

Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela

Digital Elevation Models (DEM) from spaceborne systems. An introduction and comparative analyses in the Cordillera of Mérida-Venezuela

Roa Lobo José* y Kamp Ulrich**

Recibido: mayo, 2006 / Aceptado: enero, 2007

Resumen

El uso de Modelos de Elevación Digital (MED) para el análisis visual y matemático de la topografía, paisaje y geoformas se ha incrementado, gracias a los datos e imágenes provenientes de sistemas satelitales que posibilitan la generación de MED a menor costo y mayor accesibilidad. La gran variedad de parámetros topográficos y geomorfológicos que se pueden derivar de estos modelos redimensionan los estudios relativos al modelado de procesos hidrológicos, movimientos de masa e inundaciones. Sin embargo, es necesario que el MED represente la superficie terrestre de la manera más precisa posible. En este artículo se describen las principales fuentes de MED generados a partir de datos e imágenes satelitales, se introduce un breve análisis comparativo de modelos (MED) generados por imágenes provenientes del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) y datos del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y, finalmente, se ofrece una galería de imágenes de MED y capas derivadas del área central de la cordillera de Mérida, Venezuela.

Palabras clave: Modelos de Elevación Digital (MED); cordillera de Mérida; ASTER; SRTM.

Abstract

Digital Elevation Models (DEM) for earth science studies, particularly over large areas, can be obtained via remote sensing instruments using optical and radar sensors at low cost and with a variable resolution. However, since the reliability of the geomorphometric analysis asks for the accuracy of the DEM used, in this paper we offer a description of the main sources of spaceborne systems for DEMs generation as well as a brief analyses of two DEMs like those produced from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) imagery (optical) and from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data (radar), through a direct comparison in terms of altitudinal classes and first order topographic derivatives, such as slope, aspect and shape. Finally a gallery of the imagery computed is attached.

Key words: Digital Elevation Models (DEM); cordillera de Mérida; ASTER; SRTM.

* Universidad de Los Andes-Trujillo, Grupo Geociencia, GLCF / Universidad de Maryland, e-mail: jroa@umd.edu
jose_roa@yahoo.com

** Universidad de Montana, Departamento de Geografía, Missoula-EEUU, e-mail: Ulrich.kamp@mso.umt.edu

1. Introducción

Un Modelo de Elevación Digital (MED) es una representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional, a través de una red regular de valores Z referenciados a un datum común. Los MED son usados especialmente para representar el relieve de un terreno (International Association of Assesing of Officers, 2003), por lo cual un MED puede ser interpretado como una forma digital raster que representa las características topográficas de un paisaje determinado.

La topografía es un factor que controla muchos de los procesos superficiales y atmosféricos del planeta, por lo que sólo comprendiendo la naturaleza de la topografía se podría entender la naturaleza de estos procesos, tanto en términos subjetivos como analíticos (Hutchinson, 2001). Dada la posibilidad de estudiar la superficie del planeta a través de imágenes satelitales, se han creado varios bancos de datos de topografía globales, con una resolución espacial y vertical cada vez mejor, como la encontrada en la data global de elevación 30 arco-segundo (Global 30 Second Elevation Data Set GTOPO30), cuya resolución va desde los 10 arco-minuto (aproximadamente 18 Km en el ecuador) a los 30 arco-segundo (aproximadamente 1 Km en el ecuador), (Jarvis *et al.*, 2004).

Hoy día existe una gran demanda de MED para estudios del paisaje, particularmente aquellos ejecutados sobre grandes áreas, y éstos pueden ser obtenidos a través de sensores ópticos y de radar dis-

puestos en los sistemas satelitales, lo cual implica la obtención de una información rápida, de bajo costo/área/tiempo y de resolución variable. En este artículo se describen las principales fuentes de MED a partir de teledetección, tanto de sistemas ópticos como de radar; se ofrece una galería de imágenes de MED para el área central de la cordillera de Mérida (Venezuela) y se introduce un breve análisis de los problemas, ventajas y desventajas de estos MED, particularmente entre los modelos generados por ASTER y SRTM.

Específicamente los objetivos de este artículo son:

- Describir los sistemas satelitales más populares usados para la generación de MED, particularmente los sistemas ASTER y SRTM.
- Describir el problema de pérdida de datos presente en ambos MED así como la aberración local de datos comúnmente observada en los MED-ASTER.
- Cuantificar la correlación existente entre un MED basado en datos del SRTM y en imágenes ASTER.
- Ofrecer una galería de imágenes relativa a MED en Mérida, Venezuela.

1.1 Utilidad de los MED

Existe un creciente aumento en el uso de MED para el análisis visual y matemático de la topografía, paisaje y geoformas, así como para el modelado de procesos geomorfológicos (Dikau, 1992). Por ejemplo, los parámetros más importantes para el modelado de procesos hidrológicos y de erosión del suelo como la pendiente y la

exposición pueden ser calculados a partir de un MED (Van Westen, 1994), los que a su vez son importantes parámetros para el modelado de amenazas naturales tales como deslizamientos. Para lograr esto, el MED debe representar el terreno de la manera más exacta posible, ya que la precisión de un MED determina la fiabilidad del análisis morfométrico. Actualmente, es posible la generación automática de un MED a partir de datos satelitales con un alto nivel de precisión.

Los MED se pueden generar a partir de mapas topográficos, fotografías aéreas, datos de radar como los suministrados por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), sistemas láser como los del sistema Light Detection and Ranging (LIDAR), o de imágenes satelitales estereoscópicas. Estas últimas se representan por sistemas electro-ópticos procedentes del *Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT)* o del *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*, los cuales usan imágenes satelitales en lugar de fotografías aéreas, cubriendo áreas mucho más extensas en una simple toma y generando, de esta forma, un MED más consistente dado que sus datos se generan bajo un mismo momento e igual calibración del sensor.

Algunos resultados publicados en la literatura científica arbitrada tratan el potencial de las imágenes ASTER (Raup *et al.*, 2000). Cheng & Bean (2002) publicaron resultados sobre la generación de MED basados en imágenes ASTER para Afganistán. Kamp *et al.* (2003; 2005) describieron el desarrollo de un MED a

partir de imágenes ASTER en el cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia, y una primera comparación de un MED ASTER con otro derivado de mapas topográficos.

La actual facilidad para la obtención, uso y aplicaciones de MED basados en datos e imágenes satelitales está siendo liderada por el uso de datos del SRTM, considerado como el mapeo tridimensional más preciso y extenso de la superficie terrestre, el cual puede obtenerse gratuitamente a través de algunos portales como NASA, USGS, GLCF (Global Land Cover Facility, 2006).

2. Los MED generados a partir de sistemas satelitales

Actualmente existen dos técnicas para obtener MED desde sistemas satelitales. Una se refiere al uso de imágenes satelitales estereoscópicas provistas por sensores ópticos satelitales; la otra se basa en el uso de datos provistos por sistemas de radar satelitales, ya sean de apertura sintética (SAR) o apertura sintética interferométrica (InSAR).

En el caso de barredores satelitales ópticos, la generación de imágenes de alta resolución proporciona una importante fuente de datos para el mapeo topográfico. Desde el lanzamiento de IKONOS II, con sensores H (1 metro pancromático y 4 metros multiespectral), el 24 de septiembre de 1999, otros satélites barredores frontales (pushbroom) tales como el Sistema de Observación de la Tierra (EROS-A Earth Resources Observation System A), QuickBird, SPOT-5, ASTER and OrbView,

están disponibles con una resolución que va desde los 0,61 m (QuickBird) hasta los 15 m (ASTER). La mayoría de estos satélites (EROS, IKONOS, OrbView, ASTER y QuickBird) son de enfoque variable; es decir, permiten cambiar el ángulo nadir de visión hasta 60° en cualquier azimut (Toutin, 2004), usando inclusive diferente longitud de onda como es el caso del satélite japonés para el monitoreo terrestre (JERS-1), el cual capta, con ligero adelanto, la imagen de infrarrojo cercano permitiendo una estereoscopia al largo del trayecto (along-track) con el resto de las imágenes, y creando un campo instantáneo de vista de 18 m (Endreny *et al.*, 2000), mientras que SPOT-5 mantiene su tradicional vista multitemporal transversa al trayecto (across-track).

Tanto pueden los satélites de enfoque variable o de capacidad multitemporal generar imágenes con definida estéreo-geometría que las técnicas fotogramétricas usadas tradicionalmente en fotografías aéreas también pueden ser empleadas con estas imágenes, obteniéndose datos planimétricos y altitudinales de gran precisión.

Otro beneficio del enfoque variable es que permite la generación instantánea de estereoscopia, lo cual reduce los problemas radiométricos relativos a cambios temporales, iluminación solar, homogeneidad atmosférica, etc. Y, por lo tanto, incrementando la correlación efectiva de las imágenes (Toutin, 2004), dado que la estereoscopia longitudinal al trayecto (along-track, misma órbita), presenta una separación de minutos y no de horas como sucede con los sistemas estereoscópicos de órbita múltiple (Khalsa *et al.*,

2004). ASTER es un instrumento japonés a bordo del satélite Terra de NASA, el cual con una resolución de 15 metros en el visible e infrarrojo cercano y la capacidad de rotar hasta 24° sus dos telescopios (visible e infrarrojo cercano), provee una extensa visión transversa de la superficie y una capacidad de visita cada cinco días (Rigon y Cozzini, 2001).

Sin embargo, debido a la naturaleza pasiva de estos sensores, la adquisición de imágenes apropiadas está ampliamente comprometida por la presencia de nubes y ausencia de luz solar, por ejemplo, en áreas de alta densidad de nubes como sucede en los trópicos, se necesitan varios intentos para obtener un par confiable de imágenes estereoscópicas (Rabus *et al.*, 2003), por lo que se hace necesaria una forma alternativa para el monitoreo de la superficie terrestre.

En este sentido, una segunda técnica, que usa la sección de microondas del espectro electromagnético, se ejecuta a través de la puesta en órbita de sensores de radar de apertura sintética (RAS). Dada su naturaleza activa, el radar tiene la capacidad para el monitoreo continuo de los hechos estáticos y dinámicos de la superficie terrestre, y en el caso de sistemas RAS, la limitación relativa al tamaño de la apertura (presente en las versiones simples de sensores de microondas), se supera con el uso del doble monitoreo de radar (Doppler tracking capability), para adquirir imágenes de alta resolución independientemente de la altura de la plataforma (Elachi, 2004).

Elachi (2004), basándose en los avances tecnológicos y la subsiguiente preci-

sión, divide los sistemas radar desde plataformas satelitales en dos tipos principales: los de apertura sintética (RAS) en banda simple y los radares interferométricos de apertura sintética (InRAS) multibanda. Los primeros pueden encontrarse en sistemas como el Seasat (1978), SIR-A (1981), SIR-B (1984) y el japonés JERS-1, los cuales dieron, en su momento, las primeras imágenes sinópticas de radar de la superficie terrestre a una resolución de 25 m. Estos sistemas son fundamentalmente similares en el hecho que operan en banda L con una amplitud de 6 a 20 MHz y con un barrido de 50 a 100 Km, usando antena de arreglo planar de 2 x 10 m. Similares arreglos se encuentran también en sensores europeos como los ERS-1 (1991) y ERS-2 (1995) y en el satélite canadiense Radarsat (1995), pero operando en Banda C, lo cual mejora la resolución horizontal en un rango de 10 a 25 m.

