

MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE IKONOS PARA EL ANÁLISIS DE ÁREAS DE INUNDACIÓN EN SANTA MARTA, COLOMBIA*

José Eduardo Fuentes, Jiner Antonio Bolaños y Daniel Mauricio Rozo

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras —Invemar—, Laboratorio de Sistemas de Información. Santa Marta, Colombia. Apartado aéreo 1016. jose.fuentes@invemar.org.co, jiner.bolanos@invemar.org.co, daniel.rozo@invemar.org.co

RESUMEN

Ikonos es uno de los satélites ópticos de observación de la Tierra con mayor resolución espacial, cuyo sensor tiene la capacidad de capturar imágenes estereoscópicas de una misma área en un solo momento, por lo que permite la extracción de Modelos Digitales de Superficie (MDS). En el presente trabajo se describe el proceso de extracción de un MDS a partir de imágenes Ikonos en la zona costera de la ciudad de Santa Marta obtenidas del banco nacional de imágenes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. En el proceso de generación de la topografía se simuló los parámetros del sensor y órbita para obtener los valores de Coeficientes Polinomiales Racionales de la imagen y lograr la representación tridimensional del terreno con la aplicación del algoritmo propuesto por Thierry Toutin, del Instituto Canadiense de Percepción Remota. El MDS y los productos obtenidos son insumos importantes en el análisis del área de influencia por inundación ya que, aunque la precisión de los modelos no permite trazar directamente una línea de probable inundación a nivel submétrico, si es posible realizar de forma rápida y económica un análisis preliminar de zonas vulnerables, relevantes para el ordenamiento y planificación territorial.

PALABRAS CLAVES: MDS, MDT, Ikonos, ascenso del nivel del mar, inundación.

ABSTRACT

Digital surface model from Ikonos satellite image for floodplain analysis in Santa Marta, Colombia. Ikonos is one of the available high-resolution imagery earth observation satellites, with the ability to capture at once stereoscopic images of the same area allowing the extraction of Digital Surface Models (DSM). This paper describes the extraction process of a DSM Ikonos image of the Santa Marta city coastal area obtained images from a National Bank of the Geographic Institute Agustín Codazzi. In the topography generation process, from the sensor and orbit parameters of the image, the Rational Polynomial Coefficients values were simulated and the three-dimensional terrain model was achieved throughout the application of the algorithm proposed by Thierry Toutin from the Canadian Institute of Remote Sensing. The DSM and the obtained products were important inputs for the analysis of possible

* Contribución No. 1106 del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras —Invemar—.

flood areas. Even though the accuracy of the model cannot directly trace a sub-metric flood line, the described procedure can be seen as a low cost and rapid preliminary analysis of risk areas, relevant for management and planning.

KEYWORDS: DSM, DTM, Ikonos, sea-level rise, flood areas.

INTRODUCCIÓN

La generación de Modelos Digitales de Superficie (MDS) a partir de imágenes de satélite ópticas de alta resolución espacial y su uso para la generación de información topográfica se debe considerar como una alternativa metodológica práctica y asequible para la modelación del terreno. Una amplia gama de procedimientos de corrección de imágenes de alta resolución por satélite (Ikonos, QuickBird y EROS) proporcionan la elevación por el proceso de ortorectificación, utilizando un conjunto de puntos de control terrestre; por tanto la precisión resultante en la elaboración de mapas cumple los requisitos de cartografía a escala 1:10000 (Cavallini *et al.*, 2004). Existen en la actualidad una gran variedad de programas informáticos que permiten el tratamiento digital de imágenes en fotogrametría, basados en planteamientos algorítmicos, que pretenden dar solución al problema de la representación numérica del relieve. El MDS es una capa de información fundamental y de esta pueden extraerse un número muy elevado de nuevos parámetros. El formato *raster* es el más adecuado para ello, aunque debe prepararse para que los resultados derivados sean correctos, en especial para el análisis del terreno con miras al análisis de inundaciones (Li *et al.*, 2005).

Este documento discute el proceso realizado para estudiar la capacidad de las imágenes estereoscópicas del sensor dispositivo de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés) Ikonos para tomar datos de dos órbitas adyacentes y generar un MDS que reconstruya tridimensionalmente un espacio topográfico, a partir de imágenes de alta resolución espacial. El proceso permitió analizar zonas con baja pendiente y ajustar el área de influencia por inundación trazada en un estudio anterior (Invemar, 2010), correspondiente a un paulatino ascenso del nivel del mar de cerca de 60 cm (IPCC, 2007) en un período de 100 años, debido al cambio climático. Se espera que este fenómeno incremente los riesgos de inundación en zonas bajas. Las zonas costeras estarán expuestas a riesgos cada vez mayores, tales como la erosión costera y la elevación del nivel del mar, debidas al cambio climático. El efecto se verá exacerbado por las crecientes presiones de origen humano en los litorales (IPCC, 2007).

