

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

TESIS DE LICENCIATURA

**Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED)  
en el área de la Línea de Transmisión Arenal-Barranca**

**ROSARIO CASCANTE ALVARADO**

**CARTAGO, COSTA RICA  
2010**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**TESIS DE LICENCIATURA**

**Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED)  
en el área de la Línea de Transmisión Arenal-Barranca**

**ROSARIO CASCANTE ALVARADO**

**CARTAGO, COSTA RICA**

**2010**

# **Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED) en el área de la Línea de Transmisión Arenal-Barranca**

**ROSARIO CASCANTE ALVARADO\***

## **RESUMEN**

En este trabajo se evalúan las diferencias que existen entre los datos de elevación tomados en campo con un aparato GPS Garmin 60CSx y los obtenidos de tres distintos Modelos de Elevación Digital (MED) disponibles en internet como lo son MED-NASA, Google Earth, y ASTER-GDEM. Además se evalúa la influencia de la cobertura del suelo en las elevaciones tomadas con GPS 60CSx y las tomadas de los MED. Se obtuvo que existen diferencias en las elevaciones tomadas con GPS 60CSx y las tomadas de cada modelo y se encontró que no existen diferencias debidas al efecto de la cobertura (forestal y no forestal). Los modelos con menos error y variabilidad fueron respectivamente Google Earth, ASTER-GDEM y MED-NASA.

**Palabras claves:** Modelos de Elevación Digital, MED, ASTER-GDEM, Google Earth, Cobertura Forestal.

\* Cascante Alvarado, R. 2010. Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED) en el área de la Línea de Transmisión Arenal-Barranca. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 38p.

## **Evaluation of three Digital Elevation Models (DEM) in the area of the transmission line Arenal-Barranca**

### **ABSTRACT**

This work evaluates the differences between elevation data taken in the field with a GPS 60CSx device and taken from three different digital elevation models available in internet. It also assesses the impact of land cover at elevations taken with GPS 60CSx and taken from the MEDs. The result was that there are differences in elevation taken with GPS 60CSx and taken from each model, also found that there are not differences between the type of forest cover and the non-forest. The MED models with less error and variation are respectively, MED-Google Earth, MED ASTER-GDEM and MED-NASA.

**Keywords:** Digital Elevation Models, DEM, ASTER-GDEM, Google Earth, Forest cover.

## **ACREDITACIÓN**

---

---

Esta tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

### **Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED) en el área de la Línea de Transmisión Arenal-Barranca**

**Miembros del Tribunal Evaluador**

---

**Edgar Ortiz Malavasi, Ph.D.  
Director de Tesis**

---

**Alejandro Meza Montoya, M.Sc.  
Coordinador de trabajo final de graduación**

---

**Marvin Castillo Ugalde, Lic.  
Escuela de Ingeniería Forestal**

---

**Rosario Cascante Alvarado  
Estudiante**

## **DEDICATORIA**

---

---

*A mi familia por su esfuerzo  
y apoyo, por creer en mí  
y estar siempre  
a mi lado*

## **AGRADECIMIENTOS**

---

---

A Edgar Ortiz por su paciencia, guía y apoyo en este proyecto.

Al personal docente de la Escuela de Ingeniería Forestal por brindarme su apoyo y amistad a lo largo de la carrera

A Gamaliel Salas y el personal del ICE en Tilarán Guanacaste y Barranca Puntarenas por todo el apoyo brindado

A todos mis compañeros(as) y amigos(as) con quienes compartí tantos buenos e inolvidables momentos.

A Marcela Arguedas gracias por su amistad y valiosos consejos.

A Alejandro Meza por la ayuda incondicional como coordinador de tesis.

A Ana Julieta Calvo por la ayuda en la revisión de este documento.

Al personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Forestal por su entera disposición y atención.

# ÍNDICE GENERAL

---

---

<b>RESUMEN</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>ACREDITACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
Objetivo General .....	2
Objetivos Específicos .....	2
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
Sistemas de información Geográfica (SIG) .....	3
Sensores Remotos .....	3
Modelos de Elevación Digital (MED) .....	4
<b>MATERIALES Y METODOS</b> .....	<b>6</b>
Descripción de la línea transmisión Arenal-Barranca .....	6
Modelos de Elevación Digital Empleados .....	7
MED-NASA.....	7
ASTER-GDEM (2009) .....	7
GOOGLE EARTH (MED).....	8
GPSmap 60CSx .....	8
Recolección de Datos .....	9
Análisis estadístico.....	10
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>12</b>
Cálculo del error medio cuadrático (RMSE) .....	12
Análisis de varianza .....	13

Análisis de variabilidad .....	15
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>20</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>21</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>24</b>

## **ÍNDICE DE CUADROS**

---

---

<b>Cuadro 1.</b> Cálculo de los RMSE para cada uno de los modelos de elevación digital. ....	12
<b>Cuadro 2.</b> Cálculo del error promedio para cada uno de los modelos según el tipo de cobertura. ....	12
<b>Cuadro 3.</b> Análisis de varianza del error de los modelos para un alpha de 0.01. ....	13
<b>Cuadro 4.</b> Coeficientes de variación del error para cada uno de los modelos según el tipo de cobertura. ....	18

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

---

---

<b>Figura 1.</b> Vista típica de una torre de la línea de transmisión eléctrica Arenal-Barranca (Salas, 2009). .....	6
<b>Figura 2.</b> Promedios del error entre las elevaciones del GPS 60CSx y los modelos de elevación.....	14
<b>Figura 3.</b> Promedios del error entre las elevaciones del GPS 60CSx y los modelos de elevación para cada tipo de cobertura.....	15
<b>Figura 4.</b> Distribución de las diferencias de cada MED respecto al GPS 60CSx para los tipos de cobertura Forestal y No Forestal.....	16
<b>Figura 5.</b> Distribución de las diferencias de cada MED respecto al GPS 60CSx para el tipo de cobertura Forestal.....	16
<b>Figura 6.</b> Distribución de las diferencias de cada MED respecto al GPS 60CSx para el tipo de cobertura No Forestal. ....	18

## ÍNDICE DE ANEXOS

---

---

<b>Anexo 1.</b> Modelo de elevación digital NASA. (Fuente: Atlas digital de Costa Rica 2008).....	24
<b>Anexo 2.</b> Área de estudio en el Modelo ASTER-GDEM.....	25
<b>Anexo 3.</b> Área de estudio en Google Earth.....	26

## **INTRODUCCIÓN**

---

En Costa Rica en los últimos años se ha implementado el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta para obtener información en campos muy variados, uno de esos es el forestal, donde por medio de los SIG se puede estudiar cuencas hidrográficas, erosión, usos de suelo, cambios en cobertura forestal entre otros.

Una fuente de datos para los SIG son los Modelos de Elevación Digital (MED) los cuales son una representación de la superficie terrestre, y como tal proveen la base para la extracción digital de parámetros topográficos. Estos modelos son una importante fuente de datos para diversas aplicaciones en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (GIS) (Presutti, 2002). Las características hidrológicas, como pendiente, orientación o curvatura pueden ser derivadas a partir de éstos modelos. Si bien un DEM es el origen de todas las modelaciones total o parcialmente dependientes de la topografía, la utilidad y validez de los resultados derivados están estrechamente relacionadas con la calidad del modelo original (Presutti, 2009).

