



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**“Automatización del trazado de geoformas del relieve
mediante sistemas de información geográfica, a partir de un
modelo digital de terreno”**

**Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Agrónomo**

Autor:

Luis Ivan Medina Cajamarca

Director:

Ing. Eduardo Tacuri Espinoza M. Sc.

Cuenca, Ecuador

2014



RESUMEN

El trazado de las geoformas del relieve en la actualidad se realiza de forma manual, utilizando información cartográfica y temática impreso en material fotográfico y se traza con ayuda del estereoscopio, volviéndose un trabajo laborioso, que requiere de tiempo y experticia para realizarlo.

La presente investigación plantea estudiar la aplicabilidad de los sistemas de información geográfica para realizar el trazado de las geoformas del relieve, a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) de gran detalle, generado a partir de información LIDAR (Light Detection and Ranging), de esta forma, se propuso utilizar un método que pueda replicarse para áreas extensas y con información de gran detalle. El estudio se realizó en un área de 5 km², ubicada entre la provincia del Cañar, cantón Azogues, sector Jatumpamba, y la provincia del Azuay, cantón Paute, sector San Cristóbal.

Se analizó los criterios caracterizadores, delimitadores de formas del relieve y el algoritmo de combinación de MDT, para trazar las diferentes clases de geoformas; así también se estudió diferentes softwares que procesan la información para generar el MDT, modelos derivados y análisis multicriterio con el algoritmo de clasificación no supervisado propuesto por Iwahashi & Pike (2007) el cual utiliza una firma geométrica compuesta por la pendiente, convexidad y textura.

Como resultado se consiguió generar tres tipos de clasificación pudiendo trazar el relieve en 8, 12 o 16 clases. La jerarquía está determinada por la pendiente suave, moderada, empinada y muy empinada. Luego la convexidad baja y alta, y por último la textura fina y gruesa. Finalmente las geoformas fueron sometidas a verificación cualitativa y cuantitativa en campo obteniendo un acierto de 98 % en textura, 99% en convexidad y 100% en pendiente, lo que posibilitó comprobar la viabilidad del método empleado en la clasificación de geoformas del relieve.

Palabras Claves: GEOFORMA, RELIEVE, MDT, PENDIENTE, CONVEXIDAD, TEXTURA.



ABSTRACT

Landform classification is still done manually, using hardcopy's (printouts) of maps and aerial photographs, delineating with the use of a stereoscope (used for viewing in 3 dimensions). It's a laborious task that requires time and expertise to do so.

This investigation proposes the use of geographic information system (GIS) for delineating landforms, starting from Digital Terrain Model (DTM) of great detail. The DTM is a product of LIDAR data (Light Detection and Ranging), and the methodology uses his derives: slope, curvature y texture. The proposed method can be replicated for extended areas with high detail level information. The study was done in a 5 square kilometer area located between the province of Cañar, canton Azogues, sector Jatumpamba, and the province of Azuay, canton Paute, sector San Cristóbal.

We analyzed the criteria and the combination of algorithms of the MDT to delineate the different landforms, and also the different software's which process the information to generate MDT and it's derives, with the unsupervised classification algorithm (ISODATA) proposed by "Iwahashi & Pike (2007)" which uses a geometric signature composed by slope, convexity and texture,

The results consisted of three types of classifications, in 8, 12 or 16 classes. The hierarchy is determined firstly by dividing the slope in four classes: gentle, moderate, steep and very steep. Secondly the convexity generates 2 types more: high and low, and lastly the texture divides in two classes; fine and course. Afterwards the landforms were submitted to a qualitative and quantitative verification in the field, which obtained an accuracy of 98% in texture, 99% in convexity, and 100% in slope, which made it possible to verify the feasibility of the landform classification method.

Keywords: LANDFORM, RELIEF, DMT, SLOPE, CONVEXITY, TEXTURE.



TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo general del proyecto	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. HIPÓTESIS	3
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. FUNDAMENTOS	4
2.1.1. Unidad ambiental	4
2.1.2. Relieve terrestre	4
2.1.3. Geoforma	4
2.1.4. Taxonomía de las geoformas	5
2.1.5. Densidad de drenaje (D)	6
2.1.6. Grado de pendiente	7
2.1.7. Geoforma y topografía (relieve)	7
2.1.8. Escalas	10
2.1.9. Área mínima cartografiable	11
2.1.10. Sistema de coordenadas geográficas	12
2.1.11. Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator	12
2.1.12. Geomática	12
2.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	13
2.2.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	13
2.2.2. Componentes de un SIG	13
2.2.3. Información que se maneja en el SIG	15
2.2.4. Aplicaciones de los SIG	15
2.3. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)	16
2.3.1. Introducción	16
2.3.2. Origen	16
2.3.3. Definición MDT	17
2.3.4. Tipos de MDT	17
2.4. CARACTERIZACIÓN DEL RELIEVE	19
2.4.1. Descriptores estadísticos generales	20
2.4.2. Elaboración de modelos derivados	20
2.5. CLASIFICACIÓN DE FORMAS DEL RELIEVE	22
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1. INFORMACIÓN DIGITAL, EQUIPOS Y SOFTWARE	26
3.1.1. Información digital	26
3.1.2. Equipos	26
3.1.3. Software	26
3.2. ÁREA DE ESTUDIO	27
3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	28
3.3.1. Generación de modelo digital de terreno MDT	29
3.3.1.1. Información digital base	30
3.3.1.2. Identificación de herramientas SIG	32
3.3.1.3. Procesamiento de la Información base LIDAR	33
3.3.1.4. Visualización de puntos .las	34
3.3.1.5. Modelado de los puntos .las clasificados	36



3.3.1.6.	Análisis de MDT.....	38
3.3.2.	Protocolo para trazar geoformas del relieve	39
3.3.2.1.	Criterios delimitadores	39
3.3.2.2.	Identificación de herramientas SIG	42
3.3.2.3.	Modelamiento topográfico	44
3.3.2.4.	Métodos de Clasificación Automática.....	47
3.3.2.5.	Simulado del trazado de geoformas del relieve	51
3.3.2.6.	Análisis de componentes principales	51
3.3.3.	Proceso de verificación y validación de geoformas del relieve.....	53
3.3.3.1.	En oficina	53
3.3.3.2.	Reconocimiento en campo	54
3.3.3.3.	Análisis de la información	55
3.3.3.4.	Análisis estadístico comparativo	56
3.3.3.5.	Análisis visual comparativo.....	58
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		59
.....		59
4.1.	MODELO DIGITAL DE TERRENO	59
4.2.	PROTOCOLO PARA TRAZADO DE GEOFORMAS DEL RELIEVE.....	60
4.2.1.	Modelamiento topográfico	60
4.2.2.	Trazado del relieve	63
4.2.3.	Análisis de componentes principales	69
4.3.	VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE GEOFORMAS DEL RELIEVE.....	70
4.3.1.	Análisis de información	71
4.3.1.1.	Análisis visual comparativo.....	73
4.3.1.2.	Análisis de inconsistencias	74
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		76
.....		76
5.1.	Conclusiones.....	76
5.2.	Recomendaciones.....	78
BIBLIOGRAFÍA		79
ANEXOS.....		83
Mapa de Trazado de geoformas.....		109



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía de clasificación de relieve	5
Tabla 2. Jerarquía de las geoformas principales	8
Tabla 3. Subdivisiones de las geoformas complejas	8
Tabla 4. Clasificación de las formas de las pendientes	9
Tabla 5. Clases de gradiente de la pendiente	10
Tabla 6. Escalas y su equivalencia	11
Tabla 7. Área mínima cartografiable para diferentes escalas	11
Tabla 8. Clasificación no supervisada del relieve, en nivel taxonómico de grupo.....	24
Tabla 9. Información base recopilada	30
Tabla 10. Especificación de medios LIDAR utilizados en la captura de información	31
Tabla 11. Especificación de medios - imagen.....	31
Tabla 12. Softwares utilizados en generación MDT	33
Tabla 13. Criterios caracterizadores	51
Tabla 14. Valores estadísticos del modelo de pendientes	61
Tabla 15. Valores mínimos y máximos de pendiente, convexidad y textura para 8 clases de geoformas.....	64
Tabla 16. Prueba de normalidad.....	72
Tabla 17. Prueba de T-Student para muestras relacionadas.....	72

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Posición de la pendiente en terrenos ondulados y montañosos	9
Figura 2. Forma de pendiente y direcciones de la superficie.	9
Figura 3. Componentes de un SIG	13
Figura 4 (izquierda) modelo digital raster, (derecha) modelo digital vectorial	18
Figura 5. Ubicación del área de estudio a nivel Nacional y cantonal	27
Figura 6. Diagrama de la metodología	29
Figura 7. Proceso de generación del MDT	30
Figura 8. A) Histograma de valoración, B) tipo de información	32
Figura 9. Líneas de vuelo LIDAR y cuadrantes de trabajo del área de estudio	34
Figura 10. MicroStation y aplicación T-Scan	35
Figura 11. Puntos visualizados y clasificados	35
Figura 12. Proceso de modelado de puntos Ground	36
Figura 13. Proceso de exportación	37
Figura 14. Ventana de escaneo de superficie y cálculo de pendiente para cada celda.	40
Figura 15. Comparación de valores por pendiente en grados versus porcentaje	40
Figura 16. Diagrama de valores de curvatura	42
Figura 17. Diagrama de identificación de software	43
Figura 18. Histograma de características específicas. Análisis Morfométrico	43
Figura 19. Generación de MDT Derivados	44
Figura 20. Introducción del MDT a SAGA GIS	45
Figura 21. Inputs para generación de pendiente y aspecto.	45
Figura 22. Inputs para generación de convexidad de la superficie del terreno	46
Figura 23. Inputs para la generación de textura de la superficie del terreno	46
Figura 24. Diagrama de flujo automatizado para la clasificación de geoformas del relieve en 8, 12 y 16 clases.	48
Figura 25. Partición esquemática para imágenes en escala de grises de tres variables de entrada y 8, 12, y 16 clases de salida	49
Figura 26. Diagrama de trazado del relieve	51
Figura 27. Vista anáglifo 3D	53
Figura 28. Levantamiento de información en campo	55
Figura 29. Tratamiento y análisis de la información	56
Figura 30. Fórmula del error medio cuadrático.	58
Figura 31. Vista 3D de ortofoto con la capa de geoformas sobrepuestas	58
Figura 32. MDT del Área de estudio en vista 3D	59
Figura 33. Protocolo para trazado de geoformas del relieve	60
Figura 34. Modelo derivado de pendientes	61
Figura 35. Modelo derivado de Convexidad	62
Figura 36. Modelo digital derivado de textura	63
Figura 37. Inputs para clasificación de geoformas	64
Figura 38. Trazado en 8 clases de geoformas del relieve	65
Figura 39. Histograma de clasificación de geoformas en 8 clases	65
Figura 40. Trazado en 12 clases de geoformas del relieve	66
Figura 41. Histograma de clasificación en 12 clases de geoformas	66



Figura 42. Trazado en 16 clases de geoformas del relieve	67
Figura 43. Histograma de clasificación de geoformas en 12 clases	67
Figura 44. Conversión de geoformas raster a polígonos	69
Figura 45. Aplicación de filtros y suavizados de geoformas	70
Figura 46. Estadísticos descriptivos.....	71
Figura 47. Validación de geoformas en modelo 3D y en fotografía	73
Figura 48. Análisis de valores generados automáticamente vs. Puntos de control	74
Figura 49. Verificación de inconsistencias 1	74
Figura 50. Verificación de inconsistencias 2	75
Figura 51. Verificación de inconsistencias 3	75



LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Valoración de software	84
Anexo 2. Licencia de Terra Scan	85
Anexo 3. Licencia de Terra model	85
Anexo 4. MDT generado a partir de puntos LIDAR.....	86
Anexo 5. Ficha de campo	87
Anexo 6. Equipo utilizado en campo.....	87
Anexo 7. Itinerario de puntos a validar en campo	88
Anexo 8. Tabulación de información levantada en campo.....	89
Anexo 9. Datos extraídos del trazado automatizado de formas del relieve	93
Anexo 10. Comparación de datos levantados en campo Vs. Datos extraídos de MDT derivados.....	97
Anexo 11. Estadísticos descriptivos.....	102
Anexo 12. Cálculo del RMS de pendiente	102



Yo, **Luis Ivan Medina Cajamarca**, autor de la tesis “**Automatización del trazado de geoformas del relieve mediante sistemas de información geográfica, a partir de un modelo digital de terreno**”, declaro que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación, son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Octubre 2014



Luis Ivan Medina Cajamarca
C. I.: 0705185999



Yo, Luis Ivan Medina Cajamarca, autor de la tesis “**Automatización del trazado de geoformas del relieve mediante sistemas de información geográfica, a partir de un modelo digital de terreno**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al artículo 5, literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **INGENIERO AGRÓNOMO**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afectación alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Octubre 2014



Luis Ivan Medina Cajamarca
C. I.: 0705185999



DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Dios, por la salud, el trabajo, y darme fuerzas para seguir adelante, sin desmayar en los problemas que se presentan, dándome energía para resolver las adversidades con dignidad y enseñándome que con humildad, paciencia y sabiduría, todo es posible.

Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor y ayudarme con los recursos para realizar mis estudios. Me han formado como persona con valores, principios, carácter, empeño, perseverancia, coraje para cumplir mis objetivos.

A mis hermanos y sobrinos por estar pendientes quienes fueron y seguirán siendo mi motivación, inspiración y felicidad.

A mis abuelitos, tíos, primos, amigos y todos los que de una u otra manera me apoyaron para ser lo que soy.

Luis Ivan

“Señor si permites que triunfe como profesional, no permitas que fracase como ser humano”



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y la Virgencita de la Natividad de Chilla por bendecirme con la vida, salud, la familia los amigos, el trabajo.

A la Universidad de Cuenca porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano de cada uno de los docentes.

Al Ingeniero Eduardo Tacuri que más que profesor, director de tesis y jefe de unidad es un amigo. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencia con paciencia y motivación.

Al PROMAS - Universidad de Cuenca por haber brindado la oportunidad de desarrollar la tesis y la facilidad de crecer como profesional.

A Mateo López, Xavier, José, Bastiaan que apoyaron en la realización de la tesis sin escatimar esfuerzos ya sea en campo o en oficina.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Convencionalmente el mapeo y trazado de geoformas del relieve se realiza en material fotográfico impreso y con pares estereoscópicos, apoyándose en información de la red fluvial, pendiente, áreas de depósito y cobertura vegetal. Es un proceso laborioso que requiere de mucha experiencia y paciencia; a veces sacrificado porque demanda tiempo, a más de que acarrea errores humanos generados en el manejo manual de mapas temáticos y el trazado en láminas de acetato, usando estereoscopía (Reuter, Wendroth, & Kersebaum, 2006).

Estudios actuales revelan que los modelos digitales de terreno son muy útiles en la clasificación de las geoformas del relieve, Martínez (2011), menciona que las nuevas técnicas de mapeo extraen información del modelo digital del terreno, basados en la altimetría, manejando técnicas de segmentación o análisis estadístico de los datos. Para esto, se considera la dispersión de las celdas del raster, en las que se conoce la pendiente, convexidad y la textura en cada unidad del modelo.



1.1. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad los sistemas de información geográfica permiten un trabajo eficiente y de precisión, por lo tanto, se requiere de procesos de análisis igualmente eficientes por la gran cantidad de volúmenes de datos manejados en menor tiempo (Vásquez Areas, 2009). Es por ello que se hace necesario realizar el presente estudio que se apoya en el análisis e interpretación de la información, llegando a automatizar el trazado de geoformas con el insumo principal que es el modelo digital del terreno.

Trabajos actuales entre ellos “modelos de unidades geomorfológicas” realizados por el Ministerio del Ambiente, (2013) recomiendan para futuros estudios geomorfológicos, utilizar un modelos digitales de elevación de mayor resolución que ayudaría a elaborar un producto de mayor grado evolutivo y mejor calidad, así también para afinar el Mapa de Unidades Geomorfológicas y darle mayor efectividad al modelo se propone realizar una interpretación a escala Local, que determine de forma más eficaz el detalle de cada unidad morfológica que será muy útil para realizar un análisis profundo de cada ecosistema que se encuentre y sus distintas particularidades.

Verstappen & Van Zuidam (1991) menciona, la delineación automatizada de formas del relieve no sustituye a la interpretación geomorfológica del relieve y al proceso de fotointerpretación manual, pero puede contar con uno de los insumos principales para el mapeo de suelos; reduciendo el error humano cuando se opta por el trazado en acetatos en forma manual, de esta forma se disminuye también el tiempo de procesamiento, apoyados del criterio del componente humano.



1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general del proyecto

- Automatizar el trazado de geoformas del relieve mediante sistemas de información geográfica, partiendo de un modelo digital de terreno y como insumo para el mapeo de suelos en el área de riego del Proyecto de Uso Múltiple del Agua para Paute – Azogues (PUMA).

1.2.2. Objetivos específicos

- Elaborar un modelo digital de terreno en un sistema de información geográfica, como insumo para la obtención de geoformas del relieve.
- Determinar un protocolo para trazar geoformas de relieve, a partir de un modelo digital de terreno, de manera automática en un sistema de información geográfica.
- Validar las geoformas obtenidas para comprobar la precisión del protocolo.

