

## Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas

Oñate-Valdivieso, Fernando<sup>1 a, b</sup>, Bosque Sendra, Joaquín<sup>b</sup>

<sup>(a)</sup> Área de Hidrología, Universidad Técnica Particular de Loja,  
C/. Marcelino Champagnat s/n, 1101608, Loja, Ecuador

<sup>(b)</sup> Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá,  
C/. Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares, Madrid, España

### RESUMEN

El sensor ASTER, es un sistema de observación especial que posee la capacidad de capturar imágenes estereoscópicas de una misma porción de terreno, por lo que permite la extracción de modelos de elevación digital (DEM). En el presente trabajo se describe el proceso seguido para la extracción de DEMs a partir de imágenes ASTER en dos zonas con características de relieve marcadamente diferente en la sierra sur de la República del Ecuador. Los modelos obtenidos se emplean luego en la delimitación de cuencas hidrográficas y el cálculo de sus principales características morfométricas.

Palabras claves: Extracción de DEMs, ASTER, características morfométricas

### ABSTRACT

The ASTER sensor is a system that has the capacity of acquiring stereoscopic images of one same portion in the ground and can be used for the extraction of Digital Elevation Model (DEM). This work has the description of the process to follow for the extraction of DEMs considering the ASTER images in two zones with marked characteristics well outlined in difference in the highlands south of the Republic of Ecuador. The models obtained are the used in the delimitation of watershed and calculate of its main morphometrical parameters.

Keywords: DEM extracción, ASTER, morphometrical parameters

### 1. Introducción

Un modelo de elevación digital (DEM) es la representación simplificada de una variable que se mide en una superficie ondulada de tres dimensiones (Bosque 1997). 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 (Bosque 1997). Los modelos de elevación digital son la base para todo sistema de información geográfica, son imprescindibles en estudios geomorfológicos, hidrológicos, geológicos, de

vulnerabilidad, de telecomunicaciones, entre otros.

Existen diversas maneras de obtener un DEM, ya sea aplicando interpolación de datos puntuales, a partir de curvas de nivel digitalizadas, extrayéndolos de pares estereoscópicos de fotografías aéreas o imágenes de satélite mediante procedimientos fotogramétricos, a partir de imágenes de radar aplicando la interferometría o más recientemente, mediante Lidar.

Si de imágenes ópticas se trata, la utilización de pares estereoscópicos para la generación de

---

<sup>1</sup> Contacto autor: Te: +593 72 570275 Fax: +593 72 584893

Correo electrónico: fronate@utpl.edu.ec

Copyright: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

un DEM se basa en la disparidad binocular o paralaje, definido como la «diferencia» de la imagen de un objeto proyectado en cada retina. El grado de disparidad entre las imágenes proyectadas de un objeto depende del ángulo de convergencia. La convergencia es la habilidad de enfocar el eje óptico de los dos ojos en un solo objeto. La sensación de cantidad de tensión muscular en los ojos, resultante de diferentes ángulos de convergencia, facilita una estimación indirecta de la distancia a un punto de vista. El principio de la disparidad binocular es aplicado en fotogrametría aérea y satelital para calcular la elevación del terreno a partir de la medida del paralaje entre dos imágenes (Toutin, 2001).

Existen dos medios para la obtención de pares estereoscópicos de imágenes satelitales: el primero, capturando imágenes desde orbitas adyacentes entre las que existe traslape (across-track) y el segundo, captando las imágenes desde una órbita única (along-track). Desde 1980 se ha estudiado la posibilidad extraer información de elevación a partir de pares estereoscópicos obtenidos de órbitas adyacentes del satélite LANDSAT (Simard y Staney 1986, Ehlers y Welch, 1987, citados por Toutin, 2001) y del IRS (Rao et al., 1996), pero la aplicación de imágenes estereoscópicas tomadas desde orbitas paralelas se ha visto limitada debido a que el traslape suficiente se obtiene en zonas ubicadas entre 45 y 50 grados de latitud norte o sur, para relaciones pequeñas B/H se obtienen errores mayores a 50 m y solamente en zonas con relieve alto o medio son apropiadas para producir paralaje vertical (Toutin, 2001). La adquisición de pares estereoscópicos a lo largo de la misma línea de vuelo ha sido aplicada en varios satélites tales como el JERS-1, el ASTER, y el IRS-P5, así como los satélites de alta resolución como el Orb-View1 y el Quick-Bird. La gran ventaja de este sistema es la capacidad de reducir las diferencias radiométricas del par estereoscópico, ya que el tiempo transcurrido entre la adquisición de las dos imágenes suele ser de pocos segundos, minimizándose los efectos ópticos y atmosféricos. Se han reportado trabajos realizados con JERS-1 (Maruyama et al., 1994; Raggam y Almer, 1996; Westin, 1996, citados por Toutin, 2001) con precisiones del orden de 20m, Trabajos con ASTER (Toutin, 2002; Kamp et. al, 2003; Fujisada, et. al, 2005) han reportado precisiones que varían entre los 7m y 15m, aunque en general pueden esperarse niveles de precisión entre 10 y 50 m (Lang y Welch, 1999).

