

**MODELO DE ELEVACIÓN DE TERRENO (MET) DEL PARQUE NACIONAL TINGO MARÍA,  
DISTRITO MARIANO DAMASO BERAUN, LEONCIO PRADO – HUANUCO****LAND LIFT MODEL (MET) OF THE TINGO MARÍA NATIONAL PARK, MARIANO DAMASO  
BERAUN DISTRICT, LEONCIO PRADO - HUANUCO**Luis Oré<sup>1</sup>, Fernando Gutiérrez<sup>2</sup>, Wendy Loarte<sup>3</sup>

Recepción: 31 de mayo de 2016

Aceptado: 11 de julio de 2016

**Resumen**

El propósito de la investigación fue evaluar el modelo de elevación de terreno (MET) del Parque Nacional Tingo María (PNTM); el cual busca desarrollar estrategias de conservación y protección de las microcuencas que se encuentran alrededor del área natural protegida, para ello se plantearon los siguientes objetivos: evaluar la calidad del modelo de elevación de terreno de la imagen ASTER, SRTM, GOOGLE EARTH y Carta Nacional (IGN). La metodología consistió en llevar a cabo la extracción y el análisis de la calidad de distintos modelos de elevación de terreno (MET) generados para el PNTM, mediante su evaluación con una serie de puntos de control obtenidos mediante receptor GPS modelo Garmin eTrex Vista HCx, con distintos niveles de precisión. Para este propósito, se desarrollaron con varios interpoladores: IDW, Kriging, Splines, TIN, y Natural Neighbor; partiendo de los mismos datos fuente: imagen ASTER, SRTM, Google earth y Carta Nacional digitalizada, y se contrastaron con los puntos de control (datos tomados con GPS), que suponemos en principio que relativamente se encuentra libre de errores. El análisis de calidad a partir de los puntos con GPS: imagen ASTER, el interpolador Kriging tiene un error medio cuadrático de 14,58 m, y el IDW tiene un EMC de 14,679 m; imagen Google Earth, el interpolador IDW tiene un error medio cuadrático de 11,384 m, y el Kriging tiene un EMC de 11,975 m; imagen IGN, el interpolador Splines tiene un error medio cuadrático de 6,676 m, y el Kriging tiene un EMC de 6,948 m; y la imagen SRTM, el interpolador TIN tiene un error medio cuadrático de 12,579 m, y el Kriging tiene un EMC de 13,444 m.

**Palabras clave: Modelo de elevación de terreno, interpoladores, imágenes satelitales.****Abstract**

The purpose of the investigation was to evaluate the model of elevation of terrain (MET) of the Tingo María National Park (PNTM); which seeks to develop conservation strategies and protection of the micro-watersheds that surround the protected natural area, for which the following objectives were set: evaluate the quality of the model of terrain elevation of the image ASTER, SRTM, GOOGLE EARTH and National Chart (IGN). The methodology consisted in carrying out the extraction and analysis of the quality of different terrain elevation models (MET) generated for the PNTM, through its evaluation with a series of control points obtained by GPS receiver model Garmin eTrex Vista HCx, with different levels of precision. For this purpose, they were developed with several interpolators: IDW, Kriging, Splines, TIN, and Natural Neighbor; starting from the same source data: ASTER image, SRTM, Google earth and digitized National Letter, and were contrasted with the control points (data taken with GPS), which we assume in principle that is relatively free of errors. The quality analysis from the points with GPS: ASTER image, the Kriging interpolator has a mean square error of 14,58 m, and the IDW has an EMC of 14,679 m; Google Earth image, the IDW interpolator has a mean square error of 11,384 m, and the Kriging has an EMC of 11,975 m; IGN image, the Splines interpolator has a mean square error of 6,676 m, and the Kriging has an EMC of 6,948 m; and the SRTM image, the TIN interpolator has a mean square error of 12,579 m, and the Kriging has an EMC of 13,444 m.

**Key words: Model of terrain elevation, interpolators, satellite images.**

<sup>1</sup> Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Email: luis21793@hotmail.com

<sup>2</sup> Exdocente de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Email: fgutierrez16471@yahoo.com

<sup>3</sup> Administradora de empresa Consultor Constructor & Auditor Leoc E.I.R.L. Email: wendy\_loarte\_aliaga@outlook.com.pe

## Introducción

Actualmente el Parque Nacional Tingo María no cuenta con una información precisa acerca de las características geomorfológicas (modelo de elevación de terreno) necesarias para la planificación de un manejo para la conservación forestal, fauna silvestre, suelos, zonificación ecológica y otros, donde se requiere del conocimiento de las variables topográficas del lugar y/o área de estudio. Ello implica, que las alternativas de manejo a implementar dependerán de variables como altitud, pendiente y exposición de las laderas a los rayos solares.

Un modelo de elevación de terreno viene a ser una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (9) para el ingeniero. Mientras (2) manifiesta que modelo de elevación de terreno es la representación simplificada de una variable que se mide en una superficie ondulada de tres dimensiones. Dos de esas dimensiones se refieren a los ejes ortogonales X e Y, y la tercera mide la altura Z de la variable temática representada en cada punto del espacio (2). Los modelos de elevación de terreno son la base para todo sistema de información geográfica, son imprescindibles en estudios geomorfológicos, hidrológicos, geológicos, de vulnerabilidad, de telecomunicaciones, entre otros. Por ende, el presente trabajo de investigación plantea como objetivo evaluar la calidad del modelo de elevación de terreno de la imagen ASTER, SRTM, GOOGLE EARTH y Carta Nacional (IGN) de acuerdo a la evaluación estadística "Cálculo del error del Modelo de Elevación de Terreno (MET)", cuantificando la correlación existente entre las imágenes.