En este trabajo se probó si existen diferencias significativas en tres modelos de elevación digital, MED-NASA, ASTER-GDEM y Google Earth, con puntos de elevación tomados en el campo con un GPS 60CSx. Además se determinó si existen diferencias en las elevaciones por el efecto de la cobertura (forestal y no forestal) en cada uno de los modelos.

## **OBJETIVOS**

---

### **Objetivo General**

Evaluar la exactitud y precisión de los modelos de elevación digital MED-NASA, Google Earth y ASTER-GDEM en el trayecto de la línea de Transmisión Arenal-Barranca.

### **Objetivos Específicos**

Determinar si existen diferencias en las altitudes de los modelos elevación digital MED-NASA, Google Earth, ASTER-GDEM y las altitudes tomadas en el campo con un GPS 60CSx considerando el tipo de cobertura del sitio (forestal y no Forestal).

Determinar la exactitud de las altitudes reportadas por los modelos de elevación digital MED-NASA, Google Earth, ASTER-GDEM y las altitudes medidas en el campo con un GPS 60CSx con altímetro digital.

Determinar la precisión de los modelos de elevación digital MED-NASA, Google Earth, ASTER-GDEM.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

---

### **Sistemas de información Geográfica (SIG)**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una herramienta fundamental para el análisis de cambios en los distintos usos de suelo, así como en la conservación de los bosques y el estudio de las variaciones en suelos, cuencas hidrográficas, áreas urbanas entre otros. Un SIG es el conjunto de procedimientos, equipos, y programas de computación utilizados para la recolección, pre-procesamiento, almacenamiento y análisis de datos geográficamente referenciados (Ortiz y Cordero, 2006).

El uso de los SIG permite el almacenamiento de datos y características geográficas en una superficie, estos datos tienen una posición geográfica, la cual se da por medio de un sistema coordinado definido, que permite su localización en la superficie terrestre.

Los SIG actuales están compuestos de equipos, programas de cómputo y procedimientos para trabajar con mapas digitales. Lo esencial de un SIG es que posea equipos y los programas de software que permitan realizar las funciones de captura de datos, de visualización de capas de información, de manipulación y combinación de estas capas, y las de impresión de productos finales de alta calidad (Ortiz y Cordero, 2006).

### **Sensores Remotos**

Los sensores remotos o de teledetección son herramientas importantes en el suministro de información para los SIG; estos se definen como la ciencia y arte de obtener información (tamaño, localización, forma, condición) acerca de un objeto o área a través de datos adquiridos por un aparato que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Ortiz, 2007).

Se le llama sensores remotos a diferentes tipos cámaras y satélites que son capaces de reproducir la superficie terrestre y así generar las fotografías aéreas, estas a la vez son el insumo más utilizado en los SIG. Se pueden distinguir dos tipos de sistemas de sensores:

- Sistemas pasivos: aquellos que registran la energía natural de los objetos
- Sistemas activos: aquellos sistemas que poseen su propia fuente de energía la cual es lanzada sobre el objeto y luego el sensor registra la energía reflejada (ejemplo: radar) (Ortiz, 2007).

Un producto de los sensores remotos y muy utilizado en los SIG son los Modelos de Elevación Digital (MED), los cuales son generados por sistemas satelitales como ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) y SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Los sensores remotos obtienen información de un objeto en la superficie terrestre por medio de la medición de las ondas electromagnéticas que este emite o refleja. Las técnicas de sensores remotos usan detectores de energía para registrar variaciones en la forma que los objetos sobre la superficie de la tierra reflejan o emiten ondas electromagnéticas (Ortiz, 2007).

### **Modelos de Elevación Digital (MED)**

Un Modelo de Elevación Digital (MED) es una representación digital de la altitud como variable continua sobre una superficie bidimensional. 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 (Roa y Kamp, 2007).

Los MED se pueden generar a partir de mapas topográficos, fotografías aéreas, datos de radar como los suministrados por el Shuttle Radar Topography Mision (SRTM), sistemas láser como los del sistema Light Detection and Ranging (LIDAR), o de imágenes satelitales estereoscópicas. Estas últimas se representan

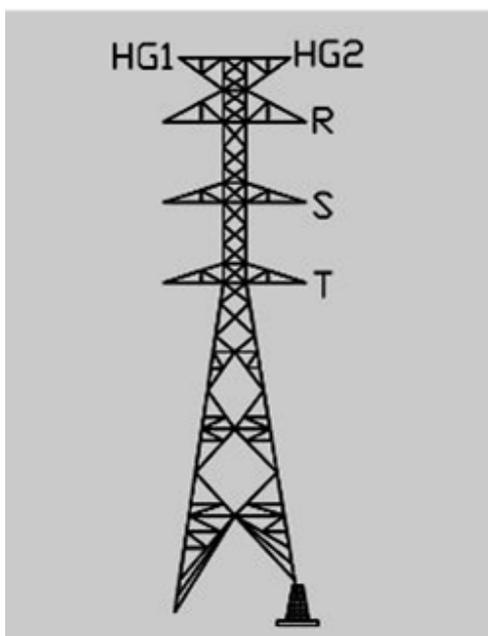
por sistemas electro-ópticos procedentes del *Système Probatoire d'Oberservation de la Terre* (SPOT) o del *Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer* (ASTER), los cuales usan imágenes satelitales en lugar de fotografías aéreas, cubriendo áreas mucho más extensas en una simple toma y generando, de esta forma, un MED más consistente dado que sus datos se generan bajo un mismo momento e igual calibración del sensor (Roa y Kamp, 2007).

Los MED tiene distintos usos en el análisis de la topografía como 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 citado por Roa y Kamp, 2007), los que a su vez son importantes parámetros para el modelado de amenazas naturales tales como deslizamientos (Roa y Kamp, 2007).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción de la línea transmisión Arenal-Barranca

La línea de transmisión Arenal-Barranca fue establecida en 1982, cuenta con 63.4 km de longitud y está compuesta por dos circuitos el HG2 que es el de Arenal-Barranca que precisamente llega hasta Barranca Puntarenas y el circuito HG1, que se llama Arenal-La Caja, que llega hasta San José (figura 1). La línea esta compuesta por 139 torres que transportan 230 kV, tiene hilo guarda de 3/8 de acero, con 343 MVA de potencia, un calibre de 795 MCM, y conductores tipo condor.



HG1: Circuito Arenal-La Caja

HG2: Circuito Arenal-Barranca

R, S, T: Cables que componen cada circuito

**Figura 1.** Vista típica de una torre de la línea de transmisión eléctrica Arenal-Barranca (Salas, 2009).

La línea de transmisión Arenal-Barranca se extienden desde el Cantón de Tilarán y pasa por los cantones de Cañas, Abangares, Puntarenas y Montes de Oro. En su

recorrido pasa por diversos tipos de cobertura forestal y no forestal que van desde potreros hasta pequeños parches de bosques naturales, secundarios, y zonas urbanas, esto fue de gran utilidad en el estudio ya que permitió tomar puntos de elevaciones en lugares con distintos tipos de cobertura en el recorrido de la línea de transmisión Arenal-Barranca.