Aunque SIR-A (Shuttle Imaging Radar) obtuvo imágenes con geometría diferente a aquellas obtenidas con el Seasat SAR, durante 1984 y 1994, las misiones de radar del Shuttle liderizaron los avances en capacidad multispectral y multipolarización, culminando en el sistema de radar interferométrico que operó en la misión del Shuttle del año 2000. Si bien el sistema de radar SiR-C/XSAR (1994) significó un gran avance al operar a tres frecuencias (Bandas L, C y X), esto fue mejorado en el SRTM 2000 mediante la adición de una mástil de 60 m, que porta una segunda antena de recepción de bandas C y X (Rabus, 2003). Los cuadros 1 y 2 describen las principales características técnicas de los más difundidos sistemas satelitales usados para la generación de Modelos de Elevación Digital.

Cuadro 1. Sistemas ópticos estereoscópicos usados para la generación de Modelos de Elevación Digital (MED)*

SYSTEMAS	TIPO DE ESTEREOSCOPIA	ÁNGULO DE VISTA	ÁREA DE LA IMAGEN	TAMAÑO DEL PIXEL
Spot-5 HRG	Transverso Multitemporal	+23 -19	60 x 60 km	5 m
EROS-A Pan	Longitudinal Instantáneo	+38 -8 -6 -27	13 x 13 km	1,8 to 2,4 m
IKONOS-II Pan	Longitudinal Instantáneo	+/- 27	10 x 10 km	1 m
QUIKBIRD Pan	Longitudinal Instantáneo	+/- 29	18 x 15 km	0,61 m
ASTER VNIR	Longitudinal Instantáneo	+/- 24	60 x 60 km	15 m
JERS-1	Longitudinal Instantáneo	+/- 24	75 x 75 km	18 m

* Basado en Toutin, 2004

Cuadro 2. Sistemas Radar RAS e InRAS usados en generación de Modelos de Elevación Digital (MED)

SISTEMAS	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCIÓN		ANCHO DEL BARRIDO	
			H	V		
SEASAT SAR	1,275 Ghz	23,5 cm (L)	25 m		100 km	
SIR A and B	1,275 Ghz	23,5 cm (L)	25 m			
RADARSAT	5,3 Ghz	5,6 cm (C)	8 - 100 m		45 - 500 km	
SRTM	SIR - C	5,3 Ghz	5,8 cm (C)	30 m	16 m	225 km
	X - SAR	9,6 Ghz	3,1 cm (X)	30 m	16 m	50 km
JERS - SAR	1,36 Ghz	23 cm (L)	18 m		75 km	
ERS 1 and 2	5,3 Ghz	5,7 cm (L)	30 m		80 - 100 km	

2.1 El sistema interferométrico de apertura sintética de la misión Shuttle 2000 (SRTM)

El sistema de radar interferométrico está conformado por la interrelación de señales de radar provenientes de dos antenas por separado; la separación de estas dos antenas se llama línea base. Estas dos antenas pueden estar montadas en una misma plataforma; sin embargo, el uso de una misma antena repitiendo el sobrevuelo en una franja u órbita parcialmente sobrepuesta a la anterior (Zebker *et al.*, 1994) es una configuración típica en aviones y satélites.

Comúnmente la separación espacial de estas franjas u órbitas (línea base) es del orden de 10 m a 500 m (Bamler, 1999), reproduciendo así un arreglo estereoscópico, en donde dos radares de apertura sintética se desplazan idealmente en líneas paralelas, monitoreando la superficie desde dos vistas/direcciones diferentes (Rabus *et al.*, 2003). Las anteriores misiones del Shuttle adquirieron

datos interferométricos de la superficie terrestre usando este tipo de sobreposición de órbitas/pasos, cumpliendo así los requerimientos relativos a la generación de estereoscopia; sin embargo, debido a que la separación temporal entre estas órbitas/pasos fue de seis meses, (Geudtner *et al.*, 2002), los datos obtenidos pudieron ser afectados por la subsecuente decorrelación espacial, limitando entonces la confiabilidad y aplicabilidad de esta técnica de sobreposición de órbitas/pasos, dado que características geográficas tales como áreas boscosas, tienden a perder coherencia en cortos períodos de tiempo por los cambios estacionales, ya que la cobertura vegetal influye decisivamente en la señal de retorno del radar (Rabus *et al.*, 2003).

La última misión del SRTM, llevada a cabo en el año 2000, soluciona este problema a través del uso de una segunda antena receptora de las bandas C y X. Esta segunda antena montada en un mástil de 60 m se despliega cuando el Shuttle llega a su órbita, logrando así una configura-

ción de interferometría simple o de una misma órbita/paso, solventando no sólo los potenciales problemas encontrados en la técnica de sobreposición de órbitas/pasos, como los mencionados anteriormente sobre decorrelación temporal, sino también problemas asociados a la calibración de la línea base y variaciones atmosféricas (Geudtner *et al.*, 2002). En este sentido, el SRTM 2000 proporciona por primera vez un MED global de alta calidad de la superficie terrestre comprendida entre los 60° N y 57° S de latitud, desde un mismo sensor, una misma misión y una misma técnica (InRAS), a una resolución de 1 y 3 arcos de segundo (Rabus *et al.*, 2003).

Estos datos interferométricos del SRTM 2000 se obtuvieron en el período comprendido entre el 11 y 22 de febrero del 2000, en el cual la superficie terrestre fue monitoreada varias veces. En esta misión se mapeó el 80% de la superficie sólida terrestre (119,56 M km²), de los cuales el 99,968% (113,10 M km²) fue monitoreado al menos una vez, 94,59% (113,10 M km²) dos veces, 49,25% (58,59 M km²) tres veces, 24,10% (28,81 M km²) 4 veces, y 50.000 km² fueron clasificados como áreas de datos erróneos o perdidos, estos últimos situados en los Estados Unidos y la península de la Guajira en Sur América.

3. Problemas, ventajas y desventajas en MED derivados de datos SRTM e imágenes ASTER

En el intento preliminar para destacar las principales características, ventajas y fallas de dos MED obtenidos a partir de

diferentes sistemas satelitales, en este trabajo se propone un caso de estudio localizado en el valle central de la cordillera de Mérida, Venezuela (8° 33' N, 71° 05' W; coordenadas centrales). Esta área de 398,4 km² (Anexo 1), presenta un relieve accidentado con un rango altitudinal desde 900 msnm a casi 4000 msnm, orientado en dirección SW - NE y atravesado por un amplio valle fluvial intramontano (valle del río Chama). Como era de esperarse en un ambiente de montaña tropical, esta área presenta pendientes abruptas y alta densidad atmosférica, lo cual juega un rol importante en la calidad de cualquier producto de sensoramiento remoto, de allí la selección de esta área como objeto de análisis.

El conjunto de datos usados en este análisis incluye imágenes ASTER de nivel 1B adquiridas en enero del 2000, y el correspondiente MED generado por los datos del SRTM 2000. Estos datos se adquirieron a través de los portales del GLCF y USGS (Figura 1) y fueron georeferenciados al datum WGS-84 y proyección UTM (zona 19N). Adicionalmente, durante el mes de junio de 2003, se realizaron excursiones en el área tomando 240 puntos de control con SPG (Sistemas de Posicionamiento Global), GPSMAP 76S, CASIO G SOC (Barométrico) y eTrex Vista, los cuales fueron referidos al punto nacional de control geodésico localizado en pico El Águila (4049 msnm) y el punto geodésico local Observatorio de Llano El Hato (3568 msnm), mejorando así la precisión vertical y horizontal de los MED creados. A partir de las imágenes ASTER, el MED se generó usando los algoritmos estándar ofrecidos SIG PCI

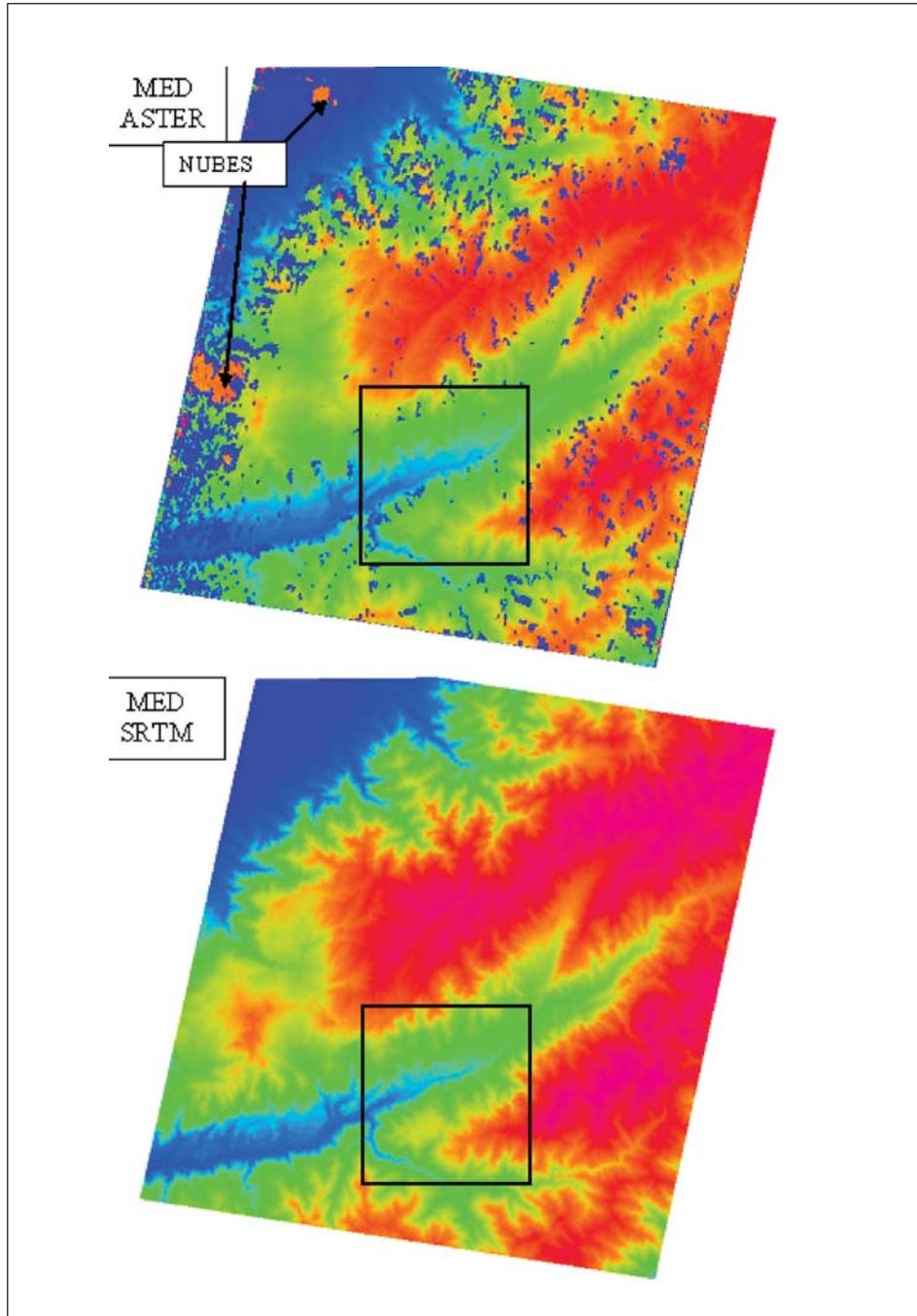


Figura 1. MED de Aster (original) y SRTM (corregido). Área de estudio en recuadro

Geomática; posteriormente, ambos MED fueron importados al SIG ILWIS para su procesamiento y comparación. El MED de Aster fue agregado de su resolución horizontal original de 15 m a 90 m, la cual es aproximadamente la resolución del MED del SRTM.