## Materiales y métodos

### Zona de estudio

El presente trabajo se ejecutó en el Parque Nacional Tingo María (SERNANP-PNTM), El PNTM se localiza en la selva central del Perú, en el departamento de Huánuco, provincia de Leoncio Prado, y en los distritos de Mariano Dámaso Beraún y Rupa Rupa (Figura 11) (26).

La superficie del Parque Nacional Tingo María, es de 4777,80 Ha. Sus límites son: Por el Norte: margen derecha del río Monzón y parte del cerro Cotomono, desde la zona turística Cueva de las Lechuzas; por el Este: con el río Huallaga margen derecha dirigiéndose aguas arriba por los límites de las laderas y pasando por las zonas Brisas del Huallaga, Afilador, Puente Prado, Puente Pérez La Perla, Cueva de las Pavas, Quezada y Tambillo Grande. Por el Sur: Margen izquierda de la quebrada Tres de Mayo desde las inmediaciones de su desembocadura al río Huallaga hasta la

catarata Gloriapata. Por el Oeste: Comienza desde la catarata Gloriapata siguiendo la quebrada Tres de Mayo llegando al tragadero del río Perdido, siguiendo aguas arriba hasta el encuentro de las quebradas Santa y Colorada, cruzando en sentido norte hasta llegar a la cumbre y siguiendo el río Oro hasta su llegada al río Monzón.

Las estaciones meteorológicas del José Abelardo Quiñones de la ciudad de Tingo María hasta el año 2016 registran una temperatura máxima media anual de 29,4 °C y una temperatura mínima media anual de 20,3 °C, siendo la temperatura media anual de 24,9 °C. La humedad relativa media anual es cercana al 85%. La precipitación media anual es de 3328,9 milímetros. La época de lluvias comienza en octubre y se prolonga hasta abril. Ecológicamente de acuerdo a la clasificación de zonas de vida o de formaciones vegetales del mundo y el diagrama bioclimático de (10), la zona del PNTM se encuentra en la formación vegetal de bosque muy húmedo Premontano Tropical (bmh-PT) y bosque húmedo Tropical (bh - T). El Parque Nacional Tingo María tiene identificado un Ecosistema de Bosque de Selva Alta (3), y de acuerdo a otra clasificación esta ubicado en las Ecorregiones de Yungas Peruanas y de Bosque Húmedo del Ucayali (4)

Tabla 01. Coordenadas del área de trabajo

PUNTO	SUR (UTM)	NORTE 18 L	ALTITUD m.s.n.m
1	386137	8968458	720
2	389874	8969521	680
3	393309	8958542	720
4	392706	8958010	800

### Método de muestreo

La generación del MET se realizó empleando los interpoladores: IDW (Inverse distance weight), Kriging, Splines (Minimum curvature), Natural Neighbor, TIN (Interpolación a partir de triángulos irregulares) y Radial Basis Function (RBF). El MET del Parque Nacional Tingo María se obtuvo mediante el Programa ArcGis 10,3 (ESRI), y un visualizador especializado en 3D denominado ArcScene, utilizando el menú 3D ANALYST (el MET se realizó con los interpoladores: IDW, Splines, Kriging, TIN y Natural Neighbor), y el interpolador Radial Basis Function se realizó en el Software SURFER 8.0; mientras que los variogramas de todos los interpoladores (IDW, Splines, Kriging, Natural Neighbor, TIN, y RBF) se obtuvieron empleando el programa SURFER 8,0 (GOLDEN SOFTWARE). Eligiendo la opción *Variogram* del Menú GRID, para lo cual las coordenadas X, Y, Z fueron introducidas en la Hoja de Trabajo (Worksheet) y guardados en formato .dat. Para la realización de un TIN (red de triángulos irregulares); para la generación de una estructura triangular, como parte de datos se tuvo que conocer

sus tres coordenadas (este, norte y altitud) (x, y, z). Esta muestra de puntos fue extraída de las curvas de nivel realizadas anteriormente con una diferencia altitudinal de 20m (Carta Nacional, Imagen SRTM, Imagen ASTER, e imagen de Google earth).

Para contrastar los distintos modelos generados fueron necesarios un conjunto de puntos de control que representen al “terreno real”, y que podamos contrastar con los modelos interpolados. Las diferencias de alturas así obtenidas nos permitieron evaluar el nivel de error de cada modelo. Según los estándares para modelos digitales de elevaciones, del U.S.G.S. (Departamento del Interior del U.S. Geological Survey), en referencia al control de la calidad de los MDE, se habla de un mínimo de 28 puntos de control, 20 interiores y los 8 restantes en el borde (34) y (35). Los puntos de control fueron obtenidos con un GPS Garmin eTrex Vista HCx; esto fue con la finalidad de asegurar una buena calidad de la altura ortométrica, se han calculado los parámetros de transformación para la zona apoyándose en tres vértices geodésicos (dos pertenece a las cotas del IGN que se encuentran dentro del PNTM, uno es por la estación meteorológica José Abelardo Quiñones) en el borde externo e interno de la zona. Este GPS cuenta con una precisión de 2 m (este y norte) y altitud 1 m., entonces se colectaron de campo 55 puntos.

