

**Análisis Morfométrico de la Cuenca del Río Mulaló utilizando
herramientas de SIG**

Trabajo de Grado Presentado Para Obtener El Título De
Especialista en Gestión del Territorio y Avalúos
Universidad Santo Tomas, Bogotá.

Mario Andrés Villota Rosero

Abril 2019

DEDICATORIA

A mi hijo Adrián...

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVO GENERAL	11
2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	12
3. ANTECEDENTES – HISTORIA DEL ARTE – PROTOCOLO ESTÁNDAR	13
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	75
5. JUSTIFICACIÓN	77
6. METODOLOGÍA	78
6.1. PROCESAMIENTO EN EL SOFTWARE ERDAS IMAGINE 9.2	78
6.1.1. <i>Composición de las Imágenes</i>	84
6.1.2. <i>Cambio del Sistema de Proyección de las Imágenes de Satélite</i>	85
6.1.3. <i>Obtención de las Ventanas</i>	85
6.1.4. <i>Corrección Atmosférica</i>	86
6.1.5 <i>Composición del MDE SRTM3 y las Imágenes Satelitales</i>	88
6.2. PROCESAMIENTO EN EL SOFTWARE ARCGIS 10.1 E IDRISI SELVA	90
6.2.1. <i>Corrección del MDE SRTM3</i>	90
6.2.2. <i>Generación de la Dirección de Flujos</i>	91
6.2.3. <i>Generación del Flujo Acumulado</i>	92
6.2.4. <i>Delimitación de la Cuenca y Análisis Morfométrico</i>	93
CONCLUSIONES	103
IMPACTOS Y BENEFICIOS	105
RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.	15
Figura 2. DEM extraído de la imagen ASTER en el que se indican las zonas de estudio.	15
Figura 3. DEM SRTM de referencia y área de traslape con el DEM ASTER.	16
Figura 4. Cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente en la zona 1.	17
Figura 5. Cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente en la zona 2.	18
Figura 6. Comparación de curvas hipsométricas.	19
Figura 7. Hojas digitales del SIG-250.	20
Figura 8. Path/Row del Satélite Landsat 7 para las Islas Malvinas.	21
Figura 9. Modelo digital de terreno.	23
Figura 10. Diferencias entre la red sintética generada con el umbral default (izquierda), la hidrografía vectorial (centro) y la red sintética generada con el umbral elegido (derecha).	25
Figura 11. Cuencas generadas automáticamente (arriba) y agrupadas manualmente (abajo).	27
Figura 12. Ubicación de las cuencas seleccionadas: (1) río Warrah, (2) río Chartres, (3) arroyo	28
Figura 13. Área de estudio, cuenca Asu.	31
Figura 14. Mapa de vegetación RADAM (vectores blancos). A y B son formaciones forestales que ocurren en las cuencas hidrográficas (delimitado en vectores negros), de acuerdo con la clasificación RADAM-BRASIL.	31
Figura 15. Proceso de los datos del SRTM.	33
Figura 16. Proceso para el Talvegue.	35
Figura 17. Mapas Morfométricos de la Cuenca hidrográfica Asu: dirección y ángulo de la pendiente, extraídos de los MDE originales (arriba) y refinados (abajo).	36

Figura 18. Mapas Morfométricos de la Cuenca hidrográfica Así: perfil y plano de curvatura, extraídos de los MDE originales (arriba) y refinados (abajo).	36
Figura 19. Mapas Morfométricos de la Cuenca hidrográfica Así: elevación y delimitación del Talweg, extraídos de los MDE originales (arriba) y refinados (abajo).	37
Figura 20. Gráficas de dispersión entre las variables morfométricas de la Cuenca Asu (resultados de los datos originales del SRTM-90m en blanco y refinados en negro).	38
Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología.	39
Figura 22. MDE de la Cuenca Erau	40
Figura 23. Eco-cuencas del área de estudio (Cuenca Erau).	45
Figura 24. Procedimiento integrado para la preparación de mapas temáticos.	47
Figura 25. Red de drenaje en imagen satelital.	48
Figura 26. Mapa de Lineamientos de la zona de estudio.	48
Figura 27. Mapa Hidro-geomorfológico de la zona de estudio	49
Figura 28. Mapa de aguas subterráneas de las partes altas de la zona de estudio.	49
Figura 29. Mapa de Contornos.	51
Figura 30. Cuencas priorizadas.	53
Figura 31. Red de Drenaje. Cuencas del Río Seco Chacras de Coria y Tejo. Mendoza (Argentina)	56
Figura 32. Geomorfología área de estudio.	58
Figura 33. Drenaje área de estudio.	59
Figura 34. Mapas de suelo del área de estudio.	60
Figura 35. Uso del suelo del área de estudio.	60
Figura 36. Mapa Topográfico de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.	64
Figura 37. Mapa Geomorfológico de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.	65
Figura 38. Mapa de Pendientes de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.	65
Figura 39. Curva Hipsográfica de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.	66
Figura 40. Perfil de Talweg, de la Quebrada Cojup.	66
Figura 41. Metodología general.	68

Figura 42. Modelo USLE en conjunto con SR y SIG para la estimación de la del suelo.	69
Figura 43. Mapa de la sub-cuenca de la cuenca Trijuga, Nepal.	70
Figura 44. Modelo USLE en Conjunción con RS & SIG para estimar la erosión del suelo.	72
Figura 45. Mapa de priorización en la conservación de la cuenca Trijuga, Nepal.	74
Figura 46. Localización general del área de estudio.	78
Figura 47. Imágenes Satelitales de la zona de estudio (TM a la izquierda y ETM+ a la derecha).	79
Figura 48. Esquema del sistema TM Landsat.	79
Figura 49. MDE SRTM3 de la zona de estudio.	82
Figura 50. Cobertura de los datos recogidos en la misión SRTM.	82
Figura 51. Distribución por continentes de los datos del modelo SRTM DTED.	83
Figura 52. Imágenes compuestas (bandas 1, 2 y 3), TM a la izquierda y ETM+ a la derecha, combinación R: 3, G: 2, B: 1 (color verdadero).	84
Figura 53. Imágenes recortadas (TM a la izquierda, ETM+ a la derecha y MDE SRTM3 abajo).	86
Figura 54. Imágenes sin Corrección Atmosférica (Banda 2, TM arriba, ETM+ abajo).	87
Figura 55. Imágenes corregidas atmosféricamente (Banda 2, TM arriba, ETM+ abajo).	88
Figura 56. Composición del MDE SRTM3 y la imagen TM.	89
Figura 57. Composición del MDE SRTM3 y la imagen ETM+.	89
Figura 58. Estancamiento del flujo de agua.	90
Figura 59. MDE SRTM3 corregido.	91
Figura 60. Dirección del flujo de agua.	91
Figura 61. Dirección de flujos del MDE SRTM3.	92
Figura 62. Red hídrica de la zona de estudio.	93
Figura 63. Mapa de pendientes para el área de la cuenca.	95
Figura 64. Mapa de longitud Principal	96

Figura 65. Cauce Principal de la Cuenca Hidrográfica del Rio Mulaló	97
Figura 66. Red Hídrica	98
Figura 67. Mapa de Orden de la Red Hídrica.	98
Figura 68. Curva hipsométrica de la Cuenca del Rio Mulaló	102
Figura 69. Perfil del Cauce Principal	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de calidad de ajuste entre los datos capturados en campo y extraídos.	17
Tabla 2. Características morfométricas de las cuencas delimitadas.	18
Tabla 3. Fechas de toma y fuente de las imágenes utilizadas.	21
Tabla 4. Valores de área y perímetro de las cuencas bajo análisis. Asignación de ID: (1) Cuenca del río Warrah, (2) Cuenca del río Chartres, (3) Cuenca del arroyo Verde, (4) Cuenca del río San Carlos, (5) Cuenca del arroyo Pedro y (6) Cuenca del arroyo Orqueta.	28
Tabla 5. Valores de Densidad de drenaje, Frecuencia de drenaje y Coeficiente de Compacidad de las cuencas bajo análisis. Asignación de ID: ídem Tabla 4	29
Tabla 6. Resumen estadístico de los datos de las 135 micro-cuencas hidrográficas de la cuenca hidrográfica Erau.	42
Tabla 7. Componentes principales del análisis de la cuenca hidrográfica Erau.	44
Tabla 8. Código de prioridad de las cuencas	52
Tabla 9. Aspectos lineales de la red de drenaje en las micro-cuencas de GV-41.	62
Tabla 10. Aspectos del área de la red de drenaje de las mini-cuencas de la cuenca GV-41.	62
Tabla 11. Pérdida forestal y de Suelo de la cuenca.	70
Tabla 12. Pérdida forestal y de suelo de las sub-cuencas.	71
Tabla 13. Calificación de los Indicadores de Condición.	73
Tabla 14. Priorización dada por la matriz de análisis con DSI y PC.	74
Tabla 15. Priorización en la conservación de las sub-cuencas.	74
Tabla 16. Principales aplicaciones de las bandas del TM.	80
Tabla 17. Parámetros de las Imágenes Landsat ETM+.	81
Tabla 18. Valores de dirección de flujo.	92
Tabla 19. Parámetros morfométricos de la Cuenca Hidrográfica del Río Mulaló	101

INTRODUCCIÓN

Una cuenca es un área natural en la cual el agua se desaloja a través de un sinnúmero de corrientes, cuyos caudales son recogidos por un colector común, que sirve de eje de la zona. La extensión de una cuenca puede variar, desde pocas a miles de hectáreas. (Henao, 1988).

El manejo integral de las cuencas hidrográficas constituye actualmente una de las herramientas de solución más importantes para facilitar la gestión sostenible y el uso ordenado de los recursos naturales (CORANTIOQUIA, 2002).

Dentro de las actividades de un planeamiento territorial, el espacio geográfico definido por una cuenca hidrográfica es de fundamental importancia para definir las acciones tendientes a la ordenación de los recursos. Identificados los problemas ambientales, uno de los principales estudios básicos corresponde a definir características del relieve que influyen en el comportamiento hidrológico (Palavecino, Kozarik, & Maiocco, 2002).

El objetivo de este trabajo consiste en determinar los parámetros que definen la morfometría de la red de drenaje de la cuenca del Río Mulaló. Para esto se utilizó 2 Imágenes Satelitales Landsat (TM y ETM+) y un MDE (Modelo Digital de Elevación SRTM3I), los cuales se procesaron en el software ERDAS Imagine 9.2. Posteriormente, se trabajó en un Sistema de Información Geográfico (ArcGIS 10.4), que permitió definir el área y los cursos de agua a través del MDE. Con los datos obtenidos se calculó los principales parámetros de la morfometría de la red de drenaje y se generó el gráfico correspondiente a la curva hipsométrica.

Esta cuenca se encuentra ubicada en el Municipio de Yumbo, Departamento del Valle del Cauca, Colombia, la cual drena desde la vertiente Oriental de la

Cordillera Occidental, hasta llegar a la fosa sedimentaria de origen aluvial del Río Cauca.

1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo consiste en describir y medir la forma de la cuenca hidrográfica del Río Mulaló, lo cual es un factor muy importante para determinar su comportamiento particular y su influencia en el Corregimiento de Mulaló, ante crecidas y riesgos que su dinamismo pueda provocar a la comunidad.

2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener datos exactos sobre la ubicación y características morfométricas de la cuenca del Río Mulaló.
- Calcular los parámetros descriptivos de la cuenca del Río Mulaló.
- Conocer la forma de la cuenca hidrográfica para su correcta interpretación.
- Concluir si por la morfometría de la cuenca existe probabilidad de inundaciones en el Corregimiento de Mulaló.
- Generar un insumo inicial para estudios posteriores que permitan la planificación y el desarrollo del territorio.

3. ANTECEDENTES – HISTORIA DEL ARTE – PROTOCOLO ESTÁNDAR

Los autores (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007), describen en su trabajo el proceso seguido para la extracción de DEMs a partir de imágenes ASTER en dos zonas con características de relieve marcadamente diferente en la sierra sur de la República del Ecuador. En este trabajo se extrajo un DEM a partir de una imagen ASTER, se analizó su calidad y se derivaron parámetros que permiten un posterior estudio morfométrico de cuencas hidrográficas.

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

Para extraer un DEM georeferenciado es necesario contar con una serie de puntos de control (GCPs) con posición y elevación perfectamente conocidas, a partir de los cuales, es posible asignar valores reales de elevación a cada uno de los píxeles del DEM extraído.

Adicionalmente, en lugares en donde no se disponga de GCP, es conveniente coleccionar puntos comunes a las dos imágenes (TPs) los mismos que se ubican de forma interactiva en pantalla y de los cuales se conoce su posición, requiriéndose solamente una elevación aproximada de ellos.

Los TPs, contribuyen a incrementar la precisión del modelo matemático utilizado en la extracción del DEM.

Se recopilamos puntos de control en campo mediante GPS. Los puntos se coleccionaron en lugares fácilmente identificables en la imagen y en el terreno, distribuyéndolos en toda la imagen y cubriendo la variación altitudinal que la zona de estudio presenta. Con este procedimiento se recopilamos en campo 30 puntos,

4 de ellos se emplearon como GCPs; y los restantes, se emplearon como puntos de comprobación para verificar la calidad del DEM extraído. Se emplearon 5 TP y se obtuvo un RMSE del orden de los 25 m. Este DEM fue utilizado para los análisis posteriores a nivel de cuenca hidrográfica.

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

Se verificó la calidad del DEM en base a la comparación entre las cotas de 26 puntos de verificación tomados en el terreno vía GPS y las cotas extraídas del DEM generado en los puntos correspondientes, calculando el coeficiente de correlación (R^2), el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (EF), el coeficiente de determinación (CD), el error cuadrático medio (RMSE), el error medio (BIAS) y el error medio absoluto (MAE). Adicionalmente se consideró un DEM SRTM (USGS, 2000) para fines de comparación, el mismo que fue remuestreado a 15m.

Se seleccionaron dos zonas con características topográficas diferentes, tanto en el DEM ASTER cuanto en el DEM SRTM. En cada una de ella se procedió a delimitar automáticamente una cuenca hidrográfica utilizando AVSWAT-X. Se determinaron las características morfométricas ya descritas, en las cuencas obtenidas del DEM ASTER y se compararon con las obtenidas del DEM SRTM. Se determinó el perfil transversal del cauce principal en cada cuenca a través de extracciones realizadas del DEM ASTER y del DEM SRTM y se calculó su pendiente media.

Visualmente existe una gran correspondencia entre el DEM ASTER y el DEM SRTM, siendo evidentes los grandes vacíos de información producidos por la falta de coherencia entre las imágenes 3N y 3B utilizadas; Gran parte de dicha falta de

coherencia de debe a la presencia considerable de nubes en la porción derecha de la imagen ASTER.

Figura 1. Flujograma de trabajo

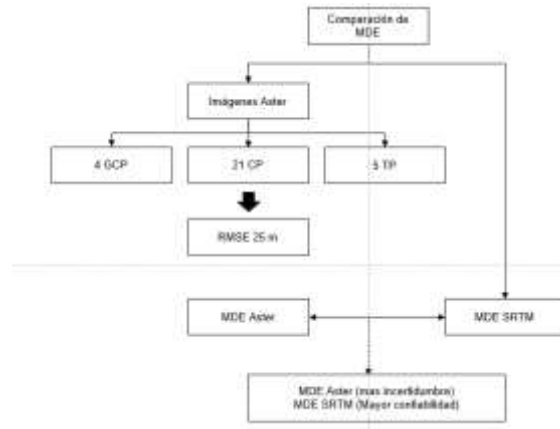
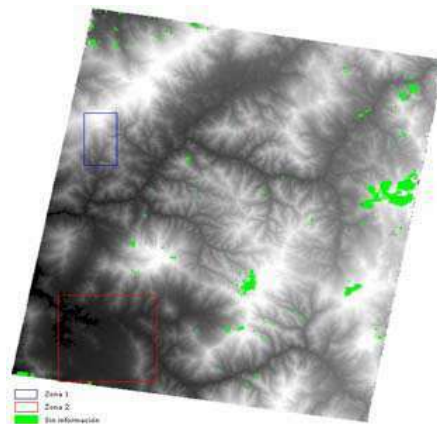
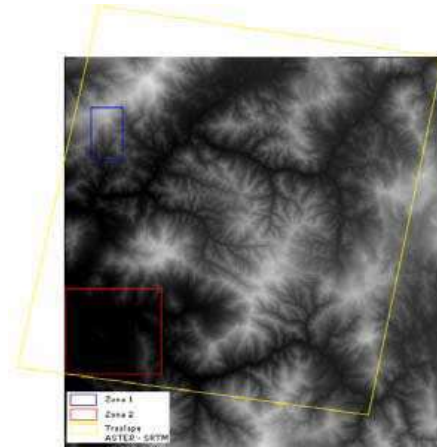


Figura 2. DEM extraído de la imagen ASTER en el que se indican las zonas de estudio.



Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

Figura 3. DEM SRTM de referencia y área de traslape con el DEM ASTER.



Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

De la comparación realizada entre los GCPs tomados en campo y sus correspondientes extracciones realizadas sobre el DEM ASTER y el DEM SRTM, se observa que si bien el coeficiente de correlación R^2 es bastante satisfactorio en ambos casos, el valor del error medio cuadrático está dentro de lo esperado en el caso del DEM SRTM, pero presenta un valor no muy satisfactorio en el caso del DEM ASTER, especialmente si se considera la resolución espacial de la imagen.

Caso similar ocurre con el error medio y el error medio absoluto. La eficiencia de Nash presenta en ambos casos valores cercanos a uno, que nos da la idea de que los datos analizados si poseen mayoritariamente una relación 1:1. El coeficiente de determinación permite determinar que el DEM ASTER subestima los valores reales a diferencia del DEM SRTM que los sobrestima.

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

	ASTER	SRTM
R²	0.998	0.999
RMSE	24.968	16.986
MAE	21.154	14.000
BIAS	11.308	-10.769
EF	0.997	0.999
CD	0.975	1.027

Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

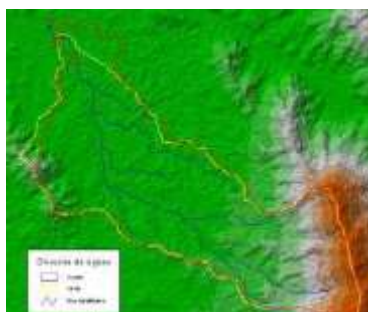
Figura 4. Cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente en la zona 1.



Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

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

Figura 5. Cuencas hidrográficas delimitadas automáticamente en la zona 2.



Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

Tabla 2. Características morfométricas de las cuencas delimitadas.

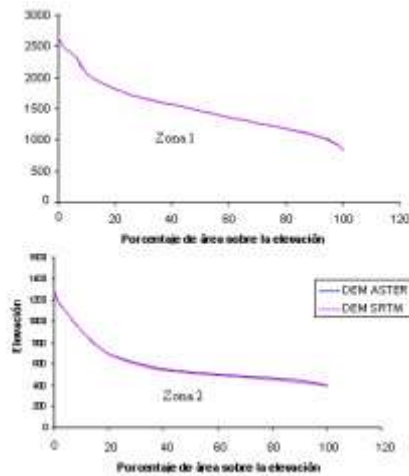
	Zona No. 1		Zona No. 2	
	SRTM	ASTER	SRTM	ASTER
Área (Ha)	2133.4	2138	2215	2150
Perim (Km)	28.4	30.3	33.12	37.26
L	10408	10666	13222	12516
Kf (m)	0.2	0.19	0.13	0.14
Kc	1.7	1.8	2	2.2
Hm (m)	1521.5	1520	599.2	589.5
Hmin (m)	830	842	402	386
Hmáx (m)	2644	2663	1322	1340
Desvest H	389.9	391.3	191.5	197.7
Dh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

Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

En general la falta de precisión en la determinación de la elevación de los puntos de control utilizados para extraer el DEM a partir de la imagen ASTER, así como la falta de coherencia entre las imágenes 3N y 3B pueden ser las causantes de la baja precisión del DEM extraído, pero los resultados obtenidos de los análisis morfométricos, permiten valorar las potencialidades del DEM ASTER,

presumiéndose que de contar con GCPs de precisión, como los levantados por un GPS con corrección diferencial e imágenes con un menor porcentaje de nubes, los resultados serían mucho más precisos.

Figura 6. Comparación de curvas hipsométricas.



Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

Los autores (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007), en su documento se refieren a la utilización de técnicas de teledetección para la obtención de información hidrológica básica de áreas de difícil acceso y escaso conocimiento, seleccionándose a tal efecto las Islas Malvinas.

La metodología implementada articuló el procesamiento digital de imágenes satelitales Landsat ETM+ con la utilización de información topográfica proveniente del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e información vectorial del área suministrada por el SIG-250 del Instituto Geográfico Militar (IGM).

La combinación de información cartográfica digital y de sensores remotos con herramientas de análisis espacial, enmarcado en un Sistema de Información Geográfica (SIG), proporciona un marco idóneo para la puesta en práctica y

evaluación de técnicas de análisis de las características del terreno y de la hidrología de un área (Mertes et al., 1999).

En este sentido, la delimitación preliminar de las cuencas de las Islas Malvinas constituye el producto del procesamiento y la interrelación de información obtenida a partir de imágenes Landsat ETM+, del SRTM y del SIG-250 (IGM).

El trabajo se realizó en gabinete, con un equipamiento informático de plataformas PC, que operan bajo ambiente Windows. Para el tratamiento de la información digital se utilizó el software Erdas Imagine 8.5 y productos ESRI: ArcGis 9 y ArcView 3.3, con sus extensiones Image Analyst para el procesamiento de la información satelital, y Spatial Analysis y HEC-GeoHMS para el procesamiento hidrológico del SRTM.

En la Figura 6 se muestran las 5 (cinco) hojas digitales que fueron seleccionadas a partir del Sistema de Información Geográfica (SIG-250), y empalmadas a fin de constituir la estructura geográfica de referencia del territorio analizado.

Figura 7. Hojas digitales del SIG-250.

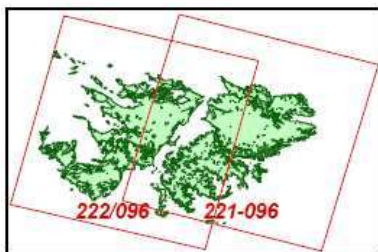


Fuente: (Oñate-Valdivieso & Bosque Sendra, 2007)

Debido a la cobertura nubosa, muy frecuente en el área de estudio, se utilizaron imágenes Landsat ETM+ de distintas fechas. Algunas de ellas fueron obtenidas en el sitio web del Global Land Cover Facility Program (GLCF) de la Universidad de Maryland (<http://glcfapp.umiacs.umd.edu>) y otras fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

Un total de 3 (tres) imágenes LANDSAT ETM+ (resolución espacial 28,5 metros) fueron procesadas para elaborar el mosaico satelital de las Islas Malvinas. En la Figura 7 se muestra el path/row de las imágenes utilizadas mientras que en la Tabla 3 se presentan las fechas de toma de las escenas y su fuente.

Figura 8. Path/Row del Satélite Landsat 7 para las Islas Malvinas.



Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

Tabla 3. Fechas de toma y fuente de las imágenes utilizadas.

