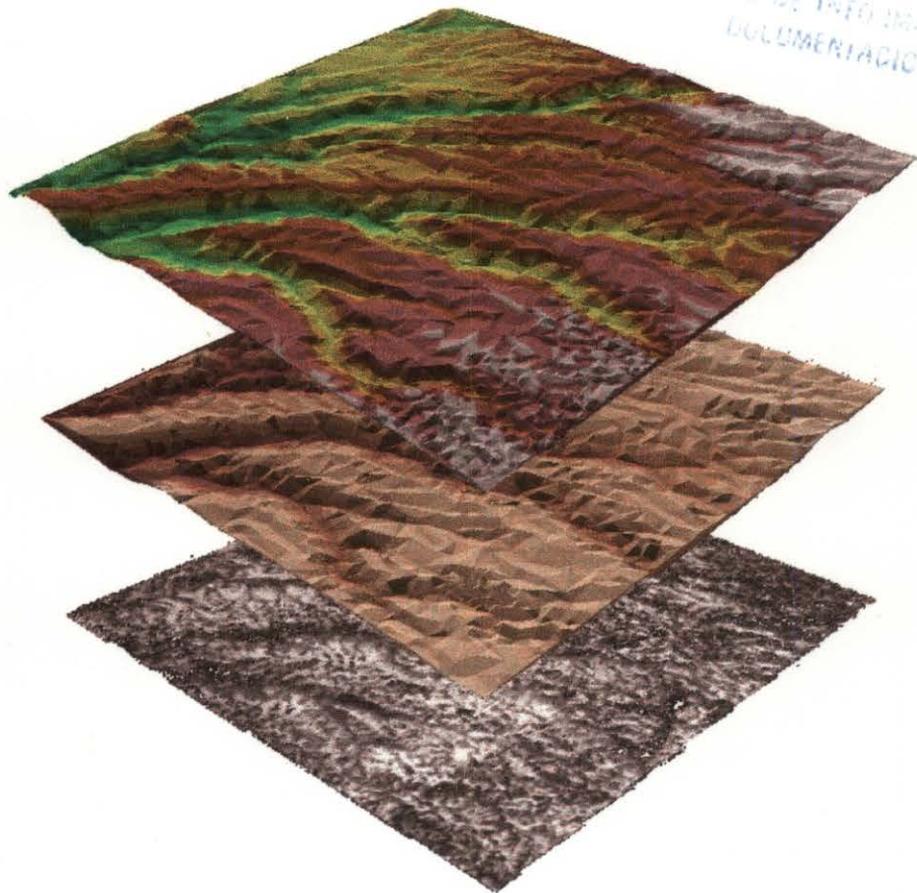


104845

# IMPACTO DE LA VEGETACIÓN SOBRE UN DENSÍMETRO AUTOMÁTICO A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CABUYAL-COLOMBIA

Beatriz Ramírez R.



 **Universidad del Valle**

**Facultad de Ingeniería**

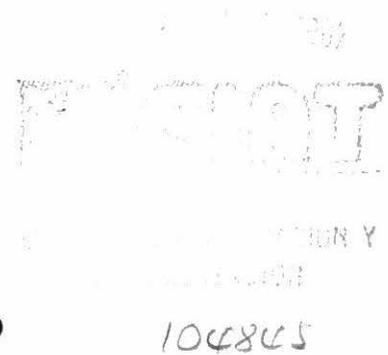
**Escuela de Ingeniería Civil y Geomática**

**Santiago de Cali**

**2002**

GA  
110  
R3

**IMPACTO DE LA VEGETACIÓN SOBRE UN MDE AUTOMÁTICO A PARTIR  
DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CABUYAL-  
COLOMBIA**



**MARTHA BEATRIZ RAMÍREZ RIAÑO**

207

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI  
2002**

**IMPACTO DE LA VEGETACIÓN SOBRE UN MDE AUTOMÁTICO A PARTIR DE  
FOTOGRAFÍAS AEREAS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CABUYAL -  
COLOMBIA**

**MARTHA BEATRIZ RAMÍREZ RIAÑO**

**Tesis de grado para optar al título de  
Ingeniera Topográfica**

**Director  
THOMAS OBERTHUR, Ph.D.  
Investigador Científico SIG  
Proyecto Manejo de tierras**

**Co Director  
FRANCISCO LUIS HERNÁNDEZ T.  
Director Programa Académico de Ingeniería Topográfica  
Universidad del Valle**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI  
2002**

## Nota de aceptación

---

---

---

---

---

**Director del Proyecto**

---

**Codirector del proyecto**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Santiago de Cali, Noviembre del 2002**

*A Edgar, Jimena y Tatiana:  
Por su paciencia, Amor y Apoyo.*

## AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a las que tengo que agradecer, personas que de una u otra manera colaboraron para lograr el éxito de mi proyecto de tesis, gracias a su colaboración desinteresada. Mainly, I would like to thank Dr. Thomas Oberthur PhD for his helpful suggestions, critical reading and revisions of the research in all the stages. It's for his tireless effort on corrections made and for the trust that he deposited in me on his project.

Dra. Nathalie Beaulieu PhD et Dr. Gregoire Leclerc PhD pour son appui initial et son contact au sein du CIAT.

Rachel O'Brien and Arjan Gijnsman for sharing their knowledge, their invaluable help and their friendship.

A Luz Amira Clavijo por su amistad, valiosa colaboración y paciencia para enseñarme las herramientas que sin ellas no hubiera podido elaborar este proyecto.

A Elizabeth Barona y Herman Usma por el compartir de sus conocimientos, su desinteresada ayuda y su gran amistad.

A Sandra Bolaños, Claudia P. Narváez, Darío Hoyos, Germán Escobar y Otto Madrid, por su colaboración en la realización de este proyecto.

A Jorge Cardona e Idris Jones, mis héroes que vinieron al rescate cuando el computador no marchaba.

Al Profesor Francisco Hernández por sus sabias correcciones y su pronta colaboración.

Al personal que conforma PE4, por su amistad, colaboración y apoyo tanto en el compartir de sus saberes como por la preocupación y detalles por mi nueva familia.

Al Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT y principalmente al proyecto Manejo de Tierras (PE4) quien me brindo la parte logística y apoyo.

A la prestigiosa Universidad del Valle por haberme brindado la oportunidad de convertirme en una de sus ingenieras.

## TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	VII
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	XI
ABSTRACT	XIII
COMPENDIO	XV
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA SIG	7
1.3 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN- MDE	14
1.4 CLASIFICACIÓN DE USO DE TIERRA CON IMAGEN DE SATÉLITE SPOT 21	
1.5 SISTEMA DE GEOPOSICIONAMIENTO GLOBAL GPS	23
1.6 MODELOS DERIVADOS	26
1.6.1 Clasificación Gemorfológica	28
1.6.2 “Wetness Index”	33
1.7 ESTADÍSTICA	42
1.7.1 Covarianza y Correlación	44
1.7.2 Significancia o Probabilidad de cometer error	45
1.7.3 La Prueba $t$	47
1.7.4 Grados de Libertad	47

1.7.5 La Prueba $F$	49
1.7.6 Análisis de Varianza	50
2. METODOLOGÍA	54
3. RESULTADOS	64
3.1 COMPARACIÓN DE MODELOS SIN EDITAR Y EDITADO	64
3.2 USO DE LA TIERRA PREDOMINANTE	74
3.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS EN CUATRO ÁREAS DE MUESTREO	87
3.4 GEOFORMAS PREDOMINANTES EN LAS CUATRO ÁREAS	94
3.5 "WETNESS INDEX" EN LAS CUATRO ÁREAS	100
3.6 PRUEBAS DE CONTINGENCIA PARA CINCO PARES DE VARIABLES	108
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	113
5. CONCLUSIONES	117
BIBLIOGRAFÍA	121

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Capas o estratos de información en un SIG .....	8
Figura 2	Representación Raster de un paisaje. ....	11
Figura 3	Sombreado automático del relieve.....	17
Figura 4	Contribución del error potencial .....	21
Figura 5	Imagen de Satelite SPOT XS.....	24
Figura 6	Esquema en dos dimensiones para las unidades Suelo-Paisaje y propuesta .....	33
Figura 7	Diagrama de flujo para derivar unidades de paisaje-suelo. ....	34
Figura 8	Diagrama esquematizado del flujo saturado .....	37
Figura 9	Esquema de la relación tiempo-área.....	38
Figura 10	Discretización de la cuenca Wagga Wagga utilizando TAPES-C .....	40
Figura 11	Área elemental de contribución efectiva .....	41
Figura 12	Curvas de nivel a intervalos de 1 metro de la cuenca Wagga Wagga. ....	43
Figura 13	Superficie de Probabilidad. ....	45
Figura 14	Diagrama de dispersión de dos variables. ....	46
Figura 15	Curva de distribución <i>t</i> típica.....	48
Figura 16	Localización de la zona de estudio al Norte de la Sub-Cuenca Cabuyal.....	55
Figura 17	Diagrama de Flujo de la metodología utilizada .....	56
Figura 18	Mosaico de ocho fotografías aéreas a escala 1: 34200 .....	58
Figura 19	Esquema de combinación de grid.....	61
Figura 20	Modelos sin editar y editado .....	65
Figura 21	Histogramas de los modelos sin editar (a) y editado (b). ....	67
Figura 22	Modelo de diferencias entre los modelos sin editar y editado.....	69

Figura 23	Modelo de diferencias negativas entre los modelos Sin editar vs. Editado.....	70
Figura 24	Histograma del modelo de diferencias: Negativas (a) y positivas (b).	71
Figura 25	Modelo de diferencias positivas entre los modelos sin editar y editado. .....	72
Figura 26	Modelo de diferencias con transeptos de puntos en la zona de traslape. .....	74
Figura 27	Clasificación de uso de tierra con imagen de Satélite SPOT.....	76
Figura 28	Clasificación del uso de tierra en el área 1.....	77
Figura 29	Clasificación de uso de tierra del área 2. ....	78
Figura 30	Clasificación de uso de la tierra en el área 3.....	78
Figura 31	Clasificación de uso de la tierra en el área 4.....	79
Figura 32	Modelos sin editar (izquierda) y editado (derecha) del área 1.....	88
Figura 33	Modelos sin editar (izquierda) y editado (derecha) del área 2.....	89
Figura 34	Modelo sin editar (izquierda) y editado (derecha) del área 3. ....	90
Figura 35	Modelos sin editar (izquierda) y editado (derecha) del área 4.....	91
Figura 36	Modelos de las cuatro áreas de muestra de las diferencias de altura..	93
Figura 37	Comparación de los histogramas de frecuencia utilizando los mismos rangos de diferencia de altura.....	93
Figura 38	Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 1.	95
Figura 39	Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 2.	96
Figura 40	Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 3.	97
Figura 41	Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 4.	98
Figura 42	“Wetness Index” para el área de muestreo 1. ....	101
Figura 43	“Wetness Index” para el área de muestreo 2. ....	102
Figura 44	“Wetness Index” para el área de muestreo 3. ....	103
Figura 45	“Wetness Index” para el área de muestreo 4. ....	104
Figura 46	Metodología propuesta para una edición más eficaz del MDE automático.....	120

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 El índice de correlación $r^2$ entre $A_e / \tan \beta$ y $A_s / \tan \beta$ .....	42
Tabla 2 Tabla de ANDEVA de una vía .....	52
Tabla 3 Estadística descriptiva del análisis de los modelos sin editar y editados.	67
Tabla 4 Análisis estadístico de parejas de puntos tomados en la zona de traslape .....	75
Tabla 5 Estadísticas de elevaciones en las cuatro áreas en los modelos sin editar y editado.....	80
Tabla 6 Estadísticas de las diferencias absolutas en las 4 áreas seleccionadas por uso. ....	80
Tabla 7 Resultado de 4 análisis de varianza para cada área de muestreo.....	81
Tabla 8 Prueba Duncan para los promedios de diferencias absolutas de elevación .....	82
Tabla 9 Especies cultivadas en la zona y sus correspondientes alturas promedio en metros. Cerón (1996) .....	83
Tabla 10 Estadística de las diferencias absolutas en las áreas de muestreo con todos sus usos .....	84
Tabla 11 Resultado de 5 análisis de varianza para 5 cultivos en las cuatro áreas de muestreo .....	86
Tabla 12 Prueba Duncan para los promedios de las diferencias absolutas de cultivos en cada área .....	86
Tabla 13 Análisis de varianza para las diferencias absolutas con la clasificación geomorfológica.....	96

Tabla 14 Prueba Duncan para la combinación de las diferencias absolutas con la clasificación .....	97
Tabla 15 Estadística descriptiva para las diferencias absolutas .....	105
Tabla 16 Análisis de varianza para las diferencias absolutas con los cinco rangos .....	105
Tabla 17 Prueba Duncan "Wetness Index" .....	106
Tabla 18 Valores de Chi cuadrado ( $\chi^2$ ) para diferentes combinaciones con su nivel de significancia $P < 0.01$ .....	109
Tabla 19 Porcentajes de aparición de un uso en cada una de las Geoformas y "Wetness Index" .....	109
Tabla 20 Porcentaje de diferencias positivas y negativas para cada tipo de uso, geoforma y "Wetness Index" .....	111

## ABSTRACT

Working with the Digital Photogrammetry Workstation (DPW) Helava 3.2 on an aerial photo's mosaic of 1989 with a scale 1:34,200, a digital elevation model DEM was generated automatically and the image were edited. Starting with a SPOT-XS satellite image with a 20-m. resolution, a vegetation cover classification (forest, crops, fallow and bares soil) was made with the Erdas Imagine 8.4 software. The GIS software Arcview 3.2 lets one calculate the difference between the automatically generated DEM and the edited DEM, separating each vegetation cover in different files and combining each of them with the model of positive differences due to their direct dependence. At that point, the program Statistical 5.0 was run to calculate descriptive statistics, the ANOVA and the chi square test for the combinations obtained and their components. As the positive differences have a different origin in the different vegetation covers, it was decided to classify the edited DEM in 6 geomorphologic units (shoulder, interfluve, backslope, footslope, toeslope, and channel) and 5 wetness indices (1 to 5), by using the software of, respectively, Conacher and Dalrymple (1977) and Barling et al. (1994) in Arcview 3.2. These new files were separated and, subsequently, combined with those of the negative, positive and absolute difference; this was then statistically analyzed, as was done with the results described earlier for the vegetation covers.

The results affirmed that the impact of the vegetation on the DEM was low and that the overestimation of the elevation number was most frequently in the range of 1 to 6 meters. It was the forest cover that brought about the biggest errors, especially when it was situated in the units backslope or footslope of a topography with a high displacement in relief, when the error reached to what may be classified as 'medium', i.e. from 5 to 16 meters. Channel and wetness indices greater than 3 (the topography at which the highest water capacity occurs) also should be carefully considered in the editing process.

Key words: vegetation cover, land use, DEM, geomorphology, wetness index, impact of the vegetation cover.

## COMPENDIO

Para la determinación del impacto de la cobertura vegetal sobre la precisión de un Modelo Digital de Elevación automático, se trabajó con la estación DPW Helava 3.2 sobre un mosaico de fotografías aéreas escala 1:34.200 de 1.989, se generó un Modelo Digital de Elevación MDE automático y se realizó una rectificación generando un Modelo Digital corregido o editado para toda la imagen. A partir de una imagen de satélite SPOT XS con 20 metros de resolución, se realizó una clasificación por cobertura (bosque, cultivos, pastos, rastrojo y suelo desnudo) utilizando el software Erdas Imagine 8.4. El SIG ArcView 3.2 permitió calcular las diferencias entre el MDE automático y el MDE editado; separar en archivos independientes cada cobertura, y combinar cada una con el modelo de diferencias positivas debido a su dependencia directa. En este punto se corrió el programa Statistica 5.0 para calcular la estadística descriptiva, el Andeva y la prueba de Chi cuadrado para el grupo de combinaciones obtenido y para sus componentes. Como el grupo de diferencias positivas tiene un origen distinto a las coberturas, se optó por clasificar el MDE editado en 6 unidades geomorfológicas (cimas convexas, interfluvios, ladera, coluvios, llanuras de inundación y drenajes) y en 5 índices de mojamiento (1 a 5) corriendo en ArcView 3.2 los softwares de Conacher y Dalrymple (1977) y de Barling et al (1994), respectivamente. Estos nuevos archivos se separaron, se combinaron con las diferencias negativas, positivas y absolutas, y se analizaron estadísticamente como se describió anteriormente para coberturas.

Los resultados permitieron afirmar que el impacto de la vegetación fue bajo, las exageraciones de cota más frecuentes (70%) estuvieron en el rango de 1 a 6 metros, y que bosque es la cobertura que provocó los mayores errores, especialmente cuando está ubicada en las unidades laderas y coluvios, de topografías con alto desplazamiento de relieve, donde el error llega a calificarse como medio, entre 5 y 16 metros. Drenajes e índices de mojamiento mayores de 3 (las topografías donde ocurre la mayor captación de agua) también deben de considerarse con cuidado en el proceso de edición.

## INTRODUCCIÓN

Existe el consenso creciente que para mejorar la calidad de vida de la población rural se necesita construir nuevas capacidades de investigación y extensión (Altieri y Anderson 1986). Centros de investigación como CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) desarrollan investigaciones a nivel rural en América Latina concentrándose en la gente, tierras, en el uso y manejo de suelos y cultivos. Su enfoque consiste en fomentar la organización social y la participación local en sistemas de producción que consideren la conservación y regeneración de los recursos naturales. Para esto se hace necesaria una base cartográfica actualizada y confiable a nivel regional que permita integrar espacialmente, indicadores socioeconómicos, poblacionales, y de uso de tierras, entre otros. Esta cartografía automatizada de alta precisión requiere modernos software y hardware que elaboran mapas Di y Tridimensionales (Modelos Digitales de Elevación) por medio de la fotogrametría digital, haciéndose cada vez más indispensable el análisis a escalas regional y nacional. La mayoría de estos Modelos Digitales de Elevación MDE, se utilizan sin editar o corregir las imprecisiones surgidas por el efecto de la cobertura vegetal en algunos sectores, debido a la utilización de software sin esta capacidad.

Esta investigación intenta MDEostrar las bondades de la edición de un modelo, corrigiendo uno de los factores que más lleva a error, la vegetación. Para ello se hizo necesario: Fotografías aéreas, para la generación del modelo, como la imagen de satélite SPOT de la zona para la clasificación de uso de Tierra.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se toma como objetivo principal:

Establecer el impacto de la cobertura vegetal sobre la precisión de un Modelo Digital de Elevación MDE generado automáticamente. Y como objetivos específicos:

1. Desarrollar una metodología para investigar MDE en grandes áreas teniendo en cuenta diferencias de vegetación.
2. Comprobar el impacto de la vegetación en el MDE generado automáticamente en la medida de la altura.
3. Probar la importancia de la edición del MDE con respecto a la vegetación.
4. Conocer las geoformas y el índice de mojado en la cuenca analizada en que posición del terreno es más frecuente cada cobertura.
5. Establecer en qué coberturas, posición del terreno, e índice de mojado se obtuvieron las mayores diferencias de elevación.
6. Observar si la edición de los MDE siempre produce una disminución de la cota y en qué situaciones sucede lo contrario.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 ANTECEDENTES

En la zona de estudio, Cuenca Cabuyal Norte del Departamento del Cauca, se han venido diseñando diversos estudios en diferentes áreas enfocados a desarrollar sistemas de uso de la tierra sostenible para fortalecer la economía campesina.

Los proyectos en materia de recursos naturales han considerado en forma tangencial la participación activa de los integrantes de la comunidad. La identificación de acciones prioritarias se dificulta cuando los integrantes de la comunidad, al tomar decisiones sobre el manejo de los recursos, ignoran las propuestas y criterios de personal especializado porque hay claras diferencias en cuanto a tiempo, escala e idioma.

Teniendo en cuenta esta problemática, el proyecto "Manejo espacial de la fertilidad del suelo" del grupo Manejo de Tierras CIAT, se ha preocupado por hacer más factible el análisis del espacio que ocupa la parcela de cada agricultor en la cuenca para lo cual utiliza herramientas gráficas y modelos tridimensionales del entorno geográfico, que aporten más elementos y criterios para interpretar la realidad y las consecuencias de sus decisiones y acciones.

Estas metodologías necesitan combinar los saberes de las comunidades con el entendimiento convencional de los científicos, incluyendo participación en cartografía en 3D, sensores remotos, o análisis de terreno.

La integración de los conocimientos locales y científicos, se formaliza y se transfiere con los modelos y los sistemas de Información Geográfica permitiendo hacer labores de extensión utilizando un solo lenguaje. La unión de estos análisis producirá nueva información para el manejo de los recursos naturales, más pertinente que el conocimiento científico o el conocimiento local por separado (Oberthur, CIAT 2001).

### **Modelo Digital de Elevación MDE a partir de curvas de nivel con el MDE editado**

Byne (1997) desarrolló para CIAT un Modelo Digital de Elevación, MDE, para la cuenca Cabuyal – Cauca. Este proyecto se hizo para investigar el nivel de precisión que se puede esperar de modelos de bajo costo. Para el desarrollo del proyecto se generaron ocho MDE a partir de mapas de curvas de nivel existentes a diferentes escalas e intervalos de curvas de nivel. Un MDE editado de control fue generado por extracción automática de los valores de elevación usando el software Helava, con puntos de control GPS, para poder asegurar alta precisión a nivel de estándares del USGS (United State Geological Survey). Las elevaciones y las pendientes de cada modelo de prueba fueron comparadas con los valores desde el MDE control en cuanto a relación de costo de producción y precisión de los resultados.

Se concluyó que en regiones de laderas los mapas de pequeña escala y grandes intervalos no son precisos, porque no proveen suficiente detalle. Las fuentes de error en los valores de los MDE originados por árboles, nubes y posición del paisaje se consideraron importantes como fuente de error pero no se analizaron.

### **Indicadores de erosión con base en MDE editado**

Los atributos de los MDE se pueden usar para predecir erosión del suelo en las cuencas. En CIAT, Pallaris (2000) desarrolló con base en el proyecto anterior

(Byne 1997), un Índice de Transporte de Sedimentos (STI del inglés Sediment Transport Index) para producir un mapa de riesgos de erosión que ayude a aplicar prácticas conservacionistas de manejo de suelos en la cuenca Cabuyal. Los resultados con esta metodología correlacionaron bien con Indicadores de los agricultores”, gracias a que se utilizó un MDE corregido o editado. Sin embargo se tomaron como una aproximación inicial ya que no se confrontaron con datos cuantitativos de erosión.

### **MDE apartir de datos de radar no editado para montaña**

Otra investigación de CIAT en generación de modelos digitales de elevación, utilizando imágenes Radarsat por el método radargramétrico (Bolaños, 2000) en el Eje Cafetero, aportó soluciones a problemas de cartografía de montaña en áreas que aún no se tienen cubrimiento topográfico, a causa de constantes nubes.

Como conclusión general, el método sirvió para generar cartografía a escalas menores que 1:200.000 a escalas mayores las imprecisiones fueron significativas en los resultados.

### **Filtrado correctivo para picos y depresiones**

Otro proyecto que se desarrolló en CIAT en este campo (Nelson y Leclerc, 1999) produjo un MDE con base en un mosaico de fotografías aéreas para la cuenca San Dionisio (Nicaragua). Se halló que surgían imprecisiones en las zonas de traslape y, por lo tanto, hasta no editar el modelo no se pudo modelar la hidrología. Para estos dos fines, primero aplicaron filtros para corregir el bandeamiento y segundo, crearon un correctivo topológico para remover los errores en los datos ocasionados por los “picos” y “huecos”.

Los “huecos” o depresiones son definidos como celdas que están más bajas que las celdas de los alrededores, y entonces el agua solamente podría entrar pero no salir. Esto causa problemas cuando se trata de crear superficies

hidrológicas. Por lo tanto, se deben “llenar” para asegurar una delineación de los basines y corrientes. Si no son llenados, la red de drenaje derivada quedará discontinua.

De igual forma los picos o elevaciones superiores al límite máximo deben ser removidos. Estos surgen debido a que el proceso de filtrado automático define objetos individuales como casas o árboles aislados y son considerados como parte de la superficie natural (Gasior, 1996).

### **Precisión del MDE usando Helava.**

La correlación de imágenes (Fotografías aéreas) es la base para la derivación automática de modelos digitales de terreno; generar ortofotos automáticas, automatizar la triangulación aérea entre otros(Gasior,1996). La correlación es un algoritmo que utiliza el software para definir píxeles iguales en diferentes fotografías, porque estos varían en función de la pendiente.

Para lograr una alta precisión, los MDE deben incluir elementos estructurales fisiográficos, los cuales son discontinuidades evidentes del terreno.

El algoritmo utilizado por el programa Helava permite desarrollar los MDE a partir de fotografías aéreas originales (orientadas solamente).

Las operaciones de filtrado corrigen árboles o casas los cuales podrían deteriorar la superficie efectiva del relieve. El producto obtenido son celdas regulares con un espaciamiento definido por el operador.

La fase de edición del MDE tiene dos pasos. El primero es el filtrado automático de los objetos espaciales incluidos dentro de la estrategia. El segundo es la edición manual interactiva a cargo del operador (Gasior, 1996).

En este paso es posible definirle datos nuevos al MDE (vectores y puntos).

El sistema de filtrado corrige bien coberturas del terreno como grupo de árboles y arbustos.

Otras investigaciones que se llevaron a cabo a escala internacional referente al tema Helava en el Instituto de Photogrammetry – Swiss Federal Institute of Technology – Switzerland, tuvieron que ver con la exactitud de la medida

automática del terreno para usar la estación de trabajo Helava. Dos áreas digitales- La Broye y Kandertal- fueron usadas como material comparativo para analizar los propósitos.

La prueba dio como resultado que la medida automática de MDE son uno de los sistemas más precisos, y versátiles en el mercado. Gracias a su alta eficiencia para corregir errores originados por las coberturas vegetales y algunas construcciones, el sistema provee datos muy precisos que son fáciles de usar en la producción de base de datos para procesar en un SIG, ortofotomapas y modelos digitales del terreno.

Utilizando el sistema de triangulación automática de Helava para fotos de escala 1:27.000 y diferentes patrones de puntos de control, Kerten y O'Sullivan (1996) obtuvieron, al editar el modelo, una precisión con un error de un metro en planimetría y alrededor de 1,3 metros en altimetría controlando con un GPS la información en el ajuste combinado. Aunque estos resultados no fueron considerados muy satisfactorios para la escala empleada debido a que el control de tierra no fue de muy buena calidad, MDEostraron las ventajas de sustraer las imperfecciones causadas por las coberturas vegetales.

En otro estudio, Bacher (1999) analizó la predicción de los MDE con la estación de trabajo Helava, mediante 2700 puntos de chequeo tomados con GPS, y evaluando un método automático para generar el modelo, el cual cambia con los cambios del terreno. Los resultados MDE mostraron que en las áreas planas y abiertas este método rindió los mejores resultados, pero se deterioraron en las áreas de terreno muy escarpados y llega a ser inutilizable en los bordes de las zonas boscosas.

En una investigación para mapas de suelo regionales se utilizó (Dobos et al, 2000) la cobertura para ayudar a delimitar suelos utilizando un MDE y se halló que era esencial un modelo digital de elevación para alcanzar resultados aceptables.

## **Predicción del patrón de distribución de la vegetación con base en la elevación (relación paisaje vegetación).**

Bader (1999) halló una gran dependencia entre la elevación del terreno y el patrón de distribución de la vegetación. Sin embargo, la calidad del MDE es afectada por la densidad de los puntos y la naturaleza de la aplicación.

### **Conclusiones**

La vegetación (especialmente bosque) contribuye a errores de sobre estimación de la cota al generar el MDE automáticamente en la mayoría de los casos.

Donde más cuidados se debe tener con los resultados del MDE generado automáticamente es en las áreas boscosas ubicadas en las topografías más accidentadas.

La vegetación no produce grandes errores para trabajos de escala pequeña o sea a nivel regional, y en estos casos el tipo de imagen no influye.

Cuando la calidad del MDE automatizado es buena, el factor vegetación suele usarse como un buen indicador de la distribución de la erosión, transporte de sedimentos y otras características relacionadas con manejo de cuencas.

Está por estudiarse el impacto que sobre la precisión del MDE automático, tiene la distribución de la vegetación boscosa debido a cambios en el piso climático a escala mediana (casi local).

## 1.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA SIG

Un Sistema de Información Geográfica SIG es un “sistema de Información diseñado para trabajar datos georeferenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas” (Gutiérrez y Gould, 1994), es decir, con información geográfica. De hecho la geografía constituye el elemento clave para estructurar la información dentro de un SIG y para realizar operaciones de análisis. El National Center for Geographic Information and Análisis (NCGIA), de los Estados Unidos, amplía la definición anterior cuando dice que un SIG es “un sistema hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución problemas complejos de planificación y gestión”.

Desde otro punto de vista se trata de una extensión del concepto de base de datos: Un SIG es “una base de datos computarizada que contiene información espacial” (Gutiérrez y Gould, 1994). En un SIG se almacena información cartográfica (con la que es posible conocer la localización exacta de cada elemento en el espacio y con respecto a otros elementos) e información alfanumérica (datos sobre las características o atributos de cada elemento geográfico). Este hecho, el trabajar con información espacial, es lo que diferencia básicamente a los SIG de otros Sistemas de Información.

Los geógrafos y los científicos de la tierra estructuraron la información en mapas temáticos, según sean los aspectos del espacio que les interese estudiar. De la misma forma en un SIG se puede descomponer la realidad en distintos temas, es decir, en distintas capas o estratos de información de la zona que se desea estudiar: el relieve, la litología, el uso del suelo, la geomorfología, la litología, los suelos, etc (Figura 1). El analista puede trabajar sobre cualquiera de esas capas según las necesidades de la investigación. Pero la gran ventaja de los SIG es que pueden relacionar las distintas capas entre sí, lo que concede a estos sistemas capacidad de análisis y simulación de situaciones. Los mapas almacenados en el

computador pueden ser objeto de peticiones muy complejas o ser combinaciones algebraicas para producir mapas derivados, que presenten situaciones reales o hipotéticas (Burrough y McDonnell, 1998).

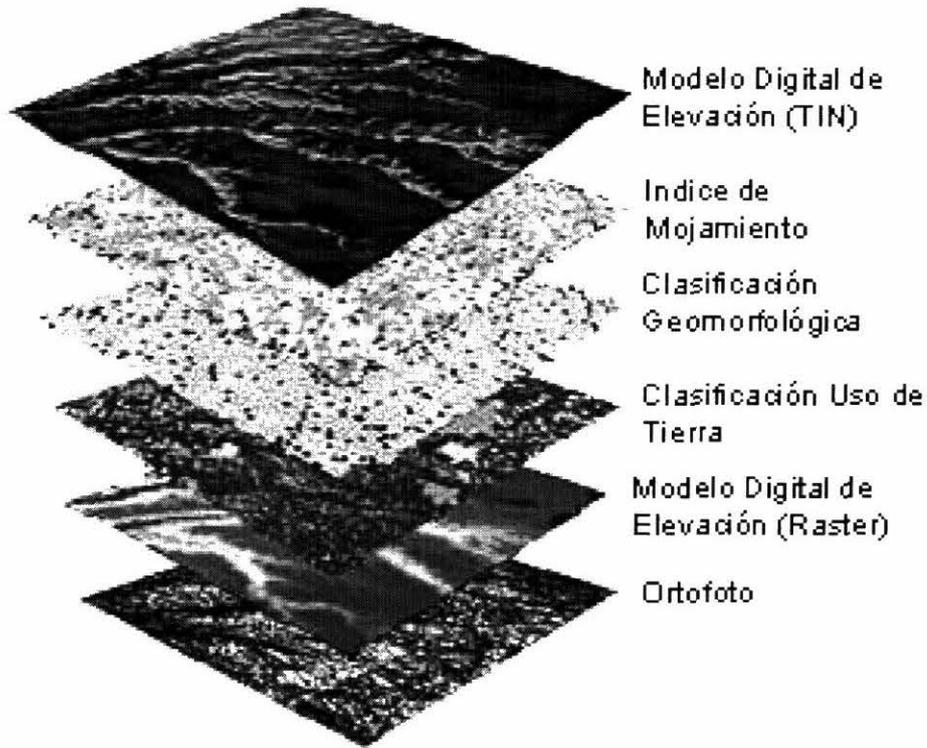


Figura 1 Capas o estratos de información en un SIG

Las definiciones van cambiando en la medida en que lo hacen los SIG.

