

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

**Clasificación Automática de Unidades de Relieve a partir de
Variables Topográficas con fines de Planificación Territorial en
la cuenca del Río Napo**

DOMINGO RAFAEL CASTRO MACÍAS

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Magister en Ciencias de Información Geográfica

Quito, Junio 2012

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Postgrados**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Clasificación Automática de Unidades de Relieve a partir de
Variables Topográficas con fines de Planificación Territorial en
la cuenca del Río Napo**

Domingo Rafael Castro Macías

Richard Resl. PhD(c).,
Director de Tesis

Stella de la Torre, Ph.D.,
Decana del Colegio de
Ciencias Biológicas y Ambientales

Victor Viteri Breedy, Ph.D.,
Decano del Colegio de Postgrados

Pablo Cabrera
Profesor de Maestría UNIGIS

Quito, Junio 2012

© Derechos de autor

Domingo Rafael Castro Macías

2012

RESUMEN

En el Ecuador la generación de información confiable y actualizada que permita la planificación y gestión del uso del territorio a escala nacional y subnacional es fundamental, en este contexto el presente estudio ha priorizado la generación de un modelo de unidades de relieve como un aporte para los planes de ordenamiento territorial en la cuenca del Rio Napo.

La construcción del modelo de unidades de relieve se basa en la geomorfología cuantitativa, que es la descripción de unidades tridimensionales en función de su forma, tamaño volumen y topografía (morfometría), elementos que generan un relieve.

Para modelar, analizar, delinear y visualizar estos elementos tridimensionales, se obtuvo variables topográficas (índices topográficos) de forma automática a partir de un modelo digital del terreno el cual es el principal insumo para el estudio, los cuales son clasificados en función de un sistema de clasificación de unidades de relieve mediante una aplicación SIG (sistema de información geográfica) y calibración de campo.

ABSTRACT

In Ecuador, the generation of reliable and updated information to enable planning and land use management at national and sub national levels is essential, in this context, the present study has prioritized the creation of a model relief units as input for land use plans in the basin of the Rio Napo.

The construction of the relief pattern units is based on quantitative geomorphology which is the three-dimensional description of units depending on their shape, size and topography volume (morphometry), generating relief elements

To model, analyze, and visualize these elements delineate three-dimensional, topographic variables was obtained (topographic index) automatically from a digital terrain model which is the main input for the study, which are classified according to a system classification of relief units by applying GIS (geographic information system) and field calibration.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
TABLA DE CONTENIDO.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	12
2.1. Modelo digital del terreno.....	12
2.2. Modelos digitales del terreno disponibles para el estudio	13
2.3. Comparación de los modelos	16
2.4. Geomorfología cuantitativa	20
2.5. Índices topográficos	21
2.6. Generación de índices topográficos.....	26
2.7. Método de clasificación automática.....	27
3. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE UNIDADES DE RELIEVE.....	29
3.1. Macrorelieve	30
3.2. Mesorelieve	32
4. MODELO CARTOGRÁFICO	35
5. ÁREA DE ESTUDIO	37
6. METODOLOGÍA	39
6.1. Modelo Digital del terreno (MDT).....	39
6.2. Modelamiento Topográfico.....	40

6.4.	Clasificación Automática	43
6.5.	Asignación Temática.....	47
6.6.	Interpretación de Unidades Temáticas	49
6.7.	Análisis Estadístico Zonal	55
7.	RESULTADOS.....	57
8.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	59
9.	CONCLUSIONES.....	66
11.	BIBLIOGRAFIA.....	69
12.	GLOSARIO	71
13.	ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo SRTM	13
Figura 2. Modelo ASTER	14
Figura 3. Modelo IGM	15
Figura 4. Perfil Modelo SRTM.....	16
Figura 5. Perfil Modelo ASTER.....	17
Figura 6. Perfil Modelo IGM	18
Figura 7. Perfil topográfico Volcán Sangay.....	19
Figura 8. Representación del relieve en forma de malla	20
Figura 9. Modelamiento Topográfico.....	21
Figura 10. Esquema de Curvatura	24
Figura 11. Ejemplo de una clasificación no supervisada	27
Figura 12. Modelo Cartográfico	36
Figura 13. Área de Estudio	37
Figura 14. Provincias dentro del área de estudio.....	38
Figura 15. MDT en 3D.....	39
Figura 16. Calculo de azimut y elevación del sol	40
Figura 17. Modelo Topográfico Multivariante	41
Figura 18. Análisis de componentes principales	43
Figura 19. Clasificación automática (ISODATA).....	45
Figura 20. Clasificación filtrada (<i>smoothing, aggregation</i>)	46
Figura 21. Puntos de calibración de unidades de relieve.....	49

	10
Figura 22. Interpretación de unidades de relieve	50
Figura 23. Información levantada en campo en ambiente SIG	51
Figura 24. Hipervínculo en ambiente SIG	52
Figura 25. Interpretación 3D en ambiente SIG	53
Figura 26. Imagen RapidEye (Fuente: Ministerio del Ambiente)	53
Figura 27. Imagen Landsat en 3D	54
Figura 28. Unidades de Relieve interpretadas y calibradas	55
Figura 29. Ejemplo del análisis estadístico Zonal	56
Figura 30. Macrorelieve en la zona de estudio	59
Figura 31. Mesorelieve en la zona de estudio	60
Figura 32. Macrorelieve en la provincia de Sucumbíos	61
Figura 33. Mesorelieve en la provincia de Sucumbíos	61
Figura 34. Macrorelieve en la provincia de Orellana	62
Figura 35. Mesorelieve en la provincia de Orellana	62
Figura 36. Macrorelieve en la provincia de Napo	63
Figura 37. Mesorelieve en la provincia de Napo	63
Figura 38. Macrorelieve en la provincia de Pastaza	64
Figura 39. Mesorelieve en la provincia de Pastaza	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Leyenda de Unidades de Relieve	29
Tabla 2. Muestra de un Análisis Estadístico Zonal	56

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las formas del relieve a partir de un modelo digital de elevación permiten conocer las características del suelo; siendo uno de los factores determinantes en la planificación del territorio. La tierra sólida constituye la plataforma estable que sirve de sustrato para el mantenimiento de la capa biótica y es modelada por sus relieves. Estas características del paisaje, que incluyen montañas, cordilleras, serranías, llanuras, entre otras; aportan otra dimensión al medio físico y proporcionan información relevante para el ordenamiento territorial. A escalas continentales, regionales y de paisaje las formaciones geológicas también influyen en los factores ambientales como la precipitación, temperatura, humedad, protección de disturbios o generación de disturbios que afectan fuertemente en el tipo de organismos que pueden establecerse en una zona dada (Báez 2010), siendo de vital importancia las unidades de relieve para la planificación y gestión del territorio.

Por ejemplo en ciertas regiones la forma del terreno tiene especial relevancia en la distribución espacial de los tipos de vegetación por su influencia en el tipo de agua de inundación y la frecuencia de estas (ej., zonas pantanosas, bosques inundables), así como en la gestión de riesgos ya que en zonas montañosas el relieve del terreno impide que los ríos tengan áreas de inundación extensas, por el contrario, en las tierras bajas como la Amazonía, dominadas por relieves suaves, la capacidad de inundación de los ríos es más amplia y por lo tanto su efecto en inundaciones adquiere una relevancia mayor.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Modelo digital del terreno

Un modelo digital de terreno (**MDT**) puede definirse como una representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas x, y, z respecto a un sistema de georeferenciación conocido (Miller y Laflamme 1958).

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo. Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente raster) que representan distintas características de la superficie terrestre, (Felicísimo, 1994), no únicamente las alturas, sino también pueden ser otras variables cuantitativas como precipitación, temperatura, pH del suelo, etc. A pesar de aquello para el presente estudio se prefiere limitar el MDT como una representación de alturas.

2.2. Modelos digitales del terreno disponibles para el estudio

Modelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

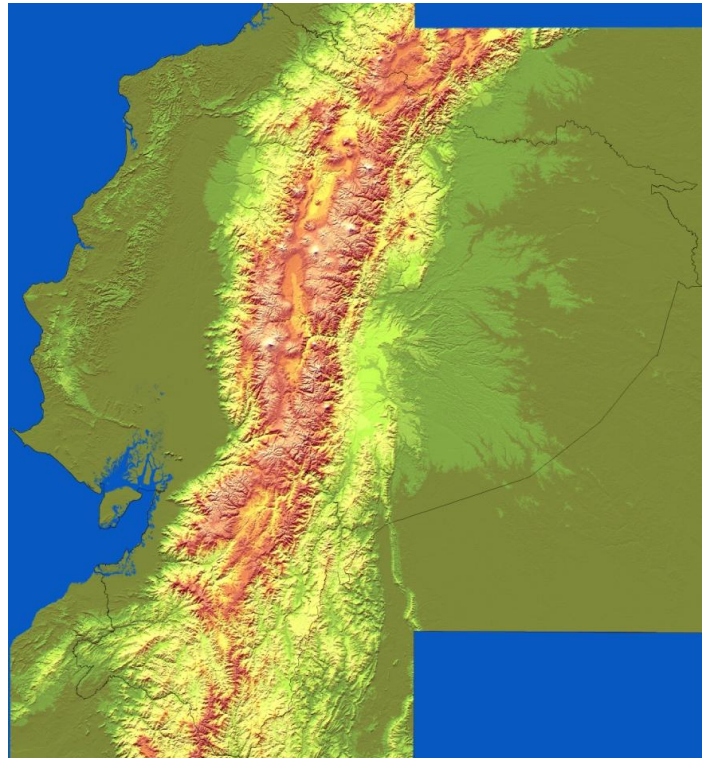


Figura 1. Modelo SRTM

La misión topográfica *SRTM* fue una misión para obtener un modelo digital de elevación de la zona del globo terráqueo entre 56 °S a 60 °N, de modo que genere una completa base de cartas topográficas digitales de alta resolución de la Tierra. (NASA, 2001).

El SRTM consiste en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo de la nave *shuttle endeavour* durante los 11 días de la misión STS-99 de febrero del año 2000. Para adquirir los datos de elevación topográfica estereoscópica, el SRTM llevaba dos reflectores de antenas de radar. Cada reflector-antena estaba separado del otro 60 metros gracias a un mástil que extendía la anchura del shuttle en el espacio. La técnica empleada conjuga software interferométrico con radares con anchos sintéticos (radar de apertura

sintética - SAR) en sus antenas reflectoras. Tiene una resolución espacial de 90 metros (3 arcosegundo). (NASA, 2001).

Modelo ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

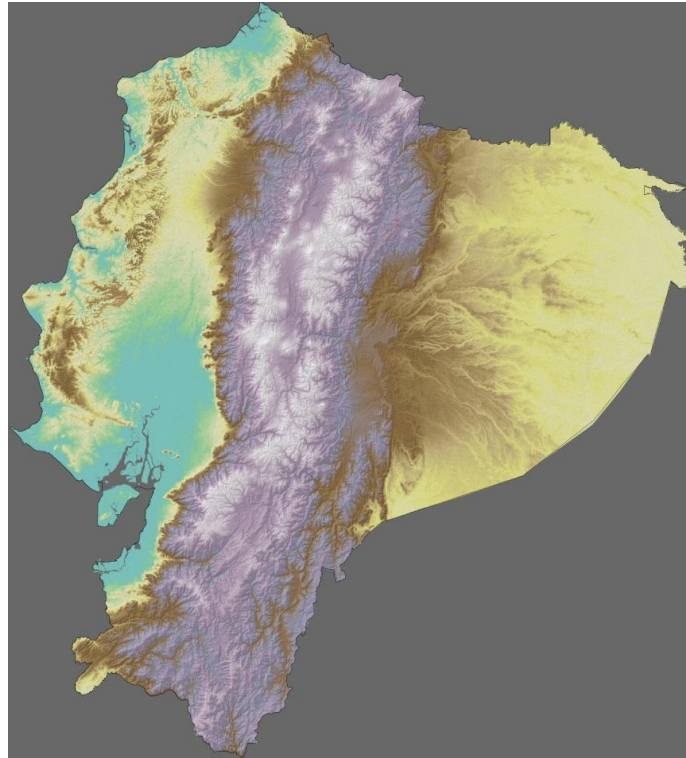


Figura 2. Modelo ASTER

El Ministerio de Economía y Comercio del Japón y la NASA ponen a disposición de todo el mundo la primera y segunda versión del *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) un Modelo Digital de Elevación producido a partir de los datos estereoscópicos obtenidos por el sensor ASTER a bordo del satélite TERRA. (NASA, 2001).

El ASTER GDEM (*Global Digital Elevation Map*) es generado con los datos estereoscópicos obtenidos mediante la banda del infrarrojo de onda corta (0.76 μ m a 0.86 μ m, Banda 3n y 3b de ASTER), lo que requirió enfrentar las limitaciones por coberturas de nubes y otras alteraciones atmosféricas,

demandando un mayor tiempo de procesamiento y edición de los datos, sin embargo se cuenta ahora con una resolución espacial superior al modelo SRTM, pues el ASTER GDEM cuenta con un píxel de 30 metros. (1 arcosegundo) con una cobertura del 99% de la superficie terrestre. (NASA, 2001).

Modelo generado por el IGM (Instituto Geográfico Militar)

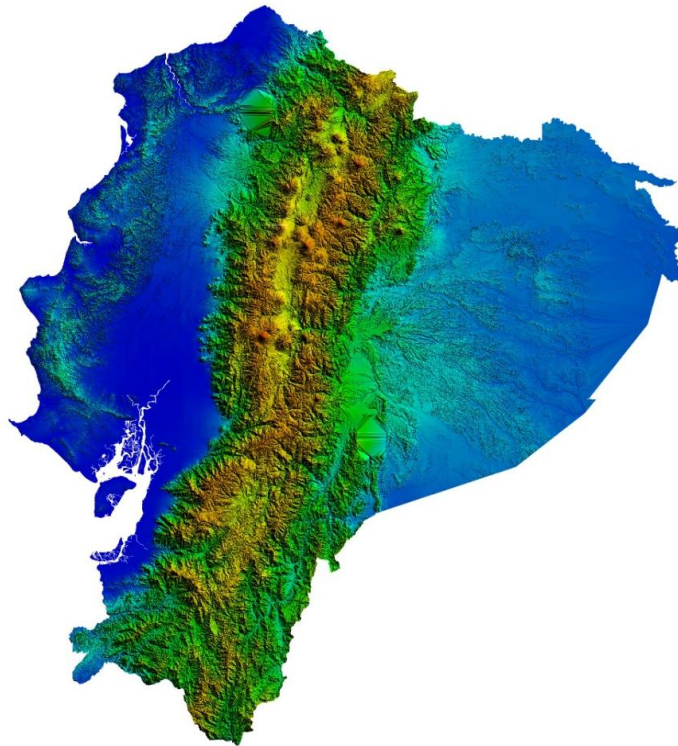


Figura 3. Modelo IGM

El modelo generado por el Instituto Geográfico Militar (IGM) fue construido a partir de curvas de nivel y puntos acotados provenientes de la restitución aerofotogramétrica, escala 1:50.000, correspondiente a la topografía del país. Se realizó una interpolación tin y posteriormente se exportó a formato grid, con un tamaño de píxel de 30 metros. (IGM, 2011).

2.3. Comparación de los modelos

En la representación cartográfica de las unidades de relieve es necesario analizar la calidad de los datos que servirán de insumos para generar la información; para este caso se realizó un proceso de comparación estableciendo la calidad de los modelos numéricos del terreno, con el fin de identificar posibles vacíos de información, y de esta manera determinar el modelo que mejor se ajuste en el mapeo de las unidades.

Para el análisis del modelo se utilizó procesos automáticos que permitieron identificar la calidad de los datos mediante la obtención de perfiles topográficos, donde se pudo observar la variación de la altitud en un transecto en ciertas zonas y de esta forma detectar anomalías en el valor de los píxeles.

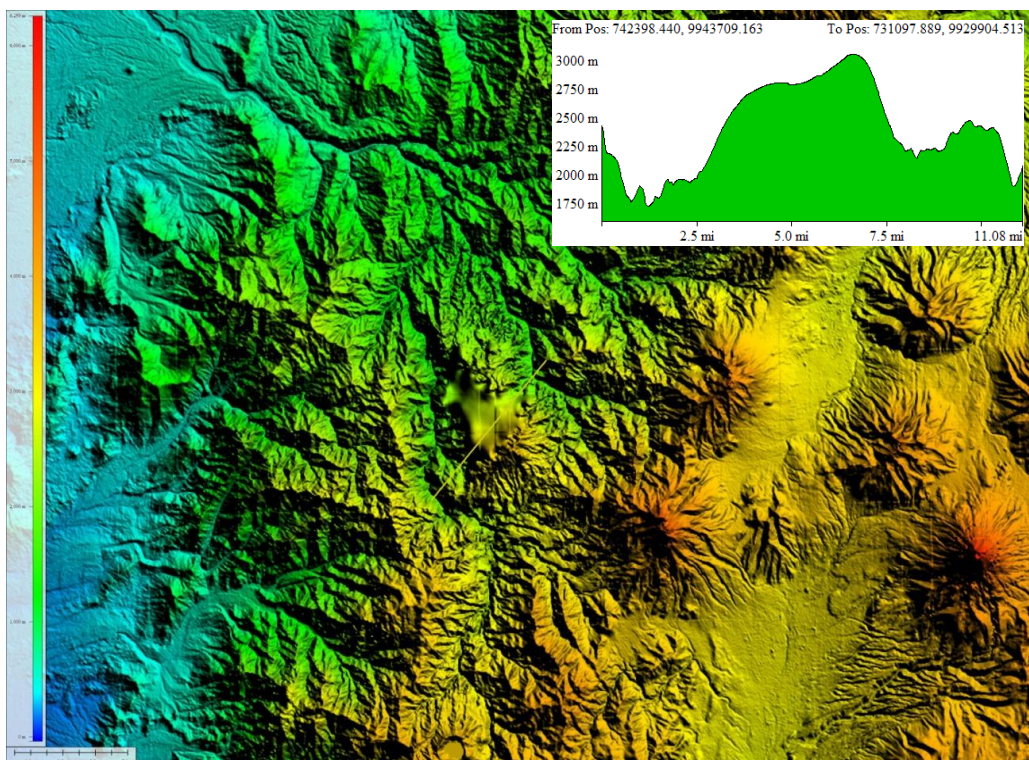


Figura 4. Perfil Modelo SRTM

En la figura 4. vemos una zona interpolada en la cordillera de los Andes cerca al sector de Machachi para el modelo SRTM, en donde se pierde cantidad de información debido a que la interpolación de pixeles vecinos en una zona montañosa da como resultado una superficie plana. Por tal razón esta zona no representa un relieve verdadero, lo que sin duda va a generar errores, sin embargo estas anomalías se pueden corregir, además de este error también se encontró alteraciones en la línea de costa.