Se verificó la calidad del MET en base a la comparación entre las cotas de 55 puntos de verificación tomados en el terreno vía GPS y las cotas extraídas del MET generado en los puntos correspondientes (puntos obtenidos de: Carta Nacional, Imagen SRTM, Imagen ASTER, e imagen de Google earth), calculando el coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>), el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (EF), el coeficiente de determinación (CD), el error cuadrático medio (RMSE), el error

medio (BIAS) y el error medio absoluto (MAE). La evaluación o validación del MET se comprobó teniendo en cuenta la validación estadística. Para ello se calculó el Error Medio Cuadrático (EMC) a partir de los puntos de control (n). Se consiguió empleando la siguiente fórmula (9), (24) y (23):

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^e - Z_i^r)^2}{n}} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

Z<sub>i</sub><sup>e</sup> = Valor estimado de la altitud del enésimo punto de control.

Z<sub>i</sub><sup>r</sup> = Valor real de la altitud del enésimo punto de control.

n = Número de puntos de control.

Para determinar “n” se empleó la siguiente fórmula:

$$n = \frac{CV^2 * t^2}{E^2} \dots\dots\dots (2)$$

CV<sup>2</sup> = Coeficiente de variabilidad.

t = Es el valor de la distribución normal estandarizada para un nivel de confianza del 95% (alfa =0,05) el valor de Z es 1,96.

n = Número de puntos de control

E<sup>2</sup> = Error máximo permisible

**Resultados y discusión**

En la Tabla 02 se muestra las estadísticas descriptivas de las contrastaciones de las diferencias altitudinales generadas a partir del GPS como altitud real con respecto a las altitudes generadas por la imagen ASTER y sus respectivos interpoladores.

Tabla 02. Estadísticas descriptivas de las altitudes (Z<sup>estimada</sup> - Z<sup>real</sup>) – ASTER

Estadística	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
Nº de observaciones	367,000	367,000	367,000	367,000	367,000
Amplitud	56,585	56,610	55,340	59,823	59,579
Media	3,498	3,776	4,549	3,554	4,955
Varianza (n)	214,592	211,688	231,823	247,592	239,245
Varianza (n-1)	215,486	212,577	232,867	248,615	240,524
Desviación típica (n)	14,649	14,549	15,226	15,735	15,468
Desviación típica (n-1)	14,679	14,580	15,260	15,768	15,509
Coeficiente de variación	4,188	3,853	3,347	4,428	3,122
Asimetría (Pearson)	-0,319	-0,260	-0,174	-0,171	-0,273
Asimetría (Fisher)	-0,321	-0,262	-0,176	-0,172	-0,275
Asimetría (Bowley)	0,297	0,312	0,280	0,127	0,208
Error estándar de la media	0,946	0,943	1,022	1,011	1,131
Desviación absoluta media	11,909	11,919	12,739	13,141	13,016
Desviación absoluta mediana	9,492	10,930	13,297	13,155	13,566

Tabla 03. Variación de la desviación estándar con distintos niveles de confianza

IMAGEN ASTER		NIVEL DE CONFIANZA (m)		
INTERPOLADORES	$\sigma$ (m)	95%	98%	99%
IDW	14,67945408	1,85335005	2,19943481	2,43583150
KRIGING	14,58002092	1,55208095	1,84190831	2,03987782
NATURAL NEIGHBOR	15,25998333	2,00289277	2,37690234	2,63237336
SPLINES	15,76754196	1,98251704	2,35272176	2,60559383
TIN	15,50883409	2,21695203	2,63093389	2,91370839

En cuanto a la distribución de deferencia de altitudes generadas por los interpoladores de la imagen ASTER en función de las altitudes reales, se muestra que todos tienen un coeficiente de variación mayor al 5 %, la cual (24) establece que cuando esta variación es mayor al 5%, los resultados difieren entre sí, por lo tanto existe estadísticamente una diferencia altamente significativa, siendo no confiables, el menor coeficiente de variación lo tiene el interpolador TIN (312,2%) y el mayor CV lo tiene el interpolador SPLINES (442,8%) (Tabla 02).

En la Tabla 03 se muestra que el interpolador KRIGING tiene una menor desviación estándar (14,58 m), por lo tanto, el nivel de confianza también es relativamente bajo, mientras que el interpolador SPLINES tiene una mayor desviación estándar (15,76 m), estos valores altos indican que los resultados obtenidos por la imagen ASTER no son confiables. (18), (19) y (20) estableció que, con 150 puntos tomados para la contrastación, la garantía de la precisión en los modelos obtenidos fluctúa en un 10% de la desviación estándar obtenida; posteriormente (19) demostró estadísticamente que la fiabilidad de 150 puntos muestrales era un poco

inferir a un 6%; esto quiere entonces que el modelo de elevación de terreno generado por la imagen ASTER tiene un alto error medio cuadrático (EMC). (15), (16) y (1), manifiesta que la imagen ASTER tienen errores de información, estos errores de información son productos de superficies con muy alta reflectancia como son las nubes, características que distorsiona las características reales de la superficie, alterando inclusive otras características geomorfológicas; como Tingo María es una zona de alta precipitación superando los 3300 mm al año, por lo general parte de la cadena montañosa de la bella durmiente se ve afectada por las nubes, de esta manera alterando la información altitudinal de la superficie, a pesar que se genera una corrección atmosférica sobre el área, permanecen los errores para la generación de los modelos altitudinales (17), (14) y (22).