Path/Row	Fecha	Fuente
221/096	19/10/1999	CONAE
221/096	9/01/2001	GLCF
222/096	24/09/1999	GLCF

Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

La Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fue un proyecto internacional conjunto entre la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y las Agencias Espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI). El mismo tuvo como objetivo la obtención de datos digitales topográficos del área situada entre los 60° Norte y los 56° Sur de la Tierra, mediante el uso de una técnica llamada interferometría radar, en la cual dos imágenes radar de un mismo sitio son tomadas desde dos posiciones diferentes. Por medio del procesamiento de la información altimétrica captada por ambas antenas, se generó un modelo digital de elevación de la superficie terrestre, siendo la NASA y el USGS (United States Geological Survey) los organismos responsables del procesamiento y publicación, respectivamente, de la

información recolectada en esta misión. A partir de 2003 se pusieron a disposición del público los datos para América del Sur, con una resolución de 3 segundos de arco (aprox. 90 metros) de tamaño de grilla, constituyendo un hecho de gran importancia para las tareas relacionadas con la conservación y gestión ambiental, la delimitación y planificación de cuencas hidrológicas y los estudios relacionados con la conservación de suelos y la biodiversidad (Moore, 2003).

Para el presente trabajo se utilizaron dos tiles o “azulejos” rectangulares de 1 grado de arco de extensión y 90 m de resolución espacial obtenidos del sitio web del Consorcio para la Información Espacial CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Este sitio brinda una interfaz gráfica muy práctica e intuitiva para la descarga de datos SRTM de diversos sectores del planeta, a la vez que sus datos (que pueden ser descargados en formato GEOTiff o ASCII) han sido objeto de un exhaustivo proceso de mejora (filtrados, relleno de píxeles vacíos, etc.) con respecto a los datos SRTM disponibles en el sitio del USGS.

La caracterización hidrológica primaria de las islas Malvinas fue realizada a partir de la utilización combinada de dos productos de la teledetección: imágenes Landsat ETM+ y un modelo digital de terreno (MDT) proveniente del SRTM.

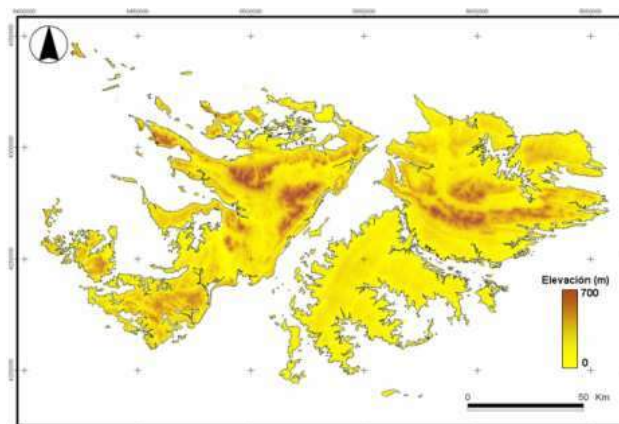
Para el procesamiento digital de las escenas utilizadas fue mantenido el tamaño original de píxel, y se implementó la siguiente secuencia metodológica: Selección de imágenes, lectura y conversión de formatos, selección de bandas espectrales, georreferenciación, realces y compatibilización espectral y generación del mosaico satelital.

Luego de su descarga en formato ASCII, los dos azulejos SRTM se convirtieron a formato GRID y se proyectaron a Faja 2 para su procesamiento y superposición con la información vectorial y satelital. Seguidamente, mediante herramientas de la extensión Spatial Analyst, los dos rectángulos fueron unidos a partir de mosaicos,

a fin de generar un MDT continuo y sin costuras para todo el archipiélago (Figura 8).

Las etapas de pre-procesamiento del MDT, generación de la red de drenaje sintética y delimitación de cuencas se realizaron con la extensión HEC-GeoHMS para ArcView (USACE, 2003). Esta extensión, que constituye una interface de acople con el modelo hidrológico HEC, presenta una serie de rutinas informáticas para el pre-procesamiento del terreno y para el cálculo de parámetros hidrológicos a nivel de cuenca y subcuenca.

Figura 9. Modelo digital de terreno.



Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

En este sentido, el primer paso consistió en generar un MDT “hidrológicamente corregido”, es decir, la elaboración de un MDT que represente con la mayor exactitud las características de la red de drenaje existente en el terreno (USACE, 2003). Para los fines del trabajo, esta tarea se efectuó en dos pasos: la imposición de la red de drenaje vectorial proveniente del SIG-250 sobre el MDT crudo, y el llenado de “depresiones”, celdas aleatorias con menor altura que sus circundantes y que constituyen un impedimento para el cálculo del movimiento del agua sobre el terreno.

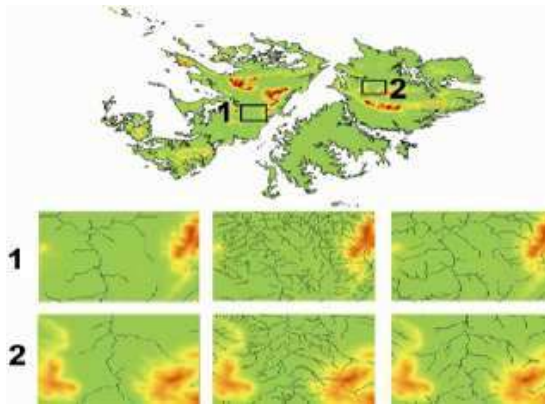
A continuación, se prosiguió con la rutina de pasos preestablecida por la extensión, los que permiten el cálculo y generación de las grillas de dirección de flujo, acumulación de flujo y red hidrográfica sintética en el área de trabajo.

Para este último paso, es necesaria la definición por parte del usuario de un umbral mínimo de acumulación de flujo (en número de píxeles o unidades de superficie) para dar inicio al cálculo de la red sintética. El valor de inicio asignado por defecto corresponde al 1% de la mayor acumulación calculada por el HEC-GeoHMS, y cuanto menor sea ese umbral, mayor será el número de cursos delineados y cuencas delimitadas.

Se realizaron cálculos de la red sintética evaluando diferentes valores de umbral, seleccionándose finalmente un valor de 2 km², por debajo del cual no se observaron diferencias significativas. A su vez, este valor permitió generar la red sintética más próxima respecto a la información del SIG-250, considerada a los fines del presente estudio como “verdad de campo”.

En la Figura 9 se presentan las diferencias entre la cantidad de cursos generados utilizando el umbral por defecto del 1% (5,356 km²) y con el valor de umbral utilizado para el presente trabajo (2 km²), frente a la información vectorial digital disponible.

Figura 10. Diferencias entre la red sintética generada con el umbral default (izquierda), la hidrografía vectorial (centro) y la red sintética generada con el umbral elegido (derecha).



Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

Definida la red de drenaje sintética, se procedió a la delimitación automática de cuencas y a su conversión a formato vectorial (polígono).

El software utilizado calcula la cuenca propia de cada segmento individual de curso sintético. Dado el número de cursos generados sintéticamente, se obtuvo una elevada cantidad de cuencas, muchas de ellas con superficies no representativas para la escala de trabajo elegida.

Con la herramienta basin merge (agrupación de cuencas) del HEC-GeoHMS, se procedió a realizar su agrupamiento manual, siguiendo un criterio hidrológico de confluencia de cursos hacia el emisario final, utilizando la red de drenaje del SIG-250 y el mosaico satelital como elementos de control para este proceso semiautomático.

Los parámetros morfométricos constituyen indicadores que son utilizados para realizar un análisis cuantitativo físico de las cuencas hidrográficas. Junto con la localización espacial, constituyen el dato más útil para evaluar en forma preliminar

las particularidades territoriales de una cuenca y esbozar características generales de la misma (Jardí, 1985).

De entre todos los cálculos posibles, y siguiendo la experiencia de Giraut et al. (2001), se escogieron los parámetros más utilizados en los análisis morfométricos tradicionales.

Área de cuenca (A): Es la que corresponde a la superficie de la misma y está limitada por las divisorias de agua que permiten identificarla.

Perímetro (P): Corresponde al cálculo de la longitud de la línea del perímetro o borde del área ocupada por la cuenca. Tanto A como P se calculan automáticamente mediante herramientas propias de los SIG.

Coeficiente de Compacidad (K): Relaciona el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo cuya área es igual a la de la cuenca. Matemáticamente queda expresado por la siguiente ecuación 1,

$$K = 0.28 \times \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right)$$

Donde P= perímetro de la cuenca, y A= área de la cuenca.

Este factor es indicativo de la concentración de los deflujos, donde si K se acerca a 1, se estará frente a una cuenca casi circular, mientras que un aumento en el valor del coeficiente indicará una mayor distorsión en la forma de la cuenca, volviéndose más alargada o asimétrica.

Densidad de Drenaje (Dd): Este parámetro cuantifica el grado de desarrollo de un sistema hidrográfico, relacionando la longitud total de los cauces de una cuenca y el área de la misma, de acuerdo a la siguiente expresión,

$$D_d = \frac{\sum L}{A}$$

donde L= longitud de cauces, y A= área de la cuenca.

Frecuencia de drenaje (Fd): Definido como el número de cauces por unidad de área, se expresa mediante la fórmula

$$F_d = \frac{\sum_1^k Nu}{A}$$

Donde Nu= número de cauces, y A= área de la cuenca.

La generación automática de cuencas permitió reconocer inicialmente 5009 unidades hídricas, las que fueron manualmente agrupadas en 1458 entidades, cuya configuración se presenta en la Figura 10.

Figura 11. Cuencas generadas automáticamente (arriba) y agrupadas manualmente (abajo).



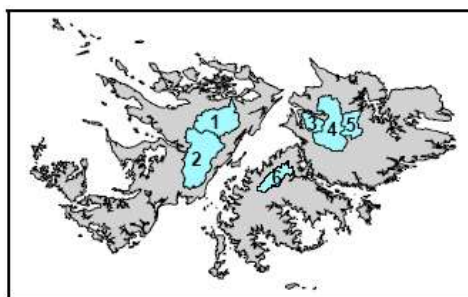
Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

Para el cálculo de los parámetros morfométricos, se seleccionaron seis cuencas en base a su representatividad respecto a los diversos modelos de drenaje

presentes en las islas: dos de ellas ubicadas en la isla Gran Malvina - ríos Warrah y Chartres - y cuatro en la isla Soledad - arroyos Verde, Pedro y Orqueta y río San Carlos (Figura 11).

Figura 12. Ubicación de las cuencas seleccionadas: (1) río Warrah, (2) río Chartres, (3) arroyo

Verde, (4) río San Carlos, (5) arroyo Pedro y (6) arroyo Orqueta.



Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

En las Tablas 4 y 5 se listan los cálculos obtenidos ordenados por ubicación geográfica.

Tabla 4. Valores de área y perímetro de las cuencas bajo análisis. Asignación de ID: (1) Cuenca del río Warrah, (2) Cuenca del río Chartres, (3) Cuenca del arroyo Verde, (4) Cuenca del río San Carlos, (5) Cuenca del arroyo Pedro y (6) Cuenca del arroyo Orqueta.

ID	A (Km ²)	P (Km)
1	341,68	123,82
2	536,83	160,55
3	97,91	57,46
4	401,57	155,02
5	145,53	79,82
6	151,52	103,71

Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

Tabla 5. Valores de Densidad de drenaje, Frecuencia de drenaje y Coeficiente de Compacidad de las cuencas bajo análisis. Asignación de ID: ídem Tabla 4

ID	D _d	F _d	K
1	0,849	0,427	1,875
2	1,336	1,391	1,940
3	1,003	0,766	1,625
4	1,027	0,819	2,166
5	0,829	0,570	1,852
6	1,385	1,240	2,359

Fuente: (Ludueña, Valladares, & Giraut, 2007)

Los autores (Valeriano, y otros, 2006), en su trabajo presentan una metodología para el refinamiento de los datos disponibles para Sur América del Radar Shuttle Topographic Misión para estudios detallados de cuencas hidrográficas en la Amazonía. Los datos originales han sido pre-procesados adecuadamente en un mapa de pocos detalles de las características de drenaje que permite las estimaciones digitales de variables morfométricas.

La resolución espacial (3'' a 1'', o ~90 a ~30 m) de los datos a través del Kriging resultó ser una solución interesante para construir modelos digitales de elevación con la presentación más adecuada de la tierra que los datos originales.

El perfeccionamiento de la resolución espacial interpolada por Kriging superó los principales obstáculos para el desagüe con el modelo original SRTM-90 m, tal como aleatoriedad espacial, artefactos y presentación poco realista debido al tamaño de píxel. El Kriging con un modelo de semivariograma Gaussiano provocó una suavización en el resultado del modelo digital de elevación (MDE), pero las características principales de drenaje para el modelo fueron preservadas.

El efecto canopy sobre el modelo de la superficie representó la principal limitación para el análisis del terreno después del tratamiento previo. Los datos respecto a una pequeña cuenca en Amazonas (~38km²), Brasil, fueron evaluados a través de técnicas de visualización, análisis morfométricos y diagramas de resultados. Los

datos mostraron limitaciones para su uso en la forma original, pero podría aplicarse para el modelado de cuencas hidrográficas en escalas relativamente detalladas descrito después del pre-procesamiento.

Este estudio fue parcialmente llevado sobre una zona de 150 Km x 100 Km que corresponde a una plancha de 1: 250 000, como se muestra en la Figura 12. Este SRTM Tiene una imagen de 1800 x 1200 (columnas x filas), tiene 30 x 30 muestras que presentan el análisis geoestadístico y la interpolación para la construcción del modelo digital de elevación.

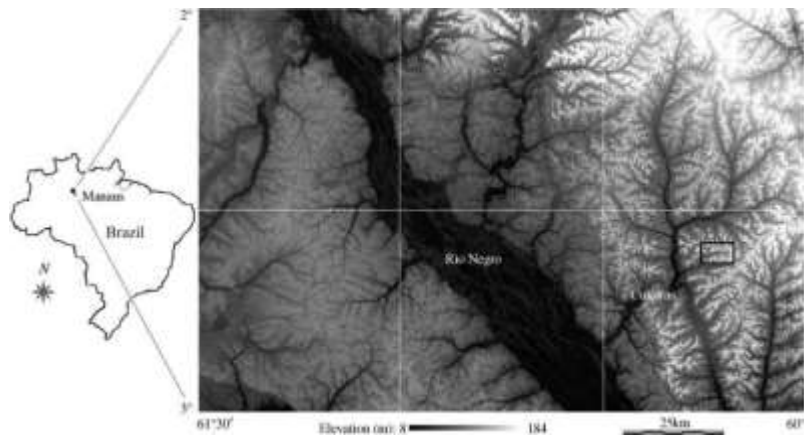
Después de las verificaciones preliminares, un pequeño subconjunto de la cuenca del río Asu fue seleccionado para un análisis detallado incluyendo análisis de controles morfométricos y sus comprobaciones. Asu es un afluente del río Cuieiras, que es afluente del Río Negro, la orientación del río es de nor-este a sur-este en la Figura 1. Se trata de un río de cuarto orden de 38.34km² en las cuencas hidrográficas con alturas que van de 40,28 a 125,70 m. El sitio se caracteriza por mesetas suavemente disectadas por pequeños arroyos. Lo dominante en las mesetas del suelo es un amarillo Oxisol, ricos en caolinita en arcilla, mientras que Spodosols, consistente en arena con tierra vegetal de materia orgánica, prevalecen en las tierras bajas.

El clima es clasificado con niveles de precipitación anual promedio de 2800 mm. La cuenca está cubierta por vegetación inalteradas llamada bosques de tierra firme (en las tierras altas) y campinarana en el fondo del valle.

En la Figura 13 hay una Imagen Landsat / Thematic Mapper (TM) de 1999 que muestra bosques en el área de estudio cerca de la fecha de adquisición de datos del SRTM. El Landsat / Thematic Mapper muestra comprobó y confirmó la densa cubierta forestal en el área de estudio. La figura 13 muestra los dos tipos de formaciones forestales que cubre el sitio de estudio, de acuerdo con el proyecto

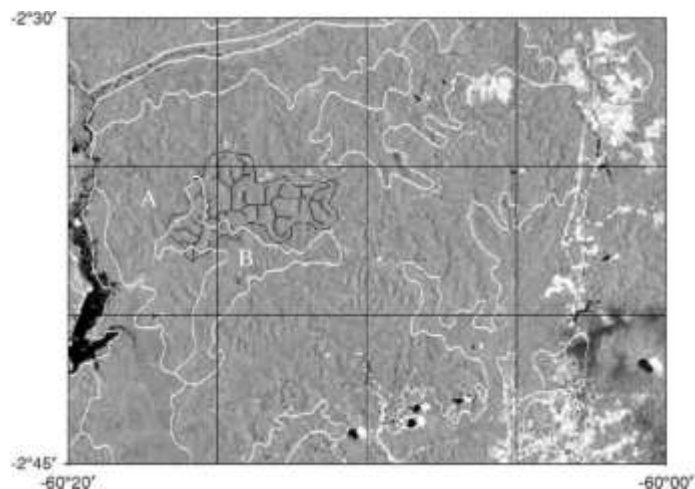
RADAM-BRASIL (1978): En A, las tierras altas están cubiertas con densos bosques con árboles emergentes en combinación con bosque abierto con palmeras y densas campinarana leñosas, mientras que los pisos del valle pueden ser poco cubiertos. En B, también prevalecen los densos bosques emergentes, pero asociado a la apertura de bosque de palmeras disectados.

Figura 13. Área de estudio, cuenca Asu.



Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Figura 14. Mapa de vegetación RADAM (vectores blancos). A y B son formaciones forestales que ocurren en las cuencas hidrográficas (delimitado en vectores negros), de acuerdo con la clasificación RADAM-BRASIL.



Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Las principales diferencias estructurales entre estos tipos de formaciones forestales están relacionadas con la altura de los árboles y la densidad: los bosques densos de tierra firme son más altos que campinaranas, con la disminución de la densidad de árboles y biomasa. Estas diferencias también son relacionadas con su condición topográfica.

El tratamiento consistió en la modificación de los datos originales del SRTM en un nuevo MDE con características deseables para el modelado de cuencas hidrográficas. Primero la apreciación de los datos mostrados, objetos como árboles, edificios, antenas que contribuyen pocas variaciones abruptas.

Las modificaciones fueron: la mejora de la resolución de 3" a 1" (~30 m); eliminación de los fallos de datos, reducción de artefactos, y la distribución espacial de la aleatoriedad, estimado como efecto a través del análisis geoestadístico.

La interpolación de kriging de los datos de elevación del SRTM siguió básicamente un enfoque geoestadístico originalmente diseñado para preparar los MDE a partir de curvas de nivel, digitalización (geográfica y de sus posiciones), como por ejemplo análisis e interpolación geoestadística.

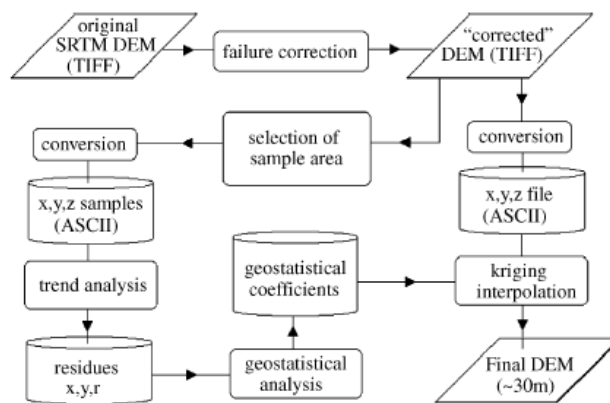
El método fue aplicado al a los datos del SRTM después de seleccionar (y desmontar) áreas para el análisis geoestadístico. Este método usa los residuos obtenidos de análisis de tendencias para garantizar geoestacionariamente el conjunto de datos presentados al análisis geoestadístico.

(Valeriano, y otros, 2006) mostró que los modelos de variogramas calculados con residuos de tendencia lineal de datos topográficos se mostraron parecidos al modelo clásico de variogramas, los cuales presentaban un umbral claramente

definido. El análisis de variogramas de estos residuos proveyeron los coeficientes geoestadísticos aplicados en la interpolación Kriging de los datos de elevación del STRM original.

La Figura 15 muestra el flujo completo de datos de una imagen Tiff descargada del SRTM hasta el MDE final.

Figura 15. Proceso de los datos del SRTM.



Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Los programas computacionales usados fueron:

Para la corrección de errores, muestreo y exportación de datos ASCII ENVI (Research Systems Inc., 2002). Para el análisis de hilos y cálculo de residuos - MINITABs (MINITAB Inc., 2000). Para el análisis geoestadístico -VarioWin (Pannatier, 1996) y para la interpolación de Kriging -Surfer (Golden Software, 1995).

Después de la generación del nuevo MDE Idris se usó para operaciones tales como la aplicaron de test y extracción de variables morfométricas.

Los resultados fueron evaluados a través de la visualización de análisis gráficos y estadísticos y observando salidas morfométricas. El relieve sombreado renderizado por Surfer típicamente presenta el relieve en una exageración vertical para balancear superficies iluminadas y sombreadas en cada Imagen independientemente del modelo del relieve actual. Esta propiedad en combinación con la posibilidad de controlar la iluminación de la geometría, permite observaciones detalladas de las características de la superficie, representando una herramienta muy importante para la evaluación visual de superficies numéricas antes de su inserción a un SIG.

El proceso de tres pasos mostrado en la Figura 15. Fue repetido en las direcciones de los 4 filtros y los resultados fueron superpuestos para producir un mapa de división de Talvegue para todas las direcciones.

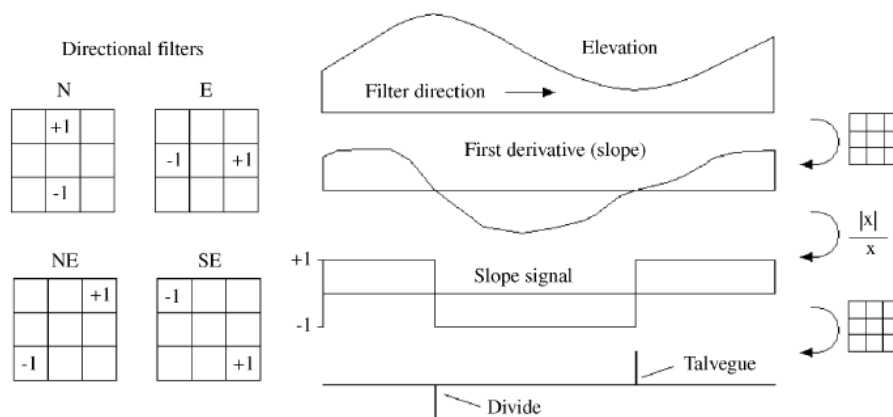
El ángulo de pendiente, dirección y plan, y perfiles de curvaturas fueron calculadas utilizando un conjunto de algoritmos desarrollados en trabajos anteriores. El ángulo de la pendiente de las imágenes fue calculada usando un programa de mapeo basado en la suma de vectores de la pendiente ortogonal, como fue cuantificada a través del movimiento de ventanas en los sistemas de orientación “X” y “+”. De acuerdo a la mejor correlación en cuanto a medidas manuales, la pendiente fue calculada escogiendo el máximo de resultantes entre la orientación y la altura máxima en cada dirección.

El método para mapear el perfil de curvatura (Valeriano, y otros, 2006)) está basado en ventanas locales de 3x3 píxeles y diseñados para desempeñar el segundo orden derivativo geométricamente a través del perfil de la pendiente. Los cálculos del a curvatura requerían de las resoluciones espaciales del MDE como una de las entradas, para calcular un valor absoluto comparable, con la tasa de cambio de la pendiente por distancia horizontal como unidad, en grados por metros.

La clasificación de la dirección de la pendiente en octantes fue usada para el control de los resultados de derivación que se entrecruzaban, calculado hacia los ocho pixeles vecinos de cada posición en ventana.

Análogamente, para mapear la curvatura del plan, una aproximación simple estaba basada en una aplicación similar moviendo ventanas en la imagen de la dirección de la pendiente, proveyendo la tasa de cambio de la dirección de la pendiente por distancia horizontal como unidad. Para la dirección de la pendiente la función de aspecto del SIG fue usada.

