

EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD ALTIMÉTRICA DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN y SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE POSICIÓN TOPOGRÁFICA

ESCALANTE ÁLVAREZ ADELAIDA EVELYN¹

¹ Docente del Dpto. de Topografía y Vías de Comunicación - Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias y Tecnología -UAJMS

Correo electrónico: evita697@gmail.com

RESUMEN

El conocimiento del factor topográfico es un insumo básico para comprender gran parte de los procesos ocurridos en la superficie de la tierra. Las crecientes necesidades de contar con datos de elevación con una baja demanda de tiempo, procesamiento y a un costo accesible, ha incentivado el desarrollo de diversas plataformas satelitales destinadas a generar información de la superficie terrestre en forma de Modelos Digitales de Elevación (MDEs).

Sin embargo, a pesar de que los rangos de precisión altimétrica están descritos en cada fuente es importante evaluar y validar a nivel regional para su aplicación en campos de la Geomorfometría u otro relacionado al tema de interés. En el caso del presente trabajo, hace énfasis en la aplicación del índice de posición topográfica y su variación en su determinación en función de la evaluación altimétrica de los MDEs ASTER y MDE Cartografía obtenidos por sensores remotos, tomando como base el MDE generado por un levantamiento topográfico y puntos de posicionamiento diferencial (GPS) con altitudes geométricas.

Los resultados del estudio, indican que existen un error altitudinal promedio de 8.97 metros para la zona de Carlazo, y de 8.5 metros para la zona de Junacas entre el MDE Mensura Directa y los MDE's generados de sensores remotos como ser MDE ASTER y MDE Cartografía, el RMSE promedio para el MDE ASTER es de 7.48 encontrándose dentro de los

limites admisibles, El RSME promedio para el MDE Cartografía es de 15.32 lo cual no es permisible según Hara y Tokunaga, se puede observar que los MDE's evaluados presenta una buena correspondencia con el MDE base, es por esta razón que se recomienda el uso de los MDE's ASTER y MDE Cartografía, para estudios geomorfométricos a escalas pequeñas.

PALABRAS CLAVES

MDE, Cartografía, ASTER, Índice de Posición Topográfica (TPI), evaluación

ABSTRACT

The knowledge of the topographic factor is a basic input to understand a large part of the processes occurring on the surface of the earth. The growing needs of having elevation data with a low demand for time, processing and at an accessible cost, has encouraged the development of various satellite platforms designed to generate information from the Earth's surface in the form of Digital Elevation Models (MDEs). Although altimetric accuracy ranges are described in each source, it is important to evaluate and validate at the regional level for its application in Geomorphometry fields or another related to the topic of interest. In the case of the present work, it emphasizes the application of the topographic position index and its variation in its determination based on the altimetric evaluation of the ASD and MDE MDS Cartography obtained by remote sensors, based on the MDE generated by a survey topographic and differential

positioning points (GPS) with geometric altitudes. The results indicate that there is an average altitude error of 8.97 meters for the Carlazo area, and 8.5 meters for the Junacas zone between the Direct Measurement MDE and the MDEs generated by remote sensors such as MDE ASTER and MDE Cartography, the RMSE for the ASDE MDE is of 7.48 being within the admissible limits, The average RSME for the MDE Cartography is 15.32 meters, not permissible according to Hara and Tokunaga, it is for this reason that the use of ASTER MED's is recommended at little scales.

KEYWORDS

MDE, Cartography, ASTER, Topographic Position Index (TPI), evaluation.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los modelos digitales de elevación MDE, se han convertido como piedras angulares en la mayoría de los estudios relacionados con las ciencias de la tierra, donde el MDE, representa a la superficie topográfica, que es el factor principal para determinar la distribución espacial, por lo tanto los cálculos aproximados para las variables en la geomorfometría depende de su resolución espacial y la exactitud vertical.

La exactitud vertical de un MDE difiere de los niveles de referencia altitudinal al cual han sido generados, un ejemplo son los MDE/SRTM, generado en función de un datum geocéntrico y que su nivel de referencia altitudinal será el elipsoide, siendo los valores altimétricos elipsoidales, sin embargo el GMDE/ASTER los valores altimétricos derivados de este sensor toma como nivel de referencia el Geoid EGM-96 es decir un datum global y las alturas serán ortométricas, diferencia marcada entre el SRTM/ASTER, pero también existen modelos digitales derivados de la cartografía convencional, donde los valores altimétricos se refieren a un datum vertical pero local, si bien ambos modelos ASTER/

CARTOGRAFIA tienen un factor común la altura, estos valores difieren entre sí.

