

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL**



## **“COMPARACIÓN DE DATOS SRTM Y ASTER GDEM PARA DELIMITACIÓN DE LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA EL ZANCUDAL EN EL CICFOR – MACUYA, EN PUCALLPA”.**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO  
DE INGENIERO FORESTAL**

**AUTOR:**

**HERNÁN ELÍAS GUTIÉRREZ ODICIO**

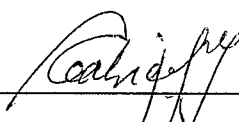
**PUCALLPA – PERÚ**

**2014**

## ACTA DE APROBACIÓN

Esta tesis fue sometida a consideración para su aprobación ante el jurado de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali integrada por los siguientes docentes:


Ing.Mg.Sc. GABRIEL MERCADO JAUREGUI.



---

Presidente

Dr. Fredy Velásquez Ramírez.



---

Miembro

Ing. Clovis Ramírez Ramírez.



---

Miembro

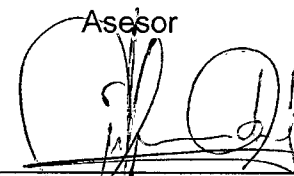
Ing. Mg. Sc. Fernando Velásquez De La Cruz.



---

Asesor

Bach. Hernán Elías Gutiérrez Odicio.



---

Tesista

## DEDICATORIA

***Dedico este trabajo de tesis a mis padres y mi hijo  
Santiago, con todo mi amor y cariño; por ser los  
principales artífices de motivación en este gran logro.  
A mi hermana y amigos que estuvieron siempre  
conmigo.***

## **AGRADECIMIENTO**

***A Dios padre todo poderoso por guiarme por el buen camino, permitirme salir adelante en mis momentos más difíciles y darme la fortaleza para asumir retos y cumplirlos.***

***A mis queridos padres por apoyarme siempre y estar a mi lado incondicionalmente, por sus consejos, ejemplos y depositar su confianza en mí.***

***A la Universidad Nacional de Ucayali, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal.***

***Al Ing. Fernando Velázquez de la cruz. Asesor de tesis, por su amistad, confianza y dedicación.***

***A mi amigo Ing. Clae Mathews. Especialista en SIG, por su apoyo para la realización de este trabajo.***

***De igual forma a los ingenieros miembros del Jurado de tesis: Gabriel Mercado Jáuregui, Fredy Velásquez Ramírez y Clovis Ramírez Ramírez, por su desinteresado apoyo y colaboración en la realización de este trabajo.***

## ÍNDICE GENERAL

	<i>Página</i>
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INDICE GENERAL.....	v
INDICE DE ANEXOS.....	viii
INDICE DE CUADROS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xi
SUMMARY.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	3
1. Planteamiento del problema.....	3
1.1. Formulación del problema.....	3
CAPITULO II.....	5
Marco teórico.....	5
2.1 Antecedentes.....	5

2.2	Sistemas de Información Geográfica.....	7
2.3	Modelos Digitales de Terreno (MDT).....	9
2.4	Modelos de Elevación Digital (MED).....	10
2.5	Datos Satelitales de Elevación Digital.....	12
2.5.1	SRTM ( <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> ).....	12
2.5.2	ASTER GDEM ( <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model</i> ).....	14
2.6	Cuencas hidrográficas.....	15
2.6.1	Caracterización fisiográfica e hidrológica.....	16
2.6.2	Área de la cuenca.....	16
2.6.3	Partes de una cuenca.....	16
2.6.4	Tipos de cuencas.....	17
2.6.5	Delimitación de cuenca hidrográfica.....	17
2.6	Definición de términos básicos.....	18
CAPITULO III.....		21
Metodología.....		21
3.1	Método de investigación.....	21

3.2 Población y muestra.....	21
3.3 Procedimiento para la recolección de datos.....	22
3.4 Instrumentos de recolección de datos.....	23
3.5 Procesamiento para recolección de datos.....	23
3.6 Tratamiento de los datos.....	25
CAPITULO IV.....	29
RESULTADOS Y DISCUSION.....	29
4.1 Delimitación de microcuenca.....	29
4.2 Estimación del error en los MEDs SRTM y ASTER GDEM.....	30
CAPITULO V.....	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
5.1 CONCLUSIONES.....	37
5.2 RECOMENDACIONES.....	38
BIBLIOGRAFIA.....	39
ANEXOS.....	42

## ÍNDICE DE CUADROS

*Página*

Cuadro 01: Estadísticos del error vertical en los DEMs SRTM y ASTER GDEM.....	30
Cuadro 02: Estadísticos del error planimétrico en los DEMs SRTM y ASTER GDEM.....	34
Cuadro 03: Datos digitales de la microcuenca de la quebrada “El Zancudal” usando los datos del ASTER GDEM.....	47
Cuadro 04: Datos digitales de la microcuenca de la quebrada “El Zancudal” usando los datos del SRTM.....	48
Cuadro 05: Datos del error lineal “X” y “Y”, en ASTER GDEM y SRTM.....	49
Cuadro 06: Datos del error vertical “Z”, en ASTER GDEM y SRTM.....	50
Cuadro 07: Distribución de frecuencias del error vertical “Z”, en ASTER GDEM.....	51
Cuadro 08: Distribución de frecuencias del error vertical “Z”, en SRTM.....	51
Cuadro 09: Distribución de frecuencias del error lineal “X”, en ASTER GDEM.....	51
Cuadro 10: Distribución de frecuencias del error lineal “X”, en SRTM.....	51
Cuadro 11: Distribución de frecuencias del error lineal “Y”, en ASTER GDEM.....	52
Cuadro 12: Distribución de frecuencias del error lineal “Y”, en SRTM.....	52

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

*Página*

Gráfico 1. Distribución de los errores verticales con los SRTM y ASTER GDEM.....	32
Gráfico 2. Distribución de los errores en X con los datos SRTM y ASTER GDEM.....	33
Gráfico 3. Distribución de los errores en Y con los datos SRTM y ASTER GDEM.....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

*Página*

Figura 1. Flujo de procesos para delimitación de cuenca en SRTM y Aster gdem, mediante aplicación de Model Builder en Arc GIS 10.1.....	24
Figura 2. Divisoria de la microcuenca “El Zancudal”, mediante datos SRTM y ASTER GDEM.....	29
Figura 3. Curvas de nivel de la microcuenca “El Zancudal”, mediante los DEMs SRTM y ASTER GDEM.....	30
Figura 4. Centroides y waypoints en la divisoria de microcuenca levantada con GPS y DEM SRTM.....	34
Figura 5. Centroides y waypoints en la divisoria de microcuenca levantada con GPS y DEM ASTER GDEM.....	35
Figura 6. Comparación de divisoria entre SRTM y GPS Garmin 60CSx.....	53
Figura 7. Comparación de divisoria entre SRTM y GPS Garmin 60CSx.....	53
Figura 8. Cuencas totales y red hidrográfica CICFOR en SRTM.....	54
Figura 9. Cuencas totales y red hidrográfica CICFOR en ASTER GDEM.....	54

## RESUMEN

En la región Ucayali, la disponibilidad de datos topográficos a una escala espacial y temporal determinada, constituyen datos esenciales, para la delimitación de las microcuencas. Los datos topográficos disponibles, generalmente poseen condiciones desfavorables, siendo la más importante, datos desactualizados de topografía, que presentan curvas de nivel cada 40 metros. Siendo imposible realizar con estos datos una delimitación de microcuenca de bajo costo. Para superar estas limitaciones, se vienen utilizando los modelos digitales de elevación (MEDs) globales de acceso público, al cual se le realizaron arreglos planialtimétricos e hidrológicos.

Mediante el presente estudio de investigación se aplicó el método de análisis comparativo, que consistió en comparar los datos geo espaciales tomados de los DEMs SRTM y ASTER GDEM con resolución de 1 arco de segundo (30 metros de pixel aproximado, para ambos), y determinar cuál de ellos se ajusta más a la realidad sobre la delimitación de la microcuenca quebrada "El Zancudal"; así mismo un análisis cuantitativo para determinar la calidad de los DEMs, a través del Test cartográfico de la NSSDA.

Se concluye que los datos del DEM SRTM presenta el mayor grado de precisión en cuanto a la exactitud vertical, y que permite obtener a través del programa un modelado de delimitación de cuenca semejante a la realidad sobre la zona de estudio. Los resultados indican que el error vertical más exacto pertenece a los datos SRTM con RMSEz de 9.474 y un índice de calidad cartográfica según la NSSDA de 18.569 metros de exactitud al 95% de nivel de confianza.

Palabras clave: DEM SRTM, DEM ASTER GDEM, Cuenca hidrográfica, ArcGIS 10.1.

## SUMMARY

In the Ucayali region, the availability of a particular topographic scale spatial and temporal data are essential data for the delineation of micro watersheds. The topographic data available generally have unfavorable conditions, being the most important; outdated topographic data, which have contours every 40m. Being impossible with these data of micro watershed delineation inexpensive. To overcome these limitations, we are using the global digital elevation models (DEMs) public access, to which underwent plani-altimetry and hidrologic.

Through this research study the comparative analysis method was applied, which consisted compare geospatial data both from SRTM and ASTER DEMs with resolution GDEM 1 arc second (approximately 30 meters pixel), and determine which one best fits the reality on the delimitation to micro creek "El Zancudal", likewise determining quantitative DEMs quality analysis, mapping through the NSSDA Test.

We conclude that the SRTM DEM data has the highest degree of accuracy in terms of vertical accuracy, allowing you to get through the program modeling delineation similar to the reality on the study area watershed. The results indicate that the most accurate vertical error belongs to the SRTM data RMSEz of 9,474 and an index mapping quality as the NSSDA of 18,569 meters of accuracy at 95% confidence level.

Keywords: DEM SRTM, ASTER GDEM, watershed, Arcgis 10.1.

## INTRODUCCIÓN

En la región de Ucayali, la información que se necesita para incorporar a los Sistemas de Información Geográficas (SIG) no se encuentran actualizadas, no existe una base cartográfica homogénea en las entidades que utilizan los SIG; generando serios problemas de compatibilidad al momento de aplicarlos, haciendo de esta herramienta una aplicación insipiente e insegura.

La disponibilidad de datos topográficos a una escala espacial y temporal, para la delimitación de cuencas, constituyen datos esenciales para realizarlas. Los datos topográficos disponibles generalmente poseen condiciones desfavorables, como datos desactualizados de topografía (documentos cartográficos a escala 1:100,000 con curvas de nivel cada 40 metros disponibles actualmente para toda la amazonía peruana); siendo imposible realizar con estos datos, una delimitación de cuenca de orden menor a bajo costo. En tal sentido existe la necesidad de obtener una base cartográfica actualizada, precisa y confiable.

Para superar estas limitaciones, se vienen utilizando los modelos digitales de elevación (MEDs) globales de acceso público, al cual se le realizaron arreglos planialtimétricos e hidrológicos. Entre los sistemas satelitales que ofrecen datos topográficos, se encuentran plataformas cuya información está disponible de manera gratuita, de fácil acceso y con una disponibilidad a nivel global. Entre estos, está el sistema radar *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), el sistema ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), que se destacan por alta resolución espacial y disponibilidad global. Si bien, ambos sistemas presentan rangos de precisión conocidas, son muchos los autores que señalan que esta dependerá finalmente de las condiciones locales presentes en el área de estudio (Kiamehr & Sjoberg, 2005; Schumann et al., 2008; Li & Wong, 2009; citados por Burgos, 2012).

Este es un estudio inicial para conocer cuál de los datos, tanto SRTM o ASTER GDEM, presenta información satelital más preciso a la realidad de nuestra zona. A

la vez permitirá aportar la confianza necesaria para su empleo en los sistemas de información geográfica, que hoy por hoy son una herramienta necesaria e indispensable para muchos profesionales que los aplican en la planificación, evaluación, monitoreo y toma de decisiones importantes en proyectos sociales como de desarrollo.

Este estudio también constituye un aporte en la investigación y planificación del manejo de cuencas hidrográficas en el CICFOR-Macuya de la Universidad Nacional de Ucayali y en la Amazonia Peruana; a la vez, una opción para obtener una base de datos de manera rápida y de bajo costo.