Ambos MED analizados tienen errores y brechas de información fácilmente observables como 'torres' y 'vacíos' cuando se visualizan en 3D (Anexos 2 y 3). Las 'torres' son errores comunes en MED obtenidos a partir de sensores ópticos como ASTER. Estos errores de información son producto de superficies con muy alta reflectancia como nubes, nieve, superficies congeladas, casquetes y glaciares (Knap *et al.*, 1999), características que distorsionan las dimensiones reales de altitud de la superficie y alterando incluso otras características geomorfológicas. Los 'vacíos' son el resultado de la pérdida de datos en sectores del MED por diferentes razones. Éstas van desde aquellas relacionadas con las especificaciones técnicas del sensor hasta características topográficas propias como pendientes, orientación, formas, cuerpos de agua, etc. Toutin (2002) encontró que el radar de apertura sintética (RAS), usado para determinar información sobre elevación, es muy sensible al ángulo local de incidencia, por lo que es de esperar que un MED basado en técnicas radar-gramétricas sea anisotrópico y dependiente de las pendientes.

Igualmente, Rabus *et al.* (2003) 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. Dada la ausencia de correcciones en los datos originales, éstos fueron corregidos a través de técnicas de interpolación ofrecidas en el programa ENVI (Figura 2). Ningún tratamiento relativo a aerosoles y nubosidad fue aplicado en las imágenes ASTER; de hecho, con miras a evitar este problema el área formal de análisis en este trabajo se limitó a una porción del área total donde estos factores eran reducidos.

Si bien ASTER mejora la resolución espectral y espacial comparado con sensores previos como el sistema LANDSAT, en el sentido que ASTER ajusta e incrementa sus niveles de sensibilidad para el óptimo monitoreo de hielos y nieve (la muy alta reflectancia de estas superficies tiende a sobresaturar los sensores), (Khalsa *et al.*, 2004), factores tales como aerosoles, nubes, vapor de agua y reflectancia bidireccional siguen afectando la consistencia de sus derivados MED, por lo que en algunos casos el píxel del MED ASTER corresponde a la altitud de las nubes o aerosoles pero no a la altitud de la superficie terrestre.

4. Comparación de los MED SRTM y ASTER

La comparación entre ambos MED descansa en: 1) la interpretación del gráfico cartesiano de dispersión; 2) el cálculo de su asociación espacial para lo cual es usual la aplicación de coeficientes de correlación (Boham, 1996), que definen los

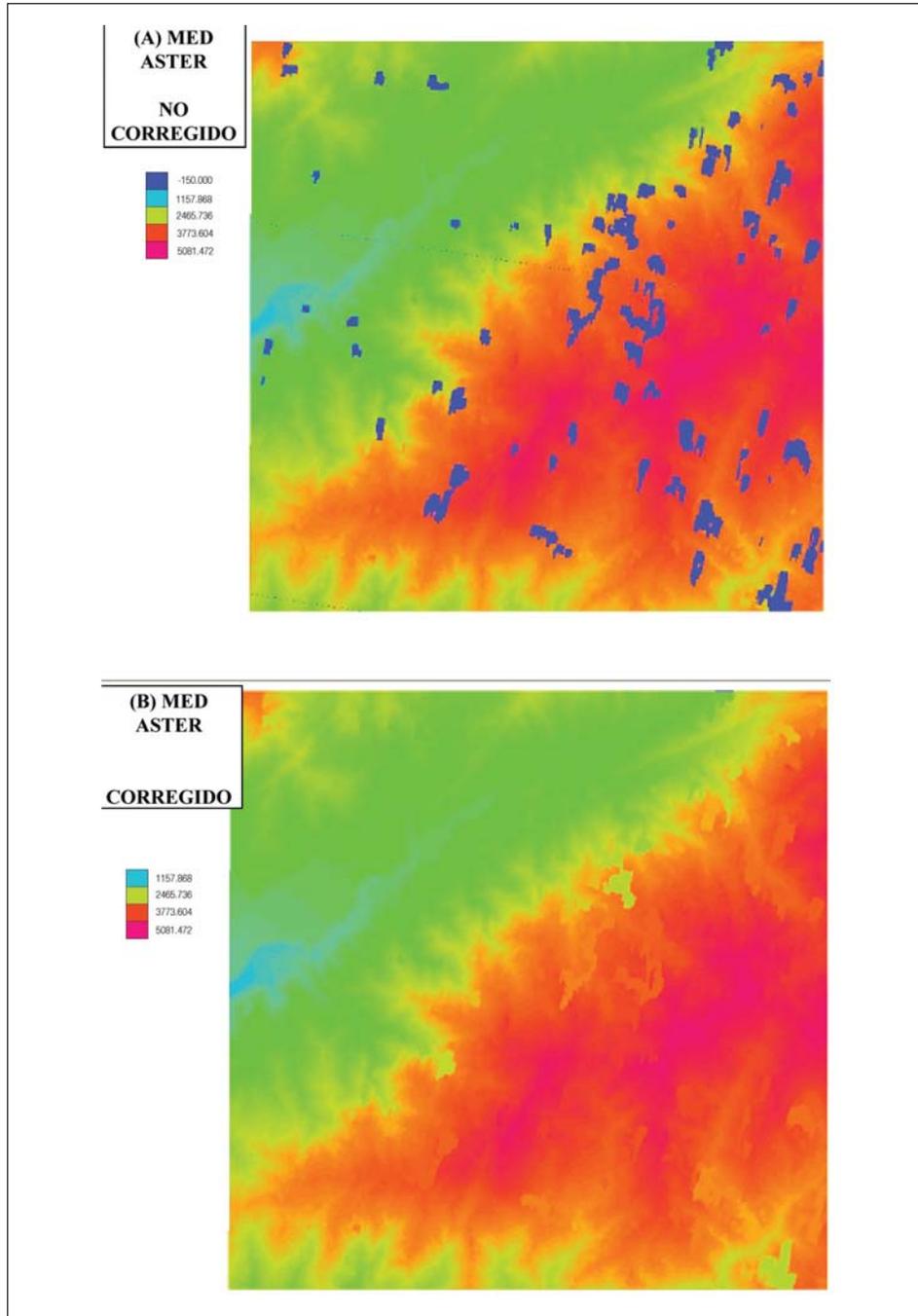


Figura 2. Ejemplo de un sector del MED ASTER, no corregido (A) y corregido (B)

niveles de precisión y confiabilidad en los MED analizados y, finalmente, 3) el análisis de las diferencias de altitud en los MED según diferentes capas derivadas (rangos altitudinales pendientes y orientación), y en dos perfiles topográficos trazados en un área con vegetación y sin vegetación respectivamente. En función del gráfico de dispersión entre ambos MED (Figura 3), en términos generales, se asume una alta correspondencia entre los datos de ambos MED, interpretándose que los datos y grupos de datos alejados de la tendencia lineal provienen de sectores fuertemente afectados por problemas relativos a densidad atmosférica, vegetación y variabilidad de inclinación y exposición de pendientes, así como también por el proceso sintético de corrección de la información original, lo cual es parti-

cularmente visible en el MED ASTER, y que fácilmente se aprecia en la figura 2. La consistencia y robustez de los datos de altitud se demuestra en la relación lineal positiva y alta correlación obtenida (0.9829).

Si bien el cálculo del coeficiente de correlación entre los MED analizados da una primera aproximación a su comparación, es necesario indagar sobre la similitud que pueda tener la información derivada de estos MED. En este sentido, de cada MED analizado se derivaron cuatro capas: rangos altitudinales, inclinación de la pendiente, forma de la pendiente y orientación de la pendiente. Cada capa se calculó bajo el mismo algoritmo y fue clasificada en un dominio común, como es usual en análisis comparativos. Cada capa calculada a partir del MED SRTM

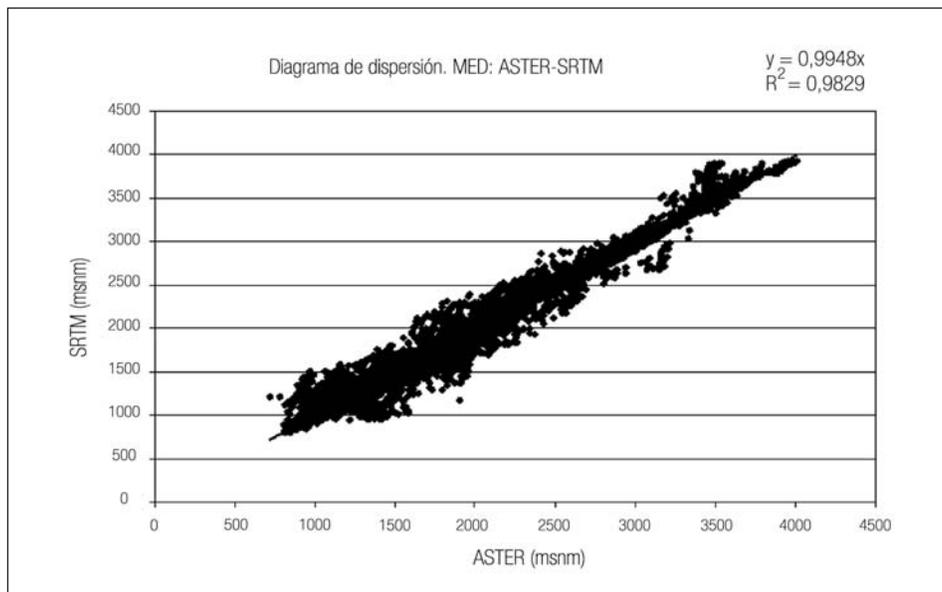


Figura 3. Diagrama de dispersión de los MED ASTER vs. SRTM

se cruzó con su similar proveniente del MED ASTER, generando una matriz de doble entrada donde los datos del SRTM corresponden a las filas y los del ASTER a las columnas. Como soporte lógico de estas operaciones se utilizó el SIG ILWIS 3.3.

En esta sección, la confiabilidad y precisión de los MED analizados se establece en función de la altitud, y pendientes (inclinación, orientación y forma). Considerando la mayor consistencia del MED derivado del SRTM, éste se utilizó como la capa base o 'maestro' y al MED ASTER como la capa a evaluar o 'esclava'. La confiabilidad está representada en las filas de las matrices calculadas y se refiere a la probabilidad que celdas de cierta clase de la capa esclava se correspondan con la misma clase representada en las celdas de la capa maestro. En el mismo sentido, la precisión representada en las columnas, significa la probabilidad que celdas de la imagen maestro se correspondan con la misma clasificación y celdas de la imagen esclava.

La precisión promedio se calcula como la suma de la columna 'precisión' y dividida por el número de clases existente en la capa 'maestro', mientras que la confiabilidad promedio se calcula como la suma de la fila 'confiabilidad' y dividida por el número de clases de la capa 'esclava'. Finalmente, la precisión general es calculada como la suma de todas las celdas (píxel) correctamente clasificadas (celdas diagonales), dividida por el número total de celdas relacionadas. Aunque los valores extraídos de las matrices de correlación no son valores continuos, cada matriz aquí calculada se acompaña

de un gráfico lineal, para facilitar la interpretación visual del comportamiento de la confiabilidad y precisión en cada capa, dado que originalmente éstos si poseen continuidad geográfica (Cuadro 3, Figura 4; Cuadro 4, Figura 5; Cuadro 5, Figura 6; Cuadro 6, Figura 7).

4.1 Interpretaciones de las matrices y gráficos de correlación

Las matrices y gráficos de correlación arriba presentados describen el nivel de asociación espacial que poseen las distintas capas provenientes de los MED analizados. No se pretende mediante estos cálculos establecer cual es el mejor MED dado que ninguno de los analizados puede considerarse como la representación absoluta de la topografía, en este caso de un área central de la cordillera de Mérida. Esta comparación busca determinar el nivel de relación entre ambos MED y cuáles podrían ser los puntos críticos de ésta. Prácticamente no se podría esperar relación perfecta entre ambos MED, debido a sus diferentes fuentes y procesos. En términos generales, las relaciones obtenidas se describen en el cuadro 7.