Otro factor importante que hay que tomar en cuenta es la geomorfometría, que trata del análisis cuantitativo de la superficie de la tierra a través de datos de elevación, generándonos variables muy importantes como el índice de posición topográfica.

Al estar directamente correlacionada con el dato altimétrico, se considera a esta variable importante para la investigación de la evaluación de la exactitud altimétrica de los MDE/Aster y MDE/Curvas en función de MDE/Mensura Directa y cuantificar el grado de influencia que existe en la generación Índice de posición topográfica (TPI).

2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la exactitud altimétrica de los Modelos Digitales de Elevación MDE Aster/ MDE-Curvas por medio de un MDE- Mensura directa para la determinación del índice de posición topográfica TPI.

2.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la exactitud altimétrica de los modelos de elevación digital GMDE/ASTER /MDE/Curvas mediante comparación con un MDE/Mensura directa.
- Determinar el Índice de Posición Topográfica (TPI) mediante la aplicación del MDE con mayor exactitud.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación de los MED's se utilizaron dos fuentes principales, el MDE ASTER con un nivel de corrección 1A, y una resolución de 1 arco segundo (30 metros), curvas de nivel digitalizadas de la carta topográfica 6629-I y 6729-IV a escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Militar.

Una cota fija (BMs), Puntos de control geodésico (GPS Diferencial) y Levantamiento topográfico de primer orden con altura geométrica.

Figura 1. Triangulaciones geodésicas Junacas, Elaboración propia



Figura 2. Triangulaciones geodésicas .CM-190, Elaboración propia



Figura 3. Triangulaciones geodésicas Carlazo, Elaboración propia



MDE-CARTOGRAFÍA

Las cartas topográficas utilizadas para la generación del MDE - Cartografía fueron (6629-I y 6729-IV) a escala 1:50 000. Previamente se realizó la transformación del sistema de referencia de PSAD-56 a WGS-84 en sus 7 parámetros método Bursa Wolf posteriormente a lo transformado se realizó la interpolación por el Método Kriging del ArcGIS 10.1

Figura 4. Cartografía Vista. Horizontal, Elaboración propia

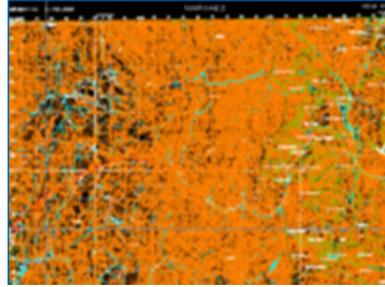


Figura 5. Interpolación Cartografía, Elaboración propia

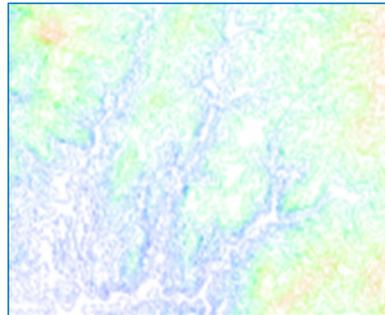
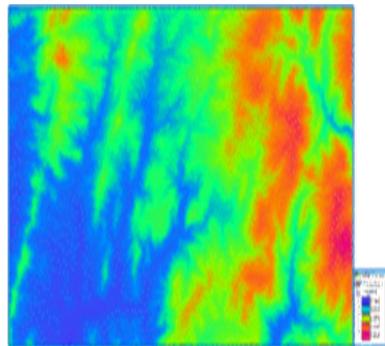


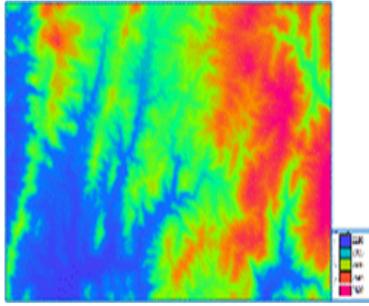
Figura 6. MDEs Cartografía Vista. Horizontal, Elaboración propia



GMDE- ASTER

El modelo digital de elevación MDE ASTER fue obtenido a partir de par de imágenes de nivel 1A, con una resolución de 1 arco-segundo (30 metros), la misma que se le aplicó los coeficientes de corrección radiométrica, geométrica y por el método sombra obteniendo un nivel de corrección 1B.

Figura 7. MDEs ASTER Vista horizontal, Elaboración propia



Valoración de la calidad de los MDEs

Dos factores importantes para determinar la calidad de un MDE, estas son la resolución espacial y la fuente de su generación, siendo está valorada cuantitativamente y cualitativamente. Es saber cuan precisa es la elevación en cada pixel del MDE y como se ajusta a la altura verdadera del terreno, ambos expresados como el RMSE (error medio cuadrático)

Precisión y Exactitud de los MDEs

Los términos anteriores, al que podemos añadir el de calidad, están muy relacionados y no se deben ser confundidos.