El objetivo general de este trabajo de investigación es conocer cuál de los datos en información geoespacial de SRTM y ASTER GDEM se ajusta más a la realidad para la delimitación de la microcuenca de la quebrada El Zancudal. Y como objetivos específicos: determinar los errores horizontales y verticales de los datos SRTM y ASTER GDEM, evaluar la calidad de estos MEDs ; obtener un levantamiento topográfico del área de estudio y realizar la digitalización y delimitación de la divisoria de la microcuenca de la quebrada El Zancudal.

## **CAPITULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

Los sistemas de información geográficos pueden traer grandes beneficios a sus usuarios por su capacidad de manipular información georeferenciada en una forma precisa, rápida y económica. Sin embargo, hasta el momento la mayoría de los datos que se han ingresado a la base de datos de los SIGs provienen de mapas analógicos. En ausencia de datos actualizados y de mayor calidad. En donde, gran parte de la información que se necesitan para incorporar a los SIGs se encuentran desactualizadas, no existe una base cartográfica homogénea, las diversas entidades referentes utilizan diferentes bases cartográficas, formatos, escalas y leyendas, etc.; generando serios problemas de compatibilidad al momento de aplicar el SIG. Por otro lado, la información topográfica que se pueda obtener para áreas forestales, con lo métodos convencionales, toman mucho tiempo para procesarlas y suelen ser costosas. Por tal motivo, obtener una delimitación de cuenca de orden menor a bajo costo con la información topográfica disponible en la región, es imposible.

En los últimos años con el desarrollo de la tecnología satelital se ha facilitado la obtención de información de una manera más amplia y con continuidad en el tiempo. Donde gracias a los datos e imágenes provenientes de sistemas satelitales, posibilitan la generación de Modelos de Elevación Digital (MED) a menor costo y mayor accesibilidad. Actualmente los MED constituyen una herramienta fundamental sobre todo en estudios para describir rasgos topográficos. No ajeno a ello la Universidad Nacional de Ucayali, viene realizando trabajos de investigación relacionados a datos satelitales,

llevadas a cabo en el Centro de Investigación y Capacitación Forestal \_ Macuya (CIFOR\_Macuya).

En la última década se ha empezado a utilizar los datos del SRTM y del ASTER GDEM, siendo estos entre los datos de los sistemas satelitales más populares, para la generación de MED; por lo tanto, se tiene poca información sobre los errores de estos datos en nuestra zona, además de existir una gran demanda de obtención de datos topográficos actualizados de mayor precisión. Por todo lo mencionado se planteó el problema ¿Cuál de los datos de información espacial de SRTM y ASTER GDEM se ajusta más a la realidad de la zona, mediante la delimitación de quebrada El Zancudal del CICFOR – Macuya?.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES.

Existen antecedentes que analizan estos tipos de DEM en zonas con datos topográficos escasos, como en el Rio Tunuyan, provincia de Mendoza, Colombia; donde se realiza una evaluación de ASTER GDEM y SRTM –C/X; presentando comparaciones, ajuste altimétrico y validación de cinco MED: SRTM en sus versiones V 2.1, SRTM30 y SRTM V4.1 en banda C; SRTM en Banda X y ASTER GDEM. Para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal. Donde se concluye que el SRTM V4.1 presenta el mejor grado de precisión con un ECM de 5.96 m (al 90% de confiabilidad). Burgos (2012).

Por otra parte, Buitrago (2011) con el Desarrollo de un modelo de visualización de erosión hídrica en el municipio de Samacá, departamento de Boyacá, Colombia. Evaluándose tres fuentes de modelos de datos de elevación, como el ASTER, curvas de nivel y SRTM. El modelo SRTM presentó mejor el comportamiento de relieve en el área de estudio.

Cascante (2010) Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED) en el área de la línea de Transmisión Arenal-Barranca-Costa Rica. En este trabajo se evalúan las diferencias que existen entre los datos de elevación tomados en campo con GPS y los obtenidos de tres distintos modelos de elevación digital disponibles en internet como MED-Nasa, Google Earth y ASTER GDEM; concluyendo que los modelos con menor error y variabilidad fueron respectivamente GoogleEarth y el Aster Gdem, ambos con RMSE de 19.66 y 27.43 m.

Otro antecedente de ajuste del MED, es el trabajo de Díaz et al (2010) evalúan los SRTM C/X y ASTER GDEM y su relación con errores planialtimétricos respecto a datos pancromáticos ortorectificados Quickbird (es el satélite comercial con mayor resolución de los disponibles hasta la fecha, ofreciendo imágenes con tamaño de pixel a partir de 60 cm), concluyendo que el SRTM /X es el más exacto en la zona analizada, con un RMS de 4.3 m (El Bolson Rio Negro \_ Argentina).

Kumar, (2005) citado por Burgos (2012); donde se utilizan dos MED (SRTM-C y ASTER GDEM) para evaluar las incertidumbres del mapeo de inundación según la fuente de elevación. Concluye que con un RMSE (*Root Mean Square Error, Raiz del Error Cuadrático Medio*) de 14.70 m y un rango de elevaciones de 93 m, ASTER GDEM se comporta satisfactoriamente para modelación hidrodinámica con el software MIKE11 (aplicación informática comercial desarrollada por el *Danish Hydraulic Institute* para modelación unidimensional).

Mathews (2011) realizó la evaluación de levantamiento de una red hidrográfica con datos de satélite mediante el sensor remoto Aster en el Bosque del CICFOR \_ Macuya, utilizando los DEMs S09W75 y S09W76 como información básica para la generación de la red hidrográfica y comparó los datos (x,y & z) con datos obtenidos in situ con GPS Garmin 60 Csx. Evaluando la quebrada "El Zancudal" el promedio de la diferencia de datos obtenidos del DEM y del track de GPS en las variables "X", "Y" y "Z" fue de 21.795 m, -8.320 m y 22.807 m, respectivamente a partir del análisis estadístico comparativo se determinó que no existe diferencia significativa entre los dos métodos de levantamiento.

Estela (2011) realizó el trazo de un camino forestal con datos del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Realizó un análisis cuantitativo de calidad de los DEM SRTM para el trazo de un camino forestal con ayuda del Software ARC GIS 9.3 en el área con cobertura vegetal. El análisis comparativo se basó en la definición de un trazo de camino digital y su

posterior realización en el campo con ayuda de un GPS. Los resultados indicaron que existe un cuadrado medio del error de (CME) de geo ubicación de 28.33 m horizontal y 8.14 m vertical.

Hidalgo (2012) realizó la Comparación de Dos Métodos de Levantamiento de la Divisoria de Cuenca de la Quebrada El Zancudal en el Centro de Investigación y Capacitación Forestal Cicfor – Macuya, donde el análisis comparativo consistió en la determinación de la calidad del MED de SRTM para delimitación de cuenca de la quebrada Zancudal. Concluyendo que la geoubicación de la cuenca presentó un CMEr de 34.86 metros a un 95% de nivel de confianza.

## **2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés Geographic Information System) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. (WIKIPEDIA, 2009).

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 recolección, pre-procesamiento, almacenamiento y análisis de datos geográficamente referenciados (Ortiz y Cordero, 2006). El uso de 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 una superficie terrestre.

Los SIG actualmente están compuestos por equipos, programas de cómputo y procedimientos para trabajar con mapas digitales. Lo esencial de un SIG es que posee 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.

(Felicísimo, 2003, citado por Pindo, 2007) Conjunto de software de ordenador, hardware y periféricos que transforman datos referenciados e información sobre localizaciones, interacciones espaciales y relaciones geográficas de las entidades fijas o dinámicas que ocupan un espacio en los entornos naturales o construidos.

En estas definiciones se identifican los principales elementos que se consideran en un SIG; el tipo de tecnología empleada (de carácter informático), la información que se maneja (información geográfica, de base espacial o georeferenciada), las operaciones que se realizan (captura, almacenamiento, gestión, análisis y presentación de resultados) y, finalmente, la problemática que se intenta resolver (problemas territoriales y medioambientales).

En síntesis un sistema de información geográfica se puede definir como “un sistema para la gestión, análisis y visualización de información geográfica”.

Las áreas de uso práctico de un sistema de información geográfica son muy variadas; desde inventario de los recursos naturales y humanos hasta el control y la gestión de los datos catastrales y de propiedad urbana y rústica (catastro multipropósito), la planificación y la gestión urbana y de los equipamientos, la cartografía y el control de grandes instalaciones (red telefónica, redes de abastecimiento y evaluación de aguas, redes de

transporte, etc.) En realidad un sistema de información geográfica es útil en cualquier área donde sea necesario el manejo de información espacial. (BOSQUE, 2000).

Los sistemas de información geográfica (SIG), definidos como sistemas de información diseñados para el manejo, análisis y cartografía de la información espacial referenciada internamente, manejan información de diversos tipos, en función de las características de los datos existentes y de la naturaleza de las variables consideradas. En las últimas dos décadas, el rápido desarrollo de los SIG y la teledetección ha facilitado enormemente la adquisición de datos ambientales y el análisis y cuantificación de los recursos naturales, reduciendo tiempo y costo de trabajo. El uso de los SIG sea convertido en una poderosa herramienta para evaluar los recursos naturales de una región determinada, ya que permite la rápida integración y la representación de varios atributos biofísicos (Bastian, 2000; Bocco et al., 2001; Lopez\_Blanco&Villers-Ruiz, 1995; Walsh et al., 1998; citados por Neto, H, 2012).

### **2.3 MODELOS DIGITALES DE TERRENO (MDT)**

Se denomina modelo digital del terreno a una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, la cota o la presión atmosférica. En particular, cuando la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevaciones o MDE. Los modelos digitales del terreno, también denominados MDT, son simbólicos pues establecen relaciones de correspondencia con el objeto real mediante algoritmos o formalismos matemáticos que son tratados mediante programas informáticos. (WIKIPEDIA, 2010).

Un MDT es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1992). La

utilización eficiente de las estructuras de datos con una organización espacial solo se ha hecho posible cuando se ha pasado del tratamiento manual al uso generalizado de los medios informáticos (Felicísimo, 1994). Los MDT son estructura de datos que representan las relaciones espaciales entre ellos y la distribución espacial de las variables cuantitativas o cualitativas estudiadas. De ese modo, por ejemplo, un modelo digital de elevación (MDE) es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie de terreno.

La integración de los MDTs en los SIGs abre las puertas a un conjunto de métodos de representación de la realidad y de simulación de procesos que contemplan de forma importante la capacidad clásica de los SIGs para el manejo de la información ambiental temática (Felicísimo, 1994).

## **2.4 MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL (MED).**

Un modelo digital de elevación (MED) es un arreglo ordenado de números que representan la distribución espacial de la altura sobre un datum arbitrario en un paisaje (Moore et al., 1991 citado por Buitrago, 2012). Los MED permiten tener una caracterización digital del relieve, mediante una estructura de datos en matriz, proporcionando los cálculos de parámetros requeridos en el estudio y modelamiento de diversos fenómenos naturales.

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 laser 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' 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 (Roa y Kamp, 2007; citado por Cascante. R., 2010).

Una característica importante de los MED es la resolución espacial. Actualmente se cuentan con datos SRTM a 30 y 90 metros de resolución y los modelos generados por el sistema ASTER con 30 metros de resolución. Desarrollos recientes, han permitido nuevas opciones en la generación de MED con mayor resolución espacial mediante el uso del sensor activo LIDAR (Light Detection And Ranging). Este sensor determina rangos por medidas de tiempos en el que toma el haz laser para reflejar un blanco al sensor. Esta nueva tecnología se ha vuelto una alternativa de mayor exactitud en la rama de la fotogrametría, por la creación de MED de mejor calidad (Zhang et al., 2008; Brovelli et al., 2004 citado por Buitrago, 2012)

Para estimar la calidad de los MED, se consideran los valores de altura del MED, contra los de una fuente de referencia. Uno de los procedimientos que se utilizan para evaluar la calidad de los MED son el error estándar, la raíz media del error cuadrático (RMSE; *Root Mean Square Error*), un análisis de histograma, diferencias verticales y un estimador de una dimensión fractal (Singh, 2004; Hengl et al., 2003 citado por Buitrago, 2012).