Donde:

- 1 El total de las celdas de una misma clase de la capa maestro se corresponde con el total de celdas igualmente clasificadas en la capa esclava. El nivel de esta correspondencia viene dado por el valor del índice de asociación, siendo 1 la asociación absoluta.
- 2 La capa esclava presenta una sub-estimación en la clase representada con respecto a la capa maestro.

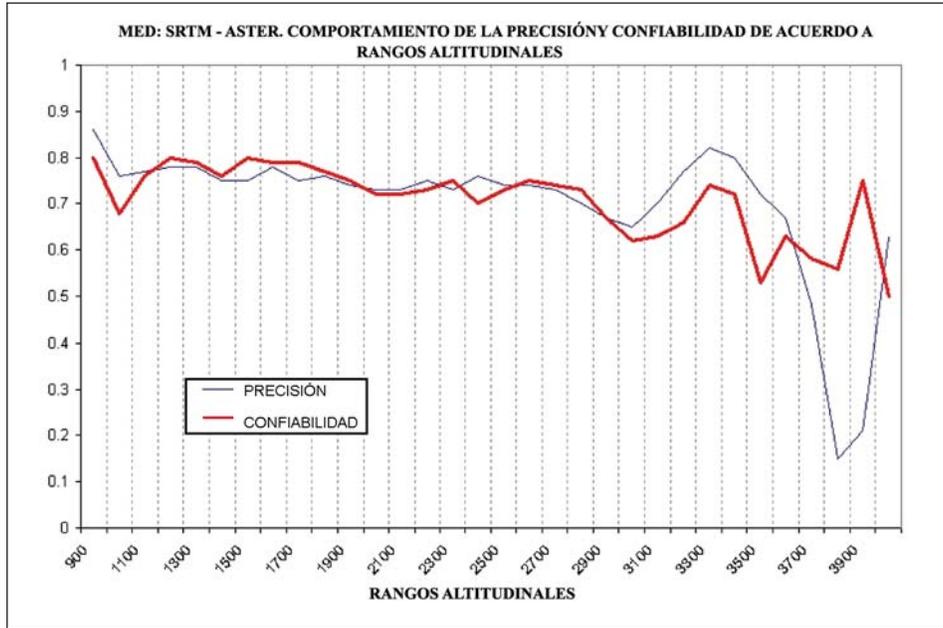


Figura 4. Comportamiento de la precisión y confiabilidad en la relación MED SRTM-ASTER, según rangos altitudinales

Cuadro 4. Matriz de correlación por inclinación de las pendientes MED: SRTM \ ASTER (relación número de celdas por clase de inclinación en grados)

SRTM\ASTER	5	10	20	30	40	50	60	70	80	>80	NO-CLASS.	PREC.
5	1099	1215	427	62	9	9	3	6	0	0	0	0,39
10	654	1541	1249	274	59	24	15	5	6	0	0	0,4
20	227	1011	4639	2674	699	264	103	53	17	0	0	0,48
30	75	291	2650	6971	3689	783	274	169	49	0	0	0,47
40	52	142	733	2770	5358	2790	766	338	78	2	0	0,41
50	12	33	110	274	741	931	316	128	37	0	0	0,36
60	1	1	6	9	21	42	29	16	0	0	0	0,23
70	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	?
>80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	?
CONF.	0,52	0,36	0,47	0,53	0,51	0,19	0	0	0	0		
Precisión promedio = 34,25%				Precisión general = 43,73 %								
Confiabilidad promedio = 26,08 %												

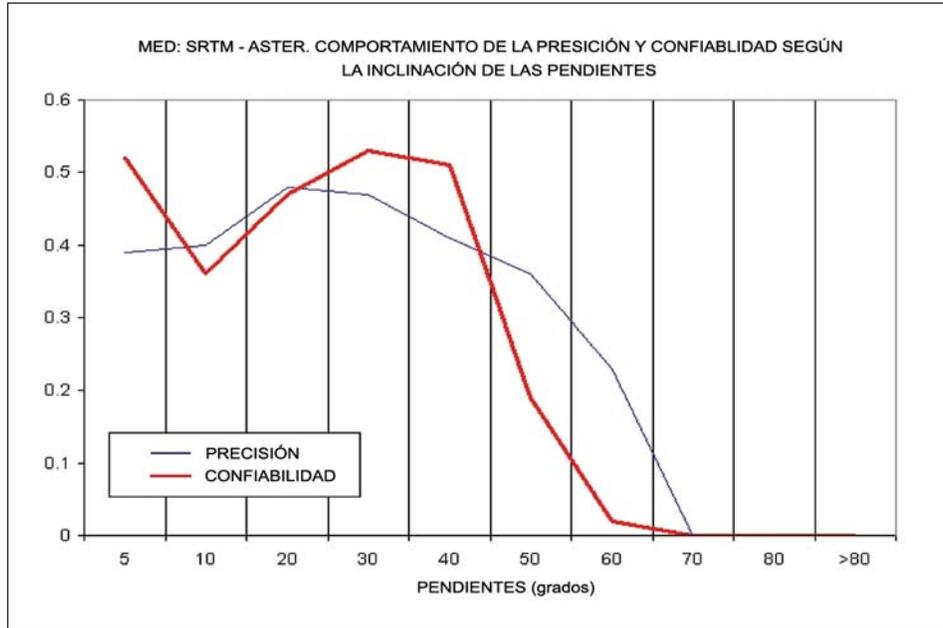


Figura 5. Comportamiento de la precisión y confiabilidad en la relación MED SRTM-ASTER, según la inclinación de las pendientes

Cuadro 5. Matriz de correlación por orientación MED: SRTM \ ASTER (relación número de celdas por clase de orientación)

SRTM\ASTER	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	NO-CLASIFICADO	PRECISIÓN
N	2887	766	281	74	129	103	418	1154	0	0,5
NE	768	1648	633	91	79	37	100	147	0	0,47
E	213	544	2203	864	318	53	63	62	0	0,51
SE	68	101	923	3040	1211	145	108	46	0	0,54
S	113	73	418	1295	5115	1408	450	125	0	0,57
SW	136	65	127	180	1305	3388	1196	179	0	0,52
W	497	122	140	109	330	1146	3951	1041	0	0,54
NW	913	158	127	80	146	127	1118	2474	0	0,48
CONFIABILIDAD	0,52	0,47	0,45	0,53	0,59	0,53	0,53	0,47		
Precisión promedio = 51.49 %			Confiabilidad promedio = 51.28 %			Precisión general = 52.20 %				

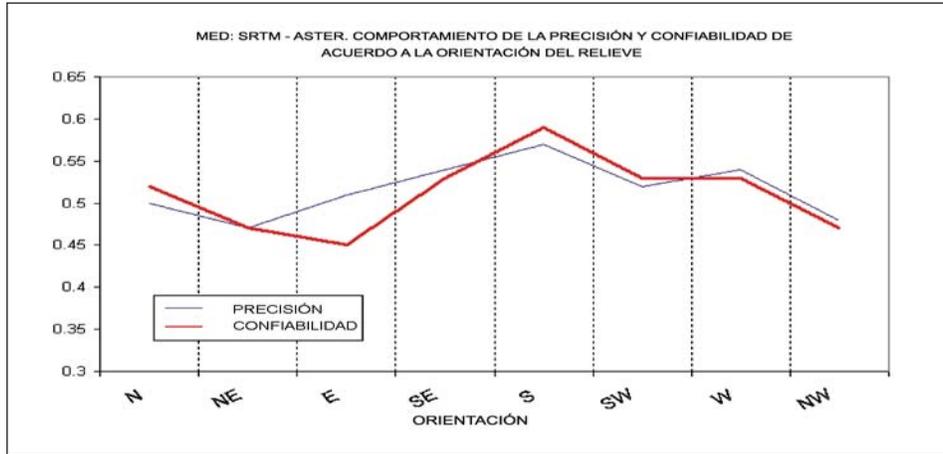


Figura 6. Comportamiento de la precisión y confiabilidad en la relación MED SRTM-ASTER, según la orientación de las pendientes

Cuadro 6. Matriz de correlación por forma de las pendientes MED: SRTM \ ASTER (relación número de celdas por clase de forma)

SRTM\ASTER	CONVEXO	PLANO	CONCAVO	NO-CLASS	PRECISIÓN
CONVEXO	13555	1760	5497	0	0,65
PLANO	3276	1247	3039	0	0,16
CONCAVO	5159	1787	12426	0	0,64
CONFIABILIDAD	0,62	0,26	0,59		
Precisión promedio = 48.59 %			Precisión general = 57.03 %		
Confiabilidad promedio = 48.98 %					

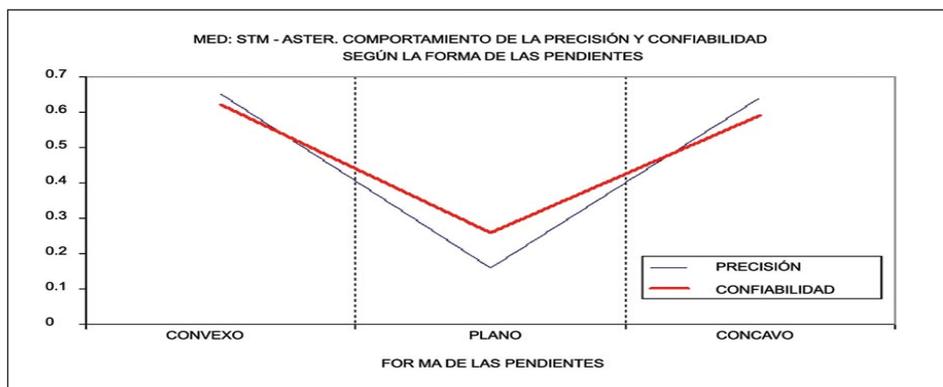


Figura 7. Comportamiento de la precisión y confiabilidad en la relación MED SRTM-ASTER, según la forma de las pendientes

Cuadro 7. Relaciones generales a interpretar de las matrices de correlación espacial

	CONFIABILIDAD / PRECISIÓN	SIGNIFICADO: Clase en capas es:	
		"ESCLAVA" (ASTER)	"MAESTRO" (SRTM)
1	Confiabilidad \approx Precisión \approx 1	Tendente a una total asociación espacial	
2	Confiabilidad > Precisión	Subestimada	Sobre estimada
3	Confiabilidad < Precisión	Sobre estimada	Subestimada
4	Confiabilidad \approx Precisión \approx 0	Baja a no existencia de asociación espacial	

- 3 La capa esclava presenta una sobre estimación en la clase representada con respecto a la capa maestro.
- 4 Cuando la confiabilidad y/o la precisión tienden a cero la asociación espacial es muy baja o inexistente.

La precisión general es indicativa del nivel general de la asociación entre las capas, mientras que los valores de confiabilidad promedio y precisión promedio orientan sobre el carácter de esta relación, tal como se describe en el cuadro 7. Para determinar la asociación a niveles puntuales es necesario recurrir a los gráficos. El cuadro 8 resume las principales características de la correlación de las capas/mapas.