- La precisión se refiere a la bondad del método empleado en el cálculo, estimación u observación de unos valores, por tanto la precisión nos informa sobre cuántas cifras de la medida son realmente significativas.
- La exactitud mide la discrepancia entre los valores manejados y los valores reales (a veces desconocidos); esa discrepancia es la medida del error.

FACTORES PRINCIPALES PARA LA EVALUACIÓN DE LOS MDES.

Para analizar el grado de exactitud en la generación de un MDEs es a partir de un conjunto de puntos de control con coordenadas absolutas. Y los factores que generalmente se aplican son:

Error cuadrático medio (RMSE)

La raíz del error medio cuadrático (RMSE), se refiere a elevar al cuadrado el error medio de cada dato, lo que provoca que todos los valores se vuelvan positivos y de esta manera la suma no es cero sino generan una suma de cuadrados que si los divides entre el número de datos generan la varianza que es un indicador de dispersión, pero refleja que tan separados están los datos entre sí o que tan juntos u homogéneos estos son. (Sandoval, 2013) Para su cálculo se utiliza la siguiente formula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_j)^2}{N}}$$

Dónde:

y_i = es el valor de altura del modelo

y_j = es la altura real

N = es el número de pares de valores modelados.

Los resultados también pueden ser expresados de los límites del intervalo de confianza de 95%, según recomendaciones de estimaciones de calidad para datos geoespaciales para dar cuenta de la variabilidad de las estimaciones de estos parámetros.

Error Medio o Bias

El error medio, también llamado Sesgo o Bias, indica la dirección promedio de la desviación de valores observados, pero no puede reflejar la magnitud del error. Mide el error promedio de un número de observaciones encontradas tomando el valor medio de los errores positivos y negativos sin hacer caso de la señal. (Sandoval, 2013).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_j)}{N}$$

Si Bias > 0, sesgo positivo señala que el valor estimado sobre estima el valor obedecido en promedio

- Si Bias < 0, sesgo negativo corresponde a una subestimación del valor promedio.

Error medio absoluto (MAE)

El error medio absoluto, mide la magnitud promedio de los errores de un set de valores estimados, sin considerar su dirección. El error medio absoluto es una puntuación lineal que quiere decir que todas las diferencias individuales tienen el mismo peso en función al promedio. (Sandoval, 2013)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - y_j|}{N}$$

Prueba chi-cuadrado

La prueba de Chi-cuadrado mide la discrepancia entre una distribución observada y la estimada (bondad de ajuste), indicando en qué medida las diferencias existentes entre ambas, se deben al azar. (Sandoval, 2013), La fórmula que da el estadístico es la siguiente:

- Cuanto mayor sea el valor de χ^2 , menos verosímil es que la hipótesis sea correcta.
- Cuanto más se aproxima a cero el valor de chi-cuadrado, más ajustadas están ambas distribuciones.

Coefficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. El cálculo del coeficiente de correlación lineal se realiza dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Siendo:

- σ_{XY} la covarianza de (X,Y)
- σ_X y σ_Y las desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

Error Altitudinal Vertical (v)

Es la medida de observación que analiza la diferencia de valores de elevación en valor absoluto entre el MDE base y el MDE evaluado, los desvíos representan donde existe en los MDE's diferencias de cotas del terreno, otras literaturas consideran a este error como MAE (Error medio absoluto)

$$\Delta v = |Elev_{DEMi} - Elev_{DEM_{eval}}|$$

PROCESO DE OPERACIONES PARA DETERMINAR EL PARÁMETRO MORFOMÉTRICO DEL TPI (ÍNDICE DE POSICIÓN TOPOGRÁFICA)

La metodología para este análisis se derivó de los MDE's del ASTER y MDE- Cartografía los cuales se procesó en el programa ArcGIS 10.1 para obtener el parámetro de posición topográfica TPI necesario en la aplicación y evaluación de parámetros morfológicos en la zona de estudio el módulo que se utilizó fue el Land Facet Corridor Tools/Topographic Position Index/ Calculate TPI Raster, que tiene un orden secuencial para poder extraer el Índice de Posición Topográfica. La cual se muestra en el siguiente cuadro.