Para DeMers, 1999, son herramientas que permiten el procesamiento de datos espaciales en información ligada explícitamente y utilizada para tomar decisiones sobre alguna porción de la tierra.

La tarea fundamental de un sig es analizar mapas (Cowen, 1988).

Es un sistema computarizado para coleccionar, verificar, integrar y analizar información relacionada con la superficie de la tierra (Rhind, 1988).

SIG es una serie de subsistemas dentro de un gran sistema (Demers, 1999) el SIG tiene que ver con datos de espacio-tiempo y a menudo, pero no necesariamente emplea el hardware y el software de los computadores.

Tiene los siguientes subsistemas:

1. Entrada de datos para coleccionar y procesar datos espaciales de varias fuentes. Este subsistema es el responsable por las transformaciones de los diferentes tipos de datos espaciales
2. Subsistema de almacenamiento, recuperaci3n, actualizaci3n y edici3n de datos.
3. Subsistema de manipulaci3n y an3lisis de datos para llevar acabo tareas de agregaci3n y desagregaci3n, estimaci3n de par3metros, y ejecuci3n de funciones de modelaci3n.
4. Subsistema de Informaci3n que despliega toda o una parte de la base de datos en tablas, gr3ficas o mapas.

Las operaciones de consulta y manipulaci3n de datos geogr3ficos constituyen la esencia de un SIG, al diferenciar el Geoprocesamiento de tecnolog3as como Cartograf3a Automatizada y Proyecto Auxiliado por Computador. Lo que distingue un SIG de otros tipos de sistemas de informaci3n, son aquellas funciones que posibilitan la realizaci3n de an3lisis espaciales (geogr3ficos). Tales funciones utilizan los atributos espaciales y no espaciales de las entidades gr3ficas, almacenadas en la base de datos espaciales, buscando conocer y consultar sus principales caracter3sticas y poder hacer simulaciones (modelos) sobre los fen3menos del mundo real.

Dentro de los Sistemas de Informaci3n Geogr3fica, el an3lisis espacial se fundamenta en los aspectos principales de las herramientas l3gicas que lo conforman. As3, existe una serie de aplicaciones para la obtenci3n de diversos an3lisis geogr3ficos; como ejemplo se pueden citar las siguientes: sobreposici3n de capas de informaci3n, construcci3n de modelos tridimensionales del terreno,

operaciones que permiten la transformación de coordenadas, así como algoritmos utilizados en la elaboración de programas que sustentan las referidas utilidades.

Los investigadores han explorado una variedad de acercamientos para ampliar las capacidades analíticas espaciales de los SIGs. Es así como hoy en día poseen una extensión de análisis geográfico de avanzada, llamada Análisis Espacial.

El Análisis Espacial contiene poderosos dispositivos que permite crear, consultar, realizar mapas y analizar datos extraídos de celdas. El Análisis Espacial no sólo puede generar la más apropiada representación de superficies de una variedad de fuentes de datos existentes, sino que también puede derivar nueva información acerca de múltiples temas.

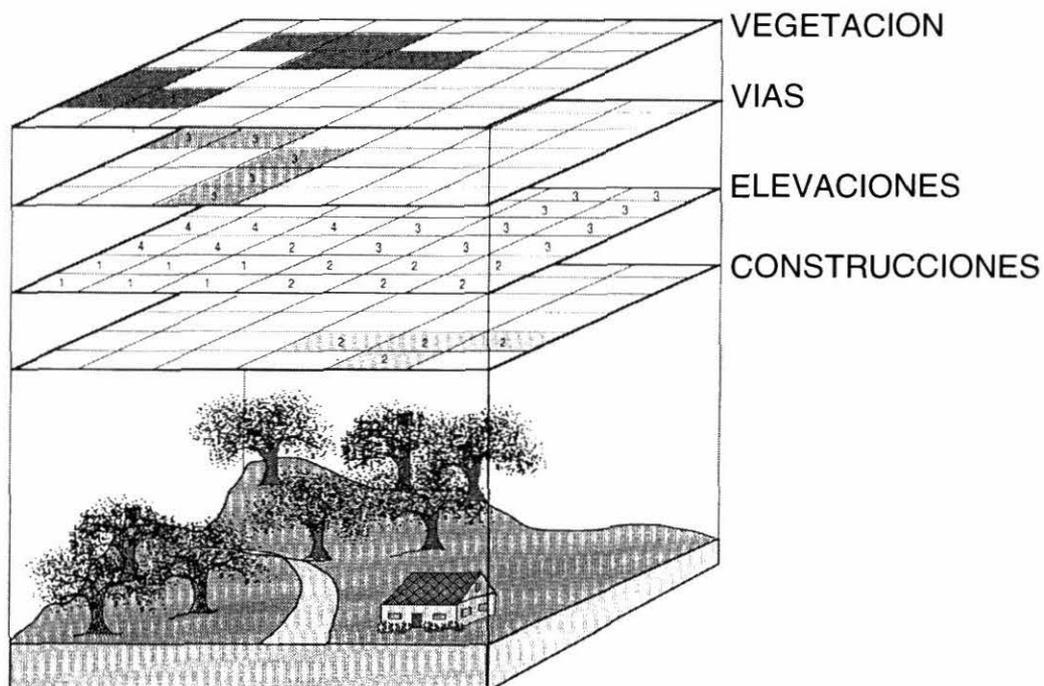
**Análisis espacial** es definido algunas veces como una colección de técnicas para analizar eventos geográficos donde los resultados del análisis dependen en el arreglo espacial de los eventos (Haining, 1995). El término evento geográfico significa una colección de puntos, líneas u objetos de área, localizados en un espacio geográfico, unido con una serie de (una o más) valores de atributos. El análisis espacial requiere información de ambos la localización geográfica de los objetos adicionada a la colección de estos valores de atributos.

La unión de un SIG con técnicas de análisis espacial es fundamental porque adiciona explicación cuando los datos son visualizados y además se examinan estadísticamente en una perspectiva espacial, haciendo al SIG más eficiente Haining (1995).

Para hacer posible el análisis espacial es completamente necesario de una serie de datos raster.

Las series, de **datos raster**, basadas en celdas, que es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud,

uso de la tierra, etc.), están especialmente disponibles para representar fenómenos tradicionalmente geográficos que varían continuamente en el espacio, como la elevación, inclinación o precipitación. Pero además pueden ser utilizadas para representar tipos de información menos tradicionales, tales como densidad de población, clasificación Geomorfológica, Wet Index (índice de mojado en el suelo) y otras características (Figura 2). Las celdas son entidades ideales para la representación de modelos digitales de elevación MDE, para el análisis de flujos y tendencias a partir de los datos representados como superficies continuas, el modelado de vertientes o los cambios dinámicos de población sobre el tiempo.



**Figura 2 Representación Raster de un paisaje.**

Las celdas hacen parte de una grilla: que son estructuras de datos raster en los cuales el espacio geográfico se contabiliza dentro de formas rectangulares de igual tamaño.

Sistema de grilla es un sistema de líneas horizontales y verticales en un globo o proyectadas en un mapa las cuales permiten localizar objetos en el espacio geográfico y hacer mediciones entre ellos.

La estructura de datos raster no da una información precisa de localización, debido a que el espacio geográfico esta dividido en grillas discretas. En lugar de representar puntos con la localización absoluta, ellas están representadas como una red única de celdas (Figura 2) se asume que en algún lugar de la grilla se puede encontrar un objeto puntual (Demers, 1999).

Las líneas y los objetos unidimensionales se representan con una serie de datos de celdas conectadas cambiando nuestra dimensionalidad desde objetos unidimensionales a una estructura de datos bidimensionales. Esta apariencia de segmentos también es obvia cuando se representa un área con celdas. Entre más irregular sea el área, más segmentada aparece.

En los sistemas raster o basados en grilla las celdas se enlazan a un sistema de manejo de base de datos, con el resultado de que más de un atributo (por ejemplo coberturas) puede estar representado por una sola celda de grilla; esto reduce la cantidad de datos que deben almacenarse para luego ser manipulados (DeMers, 1999).

La combinación de estos nuevos análisis espaciales y la visualización de herramientas para datos raster con los operadores espaciales basados en vectores (modelo de datos basados en una entidad geométrica definida por una magnitud y un sentido frente al modelos raster, basados en localizaciones), brindan una capacidad de análisis sin precedentes en la visualización y elaboración de modelos digitales de elevación MDE; todo para su organización, en un paquete accesible. Uno de esos paquetes es el software Arcview, que se eligió por este motivo, además de ser muy amigable y de la que más posee licencia donde se realizó esta investigación.

**ArcView 3.2** es un software para Sistema de Información Geográfica (SIG) producto de ESRI (Environmental System Research Institute, Inc.).

Este SIG como base de datos se une a la información de una localidad (conecta el qué con el dónde) dejando ver y analizar los datos en nuevas maneras y provechosas. Cuando se representan en un mapa objetos ya sean naturales o hechos por el hombre se llaman rasgos; cada rasgo del mapa tiene su localización, su forma y su símbolo que representa una o más de esas características (Ejemplo escuelas, caminos, ciudades, etc.), pudiendo estar representados por puntos, líneas o polígonos.

Los rasgos son almacenados en una base de datos describiendo la información, esta información es llamada atributos.

El ArcView une un grupo de rasgos con sus atributos y los maneja juntos en unidades llamados temas. Un tema consta de una colección de rasgos geográficos y los atributos de esos rasgos. La información de estos temas son almacenados bajo un proyecto, identificados con una extensión **.apr**. El proyecto almacena y organiza información en cinco tipos de documentos: Vistas, Tablas, Diagramas, Diseños de salidas, Editor de escritura (Scripts). Cada tipo de documento muestra diferentes datos y permite interactuar con los datos en diferentes formas.

El Análisis Espacial es una extensión de ArcView que permite modelar, examinar e interpretar resultados de operaciones entre modelos raster. Crea nuevos datos a partir de datos ya existentes útiles para la evaluación, capacidad para estimar y predecir.

Esta extensión de Arcview ayuda descubrir y entender las relaciones entre los datos. Este descubrimiento y entendimiento puede ser una simple vista y operaciones de datos. El principal componente del análisis espacial son las celdas de grilla.

Por ser modelos raster, las celdas son la fuente principal de datos que usa el análisis espacial. Estas celdas representan tanto fenómenos geográficos, tales

como elevación, pendiente y precipitación, como otros fenómenos densidad de población conducta del consumidor y otras características demográficas.

### **1.3 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN- MDE**

Los modelos digitales de elevación (MDE) han sido usados en la aplicación de la geociencia desde mediados del siglo pasado. Desde entonces es uno de los componentes importante en el proceso de información geográfica (Weibel y Heller, 1991). Ellos proveen la base para un gran número de aplicaciones en las ciencias de la tierra. En los Sistemas de Información Geográfica SIG, los MDE proveen la oportunidad para modelar, analizar y visualizar los fenómenos relacionados con la topografía.

Un MDE puede ser entendido en términos generales como una representación digital de la superficie de la tierra; la unidad básica de información es un valor de altitud,  $z$ , al que acompañan los valores correspondientes de  $x$  e  $y$ , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa referenciación espacial. Los MDE se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster. Los modelos vectoriales están basados en entidades (básicamente puntos y líneas) definidas por sus coordenadas. En los modelos raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que definen el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada (Felicísimo, 1999).

Aunque la tendencia general de los SIG es la adopción de estructuras vectoriales para el tratamiento de la información, ésta se refiere esencialmente a propiedades cualitativas del terreno, de distribución discreta y con límites netos entre las diferentes clases. En el tratamiento de los datos topográficos y otras variables continuas sigue teniendo una fuerte implantación el uso de formatos matriciales,

ya que tienen una fuerte componente estadística, haciendo la programación menos compleja, la ejecución es generalmente más rápida y los algoritmos más fácilmente comprensibles. La tendencia actual es la incorporación de ambos tipos de modelos debido a sus ventajas específicas en función del tipo de la variable representada (figura 3).

Para la generación de MDE es frecuente utilizar la fotogrametría, porque no necesitan acceder físicamente a la totalidad de la zona de estudio. Se utiliza como documento básico un conjunto de pares estereoscópicos de imágenes de la zona a estudiar. Los métodos fotogramétricos examinan puntos homólogos en estos pares, deducen de su paralaje las cotas de referencia necesarias para reconstruir la topografía. Los sistemas restituidores fotogramétricos automatizados graban directamente los resultados en un formato digital compatible con un SIG. Los pares estereoscópicos son analizados mediante sistemas ópticos de exploración. La información resultante es procesada para, mediante un proceso iterativo de cálculos de correlación, identificar los puntos homólogos, medir paralajes y estimar altitudes. Para luego proceder a la generación automática del modelo digital de elevación, generado por fotogrametría digital.

**La fotogrametría digital** está siendo implantada hoy en todos los ámbitos de la Cartografía (CAD, GIS, etc.), siendo sin duda el presente y futuro inmediato de la fotogrametría. Los restituidores digitales no son sólo herramientas semiautomáticas de extracción de datos para la producción cartográfica, además de sus múltiples ventajas con respecto a los restituidores tradicionales, ofrecen nuevas posibilidades, al permitir la integración de herramientas para la generación de modelos digitales de elevación, de ortofotos, de mosaicos, y hacer aerotriangulaciones automáticas de forma rápida y sencilla.

Superficies como la de la tierra son fenómenos continuos que necesitan un infinito número de datos de almacenamiento para representarse, una tarea imposible para cualquier sistema digital. Así, el reto es representar digitalmente la superficie continua usando una cantidad finita de datos de almacenamiento.

El término Modelo Digital de Elevación o MDE (del inglés Digital Elevation Model) ha sido usado frecuentemente para referenciar cualquier representación digital de una superficie topográfica, frecuentemente usando específicamente un raster o celda (red regular de puntos de altura) (Weibel and Héller, 1991).

**La captura de datos** está basada en la interpretación estereoscópica de fotografías aéreas usando un adecuado equipo fotogramétrico.

Por medio de diferentes enta minimizar la colección de datos (el número de elevaciones tomadas en la muestra), pero al mismo tiempo intenta maximizar la precisión de los resultados.

Durante la pasada década hubo un incremento en la tendencia hacia la automatización completa de modelos de terreno a través de correlación de imágenes digitales estereo. Esta técnica es rápida y parece satisfactoria para proyectos de gran colección de datos (Weibel and Héller, 1991), basada en el metodo de sombreado de relieve.

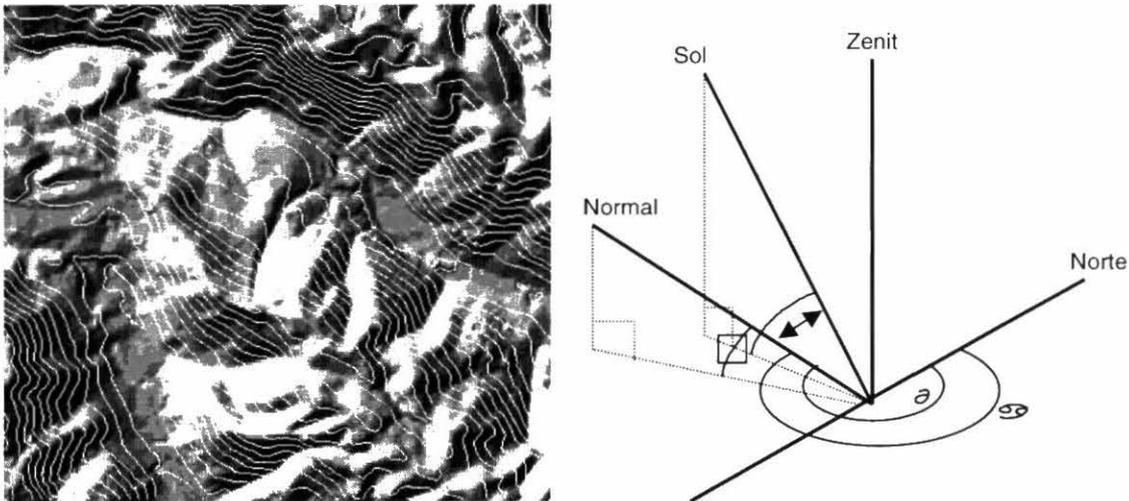
**El método de sombreado automático de relieve** (también llamado sombreado de laderas) ha sido desarrollado por cartógrafos como una técnica importante para mejorar cualitativamente los mapas, especialmente para las diferencia del relieve en áreas colinadas y montañosas. Estas técnicas se basan en la teoría óptica de la Ley del coseno de Lambert, que establece que la luminosidad de cualquier área pequeña con ondulación difusa perfecta, varía con el coseno del ángulo de la luz incidente paralela (Weibel and Héller, 1991).

$$I = 100 / c (\sin\varphi - \frac{\partial z}{\partial x} \sin\alpha \cos\varphi - \frac{\partial z}{\partial y} \cos\alpha \cos\varphi)$$

$$c = \sqrt{1 + (\frac{\partial z}{\partial x})^2 + (\frac{\partial z}{\partial y})^2}$$

Donde  $I$  es la cantidad solar reflejada por la superficie del elemento,  $\alpha$  y  $\varphi$  son el azimut y la elevación del sol respectivamente (Figura 3)  $c$  es el modulo escalar.

El sombreado analítico o automático provee una forma conveniente de descripción cartográfica cualitativa del relieve. El paisaje puede ser leído desde sombras mostradas por el relieve. El método se basa en un modelo de iluminación.



**Figura 3 Sombreado automático del relieve**

y cálculo del porcentaje de la intensidad solar reflejada. La imagen muestra una combinación de un modelo Raster y un Vector (Curvas de Nivel).

La intensidad de la luz es computada por facetas individuales del MDE, y las facetas son sombreadas uniformemente. Estos principios son la base para la

creación del algoritmo que genera automáticamente el modelo digital de elevación. Los equipos poseen sistemas ópticos que exploran una imagen o pares de fotografías con recubrimiento y mediante el sombreado automático del relieve identifica puntos homólogos, mide paralajes y estima altitudes (curvas de nivel), generando automáticamente el Modelo Digital de Elevación-MDE.

**El software Helava** utiliza la técnica de sombreado de relieve en la estación de trabajo digital, para generar modelos digitales de elevación automáticos, empezando por el escaneo de la imagen del terreno, utilizando este software para SIG, que estima elevaciones a partir de un ángulo de incidencia, con un modelos matemático de correlación de imágenes.

La imagen de correlación y la derivación automática de un MDE se pueden usar como puntos de inicio para la generación de ortofotos digitales, la cual juega un papel importante en la planeación del número de actividades futuras. Además, las ortofotos digitales son cada vez más usadas con los sistemas de Información Geográfica (SIG). Si se apoya la información vectorial con una ortofoto en el monitor de un SIG, entonces la mayoría de las operaciones fotogramétricas de ploteo pueden ser hechas directamente en la estación de trabajo.

**El flujo de trabajo** que sigue una Estación de Trabajo Digital Fotogramétrica va desde el escaneo de las fotografías aéreas, la orientación interna/relativa/absoluta para llegar a la extracción del Modelo Digital de Elevación (GDE System, 1997).

El primer paso en el flujo de trabajo de fotogrametría digital es el **escaneo** de fotografías aéreas. Este paso podría probablemente ser considerado como el más importante en todo el diagrama de flujo. En este paso se trata de capturar de las fotos aéreas su verdadera calidad radiométrica (reproducción precisa del color, calidad y tono) mientras al mismo tiempo se mantiene su geometría.

El escaneo de las fotografías se debe hacer con una resolución mínima de 12000 micrones ( $\mu\text{m}$ ) de alta resolución, radiométrica y geométrica precisa, y el sistema de escaneo plano que convierte la información de la fotografía blanco y negro dentro de un raster digitalizador de datos de imágenes.

**La orientación interior** es el proceso de medir marcas fiduciales en la imagen digital. Este proceso de medida relaciona las coordenadas del píxel de la imagen digital del sistema con las coordenadas de la foto. Una vez los fiduciales en la Primera foto han sido medidos, todos los demás en secuencia serán medidos usando la técnica de correlación.

**La triangulación** en la DPW Helava® se hace por medio de la extensión HATS (Helava Automated Triangulation System). Es un sistema altamente automatizado para ejecutar la triangulación sobre la imagen, no solo en grandes bloques de fotografías aéreas, sino en imágenes de satélite o en simples pares estereoscópicos.

La triangulación es algunas veces conocida por otros nombres tales como, registro de la imagen, geoposicionamiento, aerotriangulación, orientación, orientación exterior, o resección.

En la triangulación entran los puntos de control del terreno que son objetos identificados en la imagen con una localización precisa (latitud/longitud/elevación). Los puntos son localizados en la zona de traslape en dos o más imágenes. Después de hacerse la triangulación se dice que las imágenes están georeferenciadas.

**La extracción automática del terreno** ATE (Automatic Terrain Extraction) crea un grilla de celdas del terreno desde una imagen estereo o un par estereoscópico.

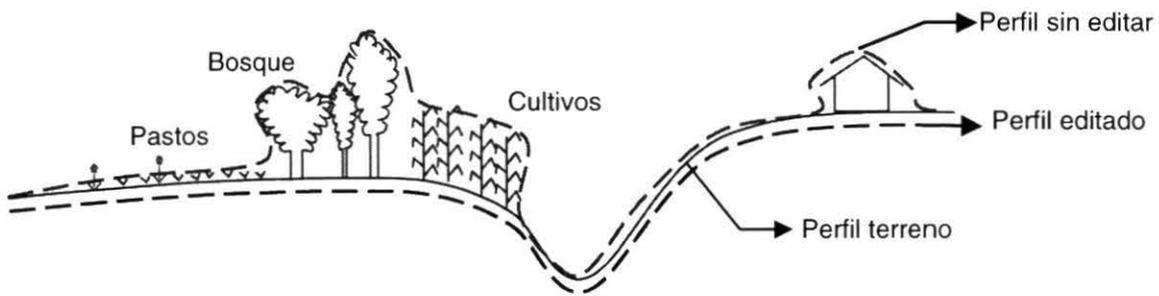
Esta malla es almacenada en un sistema de coordenadas. La resolución de las celdas se especifica cuando se crea el archivo del MDE, de acuerdo con la precisión deseada.

Después de correr el ATE, se puede chequear la calidad del MDE con una edición interactiva que ayuda a detectar y corregir elevaciones estimadas por el algoritmo, reduciendo las exageraciones positivas y negativas del relieve mediante un proceso semiautomático, en cualquier área donde el ATE fue incapaz de generar bien los datos de elevación.

La fase de corrección o perfeccionamiento llamado **edición** en el modelo digital de elevación consiste en una corrección interactiva realizada por el operador. Vale señalar que el operador no tiene que hacer la edición punto por punto, pero el software deja al mismo hacer el trabajo de edición para todo un bache (hueco) u otro objeto.

Normalmente se unen las curvas de nivel dentro del MDE después de correr el ATE, para mejorar la calidad del MDE, permitiendo aumentar la precisión de la medida del relieve, gracias a las operaciones de filtraje a fin de corregir árboles o casas individuales que podrían deteriorar la superficie efectiva del terreno (Figura 4). El ATE no distingue entre las edificaciones y el terreno ya que se eleva por los techos de las edificaciones así como también por las copas de los árboles. En esta situación, se puede desviar el ATE y proceder a la edición interactiva del terreno después de crear el MDE.

En esta fase, es posible definir nuevos datos para el MDE, como por ejemplo la estructura de líneas y el grado de suavizado; se ha comprobado que esta fase es de alta precisión y confiabilidad. Después de finalizada la fase de edición, todos los resultados (vectores y puntos) obtenidos de un modelo digital por medidas automáticas pueden ser extraídos en varios formatos para la base de datos de SIG y otros paquetes de software diseñados para crear MDE .



**Figura 4** Contribución del error potencial causado por la vegetación en la generación automática del Modelo Digital de Elevación-MDE con el algoritmo Helava.

#### 1.4 CLASIFICACIÓN DE USO DE TIERRA CON IMAGEN DE SATÉLITE SPOT

La utilización de una tecnología relativamente nueva como la teledetección, constituye una herramienta eficaz para la cartografía de unidades ambientales basadas en el uso de la tierra. Sobre la base de la interpretación de imágenes de satélites (Figura 5), además de fotografías aéreas y observaciones de campo se pueden identificar distintos usos de tierra, necesarios para diferenciar unidades homogéneas de tierras en las cuencas; la utilización de este tipo de unidades de uso es común en estudios de Análisis de Terreno.

La cartografía de los usos y coberturas vegetales de una cuenca es una información base. La teledetección nos permite acceder a este tipo de información del territorio de un modo operativo y controlar, a partir de ella, problemáticas ambientales directamente relacionadas con los usos del suelo.

Conocer cuáles son las formas y tipos de usos que se hacen de la tierra, y en su defecto cual es su ocupación, constituye una de las informaciones esenciales en

las políticas de planificación ambiental y gestión de territorio. Este tipo de información adquiere especial relevancia en la medida en que se convierte en un claro reflejo de las alteraciones y actividades que el hombre lleva a cabo sobre su medio. En este sentido, podemos analizar los usos como un indicador del grado de aprovechamiento correcto o sobreexplotación del suelo en función de la aptitud o capacidad potencial que presente una unidad de tierra. De la misma manera, los usos del suelo son con frecuencia los desencadenantes de graves problemáticas ambientales como las pérdidas del suelo debido al deterioro de la cubierta vegetal, la sobreexplotación de recursos hídricos por prácticas agrícolas intensivas, entre otras.

Para ello se hace necesario un programa para la cartografía de usos y coberturas vegetales del suelo respondiendo a un doble objetivo: El acceso de un modo operativo, al conocimiento estadístico y cartográfico de las formas y tipos de uso y ocupaciones del suelo en la zona de estudio, permitiendo el seguimiento de su evolución en el espacio y en el tiempo, y el alcance de un mejor diagnóstico en las problemáticas que están siendo evaluadas a través de modelos automáticos implementados en un SIG.

La Teledetección se puede definir como el arte y la ciencia de detectar, identificar, definir y analizar las características y fenómenos de la superficie de la Tierra con imágenes obtenidas por sensores terrestres, aéreos y desde satélite, utilizando tanto técnicas visuales como de interpretación asistida por ordenador.

La identificación de características de imágenes obtenidas mediante sensores remotos, es eficaz para evaluaciones globales de las características geométricas y estimaciones generales de los tipos de cubiertas terrestres. La interpretación mediante ordenador de las imágenes se define como un análisis cuantitativo debido a su facilidad para identificar puntos basándose en sus propiedades numéricas y contabilizarlos para realizar estimaciones de superficies. En estos procedimientos se basa la clasificación. Este es un método por el cual los puntos

de una imagen pueden ser etiquetados.

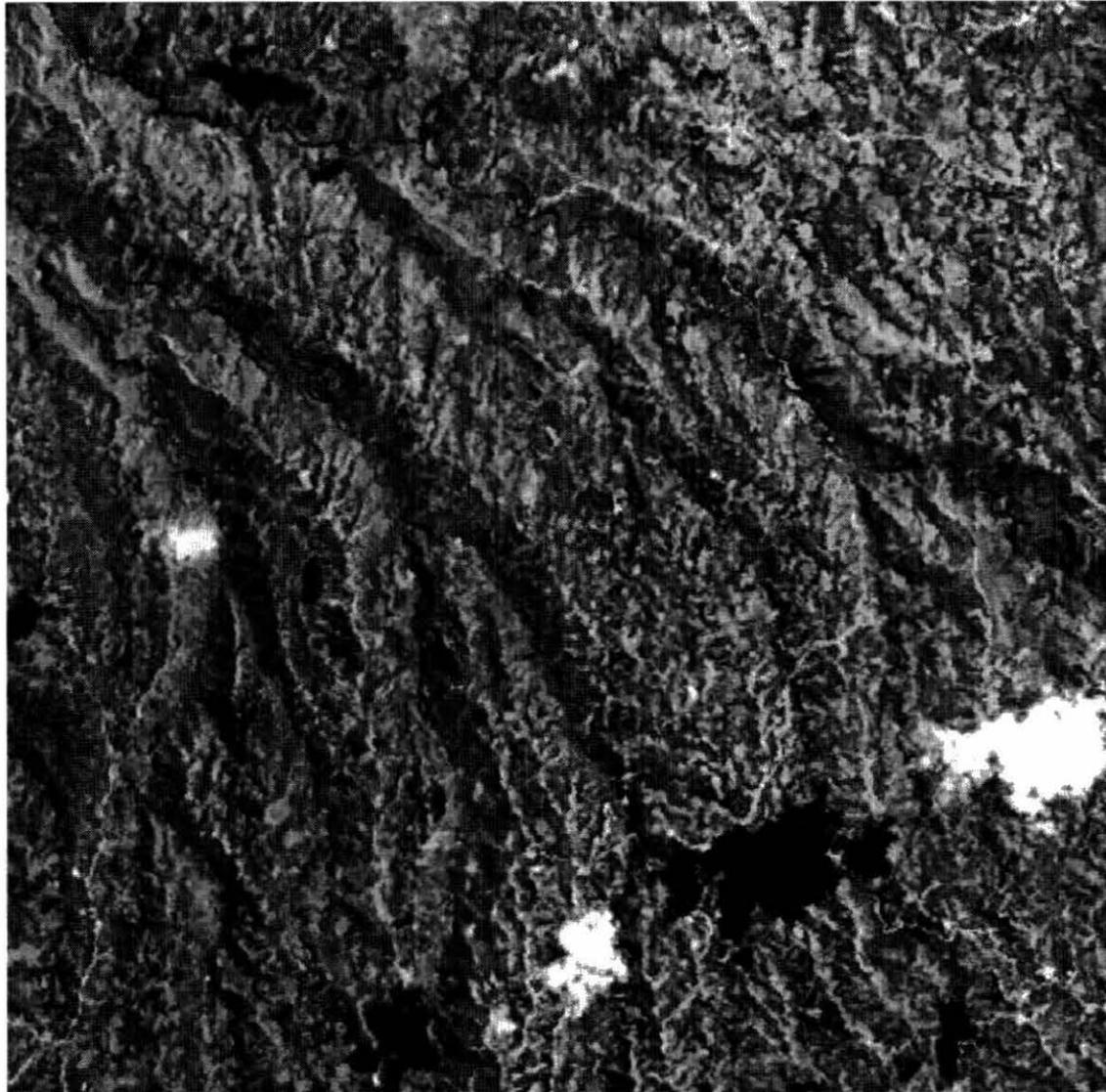
La variación de colores que observamos en una imagen (figura 6) captada por un satélite es el resultado de la diferente cantidad de energía electromagnética que los distintos cuerpos emiten o reflejan. Cada cuerpo tiene una respuesta espectral determinada, obedece a la cantidad de energía reflejada o emitida según la longitud de onda. Interpretando esa cantidad de energía electromagnética (a través del color) se identifica y clasifican los objetos.