En cuanto al modelado 3D de imágenes Ikonos, diversas experiencias en el mundo han sido desarrolladas con base a coeficientes polinomiales racionales (CPR)

que incluyen las imágenes del tipo Geo Ortho Kit [ver: Lutes (2004), Dial y Grodeky *et al.* (2002), Fraser y Hanley *et al.* (2003)]. El coeficiente polinomial racional de un sensor satelital es simplemente un modelo matemático empírico sobre el espacio de la imagen (línea y posición de la columna) con base en la latitud, la longitud y la elevación de la superficie. El nombre de polinomio racional se deriva del hecho de que el modelo es expresado como el cociente de dos polinomios cúbicos. En realidad, una sola imagen consta de dos polinomios racionales, uno para la línea de cómputo de la posición y otro para la posición de la columna. El coeficiente de estos dos polinomios racionales es calculado por la compañía del satélite con base en la posición orbital del satélite y la orientación de un modelo físico riguroso del sensor (Randall, 2008). En este caso se utilizaron imágenes con corrección geométrica estándar. Existen diversos trabajos con imágenes de alta resolución, sin el uso de CPR para generación de MDS satelitales [ver: Toutin *et al.* (2001), Kim *et al.* (2002), Aguilar *et al.* (2007), Wang *et al.* (2008)]. No obstante existen pocos referentes de trabajos realizados en Colombia al respecto.

El estudio involucró el uso del programa informático fotogramétrico comercial PCI Geomática para la generación de un MDS y pares estereoscópicos. Se implementó el algoritmo de Toutin para la generación simulada de los parámetros CPR, así como la corrección, filtrado y generación de un Modelo Digital del Terreno (MDT). Se definió una escala de análisis 1:25000 acorde con la cartografía básica y temática disponible.

ÁREA DE ESTUDIO

El área se encuentra ubicada en la ciudad de Santa Marta ($11^{\circ}14'32.79''$ N y $74^{\circ}10'8.96''$ W) en el departamento del Magdalena sobre el Caribe colombiano (Figura 1). La ciudad incluye todo un sector turístico que corresponde a cerca del 50% del área urbana, con relieve plano entre 0 y 400 msnm. Una importante porción del territorio costero es ocupado por playas (5%), litoral rocoso (15%) y vegetación esclerófila (30%). En el área urbana de la ciudad de Santa Marta se presentan llanuras costeras como extensas superficies planas a ligeramente onduladas, limitadas hacia el continente por colinas o montañas y hacia el mar por salares o áreas bajas inundables, depósitos aluviales recientes y terrazas o playas activas. Su génesis está asociada a procesos fluviomarinos de sedimentación y erosión. Para el sector de la bahía de Santa Marta, la geomorfología está dada por áreas costeras de 2 a 30 km de ancho, alturas inferiores a 100 m, constituidas por sedimentos acumulados durante el Cuaternario, como resultado de procesos de transporte y acumulación por corrientes marinas, de sedimentos erodados de la misma línea de costa y los expulsados por los deltas al mar Caribe (Ingeominas, 2005).

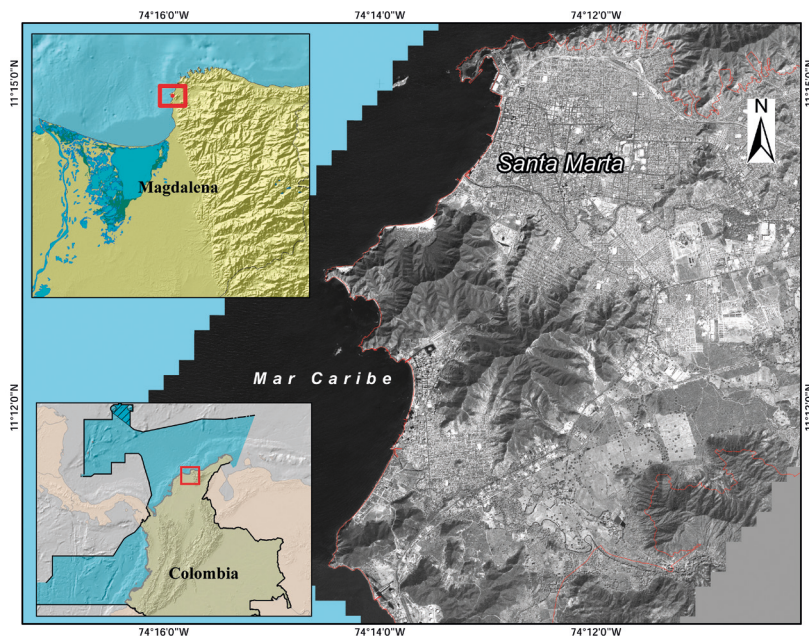


Figura 1. Localización general del área de trabajo. Ciudad de Santa Marta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron dos imágenes del sensor CCD Ikonos-2 con un nivel de procesamiento —corrección geométrica estándar— incluyendo las bandas pancromáticas (Tabla 1) tipo PAN/MSI (Figura 2), obtenidas con licencia múltiple, a través del Banco Nacional de Imágenes (BNI) del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). El BNI es un conjunto de políticas, organizaciones, estándares y tecnologías que trabajan conjuntamente para producir, compartir y usar información geográfica y satelital, con el fin de optimizar la inversión del estado para la adquisición y uso de imágenes provenientes de sensores remotos (IGAC, 2011).