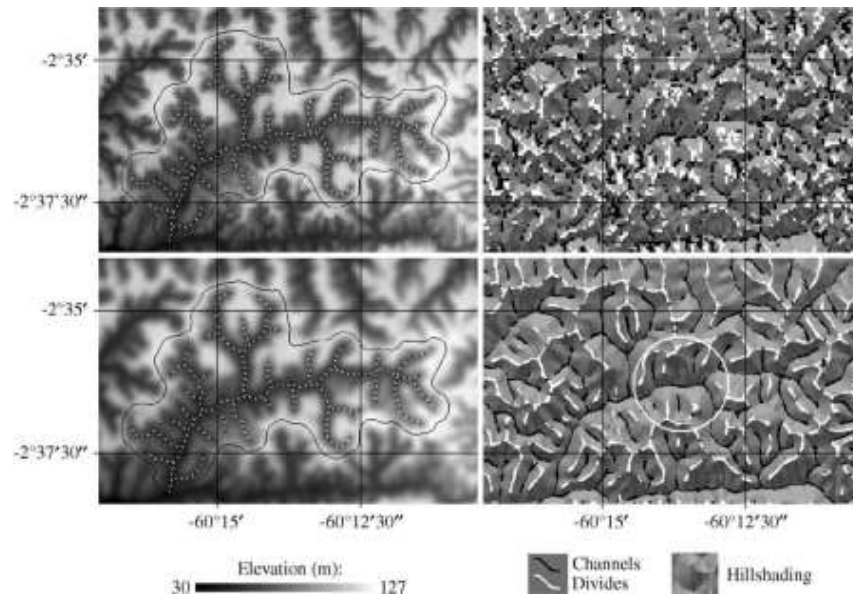
Figura 16. Proceso para el Talvegue.



Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

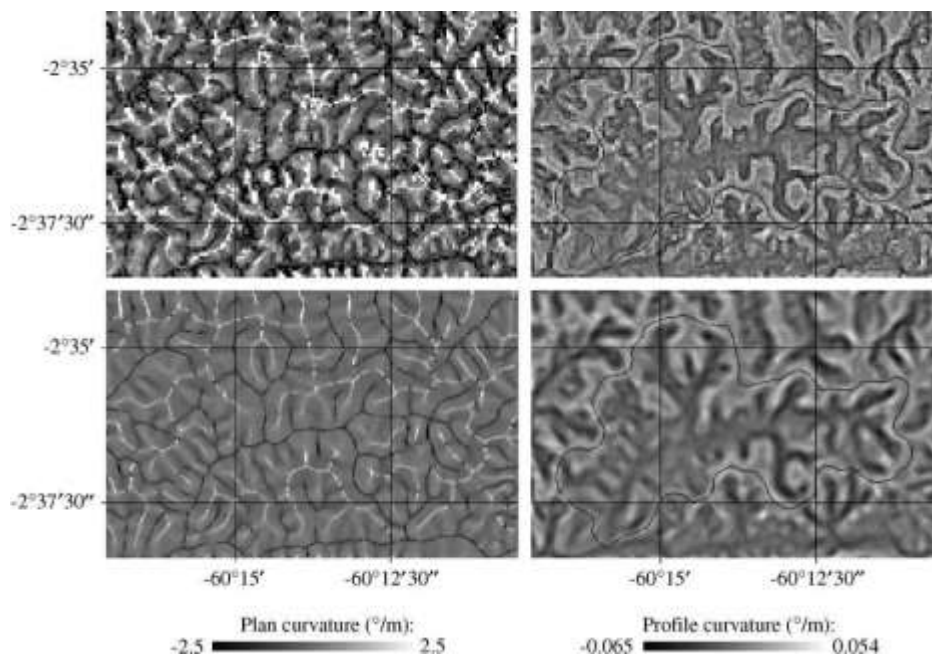
El resultado de los mapas morfométricos puede ser caracterizado a través de MDE y el modelamiento de datos procesados del SRTM. Las gráficas de elevación, ángulo de pendiente, curvatura y el perfil de curvatura mostraron los resultados del proceso en rangos más cortos en comparación a los datos originales. El refinamiento de los datos cambió la interrelación entre el ángulo de pendiente y el perfil de curvatura, en comparación a los datos originales del SRTM. Para los datos originales, la pendiente más alta fue relacionada con curvaturas cóncavas y convexas, mientras que los datos procesados produjeron datos independientes de estas variables.

Figura 17. Mapas Morfométricos de la Cuenca hidrográfica Asu: dirección y ángulo de la pendiente, extraídos de los MDE originales (arriba) y refinados (abajo).



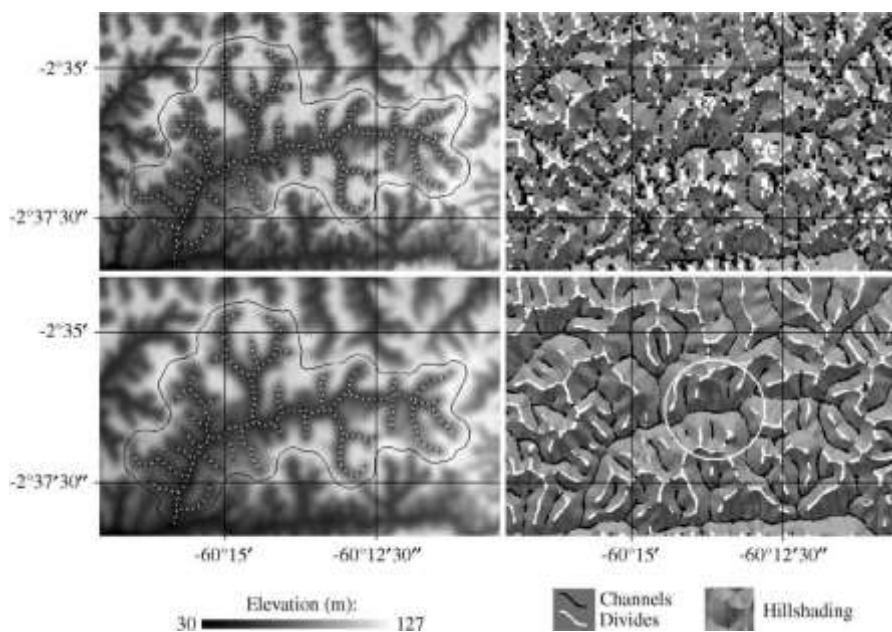
Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Figura 18. Mapas Morfométricos de la Cuenca hidrográfica Así: perfil y plano de curvatura, extraídos de los MDE originales (arriba) y refinados (abajo).



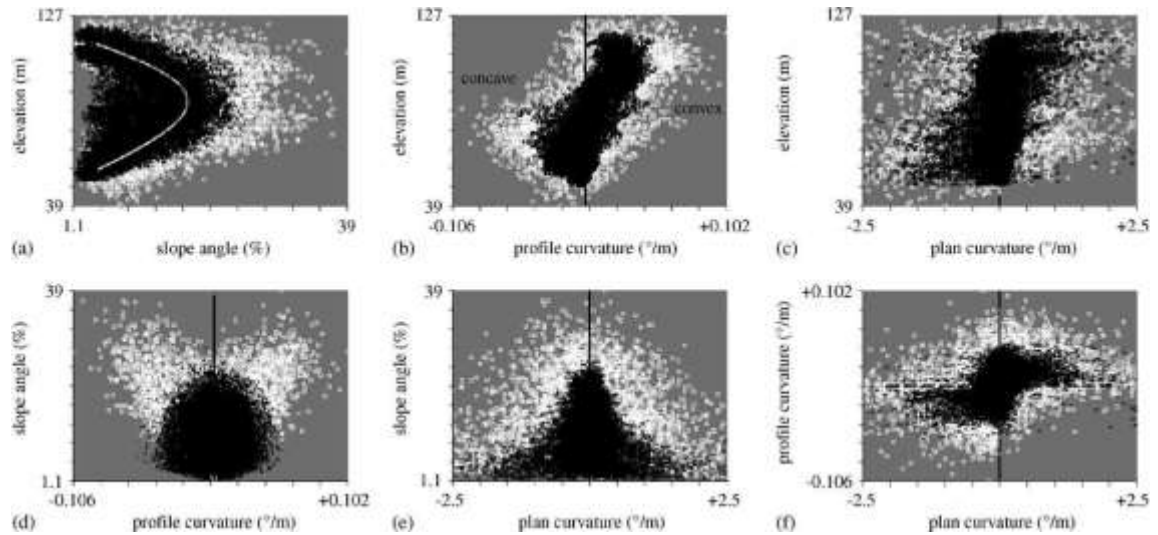
Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Figura 19. Mapas Morfométricos de la Cuenca hidrográfica Así: elevación y delimitación del Talweg, extraídos de los MDE originales (arriba) y refinados (abajo).



Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Figura 20. Gráficas de dispersión entre las variables morfométricas de la Cuenca Asu (resultados de los datos originales del SRTM-90m en blanco y refinados en negro).



Fuente: (Valeriano, y otros, 2006)

Los autores (Bothale, Bothale, & J., 1998) describen en su proyecto el concepto de eco-cuencas. Una Eco cuenca se describe como una cuenca homogénea la cual tiene características similares para el desarrollo de los recursos naturales y prácticas de gestión. El estudio fue llevado para la cuenca del Erau de la sub-cuenca de Bajaj Saga de la cuenca Mahi teniendo un área geográfica de 736 km². Las técnicas de sensores remotos y SIG fueron usadas en el análisis de las 135 microcuencas del área de estudio. Los parámetros que caracterizan las cuencas son el uso del suelo/cubierta terrestre, unidades geomórficas, parámetros morfológicos, etc. Fueron estandarizados usando puntaje Z y luego eran sometidos a análisis de componentes principales para la eliminación de datos redundantes. Fue un total de 12 componentes extraídos, los 6 primeros componentes representaron el 69,3% de la varianza en los datos. El análisis jerárquico fue aplicado a un grupo de micro-cuencas que pertenecen al grupo natural. Los grupos naturales fueron agrupados para encontrar el eco cuencas en

la zona. El estudio reveló el análisis de 9 eco-regiones y 50 eco-cuencas fuera de 135 micro- cuencas.

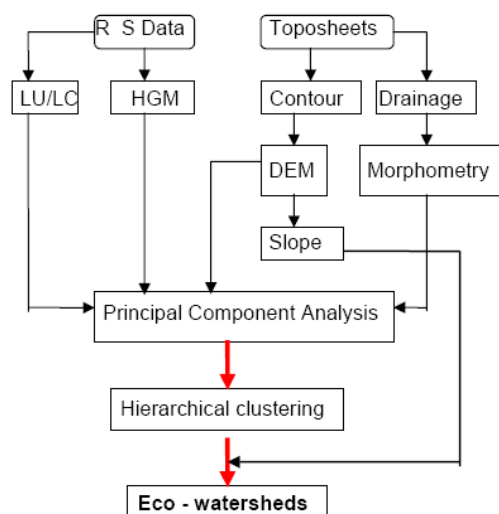
La metodología consistió en dos partes principales: Primero se realizó la preparación de la base de datos y luego el análisis de la base de datos.

Para la preparación de la base de datos se llevaron a cabo los siguientes pasos:

Extracción del área de estudio - La máscara del área de estudio fue preparada y después descargada de las bandas LISS II, los datos pertinentes para el área de estudio fueron extraídos usando la máscara.

Clasificación del uso de la tierra y la cubierta terrestre – Las técnicas de clasificación fueron supervisadas con la máxima probabilidad de algoritmos usados para la clasificación. Un total de 9 categorías fueron identificadas. Las estadísticas de áreas para las tierras fueron calculadas a lo largo de 4 categorías para tierras forestales, dos categorías en desiertos y cuerpos de agua.

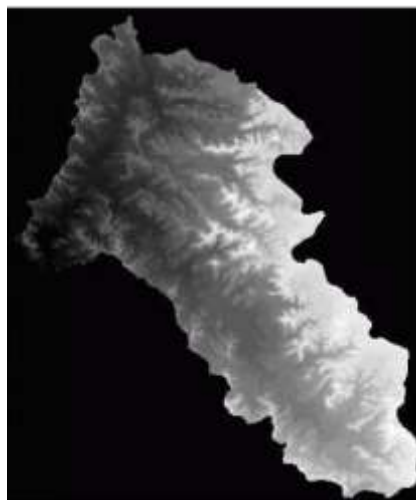
Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología.



Fuente: (Bothale, Bothale, & J., 1998)

Para la generación del MDE, se escaneo una plancha topográfica que se encontraba a escala 1:50.000, con equidistancia de curvas de nivel cada 20m. Los contornos escaneados y corregidos fueron etiquetados con valores de elevación usando un paquete de etiquetas llamado ICOLA. Las líneas de drenaje fueron también escaneadas y corregidas. El MDE y las líneas de drenaje dieron aportes para la generación del MDE del área de estudio. Del MDE fue calculada la pendiente y se definió las eco-regiones. La Figura 21 muestra el MDE para la cuenca Erau.

Figura 22. MDE de la Cuenca Erau



Fuente: (Bothale, Bothale, & J., 1998)

La extracción de micro-cuencas – El MDE de la cuenca del área de estudio dio una entrada automatizada en la extracción de micro-chuecas. El área se dividió en 135 micro- cuencas. La superficie media de la cuenca fue alrededor del 5 Km².

Preparación del mapa Hidromorfológico – Las unidades hidromorfológicas juegan un papel muy importante en el análisis de cualquier cuenca. El mapa fue preparado para toda la zona. Ocho unidades de hidromorfología fueron identificadas y su alcance se encontró para cinco micro-cuencas.

Los parámetros morfométricos son de mucha importancia para comprender el comportamiento de las cuencas hidrográficas. Un total de 6 parámetros fueron

calculados para las 135 micro-cuencas. Radio de bifurcación, el total de flujo, la densidad del drenaje, el total de los drenajes son los parámetros morfométricos calculados en el área de estudio.

Los parámetros estadísticos viz., mínimo, máximo, la desviación estándar fue calculada usando datos de las 135 cuencas y son mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen estadístico de los datos de las 135 micro-cuencas hidrográficas de la cuenca hidrográfica Erau.

Parameter	Units	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
Area	sq. km	1.08	16.27	5.45	2.06
Elevation	meters	255	543	406.86	76.83
Total streams		12	298	57.29	31.29
Stream length	meters	4009	84100	20965.6	9282.25
Bifurcation ratio		.65	9.76	2.43	1.28
Circularity		.23	.76	.53	.12
Drainage Density	meter/ sq. km	.01	1.92	.45	.35
Stream frequency	number/ sq. km	4.22	20.72	10.55	3.05
Settlement	sq. km	0	.22	.02	.04
Crop land	sq. km	0	5.29	1.36	.82
Good forest	sq. km	0	3.670	.62	.71
Moderate forest	sq. km	0	1.50	.34	.30
Degraded forest	sq. km	0	3.39	.92	.78
Forest blank	sq. km	0	1.96	.1	.24
Scrub land	sq. km	0	5.70	1.70	1.12
Sandy area	sq. km	0	1.20	.13	.16
Water bodies	sq. km	0	4.110	.26	.69
Hills	sq. km	0	4.89	.69	.88
Pediment	sq. km	0	3.62	.36	.70
Buried pediment	sq. km	0	2.43	.3	.44
Pediplain	sq. km	0	6.22	1.42	1.56
Buried pediplain	sq. km	0	7.87	1.29	1.67

Fuente: (Bothale, Bothale, & J., 1998)

Las variables usadas en el análisis son de diferente naturaleza y de diferentes unidades de medida. Para obtener los datos estandarizados, el Z fue calculado para cada parámetro.

Para el entendimiento del comportamiento de todos los parámetros pertinentes al área de estudio, y para reducir la dimensión de la base de datos, los datos correspondientes a 22 variables de 135 microcuencas se han presentado como componente principal del análisis. La Tabla 7 muestra los resultados de los principales componentes (PC) en forma porcentual de la cuenca Erau. PC extrajo 12 componentes, con un total de varianza del 92.7%. El primer componente correlaciona el área de la cuenca con la categoría de uso/ cobertura de la tierra, la longitud del flujo y el total de drenajes representan 22.3% de varianza. Segundo componente destacó la elevación entre los bosques y las categorías geomorfológicas con un 17% de varianza. El tercer componente tiene un alto porcentaje de plantado del 11% de varianza y el cuarto componente tiene alto porcentaje de agua y pendiente. En el cuarto componente hay bastantes bosques degradados con 6.1% de varianza.

Tabla 7. Componentes principales del análisis de la cuenca hidrográfica Erau.

Component Variables	1	2	3	4	5	6 - 10
Area	.85915					
Elevation		.32247				
Total streams	.66461					
Stream length	.76735					
Bifurcation ratio						.99245
Circularity						.96261
Drainage Density			.08281			
Stream frequency						
Settlement						.92314
Crop land	.83342					
Good forest		.92374				
Moderate forest		.88499				
Degraded forest					.52890	
Forest blank						.95183
Scrub land	.89401					
Sandy area	.68554					
Water bodies				.83386		
Hills		.73848				
Pediment				.71147		
Buried pediment						.93351
Pediplain					.87361	
Buried pediplain			.87417			

Fuente: (Bothale, Bothale, & J., 1998)

El análisis jerárquico sobre los componentes fue presentado como análisis de agrupamiento. El promedio fue el método utilizado para el análisis. Todas las cuencas fueron inicialmente agrupadas en 100 grupos. Estos fueron agrupados en 79 grupos y finalmente 50 eco-cuencas fueron escogidas. El agrupamiento y el reagrupamiento se hicieron como requerimiento del plan. Finalmente, las 135 micro-cuencas fueron agrupadas en 9 eco-regiones. La Figura 22 muestra las eco-cuencas del área estudiada.

Figura 23. Eco-cuencas del área de estudio (Cuenca Erau).



Fuente: (Bothale, Bothale, & J., 1998)

Los componentes principales del análisis (PCA) ayudaron a reducir la división de los datos. El análisis jerárquico de las cuencas permitió ver las características similares. La agrupación se hizo dependiendo los requerimientos del estudio. En el estudio se generó un total de 59 eco-cuencas de 135 micro-cuencas en el requerimiento del estudio. Por el nivel del estudio salieron 9 eco- regiones. Estas regiones y eco-cuencas son elementos importantes mientras se decide el manejo de la actividad. El manejo científico sobre las cuencas y este estudio ayudó a la caracterización de las cuencas hidrográficas de manera integrada.

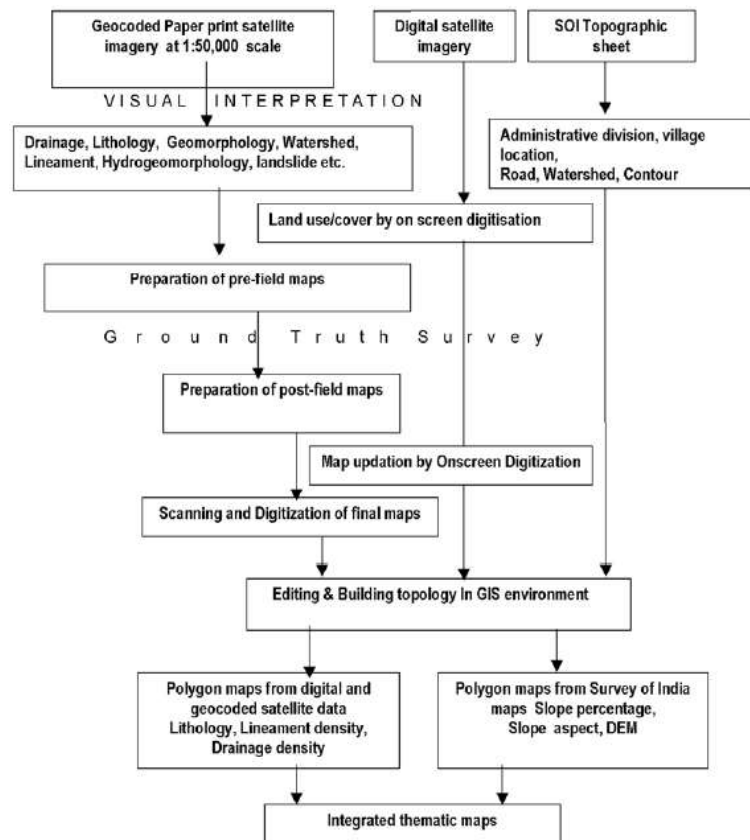
Los autores (Thapa, Ravindra, & Sood, 2008) realizaron un estudio apoyado en fotografías aéreas, imágenes satelitales, mapas topográficos y medidas de la en campo, que revelan que el área de estudio tiene una red de fracturas superficiales interrelacionadas. Las características de las actividades neo-tectónicas en la forma de las fallas y lineamientos tienen un control definido sobre la alineación de muchos ríos y sus afluentes. La geología y morfotectónica describen la geología del lugar y su correlación con la mayor o menor estructura geológica. El estudio de pendientes, aspectos, red de drenajes representan la hidrogeología y ayuda en la categorización de la forma de la tierra dentro de diferentes clases hidro-

geomorfológicas representando la relación de las estructuras geológicas vis-a-vis de la ocurrencia de agua subterránea. Los datos de integración y el potencial de agua subterránea describen el diseño de la base de datos en una plataforma SIG para el análisis de agua subterránea y el uso de modelos hidro-geomorfológicos basados en imágenes de satélite teniendo en cuenta los mapas temáticos para el entendimiento de la hidrogeología sobre una base científica para la exploración y el manejo de aguas subterráneas.

La metodología abarca el estudio y la identificación de las condiciones geo-hidrológicas prevalecientes en el área de estudio, basada en datos temporales del satélite, fotografías aéreas, y un mapa de la India a escala 1: 50 000. La técnica DIP con diferentes datos de satélite facilita la generación exacta de mapas temáticos. Esto fue seguido por la medida del terreno y mapas geológicos utilizando brújula y GPS para delimitación de estructuras y características neo-tectónicas. Posteriormente las diferentes clases geomorfológicas fueron clasificadas y algunas de estas categorías son desarrolladas a través de la actividad paleo- y neo tectónica prevaleciente en el área, basado en el estudio de pendientes, aspectos, drenajes y otros análisis morfométricos. La interpretación de los datos del trabajo incluye la generación de mapas temáticos sobre drenajes, densidad de drenajes, cuencas hidrográficas y microcuencas, litología, lineamientos, MDE, pendiente, aspecto, uso y cobertura del suelo e hidro-geomorfología.

Finalmente, se asignaron diferentes pesos a las unidades hidrológicas para la integración y análisis de datos para direccionar las consultas de los usuarios basadas en aguas subterráneas.

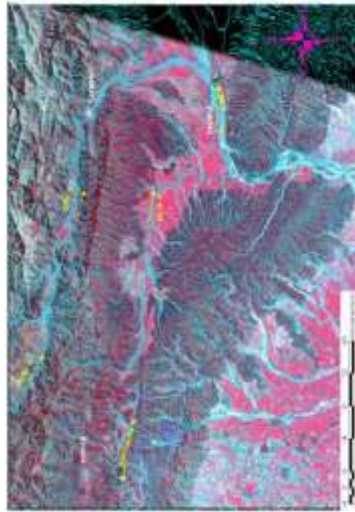
Figura 24. Procedimiento integrado para la preparación de mapas temáticos.



Fuente: (Thapa, Ravindra, & Sood, 2008)

Los siguientes datos fueron usados para el estudio hidrogeológico y el potencial de aguas subterráneas: Datos del satélite IRS 1C LISS III de alta resolución, Imágenes satelitales de alta resolución impresas, Fotografías aéreas a escala 1: 50 000, Mapas geológicos realizados por Geological Survey of India y Publicaciones y mapas.