En el presente trabajo se pretende extraer un DEM a partir de una imagen ASTER, analizar su calidad y derivar del mismo parámetros que permitan un posterior estudio morfométrico de cuencas hidrográficas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Zona de estudio

El presente estudio se realizó en una zona (figura 1) ubicada al sur de la República del Ecuador (79.90° W, 4.40° S), es un área andina montañosa caracterizada por un rango de alturas que varía entre los 100 m y 3000 m, su orografía es bastante irregular con pendientes que varían entre los 0° y 84°. Su cobertura vegetal es predominantemente arbustiva seca, con la presencia de pequeñas áreas cubiertas de pastizales y cultivos como el maíz y el café.

### 2.2 Extracción de modelos digitales de elevación

En general para extraer modelos digitales de elevación es necesario realizar los procesos que se resumen a continuación:

- Adquisición de imágenes estereoscópicas de la zona de estudio.
- Normalización de las mismas a fin de obtener imágenes epipolares.
- Superposición del par epipolar a fin de calcular la paralaje de cada píxel.
- Determinación de la elevación de cada píxel a partir de las paralajes calculadas y la información orbital de la imagen con la finalidad de generar un DEM.
- Geocodificación el DEM extraído utilizando puntos de control.

Cada uno de los procesos requeridos se detallan en los párrafos siguientes.



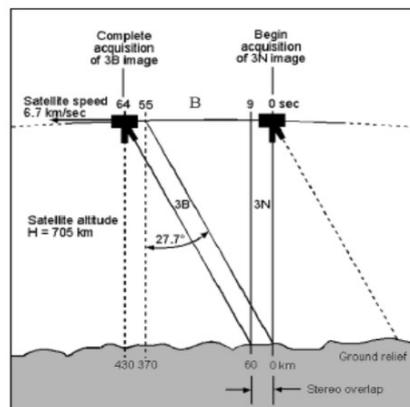
Fig. 1 Ubicación de la zona de estudio

El Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) es un sistema de observación orbital puesto en funcionamiento desde 1999 como resultado de la cooperación entre la NASA, el Ministerio de Economía de Japón, el METI y el ERSDAC japonés y su propósito fundamental es el de monitorear fenómenos relacionados al medio ambiente y la explotación de recursos naturales. Es parte del sistema EOS (Earth Observing System).

La cobertura de una escena ASTER es de 61.5 Km por 63 Km. Las imágenes Aster capturan información en 15 bandas del espectro electromagnético: cuatro en el espectro visible y el infrarrojo cercano (VNIR, 0.5-1.0  $\mu\text{m}$ ) con 15 m de resolución espacial, seis en el Infrarrojo de onda corta (SWIR, 1.0–2.5  $\mu\text{m}$ ) con 30 m de resolución espacial y cinco en el infrarrojo térmico (TIR, 8–12  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 90 m (Fujisada et al., 2005).

El subsistema de VNIR tiene 2 telescopios uno en el nadir y uno con vista atrás con un ángulo de  $27.60^\circ$  que proporcionan una vista en el nadir (nadir-looking) (banda 3N, 0.76–0.86  $\mu\text{m}$ ) y una vista hacia atrás (backward-looking) (banda 3B,  $27.7^\circ$  del nadir) que permiten obtener una visión estereoscópica de una región determinada en la dirección de vuelo del satélite. La relación B/H de 0.60. La diferencia temporal entre las dos observaciones es de 55 segundos, por lo que las variaciones en las condiciones ópticas y atmosféricas son mínimas, consecuentemente se puede esperar una excelente correlación entre las imágenes. La distancia entre órbitas vecinas es de 172 Km en el ecuador. El satélite ASTER posee una órbita circular heliosíncrona polar con un altitud de 705 Km, cruza la línea ecuatorial a las 10:30 AM y regresa al mismo punto cada 16 días.