Ikonos, un satélite de alta resolución operado por la empresa GeoEye, es el comienzo de una nueva serie de sensores capaces de adquirir información con precisión submétrica; cuenta con las bandas multispectrales de 4 m de tamaño de píxel y es capaz de adquirir información en las bandas del rojo, verde, azul e infrarrojo cercano. Además, tiene una banda pancromática (82 cm) en nadir y cuenta con la capacidad de obtener imágenes estereoscópicas en dos órbitas adyacentes. La estereoscopia del satélite es fundamental en las imágenes para poder obtener la elevación sobre el terreno. Las imágenes tienen el efecto estereoscópico debido a que se toman dos campos de vista distintos que pueden ser a lo largo o ancho de la trayectoria del satélite (*across* y *along-track*). Las imágenes se obtienen desde dos órbitas cercanas pero

ligeramente diferentes; una imagen se toma desde un ángulo entre 60 y 75° y la otra se toma en un ángulo oblicuo a la trayectoria del satélite entre 60 y 90°. Esto indica que el satélite tiene la capacidad de giro en relación a su órbita (Figura 3). Los sensores satelitales con esta capacidad pueden ser caracterizados como sistemas de imágenes estereoscópicas al poder originar datos desde los cuales se puede calcular coordenadas tridimensionales y obtener información de altura del terreno.

Tabla 1. Información de las dos imágenes estéreo pancromáticas.

Metadato	Imagen 1	Imagen 2
Imagen fuente ID	11609253	11609254
Producto imagen ID	000	001
Sensor	Ikonos-2	Ikonos-2
Escaneo cruzado	0.92 m	0.83 m
Escaneo a lo largo	1.06 m	0.83 m
Azimut de escaneo	180.01°	180.01°
Dirección de escaneo	Reversa	Reversa
Pancromático TDI Modo	13	13
Colección nominal azimuth	356.8763 grados	268.1454 grados
Colección nominal elevación	60.61212 grados	81.41981 grados
Ángulo azimuth del sol	145.6940 grados	145.9539 grados
Ángulo elevación del sol	51.72776 grados	51.84475 grados
Adquisición día/hora	2007-01-18 15:40 GMT	2007-01-18 15:41 GMT
Porcentaje de nubes	0	0

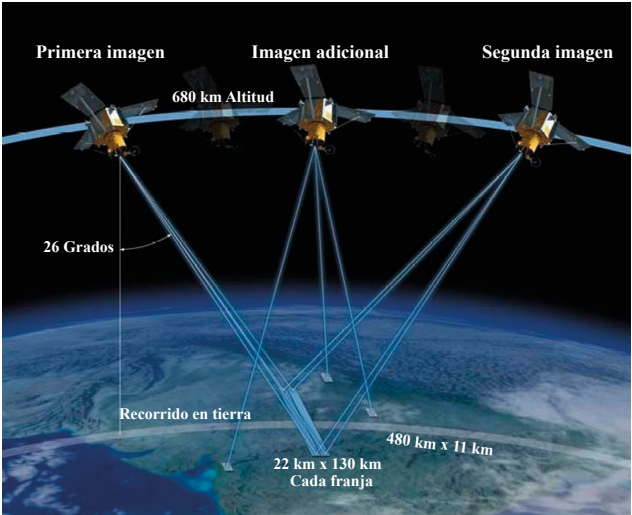


Figura 2. Ilustración de toma de datos estéreo Ikonos (modificado de GeoEye, 2008).

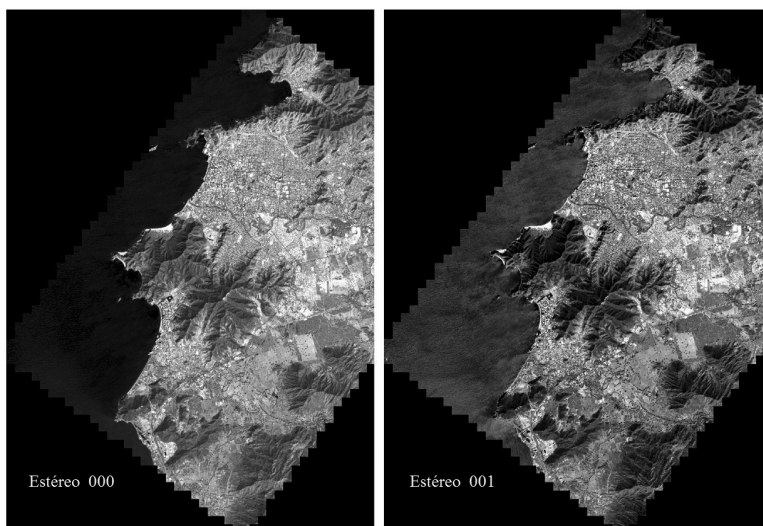


Figura 3. Imagen par estereoscópico Ikonos.

En fotogrametría las coordenadas utilizadas corresponden a cartesianas rectangulares. Así, las coordenadas (X_c , Y_c , Z_c) de los centros de perspectivas de la cámara a lo largo de un arco orbital no son valores independientes, pero sí son funciones de los seis elementos orbitales y del tiempo. Una lista de coordenadas y tiempo correspondientes es llamada una efeméride. Para hacer fotogrametría por satélite debe ser conocida la localización de la cámara en cada instante en la que se formó la imagen. Normalmente, es posible localizar la cámara con exactitud por resección a puntos de localización conocida en el suelo cuando se tienen los CPR de las imágenes (Pérez, 2001). Por esta razón se recurre a métodos matemáticos para tratar de aproximarse a esos valores cuando no se obtiene del proveedor de los datos satelitales.