## **Modelos de Elevación Digital Empleados**

### **MED-NASA**

Este modelo se encuentra en el Atlas Digital de Costa Rica 2008 (Anexo 1), además es de distribución gratuita en la Internet. Este modelo fue desarrollado por el Proyecto NASA/MRSID de la NASA.

En febrero del 2000 la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geo-Espacial (NGA), y las Agencias Espaciales de Alemania y de Italia lanzaron la Misión *Shuttle Radar Topography misión*. Esta misión produjo un modelo de elevación digital (MED) de alta resolución de la superficie terrestre (Farr, citado por Cushing, 2008). Este MED fue producido a una resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m en el Ecuador) para casi todo el globo terráqueo, entre las latitudes 60 grados norte y 56 grados sur (Farr, citado por Cushing 2008) con un error de altitud vertical medio de 6,2 m (nivel de confianza de 90%) y un error de geoubicación de 9 m para Suramérica (Rodríguez, citado por Cushing 2008).

### **ASTER-GDEM (2009)**

El modelo de elevación digital global (GDEM), fue desarrollado conjuntamente con el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) de Estados Unidos. El ASTER GDEM es un aporte del METI, la NASA y Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) y está disponible sin costo alguno para los usuarios vía descarga electrónica en la página de Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) y Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) (ERSDAC, 2009).

El instrumento ASTER se construyó y fue puesto en marcha por el METI a bordo de la nave de la NASA Terra en diciembre de 1999. Tiene capacidad a lo largo de la vía estereoscópica utilizando su banda espectral del infrarrojo cercano y sus telescopios de visión nadir y visión para atravesar, para adquirir datos estereoscópicos de imagen con una relación base-altura de 0,6. La resolución espacial es de 15 metros (m) en el plano horizontal. Un ASTER nadir de aspecto visible e infrarrojo cercano (VAIC) en una escena o imagen consiste en 4.100 muestras de 4.200 líneas, que corresponden a unos 60 kilómetros de área (ERSDAC, 2009).

### **GOOGLE EARTH (MED)**

Este programa permite 'viajar' por todo el mundo sobre un mosaico de imágenes satelitales recientes (3 años o menos) y variar el acercamiento al terreno desde una vista de todo el planeta hasta una resolución máxima de 15 m (imágenes EarthSat) a 1 m (Sanborn, Teleatlas, DigitalGlobe) en algunos sitios. Muestra la altitud de cada píxel según el modelo digital de elevación del trasbordador espacial y permite representar el relieve en tres dimensiones con perspectivas variables ('tilt') entre una vista vertical, un sobrevuelo bajo, o una caminata por un valle (Rumiz, 2006).

### **GPSmap 60CSx**

EL GPS (Global Positioning System) es un sistema de localización de puntos sobre la superficie de la tierra basado en posiciones de satélites. La configuración está compuesta por 24 satélites, localizados a 20,250 km de la tierra. Los satélites actúan como puntos de referencia para un receptor o unidad GPS. Estos actúan como excelentes puntos de referencia debido a sus órbitas y movimientos que son seguidos desde la tierra, y su posición es conocida con gran exactitud (Ortiz, 2007).

El GPSmap 60CSx cuenta con un altímetro barométrico en el que el dato de la altitud es obtenido basándose en la medición de la presión barométrica. Cuando el altímetro está debidamente calibrado su precisión puede ser de hasta un metro (Biolaster, 2010). En los altímetros barométricos su funcionamiento está basado en

la relación entre presión y altitud, la presión atmosférica desciende con la altitud, aproximadamente, 1 milibar por cada 27 pies (8,2 metros) de altitud. Toman como base de referencia el nivel del mar, pero su funcionamiento está condicionado a los cambios meteorológicos, por lo que un altímetro de cierta calidad debería permitir compensar las variaciones de presión provocadas por el clima. Un barómetro de precisión puede obtener una precisión de 0,2 mbar equivalente a 2m de altitud, y tienen un funcionamiento irregular si el cambio de altitud es muy brusco (G.I.S Ibérica, 2010).

## **Recolección de Datos**

Para la evaluación de los modelos, en la línea de transmisión se tomaron altitudes en el campo con un altímetro de un GPS (Global Position System), marca Garmin, modelo 60CSx (altímetro calibrado), en puntos escogidos al azar, y con distintos tipos de cobertura forestal y uso del suelo, a lo largo de la línea de transmisión Arenal-Barranca. La determinación del tipo de cobertura se hizo en el campo con la ayuda de la capa de Cobertura al 2005 del Atlas digital de Costa Rica 2008, y las imágenes del área del sistema de Google Earth.

El Modelo de Elevación Digital (MED) desarrollado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), se obtuvo por medio del Atlas Digital de Costa Rica 2008, elaborado por la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El modelo ASTER-GDEM 2009 es de libre acceso en la web y fue descargado de la siguiente página <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>. Para obtener las altitudes de los puntos en los modelos MED-NASA y ASTER-GDEM se cargó cada modelo en una vista de ArcGis junto con los puntos tomados y al tomar la altura en cada punto se uso la herramienta "zoom in" para evitar posibles errores en la medición de las elevaciones.

El modelo de Google Earth fue accesado en línea por medio del sistema Google Earth 5.1 (Anexo 3). Para la obtención de las altitudes en el modelo de elevación

del programa Google Earth los puntos tomados en el campo se debieron exportar al formato .kml por medio de la herramienta Xtools Pro de ArcGis, para poder ser cargados en el programa Google Earth.

## **Análisis estadístico**

### **Error medio cuadrático (RMSE)**

Evaluación de la calidad de los modelos se hizo mediante el cálculo del error medio cuadrático (RMSE) de la componente altitudinal, utilizando 304 puntos de control. El RMSE (Root Mean Square Error) es la medida más ampliamente utilizada (Li, 1991 y Yang y Hodler, 2000 citados por Pressuti, 2009), para reportar la exactitud en un DEM. Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

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

Donde:  $y_i$  es el valor de la altura del modelo

$y_j$  es la altura real y

N es el número de pares de valores modelados.

### **Cálculo del Error**

La cuantificación del error en un DEM se lleva a cabo comparando un conjunto de valores reales de elevación con los estimados en el modelo, así el error de altitud en un punto  $d(i)$  es definido como la diferencia entre la altitud del punto en el modelo  $z(i)$  y su valor real  $z'(i)$  (Felicísimo, 1994 citado por Pressuti, 2009). Para cada modelo se cálculo el error utilizando como valor real las elevaciones tomadas por el GPS y como valor observado las elevaciones tomadas del modelo. Además para cada uno de los modelos se cálculo barras de error por medio de Tukey. Para calcular la variabilidad de las altitudes en los modelos de elevación se cálculo el coeficiente de variación (CV%) del error para cada uno de los modelos.