Id	Tipo de Parámetro / Fuente	Descripción del parámetro / Ecuación	Variable del parámetro	Definición operacional
1	Terrain Processing /MDE Manipulation	Fill Sinks	MDE original	Remueve las depresiones locales que tiene un MDE
2	Parametro Morfometrico	Topographic Position Index(Land Facet Corridor Tools)	MDE Fill	Esta extension calcula el Índice de Posición Topográfica (TPI) de modelos de elevación

Tabla 1. Proceso de determinación del TPI Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Estadístico de los MDEs con distintas fuentes

Para el análisis estadístico se evaluó en primera instancia los MDE's del ASTER y MDE/Cartografía considerando como MDE base el generado por el levantamiento topográfico debido a que este presenta menor error. (Modelo que cumple con normas estándares de calidad de primer orden)

Principalmente se procedió a realizar una evaluación con el MDE generado por el levantamiento topográfico en dos áreas principales Junacas y Carlazo la zona para el análisis considera un ancho de 400m a partir del eje central por una longitud de 17.50 km para Junacas y de 19.75 km para Carlazo, para ello se determinó puntos de control Geodésico y su correspondiente nivelación geométrica a partir de una cota fija gravimétrica (BM) en este caso el VR_15, como segunda evaluación se consideraron 44 puntos de posicionamiento Diferencial (GPS) en las, 2 zonas de estudio y se procedió a realizar la comparación de los valores de altura para determinar su exactitud en metros, posteriormente se realizó la comparación con las fuentes de evaluación.

MDES Generados y Analizados

Se generaron dos MDEs, la primera determinada por mensura directa (MDE/ 1), y la segunda por cartografía (MDE/2), realizando la evaluación correspondiente con el MED/ASTER (3), mediante la cual se puede representar la diferencia altitudinal del área de estudio, se puede apreciar que los patrones altitudinales son similares, sin embargo más adelante podremos darnos cuenta que existe variabilidad en cuanto al rango altitudinal.

La variación en la altitud del MDE 1 con el MDE 2 y MDE 3 se debe a tres factores principales como la digitalización de las curvas de nivel y su proceso de

transformación de sistema de referencia y la distancia horizontal que existe en cada intervalo de cada curva.

Figura 8. MDEs (Aster - Junacas, Elaboración propia

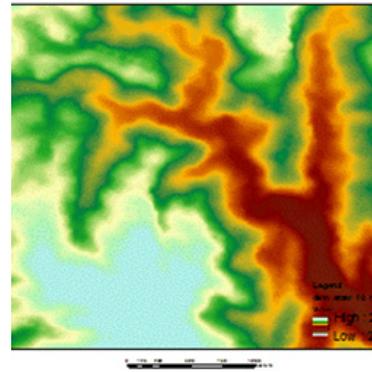


Figura 9. MDEs (Cartografía Junacas, Elaboración propia

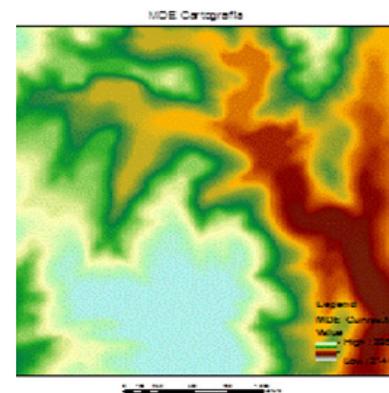
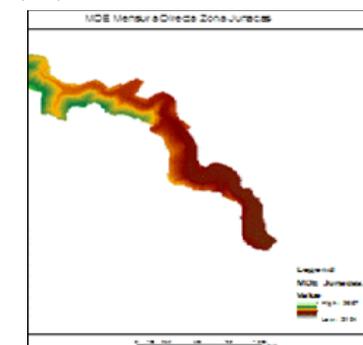


Figura 10. MDEs Mensura Directa Junacas, Elaboración propia



Y de la misma manera para la zona de Carlazo.

Figura 11. MDEs Aster - Carlazo, Elaboración propia

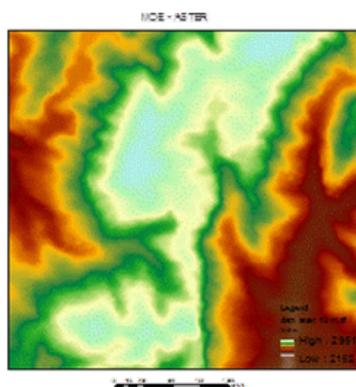


Figura 13. MDEs (Mensura Directa Carlazo) Elaboración propia

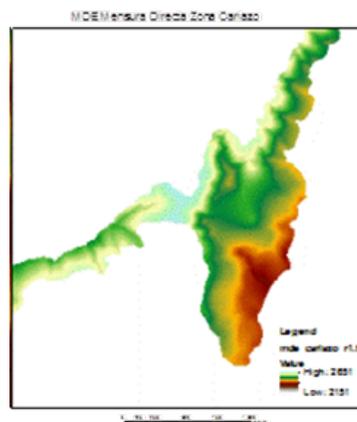
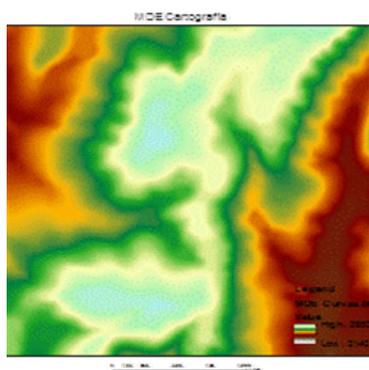


Figura 12. MDEs Cartografía - Carlazo, Elaboración propia



Análisis de calidad de los MDEs.