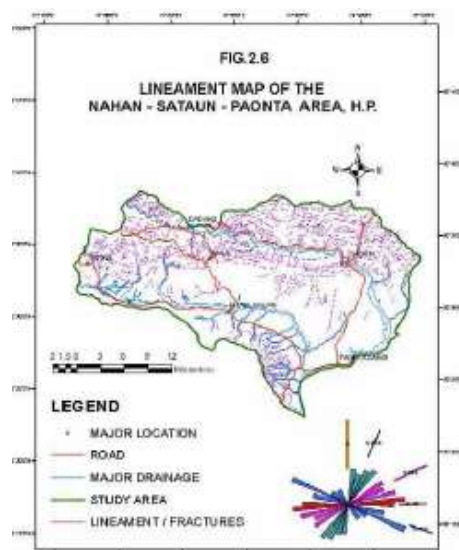
Figura 25. Red de drenaje en imagen satelital.



Fuente: (Thapa, Ravindra, & Sood, 2008)

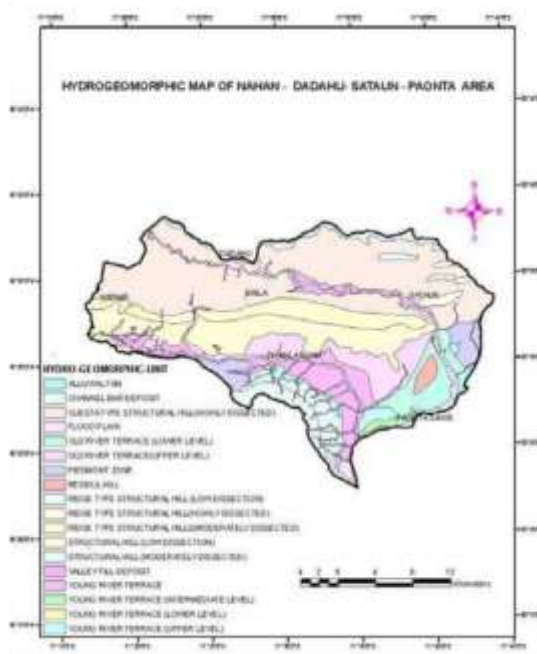
Teniendo en cuenta los estudios de geología, morfotectónica, hidrología, hidro-geomorfología y la integración de datos, se generaron SIG los cuales se muestran a continuación:

Figura 26. Mapa de Lineamientos de la zona de estudio.



Fuente: (Thapa, Ravindra, & Sood, 2008)

Figura 27. Mapa Hidro-geomorfológico de la zona de estudio



Fuente: (Thapa, Ravindra, & Sood, 2008)

Figura 28. Mapa de aguas subterráneas de las partes altas de la zona de estudio.



Fuente: (Thapa, Ravindra, & Sood, 2008)

Los autores (Bothale & Sharma, 1981) en su documento analizan la respuesta de una cuenca utilizando el modelo de erosión (ERM). En este método la densidad de vegetación, el brillo del suelo, la pendiente y los parámetros morfométricos son usados para la priorización de la cuenca hidrográfica. El ERM utiliza para la priorización de la cuenca las características de drenaje y pendiente. El modelo adiciona los pesos de cada parámetro afectado y calcula la respuesta de la cuenca.

Para la preparación de los datos la capa de drenaje, de contornos (curvas de nivel), del índice de vegetación, y del brillo de suelos fueron generados usando datos de sensores remotos y planchas topográficas SOI. El drenaje fue digitalizado de una plancha topográfica a escala 1:50 000 generando la capa de densidad del drenaje y se calculó el factor forma. El modelo digital de elevación (DEM) del área de estudio fue generado a partir de las curvas de nivel desde el cual se generó una capa de pendientes. El índice reajustado de densidad de vegetación fue calculado para cada píxel en el área de estudio utilizando la formula ($\text{Reajustado NDVI} = \text{NDVI} * 200 + 50$) y los valores de peso del área fueron calculados para cada micro cuenca. De estos se calculó el índice del brillo del suelo y se generó una capa de textura.

Figura 29. Mapa de Contornos.

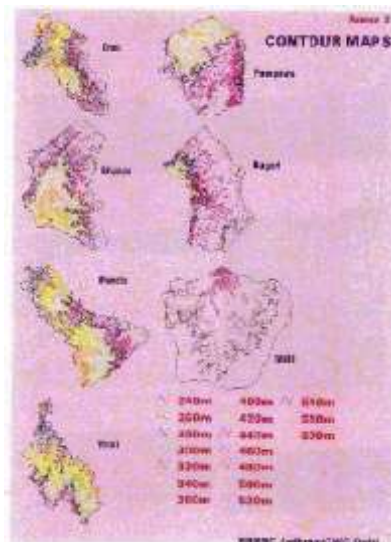


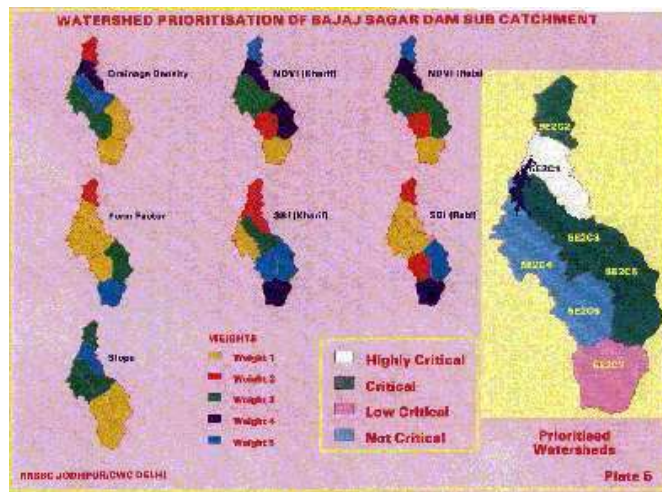
Tabla 8. Código de prioridad de las cuencas

Watershed	Name	Sum of wt for March'93 data	Sum of wt for Oct' 94 data	Average weight	Priority
5E2C1	Erau	15	16	15.5	Highly critical
5E2C2	Bhunan	14	14	14	Critical
5E2C4	Teini	11	11	11	Not critical
5E2C5	Pampawa	9	12	10.5	Not critical
5E2C6	Bageri	13	14	13.5	Critical
5E2C7	Mahi	12	12	12	Low critical

Fuente: (Bothale & Sharma, 1981)

Los resultados de priorización de las 7 microcuencas de la cuenca Bajaj Sagar, basados en datos de satélite de Octubre de 1994 y Marzo de 1993 se han dado en la Figura 29. Las cuencas hidrográficas de las sub-cuencas de captación son de bosques, por lo tanto, la respuesta de las cuencas hidrográficas será casi similar en las diferentes estaciones. Las estaciones tienen una mayor influencia en la respuesta. La Figura 29 muestra la priorización de las subcuencas del área. En esta figura, es evidente que una de las tres cuencas de drenaje directo la categoría es muy crítica y el otro es crítico. Las cuencas de drenaje directo tienen muy alta prioridad. Esto también se justifica por el hecho de que estas cuencas dan más carga de sedimentos al embalse. El factor forma y la pendiente son otros factores prominentes que afectan la prioridad.

Figura 30. Cuencas priorizadas.



Fuente: (Bothale, Bothale, & J., 1998)

Los autores (Salomón & Soria, 1998) en su proyecto, efectuaron un estudio de parámetros morfométricos, hidrográficos e hidrológicos en cuencas andinas pedemontanas y precordilleranas áridas y semiáridas de tamaño medio, que permitieran efectuar relaciones con el dinamismo hídrico-ambiental. Para ello se realizó el estudio de cuencas representativas del medio andino, árido y semiárido como son las del río seco Chacras de Coria y Tejo de Mendoza (Argentina).

En la metodología empleada para el desarrollo del proyecto, se definieron las divisorias de aguas de las cuencas de estudio y se digitalizaron los distintos tipos de cursos hidrográficos incluyendo cauces de primer orden, para lo cual se procedió a la fotointerpretación analítica y al procesamiento digital de la imagen Spot pancromática (1996) con su georeferenciación y verificación en el terreno (Salomón & Soria, 1998).

Se realizó el estudio hidrográfico mediante análisis cuantitativo de las cuencas de estudio y red de drenaje.

Se elaboró el sistema de ordenamiento de cauces, lo cual resulta de fundamental importancia la escala y calidad de la cartografía empleada (Palero, 1988). Para

ello fue necesario contar con una cartografía a nivel de detalle a fin de evitar distorsiones. Se trabajó con fotografías aéreas escala 1: 10.000 y 25.000, Imagen Spot Pancromática de la Cuenca del Río Mendoza. (1996), Imagen Landsat (1998), Restitución carta topográfica escala 1: 25.000 (1999) y Modelo Digital de Terreno (MDT) corregido y georeferenciado con un valor de ajuste menor a 8m (Salomón & Soria, 1998).

Los parámetros principales que se cuantificaron, son: clasificación jerárquica y longitud de los cursos, área, largo, ancho y relieve de las cuencas. A partir de estos datos es posible la determinación de varias características del sistema fluvial, como la redondez o elongación de la cuenca, la densidad del drenaje, el orden y la frecuencia de los cursos, sus razones de bifurcación, de longitud y de áreas (Palero, 1988).

Se calcularon los siguientes parámetros de relieve, hidrográficos e hidrológicos:

Curvas hipsográficas: se trata de aquellas curvas que: "... representan las superficies dominadas por encima de cada cota de terreno y por tanto caracterizan en cierto modo al relieve, siendo esta curva un reflejo del estado de equilibrio potencial de la cuenca..." (Llamas, 1993 citado por Degioanni, 1995).

Pendiente media: desde el punto de vista de la dinámica hídrica superficial de la pendiente interesa conocer fundamentalmente el gradiente y la dirección.: "... La pendiente media de una cuenca está definida por la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales en que la línea de máxima pendiente es constante. Este concepto en el entorno SIG es equivalente a obtener la media aritmética de los valores de gradiente en una capa digital en formato Raster que representa las alturas del terreno. En cambio la orientación de la pendiente es una magnitud angular. El procedimiento de cálculo de esta magnitud en cada píxel es rápido y sencillo de obtener pero calcular el valor medio del vector de orientación y la dispersión correspondiente, es un procedimiento algo

más complejo que la simple media aritmética aunque puede ser obtenido mediante operaciones con el SIG...” (Degioanni, 1995).

Sistema de ordenamiento de cauces: establece el orden jerárquico de los mismos (Horton, 1945 y Strahler, 1964).

Relación de Bifurcación (R_b): permite fijar aspectos lineales de la red: “siendo la relación entre el número de cauces de un determinado orden y el número de cauces en el orden inferior” (Horton, 1945 citado por Degioanni, 1995).

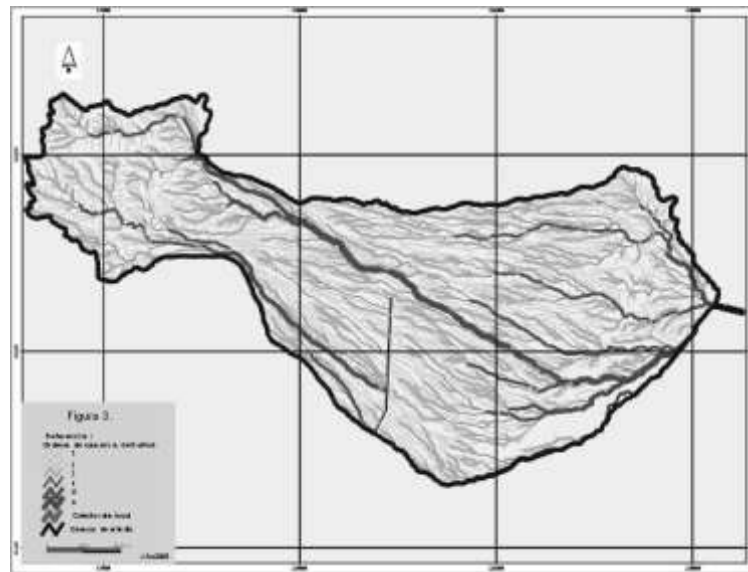
Relación de Longitud (R_l): implica que la longitud media de los segmentos de cauce aproximadamente se triplica al incrementarse el orden: “esta longitud media de segmento de cauce de orden sucesivos tiende a formar una progresión geométrica cuyo primer término es la longitud media de los segmentos de primer orden y tiene por razón una relación de longitud constante” (Strahler, 1964 citado por Palero, 1988).

Clasificación basada en la densidad de drenaje: es un sistema de clasificación independiente del orden de magnitud de la corriente. Se define como el cociente entre la longitud total de los cauces y el área de la cuenca (Degioanni, 1995).

Índice de Compacidad o Coeficiente de Gravelius: es una relación contorno-superficie, definida por el cociente entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo que tenga la misma superficie de ésta (Degioanni, 1995).

Como resultados se efectuó cartografía de detalle con la demarcación de cauces de distinto orden (Figura 30), los que fueron inventariados y clasificados en base de datos.

Figura 31. Red de Drenaje. Cuencas del Río Seco Chacras de Coria y Tejo. Mendoza (Argentina)



Fuente: (Salomón & Soria, 1998)

La superficie total de las cuencas de estudio llega a 82,8196 km², y su pendiente promedio es del 18%.

La longitud de cauces de distinto orden es de 776,65 km y su longitud media es de 0,40 km lo que demuestra que hay una gran cantidad de cauces con recorridos cortos en general.

El número total de cauces en las cuencas de estudio, efectuando las sumatorias de los cauces de distinto orden y jerarquía es de 1.924, la cantidad de cauces promedio es de 23, 27 por km² y su densidad media es de 9,38 km/km². Este valor aumenta considerablemente en las subcuencas localizadas en la unidad precordillerana.

La relación de bifurcación (RB) obtenida para todas las cuencas de estudio es de 3,65 en promedio, siendo un valor muy próximo al obtenido por Palero (1988) que en la zona fue de 4,07. En cuanto a la relación de longitud (RL) de cauces el mismo arrojo como resultado 2,27; cuyo valor medio es muy próximo al obtenido por la autora mencionada que fue de 1,97. El índice de compacidad obtenido para

las cuencas de estudio tiene un valor de 1,8; que la caracteriza como tipo óvalo-oblonga a rectangular-oblonga cuyo valor debe ser superior a 1,5.

Considerando las distintas subcuencas el orden principal llega a 5, aunque debe tenerse en cuenta que existen distintas salidas por colectores aluvionales, trasvases, defensas y desagües artificiales con vuelco al Río Mendoza y Canal Guaymallén que afectan la jerarquización natural.

En cuanto a la relación de bifurcación (RB), que expresa el grado de ramificación de la red de avenamiento o la proporción entre segmentos de un orden inferior y superior, se puede apreciar que esta presenta un orden decreciente inverso al número de órdenes que va de 5.05 correspondiente al primer orden a 1.82 en el quinto orden, en tanto su valor medio es de 3.65.

Los autores (Bhagyashri & Bhavana, s.f.) realizaron mediciones hidrogeológicas en la cuenca GV-41, Distrito de Aurangabad para averiguar la viabilidad de la recarga artificial de estructuras. Este estudio es un intento de averiguar las posibilidades de recarga artificial en la zona de hiper desarrollo del área de las mini cuencas de GV-41 (5 y 6) usando técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica

Un reconocimiento de la zona se hizo con la ayuda de planchas topográficas e imágenes de satélite para entender el marco de la topografía, la geomorfología y las características estructurales que prevalecen en la zona (reportes GSDA, CGWB)

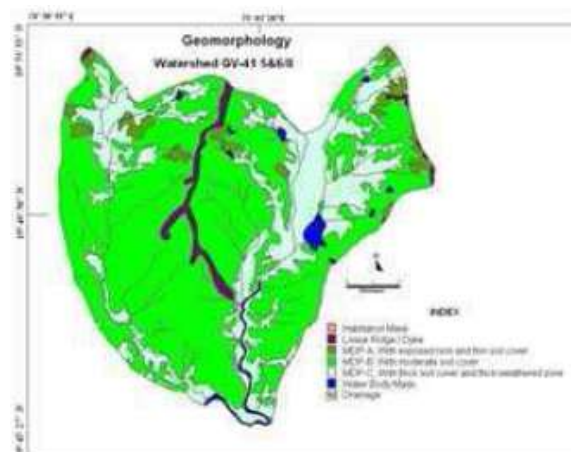
Las planchas topográficas de la India también fueron usadas para la preparación del mapa base a escala 1: 150 000 en el entorno SIG. La temática de la capa de drenaje se preparó también haciendo uso de la misma. El mapa fue elaborado a partir de los mapas disponibles con ingresos del departamento. El mapa de suelos

fue preparado con la ayuda de la información disponible de National Bureau of Soil Survey (NBSS). Los temas de geomorfología y uso de la tierra fueron elaborados con datos del satélite sat. Todos los temas fueron digitalizados y convertidos en un SIG en forma de capas temáticas usando el software Arc-Info y se hizo en escala 1: 50 000 usando la proyección regional cónica conforme (RCC). Además, los datos fueron convertidos a archivos tabulares y todo el estudio y el trabajo analítico fue llevado al mapa en el software.

El análisis de la geomorfología de superposición y los drenajes fueron llevados en capas temáticas para la identificación de los sitios adecuados para la conservación de las estructuras del agua.

La base de datos generada fue también útil en la exploración de las posibilidades de la recarga artificial en el área de estudio. En el terreno se encontró que se exhiben principalmente mesetas disectadas (MDP) y fue además clasificado en clases: MDP-A, MDP-B, MDP-C basado en el índice de erosión a lo largo de las pendientes. (Figura 31).

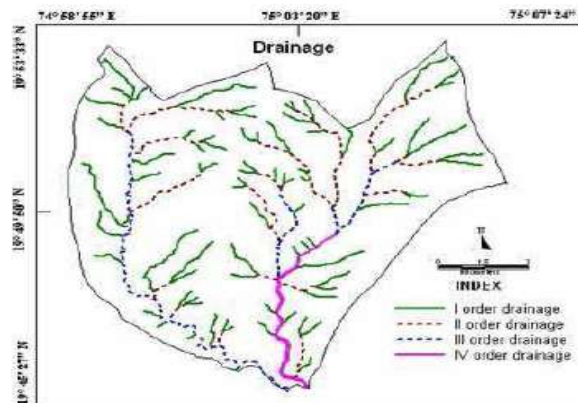
Figura 32. Geomorfología área de estudio.



Fuente: (Bhagyashri & Bhavana, s.f.)

Los diferentes parámetros morfométricos tales como densidad de drenaje, frecuencia de la corriente, la relación de extensión, y la relación de circularidad fueron calculados en Arc Info (Figura 32).

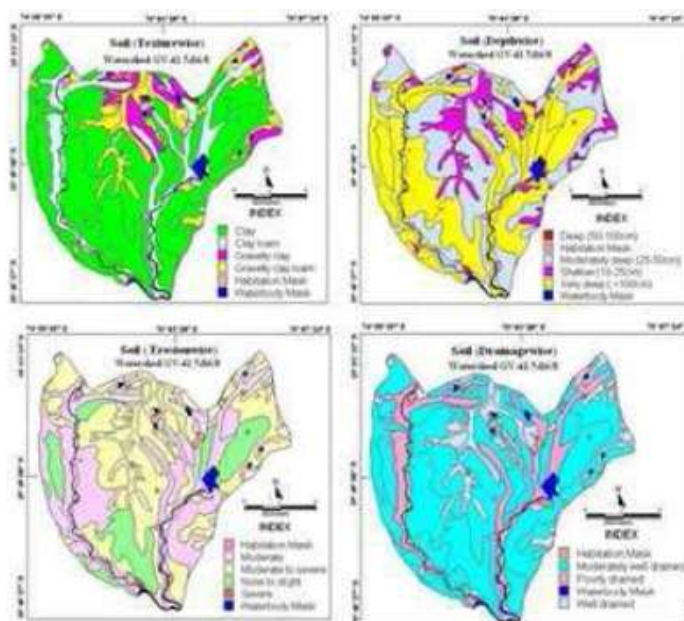
Figura 33. Drenaje área de estudio.



Fuente: (Bhagyashri & Bhavana, s.f.)

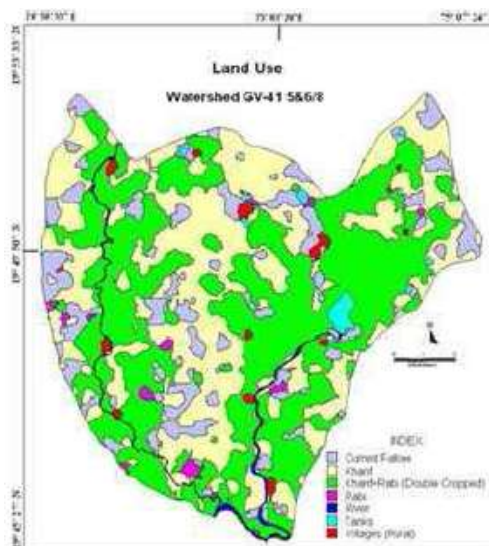
La temática de las capas del suelo se ha estudiado sobre la base de la profundidad, la textura y los factores de erosión para identificar los tipos de estructuras adecuadas para la ubicación específica (Figura 33). Los datos del uso de la tierra revelan en total 7 características (Figura 34) usando la técnica de clasificación supervisada para la posibilidad de recarga artificial.

Figura 34. Mapas de suelo del área de estudio.



Fuente: (Bhagyashri & Bhavana, s.f.)

Figura 35. Uso del suelo del área de estudio.



Fuente: (Bhagyashri & Bhavana, s.f.)

Los análisis morfométricos de las micro-cuencas se resume en las Tablas 9 y 10. La red de drenaje fue clasificada en orden de acuerdo al número de bifurcaciones usando la metodología dada por Strahler (1952). Los aspectos lineales tales como el orden de corriente, la longitud y la relación de bifurcación fueron determinadas y los resultados son presentados en la Tabla 9. De acuerdo a Strahler (1952) la relación de bifurcación mayor que 5 indica el control estructural sobre el área apoyado por drenajes sub-paralelos. Como los valores obtenidos para las mini-cuencas de GV-41 (5 y 6) es 4.54, el cual es sugestivo del desarrollo de los lineamientos en el área de estudio.

De acuerdo a Horton (1945) la relación de longitud (RI) da una idea general acerca de la relativa permeabilidad de las formaciones rocosas en una cuenca y el valor obtenido para las mini-cuencas de GV-41 es 2.92 eso indica menos permeabilidad en el área. El área de densidad del drenaje es 1.35 Km², indicativo de textura media de la cuenca (Horton 1945. El factor de la constante del mantenimiento del canal (Schumm, 1956) muestra que 0.74 Km² es requerido para mantener un kilómetro de canal de flujo. La frecuencia del flujo para las mini-cuencas del GV-41 (5 y 6) es 0.93 indica el escurrimiento superficial del área. Los análisis morfométricos dan luz en la variación de la permeabilidad del flujo de unidades expuestas en las mini-cuencas del GV-41 (5 y 6)

Los datos de los sensores remotos y los Sistemas de Información Geográfica sobre el uso de la tierra/superficie de la tierra y el suelo revelan varias unidades geomórficas, los principales accidentes geográficos, la agricultura, tanques y zonas edificadas de agua adecuadas para las estructuras de conservación.

El departamento de estado de riego ha construido cerca de 21 tanques de filtración y 3 K.T (tipo Kolhapur) presas de almacenamiento con capacidad de 2897 y 107 TCM respectivamente (reporte CGWB). La precipitación media en el área es 634.8 mm.

Por lo tanto de acuerdo a la Tabla de Strengé el total disponible de escorrentía será 7952.77 TCM.

Tabla 9. Aspectos lineales de la red de drenaje en las micro-cuencas de GV-41.