Thierry Toutin es un científico del Centro Canadiense de Percepción Remota (CCRS) creador del modelo para calcular parámetros de sensor y satélite con la finalidad de corregir geométricamente imágenes para la obtención de modelos de elevación y ortofotos. Él desarrolló ecuaciones matemáticas que vinculan la ubicación de un punto dado en el terreno con uno igual en otra imagen satelital, con base en las ecuaciones de colinealidad, representando un modelo real de transformación entre la imagen espacial y el terreno. El modelo refleja una aproximación integral de las distorsiones geométricas generadas durante la creación de la imagen. Toutin creó un método matemático muy preciso que simula los parámetros CPR. Este inicialmente se desarrolló para procesar imágenes estereoscópicas del satélite francés SPOT. Pero luego fue adaptado a distintos sensores, como Landsat, Radarsat, Irs, Ikonos y Quikbird, obteniendo estos datos a partir de los seis parámetros básicos (Figura 4): ascensión recta Ω del nodo ascendente, distancia

angular ω del perigeo, inclinación orbital i , semieje mayor de la órbita, excentricidad de la órbita, tiempo T que pasó el satélite por el perigeo y de otros complementarios en los archivos de cabecera de las imágenes, de los metadatos y parámetros específicos del sensor y el satélite (Pérez, 2001).

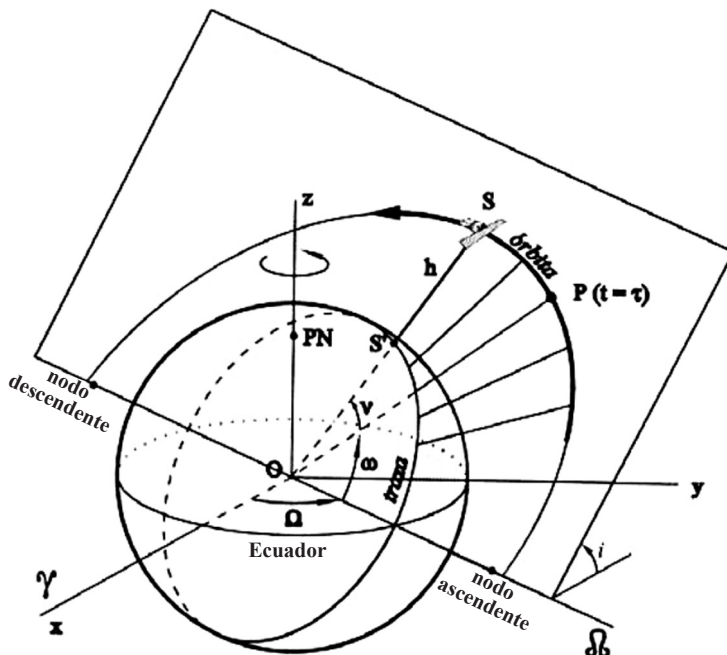


Figura 4. Parámetros orbitales de un satélite (tomado de Pinilla, 1995).

Como resultado de esta integración, las ecuaciones del modelo son simples, sencillas y con pocas incógnitas. Cada una de ellas, es la combinación de diversas variables correlacionadas de la visión geométrica, por lo tanto el número de incógnitas se reduce a un número independiente. Las ecuaciones se resuelven con pocas coordenadas de puntos de control de tierra (mínimo tres puntos) y con puntos de georreferenciación, si se está utilizando más de una imagen. La eficacia del modelo generado ha sido probada en un tercio de píxel para imágenes de satélites ópticas, siempre que las coordenadas de los puntos de control de tierra sean de buena calidad (Toutin y Carbonneau, 1989).

El método de Toutin ha sido implementado en el programa informático PCI Geomática, el cual suministra instrumentos para el desarrollo de modelos de elevación, ortorrectificación y generación de imágenes estereoscópicas de alta calidad y resolución espacial utilizando como entrada los datos del satélite, ya sea con los datos de cabecera de las imágenes originales o introduciendo los parámetros requeridos manualmente. De

esta manera, con las imágenes seleccionadas, se obtuvo la información de los datos del satélite: órbita, datos de control y altitud, desde el encabezado o metadato de la imagen.

Se introdujeron los puntos de control del terreno (GCP, por sus siglas en inglés) tomados de las cartas topográficas 1:2000 (hojas 2, 5, 30, 35, 43, 50, IGAC de Santa Marta) para las dos imágenes, los puntos de control idénticos (puntos que son ubicados en dos imágenes *raster* que tienen una superposición geográfica) y los puntos de verificación en cada imagen medida. Manipulando en conjunto la información de órbita y altitud con los datos de los puntos de control, se creó un modelo matemático asociado a la posición del satélite para estas dos imágenes estéreo, luego de esto se analizó el error de los puntos a partir de su error medio cuadrático (Tabla 2). Se tomaron 80 puntos de control, 70 puntos de enlace y 15 puntos de verificación (Figura 5).

Tabla 2. Valores de error resultantes en las imágenes 000 y 001.