### **Análisis de Varianza**

Se utilizó un análisis de varianza (alpha de 0,01) para dos factores; un factor que incluye al GPS 60CSx y los modelos, donde la variable de análisis fue la diferencia entre las elevación registradas con el GPS 60CSx y las registradas en los modelos. El otro factor de análisis es el tipo de cobertura en el cual la variable de análisis es el efecto de la cobertura (forestal y no forestal) en las elevaciones tomadas de los modelos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cálculo del error medio cuadrático (RMSE)

Para la evaluación de la calidad de los modelos de elevación digital, se cálculo el error medio cuadrático (RMSE) de la diferencia de elevación entre el receptor GPS 60CSx y los modelos de elevación, teniendo 304 puntos de control (puntos tomados con GPS 60CSx). En el cuadro 1 se presentan los resultados del cálculo del error medio cuadrático (RMSE) general y para cada tipo de cobertura.

**Cuadro 1.** Cálculo de los RMSE para cada uno de los modelos de elevación digital.

	MED NASA	GOOGLE EARTH	ASTER-GDEM
RMSE	56,32	19,66	27,43
RMSE FORESTAL	50,64	19,12	27,01
RMSE NO FORESTAL	60,48	20,08	27,76

Dado que el RMSE es una medida de variabilidad, el modelo que presenta mayor dispersión es el MED-NASA tanto a nivel general como por tipo de cobertura. En el caso de los modelos Google Earth y ASTER-GDEM se presenta una menor dispersión y además el RMSE por tipo de cobertura es aparentemente igual, lo que indica que no hay diferencias por el efecto de la cobertura en estos modelos.

### Cálculo del promedio del error

En el cuadro 2, el modelo que presenta un mayor error promedio es el MED-NASA (36,1 m) mientras que los modelos Google Earth y ASTER-GDEM presentan un error promedio mas bajo (15,9 y 23,1 m respectivamente) siendo Google Earth el modelo con menor error. Estas diferencias en los promedios del error son comprobadas en el análisis de varianza.

**Cuadro 2.** Cálculo del error promedio para cada uno de los modelos según el tipo de cobertura.

	MED NASA	GOOGLE EARTH	ASTER-GDEM	Media
Forestal	31,2	15,7	24,0	23,6
No forestal	40,0	16,1	22,4	26,2
Promedios	36,1	15,9	23,1	25,0

En el modelo MED-NASA existen diferencias en el error según el tipo de cobertura, en el cual la cobertura forestal presenta menor error (31,2 m) que la no forestal (40,0 m). En el caso de los modelos Google Earth y ASTER-GDEM los valores de error promedio para cada tipo de cobertura son estadísticamente iguales. Esto indica que no hay efecto de la cobertura en las elevaciones tomadas de estos modelos (figura 3).

### Análisis de varianza

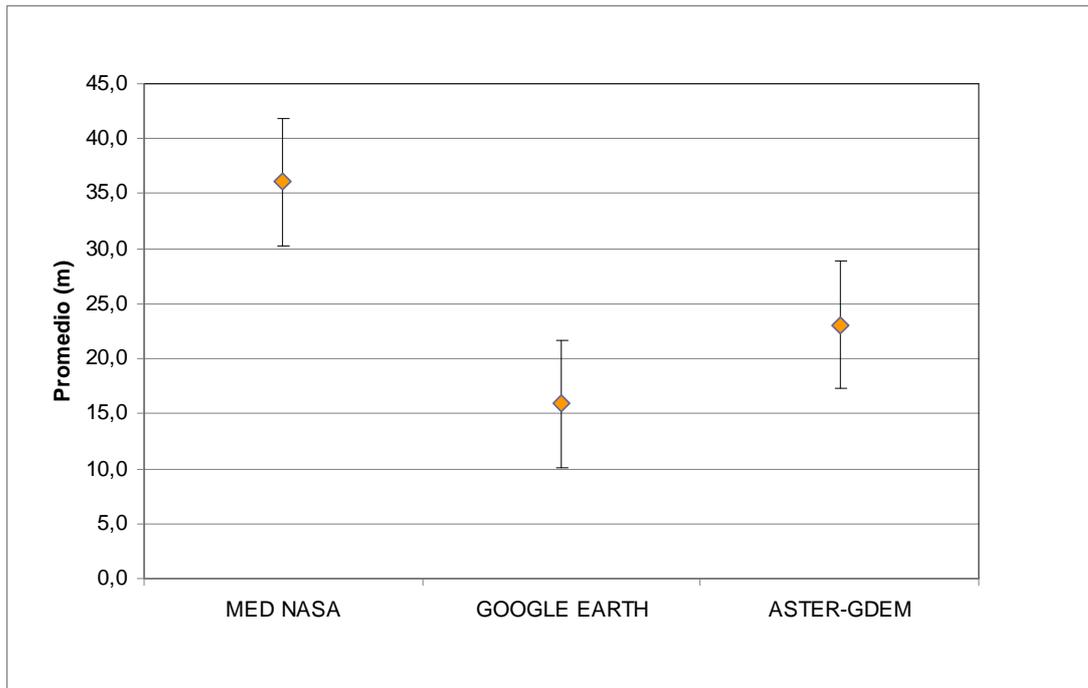
En el cuadro 3 se presenta el análisis de varianza para el error promedio de cada uno los puntos en los modelos de elevación.

**Cuadro 3.** Análisis de varianza del error de los modelos para un alpha de 0.01.

<b>F.V</b>	<b>SCC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>Fc</b>	<b>P-value</b>
<b>Puntos</b>	<b>309157,28</b>	<b>303</b>	<b>1020</b>	<b>1,70</b>	<b>1,95258E-08</b>
<b>Tratamientos</b>	<b>68261,66</b>	<b>5</b>	<b>13652</b>	<b>22,81</b>	<b>5,3743E-21</b>
<b>Modelo</b>	<b>63705,27</b>	<b>2</b>	<b>31853</b>	<b>53,21</b>	<b>5,20382E-22</b>
<b>Cobertura</b>	<b>485,70</b>	<b>1</b>	<b>486</b>	<b>0,81</b>	<b>0,37</b>
<b>Modelo-Cobertura</b>	<b>4070,70</b>	<b>2</b>	<b>2035</b>	<b>3,40</b>	<b>0,03</b>
<b>Error</b>	<b>361581,01</b>	<b>604</b>	<b>599</b>		
<b>Total</b>	<b>738999,95</b>	<b>912</b>			