Gracias a la interpretación de las imágenes de satélite se realizan y actualizan inventarios de recursos, se hacen seguimientos de fenómenos naturales como incendios, clasificación de uso de tierras, y se realiza la predicción de fenómenos relacionados con el clima, la erosión, etc.

Pero, una imagen de satélite por si misma no tiene validez cartográfica (Land Cover and Remotring Sensing, 1999). Es necesario transformar las coordenadas imagen (píxel), en coordenadas de terreno. Estas coordenadas son tomadas directamente del terreno mediante sistema de posicionamiento global GPS.

## **1.5 SISTEMA DE GEOPOSICIONAMIENTO GLOBAL GPS**

El acceso al terreno es necesario para establecer un conjunto de puntos de apoyo que permitan fijar valores de altitud en una escala absoluta, tanto en fotografías aéreas como en las imágenes de satélite.



**Figura 5** Imagen de Satelite SPOT XS  
Al Norte de la Cuenca Cabuyal.

La investigación y el tratamiento de los sistemas de posicionamiento por satélite, son utilizados para fines científicos. Pero quizá, las aplicaciones en las cuales estos sistemas han calado más hondo son la Geodesia y la Topografía, a partir del descubrimiento de que dichos sistemas de posicionamiento podían aportar las precisiones requeridas para el desarrollo de estas disciplinas y su aplicación en el desarrollo de infraestructuras, cartografía, dimensionamientos, sistemas de información geográfica SIG, estudios de movimientos y deformaciones, y para fines más expeditos como la navegación y el ocio.

Las generalidades del sistema GPS y sus características más importantes, se dividen en tres sectores fundamentales y dependientes entre sí, el *sector espacial*, el *sector de control* y el *sector de usuarios*.

**El sector espacial** lo forman los satélites de la constelación NAVSTAR (Navegación por satélite en tiempo y distancia). La constelación está formada por seis planos orbitales, y en cada uno de ellos existe una órbita elíptica casi circular donde se alojan los satélites regularmente distribuidos. Los planos tienen una inclinación de 55° respecto al plano del ecuador, y se nombran como A, B, C, D, E y F. Cada órbita contiene al menos cuatro satélites, aunque pueden contener más. Los satélites se sitúan a una distancia de 20200 Km respecto del geocentro, y completan una órbita en doce horas sidéreas. Estos satélites son puestos en funcionamiento por el Comando de las Fuerzas Aéreas Espaciales de USA (AFSPC).

Con estos fundamentos, se garantiza la presencia de al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todos los lugares de la superficie de la Tierra.

**El sector control** tiene como misión el seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR para los siguientes fines:

- Establecer la órbita de cada satélite, así como determinar el estado de sus osciladores.
- Hallados los parámetros anteriores, emitirlos a los satélites para que éstos puedan difundirlos a los usuarios.

De este modo, el usuario recibe la información de las efemérides de posición de los satélites y el error que se está produciendo en su reloj, todo ello incluido en el mensaje de navegación.

Existen estaciones de seguimiento (láser, radar y ópticas), cuyo fin es la obtención de efemérides que no estén afectadas por la disponibilidad selectiva, denominadas precisas, y que están al alcance del usuario a través de organismos científicos como el IGS (International Geodynamic Service) o el NGS (National Geodetic Survey). Con ellas, tenemos la seguridad de posicionarnos en el sistema WGS84 con los errores típicos del sistema.

**El sector de usuarios** lo compone el instrumental que deben utilizar los usuarios para la recepción, lectura, tratamiento y configuración de las señales, con el fin de alcanzar los objetivos de su trabajo. Los elementos son el equipo de observación y el software de cálculo, que puede ser objeto de uso tras la campaña de observación, o bien realizable en tiempo real, donde se obtienen los resultados in situ.

## **1.6 MODELOS DERIVADOS**

A partir de los MDE es posible construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía.

De las principales variables implicadas en estas aplicaciones, la de uso más general es probablemente la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura, como también: elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve. El relieve, definido en este caso como la variabilidad de la superficie, es lo que algunos autores denominan rugosidad (Felicísimo, 1999).

El modelo digital de elevación contiene información de dos formas diferentes. La primera se da de forma explícita, es decir, mediante los propios datos contenido

en el modelo. La segunda es una información implícita, en el sentido de que intervienen las relaciones espaciales entre los objetos o datos, relaciones que pueden considerarse incluidas en el modelo del mismo modo que los propios datos.

Ambos tipos de información, aunque complementarios, permiten obtener datos de diferente carácter. Del primer tipo se derivan los descriptores de carácter global como, por ejemplo, los estadísticos básicos del modelo (media, varianza, etc.) o la dimensión fractal. Esos descriptores están destinados a dar una información sintética sobre el terreno y, al resumir características generales, pudiera darse el caso de que modelos diferentes puedan coincidir en sus valores. El segundo tipo de información se utiliza sobre todo para construir modelos derivados que dan cuenta de nuevas variables topográficas (pendiente, rugosidad, etc.). Para ello se utiliza la información estructural implícita en el modelo digital y, por tanto, en las relaciones topológicas de los datos. En este caso las operaciones implicadas suelen ser de ámbito local, es decir, se usan los datos de un entorno limitado de cada punto. Los resultados son también de validez local y pueden ser asignados a cada punto del MDE, creando nuevos modelos digitales con la misma estructura que el original (Felicísimo, 1999).

Ambos tipos de información pueden utilizarse conjuntamente para caracterizar el relieve de acuerdo con criterios objetivos. Dado que los procesos geológicos externos dejan una huella morfológica sobre las áreas afectadas, la descripción de esta morfología, su análisis y el estudio de los procesos que la han originado pueden encontrar en los MDE un instrumento de enorme utilidad. Para mostrarlo, se describirá la construcción de los modelos derivados: Identificación de la distribución espacial de los suelos utilizando un proceso basado en la caracterización del terreno (Clasificación Geomorfológica) e índice del terreno mojado quasi dinámico para caracterizar la distribución espacial de zonas con superficie saturada y contenido de agua del ("Wetness Index").

### 1.6.1 Clasificación Geomorfológica

La importancia de la geomorfología en estudios relacionados con el Medio Ambiente físico es fundamental, ya que casi todas las actuaciones humanas tienen lugar directamente sobre las formas del relieve. La utilización de una tecnología relativamente nueva como la clasificación geomorfológica por medio de un algoritmo, constituye una herramienta eficaz para la cartografía de unidades ambientales basada en una clasificación Geomorfológica.

Conacher y Dalrymple (1977) desarrollaron un modelo sencillo basado en procesos de caracterización del terreno para identificar la ocurrencia de los suelos en un paisaje complejo. Su propuesta básica es que la distribución de suelos puede ser identificada mas eficientemente mediante la separación de unidades pedogeomorfológicas donde suceden procesos similares de hidrología (movimiento y retención de agua), geomorfología (forma del relieve y origen de la forma) y pedología (estratificación y materiales comunes). El modelo propuesto tiene una extensión tridimensional de nueve unidades de suelo paisaje. El concepto bidimensional y el modelo cualitativo se reinterpretó en términos de ecuaciones de continuidad que describen la distribución de los materiales del suelo sobre las laderas y está aplicado en un sistema de información geográfico (SIG) mediante el análisis de un modelo digital de elevación (MDE) raster.

Este modelo permite tener en cuenta la variabilidad espacial de los suelos tanto a escala continua como a escala categórica y así mismo puede hacer extrapolaciones a otras pendientes en forma predictiva.

En el siguiente cuadro se halla la clasificación y descripción de las seis unidades de uso de paisaje y sus correspondientes subdivisiones en unidades suelo paisaje.

Unidades Uso Paisaje	Interfluve	Shoulder	Backslope	Footslope	Toeslope	Channel
Possible Traducción	Interfluvios	Cimas Convexas	Ladera	Coluvios	Llanura de inundación	Drenaje, Canales
Procesos Geomorfológicos Dominantes	Lixiviación (Lavado de sales) vertical Drenaje limitado. Retención de agua.	Erosión severa y pérdidas por eluviación (lavado de coloides, partículas menores de dos micras)	Transporte de gran cantidad de material. Erosion hídrica y remoción en masa natural y por cultivo.	Coluviación (Caida de materiales por gravedad formando montículos), rompimiento de la pendiente, sedimentación	Aluviación depositacion de materiales. Tabla (nivel freático) de agua superficial.	Procesos fluviales por desborde.

(Fuente Conacher, A.J., Dalrymple, J.B., 1977)

**El Índice de Caracterización del Terreno** es un un espacio bi-dimensional, el cambio en el espesor del suelo en una posición dada de la pendiente puede definirse como:

$$\partial p / \partial t = \mu W - \partial S / \partial x \quad (1)$$

donde  $p$  es el espesor del suelo,  $t$  es el tiempo,  $\mu$  es el volumen de suelo mineral producido por la meteorización de un volumen de material parental,  $W$  es la tasa de meteorización,  $S$  es el promedio de transporte de material de suelo, y  $x$  es la distancia desde la pendiente dividida (Carson y Kirby, 1972)

El término  $\mu W$  refleja la pedogénesis vertical que incluye la reorganización de la estructura del suelo por varios procesos formadores (ADICIONES u HORIZONACIÓN), donde  $-\partial S / \partial x$  representa la tasa de transferencia lateral hidrológica, mecánica y de masa biológica a través del gradiente de pendiente (PÉRDIDAS o PROCESOS LATERALES DE TRANSPORTE)

Si el modelo asume básicamente que existe un equilibrio dinámico entre los suelos y la forma del paisaje, se pueden predecir las características del suelo sobre la pendiente ( $\mu W - \partial S / \partial x$ ) mediante la caracterización de los procesos de transporte

de masa lateral en una posición dada de la pendiente (Hack, 1960; Conacher y Dalrympe, 1977)

En una pendiente con limitaciones de transporte, la tasa promedio de material transportado ( $S$ ) por procesos de difusión (lavado de la pendiente, suelo erodado y lavado subsuperficial de productos meteorizados) puede sustituirse en forma reduccionista por la Capacidad de Transportación de Suelos ( $Th$ ) en una localidad dada (Carson y Kirby, 1972):

$$S = Th = kf(x)^m g(x)^l \quad (2)$$

donde  $f(x)$  es la distancia desde la cima de la ladera,  $g(x)$  es el cambio de elevación con el cambio de la posición (como  $-\partial S / \partial x$ ), y  $k, m$  y  $l$  son constantes.

Si se aplica la Ecuación (2) a **un paisaje tridimensional** con movimientos suelo-agua desviados por la curvatura de la pendiente, entonces  $x$  podría tratarse como un vector  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  en la dirección del movimiento, y  $f(x,y)$  puede ser reemplazado con el área de contribución pendiente arriba por unidad de curva de nivel ( $As$ ) (Carson y Kirby, 1972; Moore y Wilson, 1992). Esta  $As$  se define como el área de cuenca arriba del punto en el paisaje. Para una celda de grilla  $i$  de un DEM,  $As$  se computa a partir de las celdas de donde fluye el agua hacia la celda  $i$ .

$$As = (i/b) \sum_{i=1}^n \rho_i A_i \quad (3)$$

donde  $A_i$  es el área de la celda de grilla,  $n$  es el número de celdas drenando en la celda de grilla  $i$ ,  $\rho_i$  es el peso dependiente de los mecanismos de generación de escorrentía, y  $b$  es el ancho aproximado de la curva de nivel (dependiente de la resolución de la celda)

$As$  ha sido ampliamente utilizado como la base de los algoritmos de rutina en estudios de erosión e hidrología (Torboton, 1997). En el presente estudio se utilizó

este algoritmo en conjunción con el algoritmo de flujo múltiple de Quinn et al (1994) como método para dividir el flujo que viaja fuera de una celda hacia las celdas adyacentes de mas baja elevación.

El  $g(x, y)$  de la Ec. (2) se refiere a los factores de forma de la pendiente que influyen en los procesos de transporte de materiales de suelo y que frecuentemente han sido aproximados mediante el gradiente de pendiente  $(-\partial z / \partial x)$ . Sinembargo, el gradiente de pendiente es una aproximación en dos dimensiones y no refleja el cambio tridimensional de la curvatura de las pendientes, además, no aún no se entiende bien la influencia relativa de cada atributo de la pendiente sobre ciertos procesos pedogeomorfológicos.

Recientemente, Blaszczyński (1997) propuso un índice de terreno para caracterizar la forma del terreno el cual considera tanto el gradiente de pendiente como la curvatura tridimensional de la pendiente. Este nuevo índice del terreno es el promedio ponderado de las diferencias distancia-elevación entre un punto dado y todos los otros puntos del DEM dentro de un radio específico de búsqueda. En este estudio, el índice de terreno está planteado como la “curvatura de superficie ( $C_s$ )” y definido como:

$$C_s = \left( \sum_{i=1}^n (z_i - z_n) / d_{in} \right) / n = g(x, y) \quad (4)$$

Donde  $z_i$  es la elevación de la  $i$ -ésima celda,  $z_n$  es la elevación de un punto modelo de los alrededores,  $d$  es la distancia horizontal entre dos puntos modelos, y  $n$  es el número total de puntos de los alrededores empleados en la evaluación.

El valor de  $C_s$  refleja intrínsecamente dos características de la morfología de la superficie: magnitud del gradiente de la pendiente y curvatura de las formas tridimensionales de la superficie.

Valores positivos de  $C_s$  indican una pendiente predominantemente convexa, y la convexidad aumenta cuando el valor se vuelve más grande. De otro lado, los

valores negativos indican una pendiente predominantemente cóncava. Cuando el relieve de la superficie es mínimo, es decir, en áreas de pendiente recta, el valor de Cs tenderá a cero.

La mayoría de las pendientes convexas pueden haber experimentado continuamente procesos denudacionales por la erosión superficial, arrastre de suelo y otros procesos geomorfológicos y biológicos (Conacher, 1973), mientras que las partes cóncavas de la pendiente reciben los materiales de las partes mas altas, y consecuentemente, ocurren procesos superficiales agradacionales.

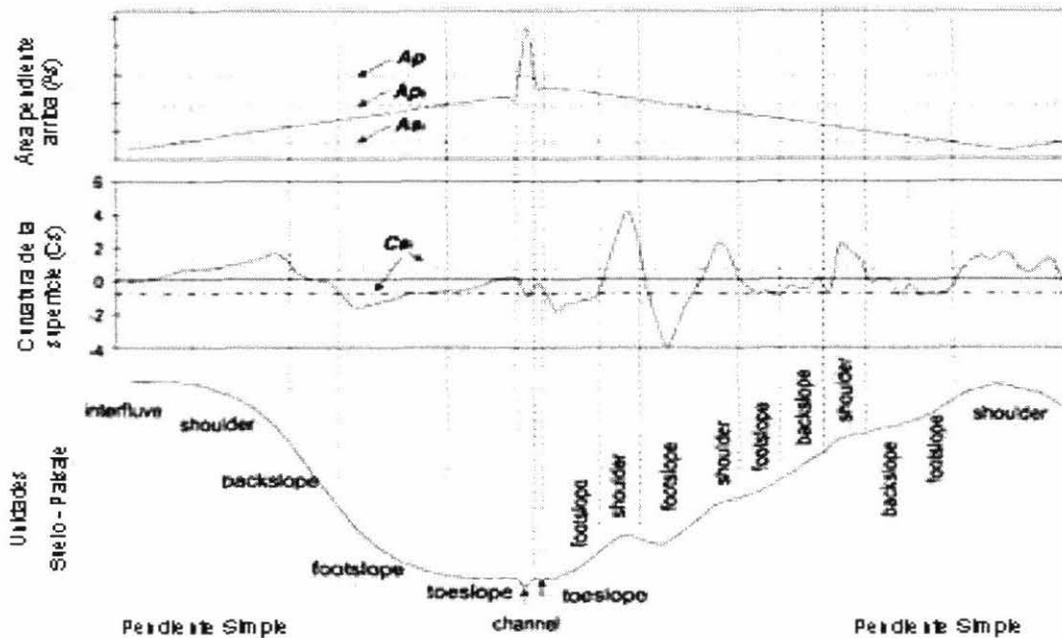
El producto de multiplicar Cs por  $\log_{10}(As)$  se utiliza aquí como un estimativo de la Capacidad de Transportación (Ts) y es definido como un índice de caracterización del terreno (TCI):

$$T_h = TCI = Cs \log_{10}(As) \quad (5)$$

Debido a su rango extremadamente amplio, la función logarítmica se utiliza con el área de contribución pendiente arriba (As).

### **Delineación de las unidades de paisaje**

La Figura 6 demuestra cómo pueden delinarse las unidades de paisaje con los valores de Cs y As a partir de laderas hipotéticas bi-dimensionales simples y complejas.



(Fuente Conacher, A.J., Dalrymple, J.B., 1977)

Figura 6 Esquema en dos dimensiones para las unidades Suelo-Paisaje y propuesta de la caracterización del terreno.

La Figura 7 es un diagrama de flujo para describir el proceso de delineación. El valor  $C_s$  en este diagrama fue calculado promediando 6 celdas vecinas y el valor  $A_s$  es la suma de las celdas pendiente arriba para una posición dada.  $A_s$  y  $C_s$  están intrínsecamente para una forma de pendiente tridimensional, pero aquí son representadas como bi-dimensionales para conveniencia de la visualización.

### 1.6.2 “Wetness Index”

Este índice estima las épocas de drenaje variable a partir de un evento de lluvia previo deducido de una teoría sencilla de flujo lateral (Barling et al, 1994). El modelo se probó por sus creadores, con una serie de observaciones de campo y

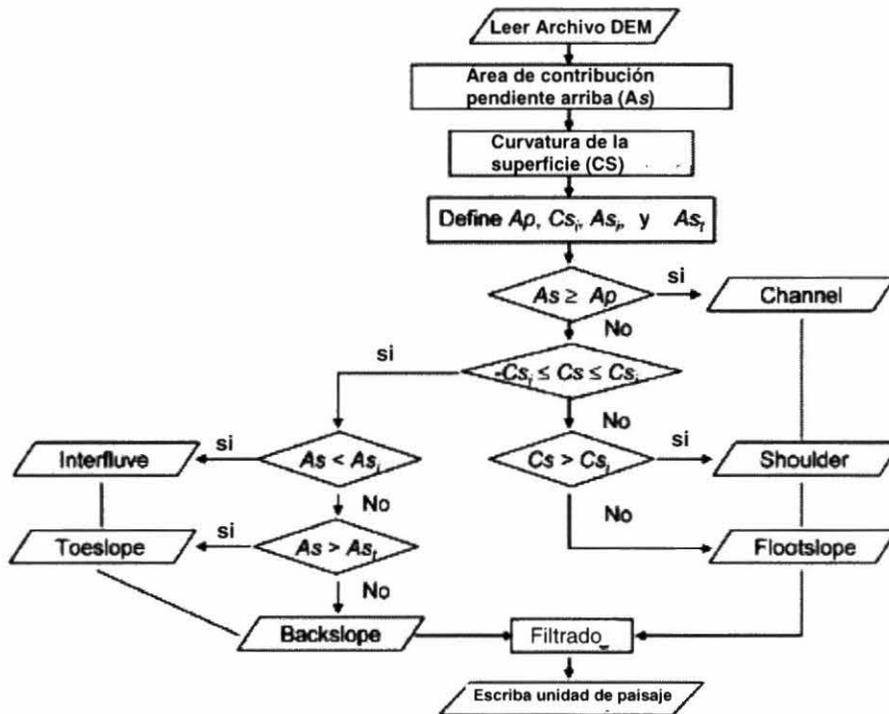


Figura 7 Diagrama de flujo para derivar unidades de paisaje-suelo. Apartir de la combinación Cs y As.

experimentos numéricos utilizando la distribución espacial de la hidrología con un modelo dinámico. Este índice ha mostrado ser una útil extensión de un anterior índice estático desarrollado para predecir zonas de suelos saturados y la distribución del agua del suelo (Por ejemplo el contenido de agua del suelo sobre una capa impermeable o semipermeable poco profunda). El nuevo índice no se ve restringido por las asunciones del flujo en estado estable que son base de los índices actuales (Barling et al 1994).

Otro término genérico para el "Wetness Index", es índice topográfico (Beven et al 1995). La automatización del análisis de terrenos y el uso de modelos digitales de elevación (MDEs) ha hecho posible facilitar la cuantificación de atributos en el paisaje.

El "Wetness Index" caracteriza la distribución espacial de los índices de humedad en zonas de superficie de saturación y contenido de agua en el suelo en el paisaje. En otras palabras representa la tendencia de algún punto en la cuenca en

condiciones de desarrollo de saturación, así si tenemos la superficie de distribución de saturación; entonces podemos decir algo sobre el exceso de saturación del flujo sobre la superficie.

Este calculo se hace dividiendo el agua de entrada por el agua de salida en cada celda:

$$\text{Log} ( A_s / \tan \beta )$$

Donde:

$A_s$  = Es el área de drenaje por unidad de área especifica

$\tan \beta$  = La pendiente, representa el gradiente hidráulico de saturación del flujo.

### **El Índice de Mojado Quasi-Dinámico (“Wetness Index”)**

Rasgos locales como la forma de la pendiente y el área de contribución efectiva pendiente arriba juegan un papel importante en la determinación de la distribución del contenido de agua y la formación de zonas con suelo saturado. Se requiere modelarlos de una forma sencilla pero significativa este fenómeno.

Para hacer esto es necesario partir de la teoría del flujo subsuperficial y determinar cómo se puede adaptar esto sin utilizar la asunción del estado estable ya que se supone que el régimen de flujo subsuperficial está en un estado de desequilibrio dinámico (Kirkby y Chorley (1967, p. 7)

La ley de Darcy para el flujo unidimensional de agua en el suelo establece que:

$$q = -K_s ( dH / dx ) \quad (6)$$

donde  $q$  es la densidad de flujo,  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada, y  $H$  es la carga hidráulica en la dirección del flujo.

Si se asume que la tabla de agua colgada es paralela a la capa impermeable o restrictiva, entonces (6) se vuelve:

$$q = K_s \tan \beta \quad \text{para } \beta \text{ pequeños, } \sin \beta = \tan \beta \quad (7)$$

donde  $\tan \beta$  es la pendiente del límite impermeable, el cual se asume que tiene la pendiente de la superficie del suelo.

La ecuación (7) se conoce como la *ecuación de la onda cinemática para el flujo subsuperficial* (Beven, 1981; Sloan y Moore, 1984) y utilizando esta ecuación se puede estimar la velocidad de flujo subsuperficial intersticial:

$$v = q / \eta = (K_s / \eta) \tan \beta \quad (8)$$

donde  $\eta$  es la porosidad efectiva.

Utilizando la ecuación (8), Lida (1984) introdujo el concepto de *curvas de área-tiempo*, para estimar el tiempo que requiere el agua para ir del punto Q al punto P a lo largo de la línea de flujo (Figura 8):

$$t_{PQ} \int_P^Q \frac{v dx}{v} = \int_P^Q \frac{\eta}{K_s \tan \beta} d_s \quad (9)$$

donde  $s$  es la distancia entre P y Q a lo largo de la línea de flujo.

Utilizando (9), se pueden dibujar las isolíneas del tiempo que tarda el agua en recorrer la unidad de espesor de una curva de nivel en el área pendiente arriba. Para un tiempo  $t$ , el área limitada por la unidad de espesor de la franja a nivel, por las dos líneas ortogonales de pendiente, y por la isolínea es definida como  $a(t_s)$  en las Figuras 10a y 10b.

En el máximo tiempo  $t_s$  (por ejemplo el tiempo para alcanzar el equilibrio o el tiempo para la concentración subsuperficial),  $a(t_s)$  es igual al área específica pendiente arriba ( $A_s$ )

A partir de esto, Lida (1984) definió la unidad hidrográfica en ( $t$ ) como:

$$\mu(t) = (1/at_s)(da/dt) \quad (10)$$

tanto la descarga por unidad de la franja a nivel  $q(t)$  como la profundidad del flujo lateral saturado  $h(t)$  están dados por (11) y (12) respectivamente:

$$q(t) = \int_0^{t_s} \frac{da(t)}{d_T} r(t - T) d_T \quad (11)$$

$$h(t) = \frac{q(t)}{K_s \tan \beta} = \frac{1}{K_s \tan \beta} \int_0^{t_s} \frac{da}{d_T} r(t - T) d_T \quad (12)$$

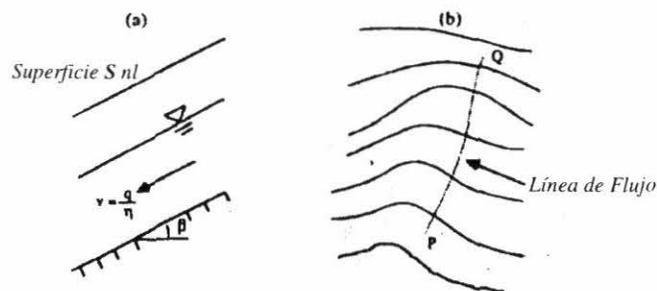


Figura 8 Diagrama esquematizado del flujo saturado

Figura 8 muestra un diagrama esquematizado del flujo saturado: (a) Corte transversal del flujo saturado corriendo paralelo a la capa impermeable,  $q$  es el flujo específico,  $h$  es la porosidad efectiva, y  $v$  es la velocidad intersticial promedio, (b) vista de planta de la línea de flujo saturado cuando la superficie del suelo es paralela a la capa impermeable (basado en Lida, 1984).

donde  $r(t)$  es la tasa de recarga en el tiempo  $t$ .

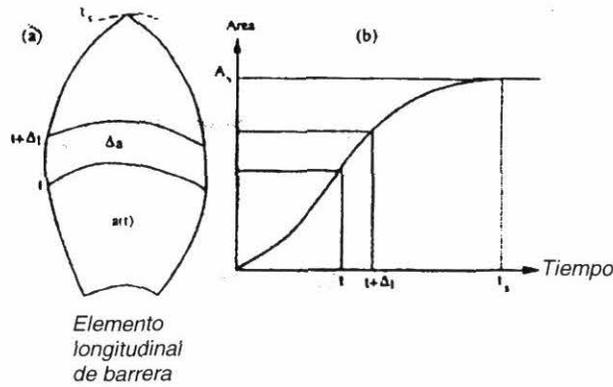


Figura 9 Esquema de la relación tiempo-área.

La Figura 9 muestra el esquema de la relación tiempo-área. (a) Las líneas punteadas son isolíneas del tiempo requerido para que el agua alcance la barrera, y las líneas continuas son las curvas de nivel ortogonales, donde  $a(t)$  es el área rodeada por la barrera, por las curvas de nivel y por la isolínea de tiempo  $t$ , y (b) muestra la curva tiempo-área (tomado de Lida, 1984).

Para una tasa de recarga constante  $r_0$ , (11) y (12) se convierten en

$$q(t) = r_0 a(t) \quad (13)$$

$$h(t) = \frac{r_0}{K_s \tan \beta} a(t) \quad (14)$$

Lida (1984) desarrolló soluciones analíticas de la naturaleza de la topografía efectiva de contribución pendiente arriba y del tiempo de redistribución del drenaje, utilizando topografías idealizadas de pendientes planas y formas cónicas para representa hondonadas y cimas.

Esta aproximación se puede extender a paisajes naturales mas complejos cuando han sido calculados los atributos topográficos del paisaje usando cualquier programa de análisis del terreno.

En la Figura 10 se ilustra los resultados de un método que divide automáticamente la cuenca en una serie de unidades o elementos interconectados y calcula los atributos de cada elemento utilizando el programa de análisis del terreno de Moore y Grayson (1991) Programa de Análisis Topográfico para las Ciencias Ambientales-Curvas de Nivel (TAPES-C del inglés)

Utilizando (ecuación 8) y los atributos topográficos (pendiente, área, sendero del flujo) e hidrológicos (conductividad hidráulica saturada, porosidad de drenaje) de cada celda o elemento del terreno, se calcula el tiempo que tarda el flujo subsuperficial en recorrer a lo largo cada unidad.

Utilizando el tiempo de drenaje de cada elemento individual, es solo un asunto simple calcular el área “efectiva” de contribución pendiente arriba por unidad de espesor de la franja a nivel ( $a(t) = A_e$ ) para cada elemento en su tiempo de drenaje específico:

$$a(t) = Ae = \sum_{i=1}^n A_i / b \quad (15)$$

donde n es el número de elementos contributivos del drenaje subsuperficial pendiente arriba (el cual se determina con el tiempo de drenaje acumulado), y  $A_i$  que es el área del elemento contributivo “i” al drenaje subsuperficial.

Debido a que el flujo tarda una cantidad considerable de tiempo en recorrer un elemento a lo largo, se debe de representar la convergencia o divergencia que suceda sobre esta longitud.

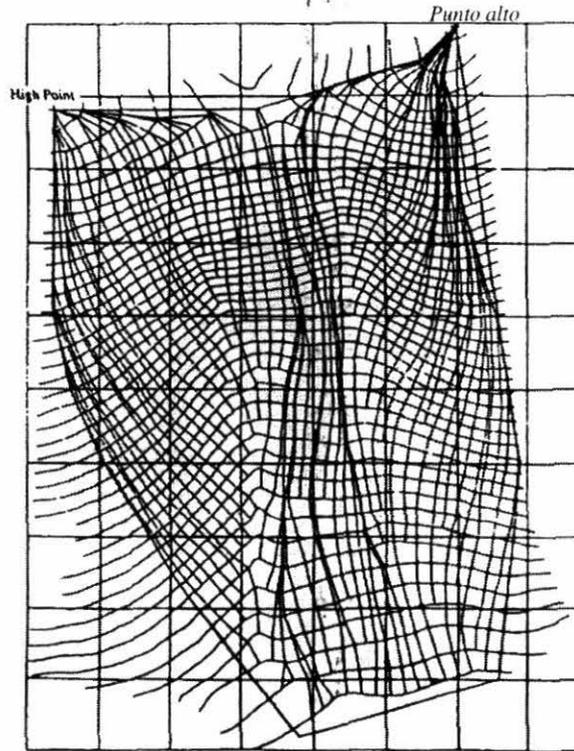


Figura 10 Discretización de la cuenca Wagga Wagga utilizando TAPES-C  
(curvas de nivel a 1 metro de intervalo).

Para cada elemento el área pendiente arriba de contribución al drenaje para un elemento específico en el tiempo de drenaje  $t$  es:

$$A_i = \int_0^{s_i} b(s) ds \quad (16a)$$

donde:

$$S_i = \frac{\eta(t - t_{i-1})}{K_s \tan \beta} \quad t_{i-1} < t < t_i \quad (16b)$$

$$S_i = S_{i \max} \quad A_i = A_{ii} \quad t > t_i \quad (16c)$$

$$A_i = 0 \quad t < t_{i-1} \quad (16d)$$

donde  $A_i$  es esa parte del área total del elemento  $i$ ,  $A_{ti}$ , que contribuye al drenaje;  $b(s)$  es el elemento espesor como una función de la longitud del sendero de flujo abajo del elemento  $s$ ;  $s_i$  es el sendero de flujo para el elemento  $i$  en el intervalo de tiempo  $t-t_{i-1}$ ;  $s_{i\max}$  es la longitud máxima de sendero de flujo para el elemento;  $t$  es el tiempo de drenaje;  $t_i$  es el tiempo de contribución de drenaje de un elemento específico para todos los elementos  $i$ , y  $t_{i-1}$  es el tiempo para que el elemento pendiente abajo hacia  $i$  contribuya al drenaje de un elemento específico (Figura 11).