Una imagen ASTER Level 1-A contiene los datos de la imagen sin aplicarle coeficientes de calibración radiométrica y remuestreo geométrico; al aplicarse dichos coeficientes, se obtiene una imagen Level 1-B. Las imágenes Level 1A y Level 1-B pueden ser utilizadas para la generación de DEMs pues los parámetros geométricos útiles del instrumento y la información del satélite son incluidos en ellas.



**Fig. 2** Geometría del sistema Along-Track de ASTER, <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

Previo a la extracción del DEM, es necesario que el par estereoscópico sea transformado a un par de imágenes epipolares normalizadas las cuales son paralelas al plano XY del espacio objeto. Al transformar las imágenes adquiridas en epipolares se produce exclusivamente la paralaje en una sola dirección y los puntos correspondientes se alinean en la misma fila o columna, por lo que el tiempo requerido para realizar el proceso de superposición de las imágenes, que permitirá luego el cálculo de la magnitud de la paralaje y en base a ella la elevación, se reduce considerablemente. La normalización del par estereoscópico adquirido se realiza comúnmente aplicando criterios de geometría epipolar, el proceso puede resumirse en los siguientes Puntos: (Morgan, 2004).

- Se inicia con la localización de un pixel en la imagen normalizada  $(x_n, y_n)$ .
- Se calcula la correspondiente localización en la imagen original  $(x_r, y_r)$  usando las ecuaciones de colinearidad (ecuaciones números 1 y 2).
- Se calculan los niveles de gris  $g(x, y)$  en la imagen original utilizando un apropiado método de interpolación como el vecino próximo, interpolación bilinear o convolución cúbica.
- Se asigna el valor de gris interpolado al píxel de la imagen normalizada  $g(x_n, y_n) = g(x, y)$ .
- El proceso se repite para todos los píxeles de la imagen normalizada.
- El proceso en general se repite para la otra imagen del par estereoscópico.

Las relaciones entre el sensor, la imagen y el suelo pueden determinarse en base a la condición de colinearidad que especifica que la posición del sensor, el punto en el terreno y su co-

respondiente punto en la imagen deben estar colocados sobre una línea recta, es decir deben ser colineales (Ping, 2003). Las ecuaciones que resumen la condición de colinearidad son las siguientes:

$$x_p = x_o - f \left[ \frac{m_{11}(X_p - X_o) + m_{12}(Y_p - Y_o) + m_{13}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right] \quad (1)$$

$$y_p = y_o - f \left[ \frac{m_{21}(X_p - X_o) + m_{22}(Y_p - Y_o) + m_{23}(Z_p - Z_o)}{m_{31}(X_p - X_o) + m_{32}(Y_p - Y_o) + m_{33}(Z_p - Z_o)} \right] \quad (2)$$

Las ecuaciones No. 1 y 2 consideran parámetros de orientación tanto interna como externa del sensor, los mismos que se incluyen en la cabecera de la imagen. Los *parámetros internos de orientación* son aquellos que definen la geometría interna del sensor, dichos parámetros permiten transformar la imagen de un sistema de coordenadas basado en píxeles al sistema espacial de coordenadas. Los *parámetros externos de orientación*, definen la posición y orientación del sensor cuando la imagen es capturada, es decir, las coordenadas  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$  de la posición de captura de la imagen y los ángulos de rotación definidos por omega ( $\omega$ ) (rotación alrededor del eje fotográfico  $X$ ), phi ( $\phi$ ) (rotación alrededor del eje fotográfico  $Y$ ) y kappa ( $\kappa$ ) (rotación alrededor del eje fotográfico  $Z$ ). Todos estos elementos definen la posición del centro de proyección ( $O$ ) con respecto al sistema general de coordenadas ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).

En el par estereoscópico normalizado las diferencias de posición paralelas a la dirección de viaje de satélite (diferencias de paralaje, "p") son atribuidas a desplazamientos causados por el relieve. Las elevaciones relativas del terreno son determinadas por la medida de "p" en las imágenes registradas y posteriormente transformadas en elevaciones relativas y absolutas (Lang y Welch, 1999).

