contornos originales, el rango de elevación está entre 910 y 1230 metros. Ahora, los MEDs que producen rangos de elevación fuera de este rango se juzgan sospechosos. Todos los MEDs exceden este

rango con *LPLY01* proveyendo el intervalo más creíble. Se debe recordar que *LPLY* es un interpolador inexacto que no preserva los valores de datos originales y que puede extrapolar los valores de elevación fuera del rango original. Los modelos *RBF* tienen rangos de elevación más razonables, excepto para *RBF03* y *RBF12*. Ambos producen elevaciones mínimas negativas, lo cual es imposible en esta área situada en un valle aislado. Para señalar, *TG01* tiene un rango de elevación más cercano a los contornos originales, pero es reservada para la valoración de la exactitud de la red.

Los valores *RMSE* calculados de la diferencia entre los puntos de control de elevación mostrados en la Figura 1 y los MEDs también proveen otra medida global de errores de elevación. Estos representan 98 puntos poseionados sobre rasgos topográficos importantes, como las cordilleras y los valles, no representados por los contornos que evalúan la exactitud de interpolación. Estos valores *RMSE* se dan junto con estadísticas descriptivas de errores de elevación (tabla 2). Los errores negativos resultan cuando la elevación de MED es más grande que el punto de control de elevación y el opuesto mantiene los errores positivos. *LPLY03* y *RBF*, *RBF03* y *RBF12* tienen iguales valores a *RMSE*, los cuales son también los más altos, con los más grandes errores de elevación mínimos y máximos; *RBF05* y *RBF06* tienen iguales valores a *RMSE* y son las medidas más bajas pero no tienen los más pequeños errores de elevación mínimos y máximos. Los MEDs y *RBF* que tienen los márgenes de error más pequeños son *RBF08* y *RBF09*.

**Tabla 2.** Errores de elevación y *RMSE* calculado entre los puntos de control y los MEDs.

Modelo	Mínima	Máxima	<i>RMSE</i>	Modelo	Mínima	Máxima	<i>RMSE</i>
<i>LPLY01</i>	-9.000	9.193	5.431	<i>RBF04</i>	-6.859	9.000	5.061
<i>LPLY02</i>	-9.000	21.635	5.883	<i>RBF05</i>	-10.594	9.000	3.699
<i>LPLY03</i>	-8.380	156.506	16.537	<i>RBF06</i>	-10.593	9.000	3.699
<i>LPLY04</i>	-7.760	11.516	3.673	<i>RBF07</i>	-6.687	9.000	5.143
<i>LPLY05</i>	-8.476	184.724	19.406	<i>RBF08</i>	-6.606	9.000	3.736
<i>LPLY06</i>	-6.362	9.000	3.570	<i>RBF09</i>	-6.606	9.000	3.736
<i>RBF01</i>	-6.943	10.726	5.345	<i>RBF10</i>	-9.171	9.000	5.175
<i>RBF02</i>	-7.200	10.170	4.815	<i>RBF11</i>	-17.692	9.000	4.001
<i>RBF03</i>	-22.732	29.491	6.322	<i>RBF12</i>	-22.732	29.491	6.322

**Fuente:** Elaboración propia con base en los cálculos del modelo de elevación digital.

## 5. Discusión de resultados

Este trabajo ha propuesto un cuadro de técnicas de valoración de exactitud de elevación con una combinación de métodos que son indicadores fiables de error. Ninguno de los estudios previos sobre valoración de exactitud de elevación de MEDs interpolados ha utilizado las estadísticas de validación cruzada suministrada en el Analista Geoestadístico Arc GIS. Esto es debido a la novedad del software que no estaba disponible en el pasado para este tipo de aplicaciones de valoración de error. De los MEDs creados, *LPLY02*, *RBF04* y *RBF10* tienen el más bajo *RMSE* de los *LPLY* y los MEDs *RBF*, respectivamente. Aunque las estadísticas de validación cruzada dan una buena indicación preliminar del desempeño del modelo y de la predicción de error en puntos de datos conocidos. Son una medida global de exactitud y no cuentan para la distribución espacial de predicción de error en locaciones de muestras desconocidas en las superficies de los MEDs resultantes. Por eso, estas estadísticas son limitadas en su capacidad de transmitir singularmente la exactitud de MEDs.