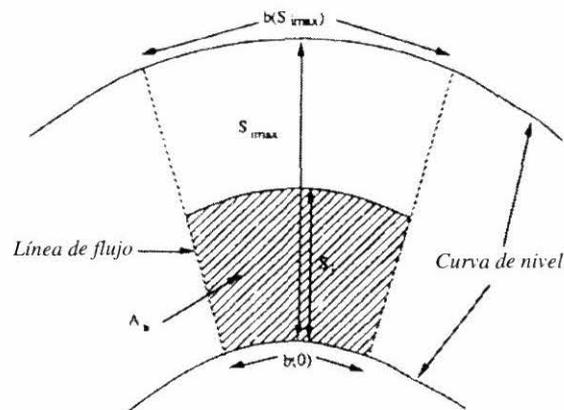


Figura 11 Área elemental de contribución efectiva para el incremento de tiempo de drenaje  $t_i$ .

La aproximación mas simple es asumir que  $b(s)$  es una función lineal de  $s$ , por ejemplo, que el elemento pueda aproximarse a un trapecio. Las ecuaciones (7) y (8) han sido incorporadas al programa DYNWET, el cual calcula valores espacialmente distribuidos del índice de humedad quasi-dinámico. Recientemente este índice ha sido aplicado a MDE basados en grilla. Se asume que el almacenamiento de humedad del suelo está linealmente relacionado a la magnitud del índice de humedad dinámico.

La Tabla 1 presenta una lista de correlaciones entre el índice de humedad  $A_e / \tan \beta$

Y el índice de flujo estable  $A_s / \tan \beta$  para todos los elementos mostrados en la Figura 11 para un rango de tiempos de drenajes.

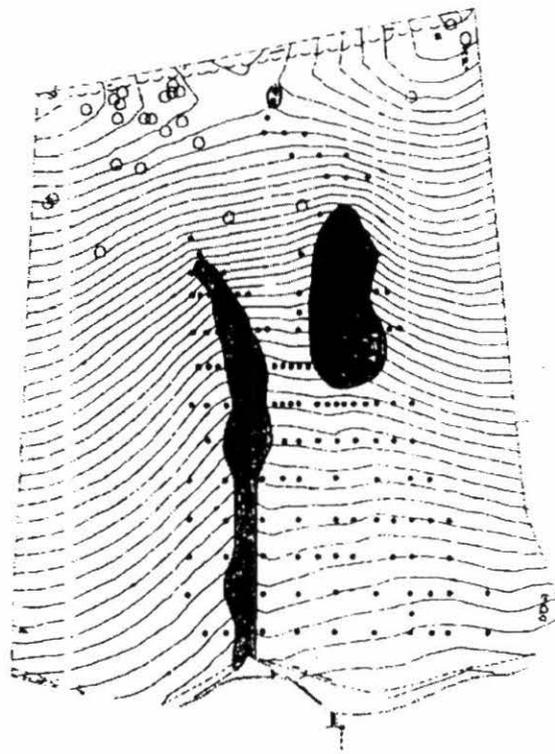
Asumiendo una conductividad hidráulica saturada uniforme de  $89 \text{ mmh}^{-1}$  y una porosidad de drenaje de  $0.24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , se calculó el área efectiva pendiente arriba y estos son los valores promedio de mediciones de campo tomadas por Barling et al (1994) en la cuenca Wagga Wagga (figura 12). Estos autores encontraron que aún después de un período razonablemente largo de drenaje, se dio solamente una baja correlación entre los dos índices, es decir que el estado estable estuvo lejos de ser alcanzado.

Tabla 1 El índice de correlación  $r^2$  entre  $A_e / \tan \beta$  y  $A_s / \tan \beta$  sobre un rango del tiempo de drenaje.

Tiempo de Drenaje en días	Correlación $r^2$
10	0.04
20	0.07
30	0.11
40	0.15
50	0.19
60	0.24
70	0.28
80	0.32
90	0.36
100	0.40
110	0.44
120	0.47

## 1.7 ESTADÍSTICA

Los modelos digitales de elevación MDE, representados como modelos raster nos proporcionan información de variables espaciales continuas que se pueden analizar por medio de la estadística.



**Figura 12** Curvas de nivel a intervalos de 1 metro de la cuenca Wagga Wagga.

La región sombreada muestra los sitios donde se midió la respuesta (por ejemplo tabla de agua superficial) con los piezómetros manuales.

Utilizando un SIG se puede probar la influencia de la vegetación sobre la calidad de un MDE, mediante agregación, combinación y extracción de bases de datos específicas para comparar distribuciones de frecuencias, varianzas y promedios, en otras palabras estadísticamente.

La estadística estudia los métodos científicos para recoger, organizar, resumir y analizar valores cualitativos o cuantitativos mediante los cuales se miden características de los sucesos o fenómenos a estudiar, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas con tales análisis.

### 1.7.1 Covarianza y Correlación

Los procedimientos utilizados para calcular la varianza de una sola propiedad pueden extenderse al cálculo de una medida de la variabilidad mutua de un par de propiedades. La medida, llamada *covarianza*, es la variación conjunta de dos variables alrededor de un mismo promedio. La Figura 13 muestra una superficie de probabilidad creada a partir de dos curvas normales.

Para calcular la covarianza:

$$COV_{jk} = \frac{SP_{jk}}{n-1} \quad (17) \quad SP_{jk} = \frac{n \sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} - \sum_{i=1}^n X_{ij} \sum_{i=1}^n X_{ik}}{n(n-1)}$$

donde  $X_{ij}$  es la  $i$ ésima medida de la variable  $j$ , y  $X_{ik}$  es la  $i$ ésima medida de la variable  $k$ ; el símbolo  $SP_{jk}$  es la suma de productos entre las variables  $j$  y  $k$ .

A fin de estimar el grado de interrelación entre variables de una forma que no esté influenciada por las unidades de medida, se utiliza el *coeficiente de correlación*  $r$ . Correlación es la razón entre la covarianza de dos variables frente al producto de sus desviaciones estándar:

$$r_{jk} = \frac{COV_{jk}}{S_j S_k} \quad (18)$$

Como el coeficiente de correlación es una razón, no tiene unidades.

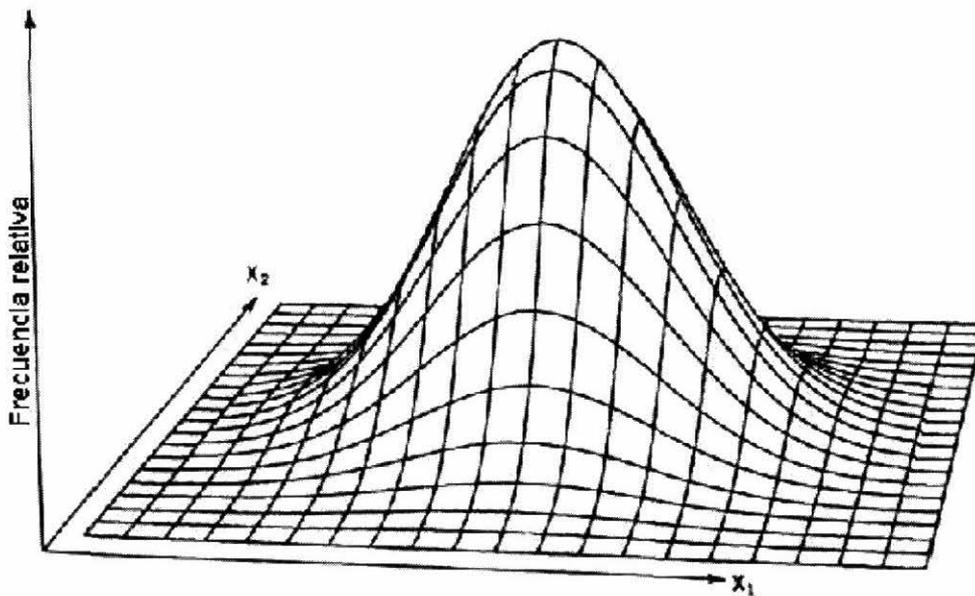


Figura 13 Superficie de Probabilidad.

La covarianza puede igualar pero no exceder el producto de las desviaciones estándar de sus variables, así que el coeficiente va desde +1 hasta -1. Una correlación de +1 indica una relación directa perfecta entre las dos variables; una correlación -1 indica que una variable cambia inversamente con relación a la otra. Entre los dos extremos hay un espectro con menos correlación, incluyendo el cero el cual indica ausencia de relación (Figura 14).

Si  $r$  mide la relación lineal entre dos variables entonces es posible calcular la línea de mejor ajuste, lo cual conduce al campo del *análisis de regresión*.

### 1.7.2 Significancia o Probabilidad de cometer error

La mayoría de los textos relacionados con estadística agrícola repetidamente utilizan niveles de significancia de uno en veinte ( $\alpha = 0.05$ ) o de uno en cien ( $\alpha = 0.01$ ) en sus ejemplos y ejercicios. Esta práctica puede sugerir que hay algo

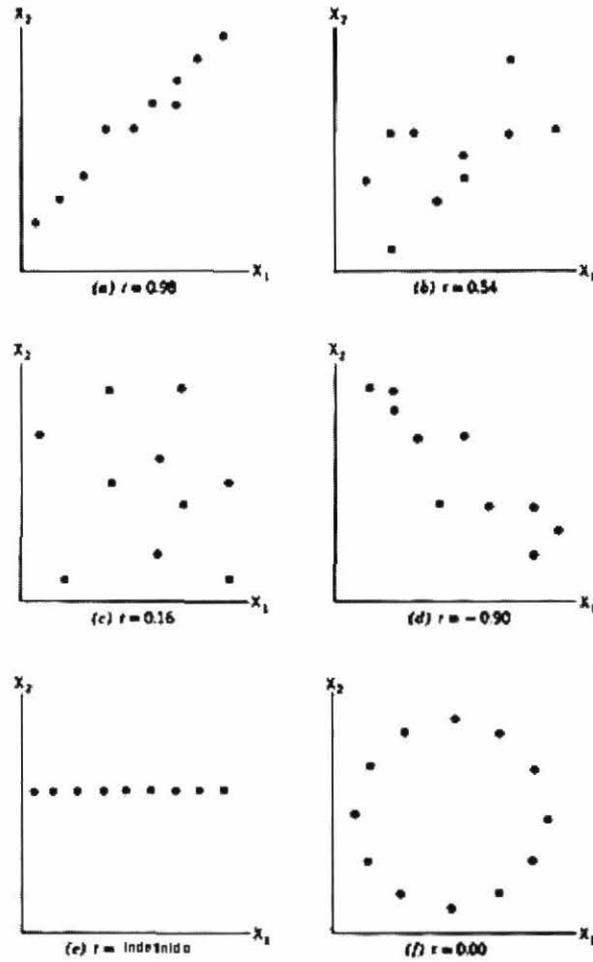


Figura 14 Diagrama de dispersión de dos variables.

Muestra las diferentes correlaciones entre dos variables.

particularmente importante en esos niveles específicos, pero este no es el caso ya que la colocación del nivel de significancia es responsabilidad exclusiva del investigador, el cual debe decidir el riesgo de rechazar una hipótesis cierta si es necesario. A menudo se tiene que ver con circunstancias de gran incertidumbre, y puede ser irreal exigir que una prueba estadística produzca una decisión por el sólo hecho de que pueda haber un error en cien o en veinte.

Si se escoge el nivel de significancia más bajo se corre el riesgo de rechazar una hipótesis verdadera (error tipo I); si por el contrario se establece el nivel de significancia mas bajo, se corre el riesgo de aceptar una hipótesis falsa (error tipo

II). Por ejemplo, la industria del petróleo prefiere las consecuencias de fallar al perforar en los sitios en donde el petróleo existe (error tipo II) en lugar de perforar pozos secos (error tipo I), esto debido a la recompensa financiera que trae el descubrimiento de un sólo pozo gigante que puede pagar de lejos la hechura de cientos de hoyos secos.

### 1.7.3 La Prueba $t$

Rara vez se conocen los parámetros de una población y por lo tanto el promedio poblacional  $\mu$  y su desviación estándar  $\sigma$  no son conocidos y lo mejor que se puede hacer es estimarlos a partir de muestras. Como hay cierta cantidad de incertidumbre está asociada con tales estimaciones, decidir con base en ellas no puede ser tan preciso.

Esta incertidumbre puede estimarse utilizando una distribución de probabilidad que posee una mayor “cobertura” que la distribución normal. Una distribución de este tipo se llama *distribución  $t$* , la cual es similar a la distribución normal, pero depende del tamaño de las muestras que se tomen. Cuando es infinito el número de observaciones, la distribución  $t$  y la distribución normal son idénticas.

Una curva de distribución  $t$  típica se muestra en la Figura 15.

### 1.7.4 Grados de Libertad

En ensayos basados sobre muestras se debe estimar un número de parámetros de la población con el fin de calcular la prueba estadística. Pero parece imprudente utilizar el mismo grupo de datos para estimar los parámetros y a la vez

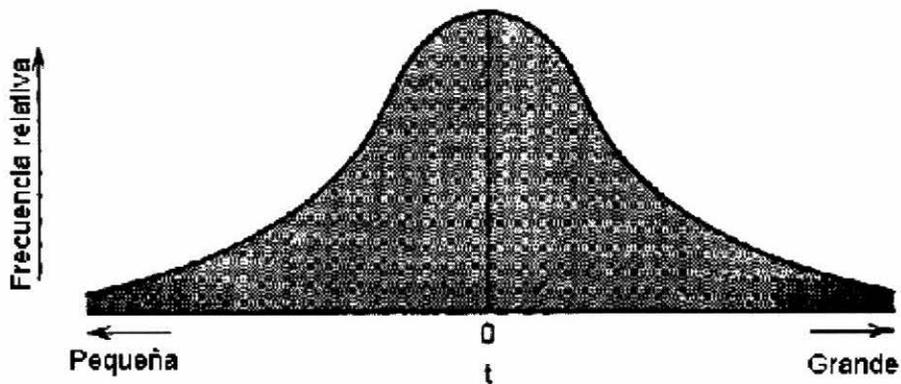


Figura 15 Curva de distribución  $t$  típica.

correr con ellos la prueba sin compensar de alguna forma su doble utilización. Esto se hace considerando una cantidad llamada *grados de libertad*, que puede definirse como el número de observaciones en una muestra, menos el número de parámetros estimados a partir de la muestra.

En otras palabras, los grados de libertad son el número de observaciones en exceso para estimar los parámetros de una población.

Se identifican con la letra griega  $\nu$  y siempre son positivos enteros.

Las tablas de distribución se utilizan de la misma manera que las de distribución normal estándar. Solo que se requieren dos entradas para encontrar la probabilidad en la tabla: el nivel de significancia deseado ( $\alpha$ , la probabilidad de un error tipo I) y los grados de libertad ( $\nu$ ).

Las pruebas de  $t$  son útiles para establecer la probabilidad que una muestra dada sea miembro de una población de características específicas, o también para probar la equivalencia de dos muestras:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s_e} \qquad t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s\sqrt{1/n}} \qquad (19)$$

donde

$\bar{X}$  = promedio de la muestra

$\mu_0$  = promedio hipotético de la población

$n$  = número de observaciones

$s$  = desviación estándar de las observaciones

$s_e$  = error estándar del promedio

En términos estadísticos formales, se está probando la hipótesis

$$H_0 : \mu_1 \leq \mu_0$$

contra la hipótesis alternativa

$$H_1 : \mu_1 > \mu_0$$

La primera hipótesis afirma que el promedio de la población del cual se tomó la muestra es igual o menor que el promedio de la muestra. La hipótesis alternativa afirma que el promedio poblacional es más grande que la media de la muestra.

### 1.7.5 La Prueba F

Las pruebas para determinar la igualdad de varianzas se basan en una distribución de probabilidades llamada *distribución F*. Esta es la distribución teórica de valores que podría esperarse del muestreo al azar de una población normal, y

podría calcularse, para todos los posibles pares de varianzas de muestras, las relaciones

$$F = \frac{s^2_1}{s^2_2} \quad (20)$$

donde  $s^2_1$  es la varianza mas grande y  $s^2_2$  es la mas pequeña, y se puede probar la hipótesis

$H_0 : \sigma^2_1 = \sigma^2_2$  esta hipótesis nula dice que las poblaciones de donde provienen las dos muestras tienen varianzas iguales

contra la hipótesis alternativa

$H_0 : \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$  que dice que ellas no lo son

La distribución  $F$  depende de dos valores de  $v$ , cada uno asociado a una varianza en la relación. De nuevo, la distribución no puede ser negativa, y si el muestreo es muy grande,  $F$  estará muy cercano a 1.0.

Se puede hipotetizar que dos muestras son sacadas de poblaciones que tienen la misma varianza. Después de calcular  $F$  es posible determinar por casualidad la probabilidad de encontrar que las muestras vienen de la misma población normal. Si no es posible obtener tal relación, se evalúa esto como un indicativo de que las muestras vienen de diferentes poblaciones con diferentes varianzas.

### 1.7.6 Análisis de Varianza

Cuando se tiene para más de dos grupos de observaciones algo diferentes y se quiere averiguar si una característica específica es la misma en cada grupo, se

considera que este es un problema de la rama de la estadística llamada *análisis de varianza*.

En general las técnicas en este campo separan la varianza total en varios componentes o fuentes. Las pruebas de igualdad operan simultáneamente teniendo en consideración tanto las diferencias en promedios como las diferencias en varianzas.

Si la variación dentro de las repeticiones de una sola muestra es grande comparada con las diferencias entre muestras, las diferencias serán difíciles de detectar.

Sin embargo, la variación dentro de las repeticiones de una sola muestra puede aumentar por diferentes causas: variabilidad intrínseca de cada muestra; la forma como las muestras son tomadas; época del muestreo, y otras influencias sutiles. Todas estas fuentes de variación se combinan para producir lo que se conoce con el nombre de *error experimental*.

Para evitar la posibilidad de introducir un error sistemático en el análisis estadístico, las repeticiones deben ser tomadas al azar. Esto se conoce con el nombre de *aleatorizar las observaciones*. Así, las diferentes fuentes de error son mezcladas, o *confundidas* en lugar de estar concentradas en unas pocas.

Determinar la equivalencia de por ejemplo 5 muestras, puede hacerse por una técnica llamada *análisis de varianza de una vía* para probar la hipótesis de que un número de poblaciones, representadas por muestras, son idénticas . Las hipótesis son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$H_1$ : al menos un promedio es diferente

Ciertas asunciones son necesarias para hacer la prueba y entonces escoger entre las dos hipótesis: a) cada grupo de repeticiones representan muestras al azar de diferentes poblaciones, b) cada población de donde se sacan las muestras está normalmente distribuida, y c) cada población tiene la misma varianza.

En este tipo de análisis, llamado en forma abreviada ANDEVA, la varianza total de los datos se descompone en dos partes: varianza entre los grupos de repeticiones y varianza entre las muestras.

Tabla 2 Tabla de ANDEVA de una vía

Fuentes de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Prueba F
Entre Muestras	$SS_A$	$m - 1$	$CM_A$	$CM_A/CM_W$
Entre repeticiones	$SS_W$	$N - m$	$CM_W$	
Variación Total	$SS_T$	$N - 1$		

de donde

$$SS_T = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij}\right)^2}{N}$$

$$SS_A = \sum_{j=1}^m \left[ \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_{ij}\right)^2}{n} \right] - \frac{\left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij}\right)^2}{N}$$

$$SS_W = SS_T - SS_A$$

$$\text{Varianza Total} = \frac{SS_T}{N - 1}$$

$$\text{Entre Varianzas} = MS_A = \frac{SS_A}{m-1}$$

$$\text{Dentro de Varianzas} = MS_W = \frac{SS_W}{N-m}$$

$$F = \frac{MS_A}{MS_W}$$

Esta F calculada debe ser mayor que la F sacada de las tablas F para que se acepte como válida la hipótesis nula.

## 2. METODOLOGÍA

Para comprobar la importancia de la cobertura vegetal en la producción de un MDE en el sector norte de la cuenca Cabuyal, se ideó una metodología apoyada en tres programas de computador para Sistemas de Información Geográfica SIG:

El primer programa de SIG fue el DPW Helava versión 3.2, de la compañía GDESystems, que es un software de fotogrametría digital avanzado que nos permite generar MDE automáticamente y editarlo mediante una técnica combinada de fotointerpretación y algoritmos, lo cual lo hace único en su género. El segundo programa fue ArcView versión 3.2 última versión de la compañía ESRI, conocido por su versatilidad de herramientas nuevas via internet; con el que se hizo el análisis espacial de las diferentes coberturas y de ahí se creó y extrajo la base de datos para el análisis estadístico. El tercero fue el software ERDAS IMAGINE versión 8.4, con el que se interpretó la imagen de satélite SPOT XS de la zona de estudio (figura 6), para hacer una clasificación por uso de tierra, con una resolución de 20 metros.

Los datos que produjeron estos SIG fueron analizados en un paquete estadístico de la compañía StatSoft, Statistica, versión 5.0. Así mismo, se usó un sistema de posicionamiento global GPS, WILD GPS 200, que es el último modelo de la compañía Leica, este se usó en la georeferenciación del mosaico de fotografías aéreas y de la imagen de satélite SPOT.

La zona de estudio comprende la zona Norte de la subcuenca del río Cabuyal, ubicada en el Nor-Oriente del Departamento del Cauca, en Colombia, esta entre las coordenadas geográficas  $-76^{\circ} 36'34''$  y  $-76^{\circ} 31'12''$  de Longitud Oeste y entre

2°47'06" y 2°52'43" de Latitud Norte. Comprende un área de 10524.2 hectáreas, con una elevación mínima de 1143 m.s.n.m y máxima de 1728 m.s.n.m (promedio de 1435.5 m.s.n.m).



**Figura 16 Localización de la zona de estudio**

Modelo de Elevación Digital, generado con fotografías aéreas para la zona Norte de la sub-cuenca del Río Cabuyal y su área de influencia, en el Departamento del Cauca, Colombia.

Todos los pasos de la metodología empleada, se resumen en el siguiente diagrama de flujo (Figura 17):

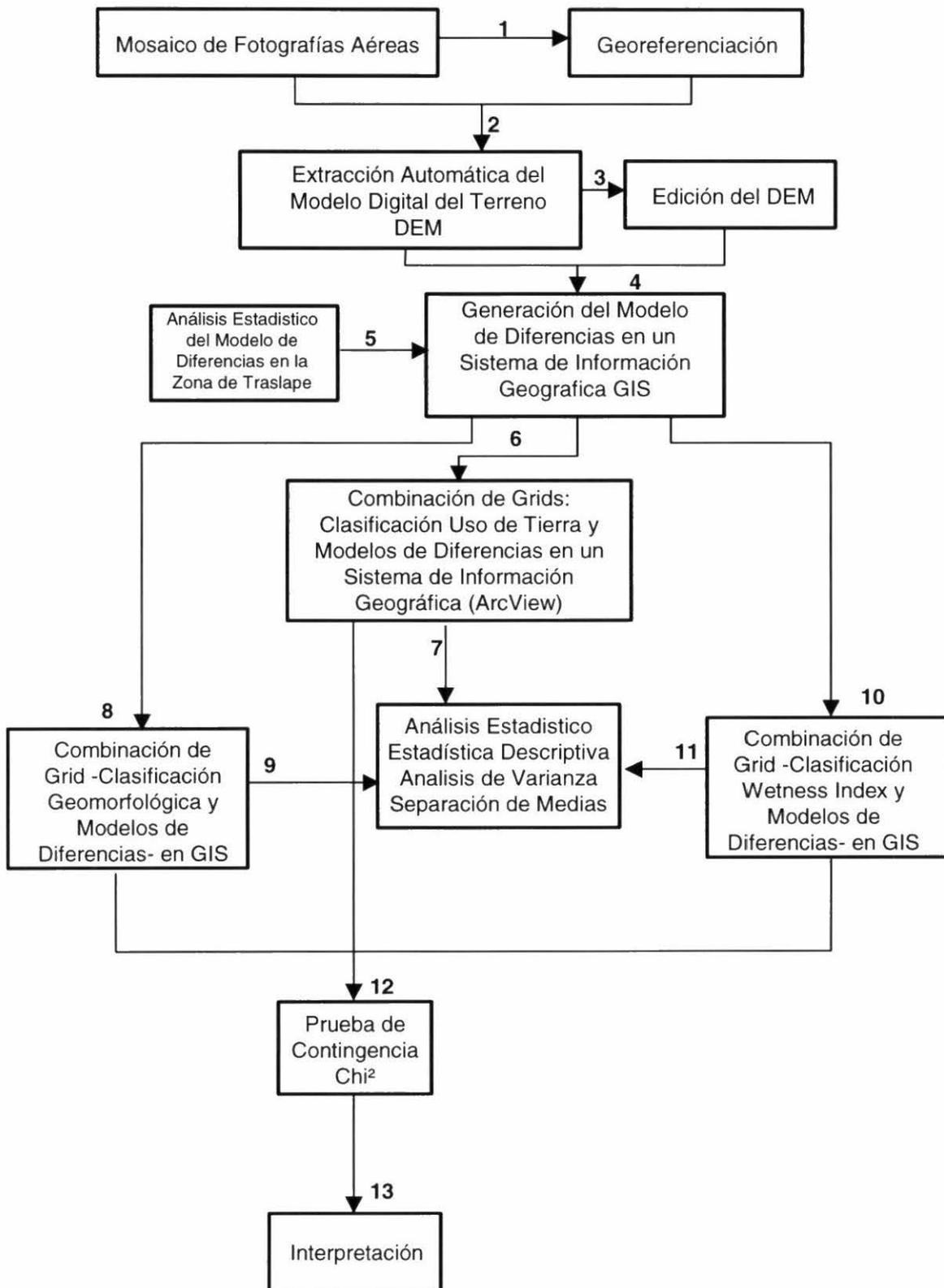


Figura 17 Diagrama de Flujo de la metodología utilizada

**Fase 1:** Captura de datos para la generación del Modelo Digital de Elevación. Utilizando ocho fotografías aéreas en dos fajas de cuatro cada una a escala

1: 34200 que cubre el área de estudio, al Norte de la Sub-Cuenca Río Cabuyal, se arma el mosaico, entre las coordenadas:

Superior izquierda X: 1051530 Y: 811230

Inferior izquierda X: 1051530 Y: 798130

Superior derecha X: 1062900 Y: 811230

Inferior derecha X: 1062900 Y: 798130

Este mosaico es importado digitalmente (figura 18), escaneándose las fotografías con una resolución de 12,5  $\mu\text{m}$  (micrones), garantizando su calidad radiométrica y al mismo tiempo mantener la geometría. Este sistema de escaneo convierte la información de la fotografía blanco y negro a un raster digitalizador de datos de imágenes en Helava.

Los puntos de control del terreno entran al sistema, como objetos identificados en la imagen, con una localización precisa (latitud/longitud/elevación). Los puntos se localizaron en la zona de traslape en dos o más imágenes, después de esto el mosaico queda georeferenciado.

Para la triangulación se tomaron 6 puntos de fotocontrol de la zona en las áreas de traslape de las fotografías, con un equipo geodésico de doble frecuencia GPS, con precisión al mm.

**Fase 2:** Extracción automática del modelo digital del terreno con el software Helava.

Importado el mosaico y georeferenciado se procede a la extracción automática del MDE por medio del módulo de Helava ATE (Automatic Terrain Extraction). Este MDE es generado automáticamente con curvas de nivel cada cinco (5) metros de distancia. A partir de las curvas se genera también un mapa raster con celdas de 10 metros de resolución y luego es almacenado en el sistema, siendo este el mapa original (sin editar) al que se le sometera a correcciones para generar un nuevo mapa raster (editado). Esta edición se hace por medio de un módulo de

edición, donde el operador puede perfeccionar el mapa que genero el software automáticamente.

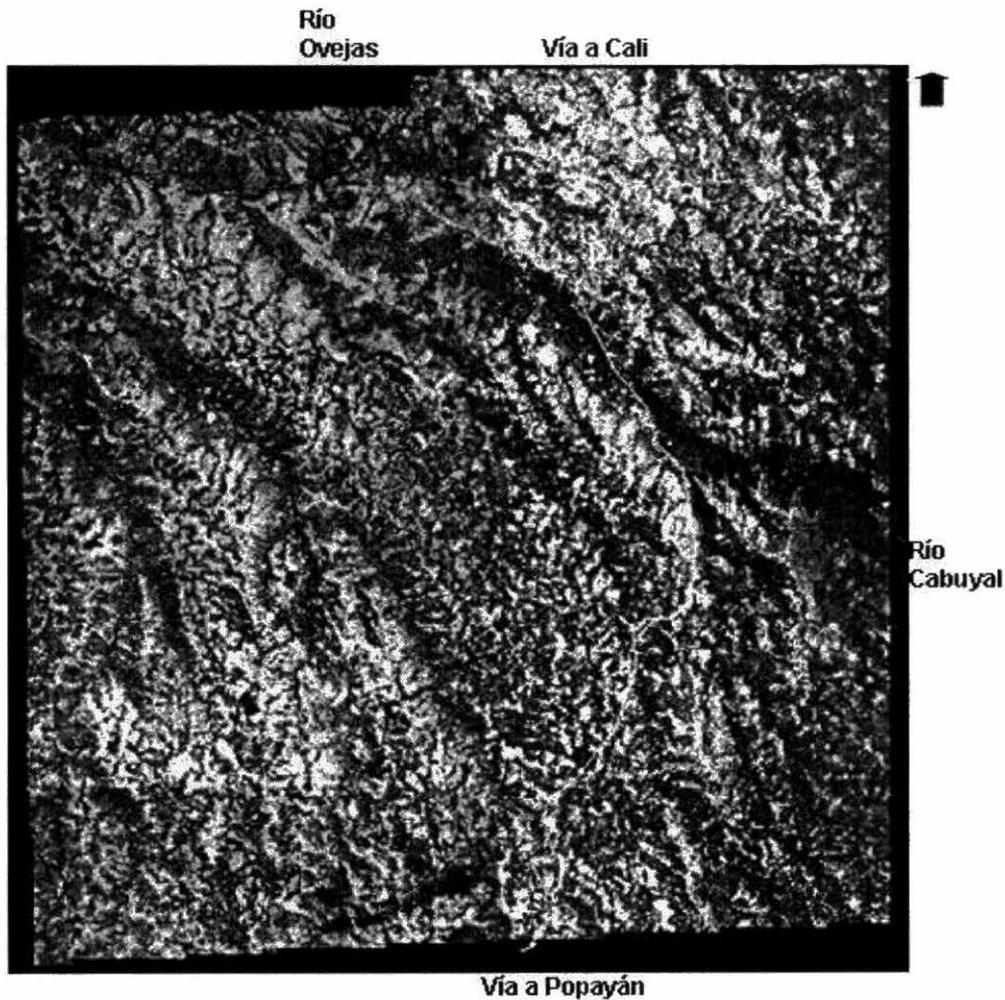


Figura 18 Mosaico de ocho fotografías aéreas a escala 1: 34200  
Al Norte de la Sub-Cuenca del Río Cabuyal

### Fase 3: Edición del Modelo Digital del Terreno MDE

La calidad del MDE se chequea por medio del módulo de edición del software Helava. Esta edición es interactiva, esto quiere decir que se pueden unir en la pantalla los rasgos geomorfológicos (mosaico de fotografías) y las curvas de nivel que el software genere. Este método requiere que el usuario especifique una estrategia para generar la correlación de imagen que más se adapte a cada tipo de terreno (plano, pendiente, escarpado). El algoritmo tiene un gran número de parámetros y una combinación dada de estos parámetros se llama estrategia

seleccionando los parámetros del archivo estrategia se puede llegar a mejorar la calidad del MDE. Una estrategia por lo general no ajusta completamente en un modelo, de modo que éste tiene que subdividirse en subáreas que tengan características semejantes (Bacher,1999).