La determinación de las elevaciones de DEM se realiza calculando la paralaje que se produce al «superponer» las imágenes normalizadas. Para conseguir esta superposición una ventana de correlación, de un tamaño predefinido (por ejemplo: 11x11 píxeles), es centrada en un píxel de 15 m en la banda 3N de la imagen. El área en la banda 3B con cada píxel conjugado localizado es definida por el tamaño de una ventana de búsqueda acorde al máximo desplazamiento de la imagen ocasionado por el relieve del terreno. La ventana de correlación se desplaza píxel a píxel a través de la ventana de búsqueda

da y el coeficiente de correlación es calculado para la ubicación de cada píxel. La ubicación que presente el mejor coeficiente de correlación es considerada como el punto óptimo. Las diferencias de localización de un píxeles en las imágenes conjugadas paralelas a la dirección del movimiento del satélite es el valor de "p" y es proporcional a la elevación relativa del terreno y al datum vertical. Éste proceso se repite sistemáticamente en toda la imagen (Lang y Welch, 1999).

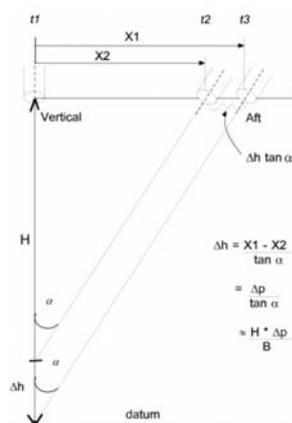


Fig. 3 Cálculo de altura en base a la diferencia de paralaje (Lang y Welch, 1999).

En la figura No. 3 se describen los elementos necesarios para el cálculo de la altura  $Ah$  a partir de la diferencia de paralaje  $\Delta p$  en un par estereoscópico. La base  $B$  es igual a  $X_1$  para la vista en el nadir y hacia atrás  $Ah$  es obtenida por el ángulo de orientación ( $\alpha$ ) y el intervalo de tiempo  $\Delta t$  requerido para capturar la cima y la base del objeto. En el par estéreo  $\Delta t$  está representado por  $(X_1 - X_2) = \Delta p$ .

La georeferenciación de los DEM se puede realizar en base de las efemérides y la información de altitud registrada en los metadatos de ASTER. Dicha información es utilizada para calcular los coeficientes de transformación entre la imagen y un determinado sistema de coordenadas, obteniéndose un DEM relativo. Al incorporar puntos de control en el modelo, es posible referir el DEM a un sistema de coordenadas, obteniéndose un DEM absoluto.

En algunos puntos la correlación puede fallar, por lo que el proceso de extracción de un DEM requiere de un paso adicional de edición utilizando una serie de procesos interactivos a fin de corregir los vacíos de información generados por la falta de correlación entre las imágenes (Lang y Welch, 1999).

### 2.3 Delimitación automática de cuencas hidrográficas y extracción de parámetros morfométricos

Considerando que una cuenca hidrográfica es el conjunto de tierras que drenan sus aguas hacia un cauce común, es posible delimitar una cuenca de drenaje en base al análisis de la orientación de la topografía.

En la figura No. 4 (Bosque, 1997) la orientación de los píxeles se ha representado a través de vectores que indican el sentido que tendría el escurrimiento que un píxel recibe directamente de la precipitación o de otros píxeles, claramente se muestra que los tres píxeles de la primera fila drenan con dirección norte - noroeste y los seis píxeles restantes lo hacen en dirección sur - sureste. Al agruparse todos los píxeles que drenan en hacia un píxel común se define automáticamente la cuenca hidrográfica.

El área de la cuenca delimitada está definida por el número de píxeles que drenan sus aguas hacia el píxel que contiene al punto de interés o de cierre de la cuenca, incluido éste.

La morfometría de cuencas permite establecer parámetros de evaluación del funcionamiento del sistema hidrológico de una región, pueden ser obtenidos con la ayuda de un sistema de información geográfica, constituyéndose en un elemento útil para la planificación ambiental.

En el presente trabajo se consideraron los siguientes parámetros morfométricos: Área (A). Perímetro (P). Longitud axial (L), definida como la distancia medida desde la salida de la cuenca hasta el punto más alejado de esta. Factor de forma (Kf), que es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc) que relaciona la forma de la cuenca con la de una circunferencia cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. Desnivel altitudinal (Dh), definido como la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. Elevación media de la cuenca (Hm). Pendiente media (Sm), pendiente mínima (Smin) y pendiente máxima (Smáx). Curva hipsométrica, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Pendiente del cauce principal (Mcp), que es la razón entre

el desnivel entre los puntos extremos del cauce y la distancia horizontal entre ellos.