Para los resultados estadísticos de los MDEs, se tuvo en cuenta los valores y rangos que presentan para un análisis estadístico. (Ver Tabla 2)

Tabla 2. Cuadro estadístico de los MDEs Fuente: Elaboración propia

Tabla Estadística de los MDEs		
	Cartografía MDE (2)	Áster MDE (3)
Rows	934	934
Cols	1485	1485
Mean	2434.767346	2436.71745
Std dev.	151.1556597	145.89
N values	65535	65542
Min	2140	2152
Max	2980	2951

Tabla 3. Cuadro estadístico de los MDEs Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ERROR MDE CARTOGRAFÍA vs MDE ASTER									
FUENTE		MDE ASTER				MDE CARTOGRAFIA			
INDICADOR ESTADÍSTICO	Nº PUNTOS	RMSE	BIAS	MAE	CHI 2	RMSE	BIAS	MAE	CHI 2
Carlazo	185	10.043	6.513	7.889	7.195	22.147	4.051	18.066	34.312
Junacas	174	8.873	4.142	7.101	5.696	12.831	-3.306	9.938	11.906

Figura 14. Mensura Directa Carlazo-Junacas
Elaboración propia

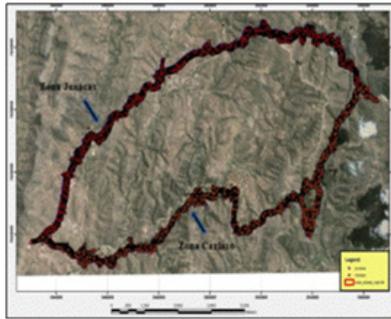


Figura 17. Gráfico de Dispersión Puntos de la zona (Junacas) MDEASTER y MDE Mensura Directa Elaboración propia

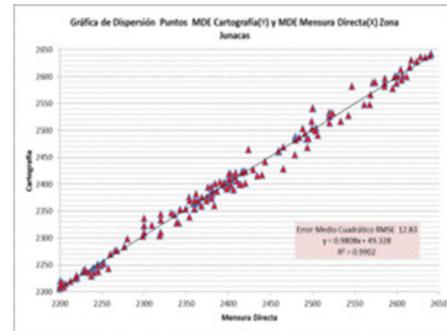


Figura 15. Gráfico de Dispersión Puntos de la zona (Carlazo) MDE Cartografía y MDE Mensura Directa Elaboración propia

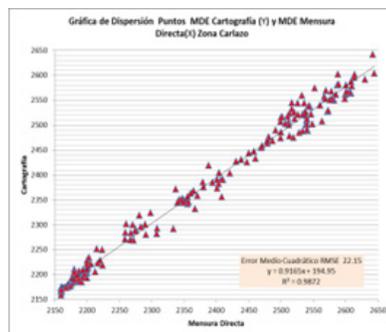


Figura 18. Gráfico de Dispersión Puntos de la zona (Junacas) MDEASTER y MDE Mensura Directa Elaboración propia

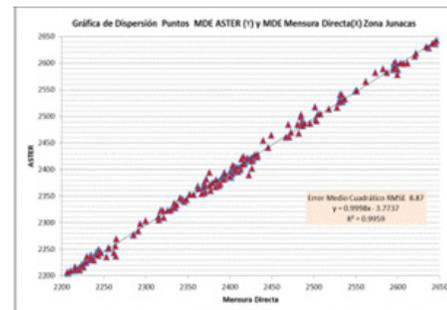
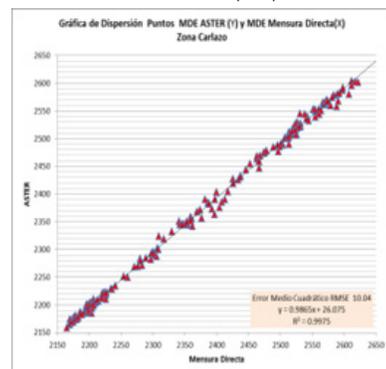


Figura 16. Gráfico de Dispersión Puntos de la zona (Carlazo) MDEASTER y MDE Mensura Directa Elaboración propia



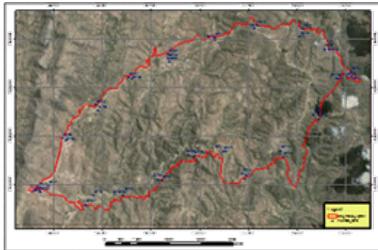
En la segunda evaluación se realizó la observación de (44 puntos de posicionamiento GPS Diferencial) para la zona Carlazo y Junacas.