## 2.5 DATOS SATELITALES DE ELEVACIÓN DIGITAL.

### 2.5.1 SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

El objetivo principal de la misión SRTM fue obtener un modelo digital casi global de elevaciones con una uniforme calidad y alta resolución. Fue realizado en cooperación entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), el *German Aerospace Center* (DLR), la Agencia Espacial Italiana (ASI) y el *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA). Los datos de interferometría por radar por apertura sintética (InSar por su acrónimo en inglés) fueron obtenidos en once días (11 al 22 de febrero de 2000) por dos sistemas de radar montados en el transbordador espacial *Endeavor*. Cada sistema de radar consistió en dos antenas separadas a unos 60 m. el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA, opero un sistema en banda C en modo ScanSAR cubriendo un ancho de faja de 225 Km logrando un MED en un rango de latitudes desde 56° S a 60° N. el DLR opero un sistema de banda X con un ancho de faja de 50 Km. Esta limitación de ancho de barrido de la banda X no permitió realizar una cobertura continua. Pero al poseer menos ruido, para una misma observación, los errores aleatorios de elevación de la banda X son cercanos a la mitad de la banda C. (Hoffman, 2006 citado por Burgos, 2012).

Las bandas C y X fueron procesadas independientemente. La primera banda fue distribuida públicamente, con resolución espacial de 1" de arco (~ 30 m) para los Estados Unidos y reducida a 3" (~ 90 m) para el resto del mundo (USGS, 2005). En el presente estudio denominada como SRTM v1. Luego la NGA post-proceso el MED de banda C creado por el JPL, y es responsable de las distintas versiones circulantes, denominadas SRTMv30 y SRTM v4.1. Los MED realizados por el DLR en banda X son distribuidos en grillas de 10° x 10° e incluye un mapa de errores de elevación (*HEM, Height Error Map*) y un archivo .kml para su despliegue en Google Earth. Desde diciembre de 2010 los datos SRTM en banda X son obtenidos sin costo desde el portal

DLR. (<http://eoweb.dlr.de:8080/index.html>).

El MED derivado de SRTM a partir de técnica de interferometría radar, posee un error absoluto nominal de la ubicación y uno de altura que puede comprender de  $\pm 6$  y  $\pm 16$  m en eje vertical y  $\pm 20$  m en sentido horizontal. La evaluación de exactitud a nivel mundial del SRTM DEM se basó en perfiles en todos los continentes, a través del sistema de posicionamiento global (GPS) obteniendo un error absoluto de ubicación entre 7 m y 13 m, en error absoluto de altura entre 5.6 m y 9 m, y un error relativo de altura entre 4.7 m y 9.8 m (Kervyn et al., 2008; Rodríguez et al., 2006 citados por Buitrago, 2012).

Una característica altamente discutida del MED del SRTM es el sesgo del follaje (o dosel vegetal). Debido a la corta (5,6 cm) longitud de onda de la Banda C, la mayoría de las ondas del radar recibidas sobre áreas densamente vegetadas se reflejan de vuelta en el follaje, bastante por encima de la superficie de la tierra desnuda (KELLNDORFER et al 2004; citado por Hidalgo, 2012). Aun el efecto de la vegetación en píxeles vecinos produce un marcado desvío en los valores de altura reales (MERCURI, 2002; MERCER, 1998; citados por Hidalgo, 2012).

Uno de los motivos por el cual resulta problemático para los hidrólogos es el modelaje de una red de drenaje, por ejemplo, en un área de selva densa donde se esté deforestando. A veces se crean redes de canales falsos por causa de valores de elevación contrastantes entre la selva y las áreas taladas (VALERIANO, 2005; citado por hidalgo 2012).

### **2.5.2 ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*).**

El ASTER es un sensor de imágenes construido por el METI de Japón (*Ministry of Economy, Trade and Industry*), e instalado en el satélite Terra de la NASA. El ASTER GDEM tiene cobertura mundial, con una resolución nominal de 30 m en planimetría. Es el sucesor del SRTM, y su diferencia fundamental es que el MED se genera a partir de la estereoscopia de las bandas 3N (Nadir) y 3B (Back), logrando un MED relativo (sin puntos de control) y un MED absoluto utilizando puntos de control. Además, se removieron automáticamente los píxeles con nubes y las imágenes se promediaron antes de correlacionar, de forma de tener un valor promedio libre de ciertos problemas. Los errores en la vertical (errores medios cuadráticos que van de 10 a 25 m) fueron evaluados con gran cuidado sobre USA y Japón, y para el resto se realizó un muestreo.

La producción del ASTER GDEM involucro el procesamiento de 1,5 millones de imágenes, incluyendo estéreo correlación para crear el modelo en mosaicos de 1° por 1° (111,11 Km x 111,11 Km aprox.), en formato GeoTiff, en coordenadas geográficas Lat/Long, con Datum WGS84. Luego de generado el modelo, se creó el *ASTER GDEM Validation Team*, (Méndez et al., 2010; citado por Burgos, 2012), grupo de trabajo que tuvo por cometido la validación del modelo en todo el mundo. Hoy, el ASTER GDEM es un MED auditado y de uso libre. Dependiendo de la parte de la tierra que se considere representada por el ASTER GDEM, los errores son bastantes variables, pero en un informe final, se acordó estimar una exactitud vertical global de 20 metros, con el 95% de confianza.

Desde octubre de 2011 la versión 2 está disponible incluyendo una mejora en la precisión vertical habiéndose incorporado una 250.000 escenas. Del sitio Web en <https://wist.echo.nasa.gov/api/> es posible descargar las secciones solicitadas. Kervyn et al. (2008); citado por Buitrago, (2012), considera que la raíz cuadrada media del error (RSME, *Root Square Mean*

*Error*) está en el rango de  $\pm 7$  a  $\pm 15$  m vertical y horizontal de  $\pm 40$  a  $\pm 50$  m, esto dependiendo del número de imágenes utilizadas para determinar un punto en la superficie de la tierra y del relieve, especialmente la pendiente.

## 2.6 CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

Se entiende por cuenca hidrográfica la porción del territorio drenado por un único sistema de drenaje natural. Una cuenca hidrográfica se define por la sección del río al cual se hace referencia y es delimitada por las líneas de las cumbres, también llamada «divisor de aguas» hidrológicos y, más recientemente, a partir de los años 1970, para la planificación racional del uso de los recursos naturales. (WIKIPEDIA, 2011).

Una cuenca hidrográfica es una unidad natural definido por existencia de divisoria de las aguas en un terreno dado. Las cuencas hidrográficas son unidades morfológicas superficiales, sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones también conocidas como “parteaguas”. El parte aguas en teoría, es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre las dos ladera adyacentes pero de exposición opuesta, desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja. (I.N.E., 2005).

Es una unidad territorial por un río con sus afluentes o una área colectora de agua. En la cuenca están contenidos los recursos naturales básicos para múltiples actividades humanas, como agua, suelos, vegetación y fauna. Todos ellos mantienen una continua y particular interacción con los aprovechamientos y desarrollos productivos del hombre. (FAO, 1990).



### **2.6.1 CARACTERIZACIÓN FISIAGRÁFICA E HIDROLÓGICA.**

Entre las características hidrológicas que afectan la respuesta de una cuenca y de las cuales se pueden obtener una idea cuantitativa del grado de su influencia se tienen: área y tipo de suelo, posición y orientación, elevación, pendiente y red de drenaje. (FAO, 1990).

### **2.6.2 ÁREA DE LA CUENCA.**

Está determinada por una línea imaginaria que encierra el área de confluencia. Esta línea que separa una cuenca de las circundantes, se denomina línea divisoria de aguas o parte de aguas y en su trazo no debe cortar ninguna corriente de agua, salvo a la salida de ella.

El área de la cuenca tiene una gran influencia en la magnitud del caudal que de ella se va a drenarse. Normalmente, a medida que crece el área de la cuenca así mismo lo harán los caudales promedios, mínimos y los máximos instantáneos. Dividir el caudal de una cuenca (Q) por el área de la cuenca (A) permite obtener los caudales específicos (q), los cuales se expresan generalmente en  $\text{lt/seg/Km}^2$ . Este parámetro permite la comparación entre cuencas de la misma o de diversas regiones; al igual que cuando se evalúan los rendimientos máximos, mínimos o medios. (FAO, 1990).

### **2.6.3 PARTES DE UNA CUENCA.**

- Cuenca alta.- Es la parte de la cuenca en la cual predomina el fenómeno de la socavación. Es decir que hay aportación de material terreo hacia las partes bajas de la cuenca, visiblemente se ven trazas de erosión.
- Cuenca media.- Es la parte de la cuenca en la cual mediamente hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale. Visiblemente no hay erosión.

- Cuenca baja.- Es la parte de la cuenca en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección.

Al interior, las cuencas se pueden delimitar o subdividir en sub-cuencas o cuencas de orden inferior. Las divisorias que delimitan las sub-cuencas se conocen como parteaguas secundarios. (INE, 2005).

#### **2.6.4 TIPOS DE CUENCAS.**

I.N.E. (2005); las cuencas hidrográficas pueden ser principalmente exorreicas o endorreicas; las primeras se caracterizan por tener un desagüe que permiten que las aguas circulen o sean expulsadas de la cuenca hacia otra cuenca o hacia el mar, mientras que las endorreicas carecen de este desagüe por lo que generalmente drenan hacia un cuerpo de agua como un lago. También existen cuencas arreicas (sin red de drenaje de salida) y criptorreicas (con drenaje subterráneo sin una red de drenaje superficial bien definida).

#### **2.6.5 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.**

Consiste en definir la línea de divortium aquarum, que es una línea curva cerrada que parte y llega al punto de captación o salida mediante la unión de todos los puntos altos e interceptando en forma perpendicular a todas las curvas de altitudes del plano o carta topográfica, por cuya razón a dicha línea divisoria también se le conoce con el nombre de línea neutra de flujo. La longitud de la línea divisoria es el perímetro de la cuenca y la superficie que encierra dicha curva es el área proyectada de la cuenca sobre un plano horizontal (CATIE; 2005; citado por Hidalgo, 2012)

La cuenca hidrográfica se puede delimitar por medio de una carta topográfica, un plano altimétrico o un mapa topográfico, que tenga suficiente

detalle de relieve del terreno. Entre las escalas más comunes se tienen, 1/25,000 y 1/50,000, aunque para fines de diseño e intervención, las escalas más recomendables pueden ser 1/10,000 ó 1/5,000; el tamaño y complejidad del relieve de la cuenca indicarán tomar en cuenta la escala más apropiada. (MANCO, 2007; citado por Hidalgo, 2012).

## DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Según Cricyt, (2009).

**Banda-C:** Es un rango del espectro electromagnético de las microondas que comprende frecuencias de entre 3,7 y 4,2 GHz y desde 5,9 hasta 6,4 GHz. Fue el primer rango de frecuencia utilizado en transmisiones satelitales.

**Curvas de nivel:** Se trata de líneas, definidas por tanto como una sucesión de pares de coordenadas, que tienen como identificador el valor de la elevación en cada uno de los puntos de la línea. Generalmente el intervalo entre valores de las curvas de nivel es constante.

**DEM:** Conjunto de datos que contienen medidas de elevación del terreno, aplicando procedimiento fotogramétricos a pares de imágenes estereoscópicas solapadas.

**Geoservidor:** Sitio web de intercambio de datos vectoriales y roster del ministerio del ambiente.

**GPS:** Sistema global de localización mediante satélites, que permite estimaciones suficientemente precisas de latitud, longitud y

altitud de un punto, posteriormente deben interpolarse los datos.

**Interferometría De Imágenes Radar.** Un sensor radar emite un impulso electromagnético y lo recoge tras reflejarse en la superficie terrestre, conociendo el tiempo de retardo del pulso y su velocidad puede estimarse la distancia entre satélite y terreno.

**Model Builder:** Herramienta SIG diseñada para construir modelos en el Software ArcGis, el cual integra otras herramientas del mismo software. Son herramientas de análisis que ofrecen la posibilidad de identificar las relaciones espaciales de los fenómenos que se estudian.

**Radar:** El radar (término derivado del acrónimo inglés **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging, “detección y medición de distancias por radio”) es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe típicamente en la misma posición del emisor.

**Resolución:** El pixel es el elemento más pequeño al que un dispositivo de visualización puede asignarle de forma independiente un atributo como es el color. Así se define la resolución como la dimensión lineal mínima de la unidad más pequeña del espacio geográfico para la que se recogen los datos. Cuanto menor sea el tamaño de dicho pixel y por ende de la zona representada por dicho pixel, mayor es también el número de celdas que se

representarán mediante dicho Raster. La resolución dependerá del nivel de detalle con el que se quiera representar el mundo real, teniendo en cuenta las posibilidades de análisis y hardware/software.