PUNTO	RESIDUAL	X: EMC	Y: EMC
Control 000	6.28	1.95	5.97
Control 001	1.32	0.96	0.91
Idéntico	2.71	1.53	4.24
verificación	2.01	1.49	3.50

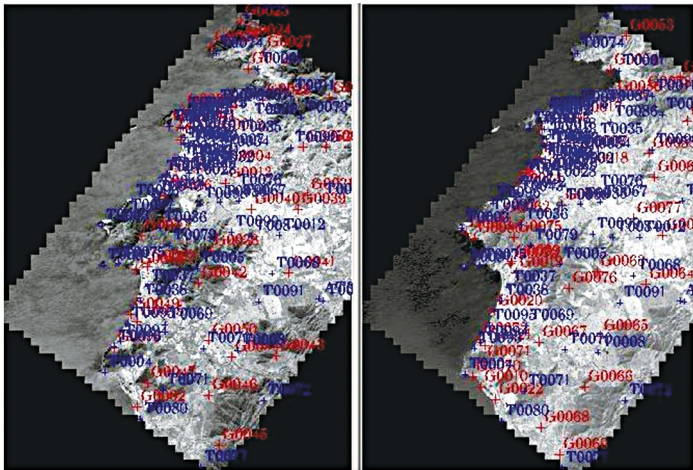
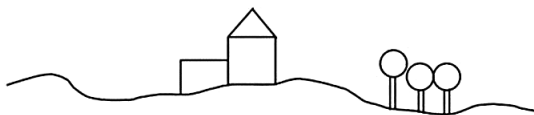


Figura 5. Puntos de control terrestre (rojo) y puntos idénticos (azul) sobre las imágenes estéreo.

Los MDS son la representación fiel de todas las variaciones de elevación de los objetos y superficies presentes en el momento de la toma de los datos; ya sea estos por instrumentos fotogramétricos, Lidar (Light Detection and Ranging) o radar.

Estos pueden tener una estructura de representación de datos regular o irregular. La diferencia principal de los MDT con los MDS es que los primeros representan solo los valores de elevación de los puntos más bajos de una superficie (terreno), a diferencia de los segundos que representan la elevación de la capa superficial de los objetos sobre el terreno. Los MDT pueden ser un producto originado de algún proceso del MDS. El término modelo de elevación digital (MDE) corresponde a un atributo de elevación en un modelo digital con una proyección específica y una estructura de representación de datos regular (Figura 6). Estos términos suelen prestarse para confusión, pues muchos utilizan MDT y MDE como sinónimos.

Qué tenemos: el mundo real.



Lo que representa un MDS: todas las elevaciones presentes en la superficie, terreno, infraestructura y vegetación.



Lo que representa un MDT: solo la elevación del punto más bajo de la superficie "terreno".



Figura 6. Diferencias entre un Modelo Digital de Superficie (MDS) y un Modelo Digital del Terreno (MDT) (modificado de Linder, 2006).

En este caso se optó por una técnica simple de limpieza de los datos. Con base en las curvas de nivel generadas por el MDS cada 2 m, se generaron isolíneas para el área, se calculó la longitud (extensión) de cada curva y luego se filtraron los datos por tamaños, definiendo 1500 m como distancia mínima de entrada. Debido a la falta de información cartográfica detallada en términos de altura (información submétrica) se optó por realizar la línea máxima de inundación mediante criterios geomorfológicos por acumulación de

la escorrentía superficial, tomando como máxima inundación 0.59 m de aumento del nivel del mar al año 2100, según lo expuesto por IPCC (2007). Sin embargo, para efectos de este estudio, se trabajó bajo un escenario pesimista al año 2040, el cual asume que podría darse un evento de máxima inundación por ANM (Invemar, 2010), junto con la presencia de eventos extremos por lluvias, mares de leva y ondas de tormenta. Por último se sobrepusieron el MDS y el MDT sobre una imagen Ikonos, como aparece en la Figura 7, para poder realizar los análisis en cuanto a áreas potencialmente inundables debido a su baja pendiente y cercanía a la línea costera. El modelo se utiliza como una primera aproximación debido a que la precisión y resolución de este no permite delimitar exactamente una línea de inundación por debajo de un metro para analizar directamente los efectos por ANM, pero sí detectar zonas costeras inundables.

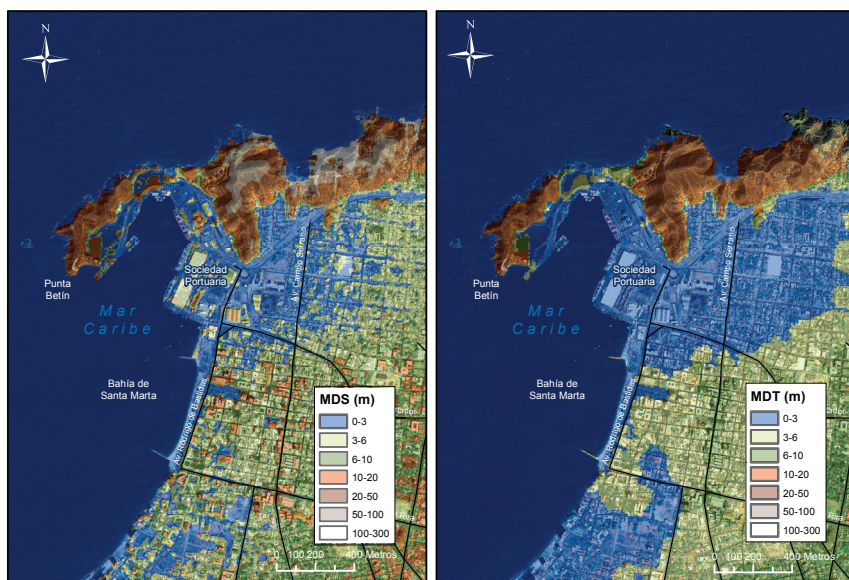


Figura 7. Áreas aledañas al mar con pendientes bajas: modelo digital de superficie (izquierda) y modelo digital de terreno (derecha).