Basin	Order of Streams	Total No. of Streams	Bifurcation Ratio (Rb)	Total Stream Length (Km)	Average Stream Length (Km)	Length Ratio
GV-41 5-6	1	81	2.79	84.88	1.05	-
	2	29	4.83	41.06	1.42	1.35
	3	6	6.00	21.34	4.05	2.85
	4	1	-	18.41	18.41	4.55
			Avg. = 4.54		Avg. = 2.92	

Fuente: (Bhagyashri & Bhavana, s.f.)

Tabla 10. Aspectos del área de la red de drenaje de las mini-cuencas de la cuenca GV-41.

Basin	No. of Streams N	Basin Area A (Km ²)	Total Length of Streams L (Km)	Drainage Density Dd=L/A (Km/Km ²)	Constant of Channel Maintenance C=1/Dd (Km ² /Km)	Stream Frequency F=N/A (per Km ²)
GV-41 5-6	117	125.28	168.69	1.35	0.74	0.93

Fuente: (Bhagyashri & Bhavana, s.f.)

Los autores (Meléndez de la Cruz & Alva Huayaney, 2005) en su proyecto en el año 2005, realizaron una investigación que corresponde al ámbito de la geografía aplicada; mediante el análisis geomorfológico, la utilización de imágenes satelitales y técnicas de geomática, identificado las principales causas endógenas y exógenas que dan origen a los procesos de remoción en masa en la subcuenca de la quebrada Cojup, concordante en su parte baja con la ciudad de Huaraz. También ubicaron espacialmente los principales procesos de ocupación actual de dicha ciudad con apoyo de un Modelo de Elevación de Relieve (MDE), los cuales coinciden con zonas de peligro muy alto, y por lo tanto, incompatibles en cuanto a la capacidad de acogida.

En la metodología empleada para este proyecto, se preparó un mapa geomorfológico sobre la base de los siguientes trabajos realizados como parte de esta investigación: material morfométrico, estudio morfogenético, trabajo de

campo, fotointerpretación y análisis de imágenes de satélite. Este último es importante porque las fotografías aéreas reflejan el detalle del relieve mientras que las imágenes satelitales complementan múltiples informaciones espectrales (combinaciones de bandas). La información topográfica, que es el soporte de la cartografía de esta investigación, fue hecha a partir del escaneo de cartas y digitalización, elaborado basándose en cartas topográficas, a escala 1:25 000, Datum PSAD, del Programa Especial de Titulación de Tierras (PETT). Apoyado en herramientas de Sistemas de Información Geográfica como el ArcGIS para generar mapas temáticos.

El material morfométrico está compuesto de mapas de pendientes y profundidad de disección o erosión y gráficos como: Histograma de frecuencia altimétrica, curva hipsográfica y perfil del talweg principal.

Para el análisis morfogenético se ha utilizado la información geológica del Ingemmet (cartas y boletines) complementada con el trabajo de campo.

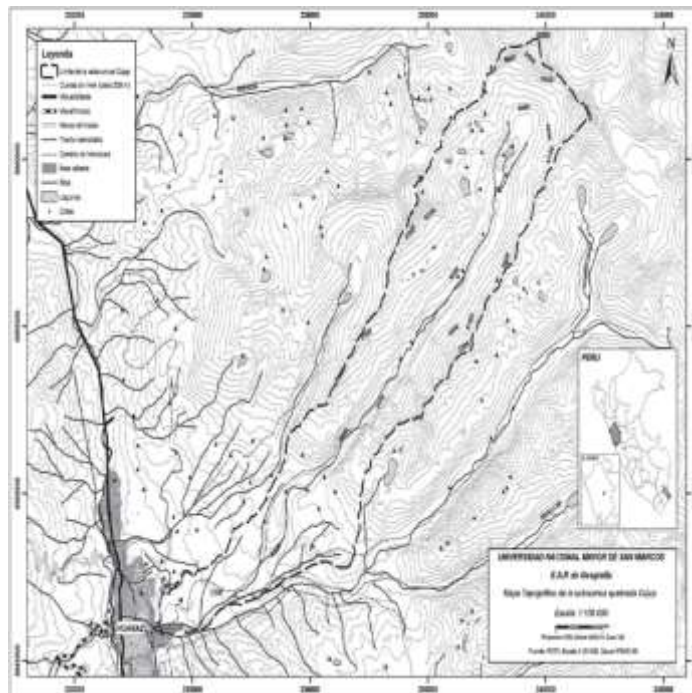
La delimitación de las unidades del relieve que forman parte del mapa geomorfológico de la subcuenca se trazó a través de la fotointerpretación, con fotos a escala 1:40 000 (vuelo USAF), análisis morfométrico e información recogida in situ.

El trabajo de campo consistió en el análisis de la relación talweg-interfluvio, particularmente en el análisis de los procesos geomorfológicos de las vertientes. Es decir, análisis de la litología, meteorización-erosión y pendientes de las laderas. Se relacionó lo anterior con los depósitos cuaternarios del alveo de la quebrada y la erosión lineal del mismo. Finalmente se analizó los procesos que causan remoción en masa y su consecuente grado de peligrosidad para la seguridad física de la ciudad de Huaraz.

Como resultados se obtuvo el mapa topográfico, mapa geomorfológico y de pendientes de la Subcuenca de la Quebrada Cojup a escala 1:100000 (Figuras 35, 36 y 37), la curva hipsográfica de la subcuenca (Figura 38) y el perfil del talweg (Figura 39).

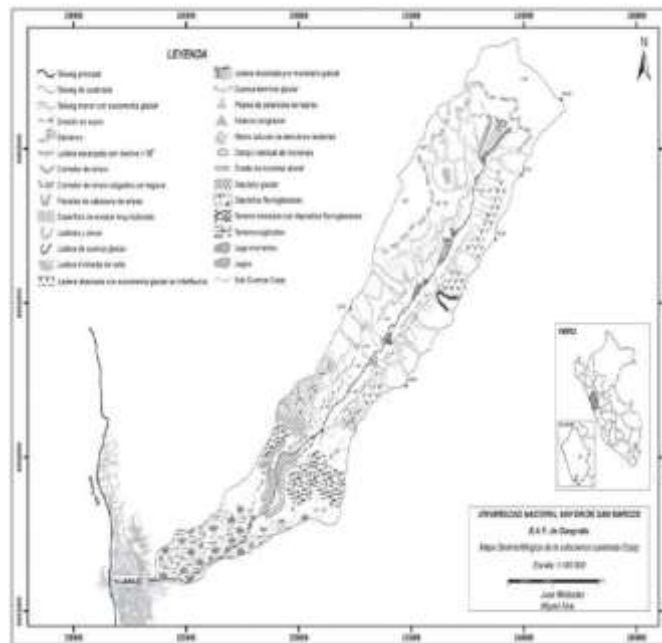
Los mapas morfométricos (pendientes y de profundidad de erosión) han sido importantes para relacionar la estabilidad de los derrubios y la masa glaciaria que van a depender de los declives (pendientes) y rugosidad de las vertientes. La estabilidad de los glaciares está condicionada por el grado de compactación y de inclinación de las laderas. En el caso de la subcuenca normalmente se orienta en forma perpendicular al fondo del valle principal. Cabe indicar que el 49% del área de la subcuenca tiene más de 28° de declive. Esta información ha sido básica para alcanzar los objetivos del estudio.

Figura 36. Mapa Topográfico de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.



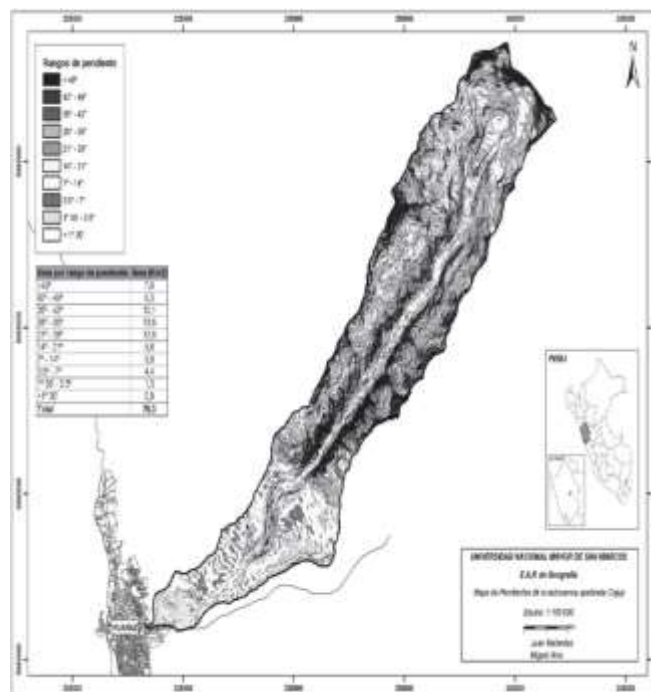
Fuente: (Meléndez de la Cruz & Alva Huayaney, 2005)

Figura 37. Mapa Geomorfológico de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.



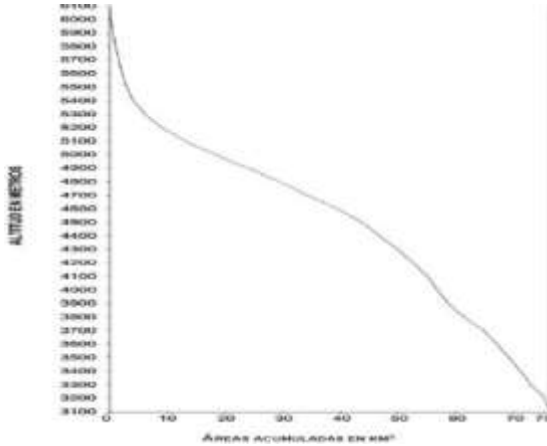
Fuente: (Meléndez de la Cruz & Alva Huayaney, 2005)

Figura 38. Mapa de Pendientes de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.



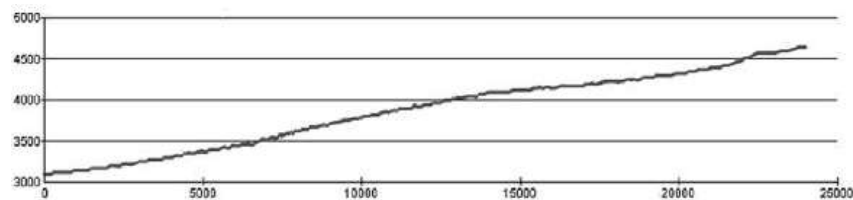
Fuente: (Meléndez de la Cruz & Alva Huayaney, 2005)

Figura 39. Curva Hipsográfica de la Subcuenca de la Quebrada Cojup.



Fuente: (Meléndez de la Cruz & Alva Huayaney, 2005)

Figura 40. Perfil de Talweg, de la Quebrada Cojup.



Fuente: (Meléndez de la Cruz & Alva Huayaney, 2005)

Los autores (Sah, Murai, & Honda, 1997) en su estudio, priorizaron la subcuenca de la cuenca del río Trijuga en el este de Nepal para considerar su condición de degradación y sensibilidad de tierra. Aquí la sensibilidad de tierra es definida como la relación locacional entre la pérdida forestal y la pérdida de suelo. La ecuación universal de la pérdida de suelo en conjunción con los sensores remotos y los SIG ha sido utilizada para estimar la pérdida del suelo y cambio de cobertura del suelo. Dos series de tiempo de datos, fotografías aéreas del año 1978 y los datos del Landsat TM, del año 1991, fueron usadas para hacer el análisis de pérdida del suelo y cambio de cobertura del suelo. La tasa de degradación forestal del área de estudio fue 0.57% por año, el cual es muy alto teniendo en cuenta la

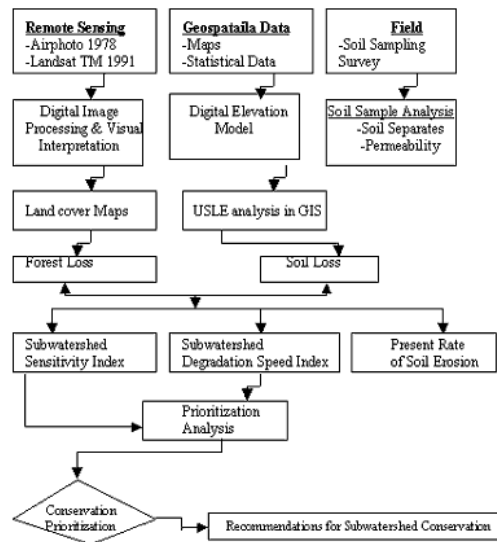
sostenibilidad, con un incremento de 0.42 mm/yr en la tasa de erosión de suelos entre 1978 y 1991. El nuevo concepto de priorización de la conservación ha sido propuesto para considerar la rápida degradación de la subcuenca, el índice de sensibilidad y la tasa de erosión del suelo. Basados en la priorización de conservación, y las actividades de conservación propuestas para la subcuenca.

Un enfoque integrado de procesamiento digital de imágenes de satelitales y una interpretación visual de la fotografía aérea combinado con SIG y USLE se realizó para la estimación del cambio de la cobertura y la pérdida del suelo.

Se utilizaron datos como medidas fisiográficas en donde 35 muestras fueron tomadas para el análisis de la textura y permeabilidad del suelo. Datos satelitales Landsat TM de ruta/fila 140/041, adquirido en diciembre 21 de 1991. Fotografías aéreas a escala 1: 50000, Nov. 1978 y mapas de reconocimiento a escala 1: 50 000 de 1982, mapa del sistema de la tierra a escala 1: 50 000 de 1984 y un mapa político a escala 1: 250 000 de 1987.

Para el uso de estos datos, la metodología general se siguió tal como se presenta en la Figura 40. El Mapa de cobertura del suelo de 1978 se obtuvo mediante interpretación visual de fotografías aéreas con la ayuda del mapa de uso del suelo de 1982, mientras era supervisado el proceso de imágenes digital se adaptó para los datos del satélite de 1991. Se obtuvo la pérdida forestal después de la comparación de la cubierta vegetal de 1978 y 1991.

Figura 41. Metodología general.



Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

El modelo USLE fue ampliamente adoptado para estimar la pérdida de suelo (Schwab et. Al, 1993). La ecuación es:

$$E = RKLSCP$$

Donde,

E= Media anual de pérdida de suelo (tons/ha/yr) R= Índice de erosión de la lluvia,

K= Erosión del suelo,

L= Longitud de la pendiente, S= Pendiente de la pendiente,

C= Gestión de los cultivos y la cubierta vegetal,

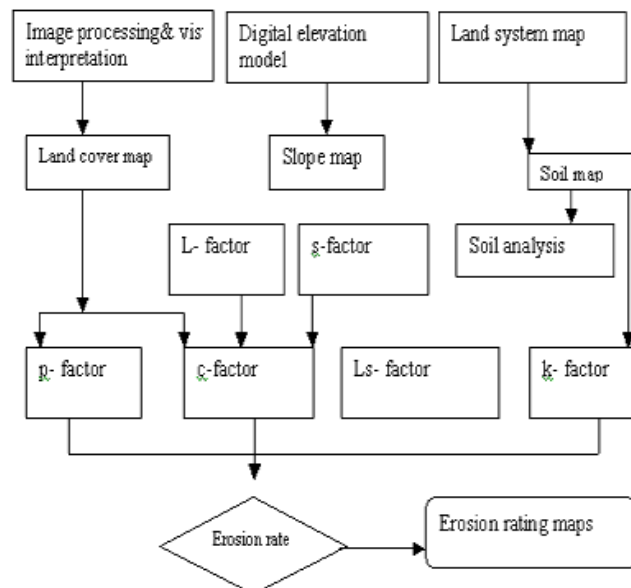
P= Factor de la práctica en el control de la erosión.

De la media anual de precipitaciones (1942-mm) y de la máxima intensidad 30 minutos (10-mm) de 1991, el valor de R se calculó. El factor K para 20 unidades de suelo y el factor P para diferentes coberturas del suelo fueron determinadas usando Schwab et al. (1993). La longitud de la pendiente para diferentes coberturas del suelo fue adaptada del DSCWM/HMG, Nepal 1992, mientras el

factor de inclinación de la pendiente fue determinado usando modelos digitales de terreno (MDT) los cuales fueron interpolados.

Después se digitalizó las curvas de nivel con intervalos de 20 metros. El valor C fue adaptado de Wischmeier y Smit (1978) para bosques, arbustos y pastizales, mientras para la agricultura, fue calculado como lo sugiere Morgan (1986). Las muestras del suelo fueron analizadas para textura y permeabilidad en RARS, Tarahara, Sunsari, Nepal. Las capas del modelo USLE fueron creadas e integradas con la ayuda de un SIG (Figura 41).

Figura 42. Modelo USLE en conjunto con SR y SIG para la estimación de la erosión del suelo.



Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

En general el cambio de cobertura del suelo y el incremento de la pérdida del suelo durante el período de 13 años; entre 1978 y 1991 son dados en la Tabla 11. La tasa de la perdida forestal de la zona de estudio fue 0.57% al año y es demasiado alto para el uso sostenible de los recursos. El incremento de la tasa de erosión del suelo de 0.95 a 1.37 mm/año es importante para el intervalo de tiempo

de 13 años, ya que el nivel de tolerancia de la erosión del suelo en Nepal está en un rango de 0.5 mm/año (Bothale & Sharma, Erosion response model for watershed prioritisation in Bajaj sagar sub catchment, 1981).

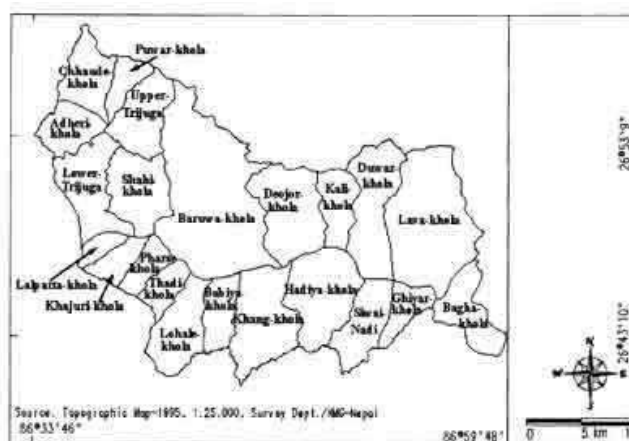
Tabla 11. Pérdida forestal y de Suelo de la cuenca.

Land Cover Types	Land Cover (%)			Soil Loss (mm/yr)		
	1978	1991	Change	1978	1991	4.33
Shrubs	2.27	3.45	1.18	9.40	13.73	4.33
Degreded forest	4.19	8.90	4.71	0.84	0.80	-0.04
Forest	65.21	57.86	-7.35	0.13	0.14	0.01
Agriculture	22.49	23.66	1.17	2.74	3.14	0.40
River	5.84	6.14	0.30	0.00	0.00	0.00
Total	100.0	100.0	0.00	0.95	1.37	0.42
Degreded forest <40% canopy cover, forest=>40% canopy cover Forest Loss Rate=7.35/13=0.57 percent per year						

Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

Del mapa topográfico, 22 sub-cuencas fueron delimitadas y después el río principal de la sub-cuenca (Figura 42). La cubierta forestal de la sub-cuenca y la pérdida de suelo fueron tomadas como base para la priorización. Además, la contribución de cada sub-cuenca a la cantidad total de la pérdida del suelo de toda la cuenca también se consideró para dicha evaluación. La Tabla 12 muestra la lista de nombres de las sub-cuencas delimitadas con la pérdida forestal y de suelo.

Figura 43. Mapa de la sub-cuenca de la cuenca Trijuga, Nepal.



Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

Tabla 12. Pérdida forestal y de suelo de las sub-cuencas.

Catchments Name	Area(sq. km)	Area of Forest (%)			Ave soil Loss(t/ha/yr)			%Contribution to soil Loss			DSI	SI
		1978	1991	Change	1978	1991(PC)	Change	1978	1991	Change		
Adheri-Khola	20.27	90.73	76.35	14.37	5.57	13.12	7.54	1.24	2.02	0.78	7.90	0.52
Babliya-Khola	18.58	73.54	70.75	2.79	3.22	3.68	0.46	0.66	0.52	-0.14	1.01	0.16
Bagha-Khola	26.37	20.05	20.02	0.04	6.06	6.53	0.48	1.75	1.31	-0.44	0.12	12.08
Baruwa-Khola	121.35	66.75	60.08	6.67	20.44	29.69	9.25	27.15	27.37	0.22	5.92	1.63
Chhaude-Khola	25.46	30.63	29.46	1.17	60.62	83.14	22.52	16.90	16.08	-0.82	10.28	19.22
Deojan-Khola	45.74	90.16	84.26	5.91	4.41	5.09	0.68	2.21	1.77	-0.44	1.97	0.11
Dunwar-Khola	44.69	52.39	46.95	5.44	13.95	26.75	12.78	6.82	9.05	2.25	8.25	1.99
Ghiyan-Khola	14.73	71.88	64.49	7.40	3.94	4.79	0.85	0.64	0.54	-0.10	2.58	0.11
Hadiya-Khola	46.15	58.62	53.12	5.50	3.36	4.94	1.58	1.70	1.73	0.03	5.37	0.10
Kali-Khola	20.91	90.59	86.61	4.98	4.45	5.80	1.35	1.02	0.92	-0.10	2.07	0.27
Khajuli-Khola	12.37	59.93	38.47	21.46	4.91	6.51	1.59	0.67	0.61	-0.05	7.14	0.07
Khang-Khola	46.15	77.05	75.29	1.76	2.28	2.83	0.56	1.18	1.00	-0.18	0.74	0.32
Lalpatte-Khola	7.55	71.54	33.19	38.35	3.63	7.54	3.91	0.30	0.43	0.13	13.30	0.10
Lawa-Khola	82.47	51.59	36.85	14.74	6.03	11.22	5.19	5.44	7.03	1.59	7.23	0.35
Lohale-Khola	31.50	89.26	86.85	2.41	1.33	1.41	0.09	0.46	0.34	-0.12	0.73	0.04
Lohar-Trijuga	36.94	70.05	58.83	11.21	8.63	12.45	3.81	3.49	3.49	0.00	5.08	0.34
Phare-Khola	12.71	46.58	22.97	23.61	5.89	8.58	2.70	0.82	0.83	0.01	8.30	0.11
Purwar-Khola	12.04	55.37	47.71	7.67	62.06	76.13	14.07	8.17	6.96	-1.21	8.33	1.84
Shahi-Khola	35.02	54.77	48.08	6.69	10.35	16.43	6.08	3.97	4.37	0.40	7.84	0.36
Shivai-Nadi	27.78	79.14	73.38	5.76	2.47	3.95	0.48	0.75	0.52	-0.13	1.51	0.10
Thadi-Khola	13.31	73.59	58.43	15.16	2.96	4.29	1.31	0.43	0.43	0.00	5.14	0.09
Upper-Trijuga	29.72	48.58	47.99	0.58	43.88	55.60	11.72	14.27	12.56	-1.72	5.02	20.05

Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

Lo forestal y los suelos son los recursos principales de la cuenca. Su cantidad de cambio en el período de tiempo especificado es la indicación de la velocidad de cambio de estado. Por lo tanto, mediante la evaluación de la pérdida de suelo y forestal y el cambio entre 1978 y 1991 se hizo la contribución total de la pérdida del suelo de cada sub- cuenca. DSI ha sido formulado (Sah et al, 1997). El DSI (Índice de Velocidad de Degradación) es definido como la velocidad de degradación de las sub-cuencas.

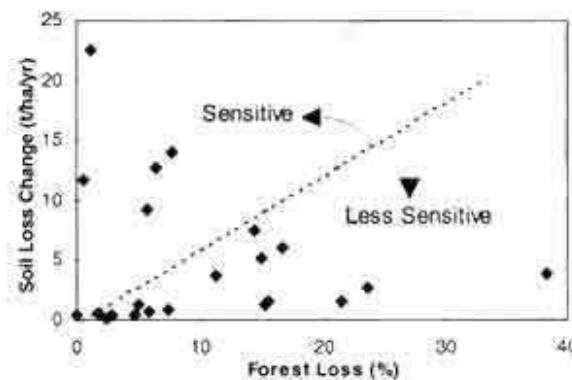
$DSI = 0.3 * \text{cambio forestal (\%)} + 0.45 \text{ tasa de cambio de la pérdida de suelo (t/ha/7año)} + 0.25 \text{ contribución para el cambio de la pérdida de suelo (\%)}$.