La capa Rangos de Altitud presenta la mayor asociación espacial de las capas analizadas, mostrando la capa esclava una muy ligera sobrestimación con respecto a la capa maestro (Cuadro 8). Esta sobrestimación es muy evidente en los rangos 900 a 1000 msnm y 3000 a 3600 msnm que, luego de los 3700 msnm, tiende a la subestimación con una mayor disociación entre ambas capas (Figura 4; Anexo 4). Esta anomalía en parte se podría atribuir a las características internas del sensor de ASTER debido a que ya Kamp (2005), en una comparación de un MED ASTER vs un MED basado en mapas topográficos provenientes del cerro Sillajhuayo (Chile/Bolivia), encontró que el MED ASTER

Cuadro 8. Principales características obtenidas de la correlación de capas derivadas de los MED SRTM y ASTER

CAPAS/MAPAS	PRECISIÓN GENERAL	CONFIABILIDAD PROMEDIO	PRECISIÓN PROMEDIO	ASOCIACIÓN	
				"ESCLAVA" (ASTER)	"MAESTRO" (SRTM)
Rangos Altitud	74,52%	66,54%	69,92%	Sobrestimada	Subestimada
Inclinación Pen.	43,73%	26,08%	34,25%	Sobrestimada	Subestimada
Orientación Pen	52,20%	51,28%	51,49%	Moderada asociación espacial	
Forma Pen.	57,03%	48,98%	48,59%	Moderada asociación espacial	

presenta un decrecimiento en la precisión de la altitud a partir de los 3000 msnm. La capas con menores índices de asociación son las correspondientes a Inclinación de las Pendientes (Cuadro 8) donde, según los valores obtenidos, existe, al igual que en las capas de altitud, una sobrestimación de la capa esclava con respecto a la maestro; esta sobrestimación (luego de los 40°), (Cuadro 4) no es relevante dado los pobres índices de correlación. Algunos autores como Toutin (2002), han determinado que la precisión en MED basados en radar es siempre baja en áreas de pendientes abruptas, lo cual podría explicar en nuestro caso la subestimación que presenta la capa maestro luego de los 40° de inclinación, pero no en el rango de pendientes menores a 10° (Figura 5).

Otro factor a considerar (tal vez para todas las capas analizadas), es el hecho que los datos provenientes de la imagen ASTER (15 m) tienen, originalmente, mayor resolución espacial que los datos del SRTM (90 m), y que éstos deben ser agregados para facilitar la comparación. En términos generales, los datos obtenidos sugieren que la precisión y confiabilidad decrecen en la medida que las pendientes aumentan, por lo que esta disociación puede estar más relacionada con las características propias de las pendientes.

Las capas Orientación de las Pendientes y Formas de las Pendientes presentan una mejor correlación, pero aún a nivel moderado (Cuadro 8). En el primer caso, el comportamiento de la precisión y confiabilidad es similar excepto en la clase E o pendientes orientadas al Este (Cuadro 5; Figura 6) y su explicación podría sus-

tentarse en el hecho de que los sensores del ASTER y SRTM tienen ángulos de vista diferentes. Jarvis (2004) argumenta que los datos provenientes del SRTM sobrestiman las pendientes orientadas al Noreste y subestiman aquellas orientadas al Suroeste; sin embargo, a nivel de este análisis no se poseen indicios para confirmar o rebatir este enunciado. En el segundo caso o de la Forma de las Pendientes, la correlación entre las clases Convexo y Cóncavo es sensiblemente mayor que en la clase Plano donde se presenta la más baja correlación (Cuadro 6). En las clases Convexo y Cóncavo, la capa esclava es ligeramente sobrestimada con respecto a la capa maestro, pero si presenta una marcada subestimación en la clase Plano.

Se pudiera afirmar sin embargo, que la moderada correlación de las capas Forma de las Pendientes responde al carácter más independiente que posee esta característica geomórfica con respecto a la orientación e inclinación; probablemente la capa esclava al ser derivada del MED ASTER, posee una mayor diferenciación de pendientes que aumentan su registro en clases como Convexo y Cóncavo, reduciendo las probabilidades de clase Plano (Figura 7). La capa maestro ha sido derivada del SRTM, el cual posee originalmente una resolución de 90 m que se traduce en una relativa generalización de información (respecto a los 15 m por celda del ASTER), y por lo tanto una mayor generalización en las formas que se traduce en mayores probabilidades de superficies planas. Dado estos supuestos, se asume que las diferencias reportadas en las capas Formas de las Pendientes están en mayor grado

relacionadas con el procesamiento y tamaño de celda que con las características internas del sensor o las externas geomórficas. Un ejemplo de la generalización de las formas de pendientes en las capas derivadas de ambos MED puede apreciarse visualmente en los anexos 5 y 6, aunque la apreciación visual no puede considerarse como única base para definir la calidad, cantidad y resolución de la información aportada por cada MED.

4.2 Diferencias verticales de los MED según rangos altitudinales, pendientes, orientación y cobertura vegetal

En esta sección se calcula la diferencia vertical (altitudinal) entre los MED analizados y luego ésta se representa según las diferentes clases derivadas como forma de establecer qué factores, en nuestra área de estudio, afectan la precisión y confiabilidad de los MED. Dado que generalmente los datos derivados del MED ASTER analizado se han encontrado sobrestimados con respecto al MED SRTM

(Cuadro 8), la diferencia vertical en este análisis se expresa como: MED ASTER – MED SRTM y se clasifica en siete rangos a partir de un rango central considerado como el de mayor precisión vertical. En este caso, la clase de mayor precisión vertical está conformada por aquellos valores de diferencia vertical entre -16 a 16 m, lo cual sigue lo estipulado por el US Geological Survey (2006), que define la precisión de los datos del SRTM a +/- 16 m con un nivel de confiabilidad del 90%. Los valores fuera de este rango se agrupan en clases contiguas cuyos límites vienen dados por la sumatoria de la desviación estándar obtenida del tratamiento de toda la muestra (55,42). El cuadro 9 muestra los rangos obtenidos.

Asumiendo que el rango de valores comprendido entre -16 a 16 es el rango de precisión estricta, los rangos inmediatos (-71,42 a -16 y 16 a 71,42), delimitados por la sumatoria de la desviación estándar al rango central (-16 a 16), se consideran rangos de precisión relativa. Los rangos restantes se consideran fuera de los límites de toda precisión. De estos re-

Cuadro 9. Diferencia vertical de MED ASTER – MED SRTM y su distribución en rangos

Rangos de diferencia vertical (m)	Numero de celdas (celda = 8100m ²)	Porcentaje del área de estudio
≤ - 126,84	844	1,7
-126,84 a -71,42	882	1,8
71,42 a -16	6136	12,7
-16 a 16	22043	45,5
16 a 71,42	17104	35,3
71,42 a 126,84	760	1,6
≥ 126,84	704	1,5

sultados se concluye que si bien los MED ASTER y SRTM del área analizada presentan diferencias verticales, 45,5 % de éstas son previstas dentro de los niveles de confiabilidad del sistema SRTM o precisión estricta, mientras que el 48% son relativas a la naturaleza propia de cada sensor, y a los problemas externos relativos a la adquisición de la información tales como los analizados en este trabajo. Sólo un 6,6 % del área presenta diferencias fuera de cualquier límite de precisión y corresponden a los sectores con mayor error de la información topográfica. La figura 8 describe la distribución espacial de los rangos de diferencia vertical ASTER – SRTM.

Para una mejor discriminación de las diferencias verticales y su distribución según las capas Rangos de Altitud, Pendientes y Orientación, se procedió a cruzar el mapa de diferencias verticales con éstas. Para ello fue necesario calcular cada capa

mencionada para cada MED analizado, obteniendo resultados como los ilustrados en la figura 9, en la que se observa que las diferencias verticales encontradas en cada rango del MED ASTER y SRTM (en este caso las diferencias se promedian para cada rango), en los rangos altitudinales de 1100 a 3500 msnm, presentan un comportamiento sistemático y relativamente ajustado a la precisión estricta antes mencionada; por encima y por debajo de estos rangos, las diferencias verticales carecen de un patrón sistemático y sugieren una información altitudinal muy disímil que sólo procede de los sectores altamente afectados por errores en los MED.

Los errores que alteran significativamente la información de altitud de los MED, particularmente en los rangos altitudinales más altos, se podrían explicar por la influencia de factores como pendiente y orientación de las pendientes. Las figuras 10 y 11 ilustran el comporta-

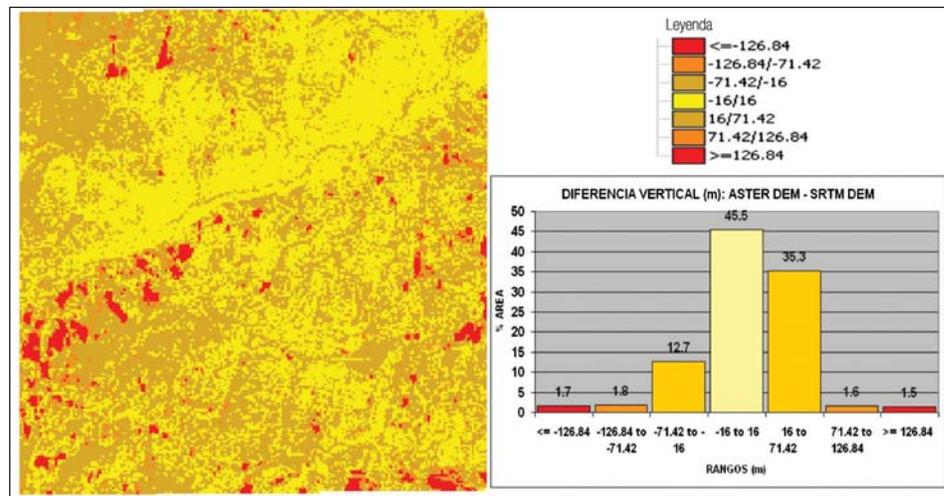


Figura 8. Distribución espacial y porcentual de la diferencia vertical MED ASTER – MED SRTM

miento de la diferencia vertical para cada MED, según clases de pendientes y orientación. De la interpretación de estas figuras se obtiene que a mayor inclinación de las pendientes en ambos MED, mayores diferencias verticales, encontrándose estas diferencias promedio extremas en las orientaciones SW y SE, derivadas del

MED ASTER, así como en las NW y N, del MED SRTM.

Posteriormente, para confirmar que el factor pendiente es el principal agente en los errores verticales encontrados en la data analizada, se cotejó el mapa de diferencias verticales con las capas rangos altitudinales y orientación de las

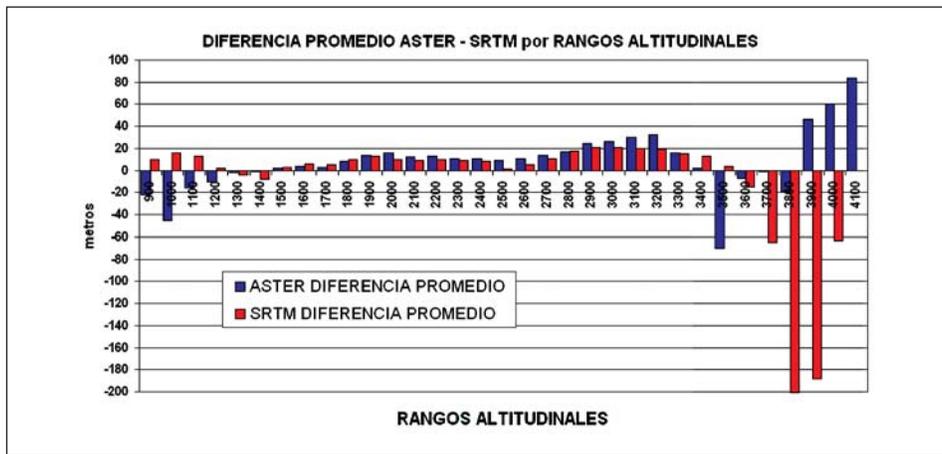


Figura 9. Distribución espacial y porcentual de la diferencia vertical MED ASTER – MED SRTM