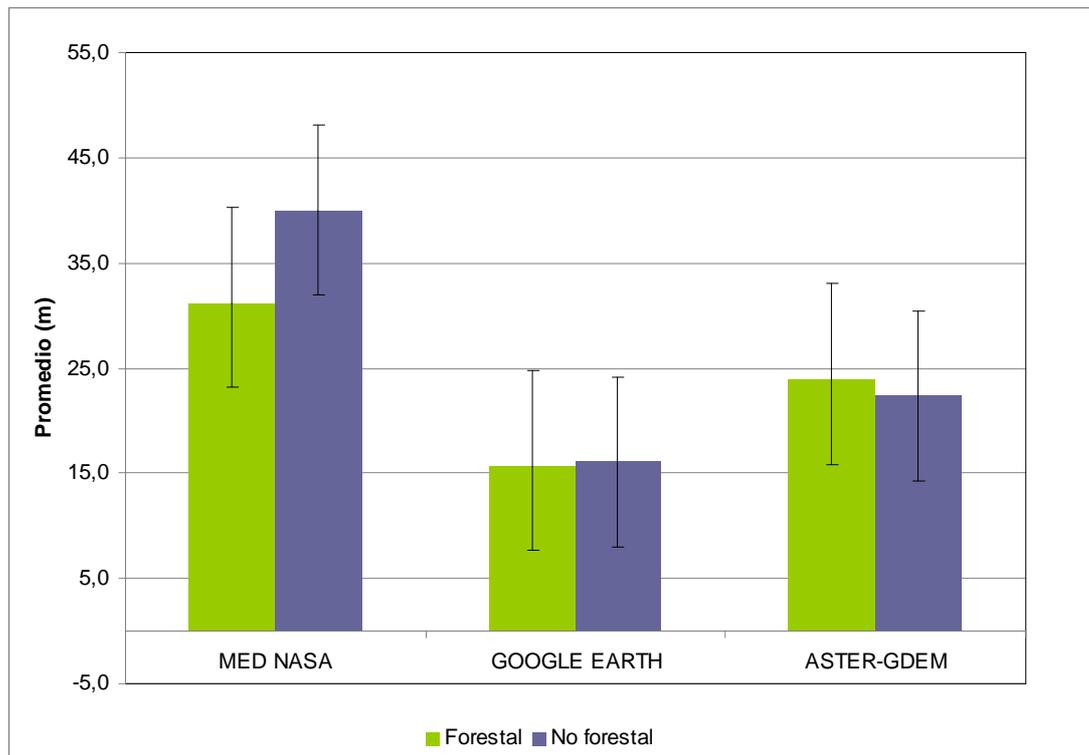
F.V. Fuente de variación  
 SCC: suma de cuadrados  
 CM: cuadrados medios  
 GL: grados de libertad  
 Fc: f calculado

En el análisis de varianza se encontró que existen diferencias significativas entre los tratamientos ( $p < 0,01$ ). Además en los modelos se encontró que existen diferencias significativas entre ellos ( $p < 0,01$ ). No se encontraron diferencias significativas para la cobertura ( $p > 0,01$ ) y en la interacción modelo-cobertura ( $p > 0,01$ ). Para cada uno de los puntos de elevación se encontraron diferencias significativas ( $p < 0,01$ ) lo que es de esperarse ya que las elevaciones tomadas son muy variadas. Se puede concluir que la cobertura no tiene efecto en las elevaciones (figura 3) y las diferencias son causas por los modelos (figura 2).



**Figura 2.** Promedios del error entre las elevaciones del GPS 60CSx y los modelos de elevación.

En la figura 3 se presentan los promedios del error para cada uno de los modelos y las barras de error en el gráfico representan la diferencia mínima significativa que fue calculado por medio de Tukey ( $\alpha=0.01$ ). Las barras de error muestran que existen diferencias significativas entre los modelos y los mayores errores los presenta el modelo MED-NASA. En el caso de los modelos Google Earth y ASTER-GDEM presentan una leve diferencia entre ellos. Esto indica que las diferencias en las elevaciones se deben principalmente al modelo que se utilice.

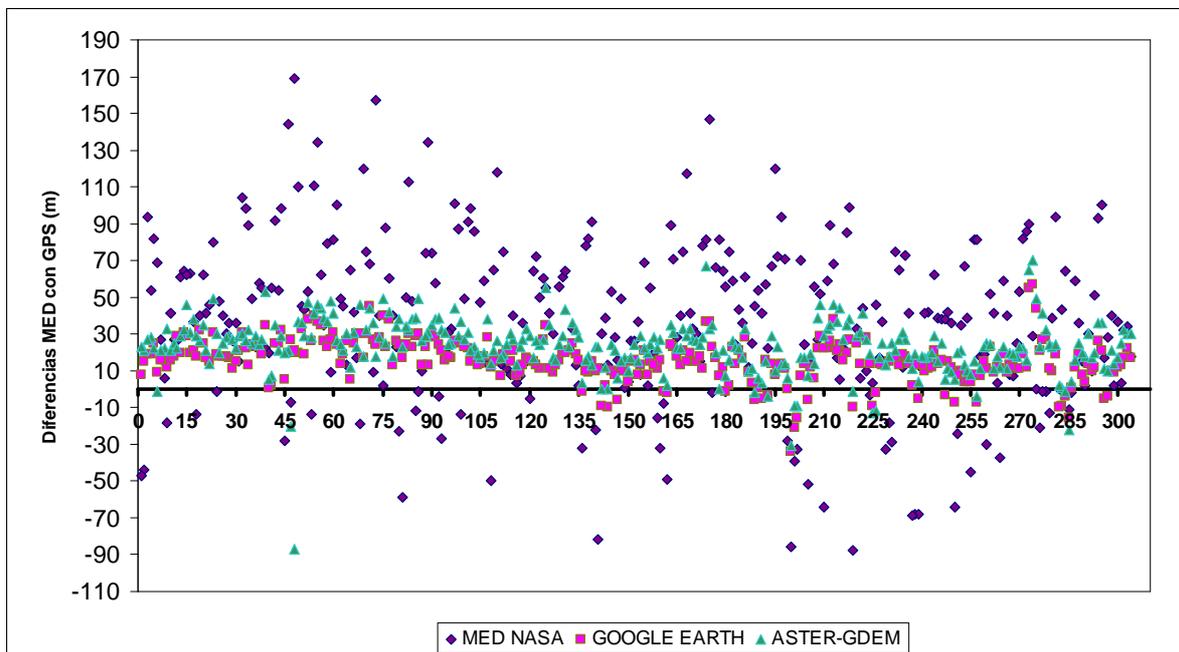


**Figura 3.** Promedios del error entre las elevaciones del GPS 60CSx y los modelos de elevación para cada tipo de cobertura.