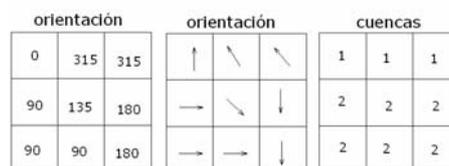


Fig. 4 Delimitación de una cuenca hidrográfica (Bosque 1997)

### 2.4 Metodología aplicada

En el presente trabajo se utilizó una imagen ASTER del 22 de julio de 2004 nivel 1B con un porcentaje de cobertura de nubes del 5% y el proceso de extracción se realizó aplicando PCI Geomatica 9.1

Para extraer un DEM georeferenciado es necesario contar con una serie de puntos de control (GCPs) con posición y elevación perfectamente conocidas, a partir de los cuales, sea posible asignar valores reales de elevación a cada uno de los píxeles del DEM extraído. Adicionalmente, en lugares en donde no se disponga de GCP, es conveniente coleccionar puntos comunes a las dos imágenes (TPs) los mismos que se ubican de forma interactiva en pantalla y de los cuales se conoce su posición, requiriéndose solamente una elevación aproximada de ellos. Los TPs, contribuyen a incrementar la precisión del modelo matemático utilizado en la extracción del DEM.

Se recopilaron puntos de control en campo mediante GPS. Los puntos se coleccionaron en lugares fácilmente identificables en la imagen y en el terreno, distribuyéndolos en toda la imagen y cubriendo la variación altitudinal que la zona de estudio presenta. Con este procedimiento se recopilaron en campo 30 puntos, 4 de ellos se emplearon como GCPs; y los restantes, se emplearon como puntos de comprobación para verificar la calidad del DEM extraído. Se emplearon 5 TP y se obtuvo un RMSE del orden de los 25 m. Este DEM fue utilizado para los análisis posteriores a nivel de cuenca hidrográfica.

Se generaron imágenes epipolares a partir de las bandas 3N y 3B de la imagen y se extrajo un DEM georeferenciado de la zona de estudio con sistema de referencia UTM, Datum WGS84 y elipsoide WGS84; con un tamaño de píxel de 15 m.

Se verificó la calidad del DEM en base a la comparación entre las cotas de 26 puntos de verificación tomados en el terreno vía GPS y

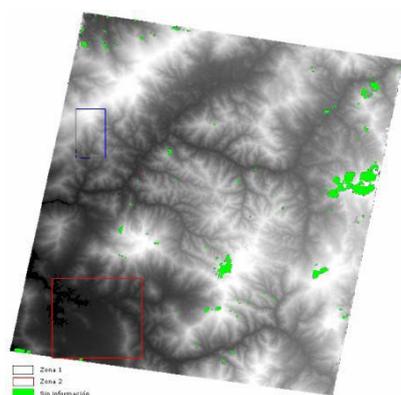
las cotas extraídas del DEM generado en los puntos correspondientes, calculando el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe ( $EF$ ), el coeficiente de determinación ( $CD$ ), el error cuadrático medio ( $RMSE$ ), el error medio ( $BIAS$ ) y el error medio absoluto ( $MAE$ ). Adicionalmente se consideró un DEM SRTM (USGS, 2000) para fines de comparación, el mismo que fue remuestreado a 15m.

Se seleccionaron dos zonas con características topográficas diferentes, tanto en el DEM ASTER cuanto en el DEM SRTM. En cada una de ella se procedió a delimitar automáticamente una cuenca hidrográfica utilizando AVSWAT-X. Se determinaron las características morfo-métricas ya descritas, en las cuencas obtenidas del DEM ASTER y se compararon con las obtenidas del DEM SRTM

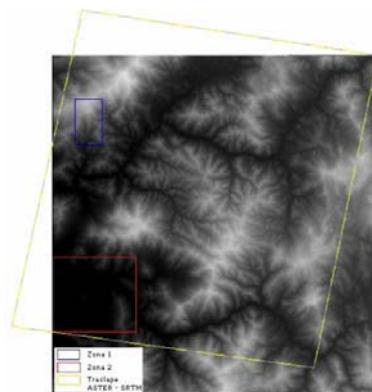
Se determinó el perfil transversal del cauce principal en cada cuenca a través de extracciones realizadas del DEM ASTER y del DEM SRTM y se calculó su pendiente media.