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

Mediante el presente estudio de investigación se aplicó el método de análisis comparativo, que consiste en comparar los datos geo espaciales tomados de los DEMs SRTM y ASTER GDEM con resolución de 1 arco de segundo (30 metros de pixel aproximado, para ambos), y determinar cuál de ellos se ajusta más a la realidad sobre la delimitación de la microcuenca quebrada “El Zancudal”; así mismo un análisis cuantitativo para determinar la calidad de los DEMs, a través del Test NSSDA.

#### **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.**

La población se obtuvo de las coordenadas (X, Y, Z), correspondientes a datos de origen satelital adquiridas sobre la zona de estudio a través de los DEMs SRTM y ASTER GDEM a una resolución de 1 arco de segundo (30 m. de pixel aprox.), en ambos datos; y los adquiridos en campo a través del GPS mediante la función TRACK, en el recorrido de la cuenca.

La muestra se obtuvo de las coordenadas (X,Y,Z), seleccionadas desde los centroides de las curvas de nivel más altas (cotas), que se presentan en la divisoria, obtenidas a través de los DEMs SRTM y ASTER GDEM; y los Waipoints registrados en el GPS, sobre las cimas o puntos más altos de la divisoria de la cuenca. Consistiendo en 20 puntos como mínimo definidos sobre la cartografía y sobre la fuente de mayor exactitud, según la NSSDA.

### 3.3. PROCEDIMIENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.

La recolección de datos se realizó mediante dos etapas:

1. Recopilación y preparación de la información digital.- mediante la recopilación de la información se buscó bibliografía relacionada sobre datos SRTM y ASTER GDEM, disponibles en la web; y la descarga de los DEMs con el software Global Mapper 13.00 y la página web <http://earthexplorer.usgs.gov> . ya obtenido los DEMs se procedió a preparar la información digital pre operativa de campo en el programa ArcGIS 10.1.

Los datos procedentes de los DEMs SRTM y ASTER GDEM se obtuvieron de la siguiente manera:

- a) Los DEMs del SRTM y ASTER GDEM se descargan desde internet con la página web <http://earthexplorer.usgs.gov>, y el software Global Mapper 13.00.
  - b) Con los DEMs obtenidos del SRTM y ASTER GDEM se obtienen el TIN y curvas de nivel para delimitar analógicamente la cuenca de la quebrada “El Zancudal”.
  - c) Los datos digitales SRTM y ASTER GDEM se procesan con un modelo de delimitación de cuencas, diseñado en el MODEL BUILDER del SOFTWARE ArcGIS 10.1, obteniéndose la divisoria de cuencas y la red de drenaje.
  - d) Finalmente se obtienen las coordenadas UTM (X,Y,Z) de los centroides de las curvas de nivel sobre las partes altas (cotas) de la divisoria de cuenca.
2. Toma de datos en campo con GPS Garmin 60 Csx.- la toma de datos se realizó tomando como referencia la fase pre-operativa de campo, consistiendo en registrar mediante Track y Waipoints la divisoria y los puntos más altos que la conforman (siendo nuestro referente los Centroides de las curvas de nivel de las cotas más altas); llevándose a

cabo de esta manera el levantamiento de la divisoria de microcuenca mediante la función Track del GPS; que se inició abriendo trocha desde la desembocadura de la quebrada “El Zancudal” que vierte sus aguas sobre la quebrada “Cashibo”.

### **3.4. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

- Ordenador portátil.
- GPS Garmin 60 CSx.
- Cámara digital.
- Libreta de campo.
- Brújula SUNNTO.
- DEM SRTM y ASTER GDEM (S09W75 y S09W76).
- Mapa de CIFOR\_UNU.

### **3.5. PROCESAMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS**

Los datos DEM SRTM y ASTER GDEM, obtenidos de internet han sido procesados mediante el software Arc GIS 10.1, utilizando la aplicación del programador Model Builder que tiene por propiedad crear el Modelo de delimitación de cuencas, realizando las operaciones en forma automatizada, esquematizando los procesos realizados mediante las herramientas con las que cuenta la aplicación de Hydrology.

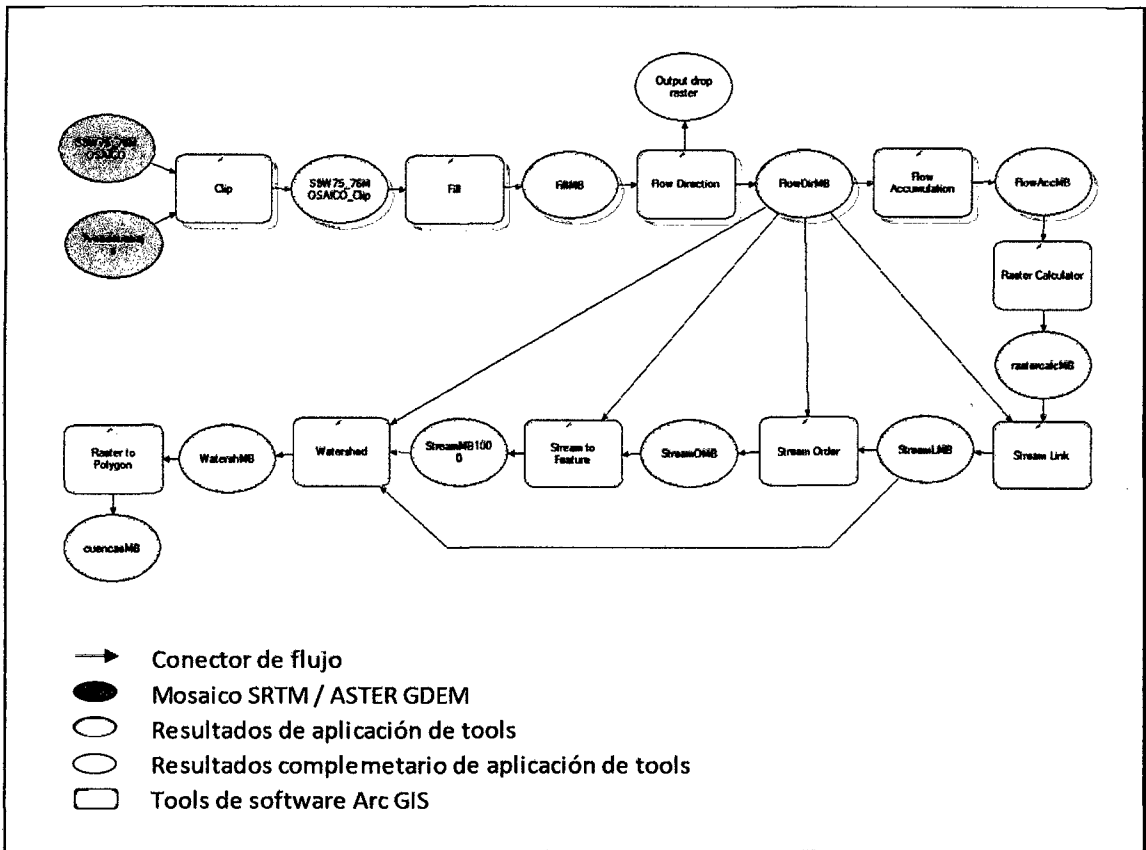


Figura 1: Flujo de procesos para delimitación de cuenca en SRTM y ASTER GDEM, mediante aplicación de Model Builder en Arc GIS 10.1

El proceso empieza con el ingreso digital de los datos de mosaico (S9W75\_76 MOSAICO) de imágenes 30 x 30 metros por píxel en ambos DEMs, sobre el cual se les realiza un recorte utilizando la herramienta Clip / Data Management tools; luego se aplicaron las herramientas de Hidrología, iniciando con FILL para homogenización de píxeles, después FLOW DIRECTION, que define la dirección del flujo buscando el camino descendente de una celda a otra; seguido FLOW ACCUMULATION, que crea el raster de acumulación de flujo en cada celda; en seguida MAP ALGEBRA, quien define la creación de la red de drenajes, aquí se empleó el umbral de “1000,1” mediante el comando RASTER CALCULATOR mediante la siguiente expresión “*stream\_Red = con (flowacc\_flow > 1000, 1)*”; luego STREAM LINK, que divide el cauce en segmentos no interrumpidos; después STREAM ORDER, que crea un raster del orden de las corrientes; luego STREAM FEATURE, crea un shape de

drenajes; posteriormente se aplica WATERSHED, quien permitió delinear las subcuencas por cada uno de los segmentos de cauce definidos en el paso anterior; finalmente se utilizó la herramienta Raster to Polygon / Conversion Tools, el cual permitió convertir las cuencas en raster a Shapes, obteniéndose de esta manera la divisoria de la microcuenca y la red de drenajes.

La obtención de los centroides de las curvas de nivel de las cotas más altas que corresponden a la divisoria obtenida en el paso anterior, se realizó mediante la herramienta Feature to Point / Data Management Tools; obteniéndose finalmente las coordenadas XYZ de origen digital.

Los datos obtenidos en campo a través de GPS, fueron descargados a través del programa DNR Garmin. Donde finalmente se prepararon ambos datos (software Arc GIS y en campo), mediante formato en Excel para su evaluación estadística. Ver anexo 2.

### **3.6. TRATAMIENTO DE LOS DATOS.**

Los datos fueron procesados por medio del Test de la NSSDA del *Federal Geographic Data Committee* (FGDC) que realiza la prueba estadística para obtener los índices de calidad de la topografía; siendo esta la que viene a sustituir a las pruebas de calidad posicional de la NMAS y al ASPRS, además de ser empleado actualmente por las agencias federales de los Estados Unidos para analizar bases de datos gráficas. (Atkinson et al, 2001).

La medida más ampliamente utilizada (Li, 1991; Yang y Holler, 2000; citados por Burgos, 2012), para reportar la exactitud en un MED es una medida de dispersión, la raíz del Error Cuadrático Medio, o RMSE (*Root Mean Square Error*).

Error cuadrático medio (RMSE ó RCEMC): Permite comparar el ajuste entre los datos observados en campo y los extraídos del DEM. Las unidades son las mismas de los datos observados. Valores de RMSE iguales a 0 son

óptimos ya que los errores no existirían y la relación sería perfecta, pueden darse cualquier valor positivo.

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{Xi}^2}$$

Ec.1 – Error medio cuadrático en la componente X.

Dónde:  $e$  = Error en la componente X para el punto i.  
 $n$  = El número de puntos de la muestra.

Lo mismo para la componente “Y” ( $RMSE_y$ ).

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{Yi}^2}$$

Ec. 2 – Error medio cuadrático en la componente Y.

Dónde:  $e$  = Error en la componente Y para el punto i.  
 $n$  = El número de puntos de la muestra.

Luego calculamos el RMSEr para la componente posicional (XY):

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}$$

Ec. 3 – Error medio cuadrático en la componente posicional (XY).

Para calcular el coeficiente de exactitud posicional a un 95% de confianza según la NSSDA, se toma en cuenta dos puntos:

- En caso de que  $RMSE_x = RMSE_y$ , se empleara la ecuación:

$$Exactitud_r = 1.7308 \cdot RMSE_r$$

Ec.4 – Coeficiente de exactitud posicional XY para  $RMSE_x = RMSE_y$

- En caso de que  $RMSE_x \neq RMSE_y$ , se empleara la ecuación:

$$Exactitud_r = 1.22385 \cdot (RMSE_x + RMSE_y)$$

Ec.5 – Coeficiente de exactitud posicional XY para  $RMSE_x \neq RMSE_y$

Se calcula el  $RMSE_z$  para la componente Z:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{zi}^2}$$

Ec. 6 – Error medio cuadrático de la componente Z.

Dónde:        e    =    Error en la componente Z para el punto i.  
                  n    =    El número de puntos de la muestra.

Finalmente para calcular el coeficiente de exactitud posicional a un 95% de confianza para la componente Z:

$$Exactitud_z = 1.96 \cdot RMSE_z$$

Ec.7 – Coeficiente de exactitud vertical de la componente Z.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Delimitación de Microcuenca.

Mediante los datos obtenidos de los DEMs SRTM y ASTER GDEM se obtuvo las delimitaciones de microcuenca realizadas en la quebrada “El Zancudal”, en el que podemos observar la divisoria de la microcuenca, la red hídrica de la quebrada a una escala adecuada. (Ver figura 2).