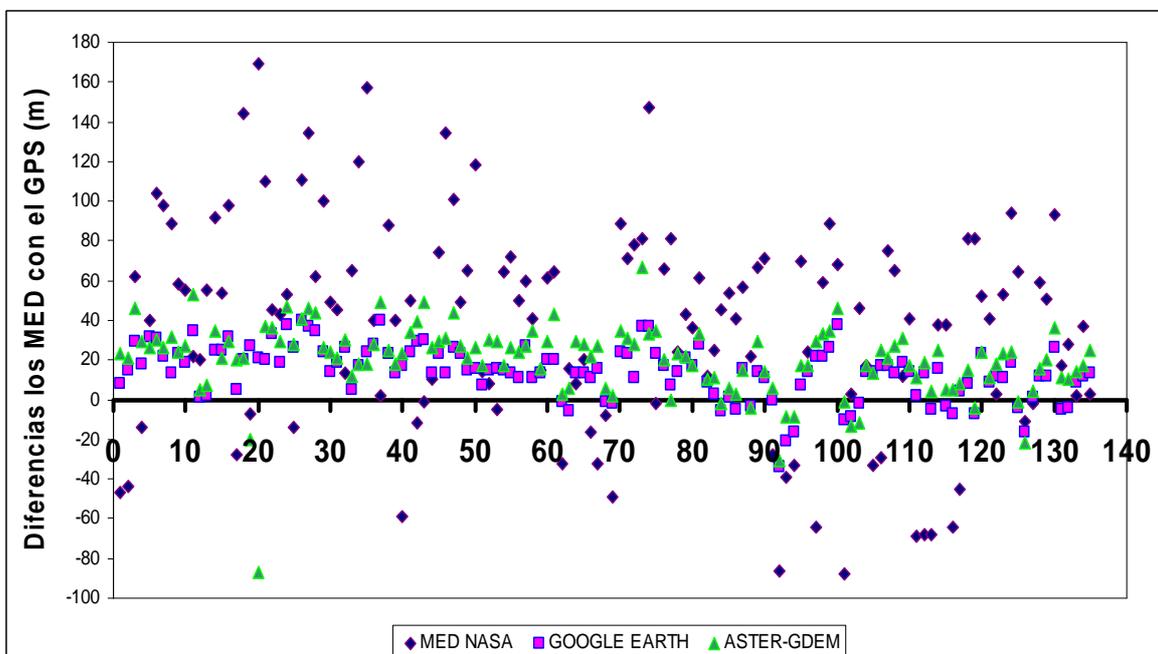
Según la figura 3 las barras de error muestran que no existen diferencias significativas en el tipo de cobertura en los modelos Google Earth y ASTER-GDEM ya que los valores en ambos tipos de cobertura son estadísticamente iguales. Solamente el MED-NASA presenta diferencias por el efecto de la cobertura ya que sus promedios para cada tipo de cobertura son estadísticamente diferentes y se comprobó con las barras de error.

### **Análisis de variabilidad**

En la figura 4 se muestran las diferencias que existen entre la elevación de los modelos y la elevación tomada con GPS 60CSx. Se puede ver que el modelo MED-NASA presenta una mayor dispersión en sus diferencias y estas se agrupan en un rango de 0 a 100 m, mientras que en el modelo Google Earth las diferencias se agrupan en el rango de los 20 a 30 m y las diferencias para GDEM-ASTER se encuentran en el rango de los 10 a 40 m.



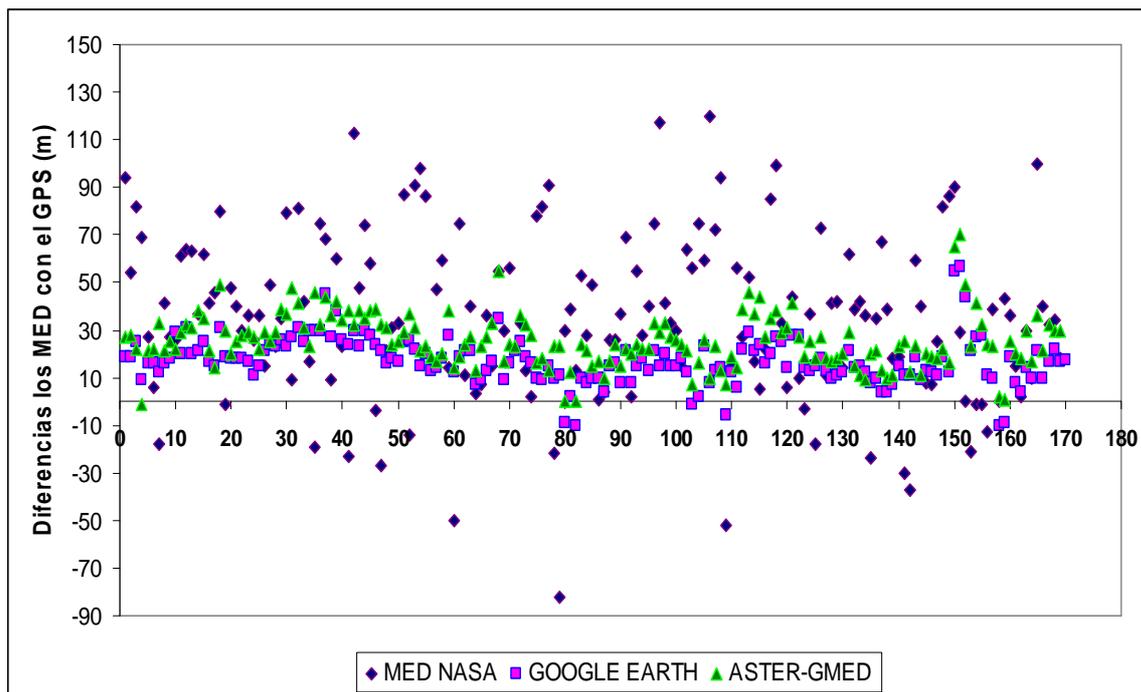
**Figura 4.** Distribución de las diferencias de cada MED respecto al GPS 60CSx para los tipos de cobertura Forestal y No Forestal.



**Figura 5.** Distribución de las diferencias de cada MED respecto al GPS 60CSx para el tipo de cobertura Forestal.

En la figura 5 se muestra la distribución de las diferencias de cada modelo para el tipo de cobertura forestal; las diferencias más altas y dispersas corresponden al MED-NASA estando estas agrupadas en un rango de 0 a 80 m aproximadamente, En el caso del modelo Google Earth las diferencias se agrupan en un rango de 0 a 30 m y en el ASTER-GDEM se agrupan de 0 a 40 m.

Los modelos de elevación digital son desarrollados con técnicas de interpolación espacial o datos satelitales o radares y es común que en su elaboración se cometan errores. Cuando se usan radares, las ondas de radar de las bandas C (5.6 cm) y X (3.1 cm), que inciden sobre la superficie terrestre son fuertemente dispersadas por los elementos presentes pues son más grandes que esas longitudes de onda. En consecuencia, en zonas cubiertas con vegetación, las hojas y ramas actúan como fuertes dispersores. Estas cortas longitudes de onda no pueden penetrar la vegetación, por lo cual los modelos de elevación generados no muestran la altura del suelo desnudo, sino más bien la altura de la superficie visible (edificios o vegetación). Por este motivo es de esperarse diferentes exactitudes del modelo para áreas abiertas, forestadas o bien ciudades (Presutti, 2009).



**Figura 6.** Distribución de las diferencias de cada MED respecto al GPS 60CSx para el tipo de cobertura No Forestal.

Para el tipo de cobertura no forestal se usaron 169 puntos y para cada punto se cuenta con la elevación tomada por el GPS 60CSx y la elevación extraída de cada MED. Se puede apreciar como en la mayoría de los puntos la elevación tomada del GPS 60CSx es mayor que la tomada de los MED.

Para el tipo de cobertura No Forestal el modelo MED-NASA es el que presenta las diferencias más altas y dispersas en un rango de 0 a 100 m, mientras que en los modelos Google Earth y ASTER-GDEM las diferencias están agrupadas en un rango de 10 a 30 m y de 15 a 50 m respectivamente (figura 6).

**Cuadro 4.** Coeficientes de variación del error para cada uno de los modelos según el tipo de cobertura.

	MED NASA	GOOGLE EARTH	ASTER-GDEM
<b>Forestal</b>	128,26	69,87	52,24
<b>No Forestal</b>	113,68	74,99	73,48
<b>Promedio</b>	119,27	72,75	63,69

En el cuadro 4 se presentan los coeficientes de variación para cada uno de los modelos y según el tipo de cobertura, las mayores variaciones corresponden al MED-NASA que presenta los CV% mayores. Esto indica que las áreas con cobertura forestal generan mayores variaciones entre los datos tomados en el campo y los tomados de este modelo.