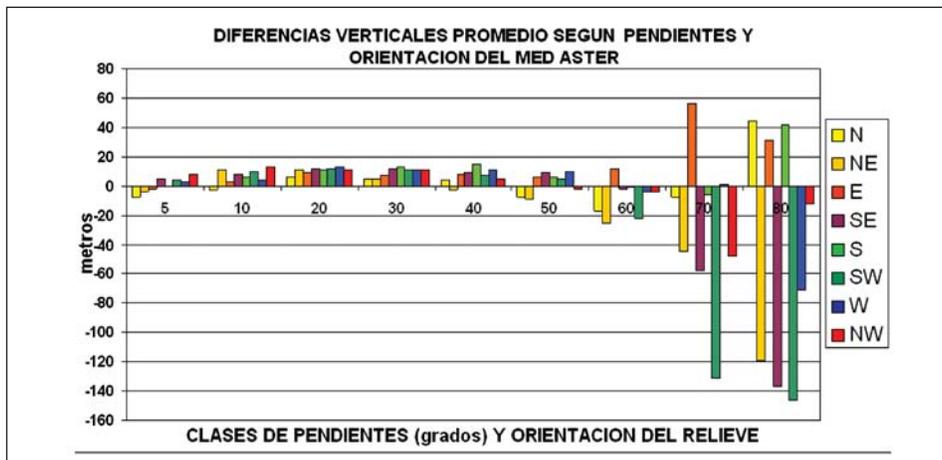


Figura 10. Distribución de las diferencias verticales promedio ASTER – SRTM, según clases de pendientes y orientación del relieve obtenido del MED ASTER

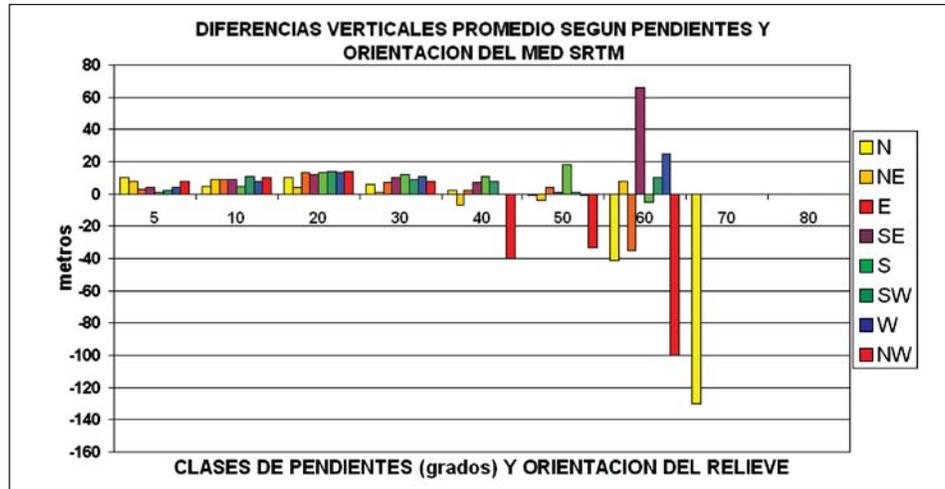


Figura 11. Distribución de las diferencias verticales promedio ASTER – SRTM, según clases de pendientes y orientación del relieve obtenido del MED SRTM

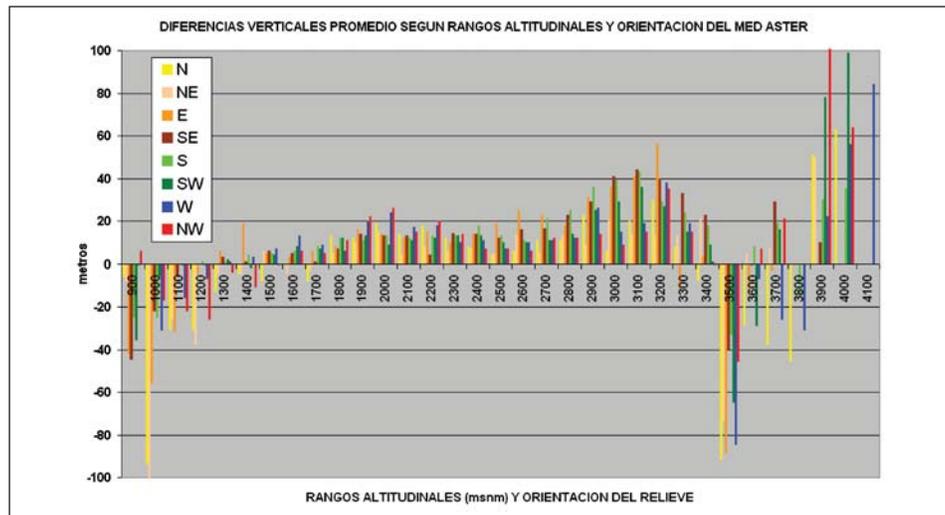


Figura 12. Distribución de las diferencias verticales promedio ASTER – SRTM, según rangos altitudinales y orientación del relieve obtenido del MED ASTER

pendientes provenientes de los MED ASTER y SRTM (Figuras 12 y 13).

De estas figuras se interpreta que las diferencias verticales conservan un com-

portamiento sistemático similar al encontrado inicialmente en la figura 9, particularmente en los rangos de altitud entre 1100 y 3500 para la capa proveniente del

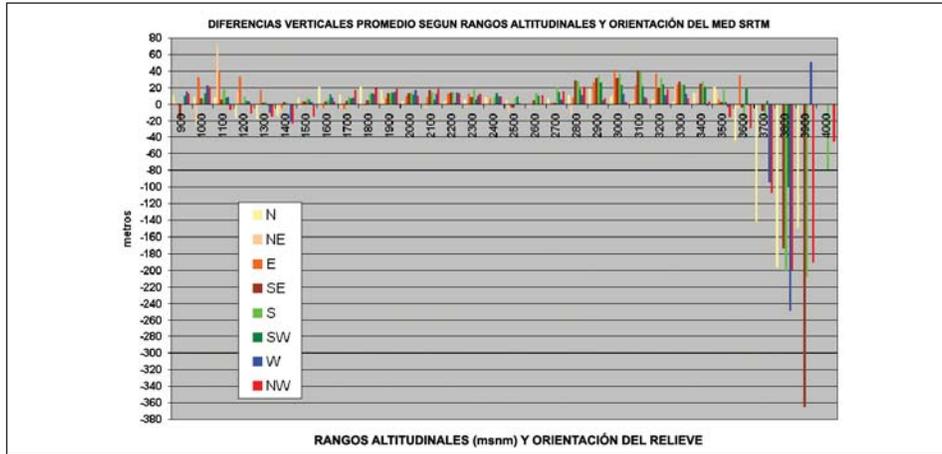


Figura 13. Distribución de las diferencias verticales promedio ASTER – SRTM según rangos altitudinales y orientación del relieve obtenido del MED SRTM

MED ASTER, y entre 1200 y 3600 para la capa del MED SRTM, variando esta diferencia vertical significativamente en los restantes rangos. Los resultados y datos manipulados en estas comparaciones sugieren que el factor pendiente es el principal responsable de las diferencias verticales encontradas entre los MED analizados.

Finalmente, se comparó la influencia de la vegetación en los errores verticales de la data empleada mediante el trazado de perfiles topográficos en iguales secciones de los MED analizados, pero con diferente cobertura vegetal. Para la selección de los perfiles se utilizó un mapa de clases derivadas de un NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) del área de estudio. La capa NDVI se calculó con los valores de reflectancia de las bandas 3 y 4 de una imagen Landsat del área adquirida el 13 de agosto de 1996, a través del portal del GLCF (www.landcover.org).

Este NDVI se normalizó a valores entre 0 y 1 mediante el método del valor máximo, por lo que valores tendentes a 0 describen áreas con poca a muy poca cobertura vegetal, mientras que valores tendentes a 1 representan áreas con densa cobertura vegetal.

Los dos perfiles trazados corresponden, uno, a una sección de poca muy poca cobertura vegetal (perfil A-B) y, otro, a una sección de mayor cobertura vegetal (perfil I-J), (Figura 14). De la interpretación de los perfiles mencionados obtenemos que efectivamente los perfiles topográficos basados en los MED ASTER y SRTM en la sección del perfil A-B, trazado sobre terrenos de poca vegetación, presentan una mayor correlación que los perfiles ASTER y SRTM trazados en la sección perfil I-J o de mayor cobertura vegetal. Aunque la sección del perfil I-J presenta mayor variabilidad en la orientación del relieve, lo cual influye nota-

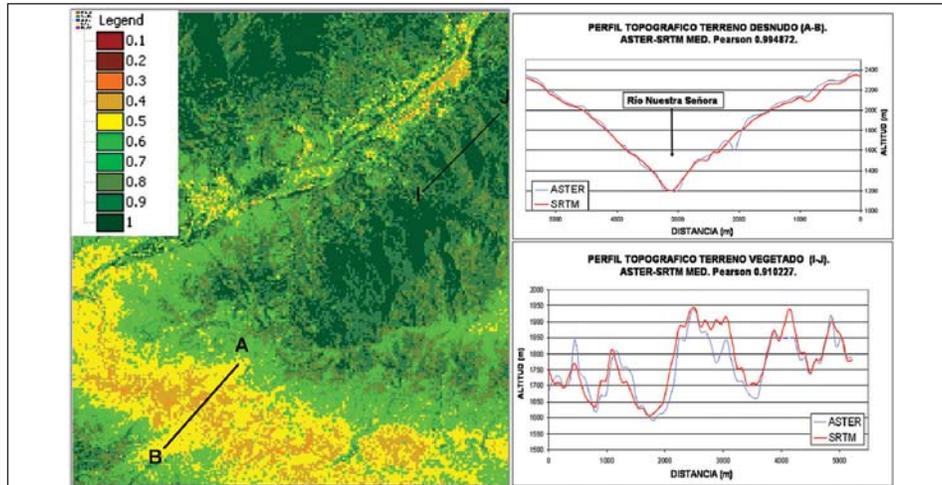


Figura 14. Comparación de perfiles topográficos trazados sobre los MED ASTER Y SRTM en secciones de distinta cobertura vegetal según la capa de clases NDVI ilustrada y correspondiente al área analizada. El Perfil A-B corresponde a terrenos de poca a muy poca vegetación mientras que el perfil I-J traza una sección con densa cobertura vegetal

blemente en las alturas registradas, esta comparación confirma que la cobertura vegetal debe ser considerada como un agente más en la explicación de las diferencias verticales encontradas en los MED analizados en este trabajo.

5. Conclusiones generales

5.1 Sobre los MED vía técnicas interferométricas (SRTM) y estereográficas (ASTER)

Ambas técnicas son de gran valor para la generación de MED sobre áreas regionales y mayores, lo cual hace que el producto final sea más consistente y coherente. Sin embargo, en este momento ambas técnicas aún son complementarias, debido a

la conveniente alta resolución espacial de los MED obtenidos a través de técnicas estereográficas, y la versatilidad de las imágenes de radar en su virtual capacidad de monitorear la superficie terrestre en cualquier momento y bajo cualquier condición atmosférica.

5.2 Sobre las correcciones de los 'vacíos' de datos en ambos MED

Este procedimiento debe ser evaluado y actualizado para así evitar la propagación de los errores presentes en los datos originales. En este sentido, se requiere probar con nuevos algoritmos y enmascaramiento de áreas no apropiadas para datos de elevación como por ejemplo, áreas nubosas o con densa calina. Todavía los datos provenientes del GTOPO30

(Anexo 1) se usan para estos propósitos (el Google Earth usa este MED global para su visualización en 3D de grandes áreas), (www.earth.google.com).