1.3. HIPÓTESIS

- Los sistemas de información geográfica apoyados en un modelo digital de terreno de gran detalle, permiten el trazado automatizado de las geoformas del relieve.



CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. FUNDAMENTOS

2.1.1. Unidad ambiental

Son áreas homogéneas por sus características físicas, bióticas y por su relación con procesos ecológicos, donde el fundamento es la interrelación o articulación de los elementos: relieve, tipo de roca, suelos, vegetación y uso del suelo. El paisaje no es la simple suma de elementos geográficos separados, sino que es el resultado de las combinaciones dinámicas, a veces inestables de elementos físicos, biológicos y antropológicos, que concatenados hacen del paisaje un cuerpo único, indisociable, en perpetua evolución (Winckell, Zebrowski, & Sourdat, 1997); cada unidad ambiental está ligada a la presencia de ciertas formas del relieve.

2.1.2. Relieve terrestre

El relieve de nuestro planeta está conformado por las distintas formas que podemos encontrar en su superficie, las cuales están generadas por:

Agentes geológicos externos: agua, hielo, viento, incluso la gravedad y los seres vivos.

Agentes geológicos internos: terremotos, movimientos tectónicos y volcanes.

2.1.3. Geoforma

Es el concepto genérico con el cual se designa a todos los tipos de formas de relieve, independientemente del origen, dimensión y nivel de abstracción; de forma similar a cómo se utiliza el concepto suelo en pedología o el concepto planta en botánica (Zinck & Urriola, 1970).



El término geoforma, con significado genérico, ha sido introducido recientemente en la Guía para la Descripción de Suelos de la FAO, (FAO, 2009).

Las geoformas tienen un componente interno (hipogeo) y un componente externo (epigeo), en relación a la superficie del terreno. El componente interno es el material de la geoforma (contenido), cuyas características conllevan información genética y estratigráfica (cronológica).

El componente externo de la geoforma es su figura, la cual expresa una combinación de características morfológicas y morfométricas.

2.1.4. Taxonomía de las geoformas

Aún no hay un vocabulario de geoformas uniformemente reconocido, exento de problemas semánticos adicionales cuando los vocablos se traducen de un idioma a otro. A continuación se utiliza una amalgama de vocablos provenientes de diversas fuentes para designar las clases de geoformas, pertenecientes a las seis categorías del sistema de clasificación.

Tabla 1. Taxonomía de clasificación de relieve

NIVEL	CATEGORÍA	CONCEPTO GENÉRICO
6	Orden	Geo-estructura
5	Suborden	Ambiente geomorfológico
4	Grupo	Paisaje geomorfológico
3	Subgrupo	Relieve/modelado
2	Familia	Litología/facies
1	Subfamilia	Forma del terreno

Fuente: (Zinck & Urriola, 1970)

Para la denominación correcta de geoformas requiere un enfoque por etapas que se incluyen en las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los atributos que se utilizarán para describir y clasificar las geoformas?
- ¿Qué atributos se debe utilizar en un nivel categórico dado?

Para ese propósito, se pueden usar cuatro clases de atributos:



- Atributos morfográficos: describen la geometría de la geoforma.
- Atributos morfométricos: describen la dimensión de las geoformas
- Atributos morfogenéticos: determinan el origen y evolución de geoformas.
- Atributos morfocronológicos: describen el contexto tiempo.

2.1.5. Densidad de drenaje (D)

Se define como la longitud de los cauces dentro de una cuenca hidrográfica (L), dividida por el área total de drenaje (A). Define la densidad de drenaje o longitud de cauces por unidad de área (Londoño Arango, 2001). Este parámetro se expresa en Km/Km². Se expresa con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{L}{A}$$

- D: Densidad de drenaje por Km.
- A: Área total de la cuenca en Km²
- L: Longitud total de las corrientes perennes e intermitentes de la cuenca en Km.

Valores altos de densidad de drenaje reflejan generalmente áreas con suelos fáciles erosionables o relativamente impermeables, con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal. Las densidades de drenaje bajas ocurren en sitios donde los materiales del suelo son resistentes a la erosión o muy permeables y la pendiente es baja, este número expresa la capacidad para desalojar un volumen de agua dado. Intensidad del relieve (Londoño Arango, 2001).

La intensidad del relieve es la diferencia promedio entre el punto más alto y el más bajo en el terreno por una distancia específica. Esta distancia específica puede variar y se expresa en metros / kilómetro en la base de datos (UNEP-ISSS-ISRIC-FAO, 1996).



2.1.6. Grado de pendiente

Es el ángulo predominante de pendiente, expresado como porcentaje más común en el terreno (UNEP-ISSS-ISRIC-FAO, 1996).

2.1.7. Geoforma y topografía (relieve)

La geoforma se refiere a cualquier componente o rasgo físico de la superficie terrestre que ha sido formado por procesos naturales y que tiene una forma o cuerpo diferente (FAO, 2009). La topografía se refiere a la configuración de la superficie de la tierra, descrita en cuatro categorías:

- La geoforma principal, que se refiere a la morfología de todo el paisaje;
- La posición del sitio dentro el paisaje;
- La forma de la pendiente;
- El ángulo de la pendiente.

Geoforma principal: Las geoformas se describen principalmente por su morfología y no por su origen genético o por los procesos responsables de su forma. La pendiente dominante es el criterio principal de diferenciación, seguido por la intensidad de relieve (Tabla 2). La intensidad del relieve es la diferencia media entre el punto más alto y el más bajo en una distancia específica dentro el terreno. La distancia específica puede ser variable y la intensidad del relieve se expresa normalmente en metros por kilómetro.

Cuando hay paisajes complejos, las geoformas sobresalientes deben tener al menos 25m de alto (si es menor debe ser considerada como meso relieve); excepto para las terrazas, donde las principales deben tener diferencias de elevación de por lo menos 10m entre áreas, las terrazas principales pueden estar cercanas unas a otras particularmente en la parte baja de la planicie. Finalmente, los niveles más antiguos serían enterrados debido a las crecidas. Para paisajes complejos se pueden usar las subdivisiones reportadas en la Tabla 3. Estas subdivisiones se aplican



principalmente a paisajes nivelados, a algunos paisajes de pendiente inclinada y en el caso de montañas.

Tabla 2. Jerarquía de las geoformas principales

1er nivel	2do nivel	Gradiente	Intensidad de relieve	Densidad de drenaje potencial
		(%)	(mkm ⁻¹)	
L tierras a nivel	LP planicie	< 10	< 50	0–25
	LL meseta	< 10	< 50	0–25
	LD depresión	< 10	< 50	16–25
	LV piso de valle	< 10	< 50	6–15
S tierras con pendiente	SE zona escarpada de gradiente medio	10–30	50–100	< 6
	SH colina de gradiente medio	10–30	100–150	0–15
	SM montaña de gradiente medio	15–30	150–300	0–15
	SP planicie disectada	10–30	50–100	0–15
T tierras escarpadas	SV valle de gradiente medio	10–30	100–150	6–15
	TE zona escarpada de gradiente alto	> 30	150–300	< 6
	TH colina de gradiente alto	> 30	150–300	0–15
	TM montaña de gradiente alto	> 30	>300	0–15
	TV valle de gradiente alto	> 30	> 150	6–15

Notas: Cambios propuestos en el encuentro SOTER, Ispra, octubre 2004.

Fuente: (Dijkshoorn, Huting, & Tempel, 2005)

La densidad de drenaje potencial se da en número de píxeles “receptores” dentro una ventana de 10 * 10 píxeles.

Tabla 3. Subdivisiones de las geoformas complejas

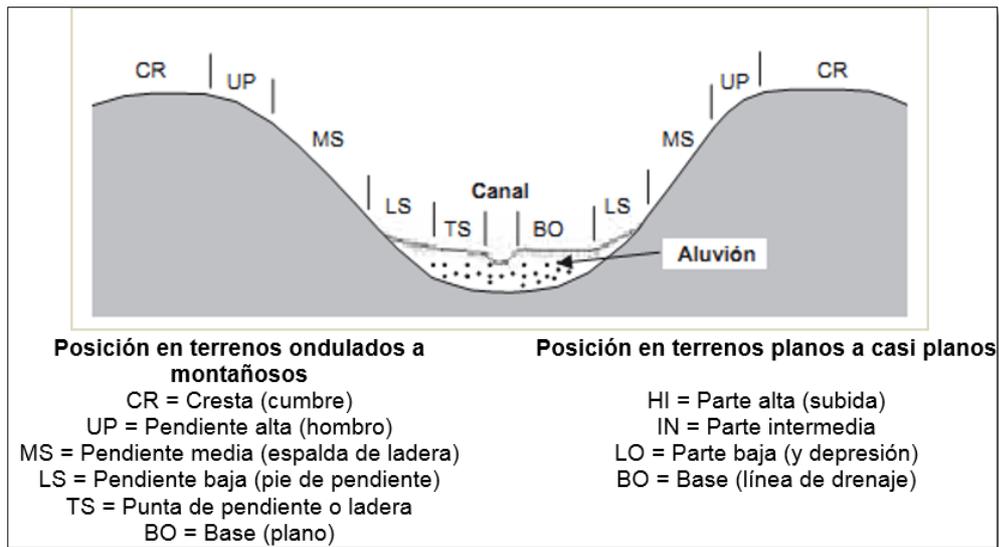
CU	Forma de cuesta	DO	Forma de domo
RI	Colinado	TE	Terraceado
IN	Inselberg cubierto (ocupando > 1% del nivel terrestre)	DU	Forma de duna
IM	Con planicies inter-montañas (los valles)	KA	Fuerte Karst
WE	Con humedales (ocupando > 15%)		

Fuente: (Dijkshoorn, Huting, & Tempel, 2005)

Posición.- Se debe indicar la posición relativa del sitio dentro de la unidad de tierra.

La posición afecta las condiciones hidrológicas del sitio (drenaje externo e interno; por ejemplo: escurrimiento sub-superficial), que puede ser interpretado como predominante receptor de agua, transportador de agua o ninguno de ellos (Figura 1).

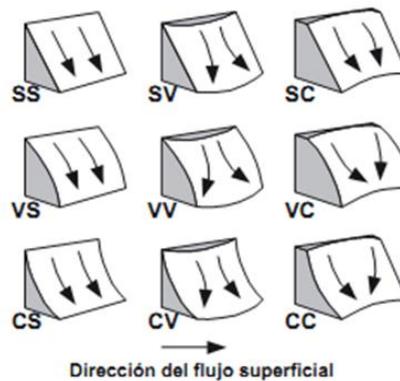
Figura 1. Posición de la pendiente en terrenos ondulados y montañosos



Fuente: (Schoenberger, Wysocki, & Benham, 2002)

Forma de la pendiente.-La forma de la pendiente se refiere a la forma general en ambas direcciones: vertical y horizontal (Figura2). La tabla 4 presenta las clases de formas de pendiente.

Figura 2. Forma de pendiente y direcciones de la superficie.



Fuente: (FAO, 2009)

Tabla 4. Clasificación de las formas de las pendientes

S	Plano
C	Cóncavo
V	Convexo
T	Taraceado
X	Complejo (irregular)

Fuente: (FAO, 2009)



Gradiente y orientación de la pendiente. El grado de la pendiente se refiere a la pendiente de la superficie del sitio, se mide en la dirección de la pendiente más empinada.

Los gradientes de pendiente en terrenos casi planos son a menudo sobrestimados, mientras que en planicies abiertas, los gradientes de 0,2 por ciento son claramente visibles. Es importante realizar un registro apropiado de las variaciones mínimas del grado de pendiente, especialmente para erosión, riego y drenaje.

Tabla 5. Clases de gradiente de la pendiente

Clase	Descripción	%
01	Plano	0–0,2
02	Nivel	0,2–0,5
03	Cercano al nivel	0,5–1,0
04	Muy ligeramente inclinado	1,0–2,0
05	Ligeramente inclinado	2–5
06	Inclinado	5–10
07	Fuertemente inclinado	10–15
08	Moderadamente escarpado	15–30
09	Escarpado	30–60
10	Muy escarpado	> 60

Fuente: (Londoño Arango, 2001)

Además de los atributos de la pendiente, se deben registrar la longitud de la pendiente (particularmente arriba del sitio) y el aspecto orientación. La orientación influencia a la precipitación, régimen de temperatura, riesgo por impacto del viento y al carácter del humus formado en latitudes más altas.

2.1.8. Escalas

Escala gráfica.- Es una barra o unidad de medida del mapa, subdividida y acotada con los valores en unidades de la realidad.

Escala declarada.- Es una relación adimensional, entre una unidad de medida del mapa y su equivalente en las mismas unidades en la realidad.



Tabla 6. Escalas y su equivalencia

Se expresa	Es una relación:	Con este valor:	Se califica como escala	Detalle y tamaño de área real
1 : 1,000	1/1,000	0.001	Muy grande	Gran detalle / área
1 : 50,000	1/50,000	0.000,02	Grande	Pequeña
1 : 250,000	1/250,000	0.000,004	Mediana	
1 : 1,000,000	1/1,000,000	0.000,001	Pequeña	Poco detalle / área grande

Fuente: (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008)

2.1.9. Área mínima cartografiable

El proceso de considerar el área mínima cartografiable (AMC) facilita la coherencia en la representación espacial, eficacia en la lectura y utilidad del mapa impreso. El principio establece que, a partir de una determinada área espacial, los polígonos con sus contenidos deben ser generalizados, permitiendo al usuario su lectura y distinción cuando utiliza en formato analógico (Salitchev, 1979).

La tabla 7 ofrece las áreas mínimas cartografiables para diversas escalas de levantamiento, las que a su vez deberán ser consideradas para definir la composición de las unidades básicas, inferiores y superiores del mapa.

Tabla 7. Área mínima cartografiable para diferentes escalas

Escala	1 cm igual a		Área mínima cartografiable (4 * 4)	
	m	km	m ²	km ²
1:500	5	0.005	4	0.000004
1:1000	10	0.01	16	0.000016
1:2000	20	0.02	64	0.000064
1:5000	50	0.05	400	0.0004
1:10 000	100	0.1	1600	0.0016
1:20 000	200	0.2	6400	0.0064
1:25 000	250	0.25	10000	0.01
1:50 000	500	0.5	40000	0.04
1:100 000	1000	1	160000	0.16
1:250 000	2500	2.5	1000000	1
1:500 000	5000	5	4000000	4
1:1000 000	10000	10	16000000	16
1:6000 000	60000	60	576000000	576

Fuente: (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008)

La propuesta de área mínima se considera como guía y no un valor absoluto. Así, en México se ha utilizado de manera indistinta el AMC de 2 x 2 mm a 6 x 6 mm, a nivel mundial la más empleada es 5 x 5 mm (Salitchev, 1979). Pero la que garantiza operatividad cartográfica y apropiada lectura del mapa es 4 x 4 mm, dependiendo de la complejidad del territorio a ser



mapeado, el cual juega un papel importante en la selección del AMC y sus umbrales (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).

2.1.10. Sistema de coordenadas geográficas

Un sistema de coordenadas geográficas es un referente usado para localizar y medir elementos geográficos. Para representar el mundo real se utiliza un sistema de coordenadas, en el cual la localización de un elemento está dada por las magnitudes de latitud y longitud en unidades de grados, minutos y segundos (Universidad de Sevilla, 2010).

Latitud: distancia angular medido en grados sexagesimales, entre un punto de la tierra y la línea ecuatorial.

Longitud: distancia angular medido en grados sexagesimales, entre un punto terrestre y el meridiano principal que se tome de referencia como 0° por el camino más corto.

El origen de este sistema de coordenadas queda determinado en el punto donde se encuentran la línea ecuatorial y el meridiano de Greenwich (Fernández & Coppel, 2001).

2.1.11. Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator

Es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, ésta se construye como la proyección de Mercator normal, cambiando la tangente al Ecuador por una tangente a un meridiano.

2.1.12. Geomática

La geomática o ingeniería geomática (geo: tierra, mática: informática) es un conjunto de ciencias encargadas de integrar los medios de captura, procesamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de la datos georeferenciados. Además puede utilizar en diferentes aplicaciones útiles para el desarrollo de los países (Vásquez Areas, 2009).

2.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.2.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG, es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal; diseñado para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (Sastre Olmos, 2010).

Ningún SIG puede tener éxitos sin la participación de las personas correctas. Un SIG realista es de hecho un sistema complejo de partes interrelacionadas, en cuyo centro se encuentra una persona que entiende la totalidad (ESRI, 2012).

2.2.2. Componentes de un SIG

Figura3. Componentes de un SIG



Fuente: (Sastre Olmos, 2010)



Hardware: Todas las partes tangibles donde opera el SIG. Actualmente el software SIG se desarrolla en una gran variedad de dispositivos, desde navegadores hasta computadores personales y servidores, los cuales pueden ser utilizados en red o en forma autónoma.

Software: Conjunto de los programas de cómputo, procedimientos, reglas, documentación y datos asociados. Suministran las funciones y herramientas que permiten levantar, almacenar, analizar y visualizarla información.