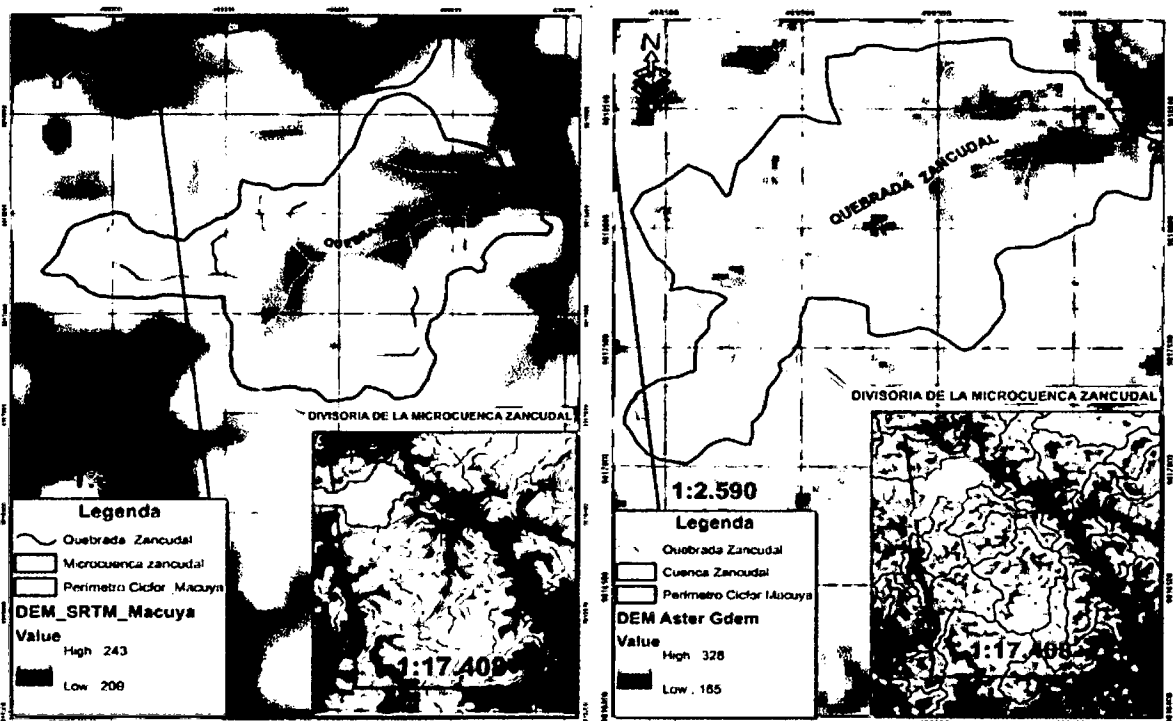


Figura 2: Divisoria de la Microcuenca “El Zancudal”, mediante datos SRTM (izquierda) y ASTER GDEM (derecha).

Mediante la delimitación de la divisoria a través de SRTM, se obtuvo un perímetro de 8,098.897 m y un área de 227.193 Has; así mismo para ASTER GDEM el perímetro es de 7,625.452 m y el área de 169.849 Has;

encontrándose una diferencia en SRTM de 1.605 m. en el perímetro y 11.536 Has en el área; y en ASTER GDEM de 2.079 m. en el perímetro y 68.880 Has en el área, con respecto a la delimitación levantada con el GPS. Cabe indicar que estos modelos se adquirieron con DEMs SRTM X y ASTER GDEM v2, siendo estos los más actuales, presentando como principal característica DEMs con 1" de segundo (30 pixel aproximados) de resolución espacial; indicado por (Méndez et al., 2010; citado por Burgos, 2012 y USGS, 2005).

Mediante los DEMs y el uso del software ArcGis 10.1, se obtuvieron diferentes mapas que tienen por finalidad describir la realidad fisiográfica de la zona de estudio, como ejemplo a lo manifestado se presenta las curvas de nivel de la quebrada "El Zancudal" obtenidos de los DEMs SRTM y ASTER GDEM (figura 3); concordando con (Felicísimo, 1994), cuando manifiesta que la integración de los MDTs en los SIGs abre las puertas a un conjunto de métodos de representación de la realidad y de simulación de procesos que contemplan de forma importante la capacidad clásica de los SIGs para el manejo de la información ambiental temática.

Para la delimitación de cuencas hidrográficas eran necesarios cartas topográficas, un plano altimétrico o un mapa topográfico, con suficiente detalle de las alturas de terreno (MANCO, 2007; citado por Hidalgo, 2012), y se realizaba mediante procedimientos de trazado con lápiz identificando en los extremos de la red los puntos más altos (mayor cota), cerros, colinas o montañas, donde para la identificación de la divisoria se debería de tener en cuenta el valor de las curvas de nivel y cuando ellas indican el drenaje fuera o dentro de la cuenca. Hoy en día, la delimitación de cuenca se puede realizarlo a través de DEMs, de manera automatizada, utilizando el programador MODEL BUILDER de ArcGIS 10.1, que te permitirá crear un modelo y realizar las operaciones en forma automatizada, durante la delimitación digital en sí.

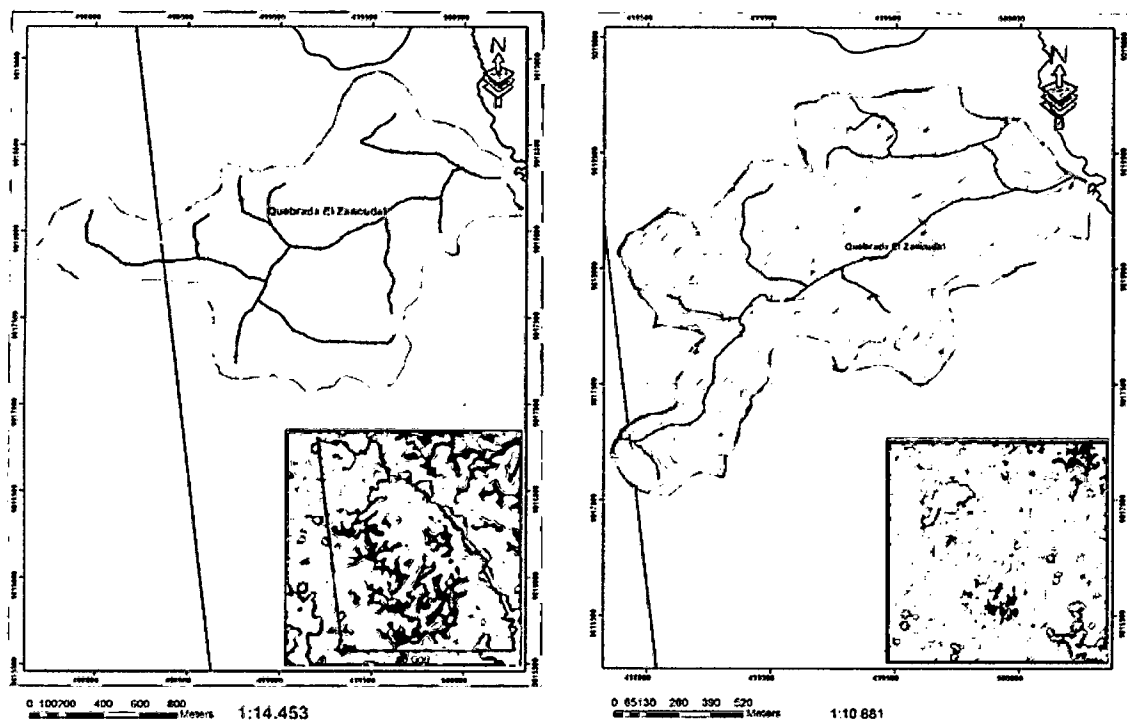


Figura 3: Curvas de nivel de la microcuenca “El Zancudal” mediante los DEMs SRTM (izquierda) y ASTER GDEM (derecha).

#### 4.2 Estimación del error en los MEDs.

Se presenta en el cuadro 1, los estadísticos obtenidos de los errores verticales de cada MDE analizado.

Cuadro 1: Estadísticos del error vertical en los DEMs SRTM y ASTER GDEM.

	SRTM	ASTER GDEM
Error max.	8.880	37.325
error min.	-16.989	-1.453
Rango del Error	25.870	38.778
Error Medio	-5.623	14.674
Desviación estandar	7.249	9.036
RMSEz	9.474	17.114
NSSDA 95% IC	18.569	33.544

La cuantificación de error en un MED 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 ( $e_i$ ), es definido como la diferencia entre la altitud del punto en el modelo ( $z_i$ ) y su valor real ( $z_i'$ ). (Felicísimo, 1994).

Los errores verticales en SRTM tuvieron menor dispersión que los del ASTER GDEM (gráfico 1). En el SRTM la distribución tuvo una tendencia hacia los valores negativos, siendo estos 68 %, tal cual se observa mediante el gráfico de distribución del error vertical y el cuadro de distribución de frecuencias de error vertical en SRTM (gráfico 1 y cuadro 8). En el caso del ASTER GDEM la tendencia fue positiva, donde el 90% del error vertical están entre el rango -1.453 m a 21.814 m, según el cuadro de distribución de frecuencias de error vertical en ASTER GDEM (cuadro 7). El  $RMSE_z$  del SRTM fue notablemente inferior al del ASTER GDEM, confirmándose con la desviación estándar. (Cuadro 1).

En relación al error vertical del SRTM, Díaz et al (2010) reporta un  $RMSE_z$  de 4.3 m (SRTM-x, con 24 puntos de control), Kumar (2005) 14.70 m (SRTM-C) y Estela (2011) un  $RMSE_z$  15.95 m. Para MED derivados de escenas ASTER, Burgos (2012) reporta EMC de 5.96 m (ASTER v2), Cascante (2010) reporta un  $RMSE_z$  de 27.43 m. Estos reportes indican  $RMSE_z$  dentro de los rangos manifestados por (Kervyn et al., 2008; Rodríguez et al., 2006; citados por Buitrago, 2012), asumiendo para SRTM una exactitud de  $\pm 6$  y  $\pm 16$  m y  $\pm 7$  a  $\pm 15$  m para ASTER GDEM en el eje vertical. Por lo mencionado, los resultados de exactitud de los MEDs analizados, señalan que los datos SRTM obtenidos se encuentran dentro del rango ya indicado ( $RMSE_z$  de 9.474 m) y para ASTER GDEM fuera del rango ( $RMSE_z$  de 17.114 m).

Contradictoriamente a la indicación anterior con respecto a ASTER GDEM (Méndez et al., 2010; citado por Burgos, 2012) señala que ASTER GDEM validation team, fue un grupo de trabajo que tubo por cometido la validación del modelo por todo el mundo considerando mediante un informa final una exactitud de 20 m con un 95% de confianza.

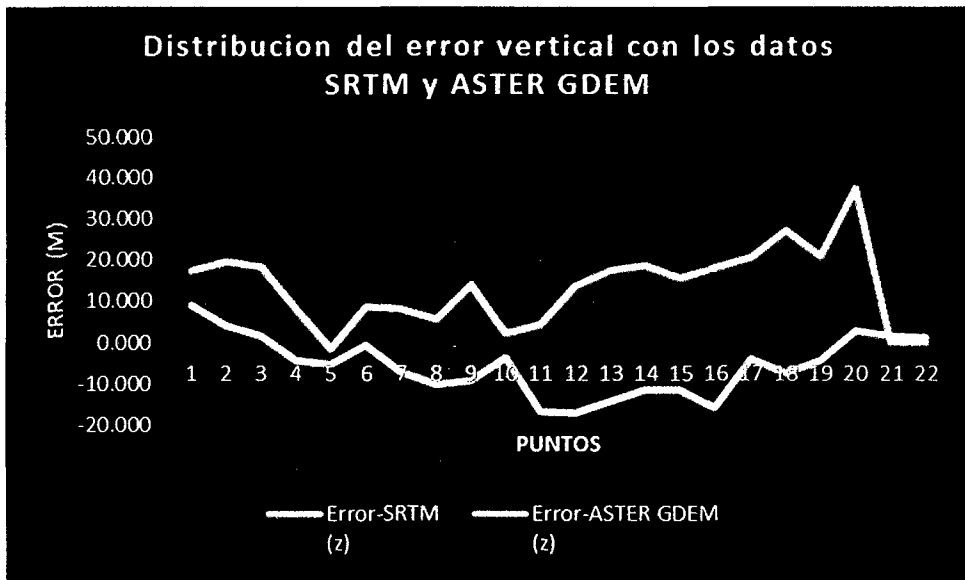


Gráfico 1. Distribución de los errores verticales con los datos SRTM y ASTER GDEM.