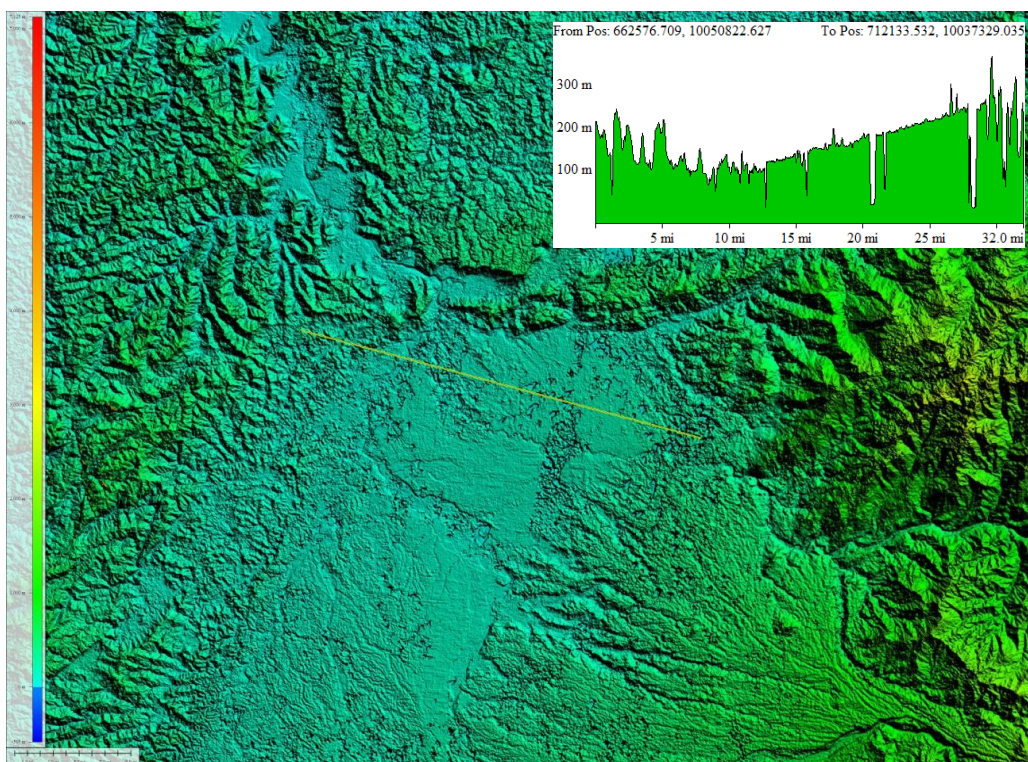


Figura 5. Perfil Modelo ASTER

Como se muestra en la figura 5., en donde se identificó los vacíos de información del modelo ASTER, los mismos que están distribuidos en toda la superficie. El perfil es en la zona de Golondrinas límite entre las provincias de Esmeraldas y Santo Domingo de los Tsachilas, aquí se puede visualizar un determinado número de pixeles que tienen un valor muy alejado a la realidad. Debido a la gran cantidad de estas anomalías y en función de tiempo se vuelve

complicado el tratar de corregir estos vacíos de información, por lo que se decidió descartar el modelo ASTER para la representación de las unidades de relieve.

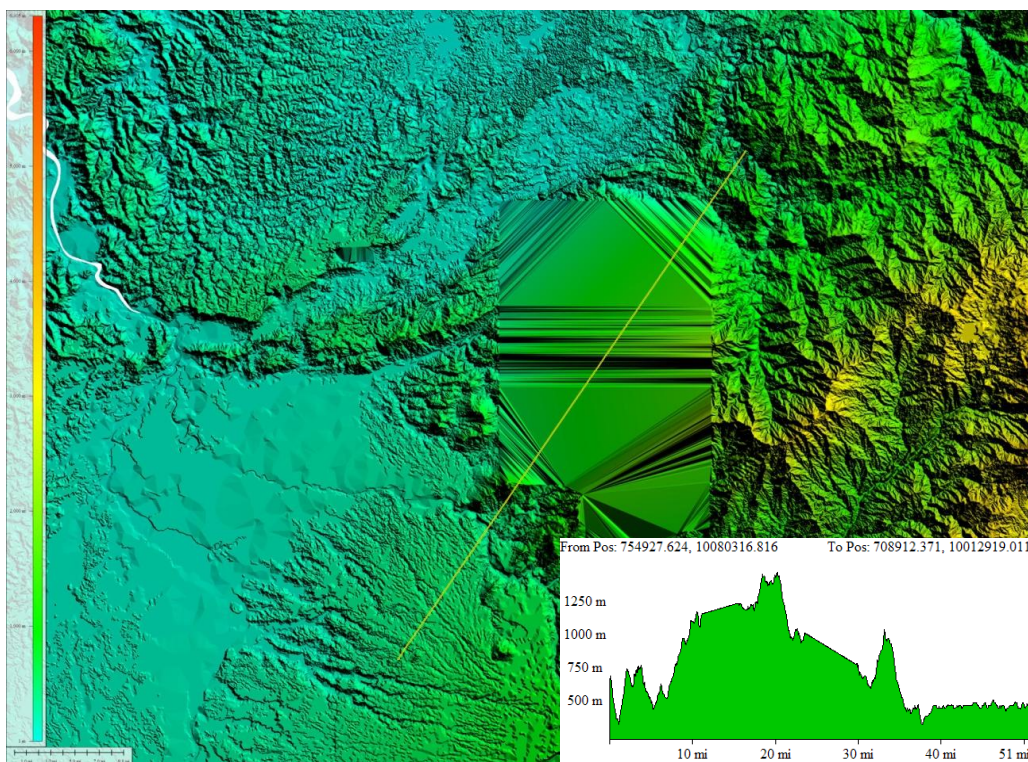
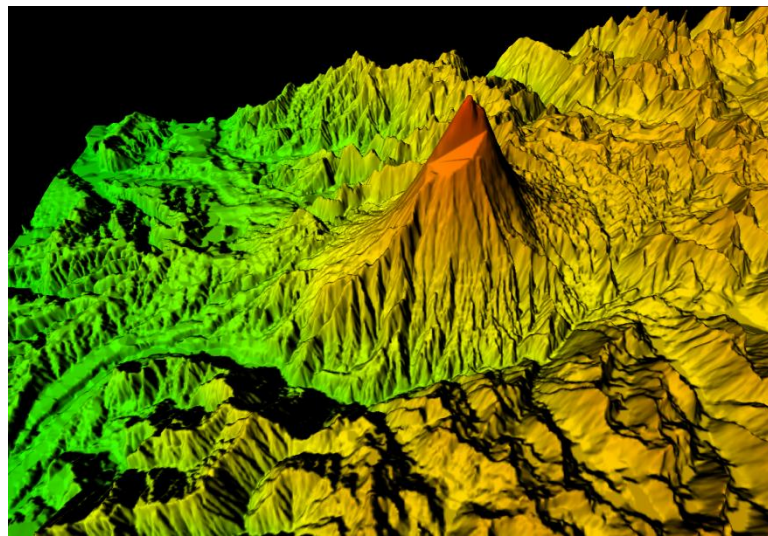
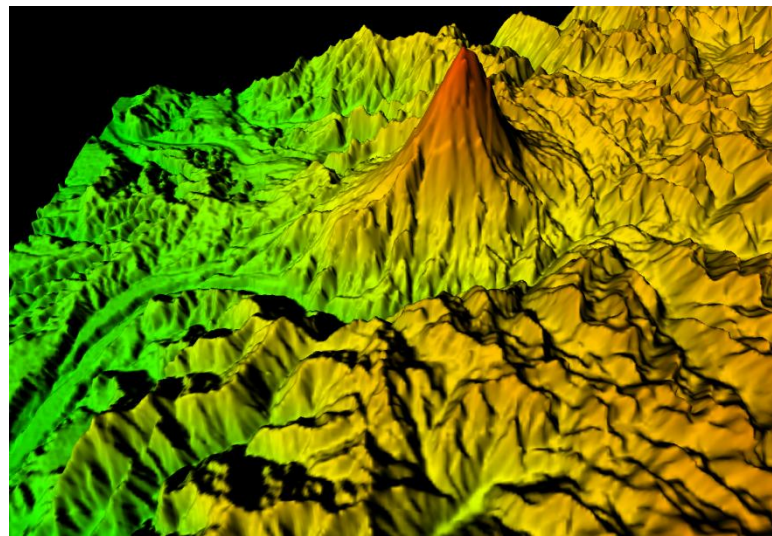


Figura 6. Perfil Modelo IGM

En la figura 6. se aprecia la pérdida de gran cantidad de detalle del relieve, debido a que no se cuenta con información 1:50.000 en varias zonas del país como es el caso que presentamos correspondiente al sector limítrofe entre el cantón Eloy Alfaro y el cantón Cotacachi, además en las zonas que si existe información la representación del relieve es deficiente lo que hace que el modelo sea muy alejado de la realidad, por esta razón no se puede delinear las unidades de relieve ni los índices topográficos para aplicaciones hidrológicas como las que busca el presente estudio.



Volcán Sangay
Modelo IGM



Volcán Sangay
Modelo SRTM

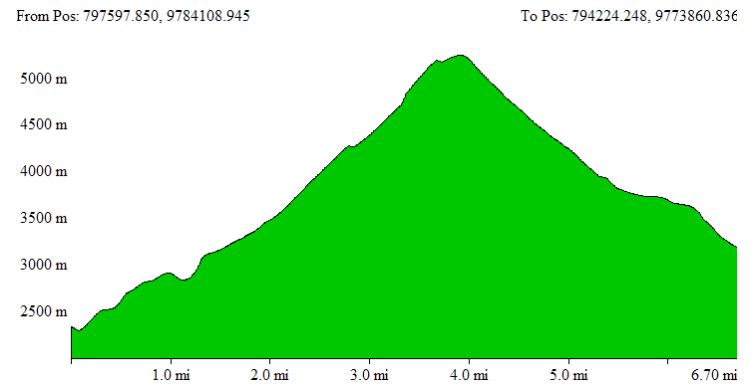
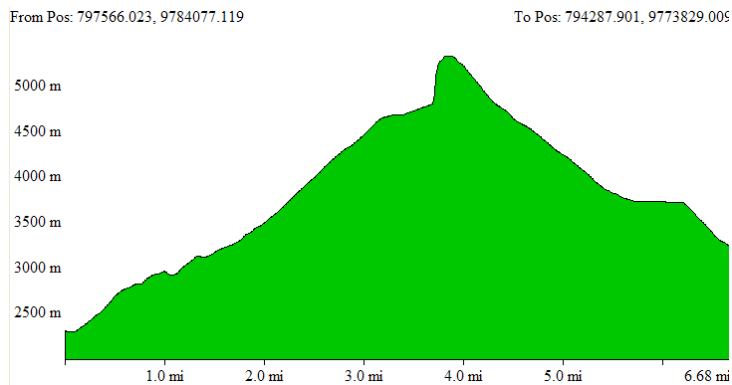


Figura 7. Perfil topográfico Volcán Sangay

Luego del análisis de comparación entre los tres diferentes modelos digitales del terreno disponibles, se seleccionó el Modelo **SRTM** al ser el modelo de mayor calidad y el que mejor se ajusta como insumo para la generación de las variables topográficas, las pequeñas anomalías en el valor de los píxeles serán corregidas para disminuir el error en los siguientes procesos de extracción de información a partir del modelo digital del terreno.

2.4. Geomorfología cuantitativa

El diseño del presente estudio se basa en el concepto de la geomorfología cuantitativa que describe las formas del relieve como elementos tridimensionales de la superficie de la tierra tomando en cuenta su forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que van desde paisajes a gran escala como llanuras y montañas a elementos individuales como valles y colinas (Blaszczynski 1997, p. 183)

El estudio de geoformas reconoce la importancia del relieve como uno de los factores que controlan la distribución de los ecosistemas, gestión y prevención de riesgos y ordenamiento territorial a múltiples escalas.

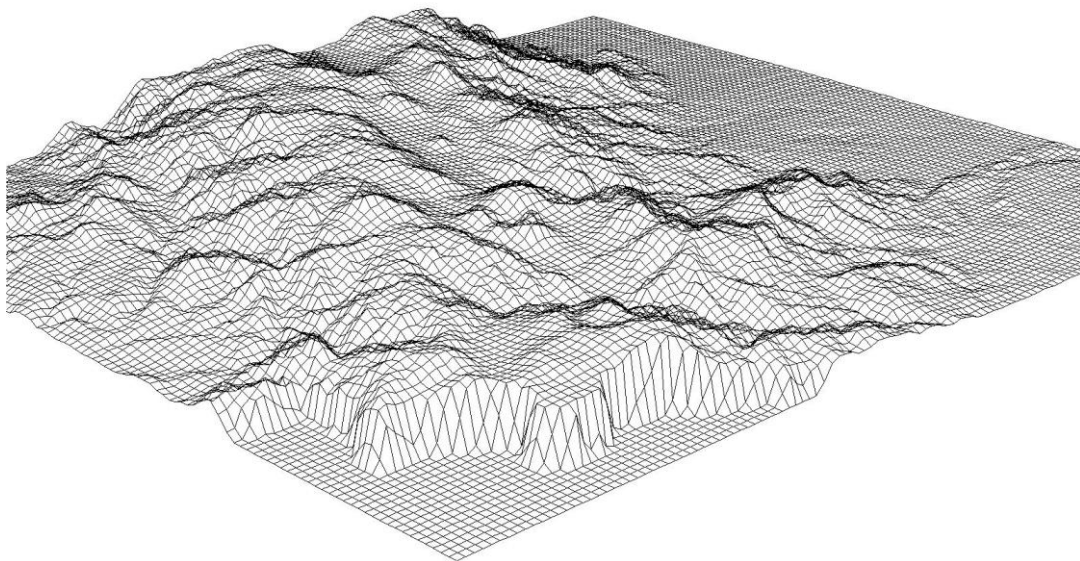


Figura 8. Representación del relieve en forma de malla

2.5. Índices topográficos

Tradicionalmente, la información topográfica y geomorfológica ha venido haciéndose a partir de mapas topográficos y a través de la fointerpretación de fotografías aéreas, para este estudio se realizará el análisis a través de procesos automáticos para la generación de la información a través de índices topográficos o también llamadas variables topográficas

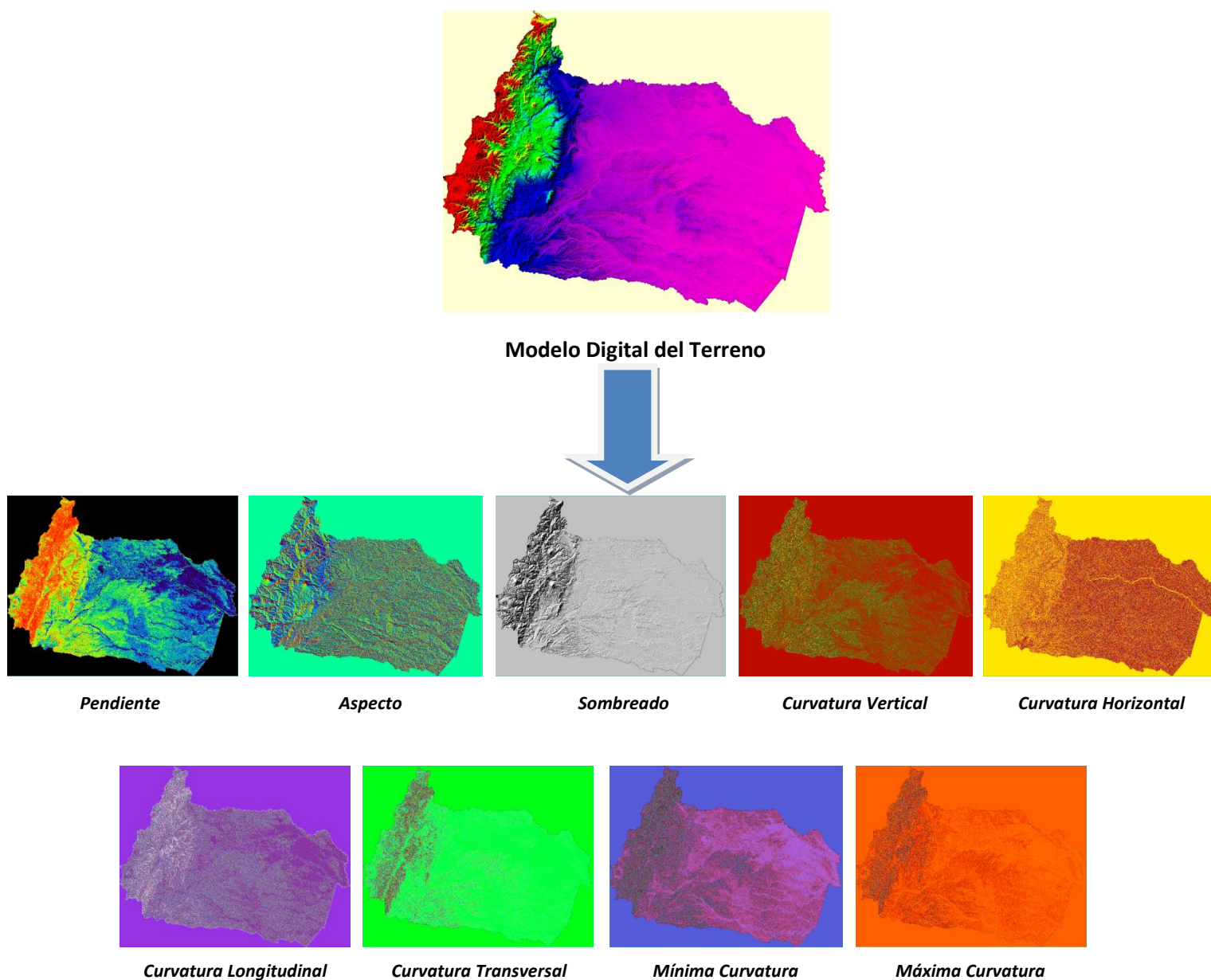


Figura 9. Modelamiento Topográfico

La aparición y extensión de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha hecho posible y necesario la aplicación de un concepto, concebido ya a finales de la década de los 1950 (Miller y Laflamme 1958), para modelar, analizar y visualizar los fenómenos relacionados con la topografía, o con variables de distribución continua, de una forma numérica y procesable por ordenadores: los Modelos Digitales de Terreno (MDT).

La obtención de variables del terreno de forma automática a partir de los MDT y los SIG ha abierto nuevas posibilidades de análisis y específicamente para la geomorfología cuantitativa, en la delineación automática de variables relativas a las cuencas de drenaje, y en la delineación de formas del terreno (Zevenbergen y Thorne 1987, Dikau 1989).

Además del apoyo a las técnicas de cartografía de suelos como la obtención de mapas de pendientes, orientaciones y delineación de formas del terreno (Klingebiel et al. 1987, Hammer et al. 1991, Dekker y Hendriks 1994).

Los índices topográficos se clasifican en:

- Índices topográficos primarios (derivables directamente a partir de los datos de altura representados en el modelo)
- Índices topográficos secundarios o compuestos (implican combinaciones de los atributos topográficos primarios).

Índices topográficos primarios

A partir de un MDT raster, el cálculo de los principales atributos topográficos primarios puede hacerse mediante operaciones matemáticas de geometría elemental realizadas en una superficie, expresada por una función polinómica, que ajuste localmente al modelo del terreno expresado por el MDT. (Martínez Casanovas, 1999).

Índices topográficos secundarios

Implican combinaciones de los atributos topográficos primarios, son índices que caracterizan la variabilidad espacial de algunos procesos superficiales o propiedades de los suelos: índices de erosión y deposición, índices como el factor LS (longitud e inclinación de la pendiente) de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*), índices de humedad, etc. (Martínez Casanovas, 1999).

Curvaturas

Este algoritmo aporta información sobre la concavidad o convexidad de la superficie en un punto dado. Se ejecuta a partir de medidas geométricas basadas en derivadas de segundo grado, los parámetros que expresan esa información se denominan curvaturas.

Estas derivadas se pueden calcular en todas direcciones. Las dos direcciones más importantes son la de la máxima pendiente y la perpendicular a ésta. Los valores obtenidos para la segunda derivada en estas direcciones son, respectivamente, la curvatura vertical y horizontal.