Los principales elementos del software son:

- DBMS Sistema gestores de base de datos.
- GUI (Interface gráfica para el usuario), facilitan el acceso a las herramientas.
- Herramientas de entrada y manipulación de la información geográfica.
- Herramientas que hacen posible búsquedas geográficas, análisis y visualización.

Datos: Seguramente lo más importante de un SIG son los datos y representan los objetos del mundo real. El SIG integra datos espaciales con recursos discretos o continuos. El almacenamiento de la información puede ser gráficos o alfanuméricos.

Personas: Integrado por el personal que ejecuta, desarrolla, administra el sistema y establece métodos para aplicarlo en el mundo real, es por tanto que sin el contingente humano la tecnología de los SIG estaría limitada.

Métodos: El SIG operará de acuerdo con el plan diseñado, modelos y las prácticas operativas.



2.2.3. Información que se maneja en el SIG

Un objeto en el SIG es un elemento relacionado a la superficie terrestre que posee dimensiones físicas (Ancho, Alto y Largo), y una localización en el espacio o una posición medible en el espacio relativo a la superficie terrestre (Olaya, 2011).

A todo objeto se asocian otros atributos que pueden ser:

- Gráficos
- No gráficos o alfanuméricos.

Atributos gráficos: Es la representación del objeto geográfico asociado con la ubicación específica en la realidad y los objetos se representan por medio de puntos, líneas y polígonos (Olaya, 2011).

Ejemplos de una red de servicios:

- Punto: un poste de energía.
- Línea: una tubería.
- Polígonos: un embalse, una ciudad.

Atributos no gráficos (Alfanuméricos): Son las descripciones, cualificaciones o características que determinan los objetos y elementos geográficos (Fallas, 2007).

En un SIG los atributos gráficos y alfanuméricos se tienen que relacionar, esto se logra mediante un atributo de unión único o ID.

2.2.4. Aplicaciones de los SIG

La utilidad principal de un Sistema de Información Geográfica radica en la capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real, a partir de las bases de datos digitales (Vásquez Areas, 2009). Las aplicaciones pueden resolver un amplio rango de necesidades, como por ejemplo:



- Suministro de servicios públicos (agua potable, drenaje sanitario, energía eléctrica, comunicaciones, etc.).
- Vigilancia de catástrofes.
- Intervención ambiental.
- Diseño y mantenimiento de la redes viales.
- Estratificación socioeconómica.
- Inventariado y avalúo de predios.
- Orientación óptima de la infraestructura de equipamiento social (educación, salud, deporte y recreación).
- Producción y actualización de la cartografía básica.
- Regulación del uso de la tierra.
- Formulación y evaluación de planes de desarrollo social y económico.

2.3. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT)

2.3.1. Introducción

El mundo en que vivimos y trabajamos se caracteriza por ser tridimensional, por ejemplo, valles, montañas, cañadas y riscos. Los programas de computación en el área de los SIG permiten recrear visual y numéricamente el valor Z asociado a elementos del paisaje (natural y antrópico), esto los convierte en una poderosa herramienta para cualquier usuario en las áreas de gestión ambiental y de recursos naturales. El software le permite al usuario visualizar elementos en tres dimensiones y realizar análisis cuantitativos a partir de dichos elementos (Fallas, 2007).

2.3.2. Origen

El término *modelo digital del terreno* probablemente se produjo en el laboratorio de fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en la década de los años 50. Esto se evidencia con el trabajo de Miller & Laframme (1958), en donde se establece los principios de la utilidad de los Modelos Digitales (MD) para el tratamiento de problemas tecnológicos,



científicos y militares, “una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas (x, y, z), conocidas en un sistema de coordenadas arbitrario”. (Felicísimo, 2006).

2.3.3. Definición MDT

Entre los elementos básicos para la representación digital de la superficie terrestre están los MDT, constituyendo la base para un gran número de aplicaciones en las ciencias de la tierra, ambiente e ingenierías. Es así como lo afirman los autores citados a continuación:

Un MDT es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno así: $z = f(x, y)$ (Felicísimo, 2006).

Un MDT es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (INEGI, 2013).

En los MDT hay dos cualidades esenciales que son exactitud y resolución horizontal o “grado de detalle digital de representación en formato digital”, éstas varían de acuerdo al método empleado para generarlos. Los provenientes y generados de tecnología LIDAR obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud (valores submétricos) (INEGI, 2013).

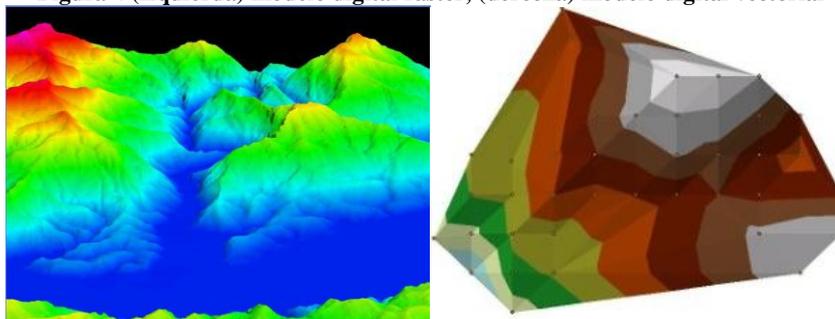
2.3.4. Tipos de MDT

La estructura de datos en los SIG y por extensión en los MDT se ha dividido en dos grupos, en función de su creación y representación de los datos vectorial o raster.

- a) **Modelo vectorial.**- Basados en entidades u objetos geométricos, definido por coordenadas de los nudos y vértices. Estos pueden ser:

- **Contornos:** Polilíneas de altitud constante; la estructura básica de un modelo de contornos son las polilíneas, definida por un vector de pares de coordenadas (x, y) que representa la trayectoria de las curvas de nivel o isohipsas.
- **TIN** Triangular Irregular Network: (Red de triángulos irregulares adosados); la estructura de datos está compuesta de un conjunto de triángulos irregulares adosados, estos se construyen ajustando un plano de tres puntos cercanos no colineales.
- b) **Modelo Raster.-** Se basa en localizaciones espaciales, con un valor asignado de la variable para la unidad básica de superficie. Las localizaciones pueden ser:
 - **Matrices regulares:** Malla de celda cuadrada, en la que la localización espacial de cada dato se determinada de forma implícita por su situación en la matriz cuando se define el origen y el valor de intervalo entre filas y columnas.
 - **Quadrees:** Matrices imbricas en una estructura jerárquica, es el método de compresión más común aplicado a los datos de mapa de .bits, cada uno de los cuales puede estar subdividido en las plazas hasta que el contenido de las células tienen los mismos valores mediante la subdivisión de una región cuadrada en cuadrantes.

Figura 4 (izquierda) modelo digital raster, (derecha) modelo digital vectorial



Fuente: (Weibel & Heller, 1993)
Adaptación: El autor

En la actualidad, con el avance de la tecnología, los modelos de elevación pueden ser de superficie y terreno, lo que permite conocer la presencia,



forma, posición y disposición de los recursos o elementos que conforman un espacio geográfico, los cuales pueden ser de origen natural o antrópico.

Los MDT poseen un sinnúmero de caracteres que facilita al usuario desarrollar análisis de datos del relieve, debido a que se puede visualizar mediante tintas hipsométricas, realizar perfiles longitudinales, representar en 3D gamas tradicionales de color, intervalos de color con la variación y rangos de la elevación, sobre posición de datos o información ya sea en formato vectorial o raster de otros ámbitos, temas y aplicaciones.

2.4. CARACTERIZACIÓN DEL RELIEVE

Puede considerarse que a grandes rasgos, el modelo digital de elevaciones contiene información de dos formas diferentes. La primera se da de forma explícita, es decir, mediante los propios datos contenidos 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 (Felicísimo, 1994).

Las dos formas de información permiten obtener datos de diferente carácter, así: del primer tipo de información se derivan los descriptores de carácter global como los estadísticos básicos del modelo (media, varianza, etc.) o la dimensión fractal. Estos descriptores están destinados a dar una información sintética sobre el terreno, al resumir características generales puede darse el caso de que modelos diferentes coincidan en sus valores. El segundo tipo de información se utiliza sobre todo para construir modelos derivados que den cuenta de nuevas variables topográficas (pendiente, rugosidad, etc.), (Miller & Laframme, 1958). Ambos tipos de información pueden utilizarse conjuntamente para caracterizar el relieve, de acuerdo con criterios objetivos.



2.4.1. Descriptores estadísticos generales

Tanto el MDT como los modelos derivados son susceptibles de ser tratados estadísticamente para concretar sus distribuciones y parámetros específicos, para lo cual es obligatorio tener en cuenta una circunstancia, que entre las variables que van a ser tratadas se encuentren algunas cuya distribución es circular, como por ejemplo, la orientación, la que debe ser tratada diferente a las variables lineales.

Estadísticos básicos para variables lineales: En el caso de las variables lineales, una descripción estadística básica debe incluir, al menos, los siguientes parámetros:

- Valores mínimo y máximo
- Rango
- Media aritmética
- Varianza
- Desviación estándar
- Mediana
- Distribución de frecuencias.

Denominando z a la variable analizada, la formulación de la media aritmética (\bar{z}) y de la varianza (s_z^2) es la siguiente:

$$s_z^2 = \frac{1}{n} \left[\sum z_i^2 - \frac{(\sum z_i)^2}{n} \right]$$

Fuente: (Weibel & Heller, 1993)

2.4.2. Elaboración de modelos derivados.

A partir de los MDT es posible construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía (datos y relaciones topológicas entre los mismos), sin intervención de datos auxiliares o información externa (Felicísimo, 2006).



Franklin & Peddle (1987), mencionan cinco parámetros básicos en este contexto:

- Elevación
- Pendiente
- Orientación
- Convexidad
- Relieve.

El relieve, definido en este caso como la variabilidad de la superficie, es lo que otros autores denominan rugosidad.

La de uso más general es probablemente la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura (Weibel & Heller, 1993).

Elevación: Identifica el tipo de cambio máximo en el valor Z de cada celda, en un modelo digital de terreno, la altitud en el entorno inmediato de un punto puede describirse de forma aproximada mediante un plano de ajuste, el uso de los valores del gradiente va a mostrarse especialmente útil en el cálculo de los modelos derivados (Fallas, 2007).

Pendiente: Se define como el ángulo existente entre el vector gradiente en un punto P y el eje Z. El análisis propiamente dicho del Modelo Digital del Terreno comienza en este punto con algunas variables sencillas inherentes a cada celda (Sastre Olmos, 2010).

Orientación: La orientación identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas. La expresión para calcular el valor de orientación a partir del gradiente puede deducirse con argumentos similares a los aplicados en el caso anterior.



La orientación de una celda se considera como un parámetro de relevancia en los aspectos hidrológicos, a través de su influencia en la caracterización morfológica del terreno, debido a la intervención que ésta tiene para los aspectos climáticos a nivel local, características como zonas de umbría y solana (Sastre Olmos, 2010).

Curvatura: La curvatura en un punto h , se define por la tasa de cambio en la pendiente, dependiendo de las derivadas de segundo grado de la altitud. Puede realizarse una estimación simple de la curvatura mediante la suma de las derivadas parciales de segundo orden con respecto a los ejes X e Y , particularmente en el sentido de la máxima pendiente (vertical) y en el de la curva de nivel asociada a la celda (horizontal) (Pike et al., 1995).

Las formas de la curvatura pueden ser: cóncava, plana y convexa.

Rugosidad: La rugosidad no es un parámetro cuantitativo que se pueda definir de una manera precisa y unívoca; al contrario de lo que ocurre con la pendiente y la orientación, no existen criterios uniformes para llevar a cabo la medida de la rugosidad, porque diversos autores han aplicado métodos significativamente distintos para su evaluación:

Balce (1987).- Utiliza la pendiente media como estimador de un factor de rugosidad.

Evans (1972).- Realiza una revisión de métodos, entre los cuales menciona desde rangos de altitud hasta la desviación estándar de la elevación en entornos limitados.

2.5. CLASIFICACIÓN DE FORMAS DEL RELIEVE

La clasificación de las formas del relieve se integra en los métodos de análisis cuantitativo, y puede definirse como el conjunto de procesos que permiten realizar el agrupamiento de los elementos en grupos (clases) con propiedades significativamente diferentes entre sí (Matínez García, 2011).



La aplicación de este concepto a la caracterización del relieve, supone la intención de discriminar diferentes tipos de formas a partir de los datos del MDE y de los modelos derivados.

METODO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA: La clasificación supone un conocimiento previo de las clases por parte del operador, que debe delimitar grupos de píxeles representativos para cada una de ellas, a partir de los cuales se determinan los valores que definen la signatura, en la que el análisis se realiza visualmente (de forma equivalente a la fotointerpretación) (Reuter, Wendroth, & Kersebaum, 2006).

Método de Clasificación No supervisada (ISODATA): La clasificación "no supervisada" no requiere intervención del operador, ya que divide los píxeles en "grupos naturales", segmentando el espacio k-dimensional (donde cada eje de coordenadas representa una variable) con criterios estadísticos (Iwahashi, Watanabe, & Furuya, 2001). En la que se usan los valores numéricos de la signatura geométrica para analizar estadísticamente las distribuciones y relaciones entre las variables.

La relación inversa entre altitud y concavidad, justifica la distribución de valles y crestas en las zonas bajas y altas respectivamente. La relación directa entre altitud y pendiente nos refleja la tendencia hacia perfiles cóncavos, con pendientes más fuertes en las zonas altas y más suaves en altitudes menores. Otras relaciones menos evidentes son el aumento de rugosidad en las zonas bajas, de baja pendiente y cóncavas (Reuter, Wendroth, & Kersebaum, 2006).

En el proceso de clasificación no supervisada se introduce, como único parámetro, el número de clases a separar. Los resultados de la clasificación se presentan de forma gráfica, en la que se muestra una síntesis de las propiedades topográficas de las clases diferenciadas por el algoritmo; así



como el porcentaje de superficie ocupado por cada una en el área estudiada.

Las propiedades de las clases definidas para la clasificación no supervisada y porcentaje de MDM (modelo digital multi-variable) lo constituyen; PE: pendiente; CU: curvatura y RU: rugosidad (Iwahashi & Pike B, 2007).

Tabla 8. Clasificación no supervisada del relieve, en nivel taxonómico de grupo

Clase	PE	CU	RU	%
1	Baja	Media	Media	
2	Media	Baja	Baja	
3	Alta	Baja	Baja	
4	Alta	Alta	Media	
5	Media	Media	Alta	

(Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008)

La clase 1: con valores bajos de pendiente, medios de rugosidad y formas ligeramente cóncavas, agrupa zonas de vega, fondos de valles abiertos y las zonas más bajas de las laderas, cubiertas frecuentemente por formaciones clásticas relativamente estables, procedentes de zonas superiores (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).

La clase 2: incorpora zonas con pendientes medias, formas ligeramente convexas y baja rugosidad. Se distribuye preferentemente en los márgenes de la clase 1, ocupando las zonas inmediatamente superiores a la línea de ruptura de pendientes. Se observa una cierta correspondencia con zonas cubiertas por formaciones clásticas sin matriz, afectadas por procesos más activos que las de la clase anterior y, en todo caso, zonas de superficie homogénea (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).

La clase 3: con fuerte pendiente, formas ligeramente convexas y baja rugosidad. Representa las laderas en cuya superficie, relativamente uniforme, no se detectan heterogeneidades significativas (siempre en función de la resolución del modelo) (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).



La clase 4: representa zonas de fuerte pendiente, cóncavas y de rugosidad media. Se distribuyen preferentemente separando las zonas de ladera pertenecientes a la clase 3 y representan los cauces de arroyada y torrenteras que surcan las laderas, de poca longitud pero alto potencial erosivo, debido a la elevada pendiente (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).

La clase 5: de pendiente media y rugosidad muy alta. Representa dos clases diferentes de elementos; la primera está constituida por los fondos de valle muy angostos, con un marcado perfil en V; la segunda la constituyen las formas inversas: crestas muy marcadas, con perfil en L. La agrupación de ambas formas en la misma clase es lo que condiciona los valores de curvatura medios, estadístico ambiguo resultante de la media entre formas cóncavas y convexas (Priego, Bocco, Mendoza, & Garrido, 2008).



CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. INFORMACIÓN DIGITAL, EQUIPOS Y SOFTWARE.

3.1.1. Información digital

- Cartografía base
 - Información Lidar, densidad 12 puntos/m²
- Ortofotos
 - Ortofotos de 9cm de GSD

Detalle de la información digital Tabla 9.