Exactitud planimétrica. Los errores estimados en el eje Y fueron mayores a los del eje X en SRTM, e inverso en ASTER GDEM (cuadro 2; y gráficos 2 y 3), observándose rangos de error elevados debiéndose a toma de datos groseros ubicados en los puntos 1,2 y 3 en el eje X; y los puntos 10 y 17 en el eje Y para SRTM. Los puntos 3, 4, 5 y 9 en el eje X; y 6, 7, 9, 16 en el eje Y para ASTER GDEM, observándose también una fuerte tendencia hacia valores negativos en el eje Y en SRTM, y una ligera tendencia en ASTER GDEM (véase, cuadro 11, 12; figura 4 y 5).

El cuadrado medio del error planímetro (RMSEr) para SRTM fue de 84.132 m, y 48.724 m para ASTER GDEM, resultando sobreestimado para SRTM y conforme para ASTER GDEM, según los rangos manifestados por (Kervyn et al., 2008; Rodríguez et al., 2006; citados por Buitrago, 2012), donde se indican para SRTM  $\pm 20$  m y para ASTER GDEM  $\pm 40$  m a  $\pm 50$  m en sentido horizontal.

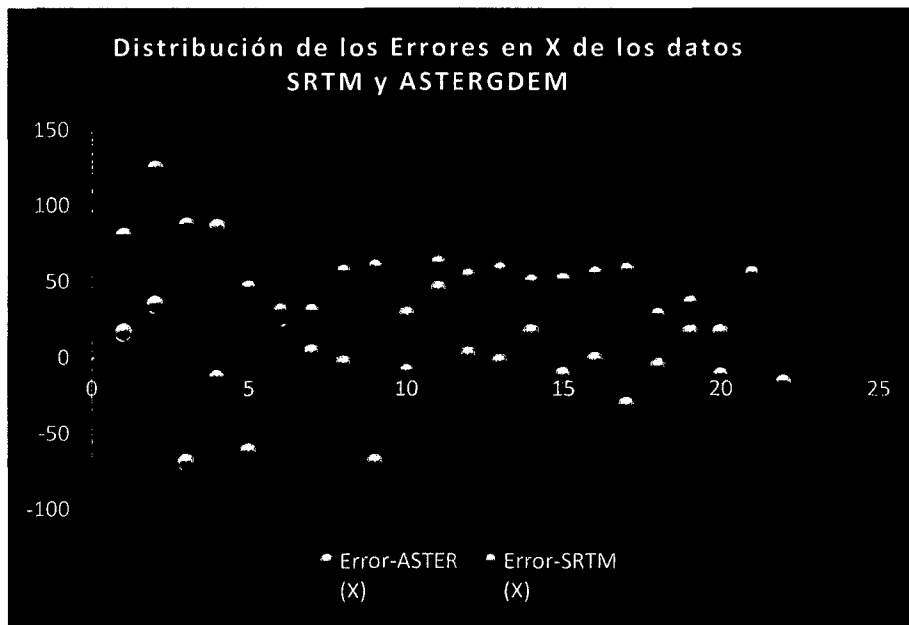


Gráfico 2. Distribución de los errores en X con los datos SRTM y ASTER GDEM.



Gráfico 3. Distribución de los errores en Y con los datos SRTM y ASTER GDEM.

Cuadro 2: Estadísticos del error planímetro en los DEMs SRTM y ASTER GDEM

	SRTM			ASTER GDEM		
	Error (x)	Error (y)	Error Planimétrico	Error (x)	Error (y)	Error Planimétrico
Error Medio	43.440	-30.581	83.414	1.425	2.438	41.479
Error max.	124.356	194.525	202.604	85.349	68.552	97.543
error min.	-16.943	-87.616	29.343	-69.392	-33.664	3.921
Rango del Error	141.299	282.141	173.261	154.741	102.216	93.622
Desviación estandar	34.310	68.561		38.112	32.218	
RMSE(x,y)	42.976	72.328		37.174	31.497	
RMSEr	-	-	84.132	-	-	48.724
NSSDA 95% IC			141.114			84.043

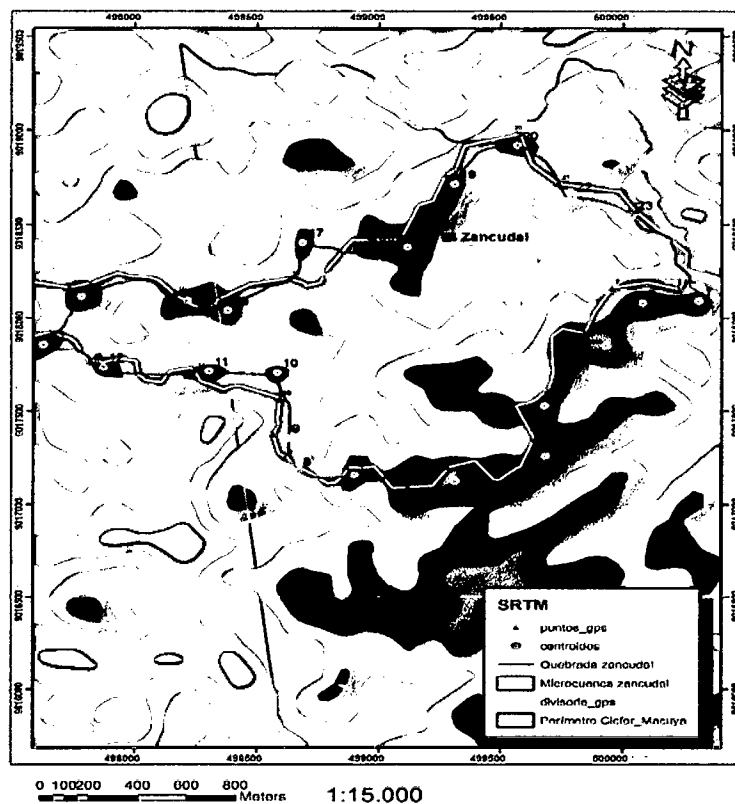


Figura 4: Centroides y waypoints en la divisoria de microcuenca levantada con GPS y DEM SRTM.

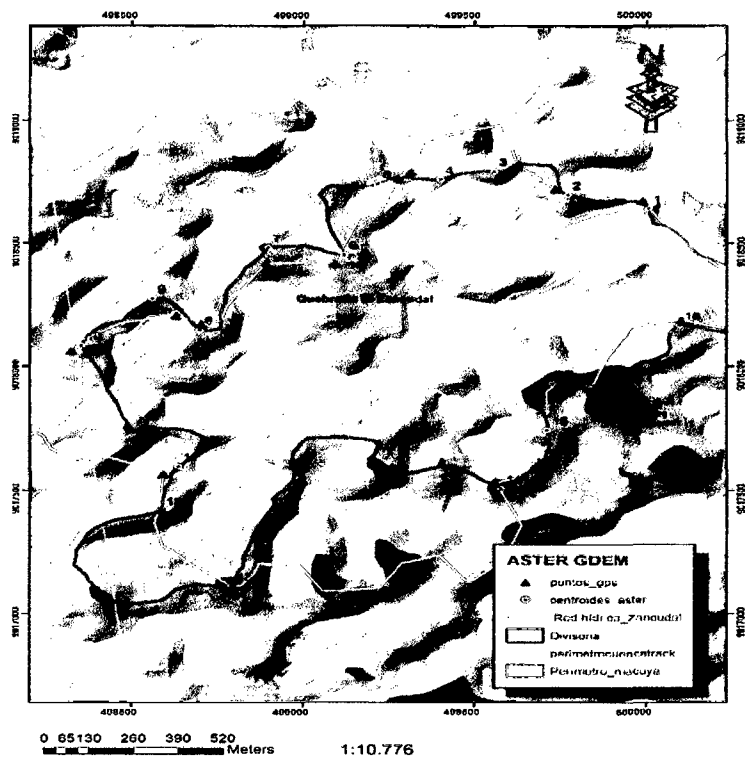


Figura 5: Centroides y waypoints en la divisoria de microcuenca levantada con GPS y DEM ASTER GDEM.

Si bien, ambos sistemas presentan rangos de precisión conocidas, son muchos los autores que señalan que esta dependerá finalmente de las condiciones locales presentes en el área de estudio (Kiamehr & Sjöberg, 2005; Schumann et al., 2008; Li & Wong, 2009; citados por Burgos, 2012). Donde, sobre esta zona de estudio, sean obtenidos datos aceptables según los rangos predispuestos, asumiendo que tanto SRTM y ASTER GDEM se ajusta a la realidad en cuanto a la precisión vertical. En la precisión horizontal se presentan con errores altos, siendo desfavorables para obtener datos fiables de la realidad de relieve. En cuanto a la delimitación de cuenca se observa que el modelo que presenta SRTM es mejor al ASTER GDEM y casi similar a la divisoria levantada con el GPS, como se puede ver mediante las figuras 6 y 7 (anexo 5). Por tanto, SRTM es el más recomendable para realizar la divisoria de microcuenca, al que se le tomara en cuenta el índice de calidad de la cartografía que ofrece la NSSDA. Este test a diferencia de los anteriores (NMAS y ASPRS), no nos dice si el mapa es aceptado o

denegado, sino que nos ofrece un índice de calidad cartográfica en unidades reales sobre el terreno, donde le corresponde al usuario de la cartografía establecer los límites de aceptación en función de sus necesidades (Atkinson et al, 2001).

Los índices de calidad cartográfica obtenida de los DEMs a partir del test de la NSSDA, presentan resultados de exactitud horizontal elevadas, siendo en SRTM mayor. Esto puede ser una condicionante para su empleo; pero es importante señalar que los resultados en estos DEMs en diversos estudios presentan mucha variabilidad, favoreciendo en algunos casos a ASTER GDEM, y ello se debe a la presencia de errores inherentes en la generación de los DEMs. Por el cual, queda claro que los resultados pueden también presentarse favorablemente en función al lugar.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES.

- La delimitación de la microcuenca de la quebrada El Zancudal, realizada con los datos de SRTM es el que más se ajusta a la divisoria levantada por el GPS Garmin 60Csx.
- El error planimétrico que se logró determinar de los centroides (cotas de la curvas de nivel en los DEMs SRTM y ASTER GDEM) y waypoints en la divisoria de la microcuenca, presenta un RMSEr de 84.132 m para SRTM y 48.724 para ASTER GDEM.
- El error vertical que se logró determinar, presenta un RMSEz de 9.474 m para el SRTM y 17.114 m para ASTER GDEM.
- Los índices de calidad cartográfica de exactitud horizontal en SRTM y ASTER GDEM obtenida del test de la NSSDA fueron altos; siendo en SRTM mayor.
- Los resultados obtenidos en SRTM y ASTER GDEM no son determinantes, estos pueden variar según a las condiciones del lugar de estudio.
- En base a los mapas derivados de los DEMs SRTM y ASTER GDEM, se realizó la delimitación digital de la microcuenca de la Quebrada “El Zancudal”, obteniendo el área y la longitud del perímetro, siendo estos:

227.193 Has y 8,098.897 metros para SRTM; y 169.849 Has y 7,625.452 metros para ASTER GDEM.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Realizar estudios sobre las delimitaciones de microcuencas con SRTM, dado a los resultados encontrados; e investigar cuanto implican los diferentes tipos de errores de generación de MED en los datos.
- Utilizar mayor número de datos como puntos de control, de tal manera que exista la posibilidad de eliminar errores groseros que se presentan frecuentemente en los DEMs.
- hacer uso de los datos GPS Garmin 60 CSx validados de acuerdo a estándares de calidad posicional, con la finalidad de obtener resultados totalmente exactos a la realidad.
- Se recomienda realizar estudios más detallados relacionados al manejo de cuencas, que permita obtener información actualizada sobre las características morfométrica de la microcuenca hidrográfica de la quebrada “El Zancuda”, utilizando los DEMs SRTM y ASTER GDEM.

## BIBLIOGRAFÍA

ATKINSON, A; GARCIA, J y ARIZA, F. (2001). Los Diferentes Test para el Control de Calidad Posicional en Cartografía. XII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Badajoz.