Los valores positivos indican una curvatura convexa, mientras que los negativos indican una curvatura cóncava. (Exelis Visual information Solutions, 2012).

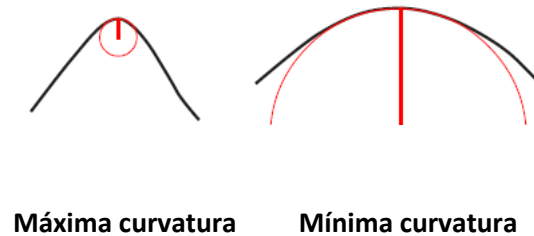


Figura 10. Esquema de Curvatura

Curvatura Horizontal (Curvatura en planta)

Curvatura en el plano que corta la superficie según la curva de nivel. Una curvatura horizontal convexa (valores negativos) representa una zona en la que el flujo tiende a dispersarse (divergente), mientras que si es cóncava (valores positivos) el flujo tiende a concentrarse (convergente), ya que las líneas de flujo convergen. Si es plana, son valores cero. (Exelis Visual information Solutions, 2012).

Curvatura Vertical (Curvatura en perfil)

Curvatura según el plano de la máxima pendiente. Los valores positivos de las celdas indican una curvatura convexa (zonas en las que el agua experimenta una aceleración, ya que la pendiente aumenta), mientras que los negativos indican una curvatura cóncava (zonas con tendencia a acumular agua, ya que la pendiente disminuye). (Exelis Visual information Solutions, 2012).

Curvatura Longitudinal

La curvatura longitudinal se calcula o se define como la intersección con el plano de la pendiente normal y la dirección del aspecto. (Exelis Visual information Solutions, 2012).

Curvatura Transversal

La curvatura transversal se define como la intersección con el plano de la pendiente y la dirección perpendicular del aspecto. (Exelis Visual information Solutions, 2012).

Mínima y Máxima Curvatura

La curvatura de una superficie en un punto es el producto de la curvatura máxima y mínima.

Se determina tomando la curvatura máxima y mínima de sus secciones en un punto. (Muñoz)

Sombreado

El análisis del sombreado del relieve es una técnica que se utiliza para generar de forma automática mapas de relieve sombreados. El sombreado del relieve se utiliza para realzar visualmente los elementos del terreno simulando los efectos de iluminación de la luz del sol sobre la superficie del terreno. El sombreado estima valores de reflectancia de la superficie a partir de la posición del sol a cualquier altitud y en cualquier azimut. La reflectancia se calcula como un rango de valores entre 0 y 100. (Exelis Visual information Solutions, 2012)

Pendiente

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. La pendiente se mide calculando la tangente de la superficie. La tangente se calcula dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal.

Normalmente la pendiente se expresa en planimetría como un porcentaje de pendiente que equivale al valor de la tangente (pendiente) multiplicado por 100.

$$\text{Porcentaje de Pendiente} = \text{Altura} / \text{Base} * 100$$

Otra forma de expresar la pendiente es en grados. Para calcular los grados se utiliza el valor de arco tangente de la pendiente:

$$\text{Pendiente en Grados} = \text{Arco Tangente} (\text{Altura} / \text{Base})$$

z1	z2	z3
z4	z5	z6
z7	z8	z9

El gradiente de pendientes se calcula a partir de una matriz de 3x3 celdas como se muestra en el esquema. Esta matriz representa la altitud de los 8 vecinos más próximos (Z) que

rodean a la celda de columna i y fila j. La Figura muestra la matriz (o kernel) utilizada en el cálculo de las derivadas de las matrices de elevación. Esta ventana de 3x3 se desplaza sucesivamente por encima del modelo para calcular la pendiente. (Martínez Casanovas, 1999).

2.6. Generación de índices topográficos

Para la generación de los índices se utilizó **ENVI 5** (Fuente: Ministerio del Ambiente), un potente software para análisis geoespacial, el cual es un paquete informático probado con un modulo específico para modelamiento del relieve (**ENVI Topographic Modeling**).

Este algoritmo se basa en un estudio para la caracterización geomorfológica a partir de modelos digitales de elevación, en el cual se calcula las variables topográficas más relevantes para aquello, y que actualmente es la mejor herramienta para este tipo de análisis. (Exelis Visual information Solutions, 2012).

2.7. Método de clasificación automática

Clasificación No Supervisada (ISODATA)



Figura 11. Ejemplo de una clasificación no supervisada

Fuente: Exelis Visual information Solutions, 2012 www.exelisvis.com

El método no supervisado crea agrupamientos espectrales o clusters en los cuales el analista debe intentar asociar una clase temática a cada uno de dichos grupos. Se han propuesto numerosos algoritmos para crear estos

clusters. Como ejemplo nosotros nos referiremos al método conocido como ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique).

Se trata de un método iterativo que requiere relativamente poca intervención humana, siendo usual que el analista deba especificar:

- Número máximo de clusters (numero de clases) que el algoritmo debe identificar.
- Máximo porcentaje de pixeles (umbral de cambio) cuyos valores se permite permanezcan incambiadados entre iteraciones. Cuando se alcanza dicho número el algoritmo se detiene.
- Máximo número de iteraciones. Cuando se alcanza dicho número el algoritmo se detiene.
- Número mínimo de miembros en un cluster. Si un cluster contiene menos de dicho mínimo es eliminado y los miembros son asignados a un cluster alternativo.
- Máxima desviación estándar. Cuando la desviación estándar para un cluster excede el máximo especificado y el número de miembros que contiene es más que el doble del mínimo especificado, el cluster se divide en otros dos clusters.
- Suele también fijarse valores mínimos para las distancias entre los centros de los clusters. Cuando la distancia resulta inferior a dichos valores los clusters se fusionan

3. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE UNIDADES DE RELIEVE

Partimos de un sistema de clasificación de unidades de relieve que nos represente un aporte para el ordenamiento territorial, para esto se analizó varios sistemas de clasificación de unidades de relieve disponibles en el mercado ajustándolos a la realidad de nuestro territorio. Esta fuente de información secundaria nos ayudó a definir la leyenda para la zona de estudio.

MACRORELIEVE	MESORELIEVE
Montaña	Edificios Volcánicos
	Relieves Montañosos
Serranía	Colinas
	Cuestas
	Chevrones
	Mesas
	Vertientes
Valle	Planicies
	Terrazas
Cordillera	Relieves Montañosos
	Colinas
	Cuestas
	Mesetas
	Vertientes
Piedemonte	Chevrones
	Colinas
	Cuestas
	Mesetas
	Vertientes
	Terrazas
	Planicies
	Abanico aluvial
Penillanura	Colinas
	Chevrones
	Vertientes
Llanura	Abanico aluvial
	Planicies
	Terrazas

Tabla 1. Leyenda de Unidades de Relieve

Leyenda propuesta para el presente estudio

Para esta clasificación se pudo establecer un sistema de clasificación de tipo jerárquico del terreno y ubicar sus unidades en distintas categorías, directamente relacionadas con la información disponible y el nivel de detalle requerido para nuestro caso de estudio. Nos basamos en el sistema jerárquico de forma piramidal de análisis fisiográfico (Villota, 1997); con el fin que nos permita relacionar con otros sistemas naturales, como suelos y vegetación, para tener una concepción más integral del estado actual de los paisajes.

3.1. Macrorelieve

Comprende asociaciones o complejos de paisajes con relaciones de parentesco de tipo climático, geogenético (implica que la morfología del relieve se debe a los procesos geomorfológicos endógenos y/o exógenos mayores que lo originaron), litológico (grupo de roca) y topográfico (Villota, 1997). Se distinguen relieves menores como: Cordilleras, llanuras, valles, montañas, serranía, piedemontes, penillanura. Se describe a continuación cada una de ellas:

- **Montaña:** Grandes elevaciones naturales del terreno que poseen un desnivel desde la línea de base hasta la cumbre mayor a 300 m, cuya altura y formas se deben a plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre. Su cima puede ser aguda, subaguda, semiredondeada, redondeada y tabular, su pendiente es $>30\%$. Las partes de una montaña son la cumbre y las laderas (vertientes) (De Pedraza, 1996).
- **Serranía:** Corresponden a relieves que forman parte de una serie o sistema montañoso. Se componen de una alineación montañosa

principal que hace de eje de la misma y, en algunos casos, de otros cordales montañosos de menor altitud. Son de carácter estructural, plegado y denudativo (De Pedraza, 1996).

- **Valle:** Llanura de tierra con pendientes menores al 8%, es aquella depresión entre dos elevaciones del terreno. Los valles se pueden presentarse en forma de U, V y plano (De Pedraza, 1996).
- **Cordillera:** Es un sistema dual de alineaciones montañosas y colinosas, enlazadas entre sí (mayor que la serranía). Constituyen zonas plegadas o en fase de plegamiento (De Pedraza, 1996).
- **Piedemonte:** Partes bajas de montañas y serranías hasta el punto de inflexión con el valle o la llanura. Hace referencia al Piedemonte Andino (De Pedraza, 1996).
- **Penillanura:** Terreno de poca altitud y escasos relieves producida en la última etapa del ciclo de denudación. Es la forma de relieve que suele ocupar grandes extensiones y que, por efecto de la erosión, presenta una superficie suavemente ondulada, sin apenas diferencia de altura entre los valles y los interfluvios. Está formada por materiales antiguos y erosionados (De Pedraza, 1996).
- **Llanura:** Terreno muy extenso y plano, con pendientes menores al 8%. La elevación del terreno en las llanuras no sobrepasa los doscientos metros sobre el nivel del mar; y son de reciente origen, ya que pertenecen al período cuaternario o antropozoico (De Pedraza, 1996).

3.2. Mesorelieve

Son las formas del relieve de menor magnitud que representan a un paisaje tridimensional (geoformas) correspondientes a una división del gran paisaje establecida según posición dentro del mismo (colina, vertiente, mesa) y, caracterizada por uno o más atributos morfométricos (forma y grado de la pendiente; tipo y grado de erosión; grado de disección; clase de condición de drenaje). Es igualmente en este nivel donde se esperan comunidades vegetales relativamente homogéneas o usos similares de la tierra (Villota, 1997).

Las definiciones conceptuales y operativas de mesorelieve son las siguientes:

- **Edificios Volcánicos:** En esta unidad genética de relieve se agrupan todos los paisajes geomorfológicos determinados por el vulcanismo, que han sufrido en diverso grado los efectos de la denudación pero que aún conservan rasgos definidos de sus formas iniciales. Estas estructuras volcánicas según sus rasgos morfológicos pueden ser recientes, antiguas y muy antiguas. Poseen materiales geológicos de rocas extrusivas, lavas y piroclastos (De Pedraza, 1996).
- **Relieves Montañosos:** A este grupo se incluyen las montañas cuya altura y formas se deben a plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre y que aún conservan rasgos reconocibles de las estructuras originales a pesar de haber sido afectadas en diverso grado por los procesos de denudación fluvio – erosional y glaciárica, respectivamente (De Pedraza, 1996).

- **Colinas:** Elevación natural y aislada del terreno con un desnivel desde la línea de base hasta la cumbre menor a 300 m, cuyas laderas presentan una inclinación promedio superior al 16% y divergen en todas direcciones a partir de la cima relativamente estrecha, siendo su base aproximadamente circular. Pueden reconocerse colinas altas, medias y bajas (De Pedraza, 1996).
- **Cuestas:** Paisaje homoclinal formado como consecuencia de la incisión o fallamiento perpendicular al buzamiento de estratos sedimentarios suavemente plegados o basculados; se caracteriza por su ladera estructural por lo común más larga que el escarpe, con buzamientos que varían entre 2° y 8° aproximadamente, lo cual les otorga una mayor estabilidad al paisaje y a sus suelos, por la menor incidencia de los procesos erosivos (De Pedraza, 1996).
- **Mesetas:** Elevación natural extensa, son formaciones geológicas que suponen determinada altura sobre el nivel del mar; que por lo general se encuentran rodeadas por abruptos acantilados y de terrenos más bajos. Pueden tener dos formas de generación principales: por el movimiento de las placas tectónicas que subyacen a la superficie o por la erosión de montañas o incluso de los territorios que la rodean (De Pedraza, 1996).
- **Chevrones:** Son pliegues con charnela angulosa y flancos planos. Poseen superficies estructurales disectadas, con pendientes entre 40 y 70% y también frentes de chevrones con pendientes superiores al 70% (De Pedraza, 1996).
- **Vertientes:** Es una superficie topográfica inclinada situada entre los puntos altos (picos, crestas, bordes de mesetas o puntos culminantes

del relieve) y los bajos (pie de vertientes o vaguadas). El perfil de una vertiente puede ser regular, irregular, mixta, rectilínea, convexa y cóncava (es decir, con rupturas de pendiente), dependiendo de la litología y la acción de la erosión (De Pedraza, 1996).

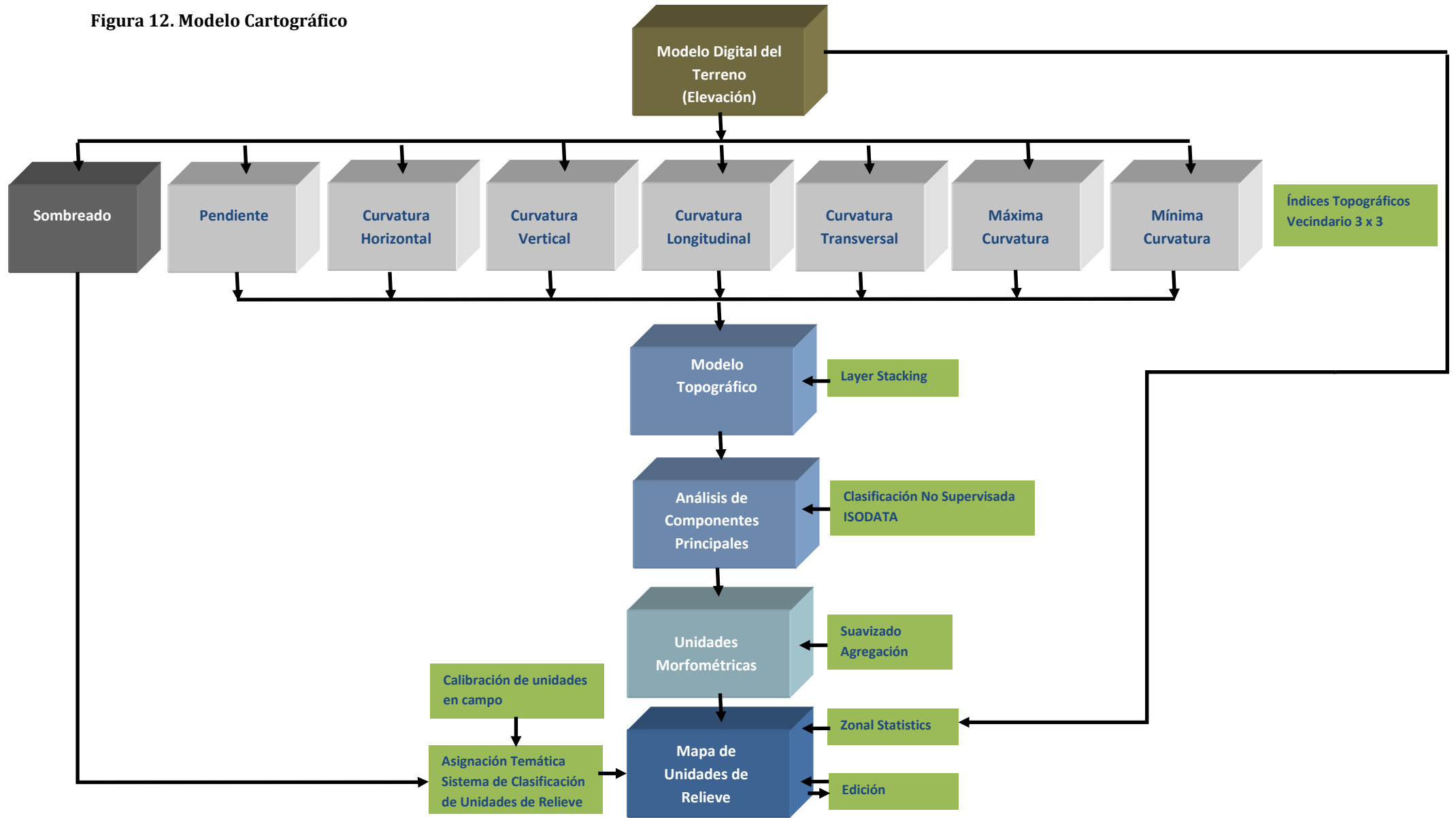
- **Abanico Aluvial (Cono de deyección):** Terreno de modelado fluvial cuyo nombre se debe a su forma característica semicircular o silueta cónica, con su parte superior más estrecha y empinada; posee una suave pendiente entre 1 y 10 grados (<20%), dependiendo de la pendiente por la que se desliza. En el cual la masa de materiales aluviales es espesa, de granulometría gruesa (cantos, gravas y arenas) (De Pedraza, 1996).
- **Planicie:** Espacio natural que constan de relieves bajos o de mínima altitud, cercanos al nivel del mar, con pendientes menores al 8%. Las planicies más comunes toman lugar a territorios bajos, en los cuales todavía el terreno no ha ganado gran altura, o también en los valles que se generan naturalmente entre cadenas montañosas. Encontramos diversos tipos de planicies de acuerdo a su formación: planicies costeras, aluviales, lacustres, glaciares y de lava (De Pedraza, 1996).
- **Terrazas:** Son zonas llanas, bajas y estrechas formadas por depósitos aluviales de arenas características del Cuaternario combinados con guijarros grandes. Se localizan a ambos lados del plano inundable y originado por repetidos descensos del nivel de base de erosión. (IGAC).

4. MODELO CARTOGRÁFICO

El modelo cartográfico es la representación de una metodología en una secuencia de pasos lógico para obtener un resultado.

El modelamiento inicia a partir de un modelo digital del terreno, del cual se generan una serie de índices topográficos donde se elimina la información redundante a partir de un análisis de componentes principales, estas nuevas variables no correlacionadas servirán de insumo para el proceso de clasificación automática, el resultado de la clasificación genera los clusters, estos representan unidades morfométricas, es decir que representen una unidad de relieve o un conjunto de estas, para luego realizar la atribución temática de acuerdo a la leyenda planteada, junto a esto se realizará una serie de filtros espaciales y un proceso de edición y calibración en campo junto a un análisis estadístico zonal para extraer variables estadísticas del modelo digital del terreno, esto con el objetivo igualmente de ayudar a clasificar de mejor manera las unidades de relieve en función de su desnivel relativo y su elevación.

Figura 12. Modelo Cartográfico



5. ÁREA DE ESTUDIO

Para la construcción del modelo de unidades de relieve se ha definido como unidad de estudio la **Cuenca Hidrográfica del Río Napo** (SENAGUA División Hidrográfica PFASTETTER –Nivel IV). La cuenca cubre una superficie de 59726.05 km².