Estos resultados del cálculo del CV% concuerdan con lo analizado en el cuadro 1, y el cuadro 2, donde el MED-NASA es el que presenta una mayor dispersión (RMSE) y también presenta diferencias en los promedios del error en ambos tipos de cobertura.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El modelo con mayor dispersión fue el MED-NASA con un RMSE de 56,32 m, y además es el modelo que presenta una mayor variación según el CV%. Estas variaciones pueden deberse a que este modelo es el más antiguo de los tres evaluados. Los modelos Google Earth y ASTER-GDEM presentaron valores de dispersión menores 19,66 y 27,43 m respectivamente, y solamente el MED-NASA presentó diferencias debido al efecto de la cobertura. A pesar de que Google Earth es una herramienta comercial es el modelo que presenta menor variación y dispersión en las elevaciones

El modelo con menor error promedio fue Google Earth con 15,9 m, y los modelos Google Earth y ASTER-GDEM no presentan diferencias en los promedios del error para la cobertura forestal y la no forestal.

Según el análisis de varianza existen diferencias significativas entre los modelos analizados y no se presentaron diferencias significativas debidas al efecto del tipo de cobertura (forestal y no forestal). Por lo que las diferencias en las elevaciones se deben al modelo que se utilice y no al tipo de cobertura presente en el sitio.

Las diferencias en el MED-NASA se agrupan en un rango de 0 a 100 m y en los modelos Google Earth y ASTER-GDEM estas se agrupan en rangos de 15 a 30 m y 10 a 40 m respectivamente. Estos dos modelos se recomiendan para el uso en Sistemas de información Geográfica pues son los que presentan menor variación y error con respecto a los valores tomados con el GPS 60CSx.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Biolaster, S.L. 2010. Altimetros. (en línea). Consultado el 29 de jun. 2010.  
Disponible en [http://www.biolaster.com/rendimiento\\_deportivo/productos/altimetros](http://www.biolaster.com/rendimiento_deportivo/productos/altimetros)

Cushing, M. 2008. Desarrollo de Mapas de Relieve. Hidrografía y Derivados para Suramérica. (en línea). Programa GeoSUR. Corporación Andina de Fomento (CAF) U.S. Geological Survey (USGS). Consultado 28 abr. 2010.  
Disponible en [http://geosur.caf.com/upload/pubs/GeoSUR\\_Papel\\_Concepto\\_SRTM.pdf](http://geosur.caf.com/upload/pubs/GeoSUR_Papel_Concepto_SRTM.pdf)

Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). 2009. ASTER GDEM Readme File – ASTER GDEM Version 1. (en línea). Consultado el 20 abr. 2010. Disponible en <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>

Fonts, O; Granell, C. 2008. Visualización geográfica 3D: estándares y aplicaciones. III Jornada de SIG libre. Servei de Sistemes D'informacion geografica I Teledeteccio, Universita de Girona. Consultado el 29 de jun. 2009. disponible en <http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/10256/1416/1/C35.pdf>

Garmin. 2010. Manual de usuario GPSmap 60CSx. Consultado el 20 jun. 2010.  
Disponible en [http://www.garmin.com/garmin/webdav/site/es/users/garmines/public/manual/es/manuales\\_outdoor/GPSmap%2060CSx%20Garmin%20-%20Manual%20de%20usuario.pdf](http://www.garmin.com/garmin/webdav/site/es/users/garmines/public/manual/es/manuales_outdoor/GPSmap%2060CSx%20Garmin%20-%20Manual%20de%20usuario.pdf)

G.I.S. Ibérica, 2010. Altimetros. (en línea). Consultado el 29 de jun. 2010.  
Disponible en <http://www.gisiberica.com/Alt%EDmetros/Copia%20de%20ALTIMETROS.htm#barometrico>

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ASSESING OF OFFICERS. 2003. Standard on digital cadastral mapas and parce identifiers (en línea).consultado 5 abr. 2010. Disponible en [www.kam.to/library/glos.htm](http://www.kam.to/library/glos.htm)

Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ingeniería Forestal, Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. 2008. Atlas Costa Rica 2008. Un disco compacto.

Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y Estados Unidos National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2009. Modelo de elevación digital Global (GDEM). (en línea). Consultado 18 set. 2009. Disponible en <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>

Ortiz, E; Cordero S. 2006. Sistemas de información geográfica. Teórico-Practico. Ed. M Villon. Cartago, CR. Ediciones Max Soft. 212 p.

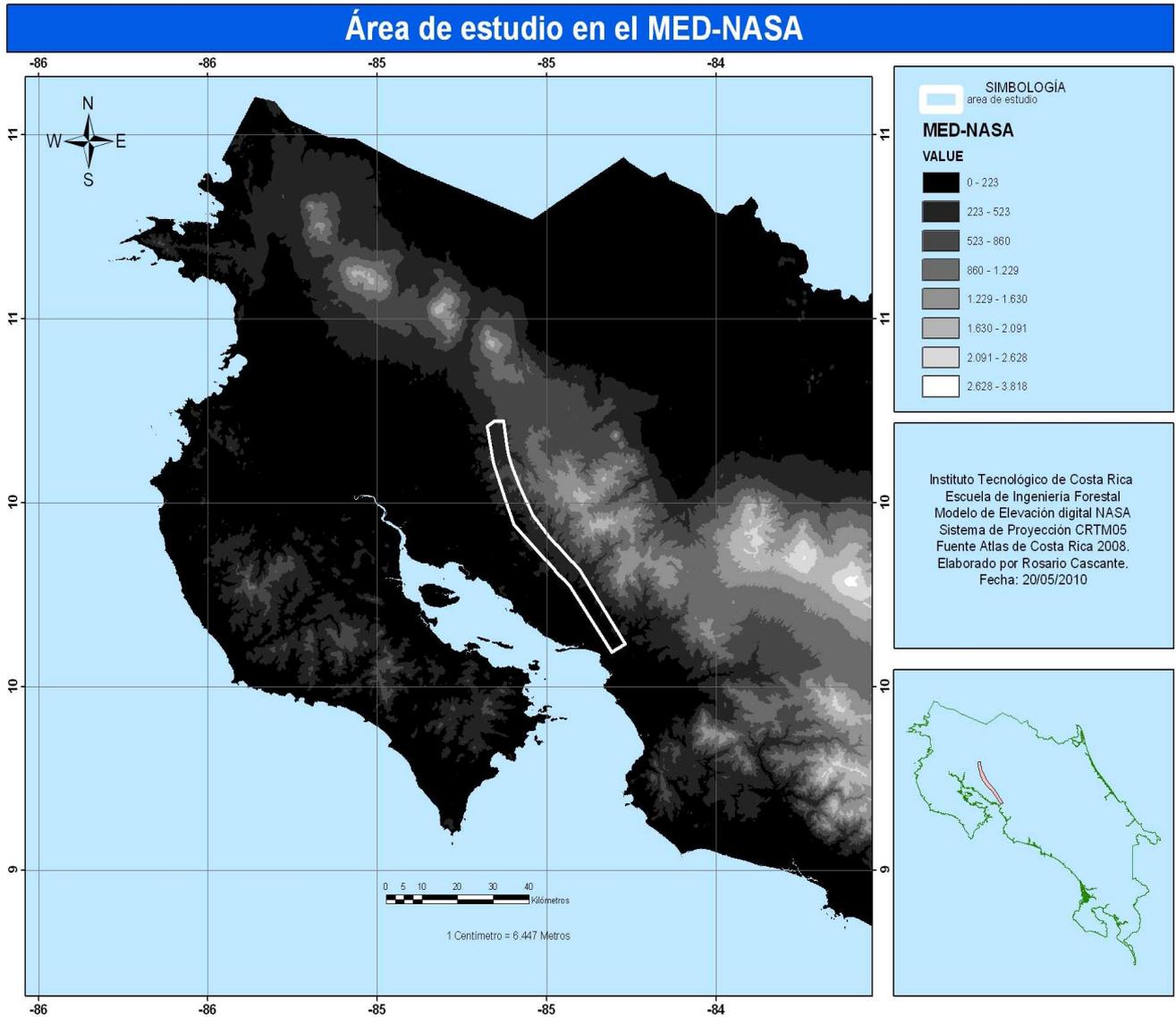
Ortiz. E. 2007. Curso: Sensores Remotos. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago CR. 40 p.