Con esta herramienta se puede detectar y corregir algunas áreas donde el algoritmo no pudo generar bien los datos de elevación por insuficiente resolución, ya que la extracción automática (o el algoritmo) no distingue entre construcciones y bosques, así el MDE se establece sobre los techos de las edificaciones y las copas de los árboles; en esta situación se toman las áreas donde el MDE no fue bien generado y se procede a mejorarlo, que en este caso sería bajar la cota a ras de piso.

Ya corregido el MDE generado se crea otro mapa raster. De esta manera quedan dos mapas raster o modelos digitales, un modelo en bruto producido por el algoritmo Helava en primera estancia, llamado modelo sin editar y un segundo modelo perfeccionamiento del anterior llamado modelo editado.

**Fase 4:** Exportación de los modelos a un Sistema de Información Geográfica y operación entre ellos para la elaboración de un modelo de diferencias.

Terminado el proceso de edición y creados los modelos, tanto el modelo no editado generado automáticamente por el método de sombreado automático de relieve, como el modelo editado que es un perfeccionamiento del anterior con una edición interactiva, se exportan a un Sistema de Información Geográfica GIS estándar. El ArcView es un sistema de información geográfica que permite hacer operaciones entre modelos, en este caso se importaron los dos modelos de Helava (sin editar y editado) y se hizo una diferencia entre ellos. Este software se prefiere por ser uno de los más actualizados del mercado de SIG, además por su disponibilidad en donde se realizó la investigación.

Para conocer o determinar la precisión del MDE se procedió con la herramienta de análisis (Map Calculation), se tomó el modelo sin editar y se le restó el modelo editado, generando un nuevo modelo, el de diferencias. Este modelo dio tres tipos

de resultados; diferencias negativas, sin diferencias o nula (cero), y diferencia positivas.

Se tomó este modelo de diferencias y a partir de él se generaron otros dos modelos, el modelo de diferencias positivas y el modelo de diferencias negativas.

A los modelos sin editar, editado y de diferencias (negativas y positivas) se les hizo estadística descriptiva, para conocer sus medidas de tendencia central y de dispersión.

A la comparación de modelos (sin editar y editados) se le hizo también un análisis de correlación para observar o analizar la similitud entre ellos.

#### **Fase 5:** Influencia zona de traslape

Con el fin de conocer la influencia de las zonas de traslape en la edición del MDE se escogieron dos filas de puntos (aproximadamente 20 pares), dos en la zona de traslape y una libre de traslape, a estas zonas se les extrae los datos de diferencias tanto positivas como negativas, pero estas diferencias se trabajan en forma absoluta, y con los estos datos se practico una prueba F a cada par de filas a nivel del 1%.

#### **Fase 6-7:** Diferencias y Uso de tierra.

Simultáneamente al proceso anterior, por medio de una imagen de satélite SPOT SX de la zona (figura 6), se clasificó el uso de la tierra en cinco clases utilizando el software ERDAS: Pastos, cultivos, bosques, rastrojo, suelo desnudo (figura 27). La imagen de satélite generó un modelo raster con 20 metros de resolución, y por medio de una herramienta Arcview (resampling) se crea un nuevo modelo con una resolución de 10 metros, y así poder trabajarlos con los otros modelos.

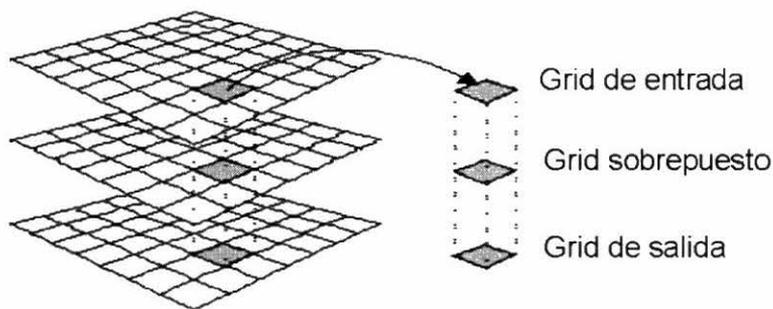
Se quiso trabajar con los modelos y toda la imagen para ver la influencia del uso, geomorfología y el "Wetness Index", pero esto no fue posible porque el gran volumen de datos generado fue imposible de procesar con la capacidad de un Pentium III. Por eso hubo necesidad de seleccionar, en la imagen de satélite ya

clasificada, cuatro áreas de trabajo de 200\*200 píxeles. Se buscó que quedaran ubicadas en paisajes bien contrastantes y representativos.

A cada una de estas áreas se le hizo un análisis visual y de estadística descriptiva del modelo de diferencias y de cada modelo individual.

De la clasificación de uso de tierra se combinó cada clase en términos absolutos con el modelo de diferencias para establecer en cual había más error.

El proceso de combinación de datos raster en ArcView se hace mediante las extensiones del software Transform Grid (Combine...) o Grid Edits (Combine Grids) (Figura 19). Esta operación une celdas de un tema de entrada con otro tema que sobrepone a él para producir un nuevo tema de salida que contiene todos los atributos y extensiones de ambos temas.



**Figura 19** Esquema de combinación de grid en un sistema de Información Geográfica.

Para hacer la estadística de los modelos combinados se extrajo la base de datos de cada modelo con la extensión Grid Analyst (Convert Grid theme to XYZ Text file) de ArcView para procesarlos estadísticamente. Esta estadística consistió de un análisis de varianza (ANDEVA), separación de medias por Duncan y estadística descriptiva.

**Fase 8-9:** Combinación y análisis estadístico de los grid; Diferencias y clasificación geomorfológica.

Con el fin de estudiar la influencia de la geomorfología sobre las diferencias de elevación entre los dos modelos se corrió sobre el MDE editado el programa para computador TCI (Terrain Caraterisation Index) y se estableció un modelo geomorfológico digital con 6 clases de paisaje: “channel”, “toeslope”, “footslope”, “backslope”, “shoulder”, “interfluve”, con el siguiente posible significado en español: Drenaje, Valle de inundación, coluvios, laderas, cimas convexas, interfluvios.

Este software todavía esta en periodo de prueba, fue ideado en la universidad de Bonn, y con el los autores han intentado con éxito hallar el patrón de distribución de los suelos de un área. Estas unidades de paisaje se han dejado en ingles ya que el software se encuentra en período de prueba y no se pretende comercializar.

Este algoritmo genera celdas de 10 metros de resolución. De este nuevo modelo se extrajeron las cuatro áreas de muestreo y de cada una se combinó las respectivas unidades geomorfológicas con el modelo de diferencias absolutas para extraer de allí la base de datos que se analizará estadísticamente. El proceso para acceder a la base de datos requiere multiplicar por un grid los datos combinados utilizando la extensión análisis (Map Calculator).

El análisis estadístico tuvo en cuenta análisis de varianza, separación de medias por Duncan y estadística descriptiva.

**Fase 10-11:** Combinación y análisis estadístico de los modelos; Diferencias y “Wetness Index”.

Se genera un modelo de “Wetness Index” que es un índice de mojado quasi dinámico para caracterizar la distribución espacial de zonas con superficies saturadas y contenido de agua del suelo que pueden tener gran influencia en la generación del MDE (Barling et al. 1993).

Este algoritmo genero un modelo de 10 metros de resolución con 22 clasificaciones de “Wetness Index” de las cuales se hizo una reclasificación y se toman solamente cinco rangos para mejor manejo, con la extensión Análisis (Reclassify...).

De este modelo se extrajeron las cuatro áreas de muestreo y a cada una se le hizo la separación de los cinco rangos para luego combinarlos con el modelo de diferencias absolutas y se hizo una extracción de datos para luego analizarlos estadísticamente y ver la influencia de cada rango en el modelo de diferencias. Se le hace entonces estadística descriptiva, con medidas de tendencia central al igual que un análisis de varianza entre áreas y para las cuatro áreas de muestreo con sus respectivos rangos. También se le hizo a estas combinaciones una prueba de contingencia ( $\chi^2$ ) para ver la relación de “Wetness Index” con el modelo de diferencias.

**Fase 12:** Se quiso ver el grado de relación que había entre los modelos de uso, geomorfología y “Wetness Index” y diferencias absolutas mediante pruebas de contingencia ( $\chi^2$ ) al 1% de significancia. Para llegar al análisis estadístico se siguieron los mismos pasos utilizados en el análisis de la geomorfología y uso.

**Fase 13:** Interpretación.

Por último, se hizo la interpretación del impacto que generó cada cobertura o grado de relación de una cobertura frente a la otra. Interpretando los parámetros estadísticos, con la comparación cualitativa de los dos modelos (reconocimiento e interpretación visual) y cuantitativa (estadística de la diferencias de elevación entre los dos modelos e interacción de estas diferencias con el uso de la tierra y las geoformas).

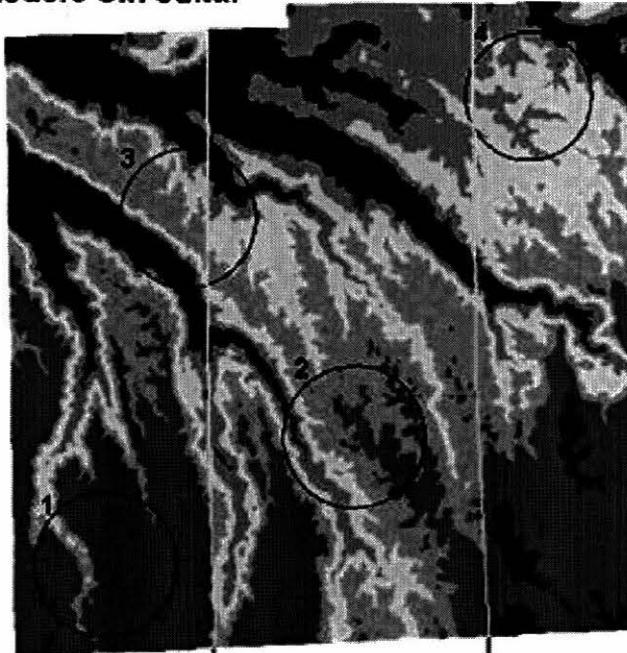
### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 COMPARACIÓN DE MODELOS SIN EDITAR Y EDITADO**

En la comparación global de los Modelos de Elevación Digital, producidos por el software Helava con base en fotografías aéreas son imágenes raster. Esta imagen raster (Figura 20), produce una primera aproximación al modelo de áreas homogéneas en elevación sobre el nivel del mar y se denomina modelo sin editar. Las diferencias de colores representan el relieve de la zona por medio de rangos en las alturas (Figura 20). Las cotas más altas están representadas por los rojos más fuertes que denotan las cimas de las planicies rodeados por valles incisados; el rosado y el azul claro representan las alturas de las laderas de estos valles y los azules oscuros corresponden a las cotas más bajas del fondo de los valles; estos últimos tienen una distribución tal que evidencia que el drenaje externo corre de Sur-Este a Nor-Oeste.

Las mayores alturas se encuentran ubicadas al Sur-Este del modelo donde está el pieMDEonte de la Cordillera Central, bajando hacia el Nor-Oeste donde encontramos ubicado el valle de Río Cauca. Formando a su paso planicies delimitadas por valles que incisan en el material parental. Tanto en el modelo sin editar como en el modelo editado presentan esta misma configuración.

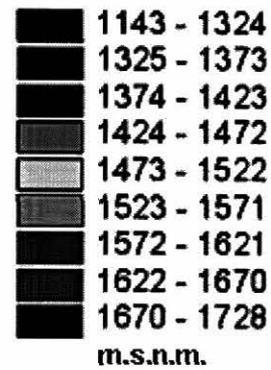
### Modelo Sin editar



Modelo sin editar producido por el DPW Helava surge de la correlación de imágenes que es el algoritmo que utiliza el software para definir pixeles iguales en diferente fotografías.

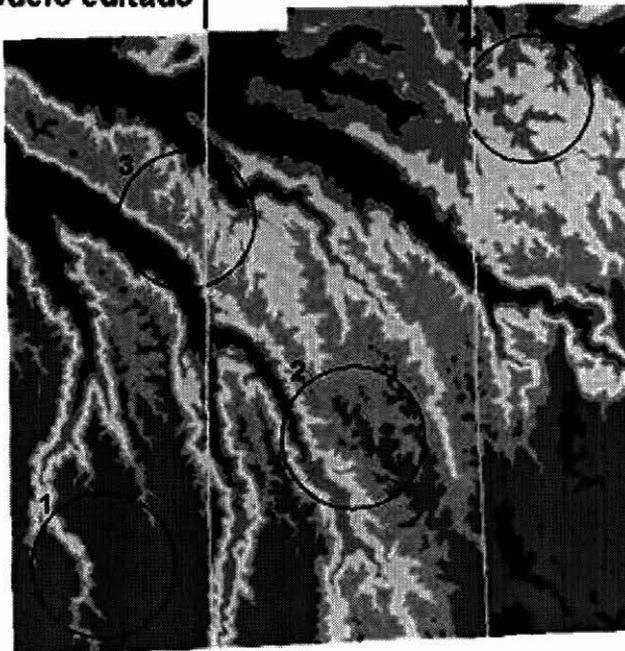


#### Elevaciones



Escala 1: 1250000

### Modelo editado



Modelo editado aumenta la precisión de la medida del relieve, implementando filtros a fin de corregir árboles y casas que deterioran la superficie efectiva del terreno.

Figura 20 Modelos sin editar y editado con una resolución de píxel de 10 metros, producido por el software Helava®.

El modelo editado es un perfeccionamiento del anterior donde se hace más claro el sistema de drenaje (Figura 20). Para comparar y resaltar las diferencias se seleccionaron con círculos cuatro zonas en los dos modelos.

Las zonas altas, de rojo intenso, se replegaron hacia el sur por un avance de las moderadamente altas, de rojo, hacia el Norte de las primeras (círculo 1 figura 20).

Algo parecido ocurre con las cotas en rosado que aumentan su área por sustitución del área de las de rojo en la zona Centro Sur (círculos 2, figura 20).

Hacia la zona central de la imagen (círculos 3, figura 20) se nota el avance del rango de cotas azul claro sobre el rosado, ampliándose así la transición hacia el fondo de los valles incisados.

Hacia el norte de la imagen (círculos 4, Figura 20) disminuye el área con predominio del rango lila claro y es favorecido con esto el aumento del área con cotas de rango azul oscuro y en algunos sectores el azul claro.

En la estadística descriptiva el valor promedio y la desviación estándar del modelo editado fueron, como se esperaba, muy similares al mapa sin editar, aunque en el primero, el valor mínimo fue más bajo y el valor máximo fue más alto (Tabla 3).

La matriz de correlación, para la comparación de los dos modelos, muestra un coeficiente positivo (0.99) lo que significa que existe una relación directa perfecta entre los dos modelos.

El análisis los histogramas de frecuencia de los dos modelos (Figura 21 a y b), revela un predominio del rango de alturas cercanas a 1550 metros, que corresponden a la diferencia de altura en las planicies de tonalidad rosada tanto en los modelos (Figura 20) como en los histogramas (Figura 21) y una escasa presencia de los rangos de los extremos.

**Tabla 3** Estadística descriptiva del análisis de los modelos sin editar y editados.

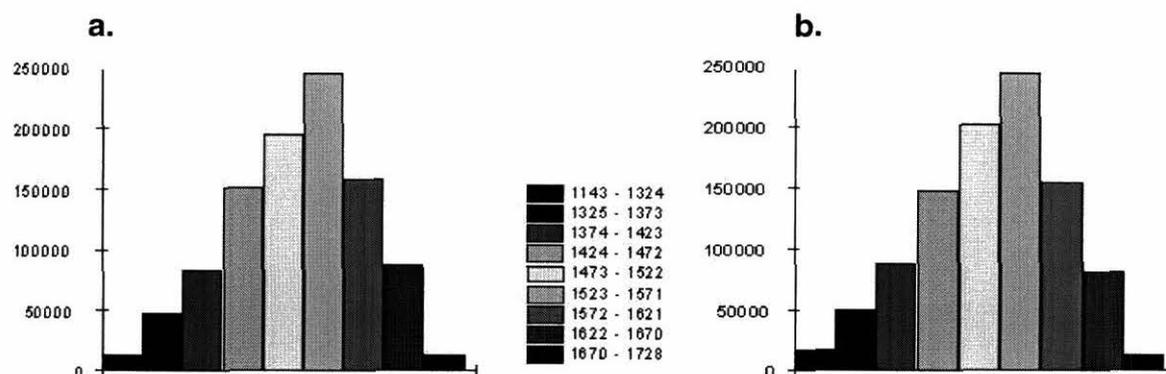
Cada modelo Tiene 1042 filas y 1010 columnas.

Modelo	N <sup>1</sup>	Promedio	DE <sup>2</sup>	Mínimo	Máximo	Rango
Sin editar	997055	1515.64	83	1275	1720	445
Editado	997055	1512.81	84	1143	1728	585
Diferencias	997055	2.82	8	-105	359	464
Negativas	194249	-4.86	7	-105	-1	104
Positivas	802806	4.68	7	0	359	359

<sup>1</sup> N: Número de Pixeles

<sup>2</sup> DE: Desviación Estándar

Aunque pequeñas las diferencias, se destacó en el modelo editado la disminución de la frecuencia de aparición de las cotas más altas a costa del aumento de la frecuencia de aparición de las cotas pequeñas y medianas (Figura 21).



**Figura 21** Histogramas de los modelos sin editar (a) y editado (b).

Cada barra de los histogramas muestra los rangos de las alturas que predominan en los modelos. Las tonalidades azules están marcando las diferencias de altura en los canales y valles, mientras que las tonalidades rojas muestran las diferencias de altura de los interfluvios y laderas.

La frecuencia de alturas (Figura 21a) muestra una distribución muy cercana a la normal, en la cual el promedio es un buen parámetro estimativo de la tendencia central y el coeficiente de variación (desviación estándar/ promedio) es relativamente pequeño, lo cual da confiabilidad (tabla 3). Esto mismo se puede decir para el modelo editado.

Como la edición provocó una disminución uniforme de todos los rangos de cotas, se hallaron promedios muy semejantes en los dos modelos, esto lo comprobó parcialmente la similitud de las desviaciones estándar.

Con las cotas mínimas sucedió lo mismo, disminuyeron al editar el modelo. Obviamente, esto repercute en el rango que tiende a aumentar en este último.

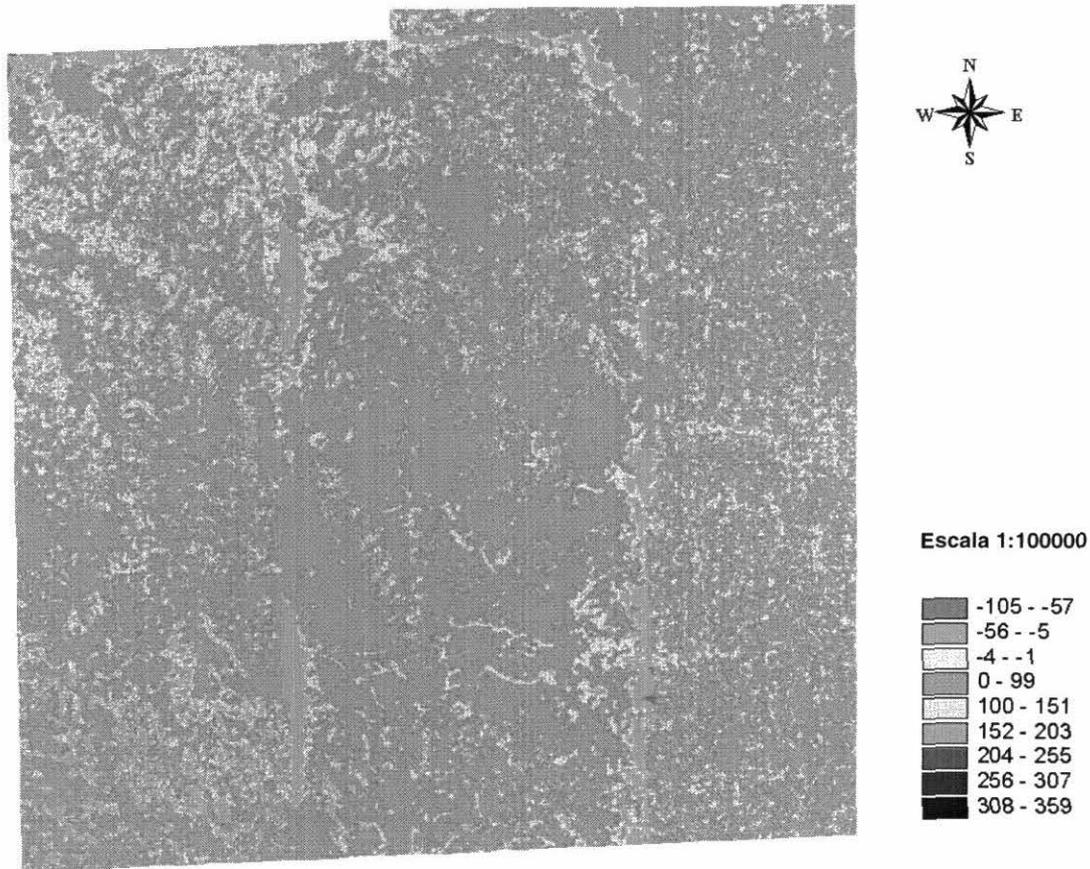
En cuanto a las diferencias de altura (Tabla 3), las positivas son numerosas y cubren un mayor número de celdas; sin embargo, la controversia surge con la aparición de diferencias negativas, que aunque pocas no se esperan ya que supuestamente al editar se baja la cota cuando se suprime el efecto de las coberturas vegetales. Enseguida se describe más detalladamente este aspecto.

### **Modelo de diferencias entre el modelo sin editar y el modelo editado**

Siendo el objetivo central de este trabajo observar los cambios que produce la edición del modelo, por el impacto de la vegetación, se creyó adecuado conocer la diferencia matemática entre la base de datos sin editar y la base de datos editada; así surgió el mapa de diferencias. Estas diferencias son tanto negativas como positivas. Como la edición busca reubicar las cotas del terreno que por ejemplo pasaron a ras de la copa de los árboles, no fue raro encontrar que hubo gran predominio de diferencias positivas: cota sin editar mayor que cota editada (Figura 22).

Del modelo general de diferencias, se separan las negativas de las positivas con el fin de ver la tendencia de cada una de ellas; fue así como al describir los modelos de diferencias negativas se observó (Figura 23) que en las zonas de traslape en las fotografías aéreas al momento de armarse el mosaico, se dieron las mayores concentraciones de diferencias negativas de alto rango y estas áreas se ven fácilmente debido a su linealidad tanto de Norte a Sur como Este a Oeste.

En algunos valles incisados con laderas muy pronunciadas se nota que también aumentaron las diferencias negativas, sin embargo, existe una tendencia a concentrarse en los bordes de la imagen, mientras que en los valles incisados del centro de la imagen estas diferencias no son tan marcadas.



**Figura 22** Modelo de diferencias entre los modelos sin editar y editado.

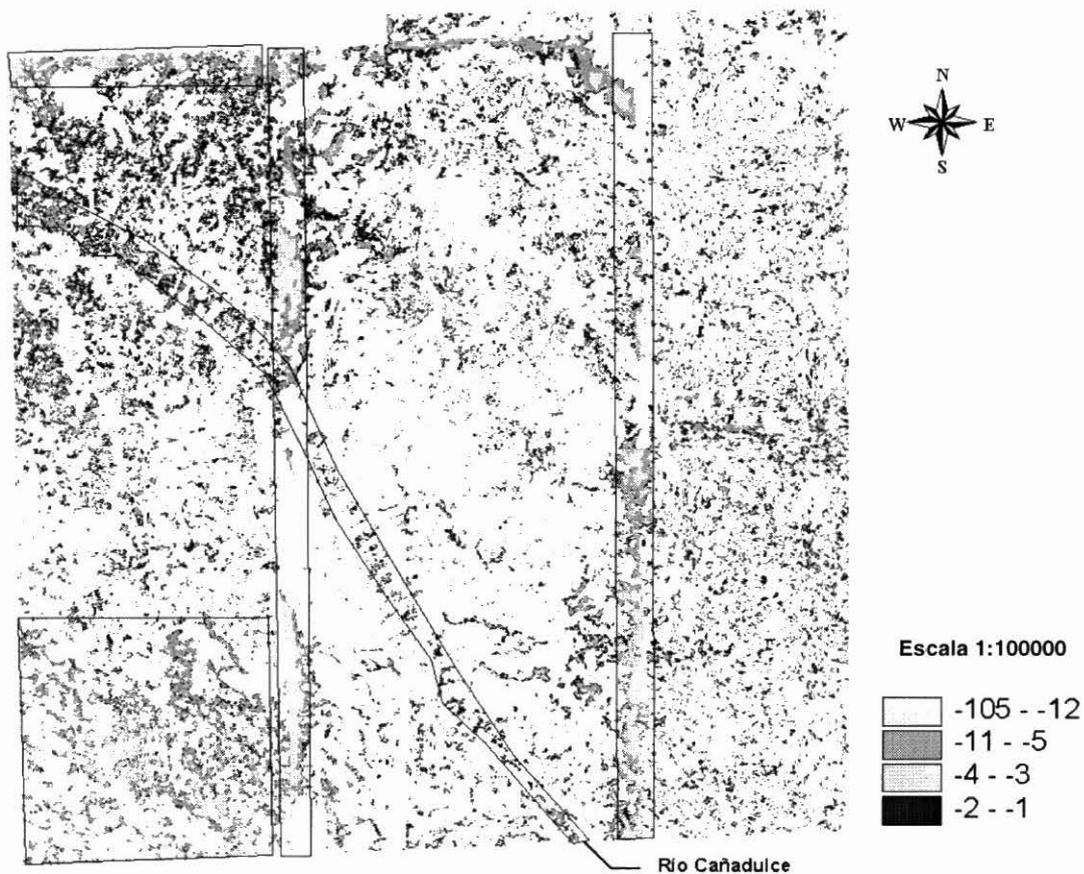
El resultado de restar el modelo sin editar producido por el software Helava® y el modelo editado nos produce este modelo de diferencias. Las tonalidades amarillas muestran las diferencias negativas.

La distribución del resto de diferencias negativas (las de menor rango) fue en general muy irregular y con tendencia al azar.

En la figura 23 se muestra las diferencias negativas en donde las de color amarillo corresponden al 10% de las diferencias negativas más altas que se encontraron en el modelo.

En los histogramas de las diferencias se puede observar que las predominantes entre las negativas son las más bajas, que pertenecen al color rojo, (Figura 24a), verde (Figura 24b).

La distribución de frecuencias no es normal, por esta razón la desviación estándar supera 1.5 veces al promedio (Tabla 3).



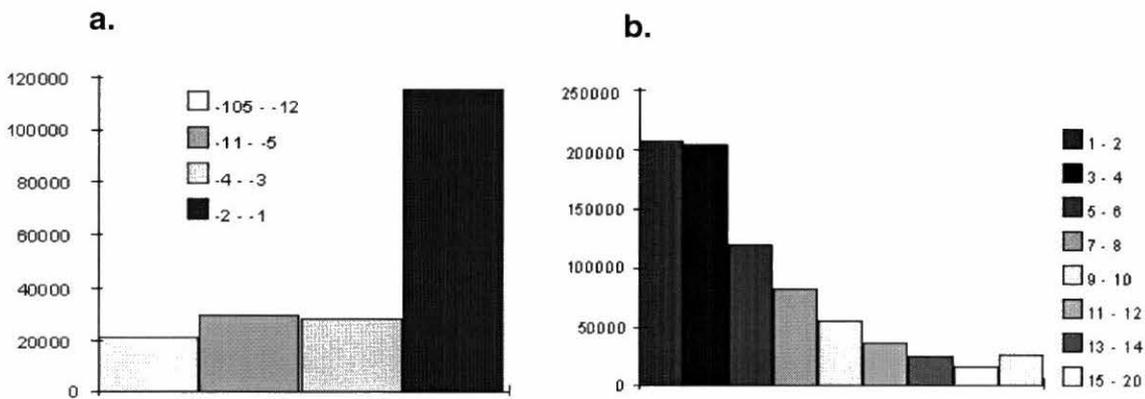
**Figura 23** Modelo de diferencias negativas entre los modelos Sin editar vs. Editado.

Del modelo general de diferencias, se separaron únicamente las negativas para poder investigar el patrón que tiende a seguir. Se observa en las zonas delimitadas rectangulares que tienen un comportamiento lineal que obedece a las zonas de traslape de las fajas de fotografías, concentrándose allí las diferencias negativas de más alto rango.

Hay también una concentración en los valles, el más marcado es el curso del Río Cañadulce que atraviesa el modelo desde N-W a S-E, al igual que la zona en la parte izquierda abajo, que es una concentración pequeña de valles, esta parte del modelo corresponde a una de las zonas más altas en el modelo.

En estos histogramas se puede verificar también el gran predominio de diferencias positivas destacándose los rangos más bajos.

Predominó con gran ventaja las diferencia positiva de más bajo rango; el siguiente rango disminuyó en un 30%, y la tendencia fue a bajar entre más altos fueron los rangos (Figura 24b).



**Figura 24 Histograma del modelo de diferencias: Negativas (a) y positivas (b).**

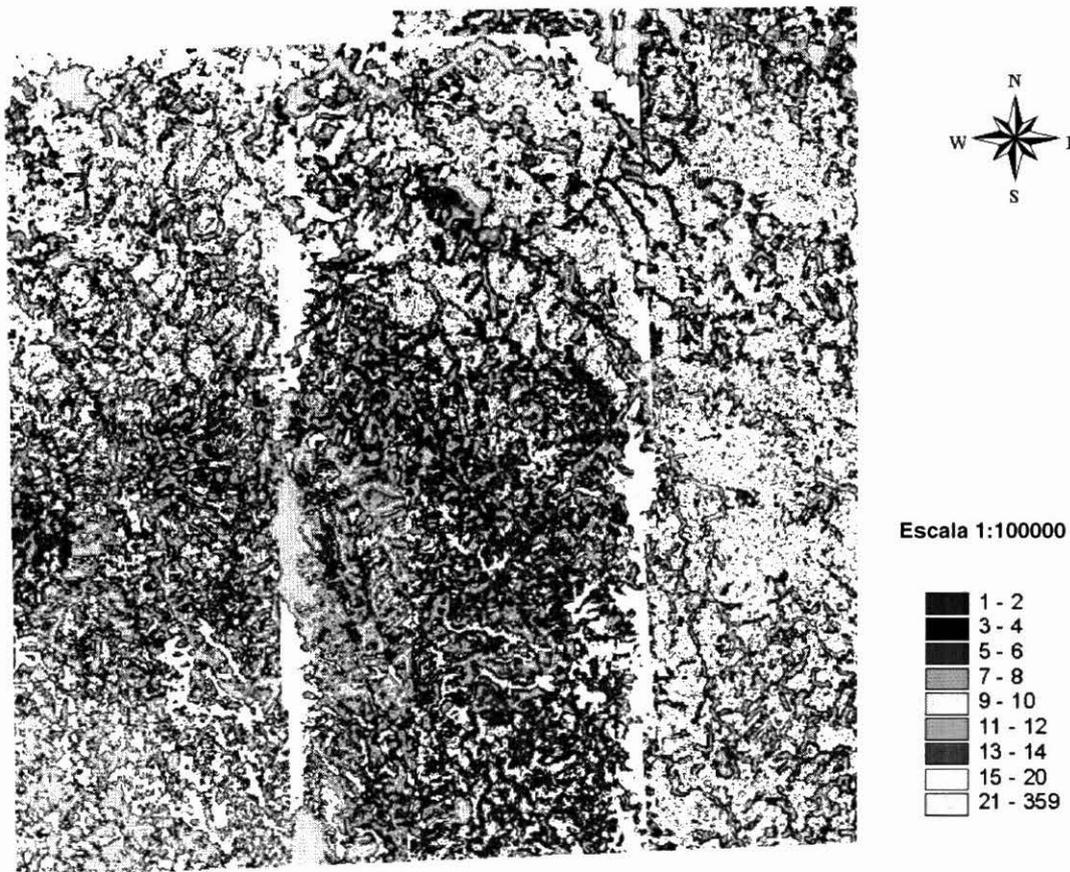
Las barras de los histogramas muestran que los rangos de las diferencias tanto negativas como positivas predominan lo más bajos. Los valores de estos rangos se muestran en metros en la barra de colores.