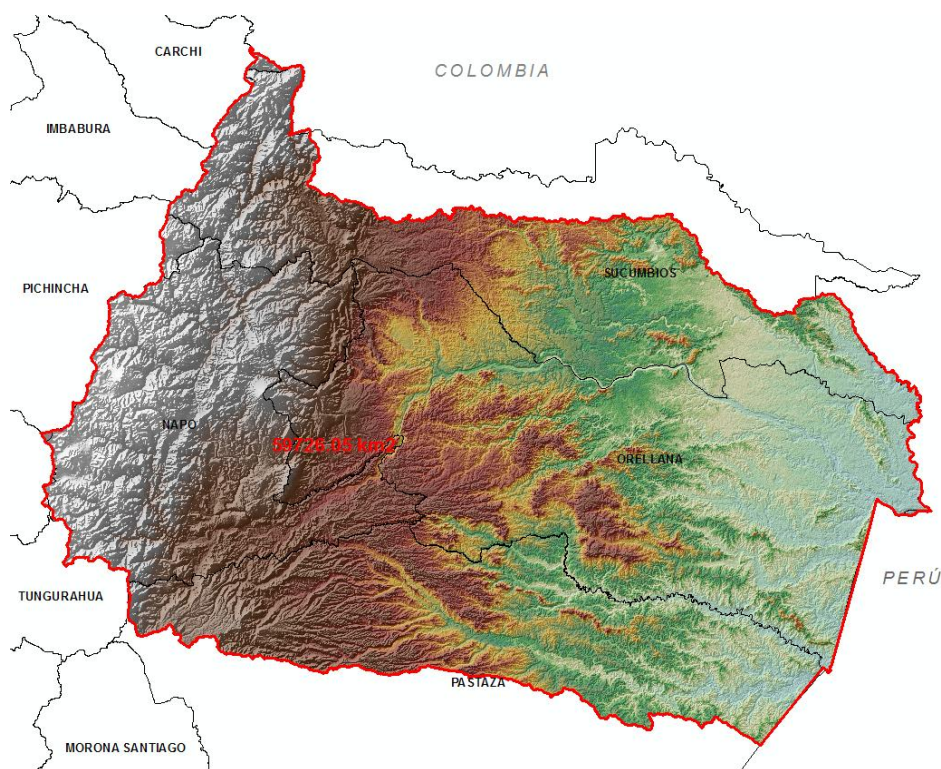


Figura 13. Área de Estudio

De acuerdo a los límites político administrativos del Ecuador esta cuenca atraviesa las provincias de Carchi, Sucumbíos, Pichincha, Napo, Orellana y Pastaza, en general esta zona presenta una compleja topografía, caracterizada por la presencia de relieve montañoso, pequeñas colinas fuertemente disectadas, combinadas con áreas relativamente planas, con suelos profundos y fértiles, especialmente en los márgenes de los ríos grandes, como las planicies aluviales. (Sánchez ,2002).

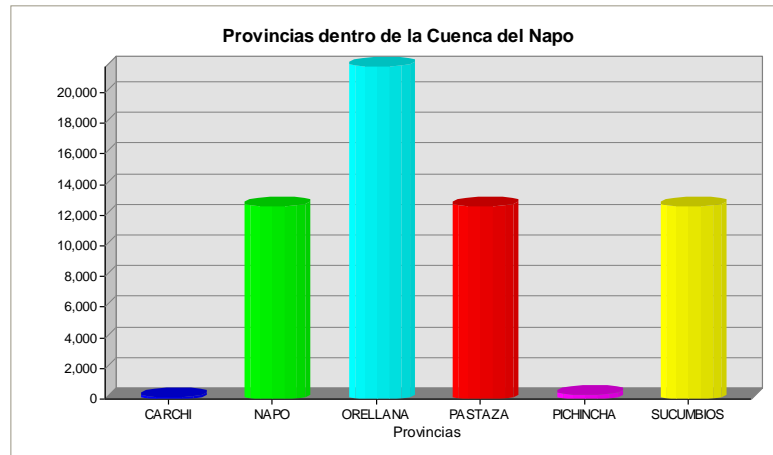


Figura 14. Provincias dentro del área de estudio

Para el presente estudio se ha definido como sistema de referencia espacial el Datum WGS84 proyección UTM zona 18 Sur.

6. METODOLOGÍA

6.1. Modelo Digital del terreno (MDT)

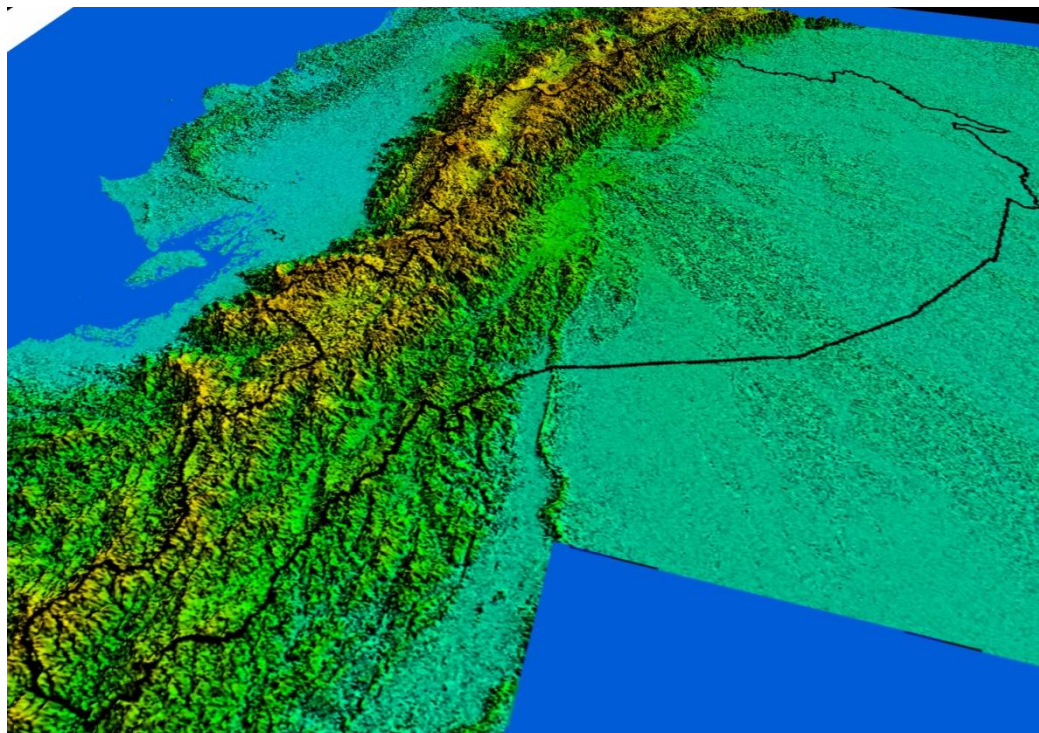


Figura 15. MDT en 3D

Para el análisis del relieve partimos del modelo digital del terreno que en este caso representa la elevación, es importante mencionar que para la ejecución de este estudio se utilizó el MDT sin recortar, ya que en la interpretación de unidades de relieve en las zonas de frontera debe considerarse el contexto espacial para poder discriminar de mejor manera las unidades en estas zonas, consideramos un error interpretar sin conocer lo que se encuentra más allá de las fronteras de la zona de estudio.

6.2. Modelamiento Topográfico

El modelo digital del terreno nos permite generar los índices topográficos utilizando la herramienta **Topographic Modeling**, del software ENVI, para esto se utilizó un vecindario de 3 x 3 (tamaño del kernel) que corresponde a una matriz que escanea todo el modelo de pixel en pixel para generar cada uno de los índices en función de los algoritmos de cada uno de ellos, para la generación de la variable topográfica del sombreado se ingresó datos de azimuth y elevación del sol de 124° y 66° respectivamente, estos valores fueron calculados automáticamente en el software en función de la fecha y hora aproximada de toma y la posición geográfica, la cual corresponde a las coordenadas del centroide de la zona de estudio como se muestra en la figura 15.

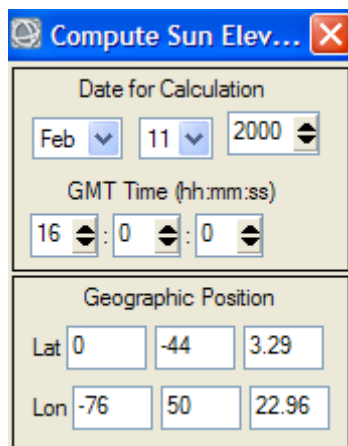


Figura 16. Calculo de azimuth y elevación del sol

Este modelamiento genera las siguientes variables topográficas:

- Sombreado
- Pendiente
- Curvatura vertical
- Curvatura horizontal
- Curvatura longitudinal
- Curvatura transversal
- Máxima curvatura
- Mínima Curvatura

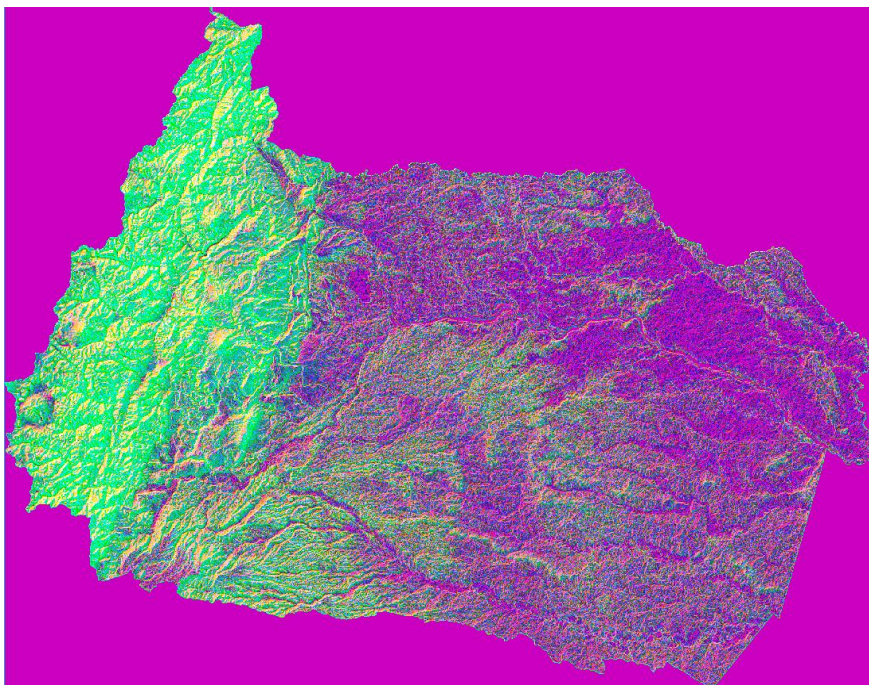


Figura 17. Modelo Topográfico Multivariante

Este modelo se lo puede visualizar en una combinación RGB (rojo – verde – azul) al igual que se lo hace con imágenes multiespectrales, por tal razón a este modelo se lo llama multivariante, es decir se lo puede realizar en diferentes combinaciones de bandas que corresponde a las variables topográficas generadas.

Las diferentes combinaciones del modelo ayudarán a la interpretación y a la asignación temática de las unidades de relieve junto a la visualización en tres dimensiones (3D).

6.3. Análisis de Componentes Principales (PCA)

El análisis de componentes principales nos permite producir bandas (índices topográficos) no correlacionadas, para separar los componentes de ruido, y para reducir la dimensionalidad de los conjuntos de datos (Exelis Visual information Solutions, 2012), es decir el presente análisis nos eliminará la redundancia de los datos. Debido a que los datos topográficos son a menudo altamente correlacionados, la transformación a componentes principales se utiliza para producir bandas no correlacionadas de salida. Esto se realiza mediante la búsqueda de un nuevo conjunto de ejes ortogonales que tienen su origen en los datos de la media y que se hacen girar por lo que la varianza de los datos es máxima (Exelis Visual information Solutions, 2012).

La primera banda del análisis de componentes principales contiene el mayor porcentaje de variación de datos y la segunda banda contiene la segunda mayor variación de datos, y así sucesivamente. Las últimas bandas de los componentes principales aparecen con ruido, ya que contienen muy poca variación, gran parte del cual es debido al ruido en los datos originales (Exelis Visual information Solutions, 2012).

Los componentes principales se calculan a partir del modelo topográfico, del cual para los siguientes procesos se utilizará únicamente los tres primeros componentes de las siete variables topográficas originales, ya que es justamente en estos, donde se encuentra la información más relevante en cuanto al relieve, como se observa en la figura 16.

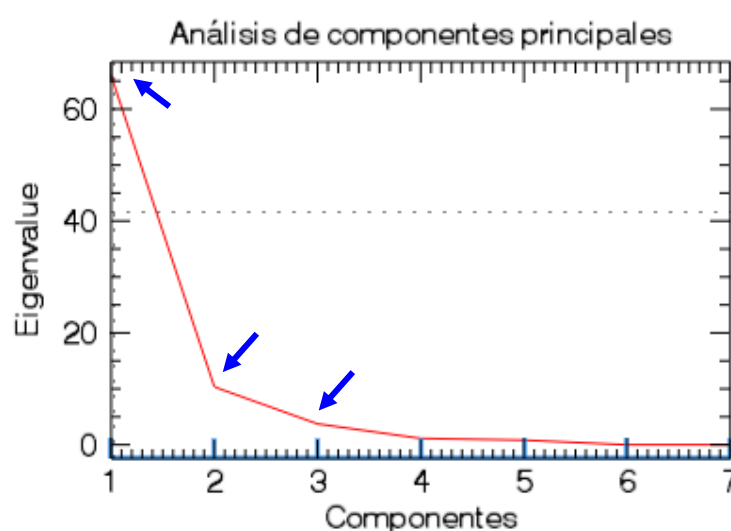


Figura 18. Análisis de componentes principales

6.4. Clasificación Automática

Una vez generado el análisis de componentes principales del modelo topográfico, realizaremos el proceso de clasificación automática, este proceso es una clasificación no supervisada mediante el algoritmo ISODATA, las variables que ingresan al proceso son, como ya se mencionó, los tres primeros componentes del modelo calculado.

Estas variables representan la mayor cantidad de información relacionada a la morfometría del relieve, estas definen límites discretos de cada una de las unidades de relieve en función de sus características topográficas (curvaturas y pendiente), las cuales son las más importantes y las más utilizadas para este tipo de análisis.

Para poder realizar la clasificación automática debemos definir ciertos parámetros como el número de clases que buscamos, el número de iteraciones y el umbral de cambio. Para la zona de estudio se han definido de la siguiente forma:

- **Número de Clases: 10** (valor estimado que corresponde a las unidades que se pueden representar en función de la leyenda temática y la realidad de la zona. Si existe una mezcla de clases o no se está conforme con la clasificación este valor puede modificarse).
- **Numero de Iteraciones: 10** (valor adecuado que permite al software continuar el proceso varias veces hasta cumplir él % del Umbral de cambio, una vez cumplido este criterio el proceso de clasificación termina. La mayoría de veces el proceso termina antes de las 10 iteraciones).
- **Umbral de cambio: 2%** (valor que indica la confianza en la clasificación, cuando el porcentaje de píxeles que cambian de clase durante una iteración es menor que el valor umbral, se finaliza el proceso de clasificación. La confianza es de 98%, el cual es adecuado para obtener una buena clasificación).

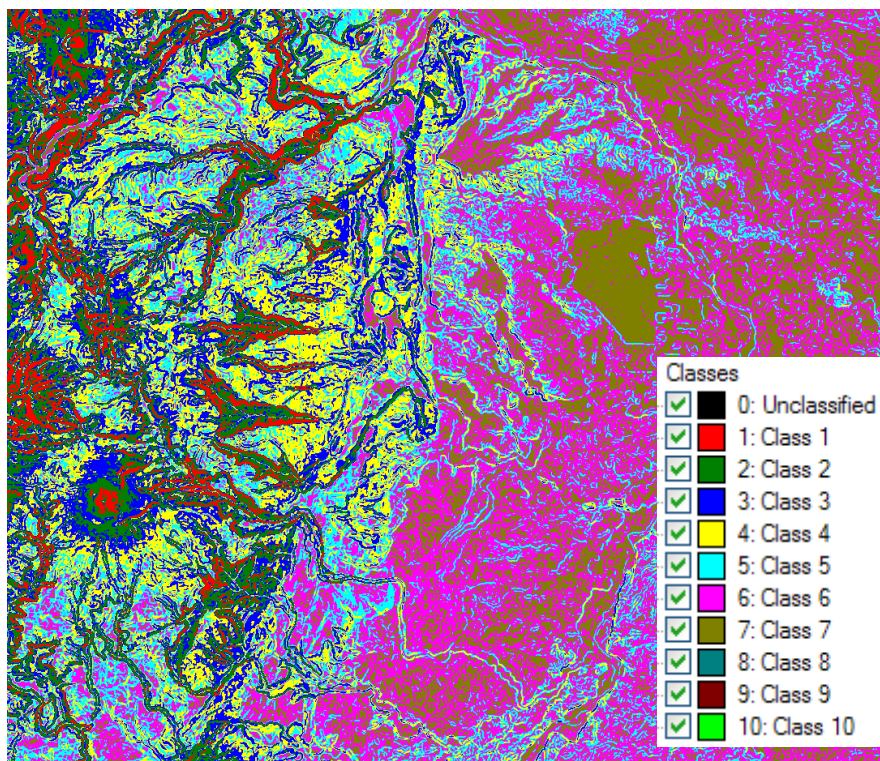


Figura 19. Clasificación automática (ISODATA)

Una vez que tenemos clasificado el modelo podemos observar que las unidades se aprecian dispersas, desordenadas, en las cuales aún no se visualiza una unidad de relieve específica, para esto se debe realizar ciertos filtros que permitan minimizar el ruido y afinar las mismas para que éstas unidades sean interpretables según nuestro sistema de clasificación.

Estos filtros son el suavizado (*Smoothing*) y agregación (*Aggregation*), el suavizado consiste en remover el ruido o también conocido como efecto sal y pimienta, para aquello utiliza una matriz cuadrada (kernel) definida por un número impar, cuyo valor del pixel central será reemplazado por el valor mayor presente en la matriz, este filtro también es conocido como *Majority*. El filtro de agregación remueve las áreas

pequeñas en función de una unidad mínima de representación, las regiones menores a esta unidad mínima son absorbidas por la región más representativa adyacente.

Para el filtrado de la zona de estudio se ha definido lo siguiente:

- Tamaño de Matriz de suavizado: **3 x 3** (matriz más fina para el cálculo).
- Área mínima de agregación: **100 ha.** (en función de la escala cartográfica 1:250000 que corresponde al modelo SRTM utilizado como insumo para el análisis).