En la Tabla 04 se muestra el grado de correlación de las diferencias altitudinales con respecto a los interpoladores usados en el presente trabajo de investigación. Se muestra que el interpolador IDW tiene baja correlación con el interpolador SPLINES, de igual manera sucede con los interpoladores KRIGING, NATURAL NEIGHBOR y TIN.

Tabla 04. Matriz de correlación de Pearson de los interpoladores – ASTER

Variables	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
IDW	1,000	0,976	0,880	0,845	0,890
KRIGING	0,976	1,000	0,903	0,828	0,859
NATURAL NEIGHBOR	0,880	0,903	1,000	0,798	0,879
SPLINES	0,845	0,828	0,798	1,000	0,829
TIN	0,890	0,859	0,879	0,829	1,000

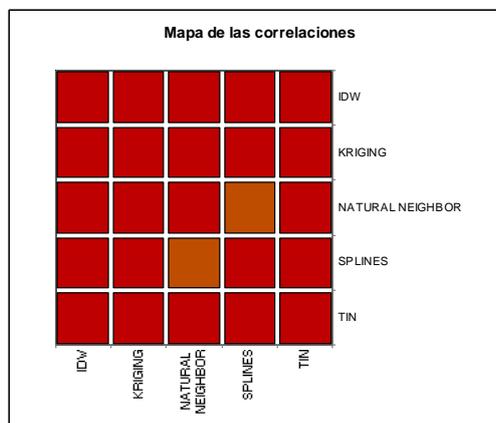


Figura 01. Mapa de correlación entre los interpoladores – ASTER

De acuerdo a la Figura 01 se muestra que por diferencia de colores el interpolador NATURAL NEIGHBOR con el interpolador SPLINES tienen baja correlación estadística (29) y (21), mientras que los demás interpoladores muestran una correlación estadística.

En la Tabla 05 se muestra las estadísticas descriptivas de las contrastaciones de las diferencias altitudinales generadas a partir del GPS como altitud real con respecto a las altitudes generadas por la imagen del GOOGLE EARTH y sus respectivos interpoladores. En cuanto a la

distribución de deferencia de altitudes generadas por los interpoladores de la imagen del GOOGLE EARTH en función de las altitudes reales, se muestra que todos tienen un coeficiente de variación mayor al 5 %, la cual (24) y (13), establece que cuando esta variación es mayor al 5%, los resultados difieren entre sí, por lo tanto existe estadísticamente una diferencia altamente significativa, siendo no confiables, el menor coeficiente de variación lo tiene el interpolador IDW (183,6%) y el mayor CV lo tiene el interpolador SPLINES (236,1%) (Tabla 05).

Tabla 05. Estadísticas descriptivas de las altitudes ( $Z^{\text{estimada}} - Z^{\text{real}}$ ) – Google earth

Estadística	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
Nº de observaciones	367,000	367,000	367,000	367,000	367,000
Amplitud	54,318	56,686	56,076	56,792	55,054
Media	6,187	5,708	5,892	5,503	6,805
Varianza (n)	129,039	142,791	146,476	168,752	164,228
Varianza (n-1)	129,588	143,396	147,130	169,482	165,092
Desviación típica (n)	11,360	11,950	12,103	12,990	12,815
Desviación típica (n-1)	11,384	11,975	12,130	13,019	12,849
Coefficiente de variación	1,836	2,094	2,054	2,361	1,883
Asimetría (Pearson)	-0,239	-0,300	-0,343	-0,320	-0,485
Asimetría (Fisher)	-0,241	-0,302	-0,346	-0,323	-0,488
Asimetría (Bowley)	0,407	0,559	0,359	0,328	0,207
Error estándar de la media	0,741	0,778	0,809	0,855	0,930
Desviación absoluta media	9,000	9,525	9,660	10,074	10,433
Desviación absoluta mediana	7,206	6,321	7,002	7,090	9,778

Tabla 06. Variación de la desviación estándar con distintos niveles de confianza

IMAGEN GOOGLE EARTH	INTERPOLADORES	$\sigma$ (m)	NIVEL DE CONFIANZA (m)		
			95%	98%	99%
IDW		11,3836657	1,4523865	1,7235974	1,9088508
KRIGING		11,9748151	1,5245817	1,8092741	2,0037360
NATURAL NEIGHBOR		12,1297262	1,5849509	1,8809162	2,0830783
SPLINES		13,0185355	1,6752291	1,9880525	2,2017297
TIN		12,8488200	1,8222276	2,1625007	2,3949277

En la Tabla 06 se muestra que el interpolador IDW tiene una menor desviación estándar (11,38 m), por lo tanto, el nivel de confianza también es relativamente bajo, mientras que el interpolador SPLINES tiene una mayor desviación estándar (13,02 m), estos valores altos indican que los resultados obtenidos por la imagen GOOGLE EARTH no son confiables. (18), (32), (33) y (6) estableció que, con 150 puntos tomados para la contrastación, la garantía de la precisión en los modelos obtenidos fluctúa en un 10% de la desviación estándar obtenida; posteriormente (19) y (36) demostró estadísticamente que la fiabilidad de 150 puntos muestrales era un poco inferior a un 6%; esto quiere entonces que el modelo de elevación de terreno generado por la imagen GOOGLE EARTH tiene un alto error medio

cuadrático (EMC). (15), (37) y (5) manifiesta que la imagen GOOGLE EARTH tienen errores de información, estos errores de información son productos de superficies con muy alta reflectancia como son las nubes (25), características que distorsiona las geofomas reales de la superficie (27), alterando inclusive otras características geomorfológicas (31); como Tingo María es una zona de alta precipitación superando los 3300 mm al año, por lo general parte de la cadena montañosa de la bella durmiente se ve afectada por las nubes (30), de esta manera alterando la información altitudinal de la superficie, a pesar que se genera una corrección atmosférica sobre el área, permanecen los errores para la generación de los modelos altitudinales (14).