El nivel medio del mar es el promedio de la altura de la superficie del mar en una estación de mareas para todas las etapas de la marea durante un período de 19 años; las alturas se toman, generalmente, a cada hora y se miden a partir de un nivel de referencia previamente determinado (OHI, 1996). En Colombia el nivel de referencia del *datum* vertical corresponde con el nivel medio del mar registrado en el mareógrafo de Buenaventura, durante diferentes períodos de tiempo, en este se basan las alturas referidas en la cartografía oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

RESULTADOS

La creación del MDS se inicia con el cálculo de la imagen epipolar (par estereoscópico) para una de las imágenes. Esto certifica que las dos imágenes están compensadas en la dirección X del paralaje, siendo un paso fundamental de la extracción del terreno. Un píxel en la imagen original es localizado con epipolaridad, utilizando funciones estadísticas calculadas para el área de traslape entre imágenes (paralaje). Se puede utilizar el promedio, el último valor o la correlación más alta de los valores de paralaje en el píxel y usarlo para calcular la elevación en dicho punto. Una ventaja de utilizar la proyección epipolar es que las imágenes solo se compensan en la dirección del eje X, proporcionando una gran eficacia en el modelo. En un paso subsecuente se realizó la generación del MDS (Figura 8) y se editaron las áreas donde los datos no se generaron, o se calcularon de una manera errada. Por otro lado, también se utilizó la herramienta de mejora que incluyó los procesos de interpolación, filtrado y suavizado, además de las funciones de enmascaramiento que remplazaron los valores filtrados.

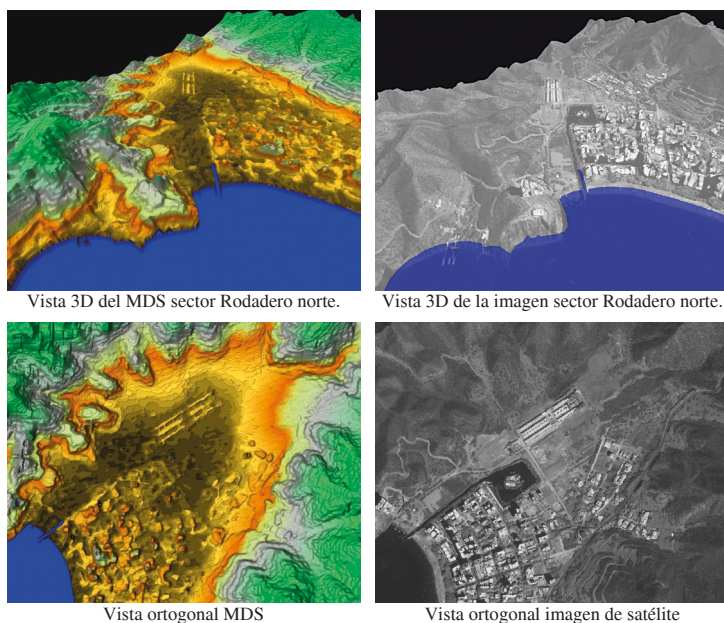
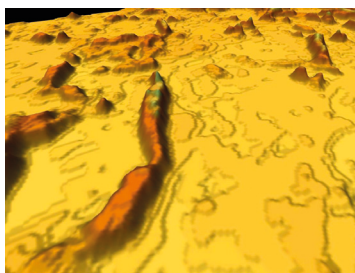


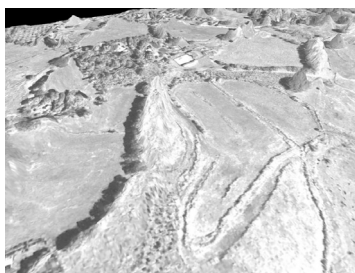
Figura 8. Modelo Digital de Superficie —MDS— resultante de Santa Marta, en una ventana para El Rodadero.

En fotogrametría los procesos resultantes de cálculos de paralaje entre dos imágenes generan las superficies de todos los objetos presentes al momento de la toma de los datos. La reconstrucción de la superficie 3D correspondiente a la vista de la primera faceta de la tierra contiene tanto micro relieve (edificios y árboles, entre

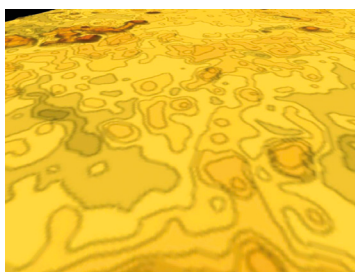
otros) como terreno sin cobertura. Para obtener el verdadero nivel del terreno se pueden emplear diversas técnicas (aplicación de filtros, limpieza estadística de datos atípicos, interpolaciones *kriging*, entre otras). Este proceso logró eliminar las áreas muy pequeñas que incluían edificios, casas y pequeños cambios de elevación de los objetos presentes en los datos (Figura 9).