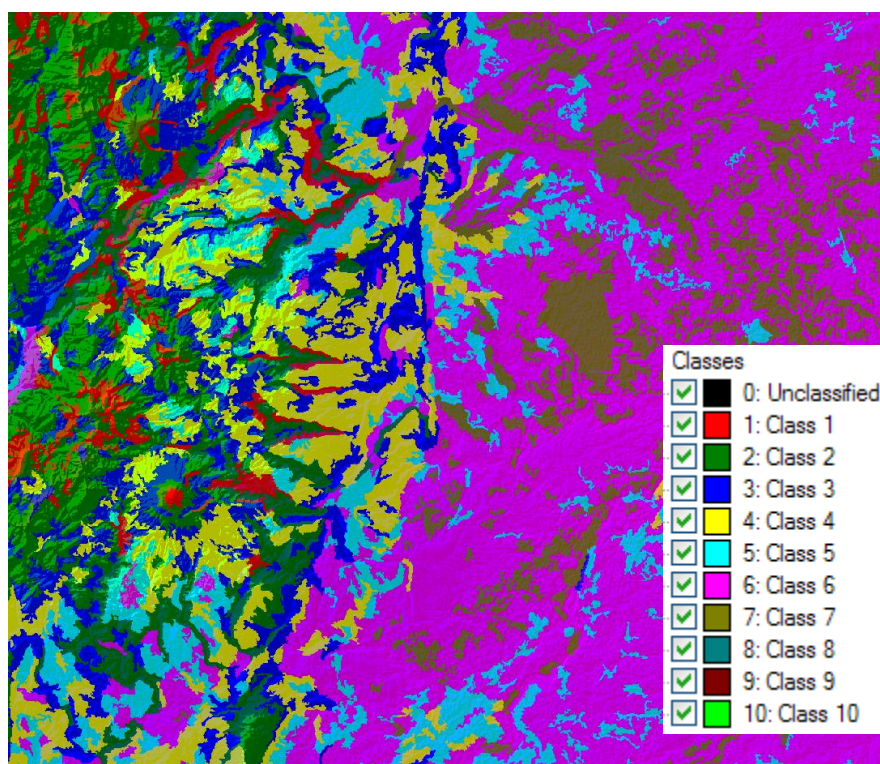


Figura 20. Clasificación filtrada (*smoothing, aggregation*)

6.5. Asignación Temática

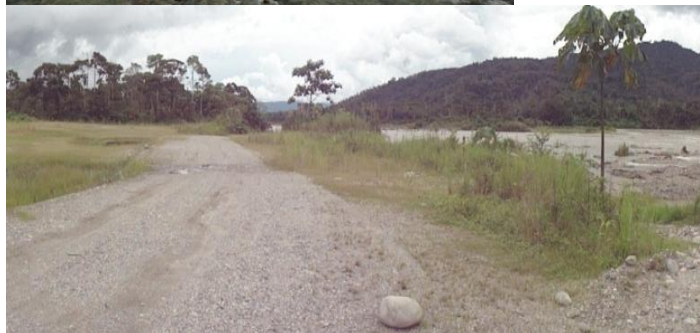
Las unidades morfométricas están listas para ser asignadas con un atributo, el objetivo es nombrar a cada clase en función de la leyenda propuesta, en este punto se hace énfasis en que las unidades de relieve serán ingresadas a partir de los nombres correspondientes al mesorelieve, para posteriormente ser generalizadas a macrorelieve.

Debemos recordar que nuestro sistema de clasificación es jerárquico, por tal razón es recomendable partir de lo específico a lo general, aunque a nivel de mesorelieve ciertas unidades se repiten por su característica morfométrica, estas se dividen o se diferencian cuando son generalizadas a macrorelieve, esto quiere decir que en distinto macrorelieve encontramos similares unidades de mesorelieve, un ejemplo práctico de esto son las planicies que a nivel de macrorelieve las encontramos en Llanura y en Valle, claro está que esta diferenciación también toma en cuenta otras variables que nos ayudan a clasificar de mejor manera, esto lo explicaremos más adelante en el proceso de interpretación como tal.

Para la asignación temática fue necesario realizar la calibración de unidades de relieve en el terreno, con información relevante de campo acompañado de fotografías que es la mejor ayuda que el intérprete puede tener, la información que se levantó en el terreno fue la siguiente:



- Macrorelieve
- Mesorelieve
- Pendiente
- Textura del suelo
- Profundidad del suelo
- Permeabilidad del suelo
- Inundabilidad



Toda esta información se la ingresó a una computadora de mano con un receptor GPS integrado lo cual permite levantar la información georeferenciada para ser ingresada a un sistema de información geográfica (SIG), siempre enlazado a su fotografía del paisaje que como se mencionó es la base para la interpretación de las unidades de relieve.

Los puntos que fueron levantados se los definió previamente en una interpretación inicial, en unidades donde causaba confusión asignar un atributo, es decir zonas donde no se contaba con la certeza de a que unidad de relieve pertenecen, además se tomó en cuenta criterios geográficos como la accesibilidad, sin duda el limitante más grande fue el acceso a la zona baja de la cuenca donde únicamente se pudo ingresar vía fluvial a la zona norte provincia de Sucumbíos – frontera con Perú, donde se realizó un gran esfuerzo logístico para verificar las unidades.

En función de estos criterios se levantaron 93 puntos y se tomaron 465 fotos en toda la cuenca hidrográfica del Rio Napo, cada punto cuenta con la información indicada anteriormente la cual es utilizada en el proceso de interpretación.

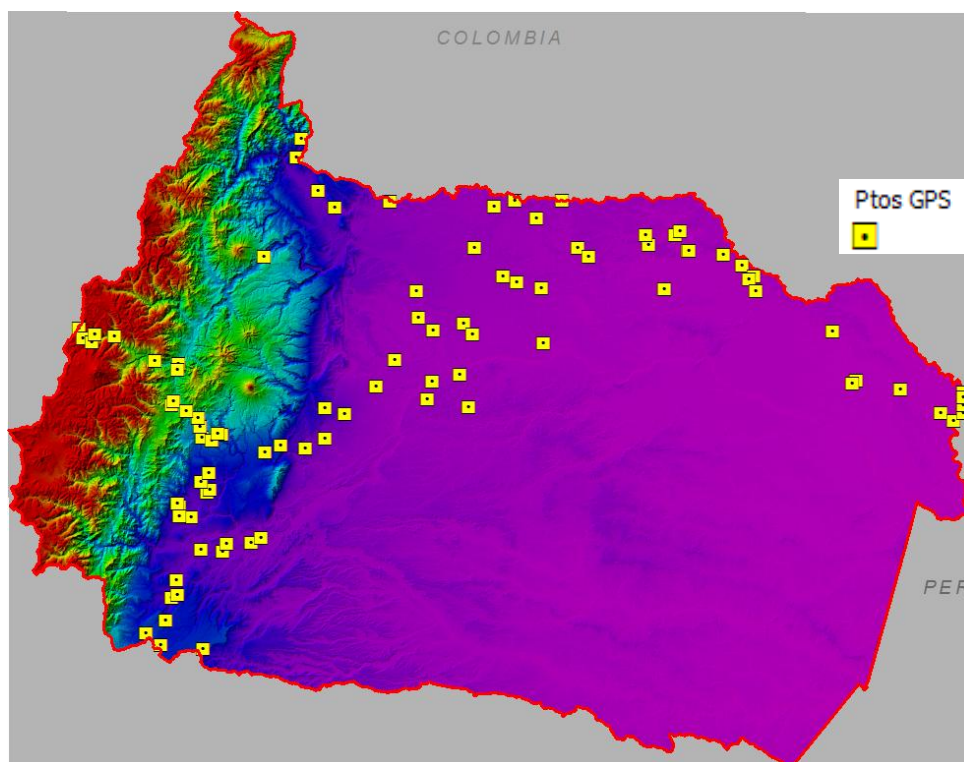


Figura 21. Puntos de calibración de unidades de relieve

6.6. Interpretación de Unidades Temáticas

La interpretación se basa en uno de los índices topográficos mas importantes como lo es el sombreado, a este índice le hemos agregado color para que nos facilite la interpretación, este índice como se explicó al inicio realza las formas del relieve, de aquí la importancia de ayudarnos en la interpretación con esta variable, es importante tomar en cuenta que este realce se basa en la iluminación según la

posición del sol. Además se utilizó visualizaciones en 3D, para interpretar de mejor manera las unidades, junto a las fotografías levantadas en campo.

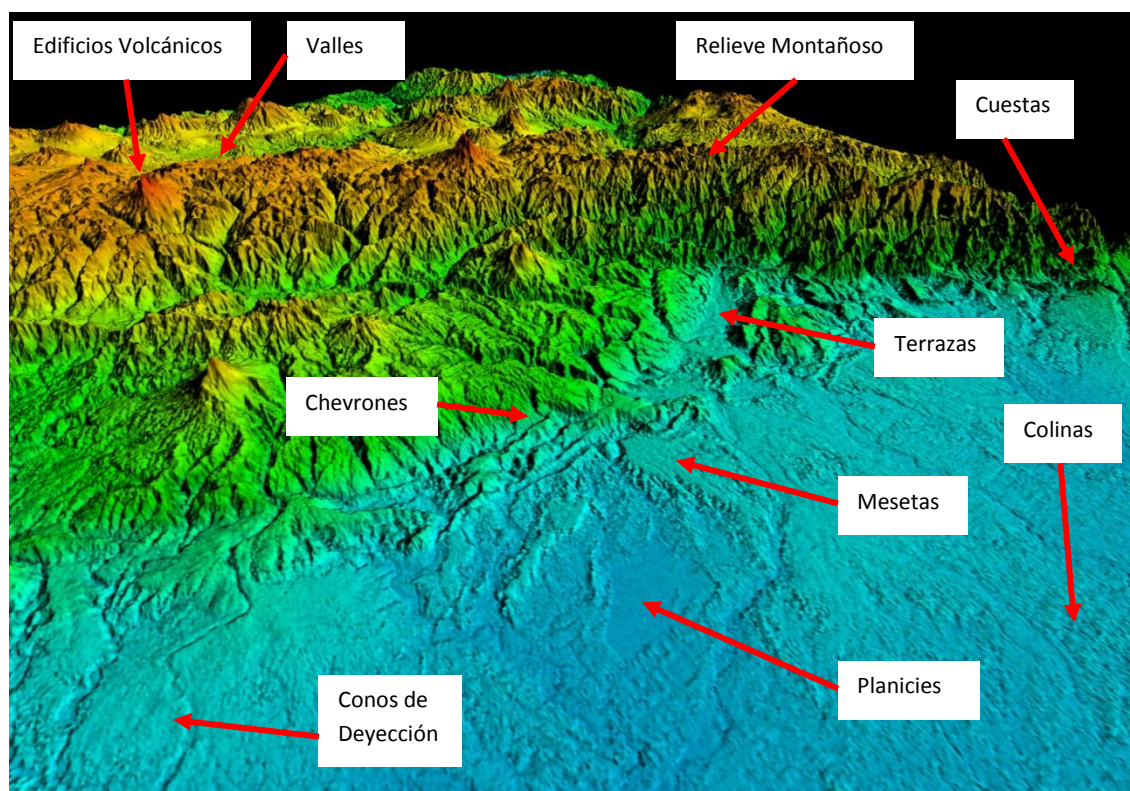


Figura 22. Interpretación de unidades de relieve

La parte de interpretación se la realizó en un ambiente SIG utilizando el software ArcGis (Fuente: Ministerio del Ambiente), donde cargamos la información de puntos de campo enlazados a las fotografías y la capa temática de las unidades, la cual fue el resultado de la clasificación automática a partir de las variables topográficas, a esta capa en formato raster se le asignó un atributo temático, para posteriormente transformar a formato vector para editar y afinar ciertas unidades, ya que cualquier método de clasificación automática nunca será perfecto, por lo que siempre deberá tener un proceso de edición.

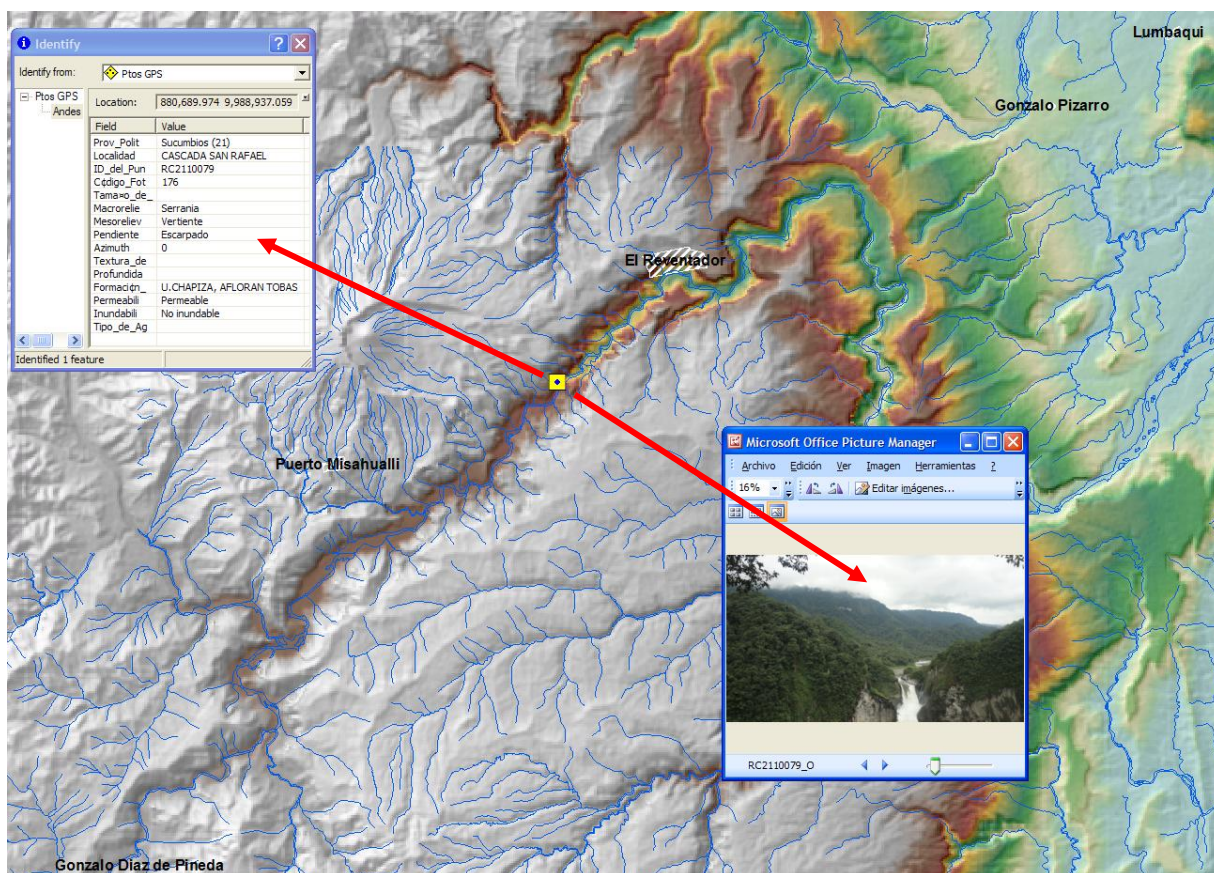
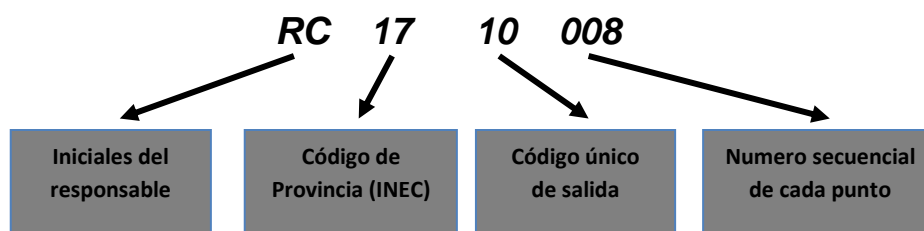


Figura 23. Información levantada en campo en ambiente SIG
Cascada de San Rafael (limite entre las provincias de Napo y Sucumbios)

En enlace de los puntos GPS con las fotografías se lo hizo mediante un código común, el código del punto fue diseñado para que sea único e irrepetible, éste se asocia con el código de la carpeta, es decir la carpeta debe tener el nombre de cada punto GPS.



Luego mediante un hipervínculo en el SIG se realiza el enlace a través de un campo en la tabla de atributos donde consta la ubicación de la carpeta que contiene las fotografías. Para aquello utilizamos las herramientas disponibles en el software ArcGis.

Prov Polit	Localidad	ID del Punt	Código Fot	Macrorelie	Mesoreliev	Vinculofot
Napo (15)	BAEZA	RC1710008	109	Serrania	Colina	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\RC1710008
Napo (15)	TENA	RC1510015	115	Piedemonte	Colina	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\RC1510015
Napo (15)	CAUCHERAS	RC1710011	112	Cordilleras	Colina	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\RC1710011
Napo (15)	BAEZA	RC1710009	110	Serrania	Colina	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\RC1710009
Orellana (22)	VIA A LORETO	RC2210043	138	Penillanura	Colina	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\RC2210043
Napo (15)	CHALCANAS	GL1510025	121	Cordilleras	Colina	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\GL1510025
Napo (15)	VIA LORETO	RC1510039	135	Montaña	Relieve montaña	H:\PERSONALES\UNIGIS\Tesis de Maestria\FOTOS\RC1510039

Record: 1 Show: All Selected Records (0 out of 73 Selected) Options

Figura 24. Hipervínculo en ambiente SIG

En cada carpeta se encuentran 5 fotos, 4 fotos referidas a los ejes cardinales en orden Norte, Este, Sur, Oeste, y una foto panorámica del lugar. Con esta herramienta de hipervínculo al momento de desplegar la información levantada también se desplegará las fotos de ese punto, tal como se aprecia en la figura 23.

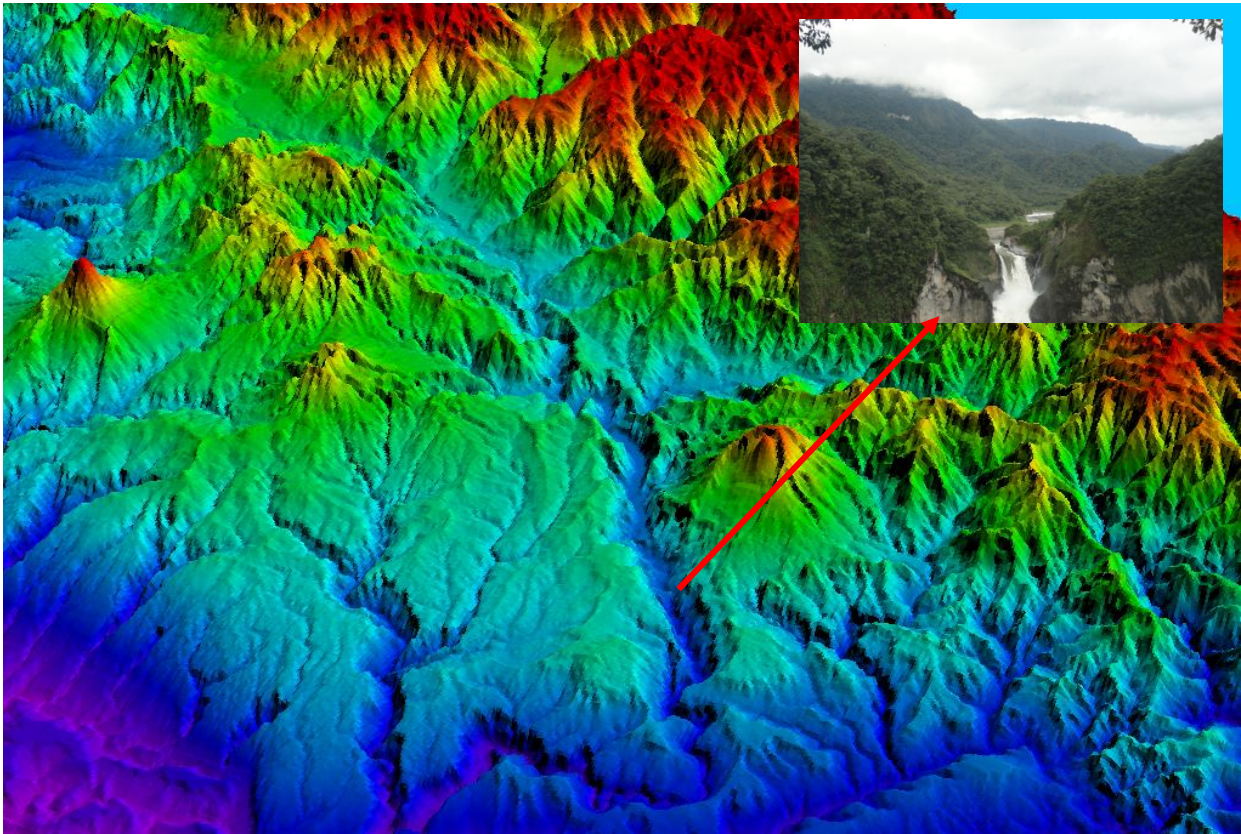


Figura 25. Interpretación 3D en ambiente SIG
 Cascada de San Rafael (limite entre Napo y Sucumbios)