Consultado el 3 de Octubre del 2013. Disponible en: [www.ingegraf.es/congresos/2001-BADAJOZ/docs/730648.doc](http://www.ingegraf.es/congresos/2001-BADAJOZ/docs/730648.doc)

BOSQUE SENDRA J (2000). Sistemas de Información Geográfica. Segunda edición. Madrid. 450 pp.

BUITRAGO, J. 2012. Desarrollo de un Modelo de Visualización de Erosión Hídrica en el Municipio de Samacá (Boyacá). Trabajo de Grado para optar el título de Magister en Geomática. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. 97 p.

BURGOS, V. 2012. Evaluación de ASTER GDEM y SRTM C/X para Modelación Hidráulica de la Rotura de Presa EL CARRIZAL. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino. Mendoza (INA CRA). Consultado el 3 de Octubre del 2013. Disponible en: [http://ina.gob.ar/pdf/ifrrhh/03\\_003\\_Burgos.pdf](http://ina.gob.ar/pdf/ifrrhh/03_003_Burgos.pdf)

CASCANTE, R. 2010. Evaluación de tres Modelos de Elevación Digital (MED) en el área de la Línea de Transmisión de Arenal-Barranca. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Costa Rica. 38 p. Consultado el 3 de Octubre del 2013. Disponible en: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/xmlui/handle/2238/748>

CRYCYT. 2009. Red Hidrográfica. Consultado el 5 de Octubre del 2013. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/términos/RedHidro6.htm>

DIAZ, G.; GOMEZ, M.; DECCECHIS, F.; LENCINAS, J. y del VALLE, H.; 2010. Evaluación SRTM-C/X y ASTER GDEM y su relación con los errores plan

altimétricos de datos pancromáticos Quickbird ortorectificados. Laboratorio de Percepción Remota y SIG. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). Consultado el 3 de Octubre del 2013.

Disponible en:

[http://www.selper.org/uploads/pdf/20130909\\_0624\\_pdf\\_Vol31\\_Junio11-web.pdf](http://www.selper.org/uploads/pdf/20130909_0624_pdf_Vol31_Junio11-web.pdf)

ESTELA, E. (2011). Trazo de un Camino Forestal con Datos del SRTM en el Bosque CICFOR – Macuya. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. UNU. Pucallpa.

FAO. (1986). Tercer Seminario Nacional, Manejo de Cuenca Hidrográficas. Proyecto Regional de Manejos de Cuencas. La Ceiba. Honduras. 125 p.

FELICÍSIMO, A.1992. Aplicaciones de los Modelos Digitales del Terreno en las Ciencias Ambientales. Visitado el 3 de Octubre del 2013. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/>

FELICÍSIMO, A.1994. Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. Visitado el 3 de Octubre del 2003. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/>

HIDALGO. V. (2000). Comparación de dos Métodos de Levantamiento de la Divisoria de Cuenca de la Quebrada “El Zancudal” en el centro de Investigación y Capacitación Forestal CICFOR – Macuya. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. UNU. Pucallpa.

INE (Instituto Nacional de Ecología). 2005. Instructivo para Delimitación de Cuencas Hidrográficas de México a escala 1:250,000. Dirección de Manejo Integral de Cuencas. 6 pag.

NETO. H. (2012). Elaboración de un Modelo Digital de Terreno en la Sierra Norte de la Sierra Grandola. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. 338 pag. Consultado el 3 de Octubre del 2013. Disponible en:

<http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/xmlui/handle/2238/748>

MATHEWS, C. (2011), Levantamiento de una Red con datos del Satélite ASTER en el CICFOR – Macuya. Tesis para optar el Título de Ingeniero Forestal. UNU. Pucallpa.

ORTIS. E; CORDERO. S. (2006), Sistemas de Información Geográfica. Teórico – Practica. Ed. M. Villon. Cartago. 212 p.

PINDO. J. (2007). Cartografía Geográfica de un Sector de la Península de Santa Elena mediante Sistemas de Información Geográfica. Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. Ecuador. 118 pag.

WIKIPEDIA. 2009. Modelos Digitales de Terreno (MED). Online:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Misi%C3%B3n\\_Topogr%C3%A1fica\\_Radar\\_Shuttle](http://es.wikipedia.org/wiki/Misi%C3%B3n_Topogr%C3%A1fica_Radar_Shuttle)  
e

WIKIPEDIA 2011, Modelos digitales de terreno MED, online:

<http://es.wikipedia.org/wiki/cuencas>

# **ANEXOS**

**ANEXO 1: TOMAS FOTOGRÁFICAS DEL TRABAJO DE CAMPO**



**Foto 01: Quebrada "Cashivo".**



**Foto 02: Naciente de la microcuenca de la quebrada "El Zancudal".**



**Foto 03: Apertura de trocha sobre la divisoria.**



Foto 04: Insertando waypoints sobre zonas altas de la divisoria.



Foto 05: Zona más alta de la divisoria.



Foto 06: Asesor de tesis (centro), guardabosques del Cicfor Macuya (extremos) y tesista.

## ANEXO 2: FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ERROR PLANIMÉTRICO Y VERTICAL.

Punto	SRTM_x	Proj_x	(SRTM_x)-(Proj_x)	$\frac{((SRTM_x)-(Proj_x))^2}{(A)}$	SRTM_y	Proj_y	(SRTM_y)-(Proj_y)	$\frac{((SRTM_y)-(Proj_y))^2}{(B)}$	(A)+(B)	$\sqrt{((A) + (B))}$
1										
2										
3										
⋮										
n										

$$\frac{\sum^{(A)}}{n}$$

**Promedio (A)**  
**RMSE<sub>x</sub>**

$$\frac{\sum^{(B)}}{n}$$

**Promedio (B)**  
**RMSE<sub>y</sub>**

$$\frac{\sum^{(A+B)}}{n}$$

**Promedio (A + B)**  
**RMSE<sub>r</sub>**

Punto	Aster_x	Proj_x	(Aster_x)-(Proj_x)	$\frac{((Aster_x)-(Proj_x))^2}{(A)}$	Aster_y	Proj_y	(Aster_y)-(Proj_y)	$\frac{((Aster_y)-(Proj_y))^2}{(B)}$	(A)+(B)	$\sqrt{((A) + (B))}$
1										
2										
3										
⋮										
n										

$$\frac{\sum^{(A)}}{n}$$

**Promedio (A)**  
**RMSE<sub>x</sub>**

$$\frac{\sum^{(B)}}{n}$$

**Promedio (B)**  
**RMSE<sub>y</sub>**

$$\frac{\sum^{(A+B)}}{n}$$

**Promedio (A + B)**  
**RMSE<sub>r</sub>**

Formatos de Recolección de datos para análisis comparativo del error planimétrico.

1	SRTM_z	Proj_z	Error_z	((SRTM_z)-(Proj_z)) <sup>2</sup>
2				
3				
⋮				
n				

$$\sum ((SRTM_z)-(Proj_z))^2$$

*Promedio* (((SRTM\_z)-(Proj\_z))<sup>2</sup>)  
**RMSEz**

1	Aster_z	Proj_z	Error_z	((Aster_z)-(Proj_z)) <sup>2</sup>
2				
3				
⋮				
n				

$$\sum ((Aster_z)-(Proj_z))^2$$

*Promedio* (((Aster\_z)-(Proj\_z))<sup>2</sup>)  
**RMSEz**

Formatos de recolección de datos para análisis comparativo del error vertical.

**ANEXO 3: DATOS DE GEOUBICACIÓN Y ERRORES OBTENIDOS DE LOS  
DEM's ASTER GDEM, SRTM y GPS GARMIN 60CSx.**

Cuadro 03: Datos digitales de la microcuenca de la quebrada "El Zancudal" usando los datos del ASTER GDEM (centroides de las curvas de nivel de los puntos más altos) y los datos tomados en campo (waypoints en zonas altas de la divisoria).

ID	ASTER GDEM			GPS Garmin 60CSx		
	Aster_X	Aster_y	Aster_z	Proj_x	Proj_y	Proy_z
1	500005.476	9018641.781	243.000	499988.677	9018675.445	225.553
2	499770.968	9018696.283	251.000	499736.039	9018720.481	231.321
3	499556.497	9018792.720	248.000	499625.622	9018821.107	229.638
4	499400.184	9018759.435	241.000	499314.835	9018791.396	233.000
5	499214.723	9018749.531	239.000	499276.779	9018761.832	240.453
6	499118.071	9018452.772	256.000	499091.675	9018417.569	247.423
7	498896.368	9018482.189	257.000	498893.339	9018416.795	248.865
8	498698.595	9018147.328	251.000	498702.827	9018172.250	245.500
9	498560.905	9018276.847	253.000	498630.297	9018208.295	239.011
10	498352.563	9018084.463	254.000	498325.064	9018064.566	251.749
11	498637.235	9017594.810	243.000	498592.838	9017564.626	238.771
12	498586.050	9017416.298	254.000	498584.586	9017421.890	240.453
13	498791.134	9017110.494	261.000	498794.445	9017108.393	243.577
14	499577.148	9017504.604	262.000	499560.976	9017533.919	243.337
15	499681.928	9017608.677	256.000	499693.875	9017612.132	240.453
16	499712.436	9017742.591	255.000	499714.407	9017697.460	237.089
17	499726.555	9017930.521	261.000	499758.015	9017941.101	240.453
18	500096.213	9018166.562	252.000	500102.170	9018188.913	225.072
19	500249.555	9018142.379	251.000	500233.542	9018152.096	230.119
20	500287.681	9018364.926	235.000	500271.770	9018346.188	197.675

Cuadro 04: Datos digitales de la microcuenca de la quebrada “El Zancudal” usando los datos del SRTM (centroides de las curvas de nivel de los puntos más altos) y los datos tomados en campo (waypoints en zonas altas de la divisoria).

ID	SRTM			GPS Garmin 60CSx		
	SRTM_X	SRTM_y	SRTM_z	Proj_x	Proj_y	Proy_z
1	500313.210	9018089.750	239.000	500233.542	9018152.096	230.120
2	500081.690	9018079.090	238.000	499957.334	9018159.065	233.965
3	499933.110	9017853.390	244.000	499846.579	9017919.557	242.376
4	499680.260	9017530.160	236.000	499693.875	9017612.132	240.454
5	499685.130	9017260.700	242.000	499639.984	9017348.316	247.183
6	499313.510	9017125.300	244.000	499283.396	9017198.719	244.780
7	498899.857	9017159.229	235.000	498869.992	9017198.051	242.136
8	498670.690	9017176.690	231.000	498614.957	9017250.178	241.415
9	498623.410	9017354.570	231.000	498564.718	9017378.502	240.213
10	498583.050	9017706.180	235.000	498592.838	9017564.626	238.771
11	498303.330	9017713.670	236.000	498242.183	9017717.986	252.951
12	497870.970	9017735.610	235.000	497818.164	9017765.430	251.989
13	497624.910	9017855.890	235.000	497567.589	9017896.179	249.346
14	497781.460	9018114.460	237.000	497732.445	9018160.114	248.384
15	498213.370	9018090.890	239.000	498163.204	9018123.986	250.547
16	498379.430	9018038.820	236.000	498325.064	9018064.566	251.749
17	498686.940	9018402.820	235.000	498630.297	9018208.295	239.012
18	499118.800	9018379.250	240.000	499091.675	9018417.569	247.423
19	499311.990	9018714.840	236.000	499276.779	9018761.832	240.454
20	499568.450	9018921.190	237.000	499580.720	9018984.340	234.205
21	499790.440	9018650.700	233.000	499736.039	9018720.481	231.321
22	500037.950	9018550.240	230.000	500054.893	9018574.197	228.918

Cuadro 05: Datos del error lineal "X" y "Y", en ASTER GDEM y SRTM.