5.3 Sobre la confiabilidad y precisión de los MED analizados

Las comparaciones realizadas entre los MED ASTER y SRTM en este trabajo sugieren que si bien ambos MED son capaces de reproducir un modelo topográfico útil y aprovechable del relieve del área de estudio, tomando en cuenta su diferente resolución espacial y naturaleza del sensor, estos datos topográficos presentan inconsistencias en ciertos sectores del área en los cuales obviamente se reduce su nivel de confiabilidad y precisión, particularmente para estudios que demanden un detalle topográfico de 25 m (1:2500) y mayores; sin embargo, para estudios de escala regional este tipo de MED generados a partir de datos son altamente recomendables.

Dentro de los factores analizados como responsables de las aberraciones de los datos topográficos y consecuente pérdida de correlación entre ambos MED en el área de estudio, las pendientes con ángulos de inclinación mayores a 60° juegan un rol principal, no descartando que este rol se magnifica con la influencia conjunta de la orientación, las características internas al sensor y características externas al relieve como los aerosoles (comunes como factores aberrantes de los MED ASTER). La vegetación como factor de aberración fue

tratada aquí en términos más ilustrativos; sin embargo, es posible concluir que su influencia se sitúa dentro de los límites de precisión estricta y relativa considerados.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al GLCF-Universidad de Maryland, Universidad de Los Andes - Trujillo y Universidad de DePaul, por la ayuda prestada para las salidas de campo, obtención y procesamiento de los datos presentados en este trabajo.

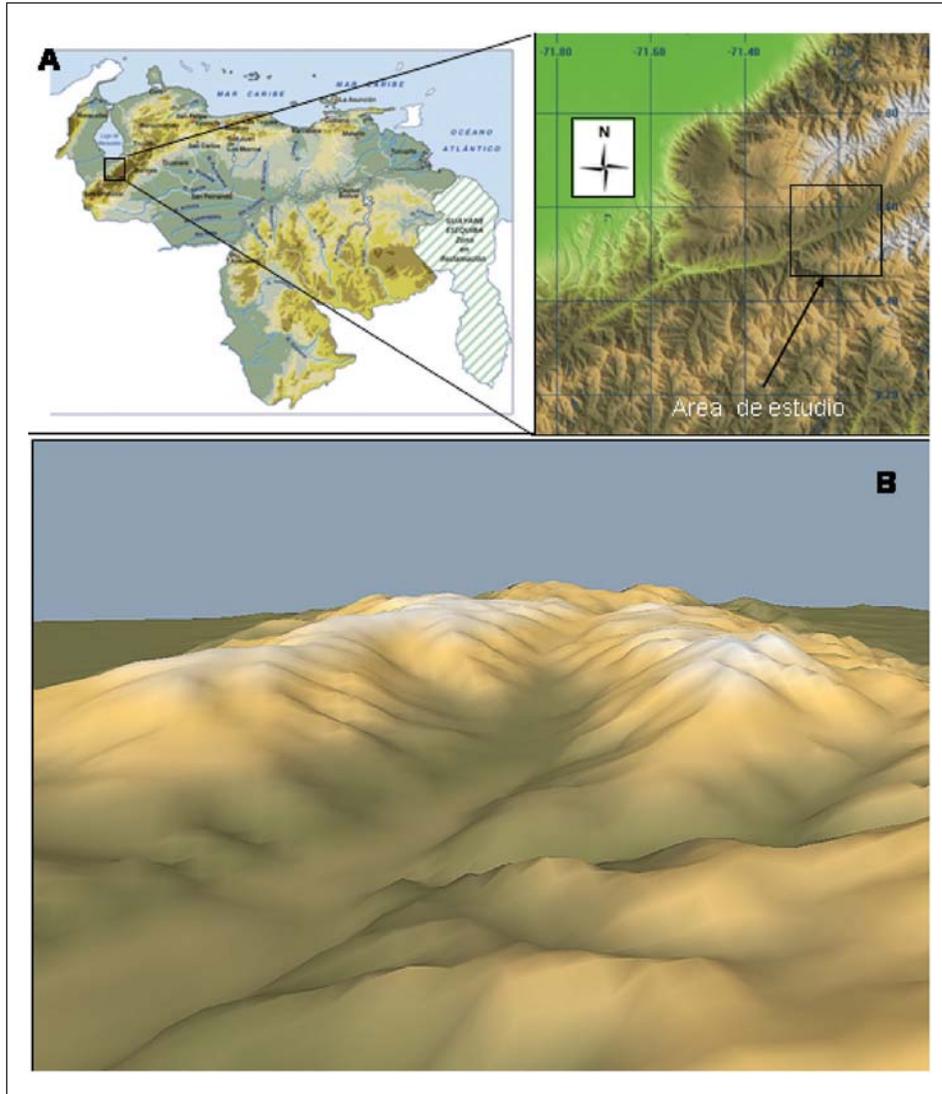
7. Referencias citadas

- BAMLER, R. 1999. The SRTM mission: A world-wide 30m resolution DEM from SAR Interferometry in 11 days. *Proc. 47th Photogrammetric Week*. 145-154. Stuttgart-Alemania.
- BOHAM-CARTER. 1996. **Geographic Information System for Geoscientific**. Pergamon (eds). 398 p.
- CHENG, P. and L. McBEAN. 2002. *Fly-through data generation of Afghanistan*. **Earth Observation Magazine**.
- DIKAU, R. 1992. *Aspects of constructing a digital geomorphological base map*. **Geological Journal**. (A122): 357-370.
- ELACHI, CH. 2004. *Space imaging radar in planetary exploration and earth observation*. **AIAA Journal**. Vol. 39, N° 4, 553 - 563.
- ENDRENY, T.; WOOD, E. and A. HSU. 2000. *Correction of errors in SPOT-derived DEM's using GTOPO30 data*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 38, N° 3, 1234 - 1241.

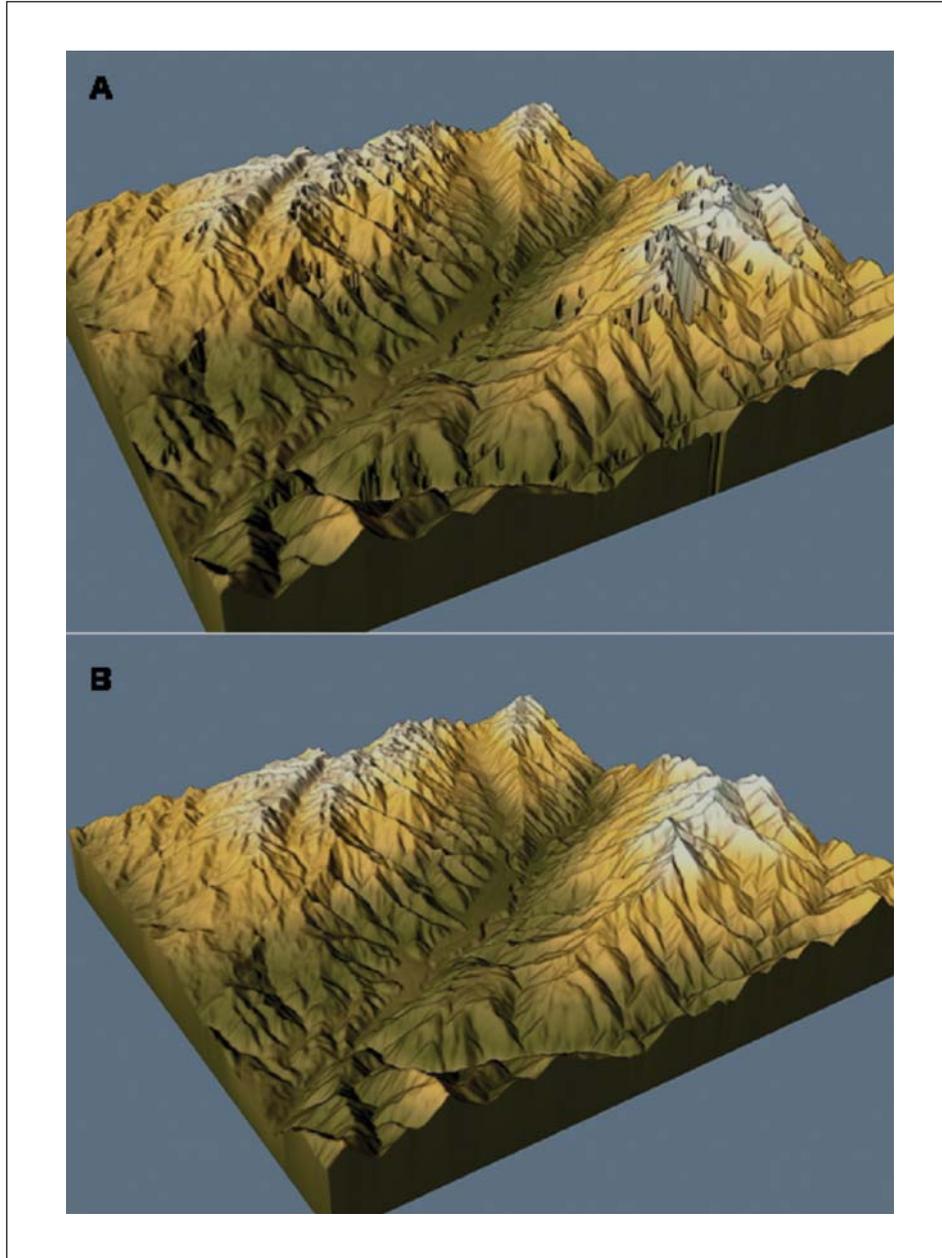
- GEUDTNER, D.; ZINK, M.; GIERULL, C. and S. SCHAFFER. 2002. *Interferometric alignment of the X-SAR antenna system on the spaceshuttle radar topography mission*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 40, N° 5, 995 – 1006.
- GLOBAL LAND COVER FACILITY (GLCF). University of Maryland. 2006. [On Line] <http://www.landcover.org> (última visita septiembre 27, 2006).
- HUTCHINSON, M. 2001. Advances in locally adaptive interpolation of digital elevation models. En: **Dems and Geomorphology**. Special publication of the Geography Information System Association (GISA). Tokyo-Japan.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ASSESSING OF OFFICERS. 2003. Standard on digital cadastral maps and parcel identifiers. [On Line] www.kam.to/library/glos.htm
- JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A. and M. MULLIGAN. 2004. *Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Working document. N° 198. Cali-Colombia.
- KAMP, U.; BOLCH, T. and J. OLSENHOLLER. 2003. DEM Generation from ASTER Satellite Data for Geomorphometric Analysis of Cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia. *Proceedings Annual Meeting Imaging and Geospatial Information Society (ASPRS)*. 9 p. Anchorage-USA (5-9 de mayo).
- KAMP, U.; BOLCH, T. and J. OLSENHOLLER. 2005. *Geomorphometry of Cerro Sillajhuay (Andes, Chile/Bolivia): Comparison of Digital Elevation Models (DEMs) from ASTER Remote Sensing Data and Contour Maps*. **Geocarto International**. Vol. 20, N° 1, 23 -33.
- KHALSA, S.; DYURGEROV, M.; KHROMOVA, T.; RAUP, B. and B. BARRY. 2004. *Space-based mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 42, N° 10, 2177-2183.
- KNAP, W.; BROCK, B.; OERLEMANS, J. and I. WILLIS. 1999. *Comparison of Landsat TM-derived and ground-based albedos of Haut Glacier d'Arolla, Switzerland*. **International Journal of Remote Sensing**, 20, 3293-3310.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A. and R. BAMLER. 2003. *The SRTM – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar*. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. N° 57, 241-262.
- RAUP, B. H.; KIEFFER, H. H.; HARE, T. M. and J. S. KARGE L. 2000. *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.
- RIGON, R. and A. COZZINI. 2001. Exploring the complexity of mountain landscape: A digital perspective. *Fifth International Conference of Geomorphology*. Vol 1, pp. 52- 53. Tokyo - Japan. (September, 22–29).
- TOUTIN, T. 2002. *Impact of terrain slope and aspect on radargrammetric DEM accuracy*. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, N° 57, 228-240.
- TOUTIN, T. 2004. *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*. Vol. 42, N° 10, 2121-2129.
- VAN WESTEN. 1994. GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia. En: Taylor and Francis, **Mountain Environments and GIS**. 135-165. Basingstoke, UK.
- ZEBKER, H.; WERNER, C.; ROSEN, P. and S. HENSLEY. 1994. *Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 32, N° 4, 823-836.
- US GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2006. Shuttle Radar Topography Mission. [On Line] <http://srtm.usgs.gov/> (última visita septiembre 23, 2006).