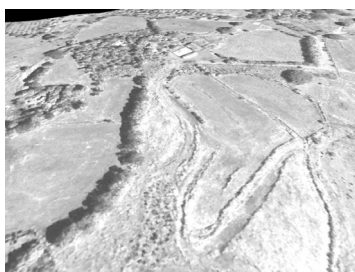
Vista 3D del MDS sector urbano-rural



Vista 3D de la imagen con MDS sector urbano-rural



Vista 3D del MDT



Vista 3D de la imagen con MDT

Figura 9. Comparación de Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital del Terreno (MDT) resultantes para la ciudad Santa Marta, sector urbano-rural

Puede apreciarse un área bastante baja en el norte conectada directamente con la línea costera (Figura 7), la cual podría ser afectada por una eventual inundación. Esta área corresponde a barrios tradicionalmente inundables por lluvias y en los cuales la topografía presenta áreas con tendencias más bajas que el promedio de la zona cercana a la bahía de Santa Marta, además está influenciada directamente por el aporte de la escorrentía de las zonas montañosas circundantes y la falta de alcantarillado pluvial que ayudaría a eliminar el exceso de agua.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De la inspección visual y estadística del EMC (error medio cuadrático) de las imágenes aplicando el algoritmo de Toutin, se verificó su eficiencia al reproducir no sólo las características generales del relieve, sino también características en detalle al simular

los parámetros CPR. Particularmente en el análisis con imágenes Ikonos, el resultado fue de adecuada precisión al mantener una coherencia de las superficies en la gran parte del área, con excepción de algunos puntos donde el algoritmo no logró calcular el paralaje. En algunos puntos altos y áreas muy variables de la costa, no se pudo obtener elevación principalmente por la dinámica de las olas debido al cambio repentino de la superficie.

La precisión del MDS depende en gran medida del área de traslape en las escenas, del desplazamiento temporal de estas y de la calidad de los puntos de control. Generalmente, la evaluación de la calidad de los MDS y MDT se hace a través de la medición del EMC entre la elevación considerada por el modelo y mediciones precisas de puntos conocidos. Para este caso, el análisis arrojó una precisión admisible con un error de 3.89 m en promedio para el área de sobreposición, comparado con los puntos de terreno en las cartas topográficas. Teniendo en cuenta que el análisis del área de inundación fue a una escala 1:25000, el MDT resultante del proceso de limpieza del MDS logró generar una superficie ajustada a la realidad con un ámbito de precisión dentro de los 3.33 m de error. Comparando estadísticamente los datos altimétricos provenientes de cartas topográficas 1:2000, se obtuvo un buen nivel de confianza en la elevación resultante porque el error medio cuadrático se encuentra dentro del nivel esperado para la escala 1:25000 (Tabla 3) que sería alrededor de 8.035 m con un nivel de confianza de 13.906 m (ASPRS, 2004). El detalle alcanzado fue consecuencia de la calidad de los puntos de control y de las excelentes condiciones meteorológicas en el momento de la toma, los resultados coincidieron con experiencias previas en trabajos anteriores donde se obtuvieron valores compatibles con escalas detalladas comprendidas dentro de los 1:10000 a 1:5000. Los valores del EMC fueron de 3.9 m (Zhang *et al.*, 2002) y 2.5 m (Mercer *et al.*, 2003) logrando obtener valores aceptables de precisión en los distintos sensores con capacidad estereoscópica que han utilizado este algoritmo.

Tabla 3. Precisión vertical National Standard for Spatial Data Accuracy (tomado de ASPRS, 2004).
(*) Escalas de la USGS cuadrángulos de 7.5 minutos 1:24000-1:25000.

Escala del Mapa	EMC (Z)	Precisión (Z) 95% Nivel de confianza
1 = 1200	67.0 cm	1.159 m
1 = 2400	1.339 m	2.318 m
1 = 4800	2.678 m	4.635 m
1 = 6000	3.348 m	5.794 m
1 = 12000	6.695 m	11.588 m
1 = 24000-1:25000*	8.035 m	13.906 m

Aunque la precisión vertical del modelo generado a partir de pares estereoscópicos oscila entre 1.49 m en el eje X y 3.5 m en el eje Y, aproximadamente, resultando no apta para modelar directamente diferencias submétricas, los resultados permitieron analizar en detalle y ajustar las áreas de riesgo por inundación trazadas, anteriormente, por otros métodos como el de pendiente (Allan *et al.*, 2003), regresión lineal e interpolación con *kriging* de datos GPS submétrico. Del análisis conjunto de estos modelos y del MDT puede resaltarse que existe una tendencia a puntos extremadamente bajos y de poca pendiente en el área norte de la bahía de Santa Marta, en donde comúnmente suelen presentarse inundaciones por lluvias demostrando la tendencia de estos lugares a la acumulación de escorrentía superficial directa.

Al evaluar la información en cuanto a la determinación del área de influencia por un posible ascenso del nivel del mar, se evidencia la necesidad de contar con información de elevación de muy buena resolución y precisión, para los cuales sensores como el Lidar podrían dar una precisión submétrica en análisis de escalas más detalladas (1:2000, 1:5000) para obtener modelos digitales de superficie. Desafortunadamente este tipo de sensores son de alto costo y de difícil acceso a proyectos de investigación con pocos recursos en cuanto a herramientas geoespaciales, razón principal por la cual se utilizaron los insumos disponibles en el BNI del IGAC.