Presutti, M. 2002. Evaluación de errores en modelos digitales de elevación (DEM) generados mediante diferentes técnicas de interpolación (en línea). X Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, Cochabamba. Bolivia. Consultado el 5 abr. 2010. Disponible en <http://www.selper.org/selper2002/selper/articulos/T094.pdf>

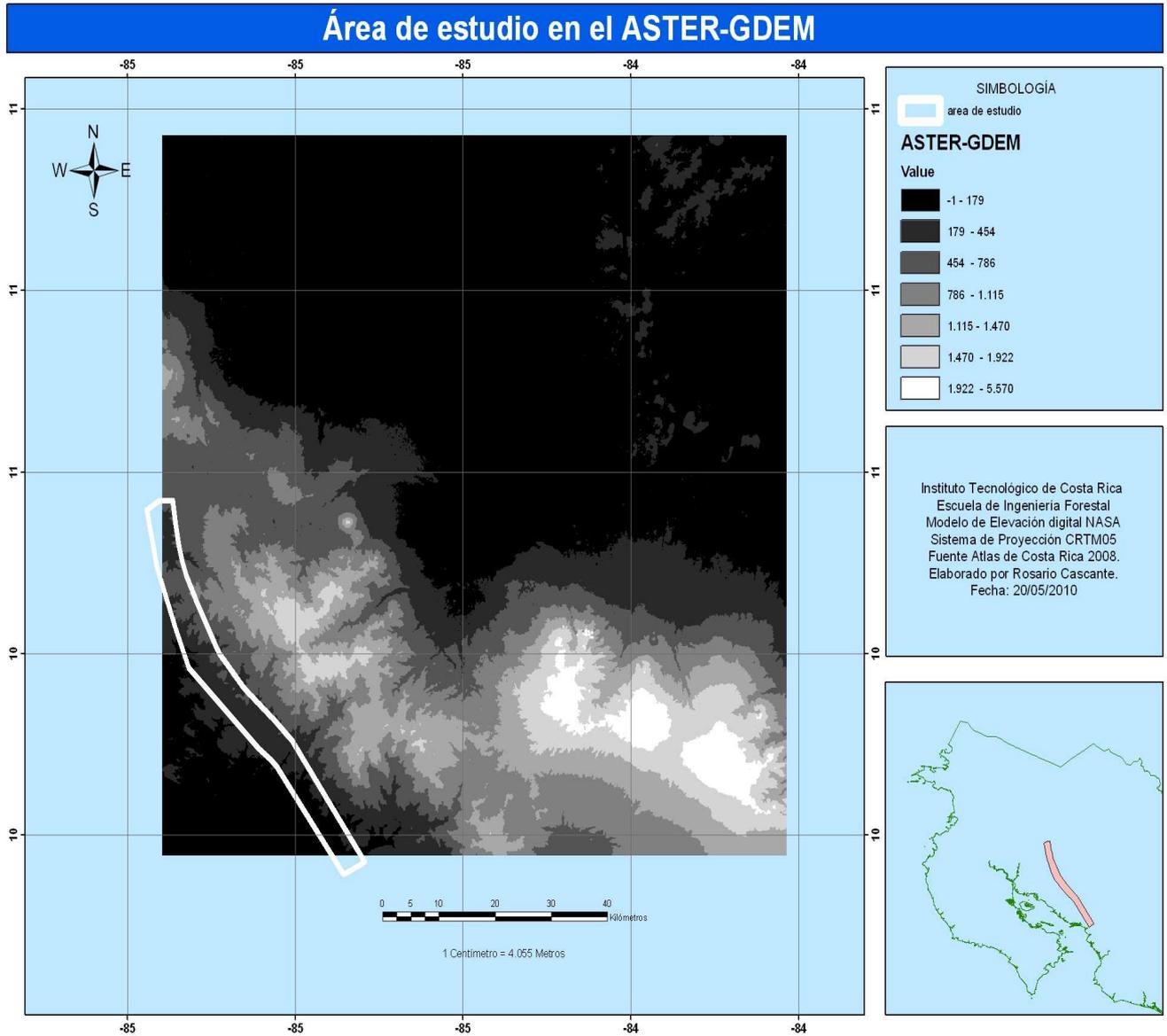
- Presutti, M. 2009. Comparación de un DEM generado a partir de curvas de nivel con el DEM-SRTM para estimar la altura de plantaciones forestales (en línea). Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil. Consultado el 3 mar. 2010. disponible en <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.13.19.08/doc/2943-2950.pdf>
- Roa, J; Kamp U. 2007. Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 49 (1) 2008, 11-42. (en línea). Consultado el 30 jun. 2009. Disponible en <http://www2.scielo.org.ve/pdf/rgv/v49n1/art02.pdf>
- Rumiz, D. 2006. GOOGLE EARTH® Y TRACKMAKER® APLICADOS A LA BIOLOGÍA DE CAMPO Y LA CONSERVACIÓN (en línea). Kempffiana 2(1):173-177. Consultado el 19 may. 2010. Disponible en [http://www.museonoelkempff.org/sitio/Informacion/KEMPFIANA/Kempffiana%20\(1\)/173-177.pdf](http://www.museonoelkempff.org/sitio/Informacion/KEMPFIANA/Kempffiana%20(1)/173-177.pdf)
- Salas, G. 2009. Características de la Línea de Transmisión Eléctrica Arenal-Barranca (correo electrónico). Tilarán, CR, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). ([gasala@grupoice.org](mailto:gasala@grupoice.org)).
- 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.

# ANEXOS

**Anexo 1.** Modelo de elevación digital NASA. (Fuente: Atlas digital de Costa Rica 2008).



## Anexo 2. Área de estudio en el Modelo ASTER-GDEM



### Anexo 3. Área de estudio en Google Earth