En la Tabla 07 se muestra el grado de correlación de las diferencias altitudinales con respecto a los interpoladores usados en el presente trabajo de investigación. Se muestra que el interpolador IDW tiene baja correlación con el interpolador SPLINES, de igual manera sucede con los interpoladores KRIGING, SPLINES y TIN.

Tabla 07. Matriz de correlación de Pearson de los interpoladores - Google earth

Variables	IDW	KRIGING	Natural Neighbor	Splines	TIN
IDW	1,000	0,806	0,815	0,599	0,791
KRIGING	0,806	1,000	0,865	0,668	0,820
NATURAL NEIGHBOR	0,815	0,865	1,000	0,629	0,871
SPLINES	0,599	0,668	0,629	1,000	0,639
TIN	0,791	0,820	0,871	0,639	1,000

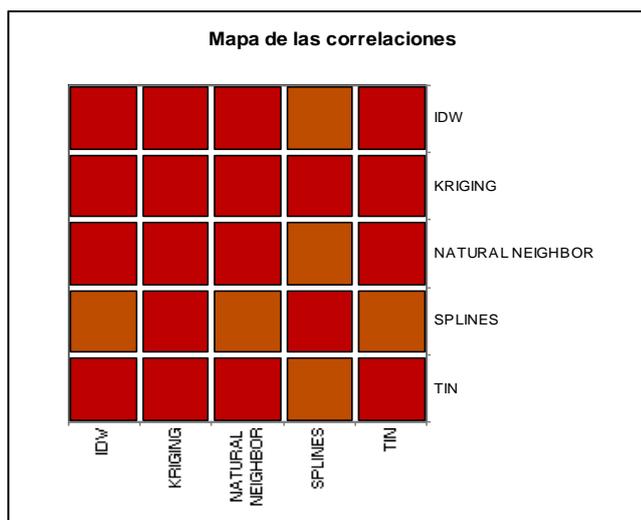


Figura 02. Mapa de correlación entre los interpoladores – Google earth

De acuerdo a la Figura 02 se muestra que por diferencia de colores el interpolador IDW con el interpolador SPLINES tienen baja correlación estadística, así como el interpolador KRIGING con el interpolador SPLINES, mientras que los demás interpoladores muestran una correlación estadística.

En Tabla 08 se muestra las estadísticas descriptivas de las contrastaciones de las diferencias altitudinales generadas a partir del GPS como altitud real con respecto a las altitudes generadas por la imagen de la carta Nacional (IGN) y sus respectivos interpoladores.

Tabla 08. Estadísticas descriptivas de las altitudes ( $Z^{estimada} - Z^{real}$ ) – IGN

Estadística	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
Nº de observaciones	367,000	367,000	367,000	367,000	367,000
Amplitud	52,532	54,574	51,349	56,238	53,400
Media	-1,317	-1,019	-1,802	-0,865	-1,357
Varianza (n)	71,975	48,145	74,100	44,449	50,115
Varianza (n-1)	72,173	48,278	74,320	44,573	50,278
Desviación típica (n)	8,484	6,939	8,608	6,667	7,079
Desviación típica (n-1)	8,495	6,948	8,621	6,676	7,091
Coefficiente de variación	-6,442	-6,807	-4,778	-7,706	-5,215
Asimetría (Pearson)	0,327	0,616	0,336	0,270	0,794
Asimetría (Fisher)	0,328	0,619	0,337	0,272	0,798
Asimetría (Bowley)	0,022	0,067	-0,025	0,014	-0,167
Error estándar de la media	0,446	0,364	0,468	0,352	0,404
Desviación absoluta media	6,650	4,878	6,419	4,423	5,092
Desviación absoluta mediana	5,617	3,328	4,652	3,041	3,773

En cuanto a la distribución de deferencia de altitudes generadas por los interpoladores de la Carta Nacional (IGN) en función de las altitudes reales, se muestra que todos tienen un coeficiente de variación mayor al 5 %, la cual (24), (8) y (9) establece que cuando esta variación es mayor al

5%, los resultados difieren entre sí, por lo tanto existe estadísticamente una diferencia altamente significativa, siendo no confiables, el menor coeficiente de variación lo tiene el interpolador NATURAL NEIGHBOR (477,8%) y el mayor CV lo tiene el interpolador SPLINES (770,6%) (Tabla 08).