El peso de cada factor se ha decidido sobre la base de su importancia a la degradación de la tierra. Los valores del DIS son dados en la Tabla 12.

El impacto de la pérdida forestal de las sub-cuencas causa varios niveles de respuesta, que en este caso es aumentar la pérdida de suelo. Eso depende de características tales como la manera de cortar árboles con la pendiente de las sub-cuencas. Por ejemplo, la pérdida de bosques en la ladera es más crítica que en el área plana. Para evaluar a esta característica, se propone la sensibilidad del suelo y el SI (Índice de Sensibilidad) definido (Sah et al, 1997). El análisis de sensibilidad del suelo (Figura 43) muestra que algunas sub-cuencas son más sensibles como la ligera pérdida forestal producida por enormes cantidades de suelo. El SI para la sub-cuenca esta dado en la Tabla 13 y su ecuación se muestra a continuación:

SI = Incremento Pérdida de Suelo (t/ha/yr.)/Pérdida Forestal (%).

Figura 44. Modelo USLE en Conjunción con RS & SIG para estimar la erosión del suelo.



Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

La tasa de erosión de 1991 es considerada como PC (Condición Presente) de las sub- cuencas. Entre varios indicadores, la mayor tasa de erosión del suelo puede

ser considerada como un indicador de las condiciones de las sub-cuencas. (Tabla 12).

Como se señaló anteriormente, el DSI, SI y el PC se tomaron como la condición y el uso para el análisis de prioridades por el simple método matricial. Para crear esta matriz, el rango de valores cuantitativos ha sido definido por valores cualitativos. La Tabla 13 muestra los valores cualitativos para el DSI, SI y PC.

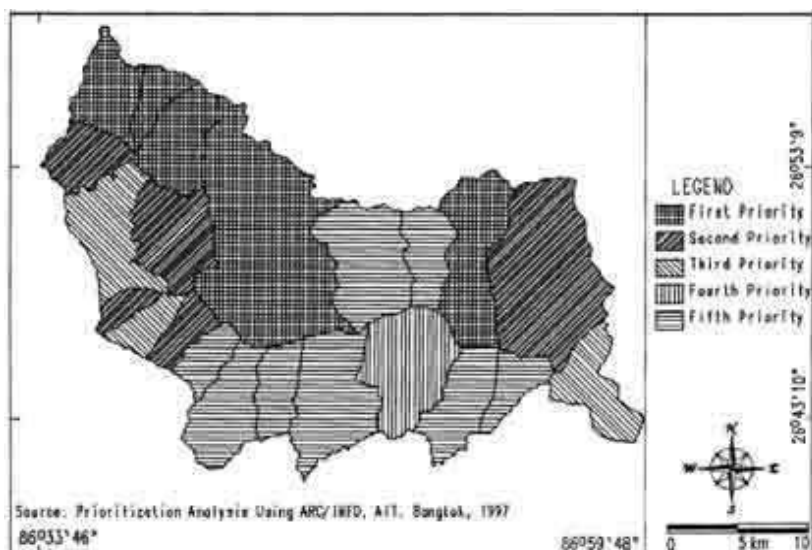
Tabla 13. Calificación de los Indicadores de Condición.

Rating	DSI	SI	PC
Very Low	<1	-	-
Low	1 to 4	<0.1	<7
Medium	4 to 6	0.1 to 0.5	7 to 15
High	6 to 8	0.5 to 2	15 to 30
Very High	>8	>2	>30

Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

De la calificación cualitativa, la matriz de superposición de dos dimensiones ha sido creada para tomar dos indicadores al tiempo. En primer lugar, el análisis de la matriz entre DSI y SI se hizo y se agruparon en 5 clases, las cuales fueron usadas para la segunda matriz de análisis con PC. Por último, se volvieron a agrupar en cinco clases cualitativas (Tabla 14). El grupo se decidió en base a la combinación lógica de los indicadores. Por ejemplo, la combinación alta del DSI y SI se agrupó como grupo de primera prioridad. La salida de la matriz de análisis es dada en la Tabla 15, donde las 22 sub-cuencas se clasificaron en 5 grupos. El mapa de la Figura 44 muestra la distribución espacial de la sub-cuenca para la priorización del trabajo de conservación.

Figura 45. Mapa de priorización en la conservación de la cuenca Trijuga, Nepal.



Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

Tabla 14. Priorización dada por la matriz de análisis con DSI y PC.

SI/DSI	VL	L	M	H	VH	PC/DSI-SI	VL	L	M	H	VH
L	5	5	4	3	2	L	5	5	4	3	2
M	5	4	3	2	2	M	5	4	3	2	2
H	4	3	2	1	1	H	4	3	2	1	1
VH	3	2	1	1	1	VH	3	2	1	1	1

VL= Very Low, L=Low, M=Medium, H=High, VH=Very high
1,2,3,4 and 5 are the Priority Decreasing order

Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

Tabla 15. Priorización en la conservación de las sub-cuencas.

Conservation Prioritization	List of the subwatershed
First Priority	Chhaude-khola, Puwar-khola, Upper-Trijuga, Baruwa-Khola and Duwar-khola
Second Priority	Adheri-khola, Lava-khola, shahi-khola, Lalpatta-khola and Pharse-khola
Third Priority	Lower-Trijuga, Khajuri-khola and Bagha-khola
Fourty Priority	Hadiya-Khola
Fifth Priority	Deojor-khola, Kali-khola, thadi-khola, Khang-khola, Babiya-khola, Lohale-khola, Siwal-Naid and Ghiyar -khola

Fuente: (Sah, Murai, & Honda, 1997)

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Si bien desde un punto de vista científico es bien probada la utilidad de estudiar la cuenca como un sistema, también lo es a los efectos prácticos. Cualquier acción que afecte a un sector de la cuenca repercute aguas abajo de la misma; una alteración en la utilización del territorio en el área de cabecera tarde o temprano repercutirá en la desembocadura.

Son precisamente estas alteraciones en el uso del suelo las responsables en gran parte de que sean más rigurosos los efectos de las crecidas en muchas áreas, y que los problemas de contaminación hayan aumentado sensiblemente (Salomón & Soria, 1998).

Acciones antrópicas modifican el estado natural de las cuencas hidrográficas produciendo desequilibrios en el medio ambiente dando lugar a poluciones y contaminaciones entre otros. Sequías, inundaciones, contaminación y otros efectos nocivos de las aguas que temporal o frecuentemente afectan a grandes zonas, producen incalculables daños a la comunidad por pérdida de bienes, infraestructura, y en numerosas ocasiones, también pérdidas humanas (CORANTIOQUIA, 2002).

A tal efecto se ha procedido a efectuar el análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del Río Mulaló, con el fin de describir y medir la forma de ésta, lo cual es un factor muy importante para determinar su comportamiento particular y su influencia en el Corregimiento de Mulaló, ante crecidas y riesgos que su dinamismo pueda provocar a la comunidad.

Y es ante la metodología que se tratará en este proyecto, que se pretende realizar una comparación entre los valores de los parámetros obtenidos para dos épocas

distintas. Además, la propuesta metodológica planteada puede constituir una base conceptual para diversas investigaciones futuras.

Para realizar los estudios y análisis encaminados a establecer dichos parámetros, se requiere la aplicación de la Teledetección (implementación de Imágenes Satelitales) para un adecuado y eficaz desarrollo, dado que se trabajará en una grande extensión y no resulta conveniente llevarlo a cabo con procedimientos o técnicas convencionales.

La escala de trabajo, la extensión y cubrimiento de la superficie y la necesidad de contar con información geográfica de la zona, son algunos elementos que conducen a pensar e implementar técnicas más avanzadas ofrecidas por los Sensores Remotos.

5. JUSTIFICACIÓN

Es de vital importancia para el Corregimiento de Mulaló realizar un estudio y análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del Río Mulaló, ya que implica beneficios futuros a mediano y largo plazo, tales como:

- Planificación, manejo y administración de la cuenca en términos de los recursos naturales de la región. Contemplando los planes para el manejo de los bosques, planes de ordenación de los cultivos, planes para el manejo de los suelos, planes para el manejo de las aguas, etc.; pero no formulados de manera aislada, sino concebidos en una forma integral, de unidad, y eso contempla la regulación de la actividad humana.
- Por medio del análisis de los parámetros morfométricos, se establecerá si la cuenca genera algún riesgo a la comunidad del Corregimiento de Mulaló, alertando y dando un previo aviso para que se implementen medidas de seguridad, ante una posible crecida o inundación.
- Aplicación en investigaciones futuras, teniendo como referencia los resultados obtenidos en este proyecto y utilizando la propuesta metodológica aquí planteada como base conceptual.

6. METODOLOGÍA

6.1. PROCESAMIENTO EN EL SOFTWARE ERDAS IMAGINE 9.2

La Cuenca del Río Mulaló se encuentra localizada entre las Latitudes $3^{\circ}37'10.1''\text{N}$ y $3^{\circ}40'25.2''\text{N}$ y entre las Longitudes $76^{\circ}27'56.1''\text{W}$ y $76^{\circ}32'47.9''\text{W}$. En la Figura 45 se muestra una imagen de la zona de estudio tomada de la página de la USGS (United States Geological Survey).

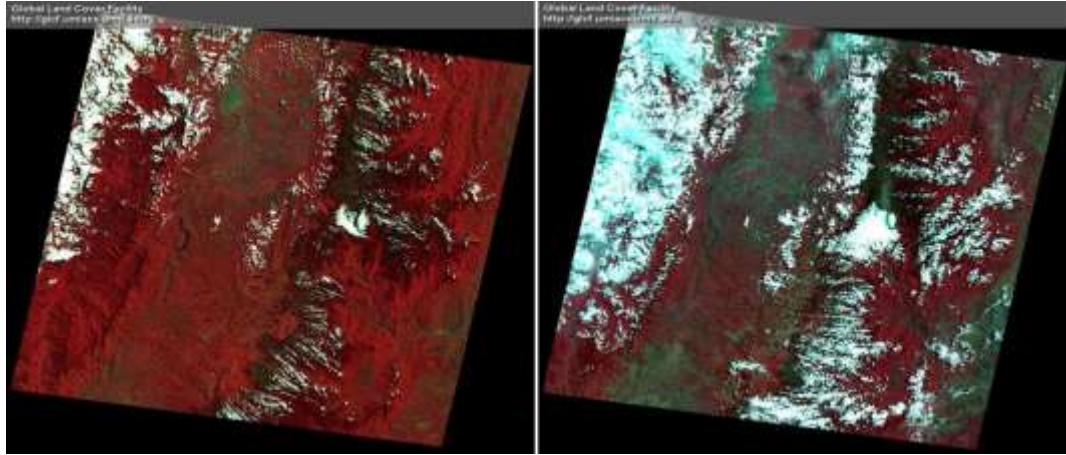
Figura 46. Localización general del área de estudio.



Fuente: <http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

Para el desarrollo del proyecto se utilizó dos Imágenes de Satélite (Landsat TM, 032-377 y Landsat ETM+, 042-824) de épocas distintas (1989-08-07 y 2001-08-24 respectivamente). Estas imágenes se encuentran en formato TIFF y fueron descargadas de la página electrónica <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/search.jsp> de la Universidad de Maryland.

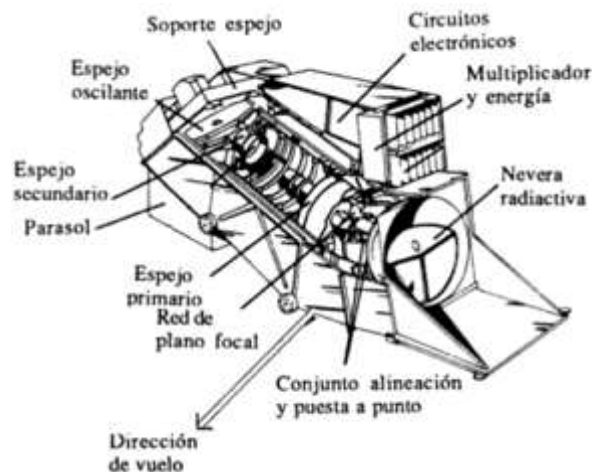
Figura 47. Imágenes Satelitales de la zona de estudio (TM a la izquierda y ETM+ a la derecha).



Fuente: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/search.jsp>

El sensor “Thematic Mapper” (TM) para cartografía temática es transportado, conjuntamente con el MSS, por los satélites Landsat 4 y 5. El TM es un sensor de barrido perfeccionado de tipo transversal (Figura 47) que tiene mayor sensibilidad espectral, radiométrica y geométrica que sus predecesores.

Figura 48. Esquema del sistema TM Landsat.



Fuente: (Gutierrez Claverol, 1993)

Los datos de las imágenes tomadas por el TM se transmiten continuamente a la Tierra en forma digital y se disponen como imágenes sucesivas compuestas de elementos puntuales de imagen “pixels”, cada uno de los cuales cubre una superficie de terreno de 30x30 m (120x120 m en la banda térmica del infrarrojo).

Una escena completa puede tener como máximo 6.920 pixels por línea y 5.760 líneas (total: 39 millones), cubriendo un área aproximada de 185 x 185 Km, los mismos que abarca la representación MSS (Gutierrez Claverol, 1993).

Tabla 16. Principales aplicaciones de las bandas del TM.

Band	λ (μm)	Espectr	Aplicaciones
1	0.45-	Azul	Aguas litorales. Suelo-
2	0.52	Verde	vegetación Salud y vigor
3	0.52-	Rojo	de la vegetación Especies
4	0.60	IR	de plantas
5	0.63-	visible	Masas de agua
6	0.69	IR	Nubes-nieve. Humedad del
7	0.76-	visible	suelo

Fuente: (Gutierrez Claverol, 1993)

El sensor TM posee 7 bandas espectrales, frente a las 4 del MSS, y su rango se extiende, además de las regiones del visible e IR reflejado, al IR térmico (banda 6). Cada banda TM utiliza una serie de 16 detectores (con la excepción de la 6). En la Tabla 16 se resumen las características de las diferentes bandas y su utilidad.

Por otra parte, el Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) es un sensor a bordo del satélite Landsat 7 que ha adquirido imágenes de la Tierra casi continuamente desde julio de 1999, con un ciclo de repetición de 16 días.

Las imágenes Landsat ETM+ se componen de ocho bandas espectrales, con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1, 2, 3, 4, 5, y 7, de 60 metros para la banda 6 (Infrarrojo Térmico) y de 15 metros para la banda 8

(Pancromática). El tamaño de la escena es de aproximadamente 170 Km Norte-Sur por 183 Km Este-Oeste.

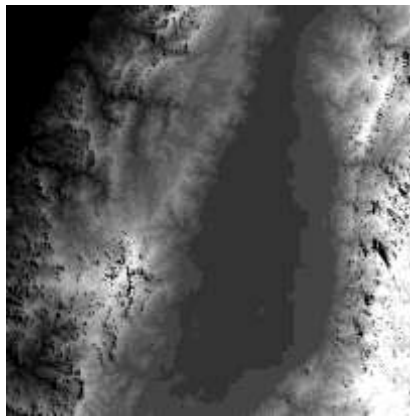
Tabla 17. Parámetros de las Imágenes Landsat ETM+.

Tamaño Píxel	15m - Banda 8 Pancromática 30m - Bandas Reflectivas 1-5 y 7 60m - Bandas Térmicas 6H y 6L
Rango Espectral	0.52-0.90 μ m - Banda 8 Pancromática 0.450-2.35 μ m - Bandas Reflectivas
Formato de	GeoTIFF
Método de	Convolución Cúbica (CC)
Proyección	UTM - WGS84 Estereográfica Polar para el
Orientación	Mapa (Norte Arriba)
Distribución	FTP de Descarga en Línea

Fuente: <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landsat/>

También se utilizó una Plancha Topográfica de la Subcuenca Mulaló (Dibujo No. 722-03-2) a escala 1:10.000 realizada por la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2000), con el fin de tener un reconocimiento de la zona de trabajo y extraer las coordenadas del punto de cierre de la cuenca para el posterior procesamiento en el Sistema de Información Geográfico. Además, se trabajó con el modelo SRTM3 (N03W077) con resolución de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m).

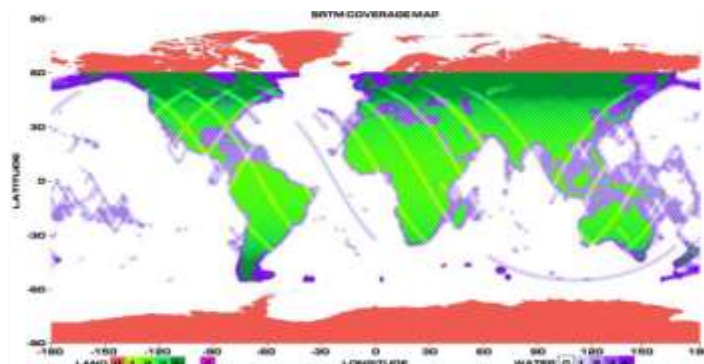
Figura 49. MDE SRTM3 de la zona de estudio.



Fuente: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3>

El modelo SRTM DTED (Shuttle Radar Topography Mission – Digital Terrain Elevation Data) se basa en los mismos datos recogidos en la misión SRTM de la NASA en febrero del año 2000, pero ofrece una resolución de hasta 1 segundo de arco para los Estados Unidos y de hasta 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m) para el resto de regiones comprendidas entre las Latitudes 56°S y 60°N. La cobertura total del modelo se muestra en la Figura 49. Se puede encontrar información sobre este modelo en el siguiente URL: <http://edcsns17.cr.usgs.gov/srtmdted/>.

Figura 50. Cobertura de los datos recogidos en la misión SRTM.



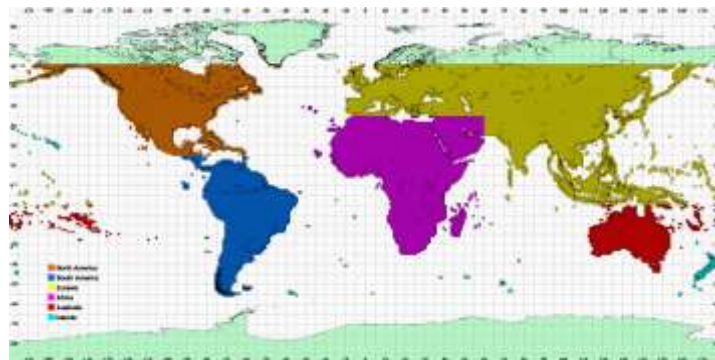
Fuente: http://edc.usgs.gov/srtm/images/srtm_covmap_hi.jpg

El Datum horizontal es el WGS84 y el Datum vertical el nivel medio del mar determinado por el Geoide EGM96 del modelo WGS84. Como ya se ha indicado, la precisión es distinta según la zona geográfica, denominándose más concretamente el modelo SRTM DTED 2 para los datos con una precisión de 1 segundo de arco y SRTM DTED 1 (llamado también SRTM3) para los datos con una precisión de 3 segundos de arco.

Los datos del modelo están organizados por continentes y pueden descargarse desde el siguiente servidor FTP:
<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3>.

En la Figura 50 se muestra la distribución por continentes de todos los datos del modelo. Cada pequeña cuadrícula corresponde con un fichero de datos.

Figura 51. Distribución por continentes de los datos del modelo SRTM DTED.



Fuente: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/Documentation/>

Dentro de cada área, los ficheros de datos que corresponden con las cuadrículas de la Figura 50 usan las nomenclaturas “NxxEyyy.hgt” o “NxxWyyy.hgt”, donde “xx” es el valor de la Latitud meridional de la cuadrícula e “yy” es el valor de la Longitud oriental de la cuadrícula.

Dado que el formato (.hgt) en que se descarga el modelo no es muy convencional y poco tratado por el software, se realizó la transformación mediante el SIG a formato .BIL y posteriormente a formato .img.

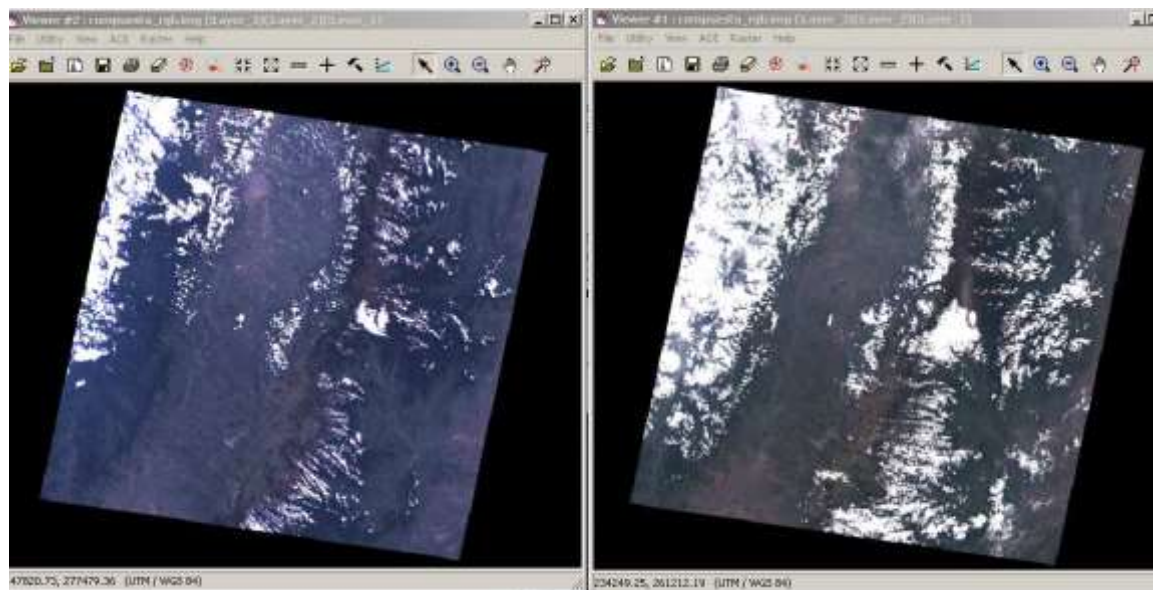
Las Imágenes de Satélite al igual que el MDE SRTM3 fueron importadas al Software ERDAS Imagine 9.2 en donde se realizaron los siguientes pasos:

6.1.1. Composición de las Imágenes

Consiste en componer las Imágenes Satelitales mediante las bandas espectrales, permitiendo así las diferentes combinaciones entre ellas que producen una visualización en falso o verdadero color (RGB).

Para este caso solo se tuvo en cuenta las bandas 1, 2 y 3 (visible) ya que para la metodología empleada no se necesita utilizar todas las bandas. Este proceso se muestra en la siguiente figura:

Figura 52. Imágenes compuestas (bandas 1, 2 y 3), TM a la izquierda y ETM+ a la derecha, combinación R: 3, G: 2, B: 1 (color verdadero).



El software genera las imágenes piramidales al momento de visualizarlas, con el fin de un fácil y ligero manejo de éstas. Esto se basa en el concepto de multiresolución y de mosaicos de imagen.

La multiresolución se refiere a la transmisión progresiva de la imagen digital de menor a mayor resolución de acuerdo con las necesidades de detalle y escala.