### 3. Discusión de resultados

Visualmente existe una gran correspondencia entre el DEM ASTER y el DEM SRTM, siendo evidentes los grandes vacíos de información producidos por la falta de coherencia entre las imágenes 3N y 3B utilizadas; Gran parte de dicha falta de coherencia de debe a la presencia considerable de nubes en la porción derecha de la imagen ASTER.



**Fig. 5** DEM extraído de la imagen ASTER en el que se indican las zonas de estudio

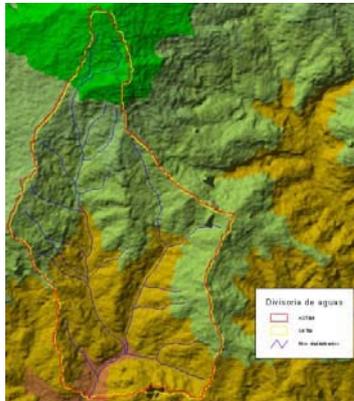


**Fig. 6** DEM SRTM de referencia y área de tras-lape con el DEM ASTER

De la comparación realizada entre los GCPs tomados en campo y sus correspondientes extracciones realizadas sobre el DEM ASTER y el DEM SRTM, se puede observar que si bien el coeficiente de correlación  $R^2$  es bastante satisfactorio en ambos casos, el valor del error cuadrático medio está dentro de lo esperado en el caso del DEM SRTM, pero presenta un valor no muy satisfactorio en el caso del DEM ASTER, especialmente si se considera la resolución espacial de la imagen. Cosa similar ocurre con el error medio y el error medio absoluto. La eficiencia de Nash presenta en ambos casos valores cercanos a uno, que nos da la idea de que los datos analizados si poseen mayoritariamente una relación 1:1. El coeficiente de determinación permite determinar que el DEM ASTER subestima los valores reales a diferencia del DEM SRTM que los sobrestima.

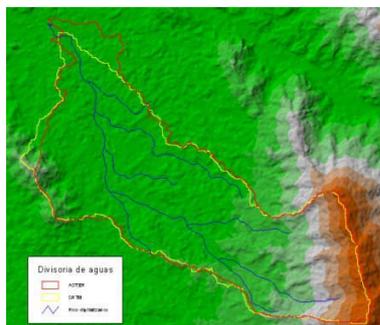
**Tabla 1** Parámetros de calidad de ajuste entre los datos capturados en campo y extraídos

	ASTER	SRTM
<b>R<sup>2</sup></b>	0.998	0.999
<b>RMSE</b>	24.968	16.986
<b>MAE</b>	21.154	14.000
<b>BIAS</b>	11.308	-10.769
<b>EF</b>	0.997	0.999
<b>CD</b>	0.975	1.027



**Fig. 7** Cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente en la zona 1

Al analizar las cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente tanto sobre el DEM ASTER y el DEM SRTM, sus características morfométricas y su distribución hipsométrica se observa una buena correspondencia entre dichos valores notándose un mejor ajuste de los valores correspondientes a la zona 1 de relieve más irregular, dicho ajuste posiblemente se deba a la mayor variación de la pendiente que se produce en dicha zona, variación que contribuye a una mejor definición de la divisoria de aguas y de los cursos de agua generados automáticamente. La desviación estándar de la pendiente de la cuenca delimitada sobre el DEM SRTM es prácticamente el doble de la registrada en la cuenca delimitada sobre el DEM ASTER, presumiblemente el remuestreo del DEM SRTM a 15 m pudo ocasionar una mayor variación de los rangos de pendiente.