Tabla 09. Variación de la desviación estándar con distintos niveles de confianza

CARTA NACIONAL (IGN)		NIVEL DE CONFIANZA (m)		
INTERPOLADORES	$\sigma$ (m)	95%	98%	99%
IDW	8,495494925	0,87395977	1,03715838	1,14863285
KRIGING	6,948220388	0,71380398	0,84709595	0,93814237
NATURAL NEIGHBOR	8,620885507	0,91771557	1,08908490	1,20614046
SPLINES	6,676274156	0,68966627	0,81845088	0,90641852
TIN	7,090729885	0,79190239	0,93977804	1,04078600

En Tabla 09 se muestra que el interpolador KRIGING tiene una menor desviación estándar (6,95 m), por lo tanto, el nivel de confianza también es relativamente bajo, mientras que el interpolador NATURAL NEIGHBOR tiene una mayor desviación estándar (8,62 m), estos valores altos indican que los resultados obtenidos por la Carta Nacional (IGN) no son confiables. (18) y (7) estableció que, con 150 puntos tomados para la contrastación, la

garantía de la precisión en los modelos obtenidos fluctúa en un 10% de la desviación estándar obtenida; posteriormente (19) y (11) demostró estadísticamente que la fiabilidad de 150 puntos muestrales era un poco inferior a un 6%; esto quiere entonces que el modelo de elevación de terreno generado por la Carta Nacional tiene un alto error medio cuadrático (EMC).

Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson de los interpoladores – IGN

Variables	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
IDW	1,000	0,879	0,744	0,688	0,734
KRIGING	0,879	1,000	0,787	0,733	0,823
NATURAL NEIGHBOR	0,744	0,787	1,000	0,646	0,816
SPLINES	0,688	0,733	0,646	1,000	0,695
TIN	0,734	0,823	0,816	0,695	1,000

En la Tabla 10 se muestra el grado de correlación de las diferencias altitudinales con respecto a los interpoladores usados en el presente trabajo de

investigación. Se muestra que el interpolador IDW tiene baja correlación con el interpolador SPLINES, de igual manera sucede con los interpoladores SPLINES con el TIN.

Mapa de las correlaciones

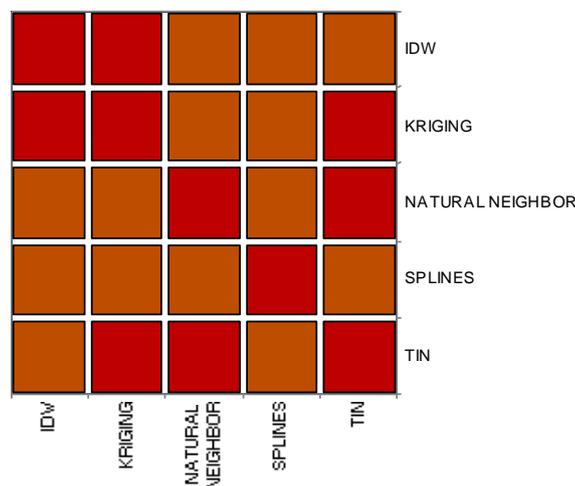


Figura 03. Mapa de correlación entre los interpoladores – IGN

De acuerdo a la Figura 03 se muestra que por diferencia de colores el interpolador IDW con el interpolador SPLINES tienen baja correlación estadística, así como el interpolador SPLINES con el interpolador TIN, mientras que los demás interpoladores muestran una correlación estadística.

En Tabla 11 se muestra las estadísticas descriptivas de las contrastaciones de las diferencias altitudinales generadas a partir del GPS como altitud real con respecto a las altitudes generadas por la imagen del SRTM y con las altitudes respectivas de los interpoladores (IDW, KRIGING, NATURAL NEIGHBOR, SPLINES y TIN) usados en este trabajo de investigación.

Tabla 11. Estadísticas descriptivas de las altitudes ( $Z^{\text{estimada}} - Z^{\text{real}}$ ) – SRTM

Estadística	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
Nº de observaciones	367,000	367,000	367,000	367,000	367,000
Amplitud	57,218	57,038	57,383	56,321	56,370
Media	8,802	9,154	10,074	10,084	10,995
Varianza (n)	180,757	179,978	184,623	193,587	157,431
Varianza (n-1)	181,533	180,738	185,454	194,371	158,230
Desviación típica (n)	13,445	13,416	13,588	13,914	12,547
Desviación típica (n-1)	13,473	13,444	13,618	13,942	12,579
Coefficiente de variación	1,527	1,466	1,349	1,380	1,141
Error estándar de la media	0,881	0,871	0,912	0,885	0,894
Desviación absoluta media	11,256	11,097	11,121	11,471	10,202
Desviación absoluta mediana	10,509	9,893	10,177	10,194	9,043

En cuanto a la distribución de diferencia de altitudes generadas por los interpoladores de la imagen del SRTM en función de las altitudes reales, se muestra que todos tienen un coeficiente de variación mayor al 5 %, la cual (24) y (12) establece que cuando esta variación es mayor al 5%, los

resultados difieren entre sí, por lo tanto existe estadísticamente una diferencia altamente significativa, siendo no confiables, el menor coeficiente de variación lo tiene el interpolador TIN (114,1%), seguido por el interpolador NATURAL NEIGHBOR (134,9%) y el mayor CV lo tiene el interpolador IDW (152,7%) (Tabla 11).