3.1.2. Equipos

- Ordenador:
 - System Model: HP Compaq Elite 8300 CMT
 - Processor: Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz (8 CPUs), ~3.4GHz
 - Unidad de almacenamiento de información: 8192MB RAM
 - Tarjeta de video: NVIDIA GeForce GT 610: 4046 MB
- DGPS:
 - 3 MobileMapper®10 - Spectra Precision
- Tablet
- Cámara digital

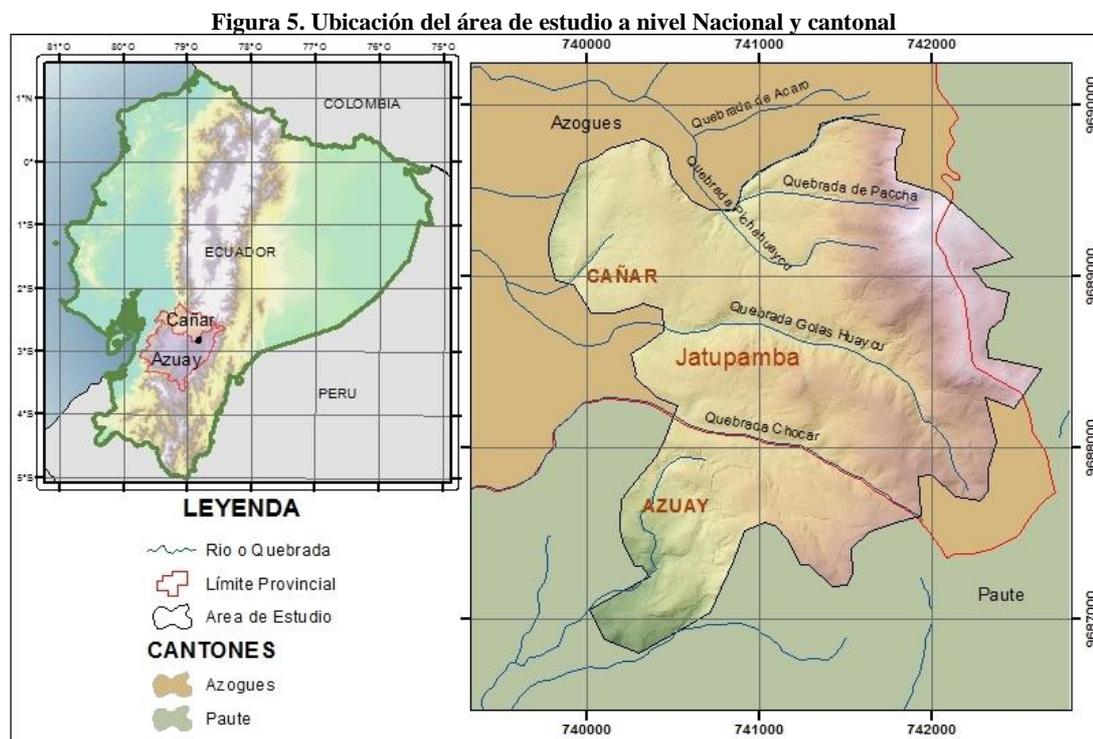
3.1.3. Software

- Módulo de aplicaciones GIS:
 - ArcGIS 10.1
 - Global Mapper 15
 - MicroStation Vi 8; Aplicaciones T-Scan, T-Model
 - Saga GIS 2.1.1
- Microsoft office 2013

3.2. ÁREA DE ESTUDIO

Para determinar el área de estudio se tomó en consideración la diversidad del relieve y la disponibilidad de información topográfica de alto detalle, como es la información Lidar y ortofotos de 0.9 m de GSD (valor medio del pixel sobre el terreno),

El área de estudio está ubicada en la región Sierra Sur del Ecuador, entre la provincia del Cañar, cantón Azogues, parroquia San Miguel, sector Jatumpamba, y la provincia del Azuay, cantón Paute, sector San Cristóbal; dentro del área de riego del Proyecto de Uso Múltiple del Agua para Paute – Azogues (PUMA) Figura 5.



Elaboración: El autor

El área de estudio tiene una superficie de 5.09 km², que conforma un polígono en el sistema de coordenadas proyectadas al Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS1984) en el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator en la zona Zone17Sur:



- X máx.: 739771,5
- Y máx.: 9689932,2
- X mín.: 742632,5
- Y mín.: 9686794,1

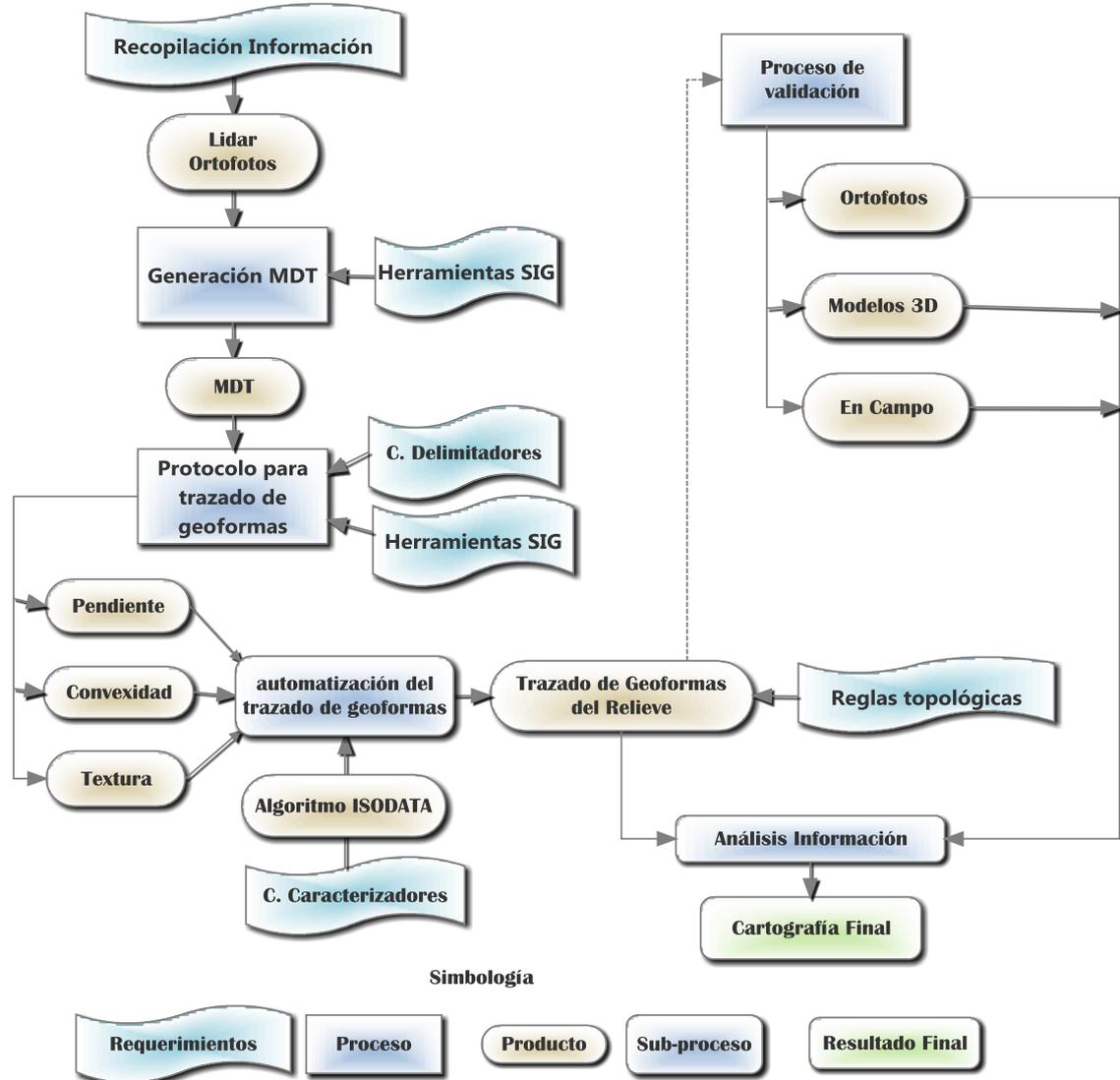
Se trata de una zona de colinas medianas, vertientes cóncavas y relieve escarpado, el cual presenta un porcentaje de ocupación del 87% para actividad agropecuaria. El rango de elevación varía entre 2702.72 m s.n.m. y 3096.83 m s.n.m., con una pendiente media de 28,68%.

3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología para realizar la “Automatización del trazado de geoformas del relieve mediante sistemas de información geográfica, a partir de un modelo digital de terreno”, se realizó basándose en los objetivos específicos planteados. Iniciando con la recopilación información topográfica y generar un Modelo Digital del Terreno en un Sistema de Información Geográfica, consiguientemente realizar el análisis espacial para la generación de modelos digitales derivados como lo son la pendiente, convexidad y textura; seguidamente aplicar un algoritmo que, en base a criterios caracterizadores y criterios delimitadores del relieve, trace geoformas del relieve obteniendo una cartografía preliminar de geoformas del relieve. Durante el proceso se establecen puntos de control para realizar una validación, lo cual se realiza mediante ortofotos, modelos 3D y reconocimiento en campo. Finalmente, se realiza un cruce y validación de información para obtener una cartografía final de geoformas del relieve del terreno.

La metodología para llegar a clasificar las diferentes geoformas del relieve se sintetiza en el diagrama de la figura 6 y posteriormente se realiza la descripción de cada uno de los pasos.

Figura 6. Diagrama de la metodología



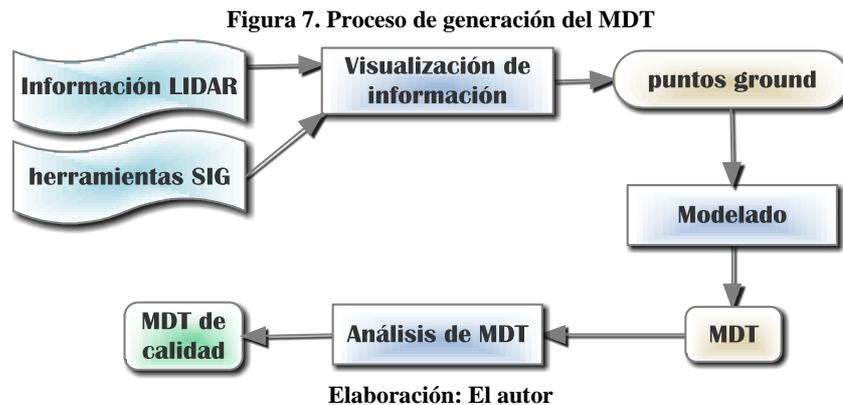
Elaboración: El autor

3.3.1. Generación de modelo digital de terreno MDT

La fidelidad de una clasificación automatizada de relieve, depende fundamentalmente de la exactitud del MDT. Datos de elevación de calidad uniforme permiten obtener los mejores resultados, pero pueden no estar disponibles para grandes superficies.

El proceso de generación del MDT partió desde información LIDAR, se realiza teniendo en consideración varios pasos fundamentales, iniciando con el pre-tratamiento de la información, luego una visualización y selección de

la nube de puntos, los cuales serán posteriormente modelados para obtener el MDT, y culmina con el análisis del MDT para garantizar su calidad, sintetizado en la Figura 7.



3.3.1.1. Información digital base

El proceso consiste en recopilar la información que esté disponible para el área de estudio, considerando la calidad, escala, fecha a la que fue levantada y el formato en el que se encuentra dicha información. Además, es importante tener en cuenta los parámetros técnicos que fueron utilizados al momento de la captura o levantamiento de la información.

En la recopilación de información digital base para el área de estudio, se logró datos de alto detalle, visualizados en la tabla 10.

Tabla 9. Información base recopilada

Tipo	Formato	Escala	Año	Fuente
Puntos LIDAR .LAS	.LAS	10000p/Ha (promedio)	2012	PROMAS
Curvas de nivel	.shp	1:1000	2012	PROMAS
Ortofotos	RGB .TIF	9cm GSD	2012	PROMAS
MDT	.ASC	1m pixel	2012	PROMAS

Elaboración: El autor

Esta información (tabla 10) ha sido capturada con equipo altamente sofisticado, en captura de información cartográfica a través de vuelos combinados “Sensores LIDAR y Sensor de captura de imágenes digitales”, con sus respectivos equipos de calibración y navegación, los cuales permiten post-procesar y garantizar calidad Tabla 11 y 12.



Tabla 10. Especificación de medios LIDAR utilizados en la captura de información

Sensor empleado	ALS50 II
Número de serie	SN 73
Altura de vuelo	600m –800m
Frecuencia de pulsación	Hasta 150.000Hz (150.000 pulsos/seg.)
Precisión a priori	Hasta 10cm en altimetría
Número de retornos capturados	4
Campo de visión (FOV)	10° - 75°
Captura de intensidades	una por pulso
Tecnología MPiA (Múltiples Pulses in Air)	Sí
Densidad de puntos (puntos/m ²)	Hasta 12

Fuente: (STEREOCARTO, 2013)

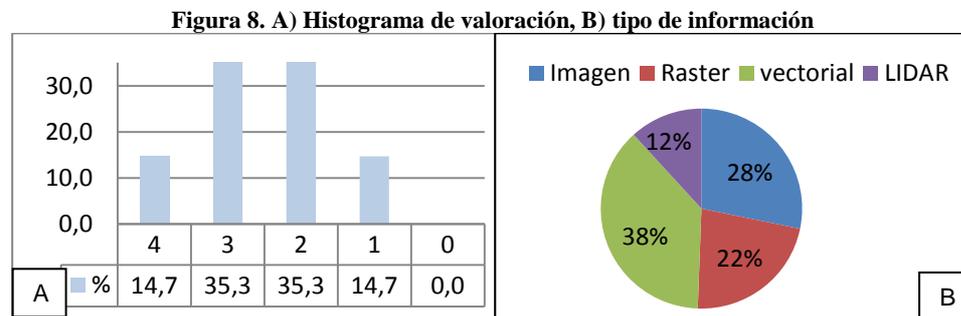
Tabla 11. Especificación de medios - imagen.

Sensor de captura de imágenes digitales	
Sensor empleado	Digital Mapping Camera (DMC)
Resolución espectral	5 bandas (Rojo, Verde, Azul, Infrarrojo cercano y pancromático)
Control automático de la exposición	Incluido
Sistema FMC	TDI
Estabilización	Sistema de estabilización de las lentes
Sistema de navegación	ASMS de Intergraph Admite: - planificar el vuelo, determinando los centros de fotos - navegación en tiempo real - control automático de disparo - registro de eventos - registro de datos de captura de cada imagen
Receptor GPS	NOVATEL Millenium: -12 canales bifrecuencia siguiendo las portadoras L1 y L2. -Registro de observaciones superior 0.1 segundos. -Modo de observación mediante código y diferencias de fase. -Algoritmos de dobles diferencias para resolver la ambigüedad de fase. -Precisión en las coordenadas de la cámara DGPS: 10 a 30 cms.
Sistema inercial (IMU/INS)	PosAV-510 - Frecuencia de registro: 200 Hz. - Precisión 0.005 deg en Omega y Phi, 0.008 deg en Kappa.
Parámetros básicos en imágenes virtuales de alta resolución	
Distancia focal (m)	0.120
Tamaño del sensor (pixel)	13824 x 7680
Tamaño del píxel (µm)	12
Punto principal (mm)	X = 0.0 ; Y = 0.0
Parámetros de distorsión	Imágenes libres de distorsión

Fuente: (STEREOCARTO, 2013)

3.3.1.2. Identificación de herramientas SIG

Luego de haber identificado el formato de información y los procesos que se requiere para obtener los objetivos deseados, se procedió a un análisis de software para identificar los más aptos y que estén a disponibilidad de conseguirlos. El proceso de identificación del software se llevó a cabo analizando los SIG comunes más utilizados y la capacidad para realizar análisis morfométrico (Anexo 1), teniendo en consideración el tipo de información que se recopiló y las características que deseamos identificar.



Elaboración: El autor

En el histograma de valoración Figura 8. A, en la clase 4 están los softwares, los cuales procesan los cuatro tipos de información como es raster, imagen, vectorial y LIDAR; en la clase 3 corresponden los que procesan tres tipos de información; y, en la clase 1 están softwares especializados en analizar un solo formato o tipo de información de la que se recopiló en este estudio.

En la figura 8. B) muestra que, de los softwares que procesan información el 28 % procesa imagen, el 22 % procesa raster, el 38% procesa información vectorial y el 12 % procesa información LIDAR.

Basado en este análisis se decidió utilizar los softwares para la generación del MDT, en el siguiente orden; 1) MicroStation Vi para post-procesar información LIDAR. 2) GLOBAL MAPPER debido a su potencial en operar formatos para hacer el mosaico de la ortofoto del área de estudio, mosaico del MDT y exportar a los formatos requeridos. 3) ArcGis 10.2.1 para la edición y validación de productos en cada proceso.