En el modelo de diferencias positivas se aprecia (Figura 25) que el rango más bajo se encontró en un 80% del área del modelo; estos rangos están entre uno y dos metros de diferencia de altura y están distribuidos por todo el modelo. Los rangos entre tres y diez metros de altura se encuentran concentrados en el centro y en la parte izquierda abajo del modelo mientras que los rangos más altos se distribuyeron exactamente en las zonas donde predominaron las diferencias negativas.

El 10% de los rangos más altos aparecen de color amarillo en el modelo de diferencias positivas (Figura 25).

Cabe recordar que las diferencias de cota más altas en valor absoluto se distribuyen o aparece en las zonas de traslape o en las de más desplazamiento del relieve por los bordes del mosaico.

Hubo una distribución homogénea altamente concentrada y dominante de las diferencias positivas de bajo rango, sin seguir ningún patrón estructural. Pero se observa que en la parte alta y derecha de la imagen la edición tuvo menos problemas ya que hubo menos concentración de diferencias positivas.



**Figura 25** Modelo de diferencias positivas entre los modelos sin editar y editado.

Del modelo general de diferencias se extraen las diferencias positivas para poder investigar que patrón tiende a seguir. Se observa que hay una distribución homogénea altamente concentrada, sin seguir ningún patrón estructural. Las diferencias positivas más altas denotadas de color amarillo que corresponden al 10%, se observa en las zonas de traslape y en los borde del mosaico.

## **Análisis estadístico de puntos tomados en la zonas de traslape para el modelo de diferencias**

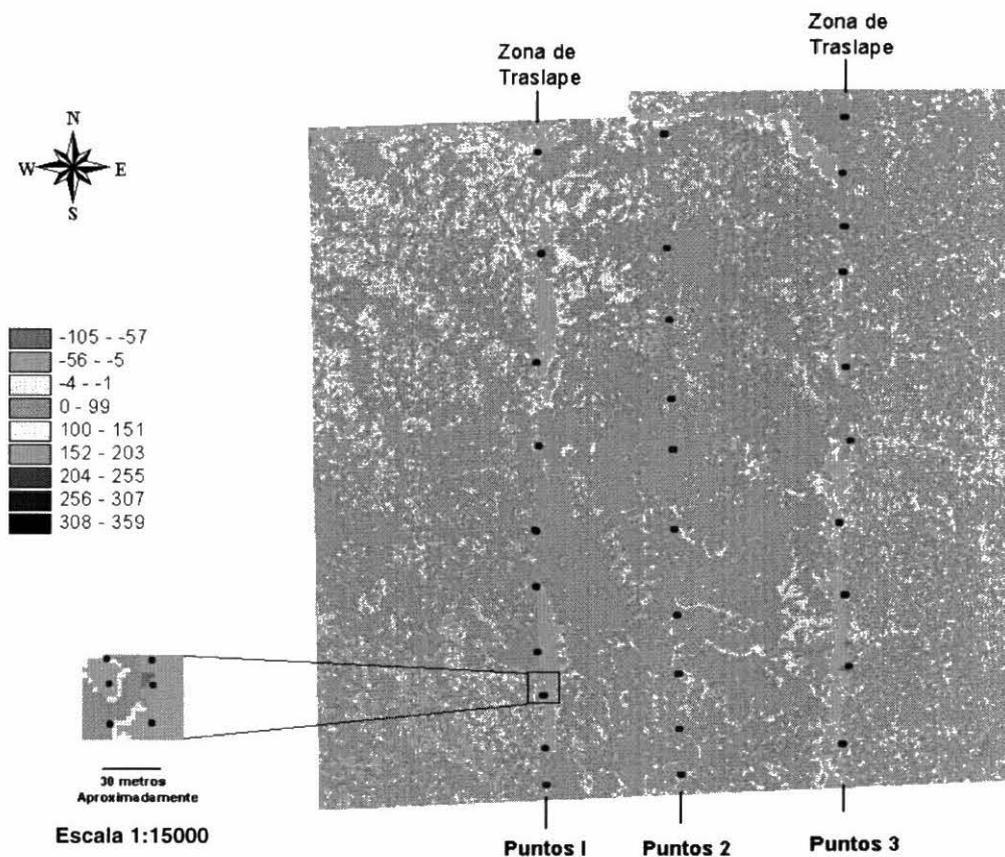
Para poder ver claramente la influencia de las zonas de traslape se hicieron tres transeptos, cada uno de ellos compuesto por dos filas de puntos a una distancia aproximada de 30 metros, dos en las zonas de traslape y uno fuera de ellas en el centro del modelo (Figura 26). Las diferencias entre pares de elevaciones dentro de cada transepto aparecen en la Tabla 4.

Se observa en esta tabla que las diferencias son altas en las dos zonas de traslape (Puntos I y Puntos III) mientras que en la zona central (Puntos II) donde no afecta el empalme los cambios son graduales y consistentes con los cambios naturales en el paisaje.

No se encontraron diferencias significativas entre las varianzas de cada fila en los diferentes transeptos tomados tanto en las zonas de traslape como fuera de ellas. Esta comprobación se hizo por medio de la prueba F para ver si es posible admitir que las dos poblaciones resultaron con varianzas iguales.

Las F observadas fueron inferiores a la F esperada: 4.25 para uno y veinte grados de libertad.

El valor promedio entre la pareja de puntos se hace con el valor absoluto. Estos promedios muestran que la tendencia es muy clara, en la zona de empalme los cambios de altura son muy altos mientras que la zona central donde no afecta el empalme los cambios parecen estar más graduales y consistentes con el paisaje.



**Figura 26 Modelo de diferencias con transeptos de puntos en la zona de traslape.**

Se observa por medio de pareja de puntos tomados al lado y lado de la zona de traslape, aproximadamente a 30 metros de separación entre puntos, que en esta zona las diferencias de altura entre los modelos es mayor que en la zona tomada en medio donde las diferencias de altura entre los puntos es gradual y consistente con los cambios en el paisaje.

### 3.2 USO DE LA TIERRA PREDOMINANTE EN CUATRO ÁREAS DE MUESTREO

Hubo problemas al trabajar con la base de datos completa en los dos ambientes debido a su gran tamaño; entonces se trabajó con cuatro áreas más pequeñas y en diferentes partes del mapa (Figura 27), teniendo presente que la vegetación predominante fuera diferente y representativa de toda el área. Se buscó entender

la influencia de tres factores sobre el modelo editado: Geoformas, Índice de mojamiento (wetness Index) y principalmente el uso de la tierra.

**Tabla 4** Análisis estadístico de parejas de puntos tomados en la zona de traslape y dentro del modelo de diferencias.

	I	II	III
	39	11	33
	16	15	5
	2	4	8
	19	2	2
	35	25	44
	32	3	20
	35	8	19
	16	1	22
	6	14	25
	25	4	35
	27	0	18
	69	2	34
	19	9	25
	68	1	14
	32	10	51
	29	15	141
	23	2	24
	54	1	7
	27	1	11
	15	6	28
	81		
Promedio	31.9	6.7	28.3

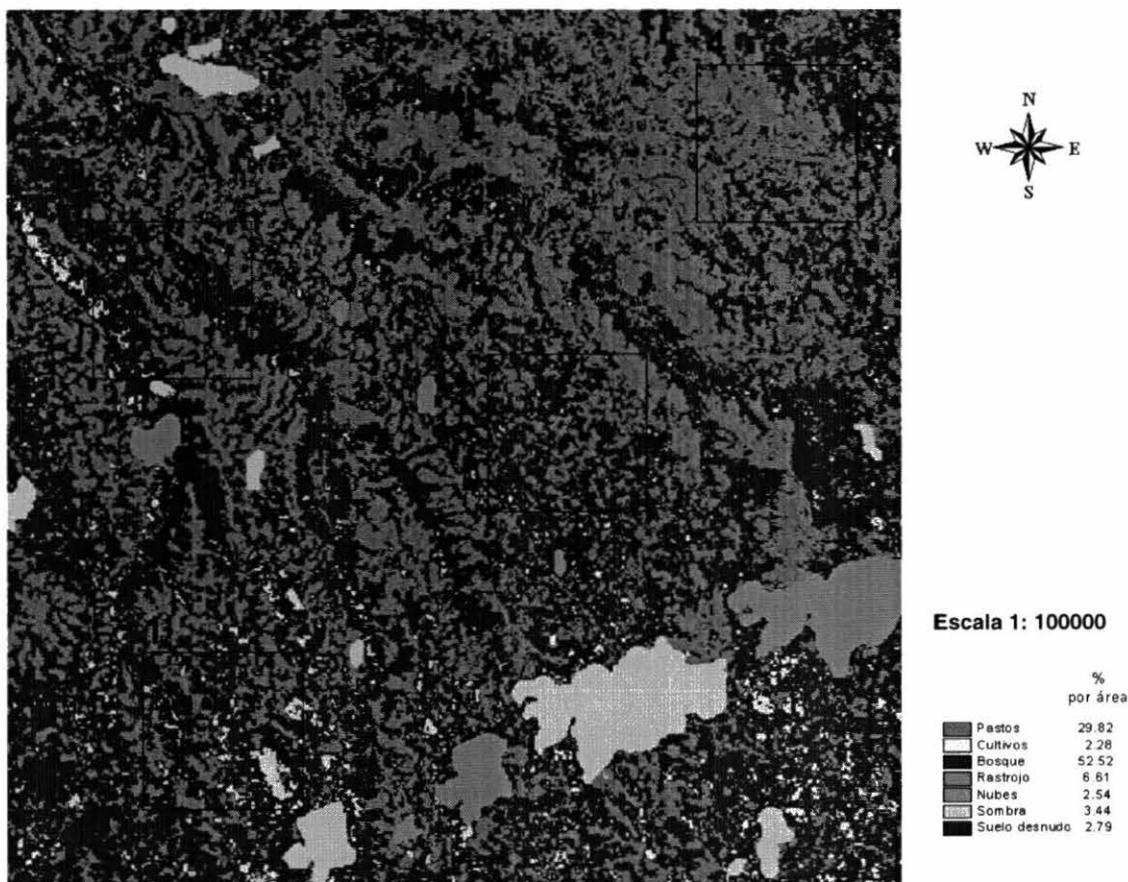
Estas áreas de muestra son de tamaño de 200 píxeles por 200 píxeles con una resolución de píxel de 20x20 metros, dando un área de 4 km<sup>2</sup>.

Es posible que los cultivos a pesar de su baja estatura influyan en sobre estimación de las cotas debido a que están entremezclados con el bosque, habría que separar áreas puras de bosque y áreas puras de cultivo en una ventana del modelo de uso, ampliada varias veces, para poder constatar ciertamente el grado de influencia de cada una de estas coberturas.

En las cuatro áreas seleccionadas se observa que el bosque es predominante seguido por pastos aunque este último presente en las tres primeras áreas una

reducción del 50% frente al bosque, los demás usos no son muy representativos en éstas. En el área 4 esta cantidad se invierte, allí predomina el pasto y baja el bosque, pero también sube relativamente los porcentajes de rastrojo y de cultivos

El bosque en el área 1 (figura 28) es representativo con un 65%, al igual que pastos con un 23%; el suelo desnudo son pequeñas manchas en rojo aisladas que no parecen muy representativas con respecto a toda el área; pero los cultivos hacen presencia con un 8%.



**Figura 27** Clasificación de uso de tierra con imagen de Satélite SPOT.

Se seleccionaron cuatro áreas de igual tamaño y en diferentes parte del modelo Teniendo en cuenta que la vegetación predominante fuera diferente y representativa, para entender la influencia del uso en cada modelo.

Estas áreas se hacen de tamaño de 200 \* 200 píxeles con una resolución de píxel de 20 metros.

Coordenadas de las área tomadas de muestra:

- Área 1: y<sub>mín</sub> = 799771; y<sub>máx</sub> = 801771; x<sub>mín</sub> = 1053113; x<sub>máx</sub> = 1055113
- Área 2: y<sub>mín</sub> = 803523; y<sub>máx</sub> = 805523; x<sub>mín</sub> = 1057427; x<sub>máx</sub> = 1059427
- Área 3: y<sub>mín</sub> = 805209; y<sub>máx</sub> = 807209; x<sub>mín</sub> = 1052491; x<sub>máx</sub> = 1054491
- Área 4: y<sub>mín</sub> = 807176; y<sub>máx</sub> = 809176; x<sub>mín</sub> = 1060036; x<sub>máx</sub> = 1062036

subió la desviación estándar, el máximo de las alturas, el rango y el coeficiente de variación (Tabla 5).

**Tabla 5** Estadísticas de elevaciones en las cuatro áreas en los modelos sin editar y Editado (áreas seleccionadas de 200x200 píxeles con un tamaño de píxel de 10 m).

Muestra	Promedio	DE <sup>1</sup>	Mínimo	Máximo	Rango	CV <sup>2</sup>
<b>Área 1</b>						
Sin editar	1606	28	1487	1683	196	1.8
Editada	1602	31	1469	1728	259	1.9
<b>Área 2</b>						
Sin editar	1538	24	1452	1593	141	1.5
Editada	1534	24	1450	1589	139	1.6
<b>Área 3</b>						
Sin editar	1435	79	1287	1594	307	5.5
Editada	1433	80	1281	1596	315	5.6
<b>Área 4</b>						
Sin editar	1476	30	1380	1546	166	2.0
Editada	1475	31	1375	1547	172	2..1

<sup>1</sup> DE: Desviación Estándar

<sup>2</sup> CV: Coeficiente de variación

El análisis de diferencias en estos modelos no presentan una distribución normalmente al azar sino que tienen un sesgo hacia la izquierda (Modelo de Ajuste Gaussiano) por lo tanto el promedio siempre ha sido inferior a la desviación estándar (Tabla 6).

La edición del área 1 fue la que produjo correcciones de altura en mayor escala frente a las otras tres áreas. En estas últimas se obtuvieron diferencias menos típicas si se las compara con la edición global de la imagen.

**Tabla 6** Estadísticas de las diferencias absolutas en las 4 áreas seleccionadas por uso.

Área	Promedio	DV <sup>1</sup>	Mínimo	Maximo	Rango
1	4	12	-105	121	226
2	3	3	-8	25	33
3	1	4	-15	33	48
4	1	3	-5	43	48

<sup>1</sup> DV: Desviación Estándar

En el análisis de varianza para cada área hubo diferencias altamente significativas entre los usos del suelo ( $F_c > F_t$ ) (Tabla 7).

Para las áreas 1 y 4, bosques y cultivos tuvieron promedio de diferencias significativamente superiores al resto de usos (Tabla 8).

En el área 2, cultivos presentó el promedio de diferencias significativamente más alto, seguido por bosques que a su vez fue significativamente mayor que el de pastos; quedando rastrojo y suelo desnudo con los dos promedios más bajos. Para el área 3, de nuevo cultivos presentó el promedio de diferencias significativamente mayor, superando inclusive al de bosques; mientras que suelo desnudo; pastos y rastrojo mostraron los promedios más bajos, sin diferencias entre ellos.

Es claro entonces que las diferencias encontradas son una consecuencia de la vegetación y que las diferencias según el uso introducen los errores en la edición.

**Tabla 7** Resultado de 4 análisis de varianza para cada área de muestreo

Área	SC <sup>1</sup>	GL <sup>2</sup>	CM <sup>3</sup>	SCE <sup>4</sup>	GLE <sup>5</sup>	CME <sup>6</sup>	F <sup>7</sup>	Probabilidad
1	15141.42	4	3785.35	880898.40	9538	92.36	40.99	0.00
2	3590.02	4	897.50	79351.29	8809	9.01	99.63	0.00
3	6712.29	4	1678.07	135859.30	8050	16.88	99.43	0.00
4	8932.25	4	2233.06	66542.93	4861	13.69	163.13	0.00

<sup>1</sup> SC: Suma de cuadrados

<sup>2</sup> GL: Grados de Libertad

<sup>3</sup> CM: Cuadrado Medio

<sup>4</sup> SCE: Suma de Cuadrados de Error

<sup>5</sup> GLE: Grados de Libertad Error

<sup>6</sup> CME: Cuadrado Medio Error

<sup>7</sup> F: F Calculada

De acuerdo con los datos de la Tabla 9 es evidente que las especies forestales y frutícolas son de mayor tamaño frente a los cultivos y los pastos. Así mismo, se notan pocas diferencias de altura entre cultivos y pastos, sin embargo, Cerón

**Tabla 8** Prueba Duncan para los promedios de diferencias absolutas de elevación por uso en cada área.

USO	ÁREA 1 Promedio	ÁREA 2 Promedio	ÁREA 3 Promedio	ÁREA 4 Promedio
Bosque	10.48 a	4.61 b	4.43 b	4.52 a
Cultivo	10.36 a 10.42 <sup>a</sup>	5.68 a 5.14 <sup>a</sup>	6.73 a 5.58 <sup>a</sup>	3.57 a 4.04 <sup>a</sup>
Pastos	7.63 b	3.49 c	2.67 c	1.82 b
Rastrojo	6.28 b 7.27 <sup>b</sup>	2.88 d 3.02 <sup>b</sup>	2.76 c 2.6 <sup>b</sup>	1.55 b 1.74 <sup>b</sup>
Suelodesnudo	7.91 b	2.69 d	2.37 c	1.86 b

Promedios seguidos con la misma letra no son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ )

<sup>a</sup> Promedios entre bosques y Cultivos los cuales fueron los usos con promedios más altos.

<sup>b</sup> Promedios entre los promedios más bajos de los usos.

(1996) explica que los sistemas de cultivos, incluyen varias especies forestales en íntima asociación, a diferencia de los sistemas de pastos, la cual determina su mimetización con el bosque, mientras que en los sistemas agroforestales y silvopastoriles, los árboles no poseen una densidad alta; Se ubican principalmente en los linderos y las fincas ocupan áreas más grandes cuya apariencia en la imagen da mayor resolución, situación que no afecta negativamente el algoritmo Helava.

### **Análisis estadístico de las diferencias absolutas en función del uso**

**Área 1:** Estadísticamente en el área 1 predominan bosque y pastos y los restantes usos no tuvieron importancia relativa (Tabla 10).

El promedio de las diferencias de elevación para todos los usos osciló entre seis y diez y él más alto correspondió a bosques y cultivos.

La mediana osciló entre cinco y seis, con el valor más alto para cultivos; sin embargo los máximos alcanzaron valores diez veces más altos que el promedio.

**Tabla 9** Especies cultivadas en la zona y sus correspondientes alturas promedio en metros. Cerón (1996)

Bosque		Cultivos				Pastos			
Árboles (sistemas agrosilvopastoriles) Lotes pequeños	Altura (metros)	Árboles (Sistema Agroforestales) Cercas vivas	Altura (metros)	Árboles y Cultivos	Altura (metros)	Árboles y Huertos	Altura (metros)	Pastos	Altura (metros)
Cascarillo	7.5	Pino Patula	9.0	Café	1.5	Caña panelera	2.0	Kikuyo	1.5
Jigua	10.0	Urapan	11.0	Platano	3.0	Yuca	1.5	Estrella	1.0
Mandur	10.0	Eucalipto	12.0	Caña panelera	2.0	Hortalizas	0.5	Yaragua	1.0
Arrayán	4.0	Guayabo	3.0					Imperial	0.3
Roble	10.0					Mango	7.5	Braquiaria	3.0
						Naranja	4.0	Gramma	0.3
				Guamo	6.0	Nispero	10.0	<i>Brachiaria decumbens</i>	0.5
				Cachimbo	10.0	Guayaba	3.0	<i>Cuphea racemosa</i>	0.5
				Nogal	11.0	Papaya	3.5	<i>Pteridium arachnoideum</i>	0.7
				Jigua	8.0	Guanábana	5.0	<i>Stachytarpheta</i>	
				Aguacatillo	5.0	Guamo	6.0	<i>cayennensis</i>	1.0
				Aguacate	5.0	Café	1.5	<i>Ageratum conyzoides</i>	1.0
						Platano	3.0		
						Hortalizas	0.5		

El cuarto inferior estuvo alrededor de tres metros y el cuarto superior en una rango cercano a 12 metros de diferencia para todos los usos.

Las desviaciones estándar más altas correspondieron a bosques, cultivos y pastos; pastos y bosques tuvieron la mayor simetría (Skewness).

**Área 2:** Estadísticamente se observa que predominan el bosque y pastos; los otros usos no son significativos en esta área (Tabla 10).

La mediana se encuentra entre dos y seis, encontrándose la más alta en cultivos. El máximo estuvo en 25 metros en bosques.

**Tabla 10** Estadística de las diferencias absolutas en las áreas de muestreo con todos sus usos, donde N es el número de píxeles con diferencias.

ÁREA	USO	N	Rango	Promedio	Mínimo	BC	Mediana	AC	Máximo	DE	Simetría
1	Suelodesnudo	68	3	7.91	1	3	7	11	27	6.05	1.09
	Cultivos	837	2	10.36	1	4	8	14	51	8.79	1.29
	Bosques	6318	1	10.48	1	4	7	14	118	10.24	2.49
	Pastos	2213	4	7.63	1	3	5	10	105	8.21	3.45
	Rastrojo	107	5	6.29	1	2	6	8	30	5.11	1.90
2	Suelodesnudo	146	5	2.70	1	1	2	4	10	1.89	1.15
	Cultivos	72	1	5.68	1	3	6	8	14	3.16	0.38
	Bosques	5380	2	4.62	1	2	4	6	25	3.32	1.33
	Pastos	2742	3	3.49	1	2	3	5	20	2.50	1.60
	Rastrojo	474	4	2.89	1	1	2	4	15	1.96	1.37
3	Suelodesnudo	69	5	2.38	1	1	2	2	11	2.24	2.26
	Cultivo	179	1	6.70	1	2	4	9	23	6.32	1.30
	Bosques	5376	2	4.43	1	1	3	6	32	4.58	2.03
	Pastos	2153	4	2.67	1	1	2	3	21	2.56	2.65
	Rastrojo	279	3	2.76	1	1	2	3	14	2.37	1.95
4	Suelodesnudo	297	3	1.86	1	1	1	2	19	2.20	4.13
	Cultivos	14	2	3.57	1	1	4	5	6	1.91	-0.28
	Bosques	1941	1	4.53	1	1	2	6	43	5.37	2.88
	Pastos	1903	4	1.83	1	1	1	2	25	1.90	4.46
	Rastrojo	711	5	1.56	1	1	1	1	25	1.77	7.74

<sup>1</sup> N: Número de Píxeles

<sup>2</sup> BJ: Bajo Cuartil

<sup>3</sup> AC: Alto Cuartil

<sup>4</sup> DE: Desviación Estándar

El cuarto inferior estuvo entre uno y dos metros en la mayoría de los usos, mientras que el cuarto superior estuvo en un rango de cuatro a ocho metros de diferencia.

La desviación estándar más alta pertenece a cultivos y bosques seguidos por pastos; mientras que la mayor asimetría corresponde a pastos, rastrojo y bosques.

**Área 3:** Predominan en esta zona bosques y pastos. El promedio de la diferencias de elevaciones estuvo entre dos y seis, siendo el más alto para bosques (Tabla 10).

La mediana está entre dos y cuatro, la más alta corresponde a los cultivos, y la máxima es ocho veces el máximo de la mediana más alta.

En el cuarto inferior predominó un metro en tres de los usos excepto en cultivos que sube a dos metros, y el cuarto superior estuvo en un rango entre dos y seis metros para tres usos con nueve para cultivos.

Las desviaciones estándar más altas correspondieron a cultivos y bosques. Pastos, bosques y suelo desnudo tuvieron la mayor asimetría.

**Área 4:** En esta área predominan bosque y pastos, hacen presencia suelo desnudo y rastrojo con más frecuencia que en las otras áreas (Tabla 10).

El promedio de las diferencias de elevación estuvo en uno para tres de los usos; él más alto lo tuvo cultivos seguido por bosque. La mediana predominante es dos en tres usos y la más alta la tienen cultivos seguido también por bosque.

El valor máximo en las diferencias de altura lo tuvo bosque y el menor de los máximos lo tuvo cultivos.

El cuarto inferior de las diferencias de elevación estuvo en un metro en todos los usos y el cuarto superior estuvo entre uno y seis siendo el más alto para el bosque.

La desviación estándar más alta fue para bosque, y la mayor asimetría la tuvo rastrojo (Tabla 10).

En el análisis de varianza para todos los usos se hallaron diferencias altamente significativas ( $P < 0.01$ ) entre los modelos editado y no editado en las zonas muestreadas, aunque los cuadrados medios más altos se presentaron con bosque cultivos, cultivos y pastos (Tabla 11).

La separación de medias de la interacción área por uso (Tabla 12) MDEostró que el área 1 independientemente del uso ocasionó las mayores diferencias entre los dos modelos ( $p < 0.05$ ); el área 4 permitió las menores diferencias la mayoría de las veces, excepto con bosque con los que presentó diferencias similares en las áreas 2 y 3 ( $p < 0.05$ ). Las áreas 2 y 3 tuvieron un comportamiento similar al del área 1 en cuanto a que el uso no cambió la tendencia de la edición, pero es esta ocasión sus promedios fueron intermedios entre los de las áreas 1 y 4 y, además, no hubo diferencias entre estas áreas ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 11** Resultado de 5 análisis de varianza para 5 cultivos en las cuatro áreas de muestreo

Uso	SC	GL	CM	SM	GL	CM	F	Probabilidad
Pastos	42700.85	3	14233.62	187194.63	9007	20.78	684.86	0.00
Rastrojo	2259.01	3	753.00	8367.70	1567	5.34	141.01	0.00
Suelodesnudo	2050.97	3	683.66	4745.75	576	8.24	82.98	0.00
Cultivos	3544.80	3	1181.60	72513.42	1098	66.04	17.89	0.00
Bosque	149890.19	3	49963.40	889863.13	19011	46.81	1067.42	0.00

<sup>1</sup> SC: Suma de Cuadrado

<sup>2</sup> GL: Grados de Libertad

<sup>3</sup> CM: Cuadrado Medio

<sup>4</sup> F: F Calculada

**Tabla 12** Prueba Duncan para los promedios de las diferencias absolutas de cultivos en cada área

Área	Pastos	Rastrojo	SueloDesnudo	Cultivos	Bosque
1	7.63 a	6.29 a	7.91 a	10.36 a	10.48 a
2	3.49 b	2.88 b	2.69 b	5.68 b	4.61 b
3	2.67 b	2.76 b	2.37 b	6.7 b	4.43 b
4	1.82 c	1.55 c	1.86 c	3.57 c	4.52 b

Promedios seguidos por la misma letra no son diferentes ( $P < 0.05$ ).

### 3.3 COMPARACIÓN DE LOS MODELOS EN CUATRO ÁREAS DE MUESTREO

En el análisis visual se observa que en el modelo sin editar del área 1 (Figura 32) que hay zonas más altas de tonos cafés (zona1) en contraste con el modelo editado donde desaparecen. Esto se refleja también en los histogramas donde la cola derecha del modelo sin editar desaparece en el modelo editado. Esto sucede porque al editar el modelo las cotas disminuyen.

En los valles, los cursos de agua (rangos azules) son continuos en el modelo editado a diferencia del modelo sin editar donde están interrumpidos ( zona 2).

En la parte central del modelo editado (Figura 32) aparecen nuevas zonas altas de tonos café (zona 3) que suben el rango de cotas. Esto no aparece en el histograma porque no son suficientemente significativas.

Los histogramas de los dos modelos presentan distribuciones normalizadas aunque la cola izquierda es un tanto más larga.

El área 2 se destacó porque las cotas mayores fueron menos frecuentes en el modelo editado, y lo contrario sucedió con las cotas menores, aunque estas diferencias con el modelo sin editar fueron pequeñas (Figura 33).

Las distribuciones de frecuencias de los modelos son normalizadas y la cola izquierda sigue siendo más larga y escalonada, es decir, que las alturas inferiores a 1500 metros siguen siendo importantes allí.

La principal diferencia entre los modelos del área 2 se advierte en los tres valles señalados (zonas 1,2,3) pues el curso de los ríos, en el modelo editado, es más largo, continuo y amplio, disminuyendo las zonas altas de color rojo que pierden su continuidad en el valle que lo delimita. Así mismo, en el modelo editado, se observa en la zona rosada de laderas ( zona 4) que el rango de cotas bajó para ahondar el drenaje.

### 3.4 GEOFORMAS PREDOMINANTES EN LAS CUATRO ÁREAS DE MUESTREO

Según la clasificación geomorfológica de Conacher, A.J., Dalrymple, J.B., (1977) este sistema clasifica en primera instancia 6 unidades de paisaje:

“interfluve”

“shoulder”

“backslope”

“footslope”

“toeslope”

“channel”

Es claro que las zonas con “footslope”, “toeslope” y “channel” puedan poseer los terrenos con mayor captación de agua mientras que las “backslope” (e “interfluve”) pueden poseer los terrenos más secos.

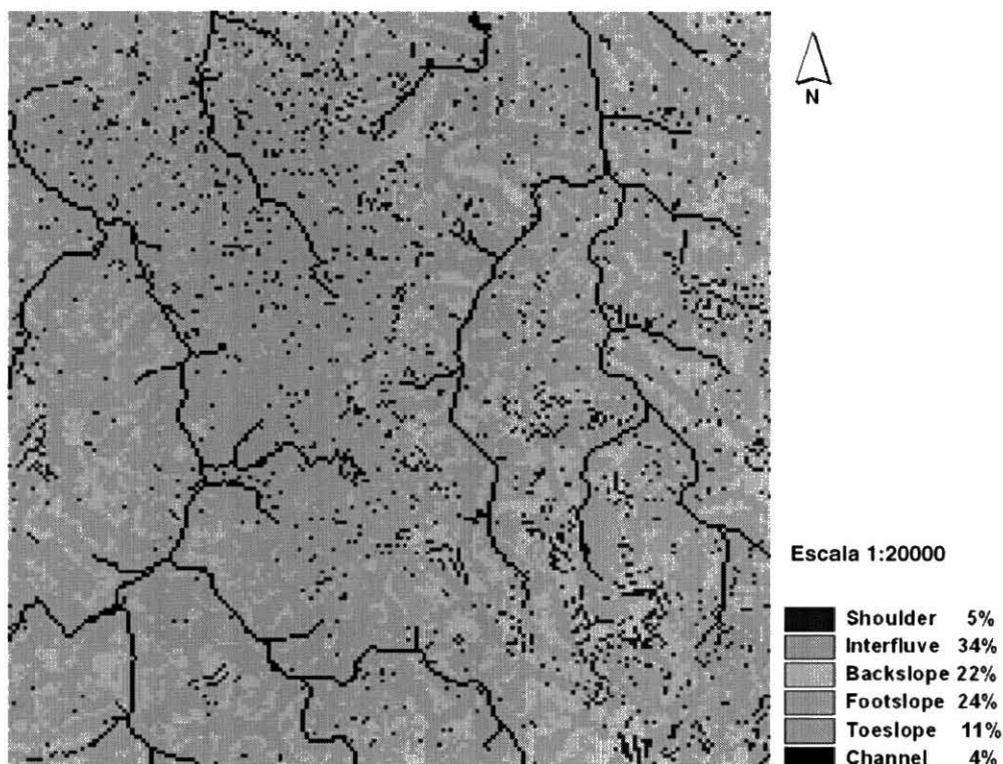
El área 1 de mayor elevación presenta dominancia de “Intefluve” y “footslope” (Figura 38), es decir que posee menor área en los “backslope” frente a las otras tres unidades. Presenta numerosos “shoulder”s” y está cruzada en todo su extensión por “toeslope” (valles de inundación) medianos.