Puntos	Error-ASTER (X)	Error-ASTER (Y)	Error-ASTER (planimétrico)	Error-SRTM (X)	Error-SRTM (Y)	Error-SRTM (planimétrico)
1	16.799	-33.664	37.623	79.668	-62.346	101.163
2	34.929	-24.198	42.492	124.356	-79.975	147.853
3	-69.125	-28.387	74.727	86.531	-66.167	108.930
4	85.349	-31.961	91.137	-13.615	-81.972	83.095
5	-62.056	-12.301	63.263	45.146	-87.616	98.563
6	26.396	35.203	44.000	30.114	-73.419	79.355
7	3.029	65.394	65.464	29.865	-38.822	48.980
8	-4.232	-24.922	25.279	55.733	-73.488	92.232
9	-69.392	68.552	97.543	58.692	-23.932	63.384
10	27.499	19.897	33.942	-9.788	141.554	141.892
11	44.397	30.184	53.686	61.147	-4.316	61.299
12	1.464	-5.592	5.780	52.806	-29.82	60.644
13	-3.311	2.101	3.921	57.321	-40.289	70.064
14	16.172	-29.315	33.480	49.015	-45.654	66.983
15	-11.947	-3.455	12.437	50.166	-33.096	60.100
16	-1.971	45.131	45.174	54.366	-25.746	60.154
17	-31.46	-10.58	33.191	56.643	194.525	202.604
18	-5.957	-22.351	23.131	27.125	-38.319	46.948
19	16.013	-9.717	18.731	35.211	-46.992	58.720
20	15.911	18.738	24.582	-12.27	-63.15	64.331
21				54.401	-69.781	88.481
22				-16.943	-23.957	29.343

Cuadro 06: Datos del error vertical "Z", en ASTER GDEM y SRTM.

<b>Puntos</b>	<b>Error-SRTM (z)</b>	<b>Error-ASTER GDEM (z)</b>
1	8.880	17.447
2	4.035	19.679
3	1.624	18.362
4	-4.454	8.000
5	-5.183	-1.453
6	-0.780	8.577
7	-7.136	8.135
8	-10.415	5.500
9	-9.213	13.989
10	-3.771	2.251
11	-16.951	4.229
12	-16.989	13.547
13	-14.346	17.423
14	-11.384	18.663
15	-11.547	15.547
16	-15.749	17.911
17	-4.012	20.547
18	-7.423	26.928
19	-4.454	20.881
20	2.795	37.325
21	1.679	-
22	1.082	-

**ANEXO 4: CUADROS DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS DEL ERROR,  
EN ASTER GDEM Y SRTM.**

**Cuadro 07: Distribución de frecuencias del error vertical "Z", en ASTER GDEM.**

Intervalos LI - LS	Marca de Clase Yi	f1	F1	h1	H1	h1%	H1%
[-1.453 - 6.303]	2.425	4	4	0.2	0.2	20	20
[ 6.303 - 14.058]	10.180	5	9	0.25	0.45	25	45
[ 14.058 - 21.814]	17.936	9	18	0.45	0.9	45	90
[ 21.814 - 29.569]	25.692	1	19	0.05	0.95	5	95
[ 29.569 - 37.325]	33.447	1	20	0.05	1	5	100
		20	-	1		100	

**Cuadro 08: Distribución de frecuencias del error vertical "Z", en SRTM.**

Intervalos LI - LS	Marca de Clase Yi	f1	F1	h1	H1	h1%	H1%
[-16.989 -11.819]	-14.404	4	4	0.182	0.182	18.182	18.182
[-11.819 -6.649]	-9.234	6	9	0.273	0.455	27.273	45.455
[-6.649 -1.479]	-4.064	5	18	0.227	0.682	22.727	68.182
[-1.479 3.691]	1.106	5	19	0.227	0.909	22.727	90.909
[ 3.691 8.861]	6.276	2	20	0.091	1.000	9.091	100.000
		22	-	1		100	

**Cuadro 09: Distribución de frecuencias del error lineal "X", en ASTER GDEM.**

Intervalos LI - LS	Marca de Clase Yi	f1	F1	h1	H1	h1%	H1%
[-69.392 -38.443]	-53.918	3	4	0.15	0.15	15	15
[-38.443 -7.495]	-22.970	2	11	0.1	0.25	10	25
[-7.495 23.452]	7.979	10	15	0.5	0.75	50	75
[ 23.452 54.400]	38.927	4	18	0.2	0.95	20	95
[ 54.400 85.349]	69.875	1	20	0.05	1	5	100
		20	-	1		100	

**Cuadro 10: Distribución de frecuencias del error lineal "X", en SRTM.**

Intervalos LI - LS	Marca de Clase Yi	f1	F1	h1	H1	h1%	H1%
[-16.943 - 11.316]	-2.8131	4	4	0.18	0.18	18.18	18.18
[ 11.316 - 39.576]	25.4467	4	8	0.18	0.36	18.18	36.36
[ 39.576 - 67.836]	53.7065	11	19	0.50	0.86	50.00	86.36
[ 67.836 - 96.096]	81.9663	2	21	0.09	0.95	9.09	95.45
[ 96.096 - 124.356]	110.2261	1	22	0.05	1.00	4.55	100.00
		22	-	1		100	

Cuadro 11: Distribución de frecuencias del error lineal “Y”, en ASTER GDEM.

Intervalos Li - LS	Marca de Clase Yi	f1	F1	h1	H1	h1%	H1%
[-33.664 _ -13.220]	-23.442	7	4	0.35	0.35	35	35
[-13.220 _ 7.222]	-2.999	6	11	0.3	0.65	30	65
[ 7.222 _ 27.665]	17.444	2	15	0.1	0.75	10	75
[ 27.665 _ 48.108]	37.887	3	18	0.15	0.9	15	90
[ 48.108 _ 68.552]	58.330	2	20	0.1	1	10	100
		20	-	1		100	

Cuadro 12: Distribución de Frecuencias del Error Lineal “Y”, en SRTM.

Intervalos Li - LS	Marca de Clase Yi	f1	F1	h1	H1	h1%	H1%
[-87.616 _ -31.187]	-59.4019	15	15	0.68	0.68	68.18	68.18
[-31.187 _ 25.240]	-2.9737	5	20	0.23	0.91	22.73	90.91
[ 25.240 _ 81.668]	53.4545	0	20	0.00	0.91	0.00	90.91
[ 81.668 _ 138.096]	109.8827	0	20	0.00	0.91	0.00	90.91
[ 138.096 _ 194.525]	166.3109	2	22	0.09	1.00	9.09	100.00
		22	-	1		100	

ANEXO 5: FIGURAS SOBRE COMPARACIÓN DE DIVISORIA Y MICROCUENCAS EN SRTM Y ASTER GDEM.

FIGURA 6. Comparación de divisoria entre Srtm y Gps Garmin 60csx

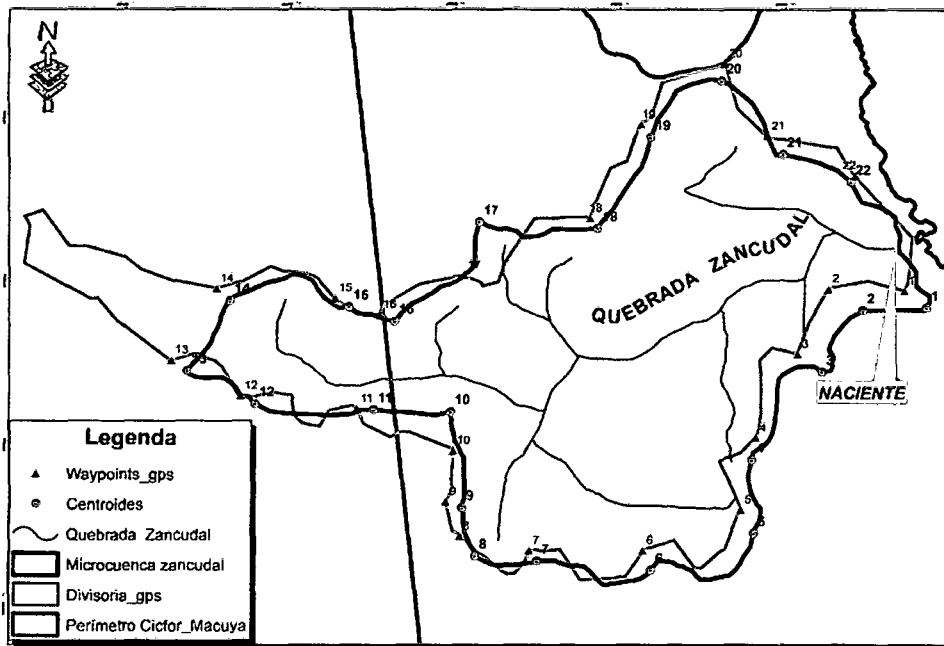


FIGURA 7. Comparación de divisoria entre Aster Gdem y Gps Garmin 60csx.

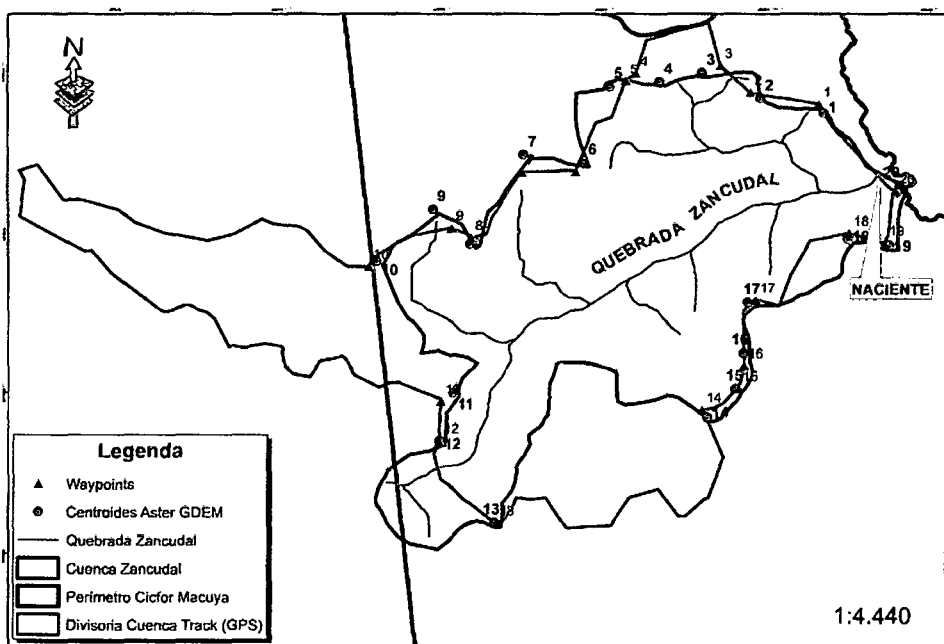
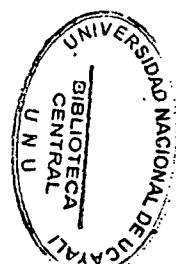
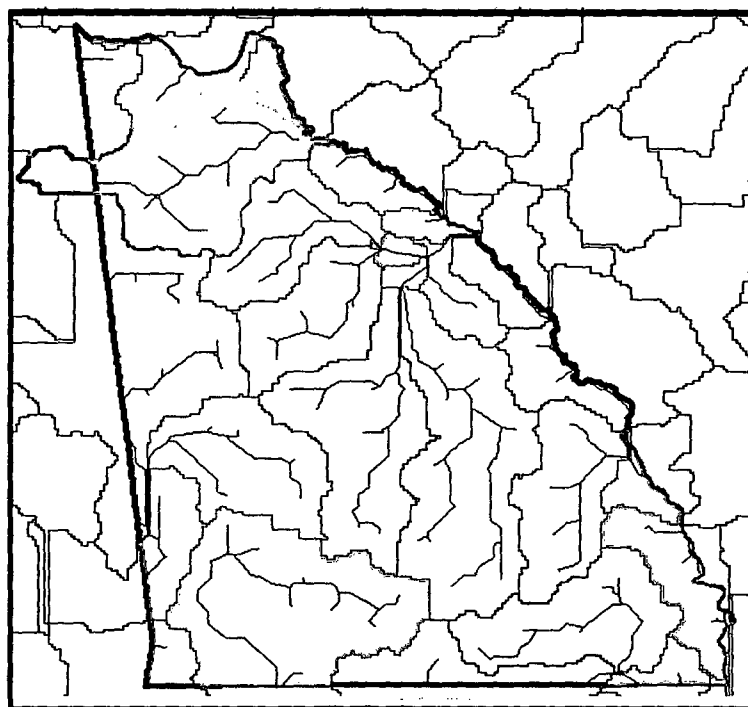


FIGURA 8. Cuencas totales y red hidrográfica CICFOR en SRTM.



475T

FIGURA 9. Cuencas totales y red hidrográfica CICFOR en ASTER GDEM.