Tabla 4. Cuadro estadístico de los MDEs ASTER/Cartografía en base a puntos de Control :
Elaboración propia

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ERROR MDE CARTOGRAFÍA vs MDE ASTER									
FUENTE		MDE ASTER				MDE CARTOGRAFIA			
INDICADOR ESTADÍSTICO	Nº PUNTOS	RMSE	BIAS	MAE	CHI 2	RMSE	BIAS	MAE	CHI 2
Puntos GPS	44	3.189	-0.295	1.268	0.715	10.977	-2.650	4.191	8.577

Los resultados muestran que, con relación a la calidad, se observa que el MDE/ASTER presenta mejores resultados de ajuste con los datos del terreno que el MDE Cartografía, que según S.Hara y Tokunaga et al.(37) es $\pm 12m$, estos estarían dentro de lo establecido.

Figura 19. Distribución de Puntos de Control Geodésico Diferencial Carlazo y Junacas): Elaboración propia



La comparación de los MDE evaluados, son.

Figura 20. Gráfico de Dispersión Puntos GPS de la zona (Carlazo y Junacas entre MDE ASTER Y MDE MENSURA DIRECTA):

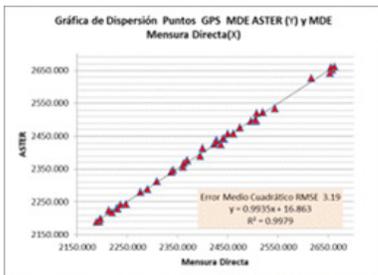
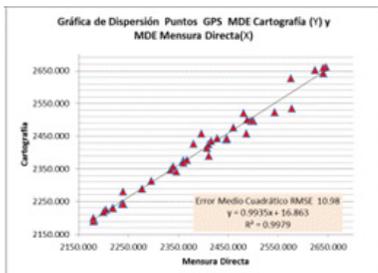


Figura 21. Gráfico de Dispersión Puntos GPS de la zona (Carlazo y Junacas entre MDE M.DIRECTA y MDE CARTOGRAFIA)



Perfiles longitudinales de diferencia de altitud y Caracterización Morfométrica de la zona de estudio

En la zona de Junacas vemos que el MDE en base a Cartografía tiene menor diferencia con el MED Mensura directa, pero a la conformación de una

geoforma característica (crestas) el error se incrementa, sin embargo el ASTER reduce el error altitudinal presentando mayor sinuosidad mostrando mayor detalle en lo que es la variabilidad geomorfológica previa validación de campo de la geomorfología.

Figura 22. Perfiles Longitudinales MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Carlazo)

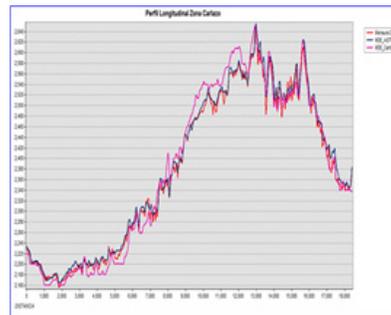
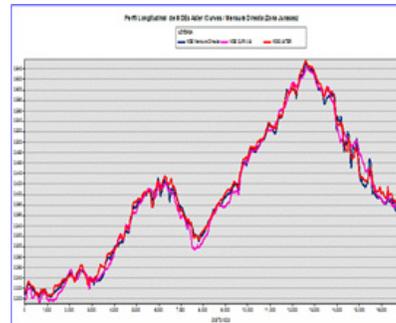


Figura 23. Perfiles Longitudinales MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Junacas)



Extracción del parámetro de Índice de Posición Topográfica (TPI)

Para finalizar se mostrara énfasis a la determinación del parámetro (TPI) mediante la aplicación de la extensión Land Facet Corridor Tools del ArcGIS 10.0 se calcularon los valores para cada MDE mostrando una diferencia visual entre cada MDEs. Como muestra la tabla estadística de los TPIs.