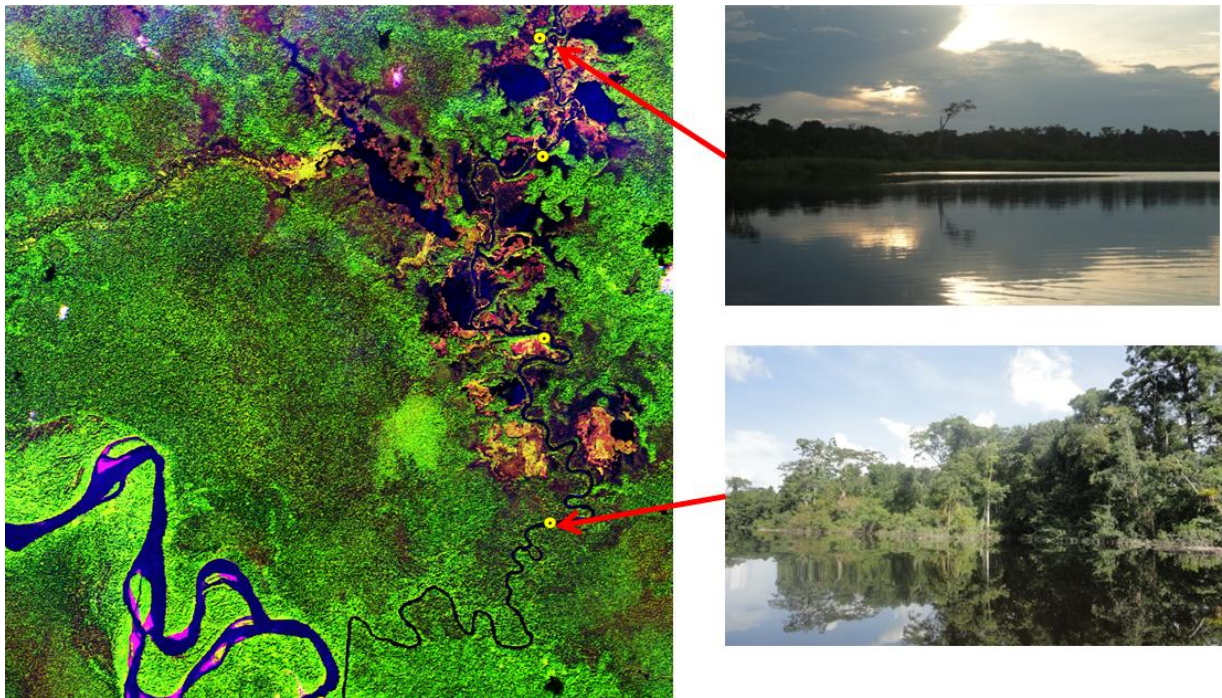


Figura 26. Imagen RapidEye (Fuente: Ministerio del Ambiente)
 Lagartococha, Sucumbios – Frontera Ecuador Perú

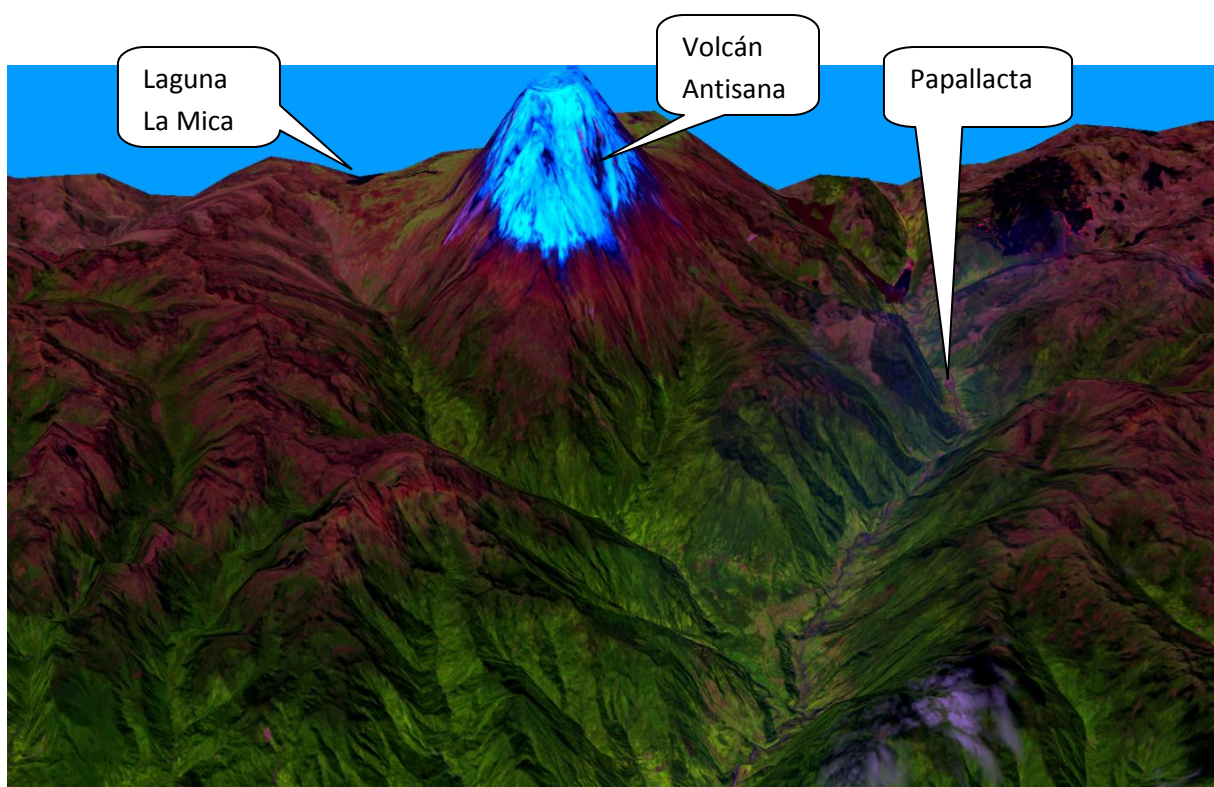


Figura 27. Imagen Landsat en 3D

Volcan Antisana (composicion 5,4,3)

Una vez que las unidades de relieve han sido interpretadas y calibradas según el sistema de clasificación y datos de campo, (además de información de apoyo como imágenes satelitales (figura 26., 27) y mapas relacionados), estas fueron generalizadas (dissolve) mediante herramientas SIG con el fin de poder realizar los siguientes procesos.

Ahora dentro del proceso metodológico y una vez que contamos con los polígonos que representan unidades de relieve vamos a extraer información de elevación para alimentar la tabla de atributos de cada una de estas unidades, con el fin de ayudarnos a diferenciarlas en función de valores estadísticos extraídos de los datos de elevación.

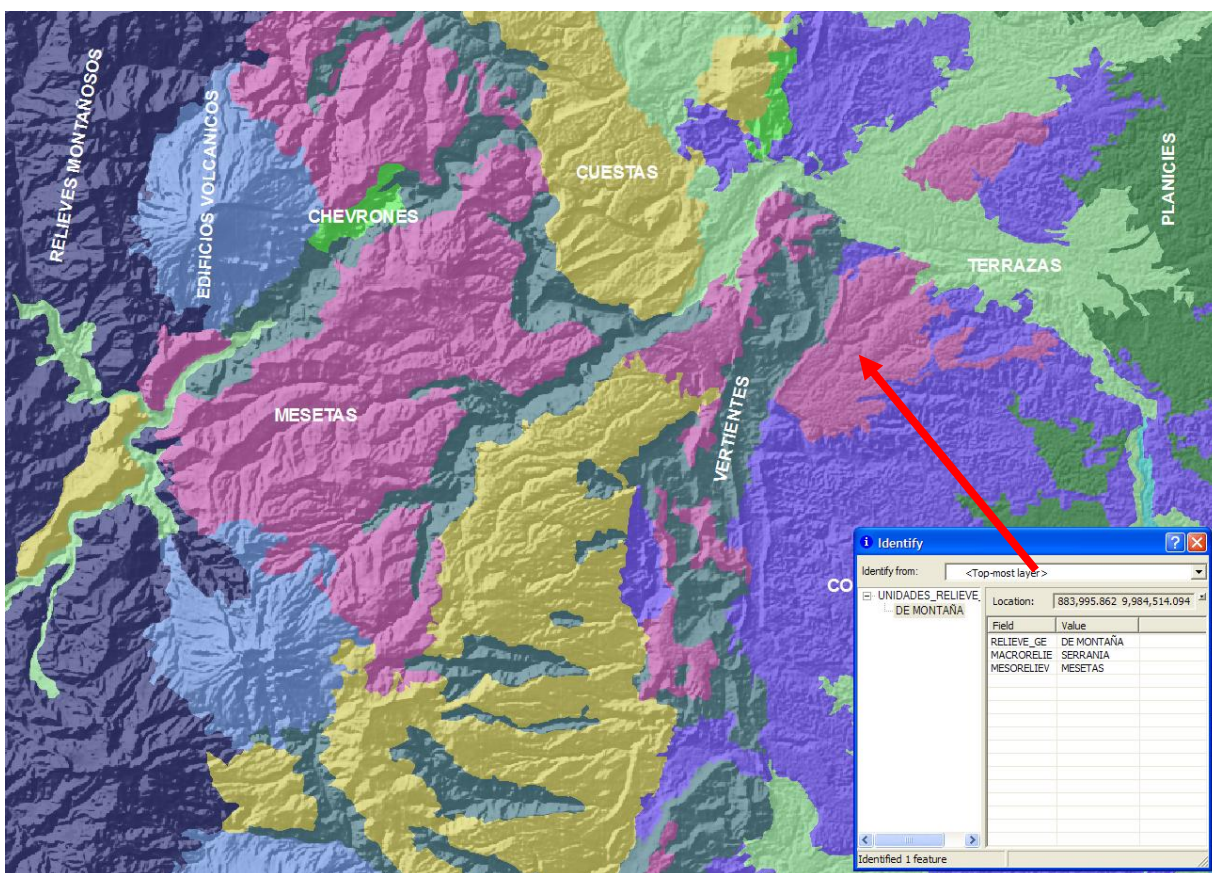


Figura 28. Unidades de Relieve interpretadas y calibradas

Sector el Reventador – Provincia del Napo

6.7. Análisis Estadístico Zonal

El análisis estadístico zonal extrae valores estadísticos (ver tabla 2.) de los píxeles del modelo digital del terreno que corresponden a cada unidad de relieve para ser almacenados en una tabla de atributos.

A partir del modelo digital del terreno se obtendrá la altura promedio (Mean), la altura mínima (Min), la altura máxima (Max) y el desnivel relativo (Range) de cada unidad de relieve, con el fin de poder diferenciar las unidades en función de estos

parámetros. Para realizar este análisis utilizamos la herramienta *Zonal Statistics* en el software ArcGis.

VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
1267	11307	91586700	3518	4726	1208	3921,630	188,668	44341900	912	3947	3518	3915
1268	2349	19026900	4012	5791	1779	4466,210	377,963	10491100	804	4118	4017	4342
1269	31099	251902000	1233	3760	2527	2030,890	400,149	63158800	2049	1735	1233	1942
1270	19776	160186000	2654	5683	3029	4138,880	527,628	81850600	2560	4352	2654	4172
1271	18574	150449000	1468	3072	1604	2255,170	261,808	41887500	1412	2159	1489	2224
1272	19231	155771000	1306	3496	2190	2215,690	450,383	42610000	2008	1881	1306	2135
1273	19070	154467000	2791	5749	2958	3874,930	488,557	73894900	2312	3717	2791	3776
1274	5288	42832800	3741	4257	516	4028,230	103,847	21301300	470	4058	3741	4046
1275	266	2154600	3984	4228	244	4106,350	50,451	1092290	122	4082	3984	4104
1276	1976	16005600	916	1784	868	1332,980	238,752	2633960	653	1693	916	1317

Tabla 2. Muestra de un Análisis Estadístico Zonal

En la figura 45. vemos una terraza en el sector de Lumbaqui, provincia de Sucumbíos, esta terraza pertenece al piedemonte, se encuentra a una altura promedio de 520 metros, su altura mínima es 413 metros, su altura máxima es 699 metros, y tiene un desnivel relativo de 286 metros. Sin duda esta información es un aporte importante al momento de utilizarla para la planificación del territorio.

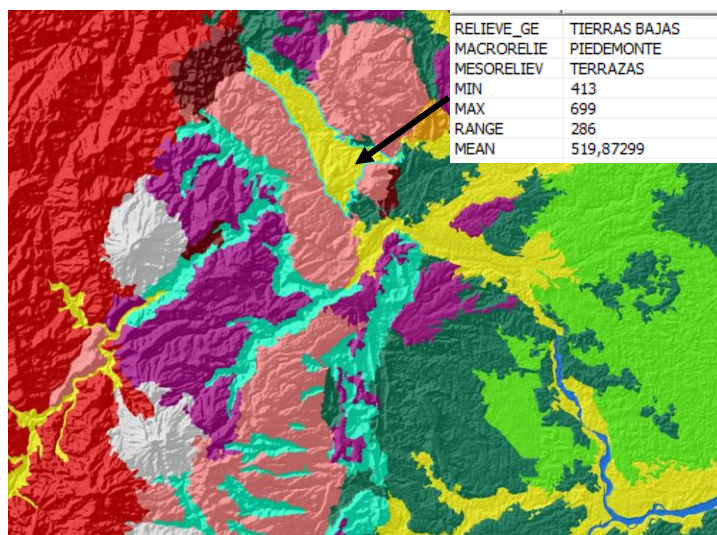
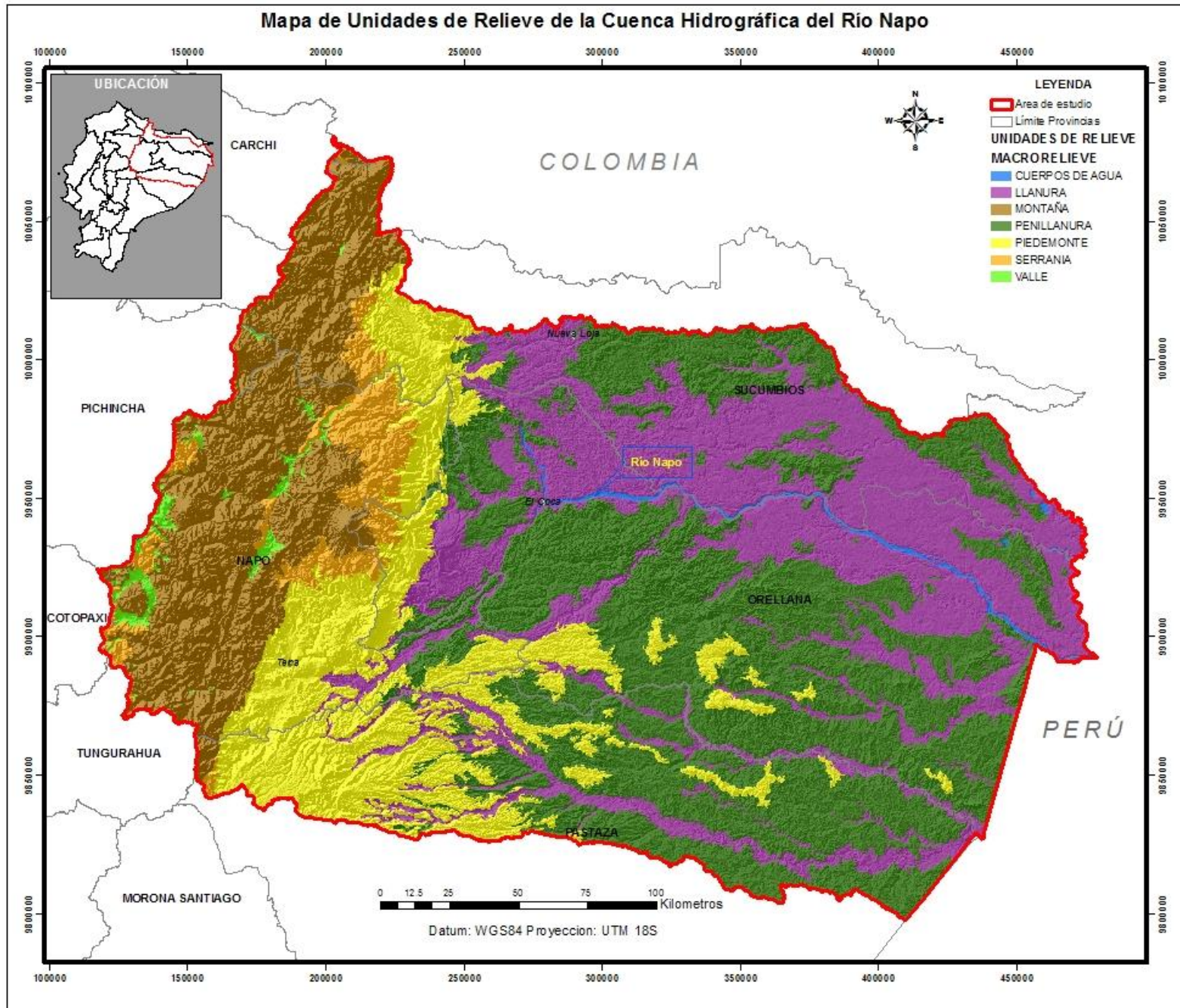
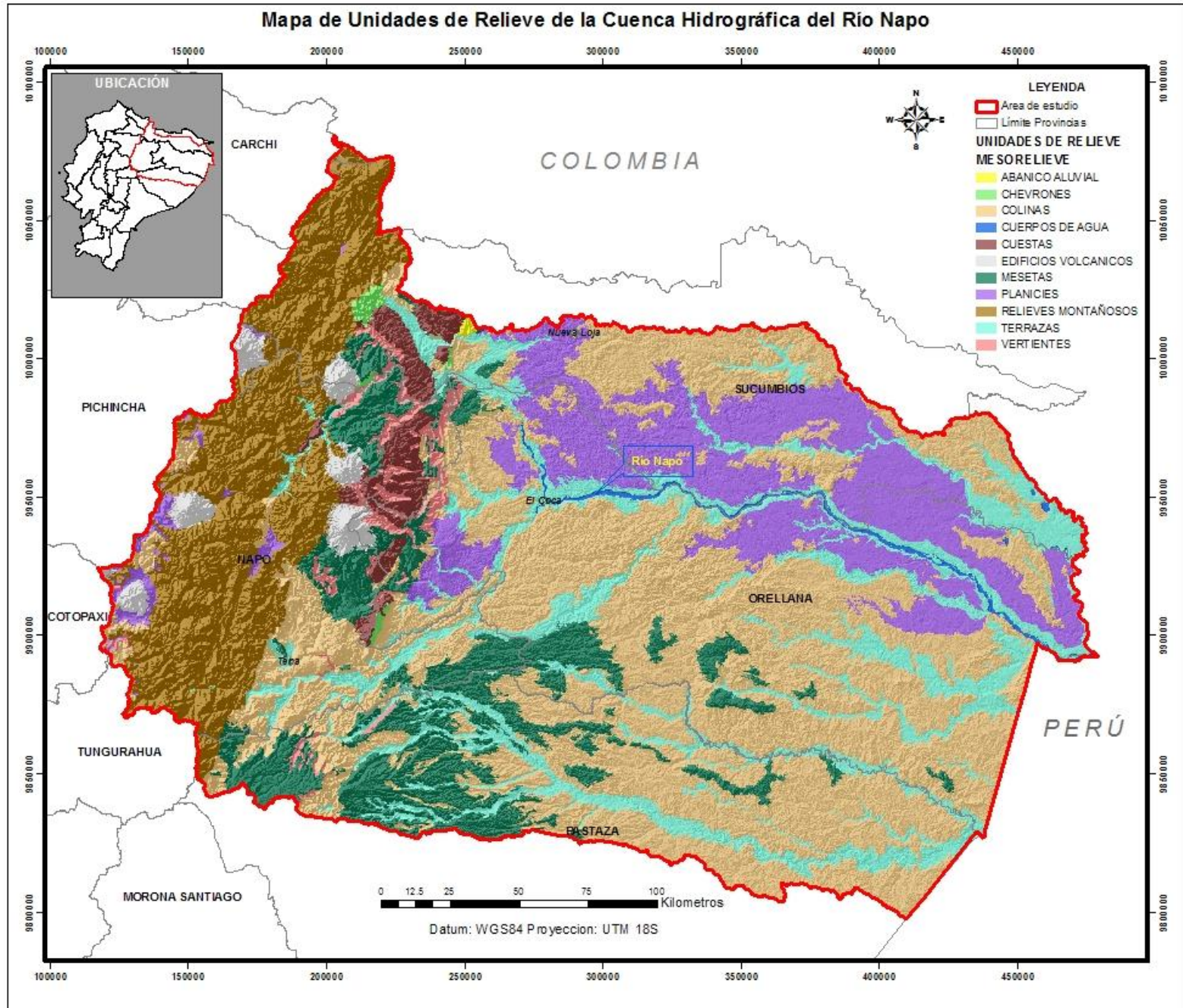


Figura 29. Ejemplo del análisis estadístico Zonal

7. RESULTADOS





8. ANALISIS DE RESULTADOS

Se ha definido las unidades a nivel de macro y meso relieve en función del sistema de clasificación propuesto, obtuvimos como resultado 5 unidades a nivel de macrorelieve y 10 unidades a nivel de mesorelieve, las cuales representan bastante bien el paisaje de la zona de estudio, de acuerdo al sistema de clasificación propuesto. Este sistema fue adaptado a la realidad del área estudiada de manera jerárquica lo cual hace más eficiente a nivel de ordenamiento territorial en diferentes escalas.