Tabla 12. Softwares utilizados en generación MDT

Software SIG	Versión	Valoración	Tipo de licencia
ArcGIS	10.2.1	4	Software propietario
GLOBAL MAPPER	V15	4	Software propietario
MicroStation / T-Scan, T-Model	V8i	4	Software propietario

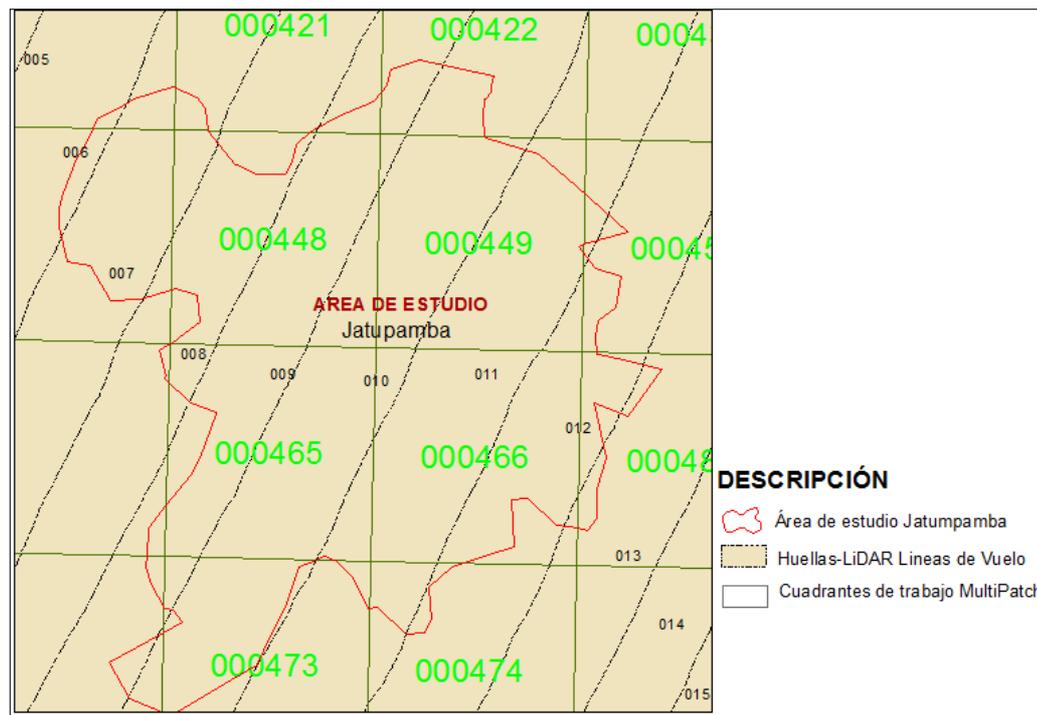
Elaboración: El autor

3.3.1.3. Procesamiento de la Información base LIDAR

Para la creación del MDT del área de estudio se partió de información LIDAR, como son los puntos .LAS preclasificados mediante procesos matemáticos automatizados y una posterior revisión manual por operadores especializados que depuran los resultados obtenidos para llegar a conseguir precisiones de trabajo deseadas.

Para administrar eficientemente la nube de puntos LIDAR, se distribuye en hojas de trabajo MultiPatch, siguiendo la misma distribución que para las hojas de orto-imágenes, asegurando así una correspondencia unívoca y sencilla entre ambos tipos de datos.

La finalidad de trabajar en cuadrantes es para agilizar el desarrollo del software, el cual procesa de una manera eficiente hasta 15 millones de puntos brutos con hardware adecuado.

Figura 9. Líneas de vuelo LIDAR y cuadrantes de trabajo del área de estudio

Fuente: PROMAS, 2013

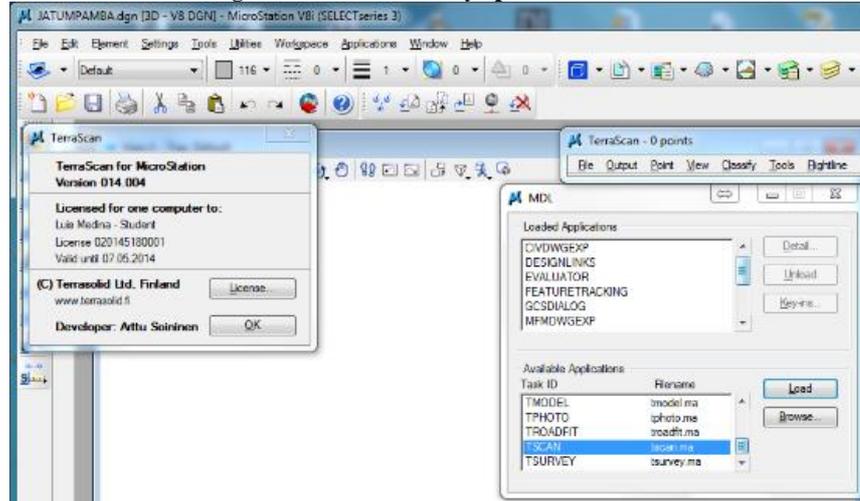
Elaboración: El autor

3.3.1.4. Visualización de puntos .las

En la visualización de los puntos .LAS se utilizó el software comercial MicroStation v8i con la aplicación T-scan, con una licencia de prueba solicitada a Bentley Institute por 30 días, de forma gratuita.

El proceso de visualización de puntos clasificados consiste; Iniciar el software “MicroStation” y cargar la aplicación “T-Scan” (Figura 10).

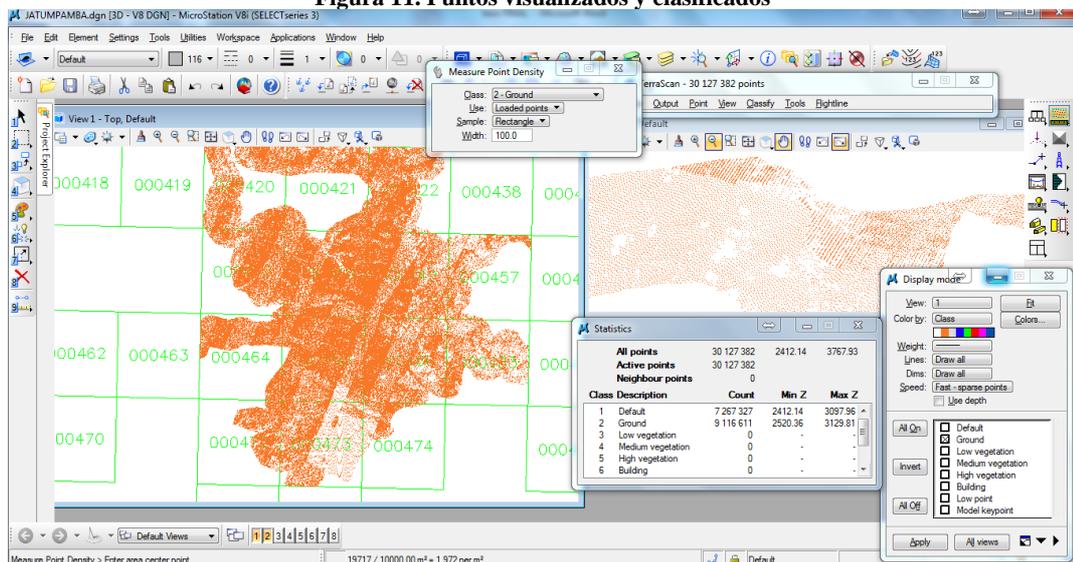
Figura 10. MicroStation y aplicación T-Scan



Elaboración: El autor

Luego se crea un “nuevo Proyecto”, en el cual se abren los cuadrantes de trabajo y cargar los puntos .LAS. Posteriormente, se procede a gestionar en la barra de tarea “display mode”, la clase de puntos que deseamos visualizar y dejamos en pantalla únicamente los puntos “Ground” (suelo). A continuación, se activa “Show statistics” para saber la cantidad de puntos que hay en la clase antes mencionada. Y, finalmente, utilizando la herramienta “measure point density” nos permite visualizar la densidad de puntos por metro cuadrado en el área que se haya designado (Figura 11).

Figura 11. Puntos visualizados y clasificados



Elaboración: El autor

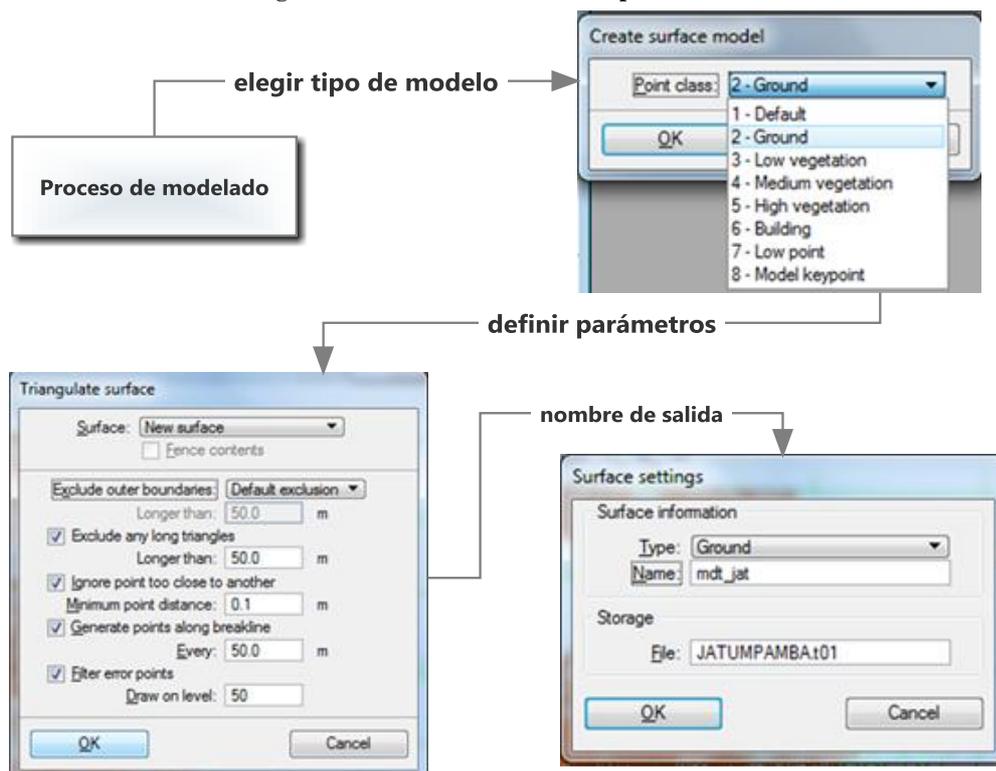
En la Figura 11 se visualiza que en los 14 cuadrantes que corresponden al área de estudio se tiene un total de 30'127.382 puntos, de los cuales 9'116.611 puntos corresponden a la clase Ground (suelo), y una densidad aproximada de 1.97 puntos/ m^2 .

3.3.1.5. Modelado de los puntos .las clasificados

Los puntos ground se interpolan a una superficie de trama regular (una cuadrícula), usando una variedad de algoritmos y software de interpolación.

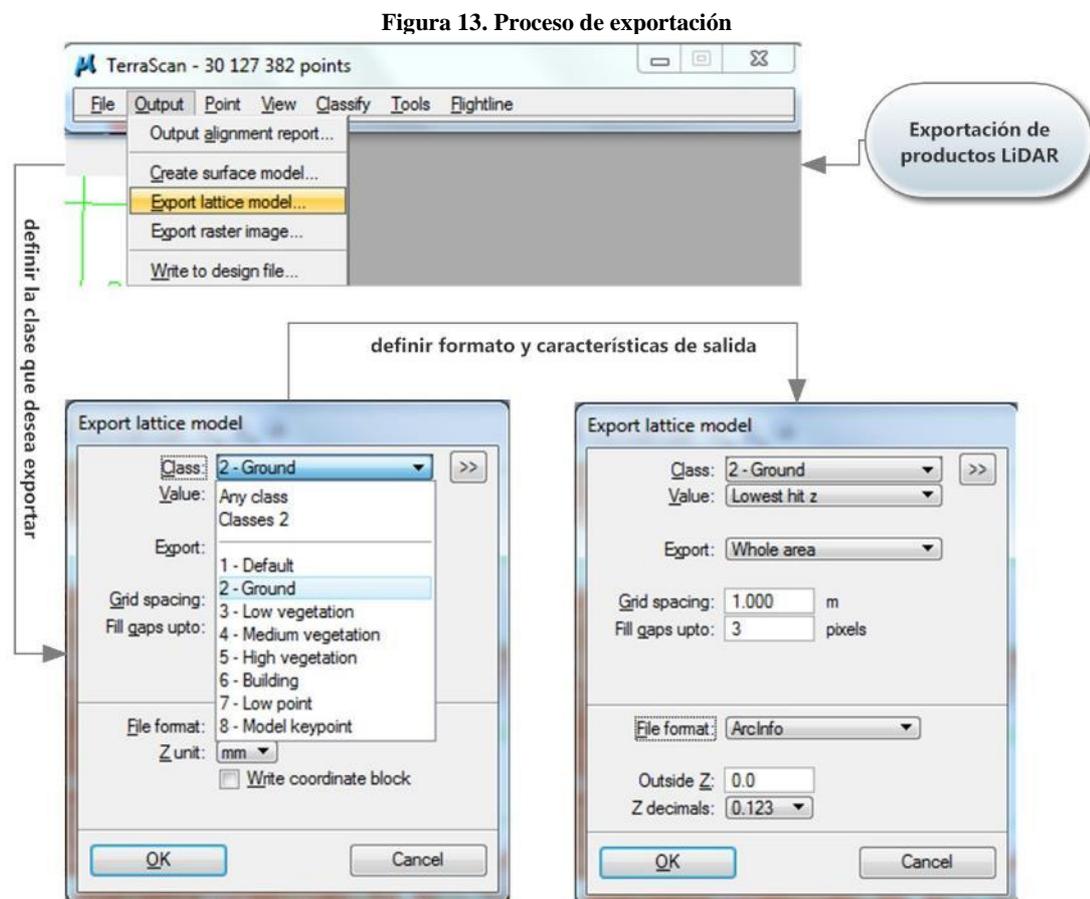
En la modelación de los puntos ground se utilizó el software MicroStation V8i con la aplicación T-Model, con licencia solicitada por 30 días (Anexo 3). El proceso de modelado consiste: en la caja de herramientas de T-model, abrir la herramienta “create surfacemodel”, identificar el tipo de modelo que desea crear, a continuación se define las reglas para la triangulación y se asigna un nombre (Figura 12).

Figura 12. Proceso de modelado de puntos Ground



Elaboración: El autor

El proceso de exportación a formato .ASC detallado en la (Figura 13) consiste en: abrir la opción “output” de la aplicación T-Scan, y seleccionamos “Export lattice model”, esta opción nos lleva a una ventana en la que seleccionamos la clase que deseamos exportar, se define los parámetros de salida, y con un clic en ok finalmente nos pedirá la ubicación del archivo a guardar.



Elaboración: El autor

El MDT generado (Anexo 4) corresponde a los 14 cuadrantes; para obtener únicamente con el MDT del área definida, se procede a extraer con el polígono del área de estudio. El procedimiento se realizó en ArcGIS 10.2.1 utilizando la herramienta de análisis espacial “Extract by mask”, el cual extrae celdas de un raster en el área definida por una máscara (polígono de área de estudio).



3.3.1.6. Análisis de MDT

Generado el MDT, se realiza el análisis para garantizar un MDT de calidad, la revisión se realiza mediante;

- a) Inspección directa de la nube de puntos usando vistas en planta, perspectiva y perfiles de la misma, e información gráfica adicional (Ortofotos).
- b) Revisión de mapas de sombras para identificar zonas conflictivas que necesitan de una revisión más exhaustiva, para la depuración del modelo.
- c) Inspección mediante visión estereoscópica, se revisa la nube de puntos en tres dimensiones sobre los modelos estereoscópicos procedentes del vuelo fotogramétrico. De esta forma se puede identificar si los puntos seleccionados como terreno se corresponden.
- d) Revisión de curvados de los modelos, identificando áreas no depuradas adecuadamente.

El análisis del MDT se realiza en cada una de las diferentes fases, que no son necesariamente consecutivas:

- Creación del MDT
- Generación de variables de superficie (pendiente, orientación, convexidad, textura, etc.)

El análisis es frecuente ya que al manipular, analizar y visualizar se descubre errores en el MDT, de modo que se vuelve al inicio y se genera un MDT mejorado.



3.3.2. Protocolo para trazar geoformas del relieve

3.3.2.1. Criterios delimitadores

Una herramienta de clasificación numérica de la superficie terrestre es la "firma geométrica", un conjunto de medidas que describen la forma topográfica, de tal manera que se pueda distinguir los diferentes paisajes geomorfológicos (Iwahashi & Pike B, 2007); Los procesos naturales crean únicos accidentes geográficos y tipos de terreno que se reconocen por sus características de diagnóstico, ya sea en el campo o en fotografías aéreas e imágenes.

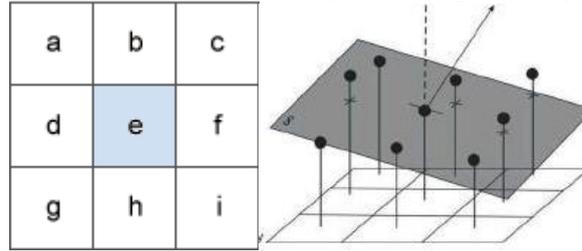
Si las formas de la superficie han sido capturadas por mapas de contorno o MDT, sus cualidades geométricas pueden ser extraídas y expresadas en un grupo de formas superficiales con atributos más o menos independientes.

Pendiente: La inclinación de la pendiente es un controlador de modo influyente de los procesos de la conformación de superficie y una propiedad fundamental del resultado en la topografía, que aparece en todos los esquemas automatizados para la clasificación del terreno.

Se calcula para cada celda la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. La herramienta ajusta un plano a los valores z de una vecindad de celdas de 3 x 3 alrededor de la celda de procesamiento o central. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno (Esri, 2013).