Se debe garantizar un monitoreo continuo del área de estudio para controlar, con indicadores y resultados, las diferencias de cota/alturas en el área de riesgo. Los resultados obtenidos de este estudio fueron socializados con diferentes entes del orden local, departamental y nacional dentro del sistema de gestión departamental del riego en el Magdalena, buscando establecer convenios de cooperación interinstitucional que garanticen la continuidad de los proyectos de investigación en gestión del riesgo con herramientas geoespaciales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo hizo parte del convenio MAVDT-Invermar proyecto BPIN: Incorporación del conocimiento científico en el ordenamiento y planificación ambiental del territorio marino y costero colombiano. Agradecemos al equipo técnico del proyecto y a Carolina García Valencia por sus valiosas correcciones y sugerencias en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M., F. Aguilar y F. Carvajal. 2007. Comparison of two commercial solutions for generating DMS from QuickBird stereo imagery. *Proceedings of the 2007 Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society*, Univ. Almería, Almería, España. 6 p.
- Allan, J. C., P. D. Komar y G. R. Priest. 2003. Shoreline variability on the high-energy Oregon coast and its usefulness in erosion-hazard assessments. *J. Coast. Res., Spec. Is.*, 38: 83-105.
- ASPRS. 2004. Guidelines: Vertical accuracy reporting for Lidar Data, version 1.0, Maryland. 20 p. <http://www.asprs.org/society/committees/lidar/Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data.pdf>. 05/06/2011.
- Cavallini, R., F. Mancini y M. Zanni. 2004. Orthorectification of HR satellite images with space derived DSM. *Proceedings of the XXth Congress International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, 35, Part B: 1682-1700.
- Dial, G. y J. Grodecki. 2002. Block adjustment with rational polynomial camera models. *Proc. 2002 An. Conf. Remote Sensing and Photogrammetry Soc.*, Washington. 6 p.
- Fraser, C. y H. Hanley. 2003. Bias compensation in rational functions for Ikonos satellite imagery. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*, 69 (1): 53-58.
- GeoEye. 2008. Ikonos Product Guide V1.0, GeoEye, Thornton, EE. UU. 45 p.
- IGAC. 2011. Banco Nacional de Imágenes de Colombia. <<http://bni.igac.gov.co>>. 27/09/2011.
- Ingeominas. 2005. Evolución tectónica de la región Caribe de Colombia. Dirección de Servicio Geológico, Instituto Colombiano de Geología y Minería, Bogotá. 55 p.
- Invermar. 2010. Perfil de vulnerabilidad y propuesta de opciones de adaptación para Santa Marta en el marco de la evaluación de la vulnerabilidad por Ascenso en el Nivel del Mar (ANM) en la zona costera del departamento del Magdalena. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Santa Marta. 245 p.
- IPCC. 2007. Resumen para responsables de políticas. 30-50. En: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden y C. E. Hanson (Eds.). *Cambio climático 2007: Impactos y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge. 152 p.
- Kim, T., Y. Im, H. Kim e I. Kweon. 2002. DEM generation from an Ikonos Stereo Pair using EpiMatch and Graph Cut algorithms. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing 18th Fall Symposium of KSRS*: 524-529.
- Li, Z., Q. Zhu y C. Gold. 2005. Digital terrain modeling, principles and methodology. CRC, Boca Ratón, EE. UU. 324 p.
- Linder, W. 2006. Digital photogrammetric a practical course. Springer-verlag, Berlín Heidelberg. 219 p.
- Lutes, J. 2004. Accuracy analysis of rational polynomial coefficients for Ikonos imagery. *Proceedings of the 2004 Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, Denver, EE. UU. 8 p.
- Mercer, J., J. Allen, N. Glass, J. Rasmussen y M. Wollersheim. 2003. Orthorectification of satellite images using external dems from ifsar. *Proceedings Joint ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003*, Hanover, Alemania. 6 p.

- OHI, 1996. Diccionario hidrográfico, versión española de la quinta edición. Organización Hidrográfica Internacional, Montecarlo, Mónaco. 405 p.
- Pérez, J. 2001. Apuntes de fotogrametría II. Univ. Extremadura, Mérida. 221 p.
- Pinilla, C. 1995. Elementos de teledetección. Ra-Ma Editorial, Madrid. 313 p.
- Randall, B. 2008. Orthorectification using rational polynomials. Microimages, Nebraska. 16 p.
- Toutin, Th. e Y. Carboneau. 1989. La multi-stereoscopie pour les corrections des images SPOT HRV. Canadian Journal or Remote Sensing, 15 (2): 110-119.
- Toutin, Th., R. Chénier e Y. Carboneau. 2001. 3D geometric modelling of Ikonos GEO images. Proceedings Joint ISPRS Workshop. High Resolution Mapping from Space 2001. Hannover, Alemania. 9 p.
- Wang, Y., X. Yang, F. Xu, A. Leason y S. Megenta. 2008. An operational system for sensor modeling and DEM generation of satellite push broom sensor images. XXI Congress the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), ERDAS Inc, Beijing. 6 p.
- Zhang, L., M. Pateraki y E. Baltsavias. 2002. Matching of Ikonos stereo and multitemporal GEO images for DSM generation. Proceedings Joint Conference Map Asia Bangkok 2002, Institute of Geodesy and Photogrammetry. Zurich. 6 p.

FECHA DE RECEPCIÓN: 22/06/2011

FECHA DE ACEPTACIÓN: 07/05/2012