Encontramos que la unidad más representativa en la zona de estudio a nivel de macrorelieve es la Penillanura, dominante en la zona baja de la cuenca hidrográfica, seguido por la Llanura amazónica, zonas donde gran parte del año permanecen inundadas o son propensas a inundaciones.

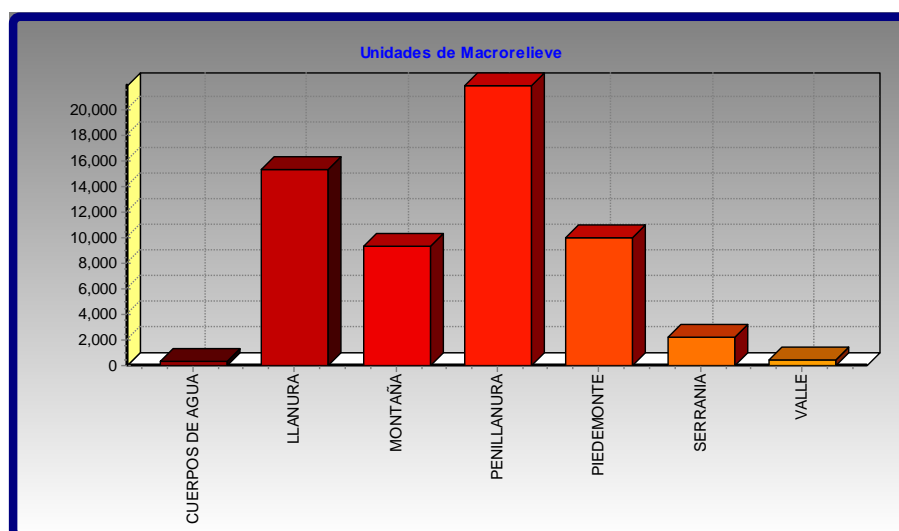


Figura 30. Macrorelieve en la zona de estudio

A nivel de mesorelieve la unidad más abundante son las colinas, especialmente en la zona baja, estas colinas son de bajas a medianas sobre areniscas y arcillas, seguido por las planicies donde prevalecen los pantanos, y el relieve montañoso de la cordillera oriental que es donde se originan los ríos más importantes de la cuenca.

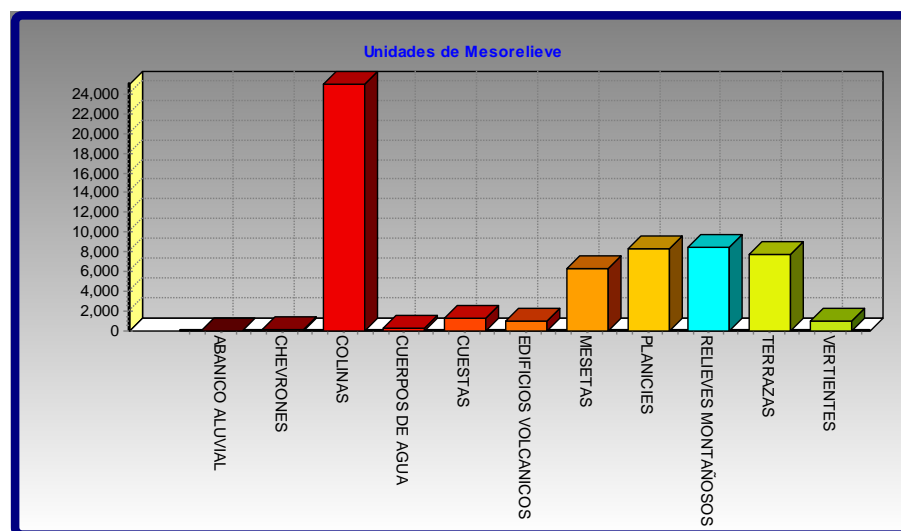


Figura 31. Mesorelieve en la zona de estudio

Esta información generada como se ha mencionado, es un importante insumo, tanto a nivel nacional como a nivel provincial, por lo que cada provincia debe comprender como su territorio está aportando a la cuenca, o es influido por ella.

A continuación analizamos las unidades de relieve en las provincias más importantes en función del territorio en el área de estudio.

SUCUMBIOS

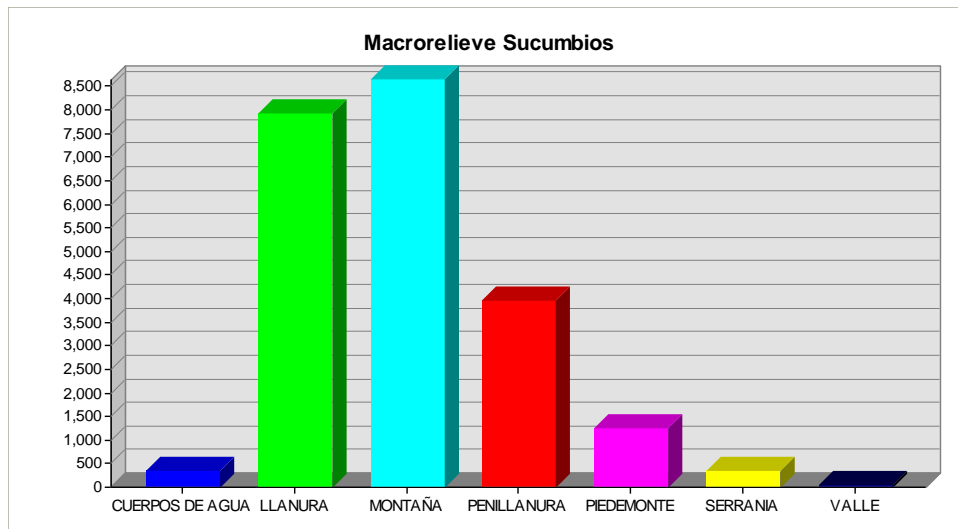


Figura 32. Macrorelieve en la provincia de Sucumbíos

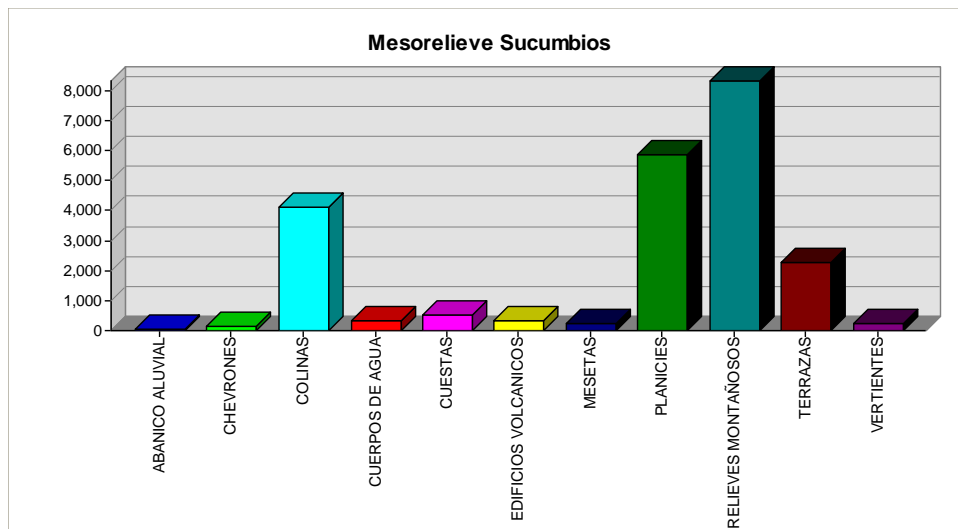


Figura 33. Mesorelieve en la provincia de Sucumbíos

ORELLANA

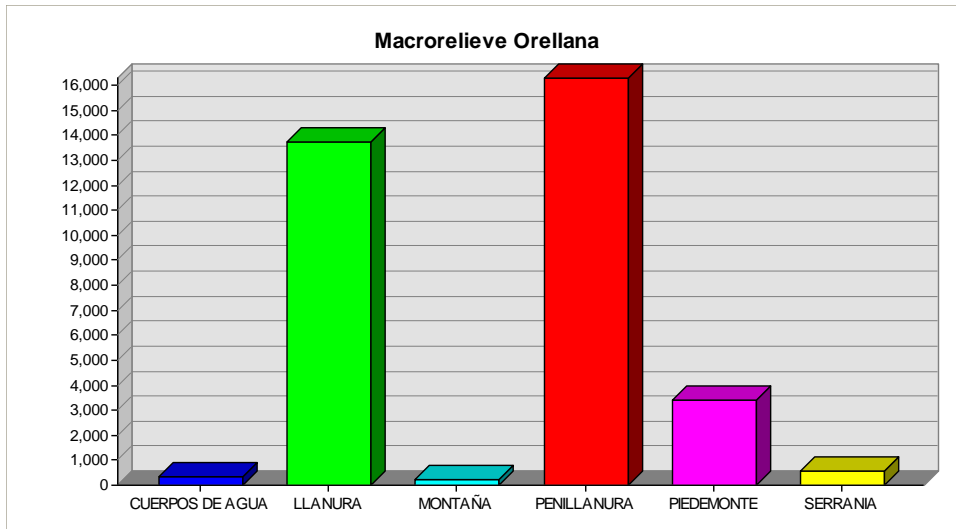


Figura 34. Macrorelieve en la provincia de Orellana

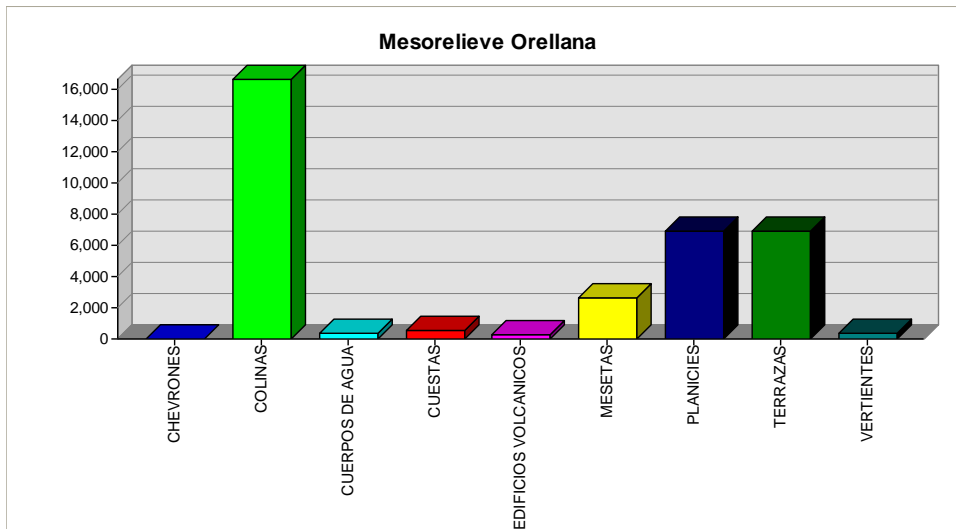


Figura 35. Mesorelieve en la provincia de Orellana

NAPO

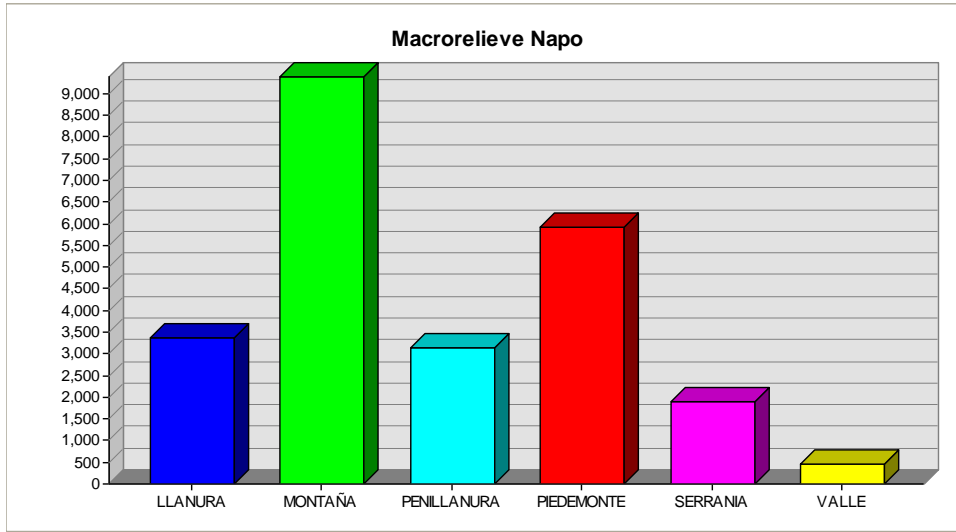


Figura 36. Macrorelieve en la provincia de Napo

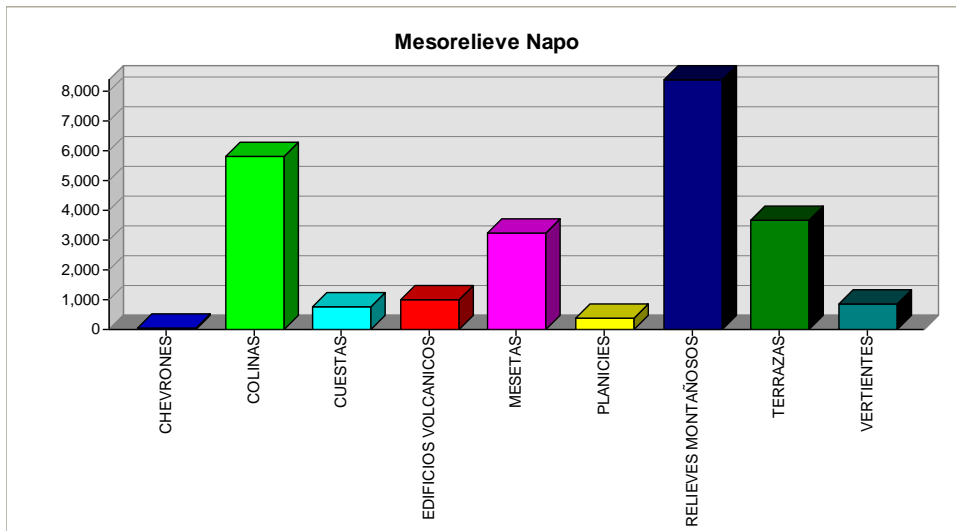


Figura 37. Mesorelieve en la provincia de Napo

PASTAZA

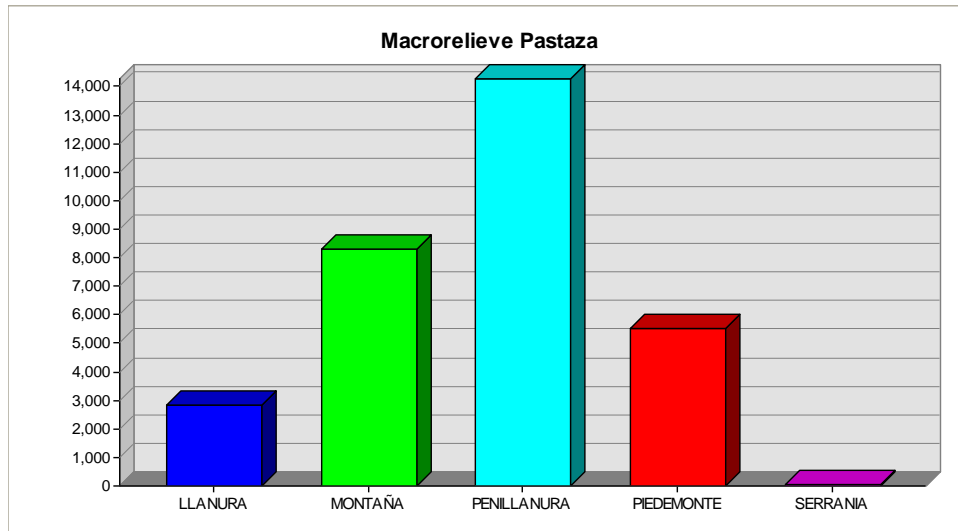


Figura 38. Macorelieve en la provincia de Pastaza

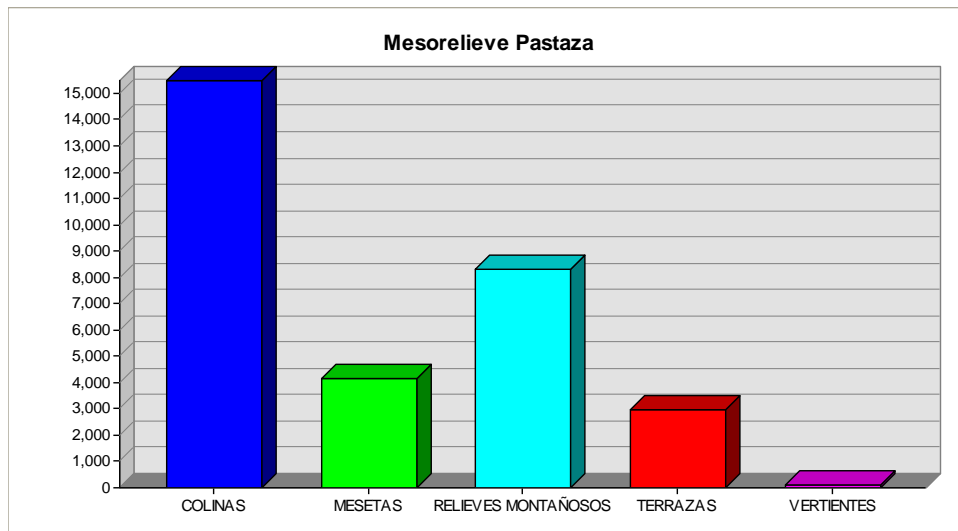


Figura 39. Mesorelieve en la provincia de Pastaza

Esta información está orientada principalmente a los gobiernos autónomos descentralizados, para la planificación de sus territorios para dar cumplimiento a los objetivos del plan nacional del buen vivir según las políticas de estado planteadas por el gobierno actual en diferentes aplicaciones tales como:

Vegetación: las formas del relieve generan diferentes hábitats para las plantas, formando condiciones específicas que junto a criterios geológicos, climáticos, y suelos permiten identificar distintos tipos de vegetación, tal como los bosques sobre mesetas de areniscas, los bosques montañosos, piemontanos, los bosques inundables de terrazas aluviales, etc.