Los valores de la celda central y sus ocho vecinas determinan las deltas horizontal y vertical. Las vecinas se identifican como letras, de la "a" hasta la "i", con la letra "e" representando a la celda para la cual se calcula la orientación.

Figura 14. Ventana de escaneo de superficie y cálculo de pendiente para cada celda.



Fuente: (Esri, 2013)

El raster pendiente calculado puede ser de dos tipos de unidades: grados o porcentaje.

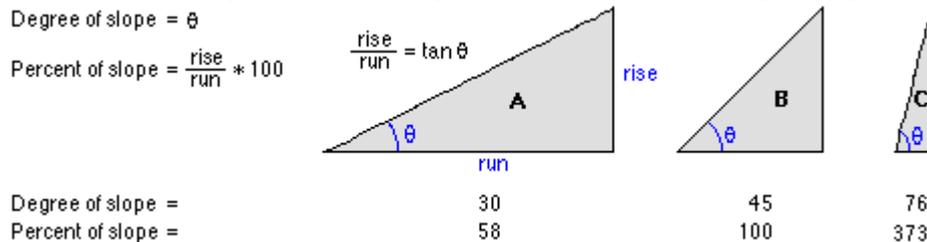
El cálculo se lo realiza con el algoritmo básico:

$$\text{slope_radians} = \text{ATAN} (\sqrt{[(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2]})$$

Cuando la pendiente es medida en unidades de grado, se utiliza el algoritmo: $\text{slope_degrees} = \text{ATAN} (\sqrt{[(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2]) * 57.29578$

El valor 57,29578 es una versión de 180/pi.

Figura 15. Comparación de valores por pendiente en grados versus porcentaje



Fuente: (Esri, 2013)

La elevación en porcentaje se la considera como la elevación dividido por el avance, multiplicado por 100.

Cuando el ángulo es de 45 grados, la elevación es igual al avance, y la elevación en porcentaje es 100%. A medida que la pendiente alcanza la vertical (90 grados) triángulo C, la elevación en porcentaje comienza a acercarse al infinito.

Textura o rugosidad (RU): Textura de terreno se define en sentido estricto a ambos relieves, tanto (Z) y el espaciamiento (X, Y) puede ser representado por las medidas de complejidad espacial, como la densidad de drenaje y los



cambios en la señal de orientación de la pendiente o curvatura por unidad de área. Anteriormente denominada "frecuencia de crestas y valles" o "rugosidad" (Iwahashi, Watanabe, & Furuya, 2001), la medida "textura" enfatiza la expresión de la separación topográfica fina vs. gruesa.

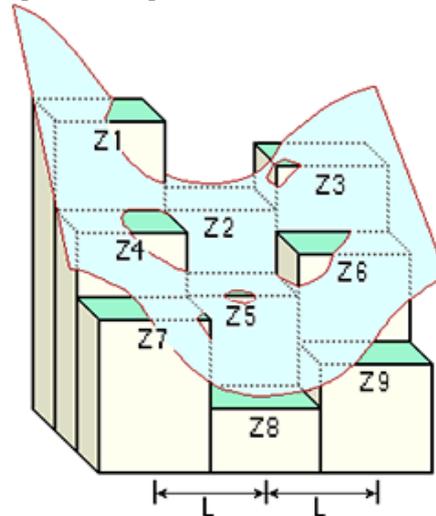
La textura se calcula mediante la extracción de celdas de la malla (en este caso, de manera informal, "hoyos" y "picos") que describen la distribución de los valles y crestas en el MDT. Estas celdas se identifican a partir de las diferencias entre el MDT original y un segundo MDT derivado pasando el original a través del filtro de mediana; el filtro es una operación de procesamiento de imágenes no lineal que elimina alta frecuencia espacial "ruido" de una escena digital, mediante la sustitución de los valores originales con un valor de tendencia central.

Convexidad (Curvatura): La pendiente y la textura de la superficie juntos son fundamentales para clasificar automáticamente topografía empinada, pero no son suficientes para discriminar entre las características de bajo relieve, por ejemplo, la separación de los abanicos aluviales de las llanuras de inundación o terrazas fluviales mayores de terrazas más jóvenes, distinciones críticas para la planificación del uso del suelo. Para identificar mejor estas formas de la tierra, la convexidad de superficie positiva, o convexidad local, fue presentada como una tercera variable. La convexidad de la superficie se mide aquí por el filtro laplaciano, una operación de procesamiento de imágenes que utiliza realce de bordes y se aproxima a la segunda derivada de la elevación, produciendo valores positivos de las zonas-convexas hacia arriba, valores negativos en las zonas cóncavas, y cero en plana (Esri, 2013).

La herramienta curvatura calcula el valor de la derivada segunda de la superficie de entrada, celda por celda. Para cada celda, una transformación polinómica de cuarto orden de la forma: $Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy +$

$Gx + Hy + I.$, la cual se ajusta a una superficie compuesta por una ventana de 3×3 . Los coeficientes a, b, c , etc. se calculan a partir de esta superficie.

Figura 16. Diagrama de valores de curvatura



Fuente: (Esri, 2013)

A continuación se incluyen relaciones entre los coeficientes y los nueve valores de elevación de las celdas numeradas, como se muestra en el diagrama:

$$A = [(Z1 + Z3 + Z7 + Z9) / 4 - (Z2 + Z4 + Z6 + Z8) / 2 + Z5] / L4 \quad B = [(Z1 + Z3 - Z7 - Z9) / 4 - (Z2 - Z8) / 2] / L3$$

$$C = [(-Z1 + Z3 - Z7 + Z9) / 4 + (Z4 - Z6)] / 2] / L3 \quad D = [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / L2$$

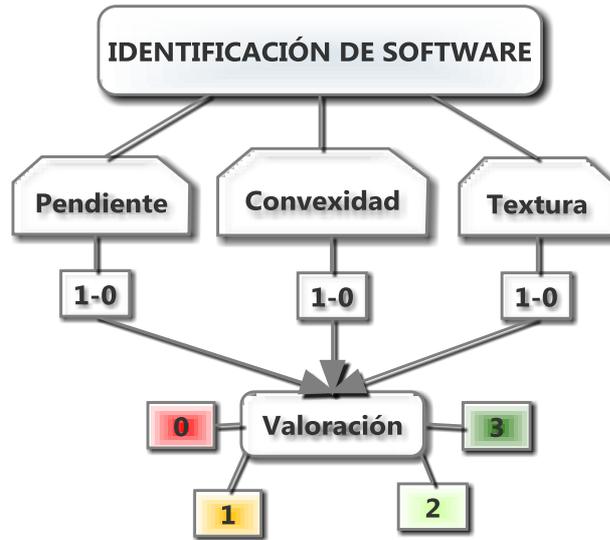
$$E = [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / L2 \quad F = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4L2 \quad G = (-Z4 + Z6) / 2L$$

$$H = (Z2 - Z8) / 2L \quad I = Z5$$

3.3.2.2. Identificación de herramientas SIG

Luego de haber identificado el formato de información y los procesos que se requiere para obtener los objetivos deseados, se procedió a un análisis de software para identificar los más aptos y que estén a disponibilidad de conseguirlos. El proceso de identificación del software se llevó a cabo analizando los SIG comunes más utilizados y la capacidad para realizar análisis morfométrico (Anexo 1), teniendo en consideración el tipo de información que se recopiló y las características que deseamos identificar

Figura 17. Diagrama de identificación de software



Elaboración: El autor

Al revisar características específicas del análisis morfométrico, se determinó que el 6% de software analizado genera modelos digitales, derivados con los tres caracterizadores para el estudio; el 12% analiza y genera dos caracterizadores; y, el 65 % de software analizados no tienen herramientas para generar modelos derivados de los caracterizadores requeridos.

Figura 18. Histograma de características específicas. Análisis Morfométrico



Elaboración: El autor

Se determinó también que la característica menos analizada tanto por software comercial y libre es la rugosidad o textura; que únicamente dos softwares tienen herramientas para procesar un MDT y generar un modelo derivado de textura, considerando que en análisis de software únicamente se basó a las herramientas del paquete original, ya que varios softwares permiten la incorporación de Script a su caja de herramientas.

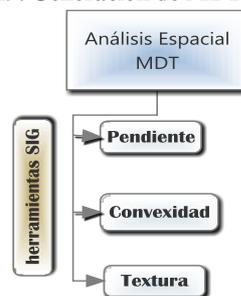
Con los resultados del análisis se optó por el software SAGA GIS 2.1.1. SAGA es la abreviatura de Sistema para Análisis Automatizado Geocientífico, es un Sistema de Información Geográfica (SIG), diseñado para una aplicación fácil y efectiva de los algoritmos espaciales; además ofrece un creciente conjunto completo de métodos geocientíficos con un interfaz de usuario fácil de abordar, con muchas opciones de visualización; el software se ejecuta bajo los sistemas operativos Windows y Linux y además es de código libre “abierto”.

SAGA tiene capacidad para generar modelos derivados con las caracterizadoras del relieve y permite clasificar en tres grupos de clases de geoformas, las cuales pueden ser de 8, 12 y 16 clases.

3.3.2.3. Modelamiento topográfico

Generación de modelos derivados: Los MDT no solo tienen información explícita de altitud en las celdillas, sino también contienen información relativa a la relación vecindad y distancia entre los diferentes niveles de vecindad. Esto permite generar los modelos de pendientes, convexidad y textura que son las caracterizadoras para el trazado de geoformas del relieve, sintetizado en la siguiente figura.

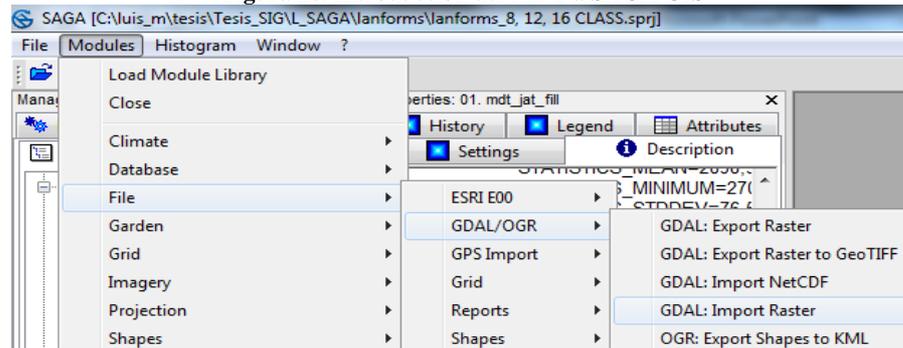
Figura 19. Generación de MDT Derivados



Elaboración: El autor

Identificado el software se procedió a generar modelos derivados, iniciamos ejecutando el software Saga GIS 2.1.1 y a continuación creamos un proyecto nuevo, y se introdujo el MDT, detallado en la Figura 20.

Figura 20. Introducción del MDT a SAGA GIS



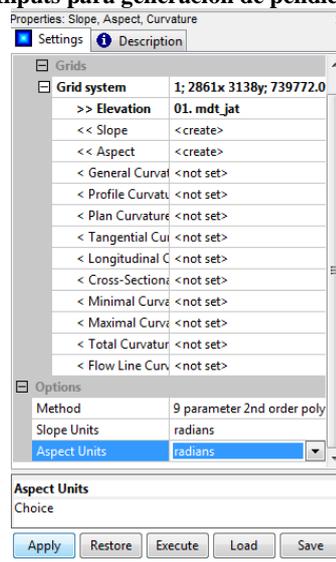
Elaboración: El autor

El MDT debe ser un raster en formato .asc o .tiff, una vez cargado el MDT se procede a abrir el módulo de herramientas y seleccionamos “terrain analysis” y a continuación “morphometry”.

Modelo derivado de pendientes

En la generación del modelo de pendientes desplegamos el módulo de herramientas de análisis morfométrico, y seleccionamos “Slope, Aspect and Curvature” y los “Inputs”; sistema de coordenadas de la cuadrícula de trabajo, elevación (MDT), el método de interpolación, las unidades en las que se desea que se exprese el resultado y posteriormente se da clic en aplicar y ejecutar.

Figura 21. Inputs para generación de pendiente y aspecto.

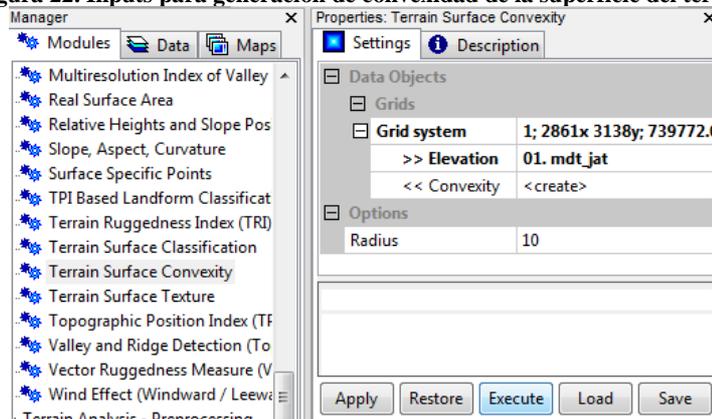


Elaboración: El autor

Modelo derivado de convexidades

Para generar el modelo de convexidad utilizamos la herramienta “Terrain surface convexity” del módulo “Terrain analysis – morphometry”; los inputs son el sistema de coordenadas de la malla y el MDT, en las opciones el radio por defecto 10, luego clic en aplicar y ejecutar.

Figura 22. Inputs para generación de convexidad de la superficie del terreno

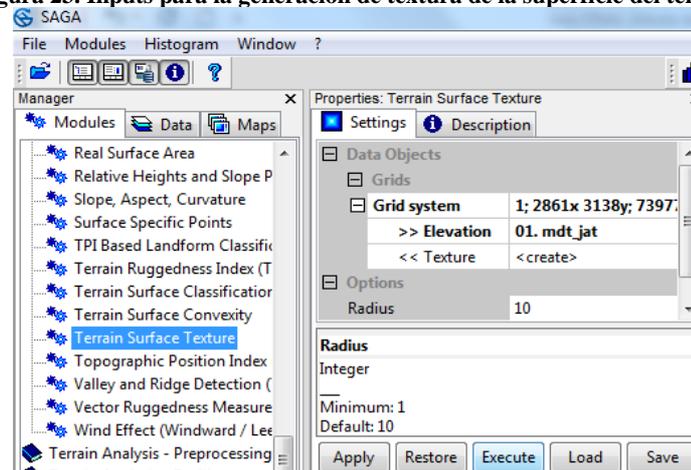


Elaboración: El autor

Modelo derivado de textura

La generación del modelo derivado de textura se consigue utilizando la herramienta “Terrain surface texture”, del módulo “Terrain analysis – morphometry”. Los inputs son el sistema de coordenadas, el MDT, los radios que es una característica opcional dejamos la dada por defecto.

Figura 23. Inputs para la generación de textura de la superficie del terreno



Elaboración: El autor



3.3.2.4. Métodos de Clasificación Automática

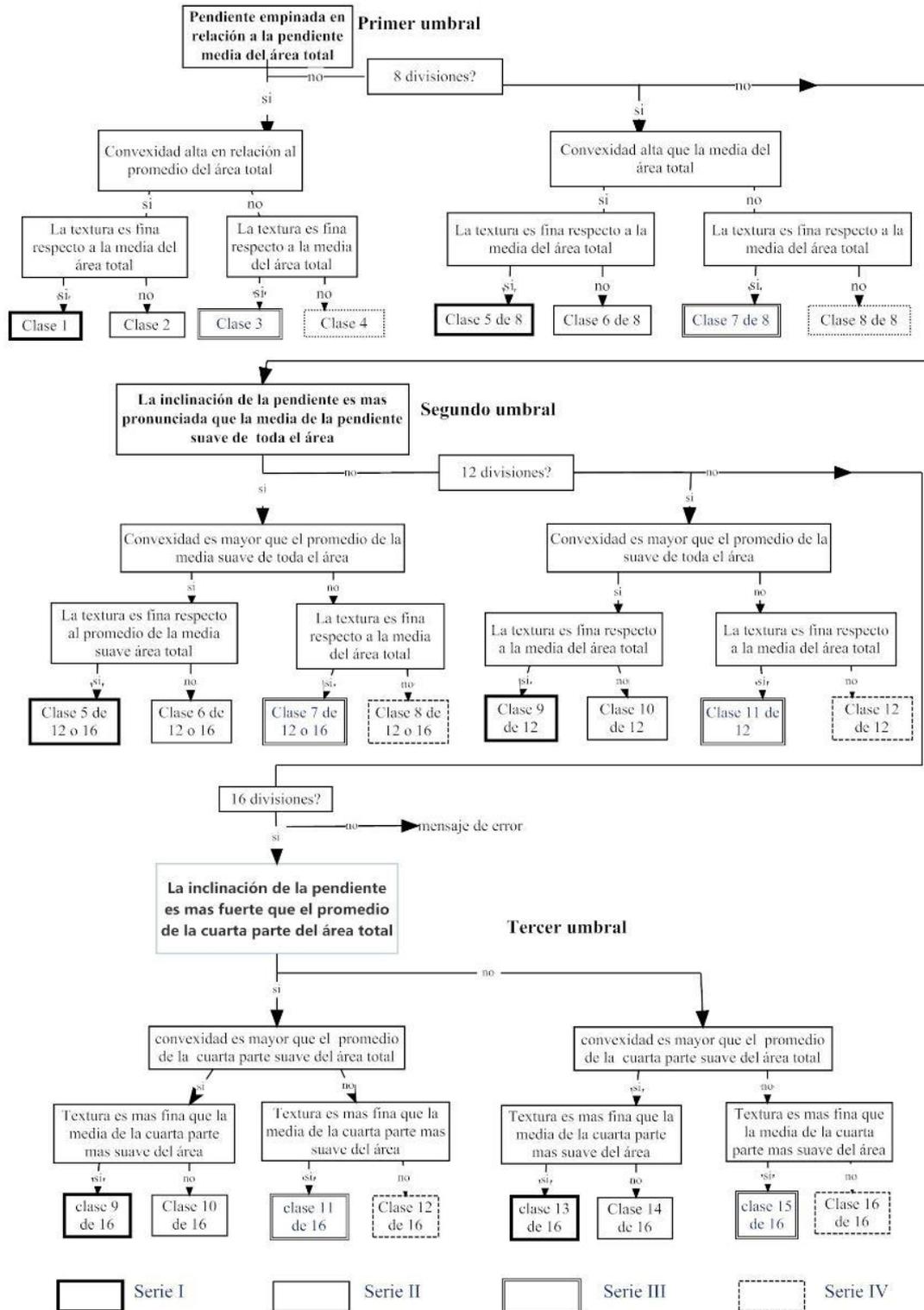
Clasificación NO supervisada (ISODATA): La secuencia programada es sin supervisión y las clases derivadas no están determinadas “a priori” por muestras de entrenamiento de distintos tipos fisiográficos. El número de categoría de salida está restringida a las opciones 8, 12 o 16 clases predeterminadas.