Tabla 12. Variación de la desviación estándar con distintos niveles de confianza

IMEGEN SRTM		NIVEL DE CONFIANZA (m)		
INTERPOLADORES	$\sigma$ (m)	95%	98%	99%
IDW	13,47342743	1,72633959	2,04870708	2,26890346
KRIGING	13,44387178	1,70801608	2,02696194	2,24482113
NATURAL NEIGHBOR	13,61815704	1,78740092	2,12117069	2,34915550
SPLINES	13,94168660	1,73518405	2,05920311	2,28052761
TIN	12,57896301	1,75213803	2,07932299	2,30280998

En la Tabla 12 se muestra que el interpolador TIN tiene una menor desviación estándar (12,58 m), por lo tanto, el nivel de confianza también es relativamente bajo, mientras que el interpolador SPLINES tiene una mayor desviación estándar (13,94 m), estos valores altos indican que los resultados obtenidos por la imagen SRTM no son confiables. (18) y (17) estableció que, con 150 puntos tomados para la contrastación, la garantía de la precisión en los modelos obtenidos fluctúa en un 10% de la desviación estándar obtenida; posteriormente (19) demostró estadísticamente que la fiabilidad de 150 puntos muestrales era un poco inferior a un 6%; esto quiere entonces que el modelo

de elevación de terreno generado por la imagen SRTM tiene un alto error medio cuadrático (EMC). Igualmente, (27) y (28) determinan que debido al bajo ángulo de vista del SRTM (55°), ocurre una pérdida de datos y que a pesar del proceso de mosaico elaborado con los trayectos ascendentes y descendentes, con miras a disminuir los sectores de pérdida de datos, éstos se reducen mucho aunque no se corrigen completamente; como el Parque Nacional Tingo María es una zona de alta pendiente generada por la cadena montañosa de la bella durmiente, este se ve afectada, de esta manera alterando la información altitudinal de la superficie (14).

Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson de los interpoladores – SRTM

Variables	IDW	KRIGING	NATURAL NEIGHBOR	SPLINES	TIN
IDW	1,000	0,908	0,795	0,811	0,765
KRIGING	0,908	1,000	0,886	0,914	0,853
NATURAL NEIGHBOR	0,795	0,886	1,000	0,901	0,868
SPLINES	0,811	0,914	0,901	1,000	0,839
TIN	0,765	0,853	0,868	0,839	1,000

En la Tabla 13 se muestra el grado de correlación de las diferencias altitudinales con respecto a los interpoladores usados en el presente trabajo de investigación. Se muestra que el interpolador IDW

tiene baja correlación con el interpolador TIN, de igual manera sucede con los interpoladores IDW con el NATURAL NEIGHBOR, y el interpolador IDW con el SPLINES.

Mapa de las correlaciones

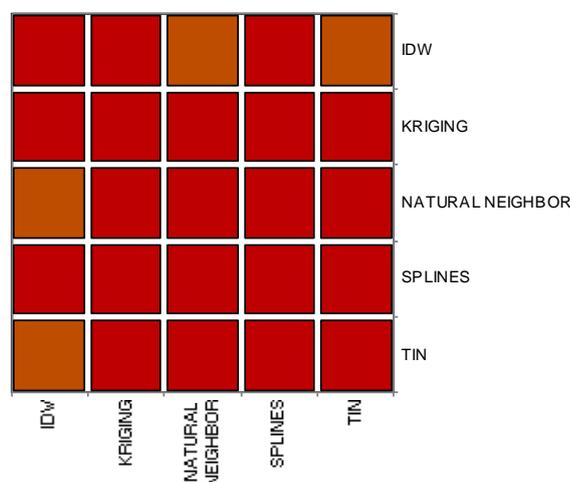


Figura 04. Mapa de correlación entre los interpoladores – SRTM

De acuerdo a la Figura 04 se muestra que por diferencia de colores el interpolador IDW con el interpolador TIN tienen baja correlación estadística, así como el interpolador IDW con el interpolador NATURAL NEIGHBOR, mientras que los demás interpoladores muestran una correlación estadística.

**Conclusiones**

1. El análisis de calidad a partir de los puntos con GPS: imagen ASTER, el interpolador Kriging tiene un error medio cuadrático de 14,58 m, y el IDW tiene un EMC de 14,679 m;
2. El análisis de calidad a partir de los puntos con GPS: imagen Google Earth, el interpolador IDW tiene un error medio cuadrático de 11,384 m, y el Kriging tiene un EMC de 11,975 m;
3. El análisis de calidad a partir de los puntos con GPS: imagen IGN, el interpolador Splines tiene un error medio cuadrático de 6,676 m, y el Kriging tiene un EMC de 6,948 m;
4. El análisis de calidad a partir de los puntos con GPS: la imagen SRTM, el interpolador TIN tiene

un error medio cuadrático de 12,579 m, y el Kriging tiene un EMC de 13,444 m.

**Referencias bibliográficas**

1. Aguilar F, Aguilar M, Carvajal F, Agüera F, Sánchez P. Efectos de la morfología del terreno, densidad muestral y métodos de interpolación en la calidad de modelos digitales de elevaciones. In: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. [Internet]. Universidad de Almería; 2002. [Citado febrero de 2006]. Disponible en: <http://departamentos.unican.es>.
2. Bosque J. Sistemas de Información Geográfica. Madrid: Ediciones Rialp S.A.; 1992.
3. Brack A. Las ecorregiones del Perú. En: Boletín de Lima. 1986; 7 (44): 57–70.
4. CDC-UNALM. Análisis del Recubrimiento Ecológico del SINANPE. Ajustado por SERNANP. Perú: Lima; 2006.
5. Cheng P. And L. Mcbean. Fly-through data generation of Afghanistan. Earth Observation Magazine. 2002.