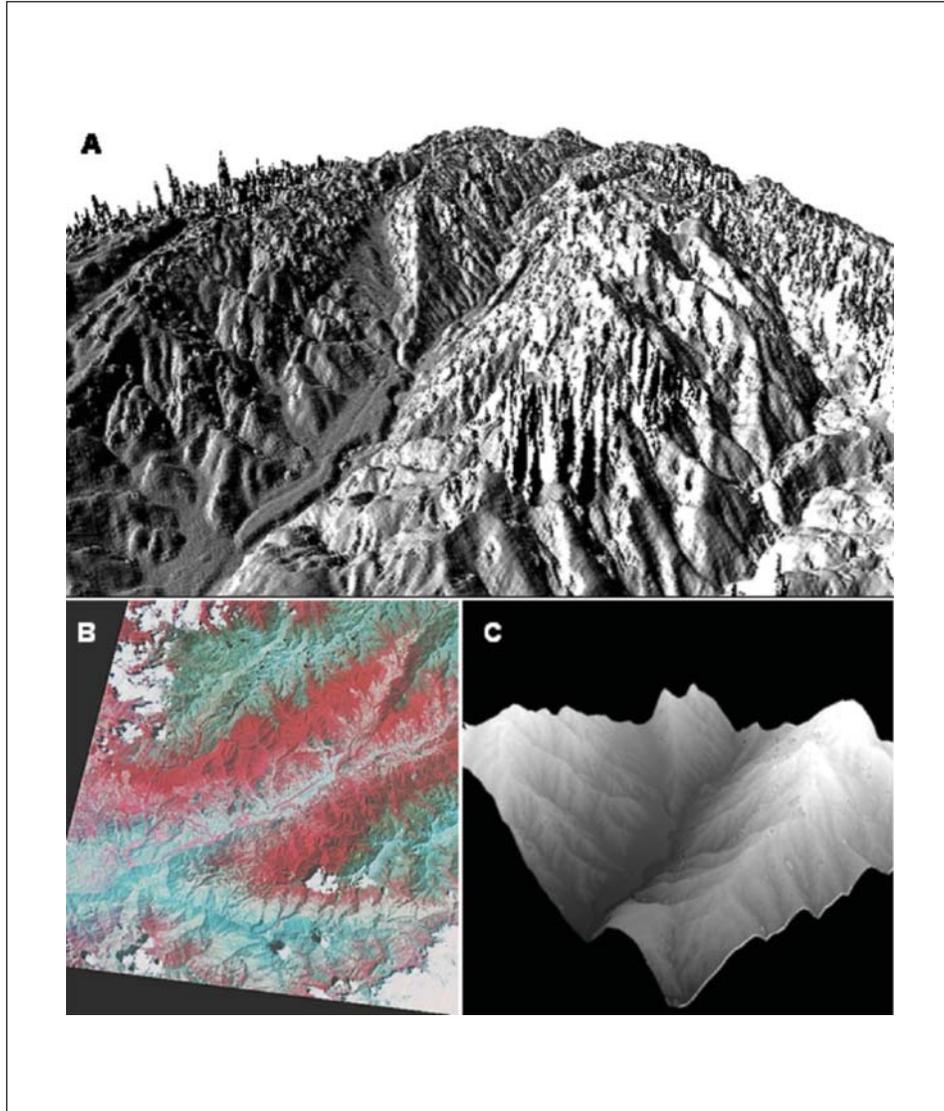
8. Anexos: Galería de imágenes



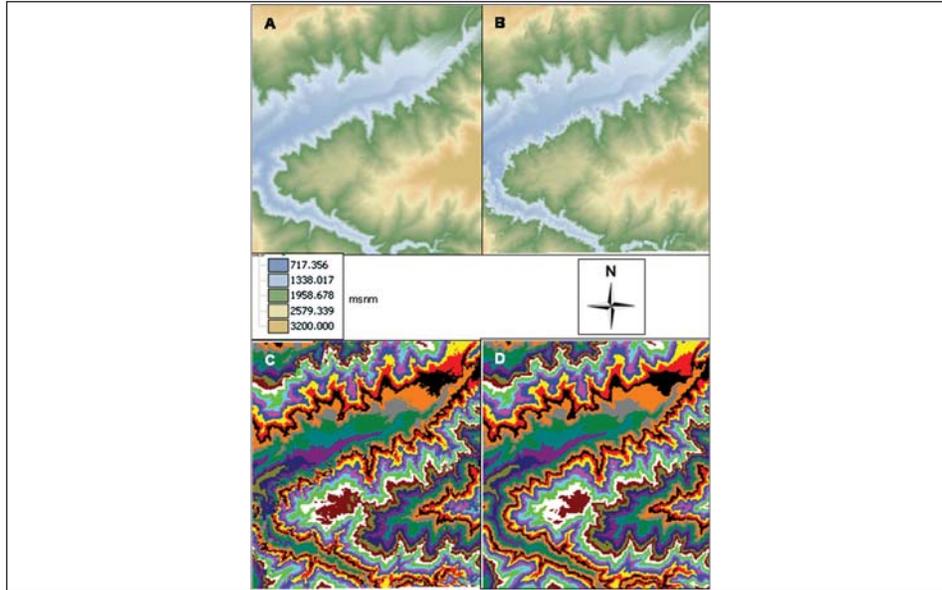
Anexo 1. Localización del área de estudio (A) y MED GTOPO30 (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>), para el área de estudio (B). GTOPO es un MED global con una resolución espacial de 30 arco de segundo (aproximadamente 1 Km), completado en 1996 y elaborado por distintas organizaciones entre las cuales EROS (Centro de Observación de Recursos y Ciencias de la Tierra), INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México), PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) y NASA



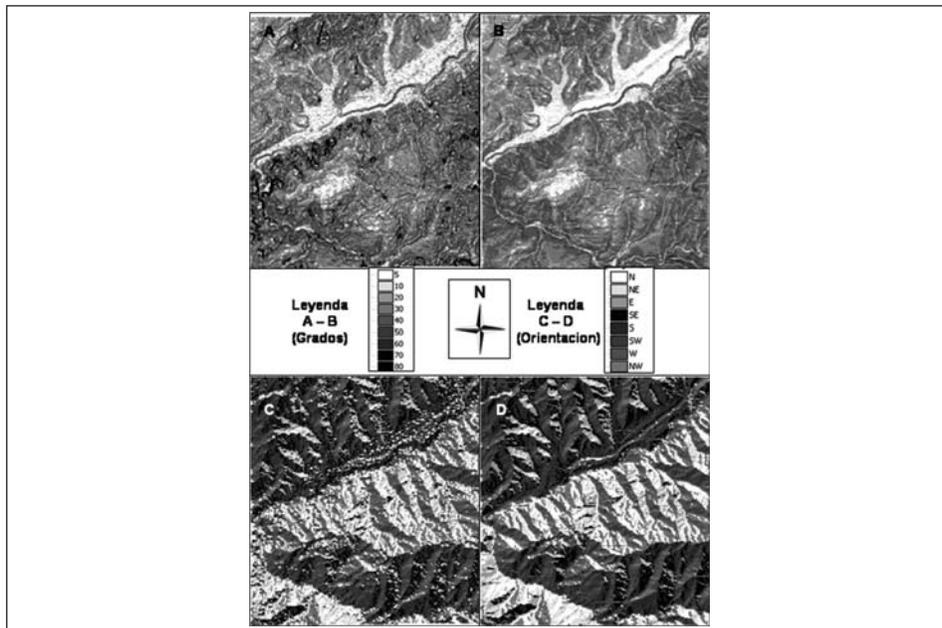
Anexo 2. MED para el área de estudio basado en datos del SRTM 90m, mostrando los 'vacíos' de información (A); y luego que éstos son completados mediante técnicas de interpolación (B). (Ejemplos generados con 3DEM)



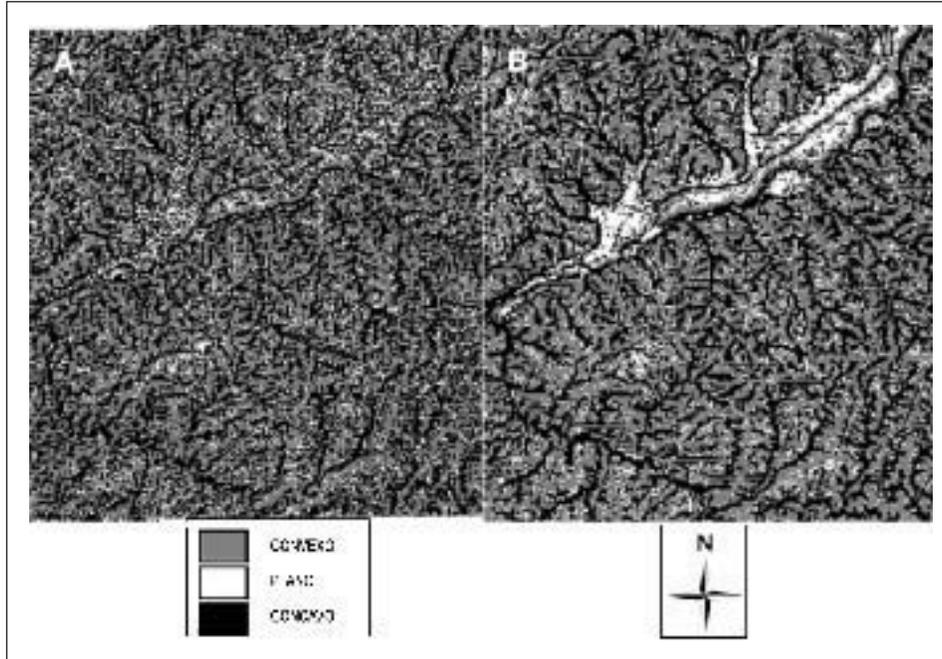
Anexo 3. Ejemplo de un MED del área de estudio obtenido a partir de imágenes ASTER. MED no corregido mostrando el efecto de las nubes en la generación de 'torres' (A). Parte de la imagen ASTER (composición falso color) usada para este MED (B). Parte del MED ASTER corregido mediante técnicas de filtrado y sustitución con datos del SRTM (C). La imagen ASTER aquí mostrada no corresponde a la realmente utilizada para el análisis comparativo presentado y su inclusión en este anexo se hace con fines netamente ilustrativos del problema de la nubosidad en los MED derivados de ASTER



Anexo 4. MED basado en ASTER (A) y SRTM (B). Capas de clases extraídas según rangos altitudinales ASTER (C) SRTM (D), (SIG utilizado ILWIS 3.3)



Anexo 5. Capas de clases según inclinación de las pendientes extraídas de ASTER (A) y SRTM (B). Capas de clases según orientación de las pendientes extraídas de ASTER (C) y SRTM (D), (SIG utilizado ILWIS 3.3)



Anexo 6. Capas de clases según forma de las pendientes extraídas de ASTER (A) y SRTM (B). (SIG utilizado ILWIS 3.3)