Riesgos: las formas del relieve permiten identificar escenarios de inundación para la gestión de riesgos en planificación y prevención, igualmente junto a criterios climáticos, geológicos y de suelo se puede identificar zonas inundables, zonas inundadas, zonas susceptibles a inundaciones, como por ejemplo en planicies y terrazas aluviales, así como deslizamientos en relieves montañosos.

Prevención de desastres: igualmente las formas del relieve indicarán el escenario de riesgos para implementar políticas para evitar catástrofes, tales como prohibir asentamientos humanos en los valles de inundación de los ríos, establecer medidas de prevención para los poblados que ya se encuentran en riesgo utilizando sobre cartografía base el mapa de unidades de relieve, mantener vegetación en laderas para evitar deslizamientos, etc.

Gestión Ambiental: las formas del relieve junto a otras variables como vegetación, cobertura y uso del suelo permitirán planificar el adecuado uso del territorio para una adecuada gestión de los recursos naturales a nivel de cuenca hidrográfica, o establecer una zonificación a nivel de unidades de paisaje para una mejor administración y manejo sustentable de las áreas naturales, etc.

9. CONCLUSIONES

El estudio del relieve por medio de índices topográficos ha dado excelentes resultados en la generación de unidades morfométricas, que una vez asignados los atributos se convierten en unidades de relieve, lo cual es el objetivo del presente estudio.

La interpretación de las unidades es fundamental, sin duda el método de clasificación automática utilizado es de gran ayuda, sin embargo no es suficiente, por lo que es muy importante el conocimiento del intérprete de la zona de estudio, el levantamiento de información en campo es la mejor herramienta para aquello.

Se ha descartado el uso del índice topográfico “aspecto” o conocido también como exposición, esta variable representa la orientación de la pendiente en función del azimut. En latitudes altas este índice tiene muchas aplicaciones especialmente por la exposición solar, la cual no es igual en distintas épocas del año, como es el caso del Ecuador, por esta razón se hace irrelevante la utilización de esta variable, que sabemos no tiene un contexto importante en la discriminación de unidades de relieve.

El mapa de unidades de relieve, no es un mapa que representa la geomorfología como tal de la Cuenca, como se ha indicado en este documento, el objetivo de este mapa es convertirse en un insumo para la planificación y gestión del territorio, por esta razón nuestra leyenda propuesta ha sido generalizada para tal fin, este modelo es un insumo de calidad que podrá ser utilizado por los gobiernos autónomos

descentralizados que forman parte de la cuenca para el cumplimiento de cada uno de sus planes de ordenamiento territorial.

El modelo de unidades de relieve tiene aplicaciones prácticas en la gestión y ordenamiento del territorio en temáticas como vegetación, recursos naturales, riesgos naturales, prevención, zonificación, implementación de políticas derivadas del análisis de esta variable junto a otras variables, de tal manera que contribuyan al desarrollo mediante un ordenamiento adecuado del territorio que mejore la calidad de vida de la sociedad.

10. RECOMENDACIONES

Esta metodología fue realizada utilizando como insumo principal un MDT de resolución media, sin embargo se recomienda utilizar un modelo de mejor resolución y calidad para poder obtener unidades más finas y precisas.

Se puede utilizar más índices topográficos además de los expuestos en el presente estudio, sin embargo, los índices utilizados han dado excelentes resultados.

Los parámetros ingresados en cada uno de los cálculos han sido definidos como un estándar en función del insumo y de los resultados que se esperaba en función del sistema de clasificación, sin embargo es recomendable modificar los mismos de acuerdo a estos requerimientos.

La leyenda temática propuesta para el análisis está enfocada de acuerdo a la escala cartográfica y adaptada a lo que se puede encontrar en la zona de estudio, se puede proponer otro sistema siempre y cuando tome en cuenta el insumo y exista relación entre la escala temática y cartográfica.

El sistema de clasificación de unidades basado en pixeles da buenos resultados, sin embargo con un modelo digital del terreno de alta precisión podría funcionar bastante bien una clasificación orientada a objetos.

11. BIBLIOGRAFIA

- A.M. Felicísimo. Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones, 1994.
- P Holmgren. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological processes*, 8:327-334, 1994.
- D.G. Tarboton. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2):309-319, 1997
- R. Dikau. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In J. Raper, editor, *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*, pages 51-77. Taylor & Francis, London, 1989.
- E.E. Dikau, R. Brabb and R.M Mark. Landform classification of New Mexico by computer. U.S. Dept Interior, U.S. Geological Survey., 1991.
- K.H. Jones. A comparison of eight algorithms used to compute slopes as a local property of the dem. In *Proceedings of the GIS Research UK 1996 Conference*, pages 7-12, 1996.
- ARONOFF, S., 1989. *Geographic Information Systems: A management perspective*. WDL Publications, Ottawa, 294 pp.
- BURING, P., 1960. The applications of aerial photographs in soil surveys. En: *Manual of photographic interpretation*. American Society of Photogrammetry, Washington, D.C., pp 631-666.
- Wood, Joseph *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*, Ph. D. Thesis, University of Leicester, Department of Geography, Leicester, UK, 1996.
- DIKAU, R., 1989, The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. En: *Three dimensional applications in GIS*, J. Rapper (editor), Taylor & Francis, London, pp 51-77.
- FARGAS, D., MARTÍNEZ-CASANOVAS, J.A. Y POCH, R., 1997. Identification of critical sediment source areas at regional level. *Journal of Physics & Chemistry of the Earth*, 22: 355-359.

- FELICÍSIMO, A., 1994. Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones, Oviedo, 220 pp.
- KLINGEBIEL, A.A., HORWATH, E.H., MOORE, D.G. Y REYBOLD, W.U., 1987. Use of slope, aspect, and elevation maps derived from digital elevation model data in making soil surveys. Soil Science Society of America Special Publication n. 20, SSSA, Madison, pp. 77-90.
- MARSH, W.M., 1991. Landscape planning: Environmental applications. J.Wiley & Sons, Inc. Toronto, Canada.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., 1998. Suelo-Paisaje-Erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès – Anoia (Cataluña). Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial: Bases de datos, SIG y Teledetección. Tesis doctoral, Universitat de Lleida, Lleida.
- MOORE, I.D. Y BURCH, G.J., 1986. Modelling erosion and deposition: Topographic effects. Transactions of the ASAE, 29: 1624-1630.
- MOORE, I.D., BURCH, G.J. Y MACKENCIE, D.H., 1988. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. Transactions of the ASAE, 31: 1098-1107.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. Y LANDSON, A.R., 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes, 5: 3-30.
- ZEVENBERGEN, L.W. Y THORNE, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes and Landforms, 12: 47-56.
- Codazzi, Agustín. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Instituto geográfico (IGAC).
- EXELIS VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, www.exelisvis.com
- DE PEDRAZA, JAVIER. Geomorfología Principios, Metodos y Aplicaciones, Madrid, 1996.
- GONZALES, LUIS. Ingeniería Geologica, Madrid, 2002.

12. GLOSARIO

Aluvial: De los sistemas fluviales y en general de las corrientes de aguas superficiales. (http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm).

ASTER: (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) (Radiómetro Avanzado Aerotransportado de Emisión y Reflexión Termal): Sensor abordo del satélite TERRA, captura información de un mismo punto de la tierra cada 16 días. El sensor cuenta con tres tipos de detectores que proveen imágenes con una resolución de 14 bandas espectrales y una cobertura de 60 Km X 60 Km (360 Km², 360.000 has) y su resolución espacial varia con la longitud de onda: 15 metros para el visible e infrarrojo cercano; 30 metros para el infrarrojo corto y 90 metros para las bandas termales. (<http://www.biesimci.org/SIMCI/glosario.html>).

ASTER GDEM: Modelo Digital de Elevación producido A partir de imágenes ASTER.

Azimut: Llamado también acimut, ángulo que forma el plano vertical que contiene una dirección dada con el meridiano local, contado en el plano del horizonte en sentido de las agujas del reloj. Como origen se toma, en unos casos, la dirección sur y en otros, la norte. (http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm).

Bandas: Los sensores remotos cuentan con la capacidad de capturar información de la superficie terrestre simultáneamente en diferentes longitudes de onda, rangos espectrales, canales o bandas del espectro electromagnético, generalmente se captura información en longitudes de onda del espectro visible y el infrarrojo para aplicaciones de uso y cobertura de la tierra. La disponibilidad de información en diferentes bandas de una determinada superficie permite realizar diferentes análisis sobre las características de los fenómenos que en ella se presentan. (<http://www.biesimci.org/SIMCI/glosario.html>).

Celdas: Se denominan también píxeles, se refiere a la unidad mínima de información de una imagen o un mapa raster. Es el elemento más pequeño al que un dispositivo de visualización puede asignarle de forma independiente un atributo como es el color. (http://www.geogra.uah.es/gisweb/1modulosespanyol/IntroduccionSIG/GISModule/GIST_Raster.htm).

Charnela: La charnela es el lugar donde se produce la curvatura del pliegue o, si se quiere, el lugar donde los flancos se encuentran; sufre tensiones distensivas como consecuencia de la curvatura, de manera que tiende a abrirse con fallas normales. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Anticlinal>).

Clusters: Es una técnica multivariante que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencias entre los grupos. (<http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Cluster.pdf>).

ENVI: Software Environment for Visualizing Images.

Filtro: Es la operación que se aplica a imágenes ráster para mejorar o suprimir detalles espaciales con el fin de mejorar la interpretación visual. Modifica el valor de cada píxel de acuerdo con los valores de los píxeles que lo rodean; se trata de transformar los ND originales de tal forma que se parezcan o diferencien más de los correspondientes a los píxeles cercanos. Dependiendo del tipo, se utilizan para suavizar y eliminar ruido, o bien para realzar los rasgos lineales de una imagen. (<http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/tradiimg.htm>; <http://coello.ujaen.es/Asignaturas/teledeteccion/glosario.htm>).

Fisiografía: La Fisiografía comprende el estudio y entendimiento de todos los fenómenos que determinan la apariencia y características de un paisaje. Lo más importante en este aspecto es la geomorfología del área, la hidrología, la vegetación y la identificación de los “procesos fisiográficos”.(Bennema y Gelens, 1969).

GPS: Acrónimo de Global Positioning System, o Sistema de Localización Global que hace referencia a un sistema mediante el cual es posible estimar las coordenadas actuales de una estación en tierra mediante la recepción simultánea de señales emitidas por varios satélites (llamados en conjunto constelación GPS) (Felicísimo, A. SF).

Fotointerpretación: Es básicamente, identificar los diferentes objetos que aparecen en una fotografía aérea. (López-Cuervo e Estevez, Fotogrametría).

Imagen Multiespectral: Una imagen satelital multiespectral es aquella que es generada a partir de los datos recolectados por un mismo sensor en más de una banda. (<http://www.biesimci.org/SIMCI/glosario.html>).

Interferometría: Es una técnica que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas de radio; para obtener una imagen de mejor resolución. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Interferometr%C3%ADa>).

Kernel o vecindario: Se entiende como una matriz de coeficientes donde el entorno del punto (x,y) que se considera en la imagen para obtener g(x,y) está determinado por el tamaño y forma del kernel seleccionado. (http://es.wikipedia.org/wiki/Procesamiento_digital_de_im%C3%A1genes).

Morfométria: La morfometría realiza la subdivisión del perfil y el mapa topográfico, en porciones de territorio que posean un sentido de la inclinación homogéneo y una inclinación comprendida dentro de varios rangos. (http://ggyma.geo.ucm.es/docencia/GeodinaExter2T/Documentos/0X_Morfometria.pdf).

Radar: Es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados, formaciones meteorológicas y el propio terreno. (<http://es.wikipedia.org/wiki/Radar>).

Raster: Modelo de datos para el almacenamiento de imágenes constituido por una matriz de columnas y filas, donde cada celda de la matriz (píxel) es referenciada por sus coordenadas y se une a uno o más valores de atributos. (<http://www.biesimci.org/SIMCI/glosario.html>).

RGB: Sigla de rojo-verde-azul . Se trata de un sistema de especificación del color basado en la propiedad aditiva de los tonos primarios que es el comúnmente utilizado en los sistemas informáticos y en la composición en verdadero o en falso color de las imágenes espaciales. (<http://coello.ujaen.es/Asignaturas/teledeteccion/glosario.htm>).

Reflectancia: Medida de la capacidad de una superficie para reflejar energía electromagnética en una determinada longitud de onda. Es la razón existente entre el flujo reflejado y el incidente sobre dicha superficie. Aplicado al espectro visible, suele hablarse de albedo. (<http://coello.ujaen.es/Asignaturas/teledeteccion/glosario.htm>).

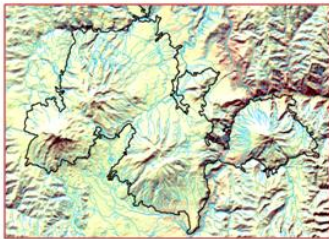
13. ANEXOS

Criterios de Interpretación

MONTAÑA

EDIFICIOS VOLCÁNICOS

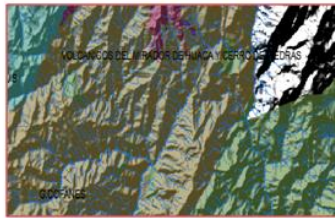
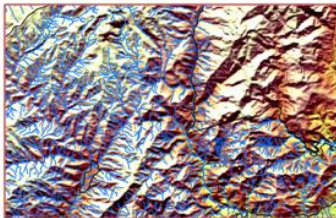
ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DE SOMBREADO



ANÁLISIS GEOLÓGICO



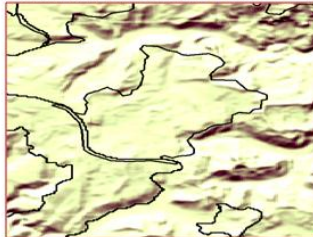
RELIEVES MONTAÑOSOS



SERRANÍA

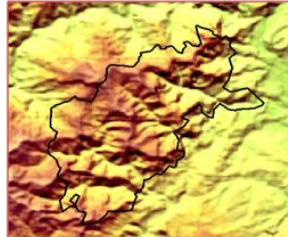
COLINAS

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y DE MODELO TOPOGRÁFICO



CHEVRONES

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y ELEVACIÓN



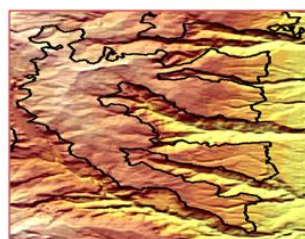
VERTIENTES

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y ELEVACIÓN

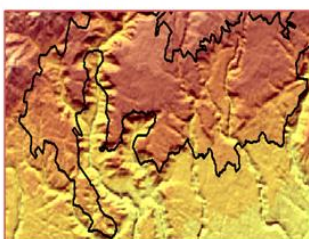


CUESTAS

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



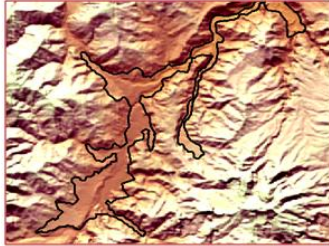
MESAS



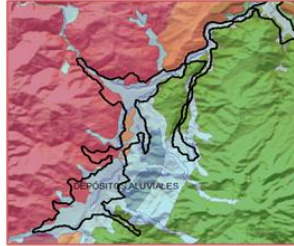
VALLE

TERRAZAS

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



ANÁLISIS GEOLÓGICO

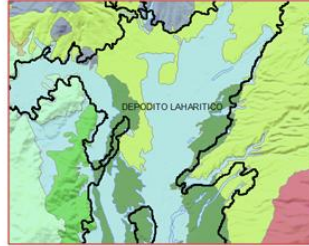


PLANICIES

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



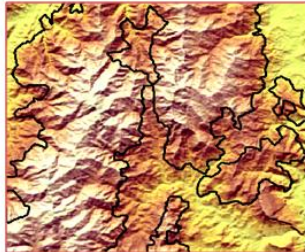
ANÁLISIS DE GEOLÓGICO Y DE PENDIENTES



CORDILLERA

RELIEVES MONTAÑOS

ANÁLISIS DE SOMBREADO, ELEVACIÓN Y MODELO TOPOGRÁFICO

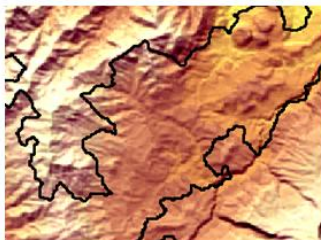


ANÁLISIS GEOLÓGICO



COLINAS

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y PENDIENTES



ANÁLISIS DE GEOLÓGICO



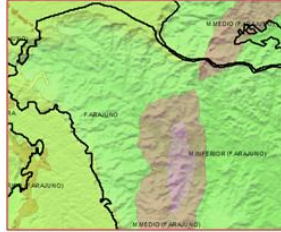
PIEDEMONTE

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



COLINAS

ANÁLISIS GEOLÓGICO



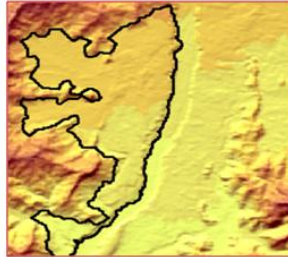
CUESTAS

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



PLANICIES

ANÁLISIS DE SOMBREADO, PENDIENTES Y ELEVACIÓN



PENILLANURA

COLINAS

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



ANÁLISIS DE SOMBREADO Y PENDIENTES

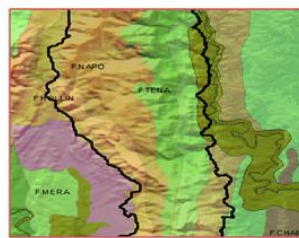


CHEVRONES

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO



ANÁLISIS GEOLÓGICOS



LLANURA

PLANICIES

ANÁLISIS DE SOMBREADO Y MODELO TOPOGRÁFICO

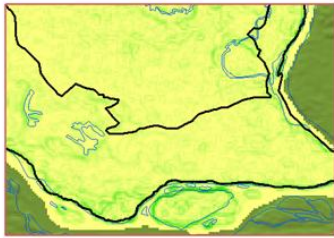


ANÁLISIS DE PENDIENTES



TERRAZAS

ANÁLISIS DE PENDIENTES Y MODELO TOPOGRÁFICO



ANÁLISIS GEOLÓGICO