Similar a las estadísticas de validación cruzadas, las estadísticas descriptivas globales de elevación mínima y máxima suministran solamente una valoración global del error encontrado en los MEDs. A diferencia de las estadísticas de validación cruzada, las estadísticas descriptivas han sido utilizadas anteriormente como herramientas de valoración de error de MED. Desmet (1997) utilizó las estadísticas descriptivas para cuantificar los errores de elevación, pero no indicó su adecuación como herramientas de valoración de error. En este estudio, son útiles para determinar la credibilidad del rango valores de elevación en los MEDs resultantes pero no dan una indicación de la localización de estos valores de elevación, ya sea altos o bajos son distribuidos en la superficie. Ellos pueden utilizarse en una valoración inicial en la cual, ya sea que el MED represente la topografía del área real o si hay algunas áreas que contienen valores de elevación irreales resultantes de la interpolación más allá del rango de la entrada de datos originales.

Esta extrapolación errónea es más probable con los interpoladores *LPLY* y *RBF*, ya que ambos procuran ajustarse a una superficie curva, a un punto de datos y producirá errores en áreas sin suficientes datos para guiar la superficie. Eso es, la carencia de puntos de datos en un área a través de la cual una superficie curva ajustada causará valores erróneos de elevación interpolados.

Esta extrapolación es evidente en los MEDs *LPLY02*, *RBF03* y *RBF12*, y al mostrar los rangos de elevación más irreales. Además, todos los MEDs *LPLY* también muestran distintos rangos, ya que las elevaciones mínimas son muy bajas y las máximas son muy altas. Por eso, con los parámetros utilizados, *LPLY* no suministra MEDs reales. Futuras investigaciones de parámetros de valores pueden resultar en mejores *LPLY* derivadas de MEDs.

El uso de puntos de control, como pruebas de exactitud de elevación, no es nuevo (Bolstad y Stowe, 1994, Li, 1994, Gao, 1995, Desmet, 1997, Gao, 1997, Kyriakidis et al. 1999, Gong, et al. 2000, Wise, 2000 y Prima y Yokoyama, 2002). Estos puntos se utilizaron para calcular un valor *RMSE*, una medida global de exactitud, de los MEDs probados, unos pocos analizaron su distribución espacial sobre los MEDs (Kyriakidis et al. 1999). Dado que estos puntos de prueba no se incluyeron en la creación de los MEDs, ellos suministran un mejor valor *RMSE* que los *RMSE* calculados por el analista Geoestadístico.

A pesar de eso, un *RMSE* global no localiza errores espacialmente, sino que indica el tipo de error (al azar o sistemático), y el número de puntos de control es pequeño comparado con el número de células de reja en los MEDs (Wise, 2000). Sin embargo, estos puntos de control pueden denotar espacialmente donde los métodos de interpolación encuentran problemas cuando tratan con aspectos topográficos como cumbres, descansos de cuesta, cordilleras, fondos de valle, y áreas de inclinación ligera, no bien cubiertas por contornos o áreas llanas.

Se realizaron varias pruebas para escoger el mejor MED, dado que los MEDs derivados de contornos son “una aproximación de una aproximación” (Carter, 1988) y son propensos a la subjetividad humana, ningún MED es verdaderamente el “mejor”. Sin embargo, uno necesita ser seleccionado para representar esta área de estudio. La etiqueta de cual de los MEDs, *LPLY* y *RBF* se desempeñaron mejor bajo cada prueba de exactitud se expresa de la siguiente forma:

Mejor validación cruzada *RMSE*: *LPLY02*, *RBF04* y *RBF10*.

Rango de elevación más real: *LPLY01*, todos los MEDs *RBF* excepto *RBF03* y *RBF12*

Mejor punto de control *RMSE*: *LPLY06*, *RBF05*, *RBF06*, *RBF08* y *RBF09*.

*RBF10* se selecciona porque tiene un punto de control *RMSE* de 5.175, que es alrededor de la mitad del intervalo de contorno original, lo cual produce una buena validación cruzada *RMSE*, y tiene un rango de elevación aceptable. La selección de *RBF10*, un MED basado en astilla, como el mejor MED coincide con Desmet (1997), quien también encontró que la interpolación basada en astilla era el interpolador más apropiado al dar un grupo de métodos de valoración de exactitud de elevación. Esta concordancia puede deberse a la interpolación de contornos representando terrenos relativamente lisos estudiados aquí y por Desmet (1997).