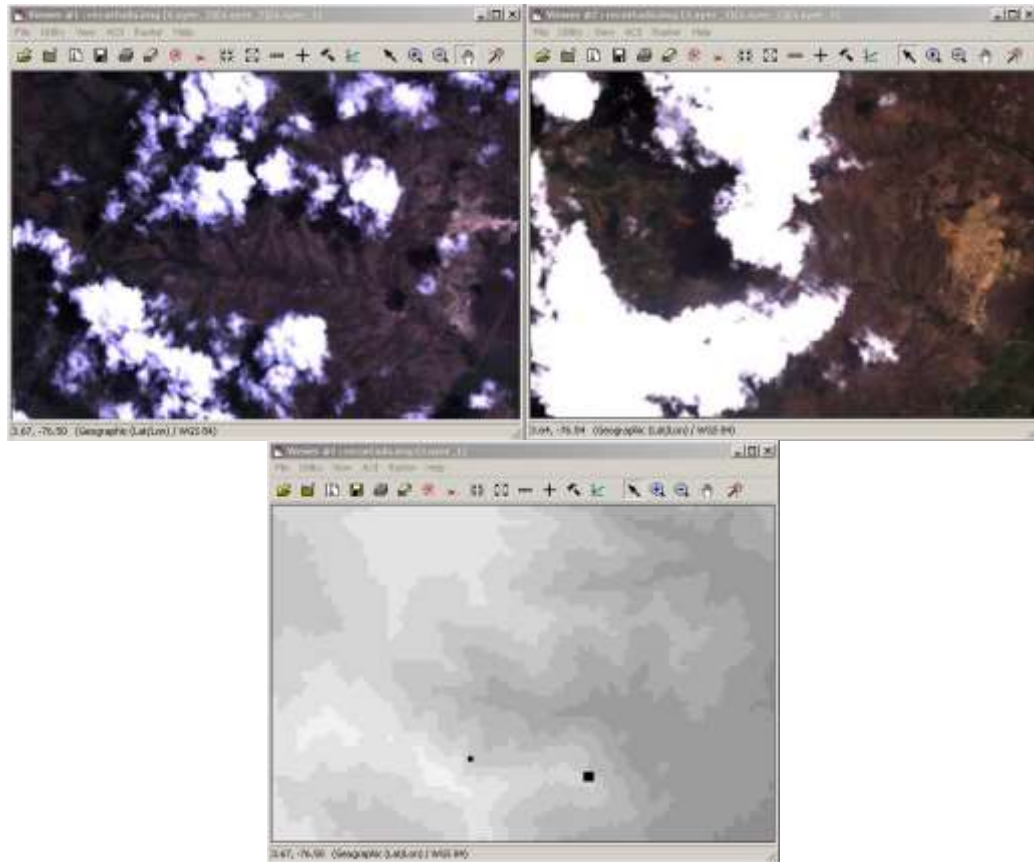
6.1.2. Cambio del Sistema de Proyección de las Imágenes de Satélite

Tanto las imágenes de satélite como el modelo SRTM3 tienen asociado el Sistema de Referencia WGS84, pero se encuentran proyectados en diferente sistema, por lo tanto, se procedió a cambiar la proyección de las imágenes de satélite (UTM zona 18 Norte) al mismo que presenta el MDE SRTM3 (Geográficas) mediante el método de re-muestreo el Vecino más Cercano, con el fin de tener todo proyectado bajo un mismo sistema. Aunque para efectos de cálculos en el SIG, se volvió al sistema UTM.

6.1.3. Obtención de las Ventanas

Proceso en el cual se recortan las imágenes de satélite y el MDE para extraer la zona de estudio (Cuenca del Río Mulaló), la cual se encuentra localizada entre las Latitudes 3°37'10.1"N y 3°40'25.2"N y entre las Longitudes 76°27'56.1"W y 76°32'47.9"W. Al realizar este proceso se obtuvo lo siguiente:

Figura 53. Imágenes recortadas (TM a la izquierda, ETM+ a la derecha y MDE SRTM3 abajo).



Como se puede observar en la anterior figura, las imágenes satelitales exhiben una gran limitante de visualización y análisis debido a las nubes presentes en ellas, además el MDE tiene pixeles sin datos (color negro) que impiden el posterior análisis hidrográfico en el SIG, por lo que se decidió pasar este modelo a formato ASCII y a través del promedio de los valores de los píxeles cercano a estos, se les asignó una altura, teniendo de esta forma una superficie continua y sin problemas. Interesante, se debe resaltar.

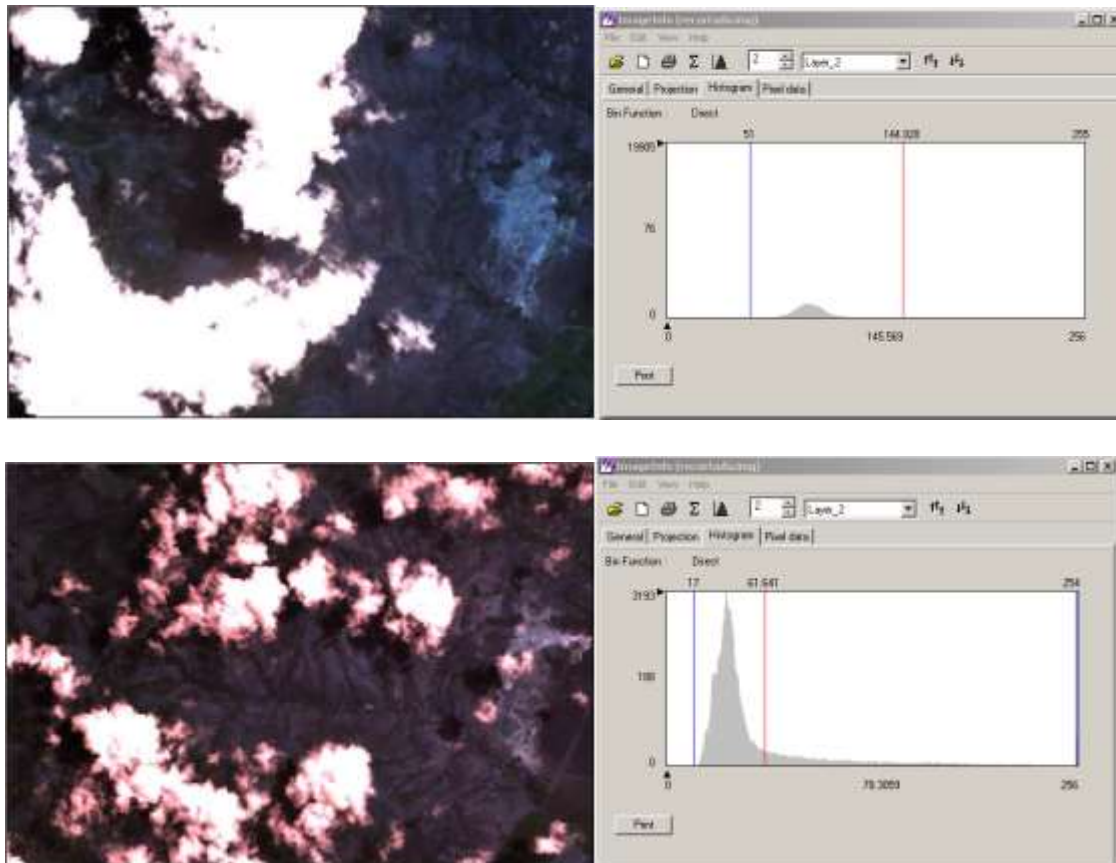
6.1.4. Corrección Atmosférica

Procedimiento mediante el cual se restauran los Niveles Digitales (ND) originales de una imagen, en el supuesto caso de tomarlos en condiciones de ausencia del

efecto atmosférico. Para esto se utilizó el método de Corrección de Histogramas por sus Valores Mínimos. Esto consiste en hacer coincidir el menor valor digital de la imagen con cero.

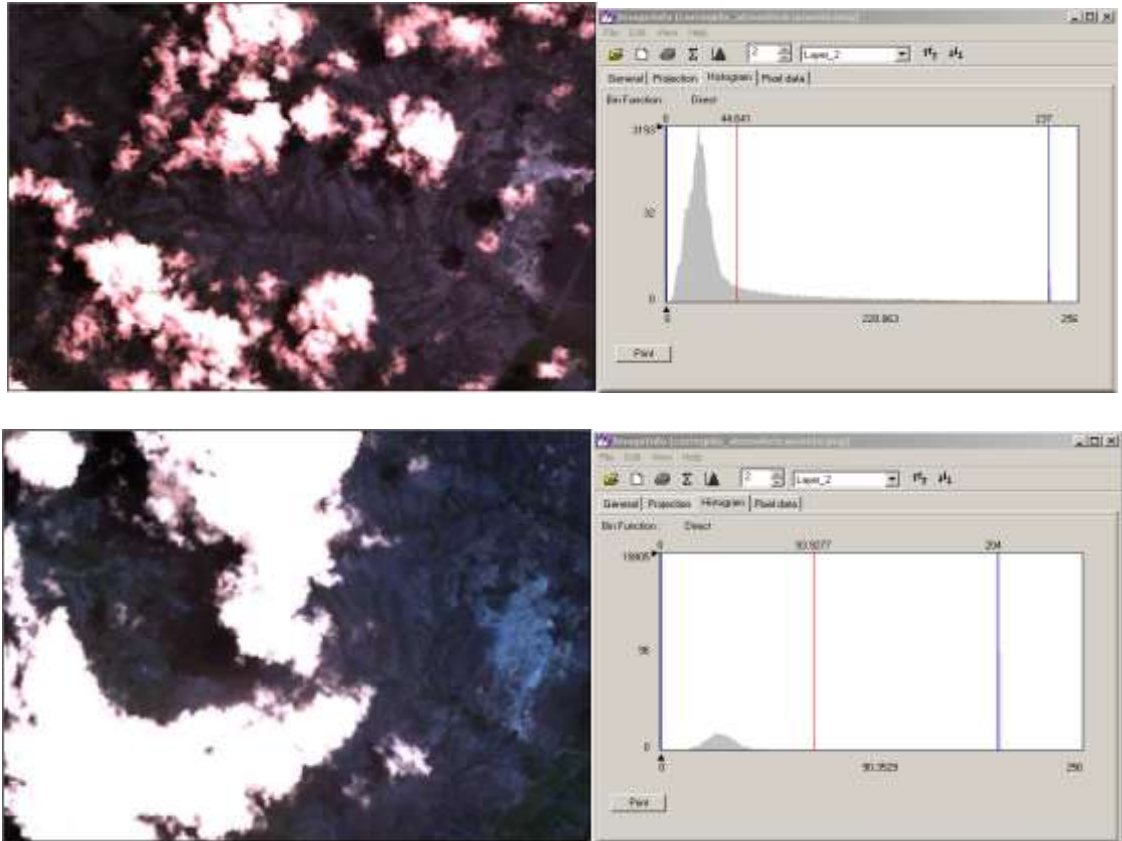
En la siguiente figura se muestra las imágenes sin Corrección Atmosférica con sus respectivos histogramas:

Figura 54. Imágenes sin Corrección Atmosférica (Banda 2, TM arriba, ETM+ abajo).



Aplicando este método a las dos imágenes (TM y ETM+) se obtuvo lo siguiente:

Figura 55. Imágenes corregidas atmosféricamente (Banda 2, TM arriba, ETM+ abajo).



Al llevar a cabo esta corrección del histograma por valores mínimos, el valor de los niveles digitales disminuye considerablemente en la imagen resultante respecto a la imagen original.

La información estadística como la media, la mediana y el valor máximo de cada banda, varían en la imagen resultante respecto a la imagen sin corregir. El único factor estadístico que se mantiene igual es la desviación estándar.

6.1.5 Composición del MDE SRTM3 y las Imágenes Satelitales

Este proceso consiste en componer el Modelo Digital de Elevación y las Imágenes de Satélite en un solo objeto, obteniéndose como resultado una imagen en 3D.

Este proceso se realizó por medio del módulo de VirtualGIS del software ERDAS Imagine 9.2, con el objetivo de visualizar los rasgos más significativos (morfología de la cuenca) que definen el área de estudio, además permite una visualización aproximada de la realidad.

Los resultados se muestran a continuación:

Figura 56. Composición del MDE SRTM3 y la imagen TM.

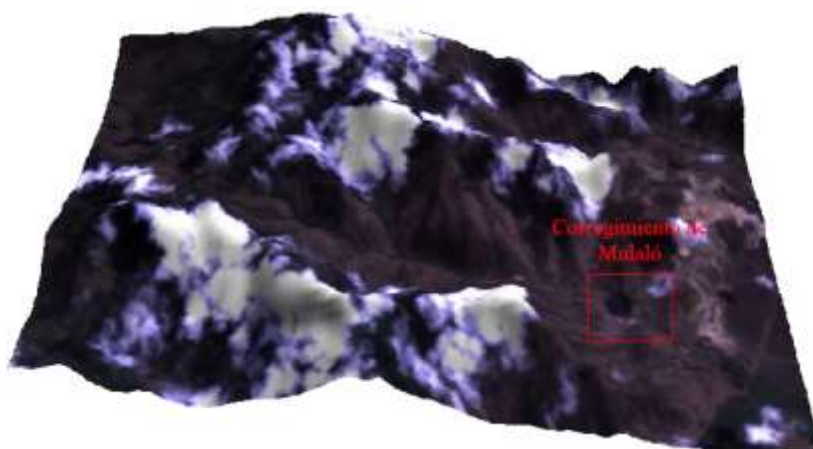
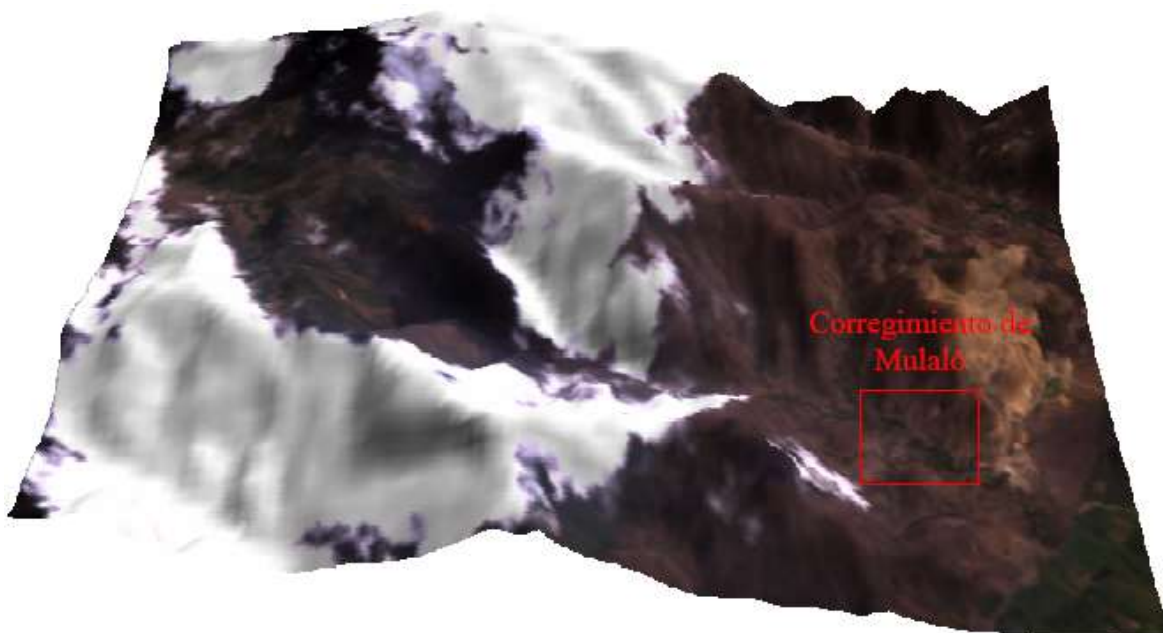


Figura 57. Composición del MDE SRTM3 y la imagen ETM+.



El problema de nubosidad en las imágenes (zonas blancas) se puede ver con claridad en las anteriores figuras. Este es una limitante ante la obtención de la información directa del terreno y no permite detectar con claridad rasgos que definen el área de la cuenca. Por esta razón se procede a realizar la delimitación de la cuenca hidrográfica en el SIG.

6.2. PROCESAMIENTO EN EL SOFTWARE ARCGIS 10.1 E IDRISI SELVA

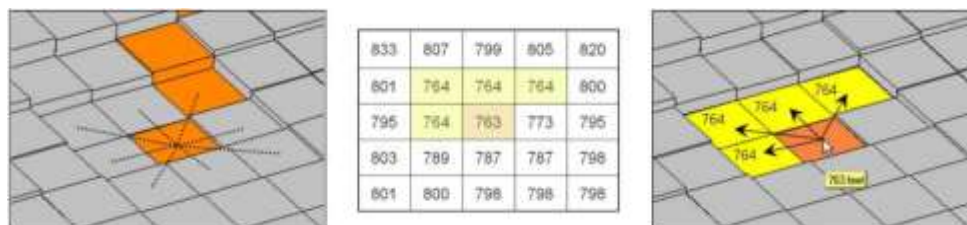
6.2.1. Corrección del MDE SRTM3

Para limitar una cuenca hidrográfica es necesario tener en cuenta la topografía del terreno. Los límites de una cuenca son las partes más altas a su alrededor a las que se le llaman divisoria o divorcios de aguas. Para realizar el proceso de delimitación de ésta se debe trabajar con el MDE SRTM3, y a partir de él realizar diferentes modelos que permitan identificar los cursos de aguas y los cauces de la cuenca.

Es necesario encontrar las zonas del MDE donde no es posible que el agua drene hacia alguna de las direcciones (es decir sumideros). Para esto, se redefine el MDE mediante la función Fill que llena esas zonas para que el agua pueda drenar.

En la siguiente figura se observa que el píxel 763 está rodeado de alturas mayores, si hubiera un flujo de agua ésta se quedaría estancada allí. Por tal razón se le realiza una corrección al MDE.

Figura 58. Estancamiento del flujo de agua.



Fuente: Baquero Olga Lucia.

Figura 59. MDE SRTM3 corregido.

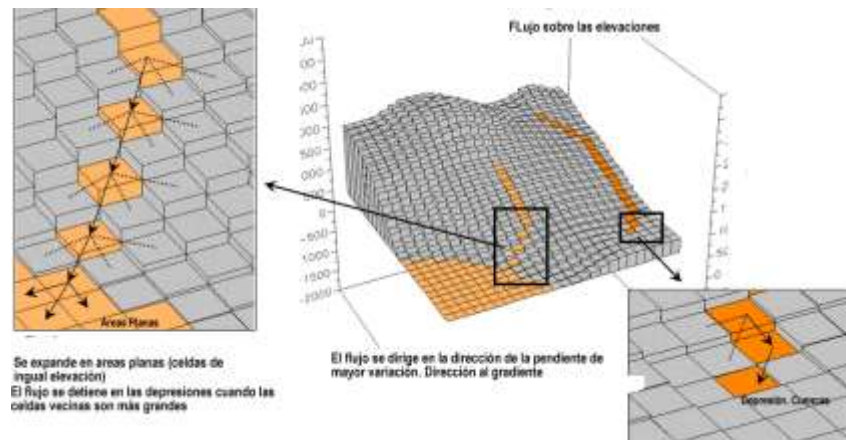


6.2.2. Generación de la Dirección de Flujos

La dirección de flujos determina el sentido y orientación en que fluye el agua, de esta forma se puede observar cómo se acumula el flujo.

Todas estas trayectorias de drenaje de agua se generan en función de las condiciones topográficas.

Figura 60. Dirección del flujo de agua.



Fuente: Baquero Olga Lucía.

Para generar las direcciones de flujo se debe utilizar el modelo corregido.

A continuación, se presenta el resultado obtenido mediante la función *Flow Direction*:

Figura 61. Dirección de flujos del MDE SRTM3.



Estos valores que toma el modelo indican la dirección del flujo, esto se explica de mejor forma en la siguiente tabla:

Tabla 18. Valores de dirección de flujo.

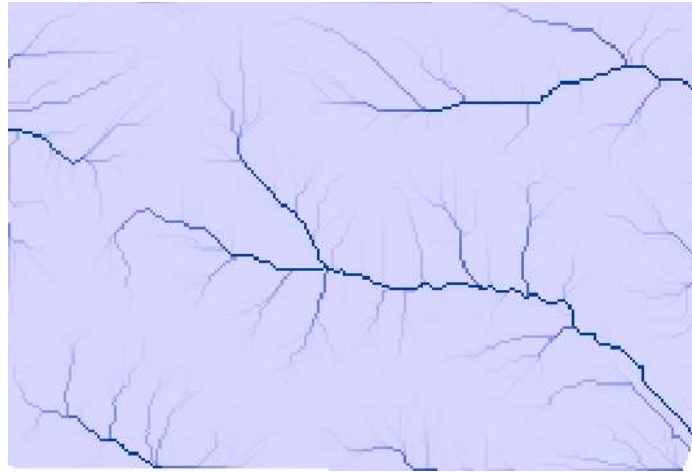
128 Noroeste	1 Norte	2 Noreste
64 Oeste		4 Este
32 Suroeste	16 Sur	8 Sureste

6.2.3. Generación del Flujo Acumulado

Se crea la red de drenaje calculando la acumulación del flujo a partir de la dirección hacia la cual drena el agua. Con esta cobertura se pueden analizar las zonas de las cuencas altas, es decir donde la acumulación del flujo es baja (colores claros), y las zonas de las cuencas bajas (colores oscuros).

A continuación, se muestra el modelo de acumulación de flujos realizado por medio de la función *Flow Accumulation*:

Figura 62. Red hídrica de la zona de estudio.



6.2.4. Delimitación de la Cuenca y Análisis Morfométrico

Para delimitar la Cuenca del Río Mulaló se debe tener un punto de cierre. Es un punto que identifica el corte de acumulación del caudal o donde la pendiente en la cuenca se hace casi cero.

Las coordenadas de este punto fueron extraídas de la Plancha Topográfica de la Subcuenca Mulaló (Dibujo No. 722-03-2) a escala 1:10.000 realizada por la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 1996).

Figura 62. Cuenca hidrográfica del Río Mulaló.



A partir de la delimitación de la cuenca se generó además el modelo de pendientes de la zona, mediante el cual se extrajo el parámetro S. Una vez

generados estos modelos, se trabajó, además del software ArcGis 10.1, con el Software IDRISI Selva y su módulo *Integrated Water Management*, con el fin de calcular los parámetros morfométricos de la cuenca y que se describen a continuación:

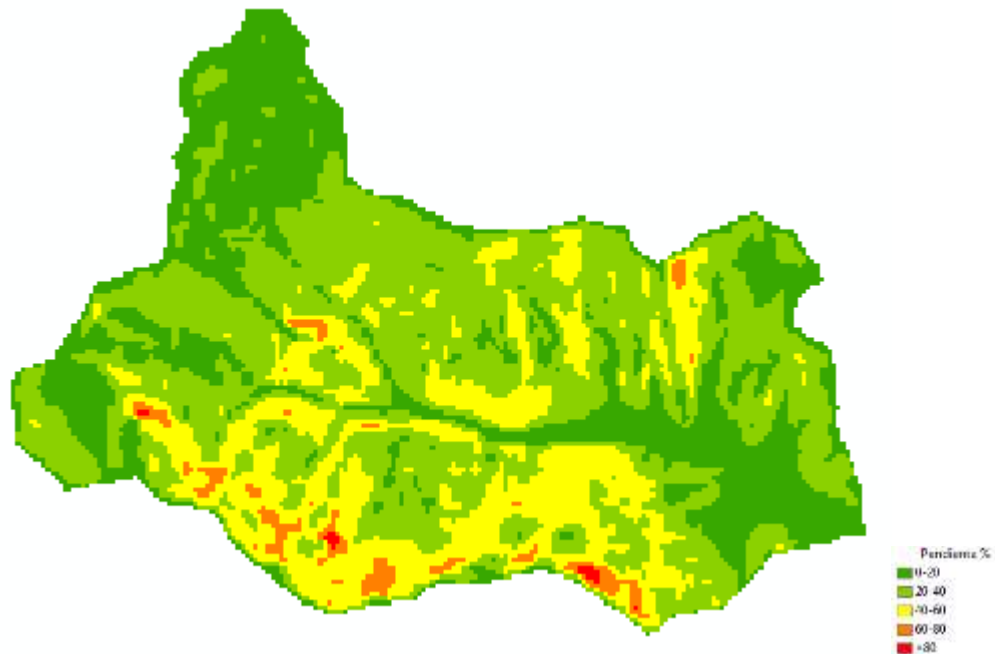
a. Área A (HA) Ha: Esta se define como el territorio que es drenado por el cauce principal (Río Mulaló), o sea que corresponde al área de captación, hasta el punto de cierre que se ha definido. Este parámetro se calculó directamente en el SIG.

b. Perímetro (P) Km: Es la longitud de la línea divisoria de aguas hasta el sitio de interés. Este parámetro se calculó directamente en el SIG.

c. Elevaciones Extremas (Cotas msnm): Son las alturas Máxima, Media y Mínima de la cuenca, medidas en el SIG.

d. Pendiente media (S) %: Se calcula a partir del mapa de pendientes realizado en el SIG.