El área 2 es una mezcla equilibrada y bien distribuida de “Intefluve”, “footslope” y “backslope” (Figura 39). Los “toeslope” no son abundantes y son angostos.

El área 3 se caracterizó por un balance entre “interfluve” y “backslope” largos (Figura 40). Exceptuando la zona centro, los “interfluve” estuvieron ligados con “footslope”; posee dos “toeslope” relativamente amplios y de gran extensión.

La zona 4 de menor elevación, tuvo dominancia de “backslope” e “interfluve” (Figura 41) con presencia significativa de “shoulder”; Los “footslope” no tuvieron

tanta presencia". Son comunes los valles de inundación medianos ("toeslope") y en el extremo Nor-Este hace presencia un valle de inundación amplio.

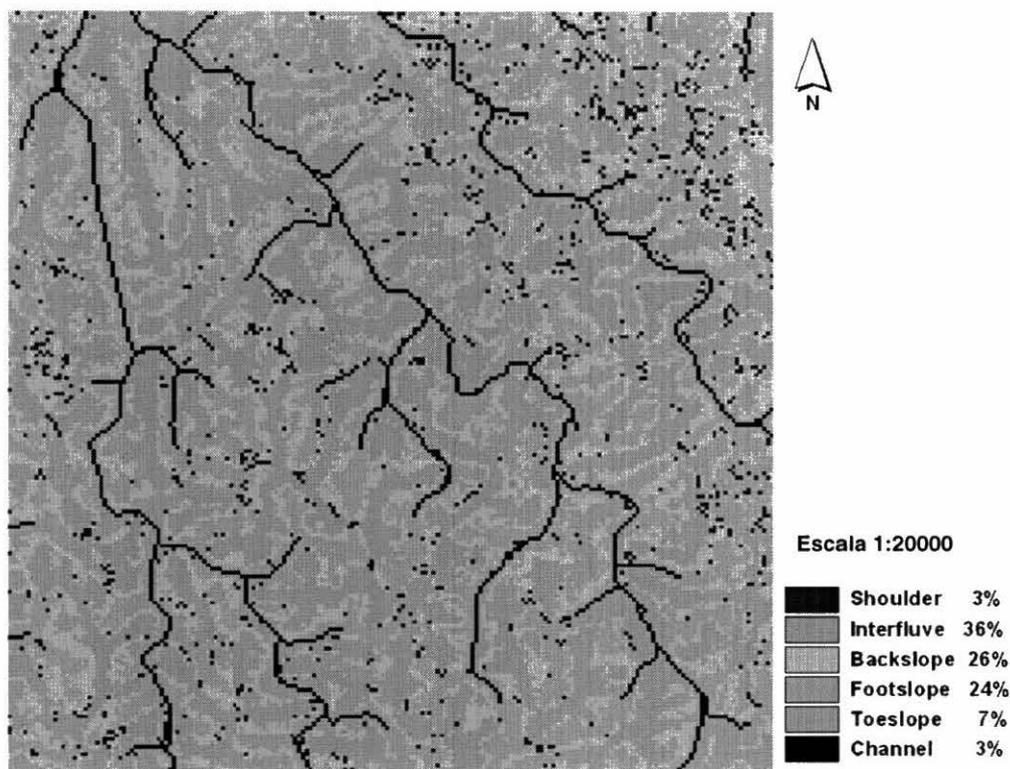


**Figura 38** Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 1.

Las zonas con "interfluve", "footslope" y "toeslope" pueden poseer los terrenos con mayor retención de humedad, mientras que los "backslope" (y "channel") pueden poseer los terrenos más secos.

**Análisis de varianza:** Hubo diferencias altamente significativas entre áreas (Tabla 13), siendo el área 1 la que presentó las mayores diferencias y el área 4 la de menor diferencias; entre las áreas 2 y 3 hubo diferencias promedio (Tabla 14).

Dentro de todas las áreas también se presentaron diferencias significativas en las seis unidades de clasificación del paisaje.



**Figura 39** Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 2.

Las zonas con “interfluvial”, “footslope” y “toeslope” pueden poseer los terrenos con mayor retención de humedad, mientras que los “backslope” (y “channel”) pueden poseer los terrenos más secos.

**Tabla 13** Análisis de varianza para las diferencias absolutas con la clasificación geomorfológica entre áreas y para las cuatro áreas de muestreo.

Área	SC <sup>1</sup>	GL <sup>2</sup>	CM <sup>3</sup>	SCE <sup>4</sup>	GLE <sup>5</sup>	CME <sup>6</sup>	F <sup>7</sup>	Probabilidad
ÁREAS	242427.45	3	80809.15	1193988.54	31181.00	38.29	2110.33	0.00
Area1	31780.49	5	6356.10	861134.20	9442.00	91.20	69.69	0.00
Area2	7382.02	5	1476.40	75557.97	8807.00	8.58	172.09	0.00
Area3	22646.49	5	4529.30	119929.48	8049.00	14.90	303.98	0.00
Area4	7360.74	5	1472.15	68110.94	4859.00	14.02	105.02	0.00

<sup>1</sup> SC: Suma de Cuadrados

<sup>2</sup> GL: Grados de Libertad

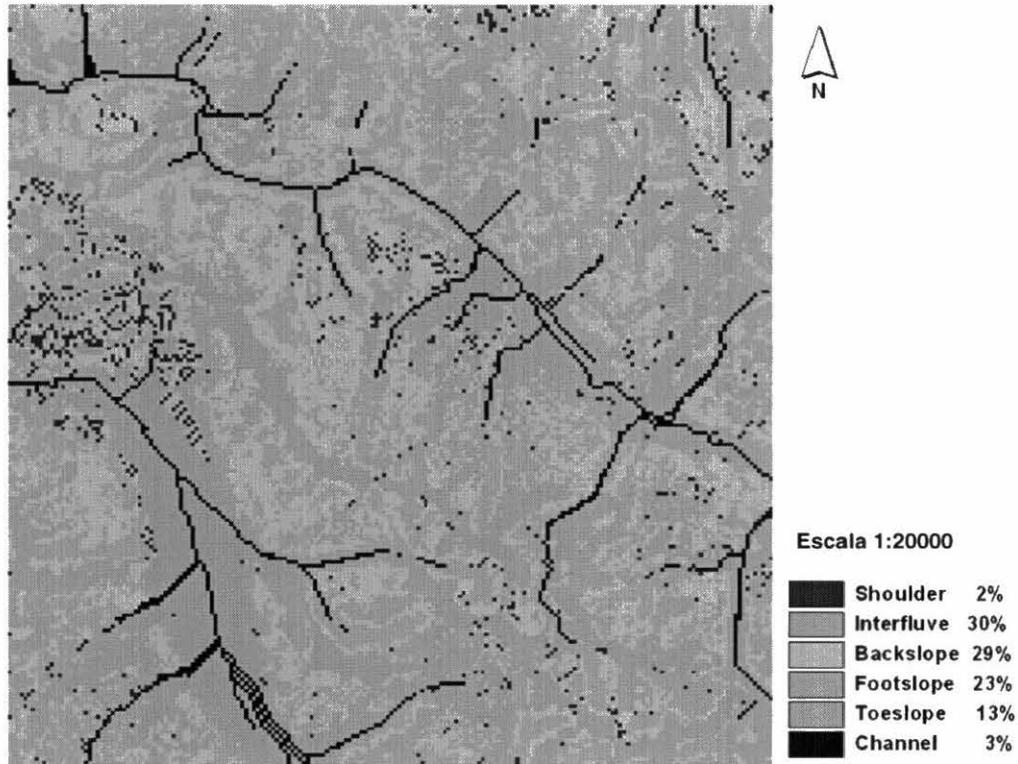
<sup>3</sup> CM: Cuadrado Medio

<sup>4</sup> SCE: Suma de Cuadrados de Error

<sup>5</sup> GLE: Grados de Libertad del Error

<sup>6</sup> CME: Cuadrado Medio del Error

<sup>7</sup> F: Prueba F



**Figura 40** Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 3.

Las zonas con “interfluve”, “footslope” y “toeslope” pueden poseer los terrenos con mayor retención de humedad, mientras que los “backslope” (y “channel”) pueden poseer los terrenos más secos.

**Tabla 14** Prueba Duncan para la combinación de las diferencias absolutas con la clasificación geomorfológica entre áreas (a) y para las cuatro áreas de muestreo (b).

a.

Área Promedio	
1	9.79 a
2	4.15 b
3	3.93 b
4	2.87 c

b. Promedios seguidos por la misma letra no son diferente ( $P < 0.05$ ).

Área 1		Área 2		Área 3		Área 4	
UG <sup>1</sup>	Promedio	UG <sup>1</sup>	Promedio	UG <sup>1</sup>	Promedio	UG <sup>1</sup>	Promedio
Channel <sup>2</sup>	15.3 a	Channel	6.09 a	Channel	7.7 a	Channel	6.34 a
Toeslope <sup>3</sup>	12.7 b	Toeslope	5.28 b	Toeslope	6.79 b	Toeslope	4.45 b
Footslope <sup>4</sup>	10.9 c	Footslope	5.11 b	Footslope	4.46 c	Footslope	3.54 c
Shoulder <sup>5</sup>	8.77 d	Shoulder	4.35 c	Backslope	3.04 d	Shoulder	2.13 d
Backslope <sup>6</sup>	8.74 d	Backslope	3.93 d	Interfluve	2.35 e	Backslope	2.02 d
Interfluve <sup>7</sup>	8.29 d	Interfluve	3.12 e	Shoulder	2.3 e	Interfluve	1.94 d

<sup>1</sup>UG: Unidad Geomorfológica

<sup>2</sup>“channel”: Ríos o drenajes

<sup>3</sup>“toeslope”: Valles de Inundación

<sup>4</sup>Footslope: Coluvios, depositos gravitatorios

<sup>5</sup>“shoulder”: Cimas redondeadas

<sup>6</sup>“backslope”: Laderas

<sup>7</sup>“interfluve”: Sistemas de terrazas disectadas que están limitadas entre dos ríos o quebradas principales.

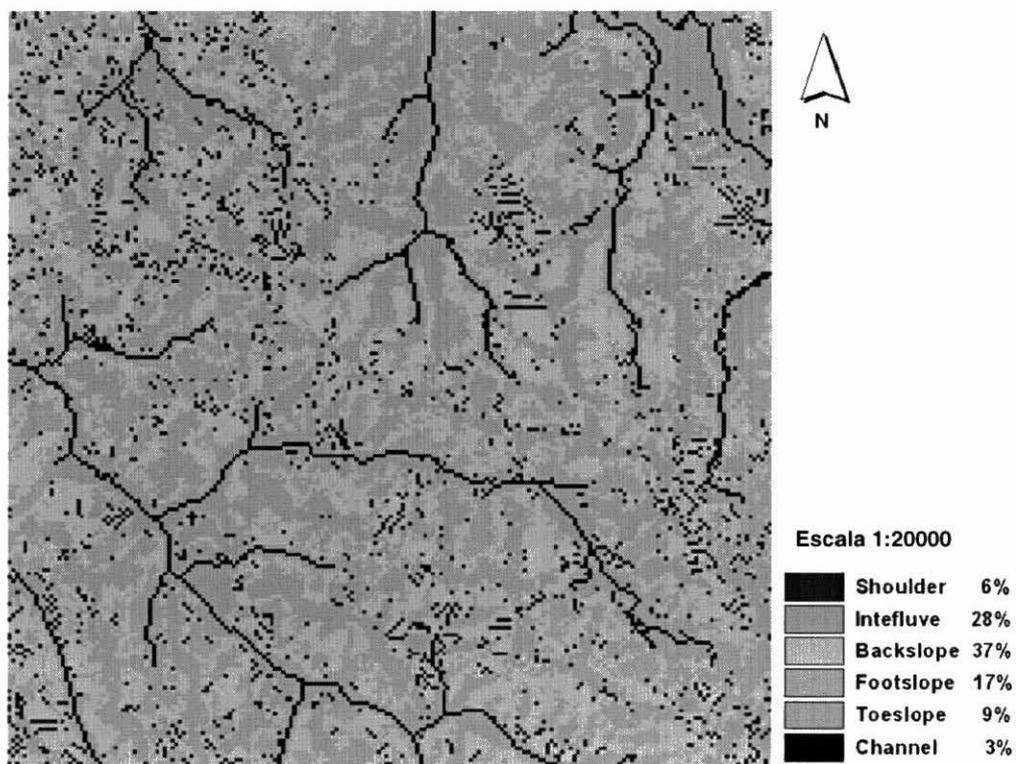


Figura 41 Clasificación geomorfológica del modelo para el área de muestreo 4.

Las zonas con “interfluve”, “footslope” y “toeslope” pueden poseer los terrenos con mayor retención de humedad, mientras que los “backslope” (y “channel”) pueden poseer los terrenos más secos.

Así, en las **áreas 1 y 4** (Tabla 14) el promedio en “channel” fue el más alto de todos, seguido por “toeslope” y este seguido por “footslope”, obsérvese en las áreas 1 y 4 que estas tres posiciones geomorfológicas son las más bajas; los tres promedios más bajos sin diferencias entre ellos fueron los ““shoulder””, “backslope” e “interfluve”, nótese que (Figuras 38 y 41) en estas dos áreas existen una gran cantidad de “shoulder” muy mezclados con los “interfluve”s y “backslope”, los patrones en estas dos zonas son muy similares.

Para el **área 2** (Tabla 14) la distribución de promedios se mantuvo frente al área 1, pero en este caso no hubo diferencias entre “toeslope” y “footslope”, en la figura 38 se alcanza a apreciar que los “toeslope” pierden importancia cartográfica frente a las otras tres áreas, en cambio si la hubo entre “shoulder”, “backslope” e “interfluve”; los “shoulder” tal vez es la única área en que los “shoulder” están más dispersos y mejor distribuidos entre los “backslope” y los “interfluve” (Figura 38).

Para el **área 3** (Tabla 14) “channel”, “toeslope” y “footslope” siguen presentando los promedios más altos, en las distribuciones de los 6 rasgos es la más clara entre las cuatro áreas analizadas (Figura 39); pero “backslope” cobró importancia dentro de los 3 últimos lugares relacionados con su gran tamaño, mientras que “interfluve” y “shoulder” presentaron los promedios más bajos sin diferencias entre ellos.

### 3.5 “WETNESS INDEX” EN LAS CUATRO ÁREAS

El “Wetness Index” presenta 19 rangos de los cuales se reclasificaron solamente en 5 rangos para estudiarlos en cada una de las cuatro áreas de muestreo, con el siguiente significado: Los rangos más bajos corresponden a los terrenos o paisajes con menores posibilidades de saturación con agua, y los más altos corresponden a los terrenos y paisajes con mayores posibilidades de captación de agua de drenaje. Estos rangos de valores corresponden a: Rango 1 (3 a 10), rango 2 (11 a 14), rango 3 (15 a 18), rango 4 (19 a 22).

El área 1 reportó la mayor presencia de índices bajos especialmente en el centro (Figura 42), en la zona oriental el valor de este índice incrementó significativamente.

En el área 2 la zona con bajos índices se extiende solamente a lo largo de la cuenca del curso de agua central y en el resto de ella los índices tienen un valor más alto (Figura 43).

El área 3 presenta índices bajos en pequeñas franjas pero distribuidos homogéneamente en toda la extensión (Figura 44). En las zonas aledañas a estas franjas este índice se incrementó.

En el área 4, con muy pocas excepciones, este índice fue relativamente alto, con características muy similares al área 2 (Figura 45).

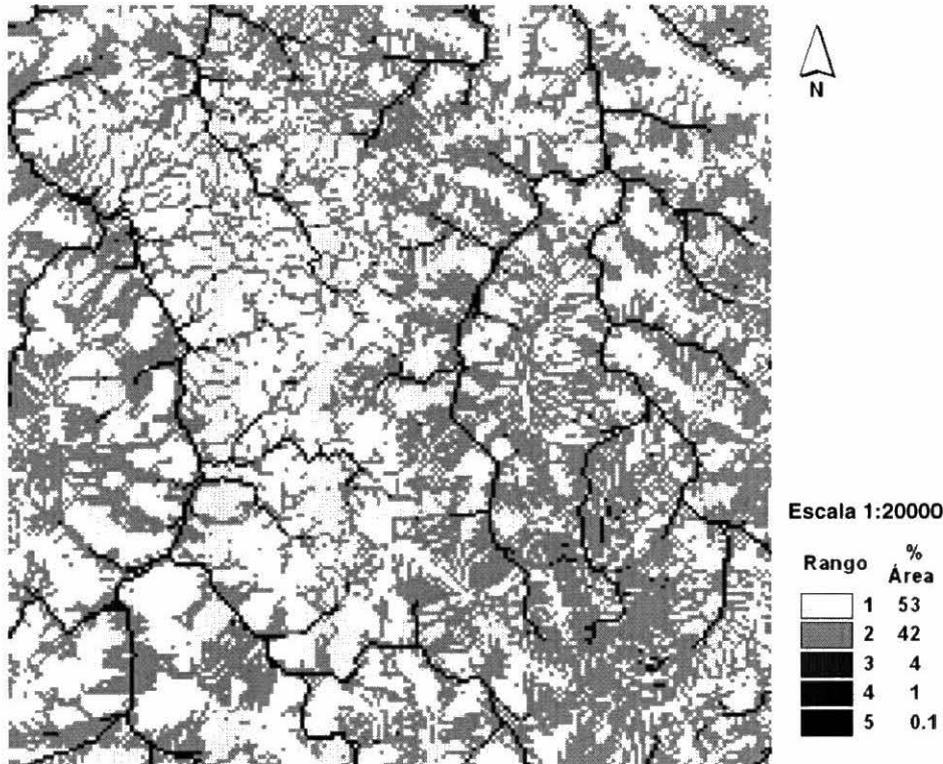


Figura 42 "Wetness Index" para el área de muestreo 1.

El "Wetness Index" se reclasificó en 5 rangos, los rangos más bajos corresponden a los terrenos o paisajes con menores posibilidades de saturación de agua, y los más altos corresponden a los terrenos o paisajes con mayores posibilidades de captación de agua de drenaje.

### Análisis Estadístico del "Wetness Index" para las cuatro áreas de muestreo.

La mediana y los cuartiles son buenas medidas de tendencia central para distribuciones de frecuencia asimétricas y sesgada; En el área 1 las medianas oscilaron entre seis y doce y fueron más bajas con los dos primeros índices y esta distribución de medianas correlaciona muy bien con los datos del cuartil inferior (Tabla 15).

En las áreas 2, 3 y 4 la mediana osciló entre uno y ocho, y de nuevo, sus valores compaginaron bien con los datos del cuartil inferior. El **área 1** tuvo los más altos máximos en especial para los tres primeros índices, en general oscilaron entre 70

y 120; en las áreas 2, 3 y 4 oscilaron entre 15 y 43. El cuartil superior tuvo una tendencia similar a los máximos, oscilo entre 12 y 26 para el área 1,

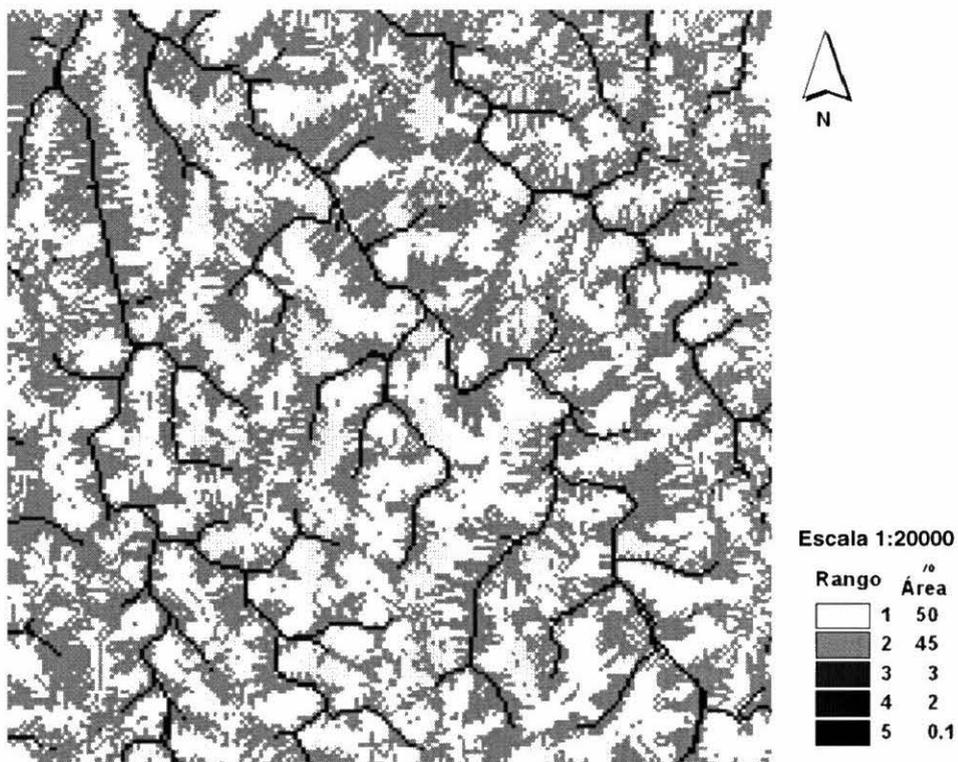


Figura 43 "Wetness Index" para el área de muestreo 2.

El "Wetness Index" se reclasificó en 5 rangos, los rangos más bajos corresponden a los terrenos o paisajes con menores posibilidades de saturación de agua, y los más altos corresponden a los terrenos o paisajes con mayores posibilidades de captación de agua de drenaje.

entre 4 y 11 para el área 3 y entre 2 y 9 para las áreas 2 y 4. Las distribuciones de frecuencia menos asimétricas (prueba de Skewness) fueron las del área 2 y el área 3 y las más asimétricas de las áreas 1 y 4.

Finalmente la prueba de Kurtosis mostró que las distribuciones de frecuencia de las áreas 1 y 4 tienen un sesgo preferencial hacia la derecha, las del área 2 un sesgo preferencial hacia la izquierda, y el área 3 el sesgo dependió del valor del índice, si era muy baja hacia la derecha y si era muy alto hacia la izquierda (Tabla 15).

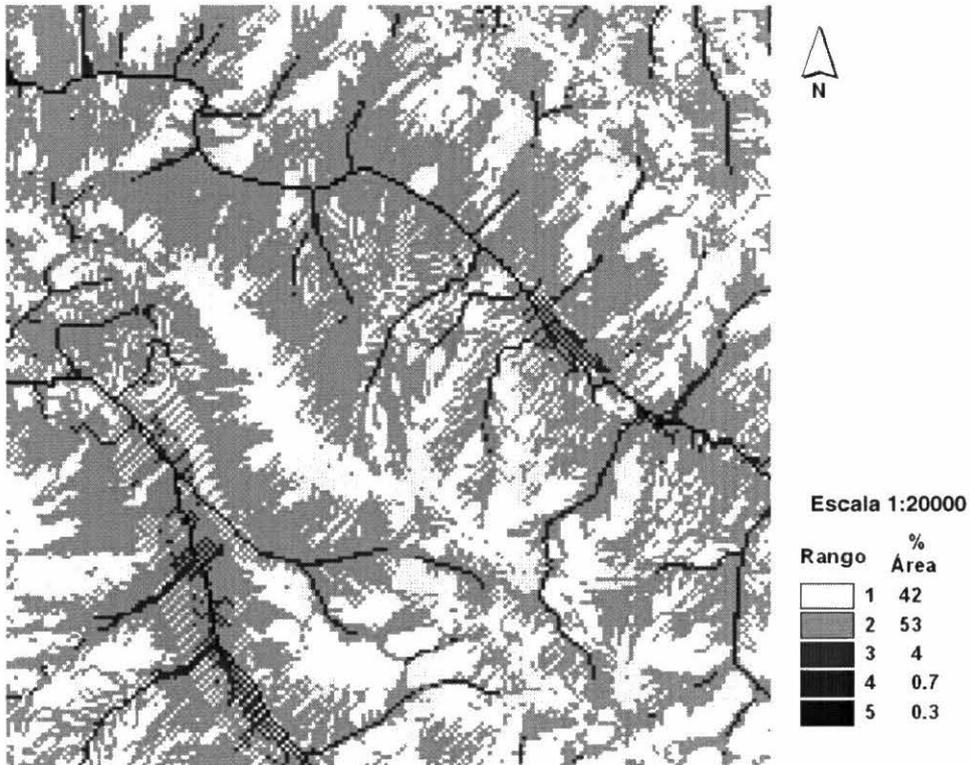


Figura 44 "Wetness Index" para el área de muestreo 3.

El "Wetness Index" se reclasificó en 5 rangos, los rangos más bajos corresponden a los terrenos o paisajes con menores posibilidades de saturación de agua, y los más altos corresponden a los terrenos o paisajes con mayores posibilidades de captación de agua de drenaje.

En el análisis de varianza: Entre áreas las diferencias debidas al "Wetness Index" fueron altamente significativas (Tabla 16). En el área 1 ofreció el mayor promedio y este fue decreciendo progresivamente hasta el área 4 marcando entre todas las áreas (Tabla 17).

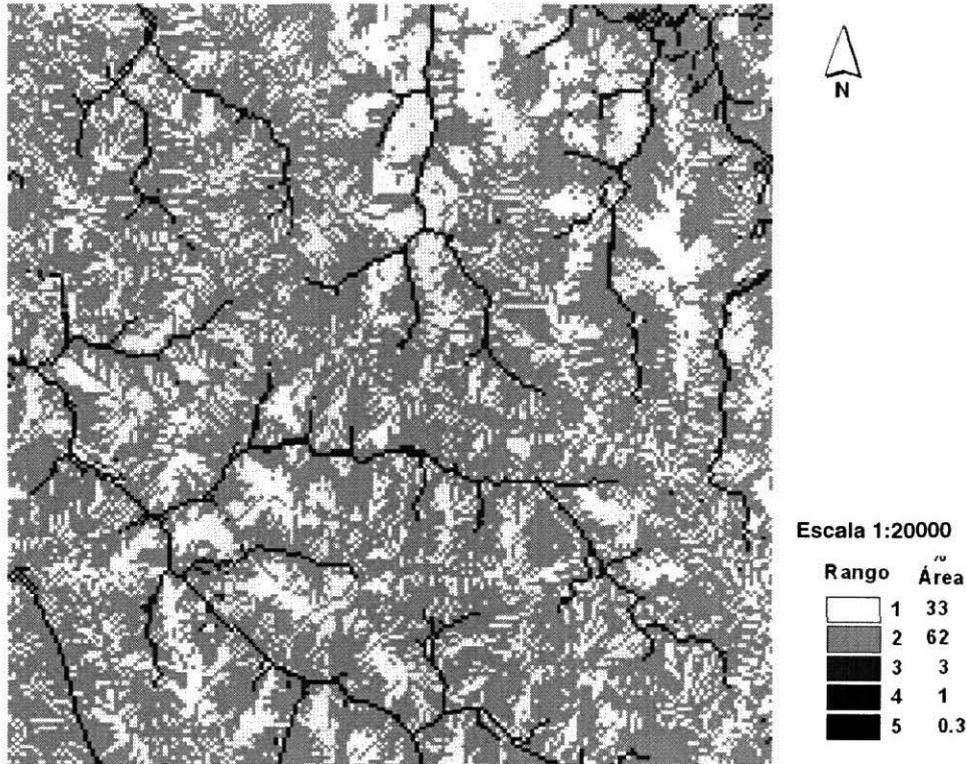


Figura 45 “Wetness Index” para el área de muestreo 4.

El “Wetness Index” se reclasificó en 5 rangos, los rangos más bajos corresponden a los terrenos o paisajes con menores posibilidades de saturación de agua, y los más altos corresponden a los terrenos o paisajes con mayores posibilidades de captación de agua de drenaje.

Dentro de todas las áreas los 5 rangos del “Wetness Index” escogidos marcaron diferencias significativas para los modelos sin editar y editado (Tabla 16). En los cuatro casos los índices tres, cuatro y cinco siempre produjeron significativamente los mayores promedios aunque alternaron en el primer lugar, y los índices uno y dos siempre correspondieron a los menores promedios algunas veces con diferencias marcadas entre estos dos (Tabla 17).

**Tabla 15** Estadística descriptiva para las diferencias absolutas

con los cinco rangos del wetness index en las cuatro áreas de muestreo

Área	Rango	N <sup>1</sup>	Promedio	Mínimo	CI <sup>2</sup>	Mediana	CS <sup>3</sup>	Máximo	DE <sup>4</sup>	Simetría	Kurtosis
1	1	20181	9.37	1	3	6	12	106	9.36	2.45	9.54
	2	16077	9.81	1	3	7	13	121	9.49	2.62	12.88
	3	1366	13.35	1	5	10	18	118	12.57	2.60	11.86
	4	470	17.30	1	6	12	26	94	14.98	1.47	
	5	45	15.00	1	7	12	17	72	14.04	2.36	6.74
2	1	17125	3.40	1	1	3	5	23	2.47	1.58	3.89
	2	16214	4.61	1	2	4	6	24	3.23	1.29	2.28
	3	1293	6.95	1	4	6	9	25	3.98	1.04	2.04
	4	620	6.55	1	4	6	9	21	3.81	0.89	0.78
	5	32	5.53	1	2.5	4	8	15	3.72	0.73	-0.22
3	1	12911	3.00	1	1	2	4	30	3.05	2.70	9.22
	2	17223	4.24	1	1	2	5	32	4.47	2.13	4.91
	3	1475	7.36	1	3	6	10	33	5.86	1.16	1.17
	4	304	8.23	1	4	7	11	31	5.92	1.18	1.58
	5	105	8.85	1	5	8	11	32	5.56	1.11	2.01
4	1	5850	2.68	1	1	1	2	37	3.89	4.17	21.96
	2	12529	2.55	1	1	1	3	41	3.33	4.21	26.03
	3	1117	5.61	1	1	4	7	43	6.53	2.83	9.91
	4	291	6.06	1	2	5	7	39	6.44	3.14	
	5	81	5.86	1	2	6	8	25	4.36	1.99	6.43

<sup>1</sup> N: Número de pixeles

<sup>2</sup> CI: Cuartil Inferior

<sup>3</sup> CS: Cuartil Superior

<sup>4</sup> DE: Desviación Estandar

**Tabla 16** Análisis de varianza para las diferencias absolutas con los cinco rangos

del "Wetness Index" entre áreas y para las cuatro áreas de muestreo.

Área	SC <sup>1</sup>	GL <sup>2</sup>	CM <sup>3</sup>	SCE <sup>4</sup>	GLE <sup>5</sup>	CME <sup>6</sup>	Prueba F	Probabilidad
Áreas	988673.31	3	329557.77	4791968.26	125322	38.24	8618.76	0
1	48507.78	4	12126.95	3544847.32	38138	92.95	130.47	0
2	26877.66	4	6719.42	303091.50	35283	8.59	782.21	0
3	38320.06	4	9580.01	528455.14	32017	16.51	580.42	0
4	13612.85	4	3403.21	288255.96	19868	14.51	234.57	0

<sup>1</sup> SC: Suma de Cuadrados

<sup>2</sup> GL: Grados de Libertad

<sup>3</sup> CM: Cuadrado Medio

<sup>4</sup> SCE: Suma Cuadrados del Error

<sup>5</sup> GLE: Grados de Libertad del Error

<sup>6</sup> CME: Cuadrado Medio del Error

**Tabla 17** Prueba Duncan “**Wetness Index**”

para la combinación de las diferencias absolutas con los cinco rangos. Entre áreas (a) y para las cuatro áreas de muestreo (b).

a.