## 6. Conclusiones

Aunque las valoraciones de exactitud MED han sido conducidas varias veces en muchos tipos de estudios de elevación surgidos de varias fuentes, son importantes porque los MEDs son ampliamente utilizados en muchos estudios hidrológicos y geomorfológicos, entre otros, y que influyen en las decisiones de política ambiental. Los MEDs basados en raster son una fuente de datos de elevación disponibles desde vendedores comerciales y pueden ser fácilmente generados por muchos tipos de métodos de interpolación. Por eso existe la necesidad de cuantificar la cantidad de errores innatos en estos productos antes de utilizarse en la investigación y la industria.

Este estudio combina algunas pruebas estadísticas estándar y visuales para la valoración de exactitud vertical. Las pruebas estándar proveen una medida global de exactitud de elevación, pero están limitadas en su explicación de tipo y de distribución de error. Por eso, la visualización de la distribución de errores es la llave para entender los errores de elevación y su efecto sobre productos derivados, como son las desviaciones en los cursos fluviales.

Futuras investigaciones de cuantificación de la relación entre las distancias de los arroyos desviados y la posición del error pueden producir una prueba de posición del arroyo más exacta. Tal vez una investigación que utilice la regresión lineal para desarrollar esta relación podría emplearse en el futuro.

Actualmente, ningún MED raster es una representación perfecta de la topografía real, debido a la infinita complejidad del planeta y las limitaciones de una representación abstracta de este. Sin embargo, así como la elevación basada en sensores remotos se hace más común, la calidad y exactitud de los MEDs también.

## 7. Referencias

- Bishop, C. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford Press. Oxford.
- Bolstad, P. V. & Stowe, T. (1994). An evaluation of MED accuracy: elevation, slope, and aspect. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60(11), 1327-1332.
- Carter, J. R. (1988). Digital representations of topographic surfaces. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54, 1577-1580.
- Chiles, J. & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics. Modeling Spatial Uncertainty*. New York: John Wiley and Sons.
- Cressie, N. (1993). *Statistics for Spatial Data*, revised ed. New York: John Wiley and Sons.
- Desmet, P. J. J. (1997). Effects of interpolation errors on the analysis of MEDs. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 563-580.
- Florinsky, I. V. (1998). Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. In: *Progress in Physical Geography* 22(1), 33-60.
- Gao, J. (1995). Comparison of sampling schemes in constructing DTMs from topographic maps. In: *ITC Journal* 1, 18-22.
- Gao, J. (1997). Resolution and accuracy of terrain representation by grid MEDs at micro-scale. In: *International Journal of Geographical Information Science* 11(2), 199-212.
- Gong, J., Li, Z., Zhu, Q., Sui, H., & Zhou, Y. (2000). Effects of various factors on the accuracy of MEDs: an intensive experimental investigation. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66(9), 1113-1117.
- Holmes, K. W., Chadwick, O. A. & Kyriakidis, P. C. (2000). Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. In: *Journal of Hydrology* 233, 154-173.

- Instituto Geográfico Nacional. (1965). 1:25,000 topographic map sheet San Ramón 3346III. Costa Rica.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. & Lucas, N. (2001). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute Publications.
- Kenward, T., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. & Fielding, E. (2000). Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. In: *Remote Sensing of the Environment* 74, 432-444.
- Kyriakidis, P. C., Shortridge, A.M., & Goodchild, M. F. (1999). Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. In: *International Journal of Geographical Information Science* 13(7), 677-707.
- Li, Z. (1994). A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 49 (1), 2-11.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. In: *Hydrological Processes* 5, 3-30.
- Prima, O. D. A. & Yokoyama, R. (2002). (In press). MED generation method from contour lines based on the steepest slope segment chain and a monotone interpolation function. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57 (1-2), 86-101.
- Robinson, G. (1994). The accuracy of digital elevation models derived from digitised contour data. In: *Photogrammetric Record* 14(83), 805-814.
- Thompson, J. A., Bell, J. C. & Butler, C. A. (2001). Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. In: *Geoderma* 100, 67-89.
- Walker, J. P., & Willgoose, G. R. (1999). On the effects of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. In: *Water Resources Research* 35(7), 2259-2268.
- Wise, S. M. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. In: *Hydrological Processes* 14, 1909-1929.