Tabla 5. Cuadro estadístico del parámetro de Índice de Posición Topográfica Elaboración propia

Tabla Estadística de los TPIs				
	Aster	Cartografía	MD_2000 Carlazo	MD_2000 Junacas
Rows	934	934	934	1243
Cols	1485	1485	1485	692
Mean	-0.0152	0.001	-0.0555	-0.0026
Std dev.	0.8657	0.9995	0.8029	0.8512
Min	2.1508	-2.8248	-2.3151	-5.3530
Max	4.4709	4.4513	2.7188	7.7327

Análisis gráfico de los resultados del Índice de Posición Topográfica (TPI) Zona Junacas.

Figura 24. Análisis Grafico del TPI del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Junacas)

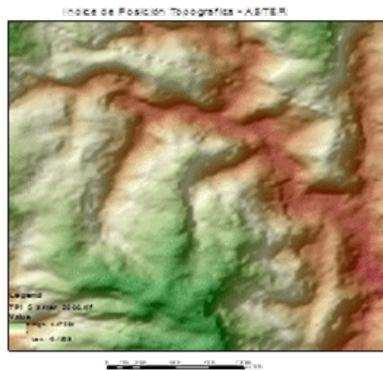


Figura 25. Análisis Grafico del TPI del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Junacas)

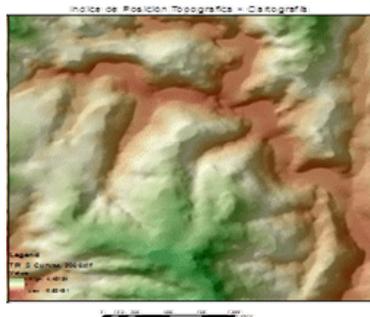
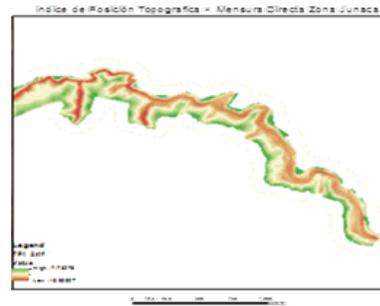


Figura 26. Análisis Grafico del TPI del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Junacas)



Análisis gráfico de los resultados del Índice de Posición Topográfica (TPI) Zona Carlazo

Figura 27. Análisis Grafico del TPI del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Carlazo)

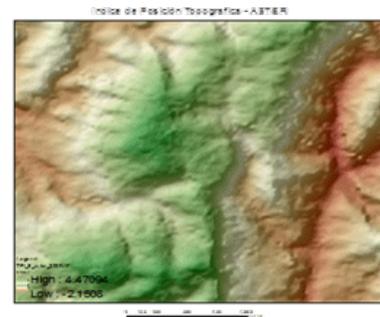


Figura 28. Análisis Grafico del TPI del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Carlazo)

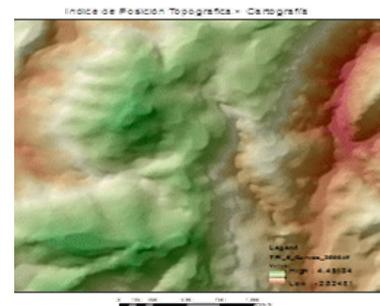


Figura 29. Análisis Grafico del TPI del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Carlazo)

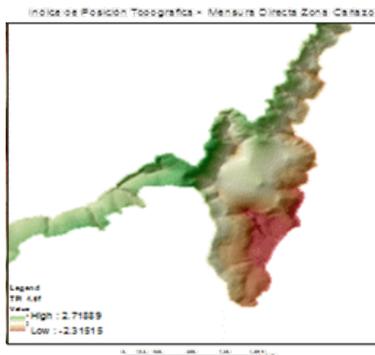


Figura 30. Análisis Grafico del TPI Categorizado del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Carlazo)

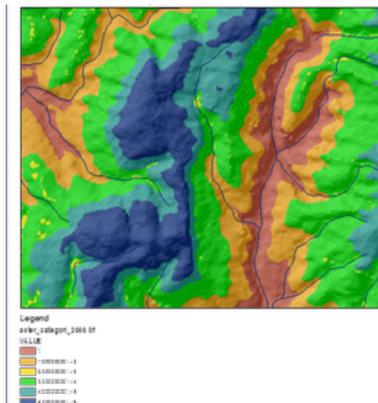
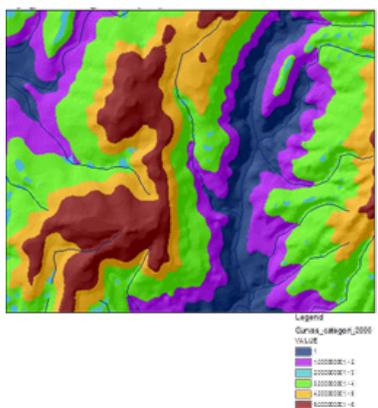


Figura 31. Análisis Grafico del TPI Categorizado del MDEs Aster MDE Cartografía MDE Mensura Directa Carlazo)



CONCLUSIONES

Los modelos de elevación digital, el GMDE del ASTER y MDE Cartografía tienen coeficientes de correlación altos que sobrepasan valores de 0.98, lo cual indica que los MDE's obtenidos por sensores remotos tienen una relación lineal directa versus los valores derivados de instrumentos topográficos.