6. Elachi Ch. Space imaging radar in planetary exploration and earth observation. 2004;39(4): 553–563.
7. Endreny T, Wood E, Hsu A. Correction of errors in SPOT-derived DEM's using GTOPO30 data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000; 38 (3):1234-1241.
8. Fallas J. Modelo de elevación digital para hojas cartográficas Tilarán y Juntas Escala 1: 50,000 del Instituto Geográfico Nacional. Universidad Nacional. Programa Regional en Manejo de vida silvestre y Ciencias Ambientales. [Internet]. 2003. [Citado febrero de 2006]; disponible en: <http://www.icomvis.una.ac.cr/telesig/-cursos/curso-med>.
9. Felicísimo AM. Paramétric statistical meted for error detection in digital elevatiom models. ISPRS Jornal of Photogrammetry and Remote Sensing. [Internet]. 1994. [Citado 15 de abril de 2007]. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/SIG/ICA95.html>.
10. Holdridge L. Ecología Basada en Zonas de Vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José de Costa Rica; 1987. 216p.
11. Hutchinson MF. Advances in locally adaptive interpolation of digital elevation models. En: Dems and Geomorphology. Special publication of the Geography Information System Association (GISA). Japan: Tokyo; 2001.
12. Kamp U, Bolch T, Olsenholler J. Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): Comparison of Digital Elevation Models (DEMs) from ASTER Remote Sensing Data and Contour Maps. Geocarto International. 2005; 20(1):23-33.
13. Johnston K *et al.* Using Arcgis geoestatistical Analyst. 2001.
14. Khalsa S, Dyrgerov M, Khromova T, Raup B, Barry B. Spacebased mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004; 42(10):2177+2183.
15. Knap W, Brock B, Oerlemans J, Willis I. Comparison of Landsat TMderived and ground-based albedos of Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. International Journal of Remote Sensing. 1999; 20:3293-3310.
16. Lang HR, Welch R. Algorithm Theoretical, Basis Document for ASTER Digital Elevation Models (Standard product AST14) Version 3.0, NASA EOS publication ATBDAST- 08. 1999.
17. Leberl F. Interpolation in square grid DTM. ITC. Journal. LI Z. 1994. A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models. ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1993; 49(1):2-11.
18. Ley R. Accuracy assessment of digital terrain models. Proceedings, Autoto Carto London, 1986;1:455-464.
19. Li Z. Variation of the accuracy of Digital Terrain Models with sampling interval In Phtogrametric Record. 1992.
20. Martínez R. Análisis de las metodologías habituales para la generación de modelos digitales del terreno Mapping N° 71. 2001.
21. Murray R. Spiegel Estadística Ed. McGraw-Hill, 2ª ed. 1991.
22. Pacheco C. Evaluación de factores de escala en los métodos de digitalización e interpolación para la elaboración de un modelo digital de elevaciones (MDE) en cuencas montañosas. Tesis Magíster Scientiae en Manejo de cuencas hidrográficas. [Internet]. Universidad de los Andes, Venezuela; 2003. [Citado febrero de 2006]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve>.
23. Pérez R. Selección óptima del método de interpolación en el tratamiento de las bases de datos: una aplicación en la construcción de las cartas magnéticas. [Internet]. Rev. Cs. Tierr y Esp. La Habana – Cuba. N° 1/2000. Art. 5.; 2000 [Citado enero de 2006]: Disponible en: [http://www.iga.cu/revista/cte\\_01/art-05](http://www.iga.cu/revista/cte_01/art-05).
24. Pimentel F. Estadística Experimental. 12ava edic. Edit Livraria Novel. Univ. Sao Paulo. Paracicaba: Estado do Sao Paulo-Brasil; 1996.
25. Piong X. Digital elevation model extraction from ASTER in support of coal fire and environmental research project, China, [Tesis MSc]. Holland; 2003.
26. Plan Maestro - PNTM. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. Plan Maestro del Parque Nacional Tingo María. 2017.
27. Rabus B, Eineder M, Roth A, Bamler R. The SRTM – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003; 57:241-262.
28. Raup BH, Kieffer HH, Hare TM, Karge JSL. Generation of data acquisition requests for the ASTER satellite instrument for monitoring a globally distributed target Glaciers. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 1105-1112. 2000.

29. Rigon R, Cozzini A. Exploring the complexity of mountain landscape: A digital perspective. Fifth International Conference of Geomorphology. Japan, Tokyo. 2001; 1:52-53.
30. Stanley H. Terrain parameters directly from a digital terrain model. Canadian Surveyor. 1975; 29 (5).
31. Strahler A. Quantitative Geomorphology. En: R. Fairbridge (ed.). The Encyclopedia of Geomorphology (Encyclopedia of Earth Sciences Series, T. 3). 898-912. Dowden, Hutchinson & Ross. Pennsylvania-USA; 1998.
32. Toutin T. Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002; 57: 228-240.
33. Toutin T. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, Ikonos-II and QuickBird. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004; 42(10): 2121-2129
34. USGS. Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second scene SRTM\_f03\_s005w081, filled finished 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland. College Park, Maryland. 2000.
35. US GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Shuttle Radar Topography Misi3n. [Internet]. 2006. [Citado 23 setiembre de 2006]. Disponible en: (<http://srtm.usgs.gov/>).
36. VÍlchez J. Evaluaci3n de la exactitud de los modelos de elevaci3n digital de malla regular generados a partir de curvas de nivel. [Internet]. Universidad de los Andes; 2000. [Citado enero de 2006]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve>.
37. Xiaojun Y. Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data. In Cartography and Geographic Information Science. 2000;27(2): 165-175