Figura 63. Mapa de pendientes para el área de la cuenca.



e. Coeficiente de compacidad o Gravelious (KC): Se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca, basado en la relación del perímetro de la cuenca con el área de un círculo de área igual a la de la cuenca (círculo equivalente); de esta manera, entre mayor sea el coeficiente más distante será la forma de la cuenca con respecto al círculo.

Así, en una cuenca de forma alargada el agua discurre en general por un solo cauce principal, mientras que en otra de forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal, por lo que la duración del escurrimiento es mayor según (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 1996), se define como:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde P es el Perímetro y A es el Área de Captación.

Este coeficiente define la forma de la cuenca, respecto a la similitud con formas redondas, dentro de rangos que se muestran a continuación:

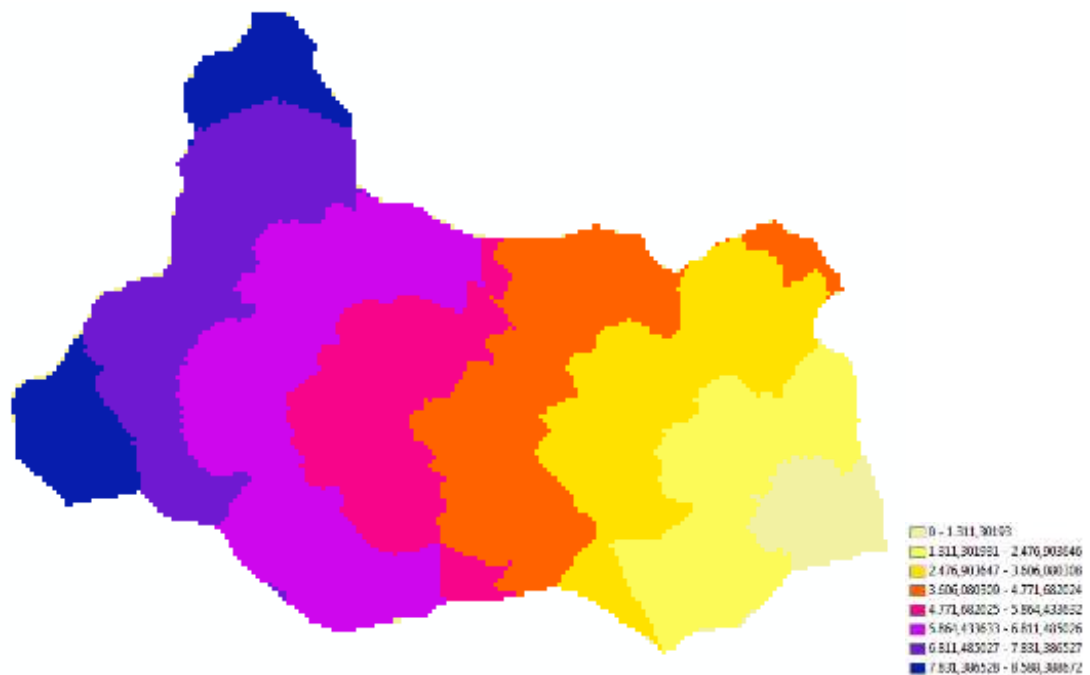
Kc1: Rango entre 1 y 1.25. Corresponde a forma redonda a oval redonda.

Kc2: Rango entre 1.25 y 1.5 Corresponde a forma oval redonda a oval oblonga.

Kc3: Rango entre 1.5 y 1.75 Corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

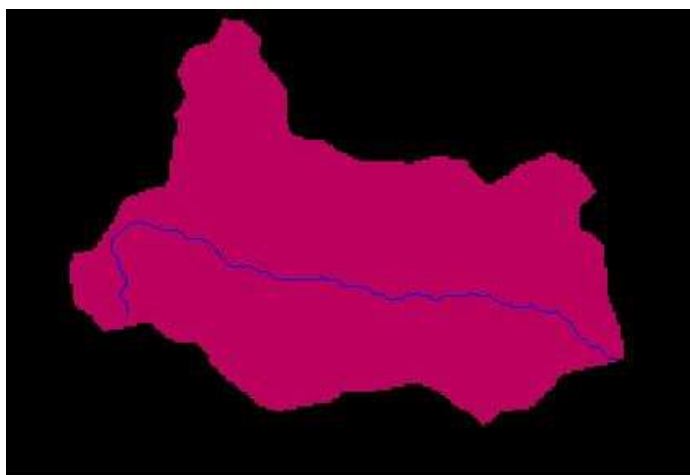
f. Longitud del Rio Principal (LR) Km: Es la longitud del cauce principal (Río Mulaló) medida en el SIG, por medio de la herramienta *Hidrology* a partir del modelo de dirección de flujo de la cuenca.

Figura 64. Mapa de longitud Principal



g. Longitud Directa del Rio Principal (LD) Km: Es la longitud directa del cauce principal (Río Mulaló) medida automáticamente por el software IDRISI.

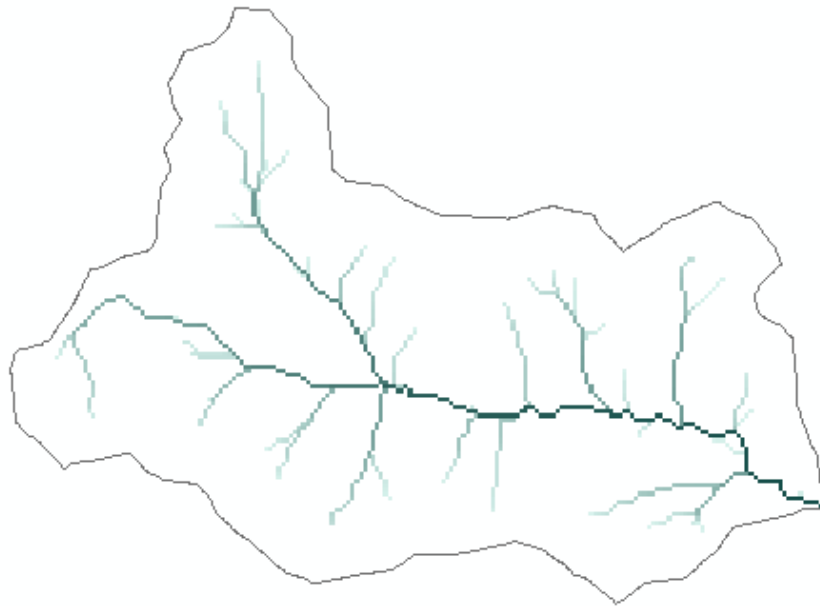
Figura 65. Cauce Principal de la Cuenca Hidrográfica del Río Mulaló



h. Pendiente Promedio del Río Principal (SC_P) grados: Se calcula automáticamente en el Software IDRISI.

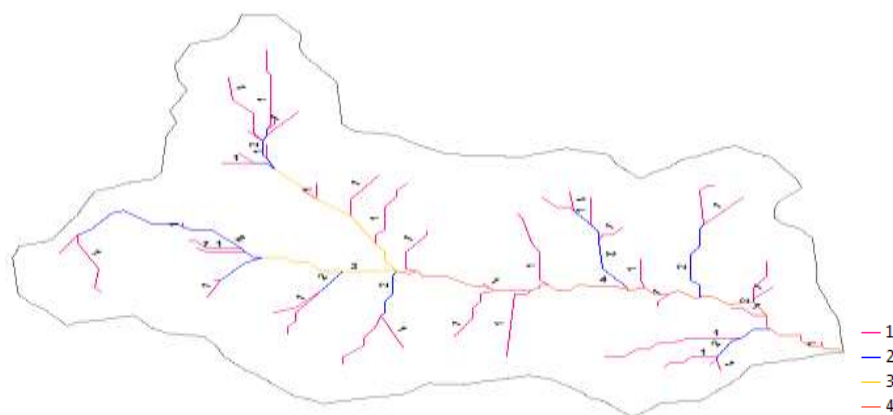
i. Orden de la Red Hídrica (UND): Se calcula por medio del SIG por medio de operaciones algebraicas al raster de dirección de flujo obteniendo un mapa de la red como se aprecia en la figura 66.

Figura 66. Red Hídrica



Seguido a esto y con las herramientas *Stream Link* y *Stream Orden* de ArcGis y acompañadas con el modelo de dirección de flujo se obtuvo el mapa de Orden de la Red Hídrica como se aprecia en la figura 67.

Figura 67. Mapa de Orden de la Red Hídrica.



j. Longitud de la Red Hídrica Km: se calculó como la sumatoria de la longitud de cada orden de la red hídrica, mediante consultas dentro del SIG.

k. Tiempo de Concentración (KC) horas: Se define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca, determinándose mediante fórmulas experimentales. En este ejercicio se utilizará la ecuación californiana (Kirpich), la cual se basa en la Longitud del Río Principal y la Diferencia Altitudinal de la cuenca. Este cálculo lo realiza automáticamente el software IDRISI.

l. Longitud Axial (LA) km: Es la distancia medida entre el punto más alejado de la cuenca y el punto de entrega o captación.

m. Ancho Promedio (AM) Km: Se define como la longitud plana de la línea promedia que se extiende entre lado y lado del territorio de la cuenca, perpendicular a la Longitud Axial y se calcula como:

$$AM = A/LA$$

Dónde:

A= Área de Captación. LA= Longitud Axial.

n. Factor Forma (FC): Es un indicador adimensional de la forma de la cuenca que permite, mediante la comparación con figuras geométricas básicas, interpretaciones de la conformación plana que tiene el área de captación; y es utilizado para conocer la susceptibilidad de la cuenca a las crecidas, valores bajos del factor indican que las cuencas serán menos propensas a estos fenómenos. Se calcula como:

$$FC = AM/LA$$

Donde AM es el Ancho Promedio y LA es la Longitud Axial.

o. Índice de Alargamiento (IA): Se obtiene relacionando la Longitud Axial con el Ancho Mayor medido perpendicularmente, es un parámetro utilizado para determinar la forma de la cuenca; un índice elevado significa una cuenca alargada en forma de rectángulo; por el contrario, un índice pequeño corresponde a una cuenca poco alargada en forma de cuadrado, con su red de drenaje en forma de abanico y el tramo del colector principal corto. Se calcula así:

$$IA = LA/I$$

Donde LA es la Longitud Axial e I es el Ancho Máximo medido perpendicularmente a LA.

p. Índice de Homogeneidad (IH): Se define como un factor adimensional que expresa la forma de la cuenca dividiendo su Área por el producto de la Longitud Axial y el Ancho Máximo medido perpendicular; en otras palabras, comparar el área de la cuenca con el área teórica de sus longitudes, de esta manera, el Índice de homogeneidad complementa el análisis del Índice de Alargamiento para definir la forma de la cuenca.

Se calcula así:

$$IH = A/(LA \times I)$$

Donde A es el Área, LA es la Longitud Axial e I el Ancho Máximo medido perpendicularmente a LA.

q. Coeficiente de Sinuosidad Hidráulico: se obtiene al calcular la relación entre la longitud del cauce principal (Río Mulaló), con la longitud máxima del valle que forma. Este parámetro se calculó automáticamente en el software IDRISI.

7. RESULTADOS

Tabla 19. Parámetros morfométricos de la Cuenca Hidrográfica del Río Mulaló

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
Área	<i>km²</i>	20.06
Perímetro de la cuenca	<i>km</i>	21.65
Cotas		
Altitud máxima	<i>msnm</i>	1830
Altitud media	<i>msnm</i>	1410
Altitud mínima	<i>msnm</i>	990
Pendiente promedio de la cuenca	%	40.52
Coeficiente Gravelious (Kc)		1.36
Longitud del curso principal	<i>km</i>	8.58
Longitud directa del curso principal	<i>km</i>	6.3
Pendiente del cauce principal	°	7.34
Orden de la Red Hídrica	<i>UND</i>	4
Longitud de la Red Hídrica	<i>km</i>	33.7
Tiempo de concentración	<i>horas</i>	0.89
Longitud Axial (LA)	<i>km</i>	7.2
Ancho Promedio (AM)	<i>km</i>	2.78
Factor Forma (FC)		0.38
Índice de Alargamiento (IA)		1.6
Índice de Homogeneidad (IH)		0.6
Coeficiente de Sinuosidad Hidráulico		1.37

Calculados los valores definidos en el capítulo anterior y que se presentan en la tabla anterior se generó el gráfico correspondiente a la curva hipsométrica, que representa la variación de la elevación de la cuenca respecto al nivel medio del mar (figura 68), así como también se generó el gráfico de perfil del cauce del río principal (figura 69).

Figura 68. Curva hipsométrica de la Cuenca del Rio Mulaló

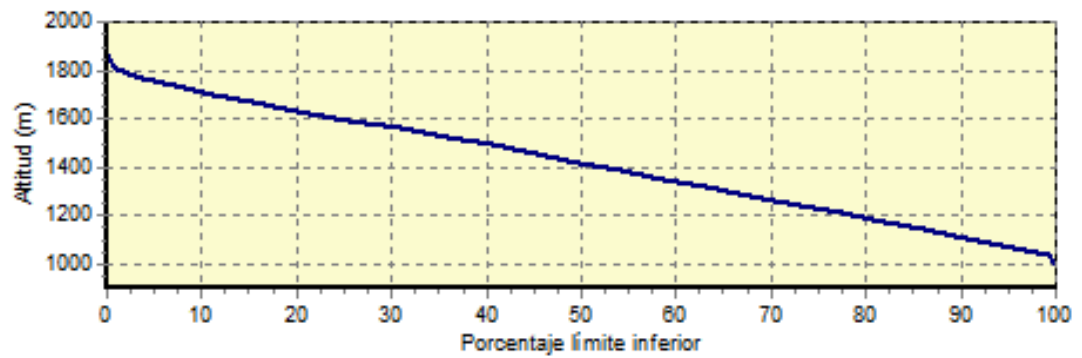
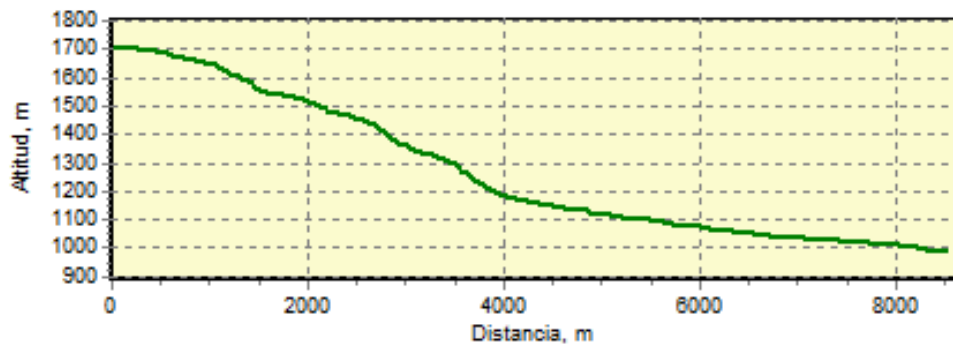


Figura 69. Perfil del Cauce Principal



CONCLUSIONES

A partir de los parámetros morfométricos (Tabla 19) se define que la cuenca presenta una forma alargada dado que el Factor Forma tiende a cero, este es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que aquellas con formas alargadas, tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las que presentan una forma redondeada, logrando una evacuación de la cuenca más rápida, mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base, principalmente.

Además, esta cuenca presenta una forma oval redonda u oval oblonga dado que el Coeficiente de Compacidad (KC) se encuentra dentro del rango de 1.25-1.5.

El valor del Índice de Alargamiento es mayor a uno, lo cual permite definir que la cuenca presenta un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada, que la de aquellas donde la proporción entre largo y ancho de la cuenca, está relacionada con la forma redondeada.

La pendiente promedio en la cuenca es del 40,52%, un valor alto que permite definir la zona como montañosa, lo que indica que las pendientes longitudinales y transversales son fuertes, aunque no las máximas que se puedan presentar en una dirección dada.

Según el Tiempo de Concentración (TC) el agua que llueve en el punto más lejano, tarda 0.8 horas (48 minutos) en llegar al nivel de base o fin de la cuenca.

Los resultados obtenidos utilizando las herramientas del geoprocesamiento permitieron conocer e interpretar parámetros del relieve, forma de la cuenca y otros parámetros morfométricos que definieron que el Corregimiento de Mulaló, no presenta algún riesgo inminente ante el dinamismo de esta cuenca.

IMPACTOS Y BENEFICIOS EN LA GESTION DEL TERRITORIO

Los resultados y conclusiones obtenidas como resultado del desarrollo de este proyecto permitirán estimar caudales máximos de creciente y generar mapas de inundabilidad para diferentes periodos de retorno, teniendo así un insumo base para planeación del territorio y los planes de mitigación del riesgo. Lo anterior permitirá tomar decisiones más acertadas tanto a las autoridades competentes como a los planificadores, beneficiando así a la comunidad que habita la zona de influencia de la cuenca.

El uso de la metodología aplicada en este estudio, tiene como valor agregado la automatización de los procesos que llevan a los resultados, es decir que se puede estimar un mayor número de parámetros en el menor tiempo posible entendiéndose con esto, un beneficio importante a la hora de tomar decisiones. El uso de este modelo digital de elevación (MDE) con una resolución como la que presenta, permite obtener datos más precisos, y asegura una menor pérdida de información en los cálculos internos del software, siendo este MDE apto para este tipo de topografía que presenta la zona, y no así para áreas planas.

RECOMENDACIONES

Debe aclararse que, dado que los parámetros morfométricos fueron calculados a partir del MDE SRTM3 generado en febrero de 2000, las condiciones establecidas en este proyecto para la cuenca hidrográfica del Río Mulaló están referidas a esta época y resolución del producto. Lo anterior nos lleva a recomendar que se debe definir una periodicidad para realizar análisis de este tipo en una cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta factores antrópicos y naturales en el área de estudio.

Además de contar con los datos más actuales posibles, se recomienda que las áreas que presenten una interacción antrópica directa deberán ser analizadas con mayor detalle, puesto que las mismas afectarían de alguna manera la precisión de los resultados calculados.

Los resultados de este estudio, sirven como base de modelos matemáticos más complejos que permiten estimar las energías cinéticas del recurso hídrico disponible, optimizando así el uso del mismo.

Aunque el uso de herramientas de Teledetección Espacial y sistemas de Información Geográfica permiten y facilitan el desarrollo de este tipo de estudios, es vital el reconocimiento en campo y las visitas a la zona de estudio para contar con datos mucho más acertados y certeros que conlleven a resultados más ajustados a la realidad.

Las imágenes satelitales son un insumo muy importante para la clasificación de los suelos, si se cuenta con este elemento en unas condiciones óptimas de interpretación sería muy interesante la correlación de los datos resultantes de una clasificación supervisada con el área de la cuenca y su comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Baquero Olga Lucía (2006). "Requerimiento Cuenca". Grupo de Investigación en Geomática.

Bhagyashri, M., & Bhavana, N. U. (s.f.). Scope for Artificial Recharge in Overdeveloped Watershed GV-41, District Aurangabad, Maharastra, India Using RS - GIS Techniques. Obtenido de GIS Development: <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/watershed/enviour.htm>

Bothale, R. V., & Sharma, J. R. (1981). Erosion response model for watershed prioritisation in Bajaj sagar sub catchment. Obtenido de GIS Developpment: <http://www.gisdevelopment.net/application/nrm/water/watershed/watws0009pf.htm>

Bothale, R. V., Bothale, V. M., & J., R. S. (1998). Delineation of eco watersheds by integration of remote sensing and GIS techniques for management of water and land resources. Obtenido de Institut fur Photogrammetrie- Universitat Stuttgart: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXII/part4/bothale39neu.pdf>

CORANTIOQUIA. (2002). Experiencias en el Ordenamiento Ambiental del Territorio. En C. A. Antioquia, Fundamentos y Conceptualización de los Planes de Ordenamiento Territorial (págs. 35-51). Medellín: CORANTIOQUIA.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (1996). Resumen de las Características Fisiográficas de las Cuencas que Drenan al Río Cauca. Cali: Subdirección Técnica – División Proyectos Técnicos – Grupo Recursos Hídricos.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2000). Sistema de Información Geográfica de la Unidad de Manejo de Cuenca Yumbo-Arroyohondo. Cali: Subdirección de Planeación – Grupo de Cartografía.

Gutierrez Claverol, M. (1993). Compendio de Teledetección Geológica. Oviedo: Servicio de Publicaciones Universidad de Oviedo.

Ludueña, S. G., Valladares, A. I., & Giraut, M. A. (2007). Caracterización hidrológica preliminar a partir de técnicas de teledetección. Caso de estudio: Islas Malvinas. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección (págs. 1-8). Mar del Plata: Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina.

Meléndez de la Cruz, J. F., & Alva Huayaney, M. (2005). Aplicación de la geomática en el análisis geomorfológico de la subcuenca de la quebrada Cojup (Huaraz, Ancash). Investigaciones Sociales, 9(15), 337-352.

Oñate-Valdivieso, F., & Bosque Sendra, J. (2007). Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección (págs. 457-464). Mar del Plata: Asociación Española de Teledetección.

Palavecino, J. A., Kozarik, J. C., & Maiocco, D. C. (2002). Morfeometría de la red de drenaje de la cuenca del arroyo Pomar. Obtenido de Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota SELPER: <http://www.selperbolivia.org/articulos/T064.pdf>

Sah, B. P., Murai, S., & Honda, K. (1997). Subwatershed prioritization for watershed management using Remote Sensing and GIS. Obtenido de Geospatial World: <http://geospatialworld.net/Paper/Application/ArticleView.aspx?aid=1325>

Salomón, M., & Soria, D. (1998). Estudio hidrográfico e hidrológico de las cuencas del Río Seco chacras de Coria y Tejo. Mendoza (Argentina). Obtenido de ASIC Primera Zona: http://www.asicprimerazona.com.ar/asic/publicaciones/estudio_tejo_mendoza.pdf

Thapa, R., Ravindra, K., & Sood, R. (2008). Study of Morphotectonic and Hydrogeology for Groundwater Prospecting Using Remote Sensing and GIS in the North West Himalaya, District Sirmour, Himachal Pradesh, India. Obtenido de The International Archives of the Photogrammetry: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/4_pdf/41.pdf

Valeriano, M. M., Kuplich, T. M., Storino, M., Amaral, B. D., Mendes, J. N., & Lima, D. J. (2006). Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. Obtenido de Mamiraua: http://www.mamiraua.org.br/cms/content/public/documents/publicacao/3093f5c8-2728-4ea6-af15-623713803305_artigo_16.%20VALERIANO.pdf