Si se hace una comparación visual, se puede observar claramente que ambos MED's, tanto el de Cartografía como el ASTER se ajustan a las características topografías del área de estudio; sin embargo para el caso del MDE Cartografía en la zona Carlazo el RMSE es de 22.15 m. y está fuera de los rangos teóricos de precisión, esto se puede deber a la existencia de variadas geofomas como serranías de pendiente alta, pero el error es mucho menos en la zona de Junacas con 12.83 m. producto de la topografía homogénea que presenta esta zona y la presencia de crestas de relieve irregular con variaciones de pendiente sobrestimando los valores del MDE Cartografía.

Otro factor que se debe tomar en cuenta es la distancia horizontal que tienen las curvas de nivel que no es de manera constante como la distancia vertical de elevación que es de 20m, esto se debe al cambio de pendiente que tiene la curvas de nivel para determinar la elevación produciendo de esta manera errores en la determinación de la superficie continua sin tomar en cuenta algunas geofomas existentes en la superficie entre esa distancia.

Para el caso del MDE ASTER vemos que claramente en ambas zonas el valor de la elevación ha sido subestimado, para la zona Carlazo se tiene un RMSE de 10.04 m. y para Junacas de 8.87 m. las cuales se encuentran dentro de los rangos teóricos de precisión.

Del análisis espacial, para el caso de la Cartografía casos se puede observar que los mayores errores altitudinales, se presentan en la parte alta de la zona

de Carlazo que llega a los 51 metros, donde se puede observar claramente una topografía accidentada, con formaciones rocosas y pendientes mayores a 70%, sin embargo, en los lugares como Junacas presentan una topografía con pendientes regulares inferiores al 70% el error altitudinal vertical no supera los 25 metros.

En las observaciones de posicionamiento con GPS-Diferencial el resultado del Error Medio Cuadrático RMSE para el ASTER es de 3.19 m para la Cartografía de 10.98 m, que dentro de las especificaciones se considera ± 12 m. como aceptable para paisajes de geofomas variadas como son las serranías de pendiente alta, estando casi al límite en los rangos teóricos de precisión.

En la extracción del parámetro del Índice de Posición Topográfica derivados de los MED's fuente, el ASTER presenta una buena correspondencia con las obtenidas con el MDE base Mensura directa, tanto en la representación de geofomas, sin embargo El MDE Cartografía la correspondencia es sobreestimada por tanto la información generada tanto del MDE ASTER es de gran utilidad para tener una clasificación adecuada y representativa de las geofomas.

Finalmente se puede mencionar que MDE ASTER puede ser utilizado para determinar y estimar parámetros morfométricos a pequeñas escalas y con características topográficas diferentes, debido a que este MDE muestran un comportamiento semejante y las variaciones de la superficies topográficas de mayor elevación y su menor error medio cuadrático RMSE, sin embargo cabe mencionar que el MDE/ ASTER es el que presenta mayor detalle en la variabilidad del terreno debido que sus valores altimétricos son las que menos difieren de la realidad topográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barling, R., Moore, I., Grayson, R. 1994. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*.
- Beven K., Kirkby, M. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Sci Bull*
- BOSQUE, J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones Rialp S.A., Madrid, 1992
- Burrough&McDonnell, P. 1998. *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press. New York.
- Espinoza, A. 2005, *Generación de un Modelo Digital del Terreno con la utilización tesis de Maestría, CLAS - Universidad Mayor San Simón*.
- Felicísimo, A.M., 1994a *Modelos Digitales del Terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. (Visitado 2013-11-06) <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>.
- Felicísimo, A.M. 1994. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Figueredo, H. 2006. *Generación de modelo digital de elevación de tres métodos y su aplicación en las variables topográficas*. Tesis Maestría CLAS - Cochabamba. UMSS, 2006.
- Felicísimo, A. 2005. www.etsimo.uniovi.es.
- Guisan A, SB Weiss & AD Weiss 1999 GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*.
- Tokunaga, M. and S.Hara (1996). "MDE Accuracy Derived from ASTER data" Accessed on lines <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1996/ts10/ts100007pf.htm> in december 2005
- Vásquez J., 2011, *Comparación de Modelos de Elevación Digital*.