Área	Promedio	
1	9.79	a
2	4.14	b
3	3.94	b
4	2.82	c

b.

Área 1		Área 2		Área 3		Área 4	
Rangos	Promedio	Rangos	Promedio	Rangos	Promedio	Rangos	Promedio
4	17.27 a	3	6.96 a	5	8.85 a	4	6.04 a
5	14.80 b	4	6.54 b	4	8.20 b	5	5.90 a
3	13.35 b	5	5.48 c	3	7.35 c	3	5.61 a
2	9.80 c	2	4.60 d	2	4.24 d	1	2.67 b
1	9.36 c	1	3.40 e	1	3.00 e	2	2.54 b

Promedios seguidos por la misma letra no son diferentes ( $P < 0.05$ )

La separación de medias para el **área 1** destacó el índice cuatro como el más alto, entre el cinco y el tres no hubo diferencias, ni entre el dos y uno. La figura 42 revela que el índice uno ocupa prácticamente toda la zona central relegando al dos, que es el segundo en importancia a los extremos sur este y centro oeste.

La prueba Duncan del **área 2** marcó diferencias significativa entre los cinco promedios destacando al índice tres como el más alto, luego al cuatro y luego al cinco (Tabla 17). En este caso el índice uno está desplegado en casi toda el área relegando al índice dos a los canales secundarios y terciarios del drenaje externo (Figura 43).

El **área 3** tuvo una distribución de promedios acorde con la hipótesis de que el índice más alto genera las diferencias absolutas más altas y viceversa (Tabla 17).

Esta área es una mezcla balanceada de los índices uno y dos en el terreno, y aquí cobran importancia relativamente los índices tres y cuatro (Figura 44).

Por último en el **área 4** no hubo diferencias entre tres, cuatro y cinco ni entre uno y dos. La figura del área 4 es clara al mostrar la gran distribución que tiene el índice dos, relegando al índice uno a las crestas de la cimas; índices más altos tienen alguna importancia en el extremo Nor-Este y algo en el Sur-Oeste (Figura 45).

Partiendo de la hipótesis de que a mayor índice mayor diferencia absoluta, se corrieron pruebas de correlación simple, cuyos resultados: Se justifican con los datos de las pruebas Duncan: Las correlaciones fueron positivas y en general con coeficientes entre bajos y muy bajos. Con valores relativamente más altos (0.3) se destacaron las áreas 2 y 3; el coeficiente del área 4 descendió ligeramente (0.2), y para el área 1 prácticamente no se halló correlación (0.09).

### 3.6 PRUEBAS DE CONTINGENCIA PARA CINCO PARES DE VARIABLES

Se estudio el grado de relación entre la geomorfología y el uso; el “Wetness Index” y el uso, y las diferencias entre modelos no editados y editados con uso, geomorfología y “Wetness Index”, mediante pruebas de contingencia utilizando el estadístico Chi cuadrado ( $Ch^2$ ) (Tabla 18). Los resultados permiten establecer, al 1% de probabilidad, que existe dependencia en cada uno de los cinco pares de variables considerados. Es decir, que para cada área la clasificación de uso depende de la clasificación geomorfológica y además tiene preferencias por cierto “Wetness Index”. Así mismo, la edición del MDE elevó o redujo la cota en función del uso, la geomorfología, y el área de estudio.

Las áreas 1 y 3 y las áreas 2 y 4 presentaron respectivamente tendencias similares (Tablas 19 y 20).

Para las áreas 1 y 3, bosque habitó mas en Bakslope e “interfluve” y en el área 3 también hizo presencia en los dos grandes “toeslope”; tuvo preferencias por “Wetness Index” (Tabla 19). Pasto habitó más en “interfluve” y prefirió “Wetness Index” bajos, pero en el área 3 se le halla por igual en ambiente de “Wetness Index” bajos y altos (Tabla 19).

En estas dos áreas la edición del MDE profundizó el relieve (diferencias positivas) en terrenos de bosque y pasto y en la geoforma “footslope” no muy habitada por estos dos usos (Tabla 20), pero también lo elevó (diferencias negativas) en los terrenos de estos dos.

**Tabla 18** Valores de Chi cuadrado ( $\chi^2$ ) para diferentes combinaciones con su nivel de significancia  $P < 0.01$ .

ÁREA	Geomorfología Vs Uso			Wet Index Vs Uso			Uso Vs Diferencias			Geomorfología Vs Diferencias			Wed Index Vs Diferencias		
	Valor	GL <sup>1</sup>	Valor P	Valor	GL <sup>1</sup>	Valor P	Valor	GL <sup>1</sup>	Valor P	Valor	GL <sup>1</sup>	Valor P	Valor	GL <sup>1</sup>	Valor P
1	288.83	9	0.00	205.39	3	0.00	346.82	4	0.00	3563.60	5	0.00	1069.90	2	0.00
2	731.59	9	0.00	399.11	3	0.00	183.53	4	0.00	858.76	5	0.00	356.15	2	0.00
3	628.04	9	0.00	391.70	3	0.00	244.60	4	0.00	4669.80	5	0.00	1742.40	2	0.00
4	970.56	9	0.00	58.41	3	0.00	211.48	4	0.00	2859.60	5	0.00	647.74	2	0.00

<sup>1</sup>GL: Grados de Libertad

**Tabla 19** Porcentajes de aparición de un uso en cada una de las Geoformas y "Wetness Index"

Área	Uso	Geomorfología						Wet Index		
		Shoulder	Shoulder Interfluve	Interfluve	Backslope	Footslope	Toeslope Channel	Footslope Toeslope Channel	1	2
1	Pasto	0.90		11.00	5.21			6.42	15.09	8.46
	Cultivo	0.72		2.32	2.25			3.46	3.31	5.38
	Bosque	3.17		20.43	13.83			28.42	33.55	32.34
2	Pasto		17.20		8.05	5.15	1.69		20.24	11.85
	Cultivo		0.17		0.26	0.32	0.05		0.32	0.48
	Bosque		17.62		15.50	17.64	8.69		25.07	34.38
	R+ SD		3.86		2.08	1.44	0.28		4.60	3.06
3	Pasto	0.63		12.72	8.62			7.05	15.95	13.09
	Cultivo	0.05		0.10	0.50			1.37	0.51	1.53
	Bosque	1.35		14.82	19.21			29.28	22.86	41.82
4	Pasto		15.22		17.90	6.88	3.06		14.82	28.76
	Cultivo		0.04		0.06	0.05	0.08		0.04	0.19
	Bosque		6.48		8.52	6.42	7.46		8.00	20.88
	R+ SD <sup>1</sup>		11.81		10.91	3.29	1.26		10.03	17.28

<sup>1</sup> R + SD: Rastrojo mas suelo desnudo presentaron siempre menores o iguales a uno porcentajes en las áreas 1 y 3.

Para las áreas 2 y 4, Bosque habitó mas en “shoulder”, “interfluve”, “footslope”, “backslope” y en el área 4 cambió a “backslope”, “toeslope”; tuvo preferencias por “Wetness Index” altos (Tabla 19). Pasto fue común en “interfluve”, “shoulder”, “backslope” y prefirió “Wetness Index” altos. Rastrojo y suelo desnudo hicieron relativamente presencia en estas área, habitó principalmente terrenos de “interfluve” y/o “backslope” y/o “shoulder” con ligeras preferencias por “Wetness Index” bajos frente a “Wetness Index” altos.

Aquí la edición del MDE profundizó el relieve (diferencias positivas) en los terrenos de “backslope” pastos y rastrojo (Tabla 20), y solo produjo elevaciones del relieve (diferencias negativas) en los terrenos con rastrojo.

**Tabla 20** Porcentaje de diferencias positivas y negativas para cada tipo de uso, geoforma y “Wetness Index”

Área	Diferencias	Uso				Geoformas						Wet Index			
		Bosque	Cultivos	Pasto	Rastrojo	Suelo Desnudo	Backslope	Channe l	Footslope	Interfluve	Shoulder	Toeslope	1	2	3
1	Positivas	21.78	2.94	10.12	0.42	0.25	7.73	0.47	4.78	18.15	2.10	2.26	22.60	12.40	0.50
	Negativas						13.76	3.00	20.01	16.13	2.79	8.80	30.30	31.30	2.90
2	Positivas	3.33	0.03	2.73	0.59	0.13	1.38	0.04	0.73	4.10	0.19	0.40	6.51	0.32	0.04
	Negativas						24.85	3.52	24.68	29.63	2.83	7.59	73.55	15.60	3.98
3	Positivas	22.05	0.73	10.73	1.49	0.49	10.53	0.26	5.30	16.57	0.82	2.03	29.76	5.54	0.19
	Negativas						17.64	3.55	18.68	10.31	1.18	13.14	40.15	20.82	3.50
4	Positivas	6.48	0.04	9.28	3.75	1.69	6.21	0.26	1.88	9.51	1.82	1.37	16.73	4.04	0.28
	Negativas						27.93	4.73	19.94	11.88	2.72	12.27	46.33	27.29	5.33



## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La comparación global de los modelos sin editar y editados mostró que los cambios de relieve se mantuvieron con alta significancia, o sea que la edición no cambia el patrón del relieve del Modelo Digital de Terreno MDE generado automáticamente (Figura 20 y 21).

La tendencia general de la edición fue a bajar la cota (Figura 22-25), es decir que en el caso de la vegetación la cota cayó desde la copa de los arboles hasta la superficie del suelo; pero especialmente en los sectores occidental y oriental, la edición subió la cota, lo cual solo se puede explicar por reformas a la estructura geomorfológica del terreno, ya que la edición de la vegetación no producen disminución de cota.

Las diferencias (modelo sin editar menos modelo editado) (Figura 36) negativas más altas (-12 a -15 metros) ocurrieron principalmente en las zonas de traslape del mosaico con un 10 % de frecuencia y las positivas más altas (21 a 359 metros) principalmente en la franja Norte y en el Sur Oeste de la imagen con un 10% de frecuencia, relacionado con las topografías de mayor desplazamiento del relieve y con tonalidades de baja resolución. Estos paisajes se convirtieron entonces en las zonas de menos confiabilidad del MDE automático.

Con relación a lo anterior, las áreas 2 y 4 (con relieve más llano) redujeron relativamente el porcentaje de diferencias negativas en la edición, o sea que, frente a las áreas 1 y 3 (con relieve más ondulado), la elevación de la cota no fue muy necesaria debido a una mayor resolución de la imagen.

El bosque y cultivos arbóreos dominaron en el 55% del área de estudio y esto habla de la potencialidad de error en el MDE automático debido a coberturas, sin embargo, como su distribución cambio dentro de la imagen, la proporción del error en el MDE automático fue diferente (Tablas 5,8,10,12).

Al estudiar la imagen en cuatro áreas seleccionadas de acuerdo con el patrón de distribución del uso en el paisaje (Tabla 8 y Figura 23 a 27) se halló que la vegetación arbórea en el área 1, que presenta las mejores características para retener humedad y drenar debido a su geomorfología con predominancia de “interfluve” y “footslope”, produjo diferencias cercanas de 10 metros; en el área 2 con un paisaje equilibrado de “interfluve”s, “footslope” y “backslope” le da a sus terrenos la capacidad para captar drenajes, confiriendo a esta área posibilidades de retener adecuada humedad, las diferencias aquí fueron alrededor de 4 metros; en el área 3 fue alrededor de 5 metros, estando dominada por laderas largas coronadas por “interfluve”s, es un área propicia para el drenaje superficial y los ambientes más secos y en el área 4 con diferencias alrededor de 3.5 metros, área típica de “backslope” de baja inclinación y zonas de “interfluve”, con tendencia a terrenos más secos.

La ubicación del bosque y los cultivos arbóreos cambió de un área a otra, predominando en “interfluve”s en el área 1; en “footslope” en el área 2; en “backslope” en el área 3, y en “backslope” en el área 4 (Tabla 19). Entonces se puede afirmar que el impacto de la cobertura vegetal fue bajo si se tiene en cuenta que en cuatro paisajes contrastantes el cambio promedio de cota osciló entre 4 y 10 metros y el máximo se presentó en sectores aislados, independientemente de la unidad geomorfológica donde se hallasen los árboles.

La influencia de las geofomas y el “Wetness Index” sobre la precisión del MDE automático se estudió solo en las 4 áreas como se aprecia en las tablas 14,15,16, de donde se deduce que su impacto fue moderado y dependiente de la posición

en la región puesto que en el área 4 el error promedio más alto fue cercano a 15 metros y en las tres áreas restantes osciló entre 6 y 8 metros, siendo siempre “channel”, “toeslope” y “footslope” las unidades más influyentes y “shoulder” , “backslope” e interflueves las unidades de menor impacto. Así mismo en los “Wetness Index” superiores a 3 ocurrieron las mayores modificaciones al MDE automático.

En otras palabras, las modificaciones más importantes de cota en la edición estuvieron relacionadas con la estructura del drenaje.

La comparación cualitativa de los dos modelos (reconocimiento e interpretación visual) y cuantitativa (estadística de las diferencias de elevación entre los dos modelos e interacción de estas diferencias con el uso de la tierra y las geoformas), reveló que el sistema Helava® puede proceder de acuerdo con una lógica simple, para la cual posee algoritmos que corrigen la topografía en función del uso bajando la cota (Gasior, 1996) y en función de las geoformas nivelando picos (diferencias positivas) y rellenando depresiones (diferencias negativas) (Nelson y Leclerc, 1999).

El sistema de correlación automática del Helava dejó por error la cota del terreno en el MDE generado automáticamente por encima de la superficie, a una altura que osciló desde unos pocos centímetros hasta aproximadamente 3 o 4 centenares de metros en el peor de los casos, debido a la cobertura vegetal existente a depresiones sin salida para el agua de drenaje.

Sin embargo, al comparar un área sin editar con una editada se comprobó que la edición interactiva tiene una prioridad a todos los niveles, buscarle salida al patrón de drenaje de la cuenca, es decir, unir canales secundarios y terciarios con los principales donde el drenaje está interrumpido y requiere corrección, Nelson y Leclerc (1996). En estos casos ocurrió que la cota del terreno subió en zonas de bosque, para recomponer el paisaje original. Como la correlación de imágenes es un algoritmo que utiliza el software para la autocorrelación o definición de píxeles

iguales en los alrededores (Gasior, 1999) los algoritmos para “rellenar” depresiones y para “nivelar” picos interpolan dentro de un “dominio”, en cuyo interior la orden de relleno produce también incrementos en la altura de los “shoulder”s e interflueves y la orden de nivelación produce ahondamientos “backslope”, “toeslope” y “channel”s, lo cual fué necesario para mantener la continuidad del relieve.

## 5. CONCLUSIONES

En términos generales, la cobertura vegetal no tuvo gran impacto sobre el MDE generado automáticamente; las exageraciones de cota más frecuentes (70%) estuvieron en el rango de 1 a 6 metros.

Bosque, la cobertura más común con 53% del área, fue el tipo de vegetación que produjo las imprecisiones más grandes, en el orden de 21 a 105 metros, pero solamente en las zonas donde dominaba “interfluve” o “backslope” (10% del área).

El impacto de las geoformas y el “Wetness Index” fue moderado pues en los casos extremos la diferencia de cota (sin editar menos editado) osciló entre 5 y 20 metros y en general estuvo entre 2 y 8 metros dependiendo del paisaje.

Las geoformas de más impacto fueron “channel” y “toeslope” con un tercer lugar para “footslope”. Las de menos impacto fueron “shoulder”, “backslope” e “interfluve”.

Los “Wetness Index” de más impacto fueron los superiores a 3 en un rango de 1 a 5.

Hay variación espacial en el modelo de diferencias. Las diferencias negativas que corresponde al 20% de los píxeles del modelo, se concentraron más en el extremo

Nor-Oeste y desde allí se difundieron a toda el área. Las diferencias positivas (el 80%) restante de las diferencias, se concentraron mas en los sectores Sur-Oeste y Sur y desde allí se difundieron al resto del área.

Las diferencias máximas se ubicaron principalmente en las franjas de traslape del mosaico de la fotografías aéreas; En el Sur-Oeste y en el borde superior.

Las diferencias negativas más comunes oscilaron entre -2 y -1 metros (60%), y las positivas más comunes ente 1 y 6 metros (70%).

El rango máximo negativo fue de -12 a -105 metros (10%) y el máximo positivo fue de 15 a 359 metros (10%).

La variación espacial es estructurada, dependiente de la escala, porque a 1:100.000 su origen estuvo relacionado con cambios en la resolución dentro del mosaico, mientras que a 1: 200.000 se constató que los elementos del paisaje influyeron sobre ella.

Se tuvieron en cuenta tres posibles causas de la estructura espacial de las diferencias: El uso de la tierra, las geoformas y el patrón de drenaje.

El modelo sin editar tuvo los mayores errores en las áreas con bosque y cultivos arbóreos los cuales frecuentaron más las zonas de valle (“channel”, “toeslope”, “footslope”) y los “Wetness Index” más altos.

La zona de traslape no se investigó como un factor de impacto porque no era el objetivo, pues una de las causas es la diferencia en las tonalidades de las fotografías aéreas, al igual que la unión de las dos fajas de fotografías. Se incluyó para mostrar que estos problemas no tienen relación con la geomorfología.

La zona con estas características se puede corregir mediante técnicas de filtrado (Nelson y Leclerc, 1999) y una vez se minimiza o remueve del MDE, el siguiente paso es ajustar las cotas a su valor real.

El siguiente diagrama de flujo es una metodología sugerida para determinar el impacto de la cobertura vegetal y hacer más eficiente la edición del MDE generado automáticamente.

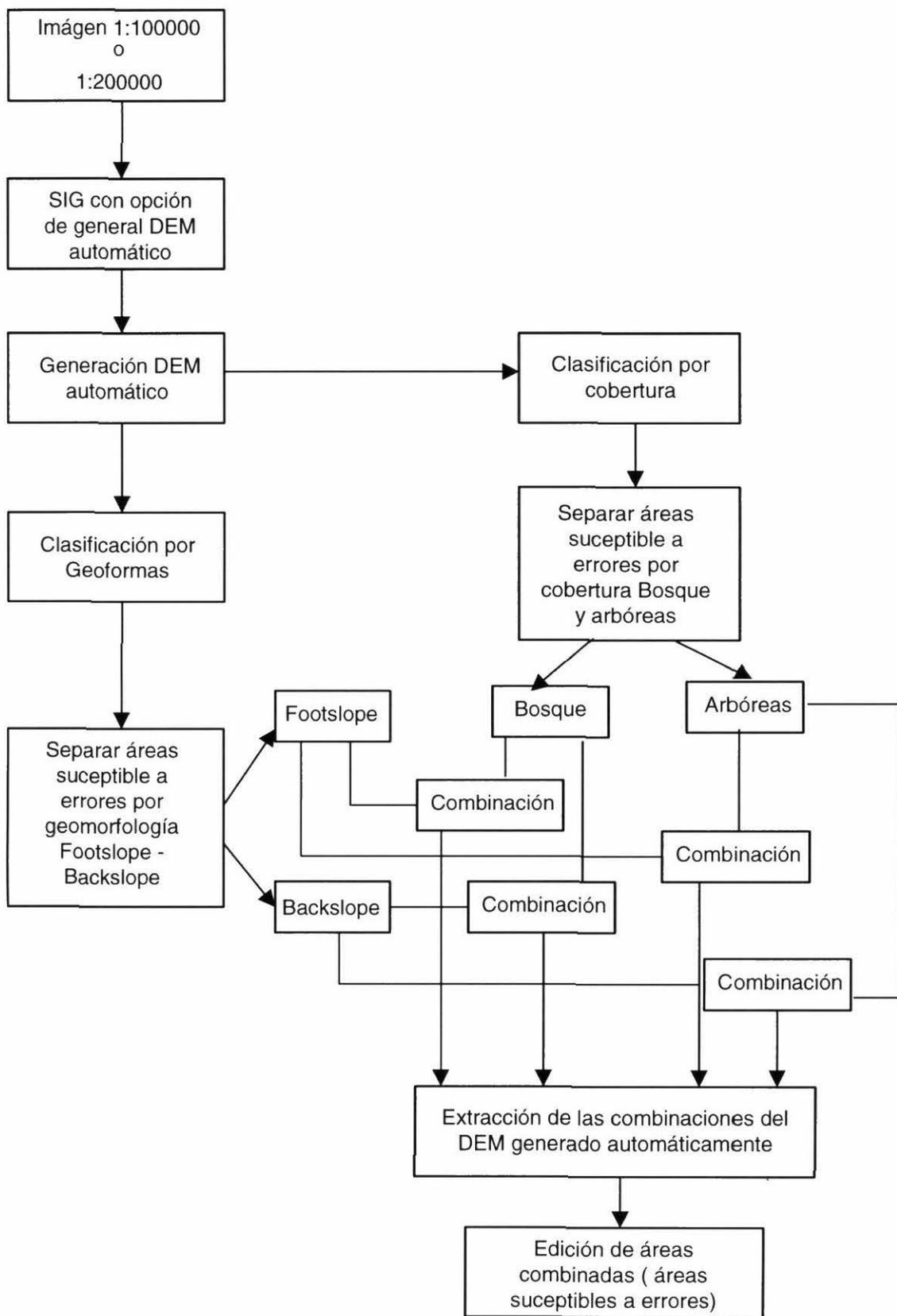


Figura 46 Metodología propuesta para una edición más eficaz del MDE automático.

## BIBLIOGRAFÍA

ABAD, Javier. Ley de Lambert. Introducción al Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales. 2000. Departamento de Ciencias de la Computación. Universidad de Granada. Granada España.

ALTIERI, M.A. and M.K. ANDERSON 1986. An Ecological Basis for the development of alternative Agricultural System for Small Farmers in the Third World. J. Alternative Agric. 1:30-38.

ALTIERI, Miguel A, División de Control Biológico – Universidad de California. Berkeley Andrés Yurjevic, Centro de Educación y Tecnología, Santiago, Chile. La agroecología y el desarrollo rural, sostenible en América Latina. <http://clades.org>

BACHER Uwe. Experimental Studies into automated generation on the DPW770. 1999. Universitaet der Bundeswehr Muenchen. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 4, pp 35-41.  
[http://www.bauv.unibw-muenchen.de/institute/inst10/people/bacher/isprs\\_commlV\\_bacher.pdf](http://www.bauv.unibw-muenchen.de/institute/inst10/people/bacher/isprs_commlV_bacher.pdf)

BADER Maaïke. Application of elevation data vegetation studies. Centre for geoinformation, 1999. <http://www.geoinformatie.nl/cgi/education/courses/k075219/results1999/007.htm>

BARLING, Rowan, MOORE, Ian, GRAYSON, Rodger. A quasi-dynamic "Wetness Index" for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. 1993. Centre for Environmental Applied Hydrology. Department of Civil and Environmental Engineering.. University of Melbourne. Parkville, Victoria, Australia.

BEVEN, Keith. TopModel. 2001. Department of Hidrology and Fluid Dynamics, Lancaster University, Wiley, Chichester. UK.

<http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/beven2000/Beven2000.html>

BEVEN, K.J., Kinematic subsurface stormflow, Water Resour. Res.,17(5), 1419-1424, 1981.

BOLAÑOS, Sandra. Generación de Modelos Digitales de Elevación con Imágenes de Radarst por el Método Radargrametrico, Proyecto de Trabajo de Grado. Universidad del Valle. Cali-2000. <http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar>

BOCCO, Gerardo. Sistemas de Informacion Geografica. 1999. Universidad Nacional de Mexico. Ciudad de Mexico.

<http://www.jornada.unam.mx/1999/abr99/990405/cien-bocco.html>

BURROUGH, Peter and McDONELL, Rachel. Principles of Geographical Information System, Spatial Information Systems and Geostatistics. 1998. Oxford University.

BYNE, Sarah. Technical Report. An evaluation of the accuracy of MDE-derived altitude and slope values. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT – 1997. Palmira Valle.

CARLSON, Toby N, TRACI, Arthur, and RIPLEY, David A. J. Satellite Investigations of Urban Spraw. 1997. Department of Meteorology / Earth System Science Center. The Pennsylvania State University. USA. <http://www.emsei.psu.edu/centers/LURP/>

<http://www.essc.psu.edu/~dajr/chester/index.htm>

CASANOVA, José Luis y SANZ JUSTO, Julia. Teledetección usos y aplicaciones. Universidad de Valladolid. España. 1997.

CONACHER, A.J., DALRYMPLE, J.B., 1977. The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma* 18, 1–153. 675.

<http://www.elsevier.com/locate/geoderma>

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL CIAT, Proyecto de las América, Alternativas Sustentables para el Manejo de Cuencas en Laderas, Palmira Valle, 2001.

CERON, Patricia. Uso, Manejo y Clasificación Local de Suelos entre Agricultores de la Microcuenca Potrerillo, Cauca. Proyecto de grado, 20001. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de postgrados. Palmira Valle.

DANA, Peter H. Global Positioning System Overview, 2000. Department of Geography, University of Texas at Austin, USA.  
[http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html)

DAVIS, Jhon C. Statistic and data análisis in geology, 1986. Segunda Edición. Editorial Jhon Wiley and Sons, 646 páginas. USA.

DOBOS, Endre. MICHEELI, Erika. Baumgardner Marion F. BIEHL Larry. HELT Todd. Use of combine digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. 1999. Geoderma. <http://elsevier.nl/locate/geoderma>

ESRI, Library. Glossary of GIS Terms, 2002.  
<http://www.esri.com/library/glossary/glossary.html>

ERDAS, Imagine. Software Erdas. Miami.  
[http://www.idasnet.com/IDASNET.esp/Contenidos/Productos/Software/ERDAS/esp\\_erdas\\_soft.htm](http://www.idasnet.com/IDASNET.esp/Contenidos/Productos/Software/ERDAS/esp_erdas_soft.htm)

FELICÍSIMO, Ángel M., Modelos Digitales de Terreno, 1999. 122 paginas.  
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>

FERAUGE, Orban, RASSON J.P., BERTHOLET V. A Behavioral Approach for Classification in Remote Sensing and Photogrammetry. Laboratory GEOSATEL, F.U.N.D.P. University, Namur, Belgium. 1998.  
<http://www.fundp.ac.be/~geosatel/survey.html>

GASIOR, Dariusz. Automatic Derivation of a DTM with the Helava System. Laboratory of Photogrammetry. 1996. Swiss Federal Institute of Technology – Switzerland.  
[http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/workshop/wks96/art\\_3\\_5.html](http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/workshop/wks96/art_3_5.html)

GIS by ESRI. Arcview GIS 3.2. The Geographic Information System for Everyone. 1996. Environmental System Research Institute, Inc. United State of America.

GUTIERREZ PUEBLA, Javier y GOULD, Michael. SIG: Sistemas de Información Geográfica. España. Editorial Síntesis. 1994

HAINING, Robert. Designing spatial data análisis modules for geographical information systems. En Fotheringham and Rogerson, Spatial Análisis and GIS. Great Britain. Taylor and Francis. 1995.

HURTADO, Martha, RUBIANO, Jorge E., Identificación Agroecológica de necesidades de Investigación en el Norte del Departamento del Cauca. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Santa fe de Bogota, 1992.

KIRKBY, M.J., and R.J. CHORLEY, Throughflow, overland flow aand erosion, Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol., 12, 5-2, 1967.

KREVELD, Marc Van, Algorithms for Triangulated Terrains, 1997. Depto. of Computer Science. Utrech University, The Netherland.

<http://citeseer.nj.nec.com/update/126071>

LAND COVER AND REMOTING SENSING, Deriving the Classification Product, 1999. Department of Geography, University of Maryland, College Park, Maryland.

<http://www.geog.umd.edu/landcover/8km-map.html>

LIDA, T., A hydrological method of estimation of topographic effect on saturated throughflow, Trans.Jap.Geomorphol. Union, 5(1), 1-12, 1984.

MORE, I. D., and R. B. Grayson, Terrain based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data, *Water Resour. Res.*, 27(6) 1177-1191. 1991.

PALLARIS, Koulla. *Micro-Watershed Characterisation and Classification: a methodological guide to identifying similar catchments for field research.* CIAT-Palmira, 1988.

PALLARIS, Koulla. *Terrain Modelling for Erosion Risk Assessment in the cabuyal River Catchment.* International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), 2000. Cali Colombia.

<http://www.kcl.ac.uk/kis/schools/hums/geog/adveemm/vol1no1/pallabs.html>

PARK S.J, MCSWEENEY K., LOWERY B., Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization, Marzo 2000. Department of Soil Science, University of Wisconsin, Madison WI, USA

<http://www.elsevier.com/locate/geoderma>

PERLITSH WECHSLER, Suzanne, ( MS, Ph.D. Candidate, BR). *Digital Elevation Model (MDE) Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters.* 1999. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. Syracuse, NY 13210.

<http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap262/p262.htm>

PUENTE, María Ines, *Aplicación de procesamiento de imágenes satelitales en el estudio de los procesos de erosión hídrica en la región Pampa Ondulada.* Boletín

Edafomática No. 19 – Octubre de 1999. Buenos Aires, Argentina.  
<http://suelos.inta.gov.ar/Edafomatica/edafo19.htm>

QUIMING Zhou, GIS Applications, Review of basic GIS Concept. 1999. School of Geography, University of New South Wales, Sydney, Australia.  
<http://geog.hkbu.edu.hk/QZone/Teaching/geog3142.html#Lectures>

RAPER, Jonathan. Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems, Department of Geography, Birkbeck college, University of London. Taylor and Francis. 1989.

RINCÓN, Mauricio. Validación de Modelos de Elevación, Proyecto Trabajo de Grado. 1995. Universidad del Valle, Cali Colombia.

STATASOFT, Inc. (2001). Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft.  
<http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>

SOCET set, GDE System Inc., User Manual Helava Associates Incorporated. versión 3.2. 1997. USA.

KERSTEN, Thomas y O'SULLIVAN Willie. Digital Aerial Triangulation with the Helava Automated Triangulation System. 1996. Regensdorf-Watt, Switzerland.  
[http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/workshop/wks96/art\\_2\\_3.html](http://dgrwww.epfl.ch/PHOT/workshop/wks96/art_2_3.html)

U.S Department of the Interior, U.S. Geological Survey. USGS, National Mapping Program Standards, Digital Elevation Model Standards. 2001.

<http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/MDEstds.html>

WEIBEL, R. And HÉLLER, M., Modelling the Third Dimension: Digital Terrain Models. 1991. Longman Scientific & Technical, England.

<http://geog.hkbu.edu.hk/QZone/Teaching/geog3142.html#Lectures>

WOOD, Joseph, The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models. *Ph.D. Thesis, 1996*. Department of Geography, University of Leicester. Leicester, UK. <http://www.geog.le.ac.uk/jwo/index.html>

NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER, REMOTE SENSING. Global Change Database, vol.1, , Colorado, 1992.

<http://www.geografforlaget.dk/course/MDEoeng/basic/tele1.htm>

<http://www.geografforlaget.dk/course/MDEoeng/basic/digbild.htm#korrektion>

KRZANOWSKI, R. M., PALYLYK, C. L. and Crown, Gis Dictionary – Search Results. 2002. Association for Geographic Information. GIS World Inc.

<http://www.geo.ed.ac.uk/agidexe/term?44>