Los criterios son: la media de los valores de inclinación de la pendiente, la convexidad local, y la textura de la superficie, que cambian para adaptarse cada vez más la topografía de relieve bajo, dependiendo del número de clases solicitados (8, 12 o 16).

Las celdas de la cuadrícula más pronunciada de pendiente media del área de estudio se distribuyen entre las clases 1-4 en las tres opciones (primer umbral), para una salida de 8 clases, las celdas restantes se dividen en clases 5-8; para 12 clases, estas últimas celdas en cambio se asignan entre las clases 5-12 por medio de parámetros reducidos (segundo umbral); y el 16 clases, las células no colocados en las clases 1 a 8 se analizan de manera similar en el tercer umbral de clases 9-16.

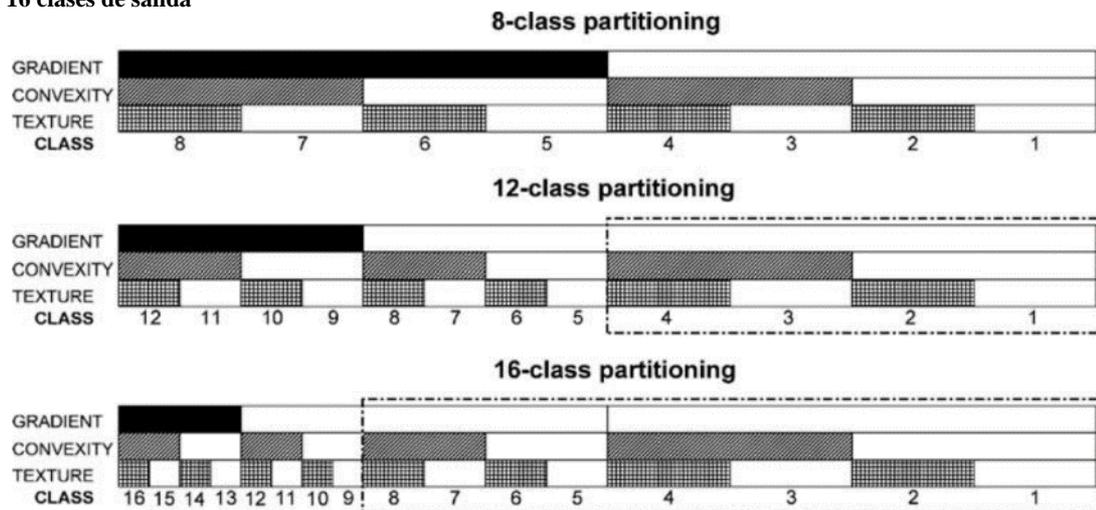
El método descrito en la figura 24 y diagramado en la figura 25 reduce la identificación de tipos de topográficos a un ejercicio de clasificación de escena mediante el uso de reglas dentro de un árbol de decisión simple, adaptando las operaciones de procesamiento de imágenes a los mapas digitales de las tres variables.

Figura 24. Diagrama de flujo automatizado para la clasificación de geoformas del relieve en 8, 12 y 16 clases.



Fuente: (Iwahashi, Watanabe, & Furuya, 2007)
Adaptación: El autor

Figura 25. Partición esquemática para imágenes en escala de grises de tres variables de entrada y 8, 12, y 16 clases de salida



Fuente: (Iwahashi, Watanabe, & Furuya, 2007)

Descripción del algoritmo: Lo diagramado en las figuras 24 y 25 comprende un conjunto de tres filtros para el cálculo de lumbral. El primer filtrado, diseñado para producir ocho tipos topográficos, ejecuta lo que quizás es la operación más crítica, separando celdas de la cuadrícula en el terreno típicamente montañoso (clases 1-4), más empinada que la pendiente media de toda el área bajo consideración) de todas las demás celdas (clases 5-8). Similares particiones binarias basan en convexidad media local y a continuación textura media de la superficie, completando la distribución de las celdas en las ocho clases.

Para 12 clases de salida se especifican, las celdas de la red previamente asignadas a clases 1-4 se conservan la primera fila, pero todas las otras celdas proceden al segundo filtro; estas celdas de menor pendiente son interpretadas ya sea en las clases 5-8 o 9-12 (segundo filtro), comprenden valores medios de gradiente, convexidad y textura calculada a partir de las celdas que son, respectivamente, ya sea empinada o moderada que la pendiente media de todas las celdas en el medio más suave de la zona en estudio (Fig. 25, segunda fila). Posteriormente, la partición subsiguiente de este mismo subconjunto de celdas por la convexidad media local y textura de la superficie, completando la asignación de las celdas en las clases 5-12.



Este cambio de criterio plantea sensibilidad taxonómica para acomodar progresivamente las características del terreno con menor pendiente; el ajuste es importante porque la distribución de frecuencias de la mayor parte de parámetros terreno está sesgada hacia sus otros valores bajos, que contienen variación considerable en la forma del relieve.

De la misma manera, si se solicitan 16 clases de salida en el principio, las celdas de la red no asignadas previamente por el algoritmo para las clases 1-4 y 5-8 proceden al tercer filtro; aquí se analizan en cualquiera de las clases 9-12 o 13-16 por un tercer conjunto de umbrales que comprende valor medio de gradiente, convexidad y textura calculado a partir de celdas que son, respectivamente, ya sea más empinada o menos empinada que la pendiente media de las celdas en el cuarto más suave (es decir, la media más suave de la media más suave) de la zona de estudio, Fig.25, tercera fila). Al igual que en la segunda operación de filtrado, los particiones de celdas por convexidad media local y textura de la superficie completa la asignación de celdas en las clases 9-16.

Este enfoque recursivo acomoda todas las posibles combinaciones de pendiente, convexidad y textura; en las clases 1 y 16 incluyen las cuadrículas que tienen, respectivamente, los valores más altos y más bajos de las tres variables en el área de estudio, mientras que las clases 2-15 incluyen los tipos intermedios de tipos relieve.

En zonas de pruebas sugieren que un MDT de 50m compilado a partir de contornos puede soportar hasta 6-8 clases de terreno a nivel local, mientras que un MDT de 400m es bueno para no más de 3-6 clases. Dieciséis clases pueden ser adecuadas para una región fisiográficamente diversa, pero tal detalle es superfluo, donde las diferencias en pendiente es pequeño y la superficie de la tierra es relativamente homogénea (Iwahashi & Pike B, 2007).

La subdivisión más detallada, sobre todo en el terreno ligeramente planos, se justificaría sólo por DEM con una alta densidad de punto, tales como los obtenidos desde el estudio de campo, fotografía aérea de alta resolución, o LIDAR (Reuter, Wendroth, & Kersebaum, 2006).

Las unidades ya definidas se caracterizan de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 13. Criterios caracterizadores

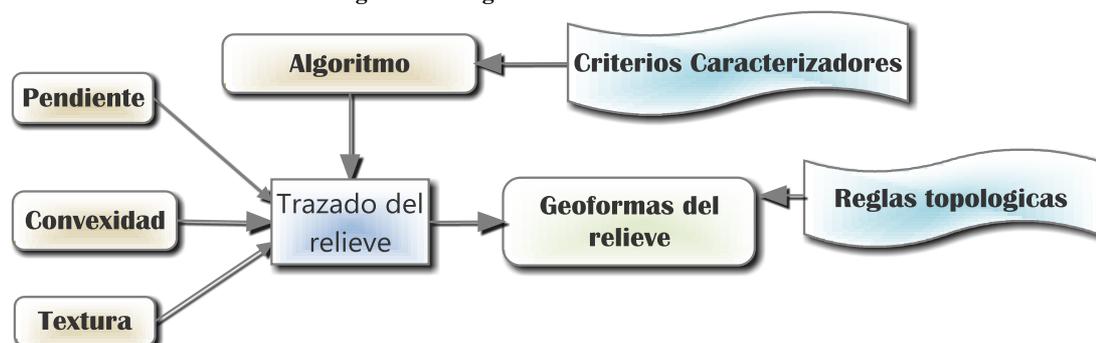
Pendiente			CONVEXIDAD	RUGOSIDAD
8 clases	12 clases	16 clases		
Empinada	Empinada	Empinada	Alta (+) Baja(-)	Fina Gruesa
Suave	Suave	Suave		
	Moderada	Moderada		
		Muy empinada		

Elaboración: El autor

3.3.2.5. Simulado del trazado de geoformas del relieve

Generado los modelos digitales derivados de pendientes, convexidad y textura, se procede a la clasificación de la superficie del terreno, para este proceso se ejecuta el diagrama de flujo automatizado para la clasificación de geoformas del relieve (Figura 24), obteniendo como resultado un simulado de geoformas del relieve; el proceso se sintetiza en la Figura 26.

Figura 26. Diagrama de trazado del relieve



Elaboración: El autor

3.3.2.6. Análisis de componentes principales

Vectorización: Para la conversión de un dataset raster a entidades de polígono, el raster de entrada puede tener cualquier tamaño de celda y debe



ser un dataset raster entero válido con un parámetro “campo”, este permite elegir qué atributo del dataset raster de entrada se convertirá en un atributo en la clase de entidad de salida, puede ser un campo entero o de cadena de caracteres (Esri, 2013).

Generalización: Este análisis consiste en generalizar el modelo obtenido en la clasificación automática ISODATA que representa unidades morfométricas, previo al análisis 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 el sistema de clasificación, aplicando las reglas de las unidades mínimas mapeables UMC (Tabla 7) definidas por la escala de trabajo (Tabla 6)

Para la generalización de esta capa vectorial se utiliza los siguientes filtros;

1. agregate polygons
2. dissolve
3. eliminate

Los filtros con ayuda de herramientas SIG, permiten eliminar los pixeles aislados (efecto pimienta) y que no son representativos, cada uno de los resultados en el valor del píxel central se sustituye por el resultado de la función de filtrado.

Suavizado: luego de la generalización se procede con el suavizado de las unidades morfométricas utilizando el filtro (smooth poligon), el cual suaviza ángulos cerrados en contornos de polígonos para mejorar la calidad estética o cartográfica, dando como resultado la cartografía preliminar de geformas del relieve.

3.3.3. Proceso de verificación y validación de geoformas del relieve

El proceso de verificación y validación permite obtener una cartografía final de geoformas del relieve, la cual se realiza en dos fases: la primera en oficina con medios tecnológicos, y una fase posterior reconocimiento directo en campo estableciendo puntos de control.

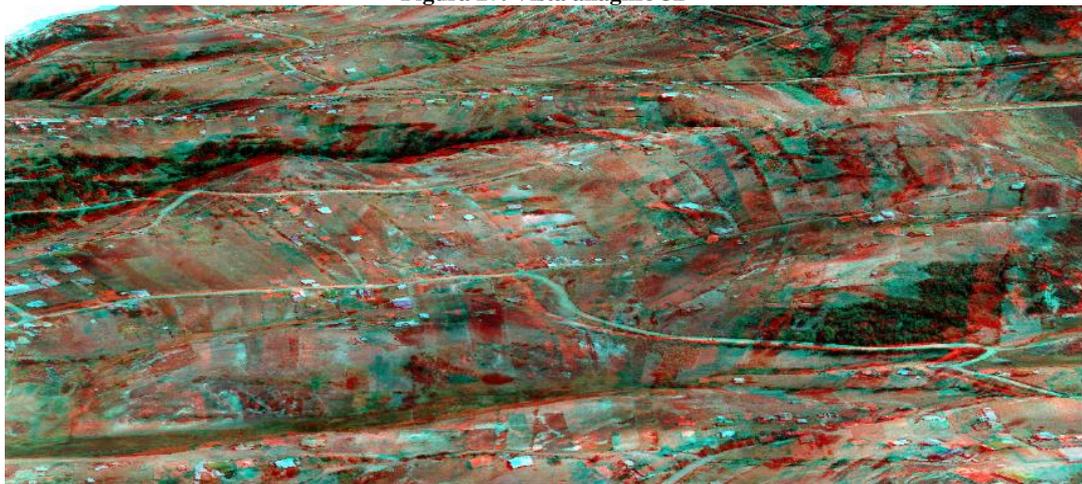
3.3.3.1. En oficina

El análisis 3D mediante ortofotos; visión estereoscópica con anáglifos ofrece apreciaciones que no son fácilmente visibles en un mapa planimétrico con los mismos datos.

Mediante la visualización 3D, se analiza que cada geoforma corresponde a características tanto en pendiente curvatura y textura.

La visualización 3D, visión estereoscópica con anáglifos entre otras, permite al operador mantener un control en todo el análisis espacial y los geoprocesos realizados hasta obtener la cartografía preliminar.

Figura 27. Vista anáglifo 3D



Elaboración: El autor

La vista anáglifo permite apreciar la profundidad en el terreno, como sucede al visualizar con estereoscopio. Para el control se sobrepone la capa de las geoformas, se ajusta el paralaje de los ojos del operador y se procede a la



visualización para analizar, si corresponden o no cada una de las geoformas.

3.3.3.2. Reconocimiento en campo

El proceso de reconocimiento de geoformas en campo se realiza en el siguiente orden;

- Diseñar una ficha para llenar con la información recolectada en campo (Anexo 5).
- Capacitar en manejo de equipo a utilizar en el levantamiento de información (Anexo 6)
- Realizar un itinerario de sitios a visitar (Anexo 7). La planificación del itinerario debe considerar lo siguiente;
 - a. Apertura de la comunidad ingresar a sus predios.
 - b. Accesibilidad por vías y caminos.
 - c. Condiciones meteorológicas.
- Tabular la información en una hoja de cálculo para analizar la información generada del MDT con la levantada en campo.

El reconocimiento en campo y levantamiento de información en los puntos de control establecidos en la planificación del itinerario, se realizó de la siguiente manera:

1. Se identificó las diferentes clases de relieve.
2. Se realizó mediciones de pendiente, descripción de convexidad y textura.
3. Llenado la ficha digital en la Tablet con las características, un código de identificación y observaciones.
4. Toma de un punto GPS en cada geoforma identificada en el sitio.

5. Toma de una fotografía y un punto GPS desde un lugar del cual se pueda apreciar la geoforma.

Figura 28. Levantamiento de información en campo



Elaboración: El autor

El equipo utilizado en el levantamiento de información estuvo compuesto por: 3 MobileMapper®10 de Spectra Precision, una Trimble® Yuma® 2 rugged Tablet computer, Tablet Android Samsung, cámara sony 16 mpg (Anexo 6); y, se realizó un reconocimiento a 62 sitios elegidos al azar (Anexo 7), en donde se describió y levantó información de 91 geoformas.

3.3.3.3. Análisis de la información

Terminado el levantamiento de información en campo, se procede a extraer las características del raster de geoformas, para realizar la comparación y determinar la eficacia del método trazado de geoformas del relieve.

El tipo de análisis a aplicarse dependerá de la información. Para información cualitativa, se realizará un análisis visual y porcentual, asignando valor 1 para las características que coinciden y 0 para las que no coinciden; en la información cuantitativa, se puede aplicar pruebas estadísticas como

normalidad de los datos y evaluar los errores medios cuadráticos RSM (Root Mean Square).

Figura 29. Tratamiento y análisis de la información



Elaboración: El autor

Realizado el reconocimiento y levantamiento de información en campo, se procedió a la tabulación en una hoja de cálculo (Anexo 8); y, posteriormente, a extraer las características de los modelos derivados (Anexo 9).