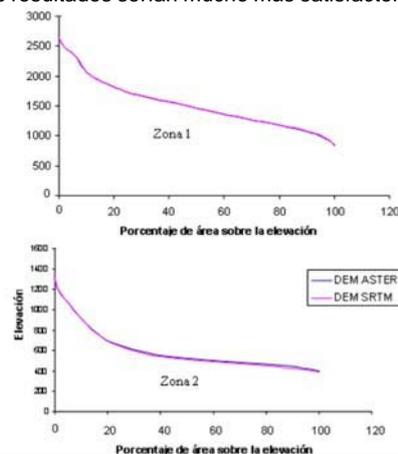


**Fig. 8** Cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente en la zona 2

**Tabla 2** Características morfométricas de las cuencas delimitadas

	Zona No. 1		Zona No. 2	
	SRTM	ASTER	SRTM	ASTER
<b>Área (Ha)</b>	2133.4	2138	2215	2150
<b>Perím (Km)</b>	28.4	30.3	33.12	37.26
<b>L</b>	10408	10666	13222	12516
<b>Kf (m)</b>	0.2	0.19	0.13	0.14
<b>Kc</b>	1.7	1.8	2	2.2
<b>Hm (m)</b>	1521.5	1520	599.2	589.5
<b>Hmín (m)</b>	830	842	402	386
<b>Hmáx (m)</b>	2644	2663	1322	1340
<b>Desvest H</b>	389.9	391.3	191.5	197.7
<b>Dh (m)</b>	1814	1821	920	954
<b>Sm (°)</b>	53	49.1	21.52	22.03
<b>Smín (°)</b>	0	0	0	0
<b>Smáx (°)</b>	73.61	76.7	75.38	61.51
<b>Desvest S</b>	23.77	10.71	15.53	8.95
<b>Mcp (%)</b>	17.42	17.07	6.958	7.622

En general la falta de precisión en la determinación de la elevación de los puntos de control utilizados para extraer el DEM a partir de la imagen ASTER, así como la falta de coherencia entre las imágenes 3N y 3B pueden ser las causantes de la modesta precisión del DEM extraído, pero los resultados obtenidos de los análisis morfométricos, permiten valorar las potencialidades del DEM ASTER, presumiéndose que de contar con GCPs de precisión, como los levantados por un GPS con corrección diferencial e imágenes con un menor porcentaje de nubes, los resultados serían mucho más satisfactorios.



**Fig. 9** Comparación de curvas hipsométricas

## 5. Conclusiones

La extracción de un DEM que posea una buena precisión se encuentra supeditada a la precisión de los puntos de control utilizados para georeferenciarlo y para asignarle las cotas reales del terreno, siendo notorio que la calidad del DEM depende en gran medida de la calidad y ubicación de los GCPs, antes que de su número. En futuros trabajos se debería analizar el efecto de la calidad, cantidad y ubicación de los GCPs en la precisión final del DEM.

En el presente trabajo no se pudo estudiar a profundidad el efecto que el número de TPs puede tener en la precisión del DEM, aunque se puede presumir que una óptima ubicación de los mismos puede brindar mejores resultados que la identificación de una gran cantidad de ellos.

La falta de coherencia entre las imágenes 3N y 3B hace presumir la necesidad de realizar un preprocesamiento de las imágenes ASTER antes de la extracción del DEM pudiendo ensayarse la aplicación de máscaras de nubes, filtros, realces radiométricos, etc., a fin de mejorar dicha coherencia y esperar de esta manera mejores resultados.

Las características morfométricas derivadas del DEM ASTER presentan una buena correspondencia con las obtenidas del DEM SRTM, siendo posible realizar la caracterización de cuencas hidrográficas con relativa precisión.

La extracción de DEMs a partir de imágenes ASTER en combinación con sistemas DGPS viabiliza la obtención de información morfométrica a escalas medias y a costos reducidos. Estos procedimientos se constituyen en una alternativa interesante para la generación y actualización de información topográfica base.

## 6. Referencias

- Bosque, J., 1997, *Sistemas de Información Geográfica*, Madrid, Riapl,
- Fujisada, H., Bailey, G. B., Kelly, G. G., Hara, S., Abrams, M. J., 2005, ASTER DEM performance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, pp. 2707-2714.
- Kamp, U., Bolch, T., Olsenholler, J., 2003, DEM generation from ASTER satellite data for geomorphometric analysis of cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia, *ASPRS Annual Conference Proceedings*, Anchorage, Alaska.
- Lang, H. R., Welch, R., 1999, *Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models (Standard product AST14) Version 3.0*, NASA EOS publication ATBD-AST-08.
- Morgan, M., 2004, *Epipolar resampling of linear array scanners scenes*, Ph.D Thesis, University of Calgary.
- Piong X., 2003, *Digital elevation model extraction from ASTER in support of coal fire and environmental research project*, China, MSc. Thesis, ITC, Holland.
- Toutin T., 2001, Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data, *International Journal of Remote Sensing*, 22, pp. 1097-1125.
- Toutin T., 2002, Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, pp. 2241-2247.
- USGS, 2000, *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.