Los datos levantados son de dos tipos cuantitativos para la pendiente, cualitativos para convexidad y textura, por tanto se procedió a realizar un control visual y porcentual para la información cualitativa y análisis estadístico para la información cuantitativa.

3.3.3.4. Análisis estadístico comparativo

El análisis estadístico comparativo se realizó con el software estadístico IBM SPSS Statistic. El desarrollo de la prueba estadística, se lo efectuó de la siguiente manera:

Planteamiento de hipótesis alternativa y nula

- **H1 (Hipótesis alterna)** = Existe una diferencia significativa entre la media de los valores de pendientes medidos en el campo y la media de valores de pendiente obtenida del modelo digital de elevación.



- **H0 (Hipótesis nula) =** No existe una diferencia significativa entre la media de valores de pendiente medidos en el campo y la media de valores de pendiente obtenida del modelo digital de elevación.

Definir el porcentaje de error (α): El porcentaje de error que se estableció para el análisis estadístico es del 5% = $\alpha = 0.05$.

Calcular (P.valor) Normalidad: Realizar una prueba de normalidad de la variable pendiente permite analizar el comportamiento de los datos. Se utilizó el método de Kolmogorov-Smirnov para muestras grandes (>30 individuos), por cuanto se tiene 91 muestras o puntos de control.

Criterio para determinar la normalidad:

P-Valor $\geq \alpha$ Acepta H_0 : los datos provienen de una distribución normal.

P-Valor $< \alpha$ Acepta H_1 : los datos no provienen de una distribución normal.

Elección de la prueba

Para definir la prueba estadística se analizó la variable pendiente, en la cual la variable aleatoria es numérica, con lo que se determinó que la prueba a realizarse es una prueba paramétrica y la variable fija tiene dos medidas longitudinales, además la toma de muestras de la variable pendiente ha sido calculada en dos tiempos diferentes: una del modelo generado mediante software GIS y otra en campo; por tanto el método a aplicarse sería una prueba de T Student para muestras relacionadas.

Error medio cuadrático

El RMS (Root Mean Square) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable, y es igual a la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores (Navarro Judiel, 2008).

Figura 30. Fórmula del error medio cuadrático.

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

Fuente: (Navarro Judiel, 2008)

3.3.3.5. Análisis visual comparativo

Este proceso de verificación se basó en la utilización de modelos 3D generados a partir del MDT, ortofotos del área de estudio con un GSD de 10cm de píxel y software adecuados, permiten ver una simulación de la realidad en el monitor.

Figura 31. Vista 3D de ortofoto con la capa de geformas sobrepuestas



Elaboración: El autor

Para lo cual, se asignó valor 1 a las características que coinciden y 0 para las que no coinciden, y finaliza haciendo una comparación porcentual.

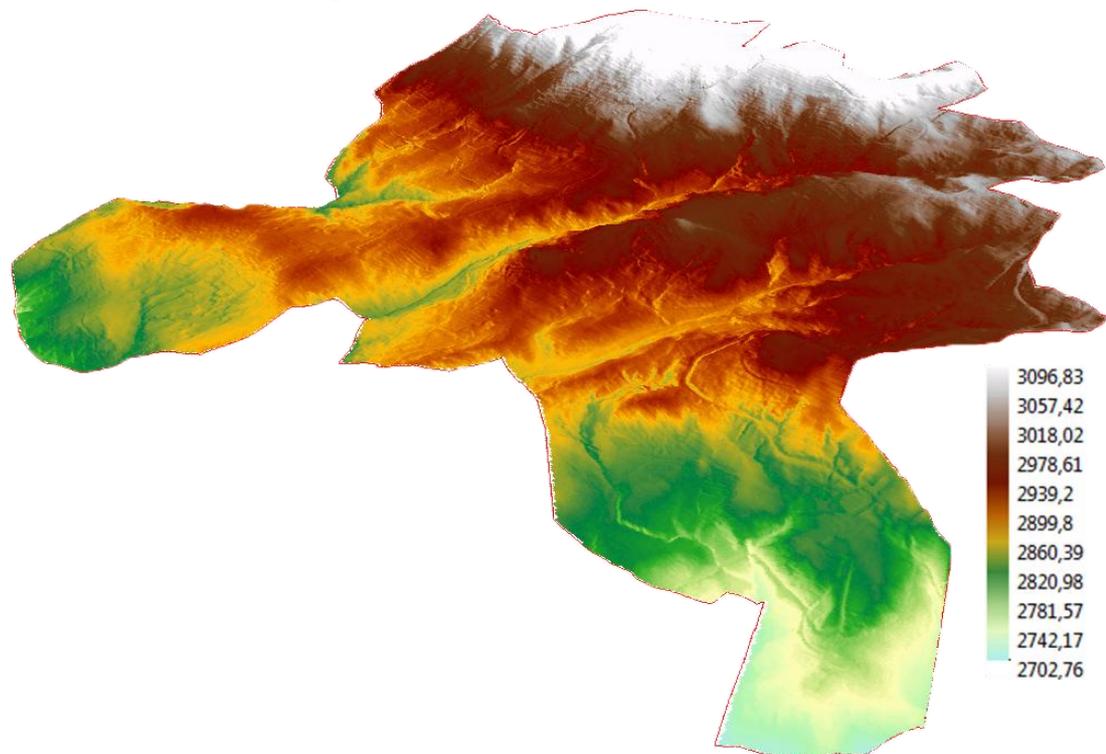
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MODELO DIGITAL DE TERRENO

El proceso de generación del MDT depende del tipo de información base disponible para el área de estudio; y, a su vez, de acuerdo al formato de la información base, se decidirá el uso de determinado software para la generación del modelo digital del terreno.

Generado el MDT se realiza el análisis para garantizar un MDT de calidad, el proceso se lo cumplió con vistas 3D, inspección directa utilizando vistas en planta, modelo de sombras y ortofotos.

Figura 32. MDT del Área de estudio en vista 3D

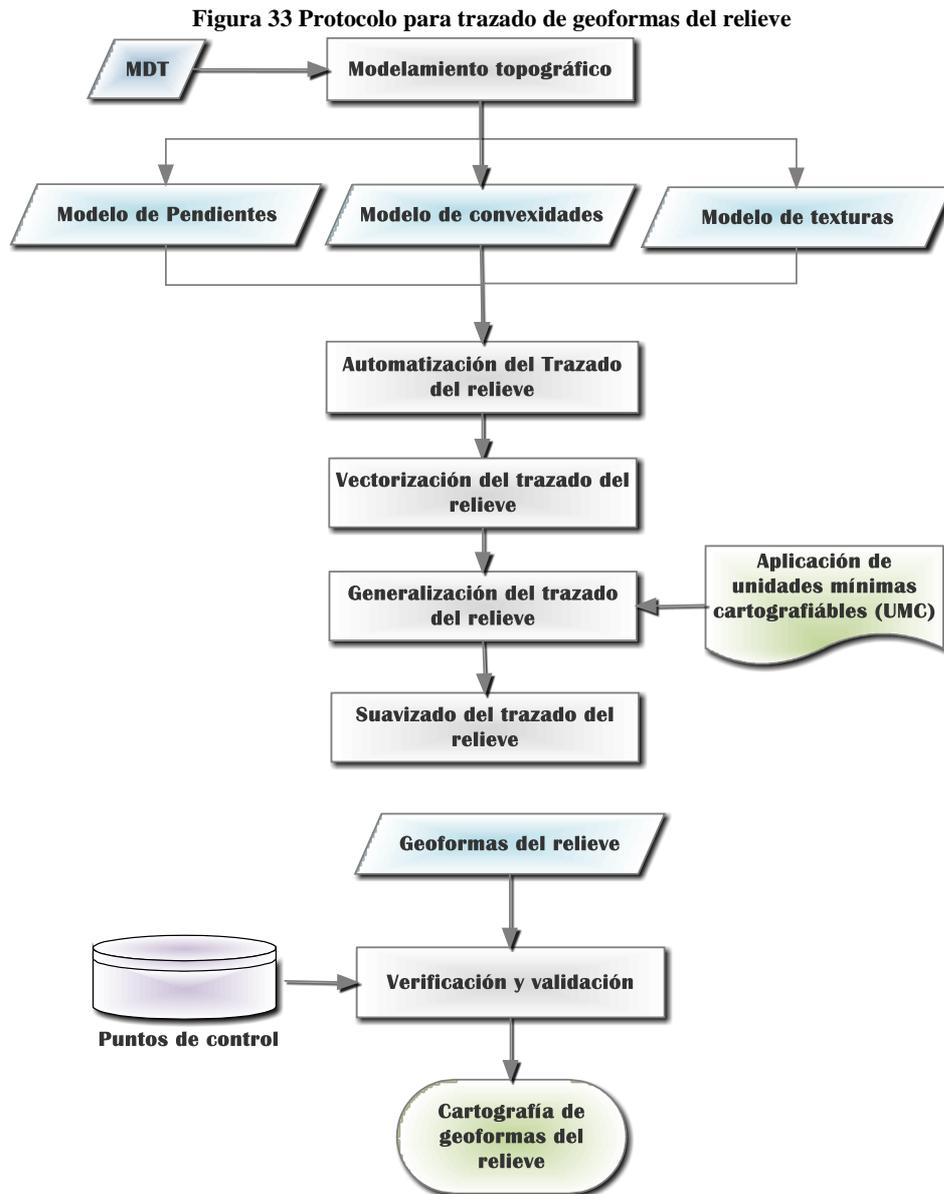


Elaboración: El autor

El MDT generado será la base para realizar el análisis morfométrico, el cual tiene las siguientes características: 1 metro píxel, elevación mínima de 2702,72 m .s.n.m y una elevación máxima de 3096,83 m s.n.m., con una desviación estándar de 76, 54 típica de los andes Figura 33.

4.2. PROTOCOLO PARA TRAZADO DE GEOFORMAS DEL RELIEVE

Analizado los criterios caracterizadores y delimitadores del relieve se establece el protocolo para automatizar el trazado del relieve Figura 33.

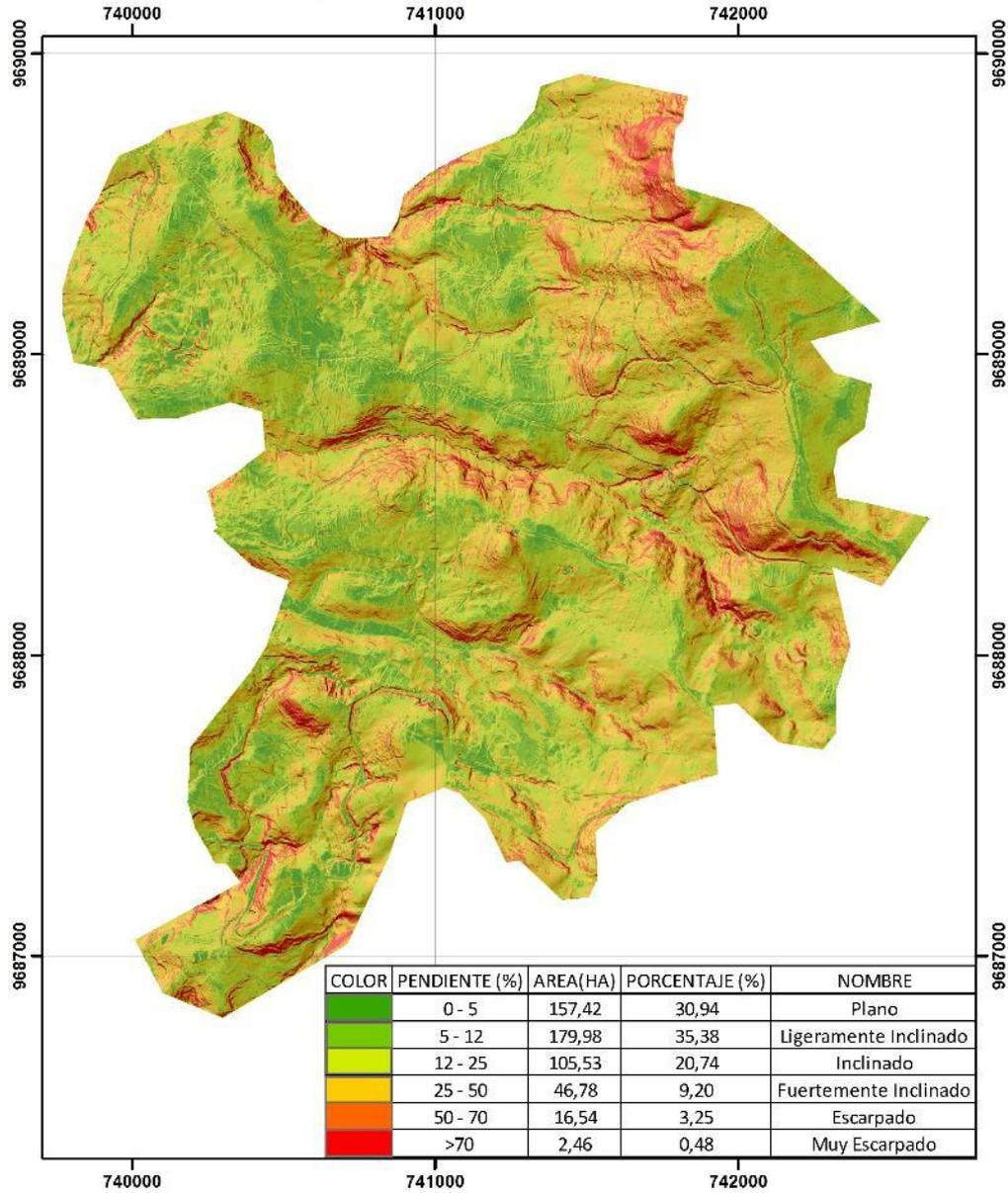


Elaboración: El autor

4.2.1. Modelamiento topográfico

Modelo derivado de pendientes: es un insumo para la clasificación del relieve es el modelo el cual se generó a partir de un MDT de 1m de pixel.

Figura 34. Modelo derivado de pendientes



Elaboración: El autor

El modelo derivado de pendiente generado presenta las siguientes características:

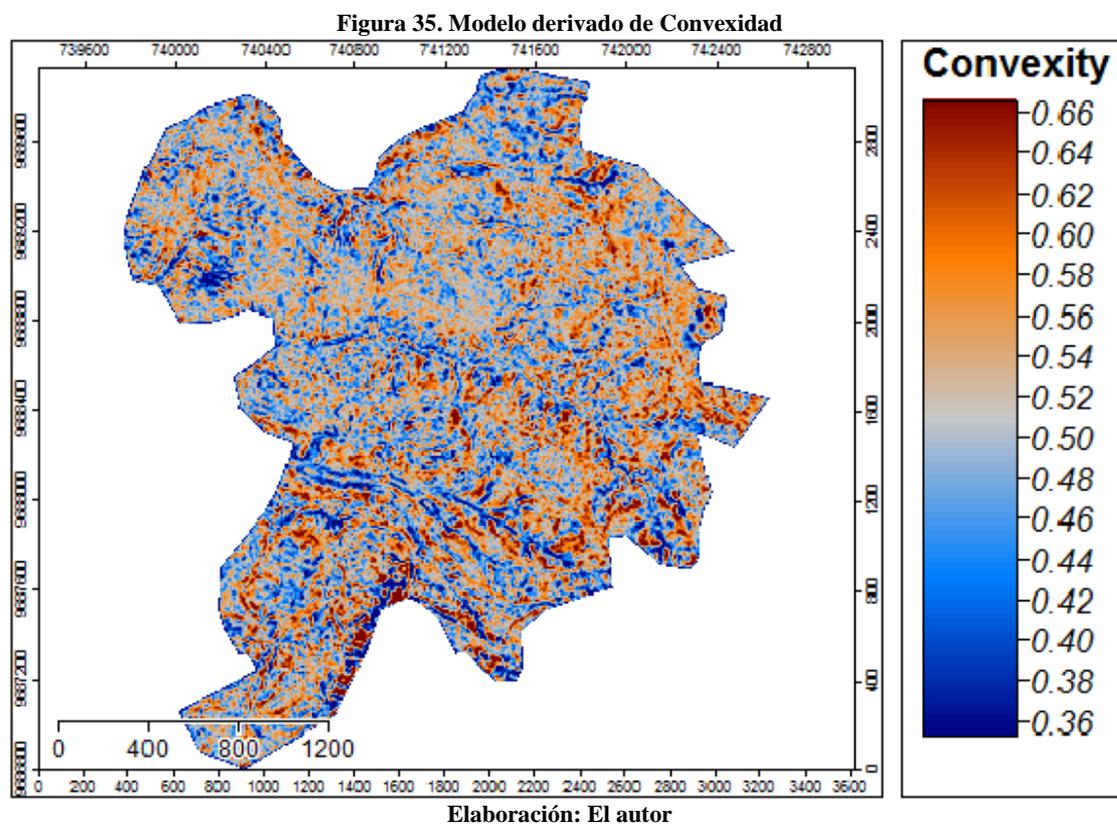
Tabla 14. Valores estadísticos del modelo de pendientes

Pendiente mínima	0
Pendiente Máxima	388.25
Rango	388.25
Media Aritmética	28,68
Desviación estándar	20.25

Elaboración: El autor

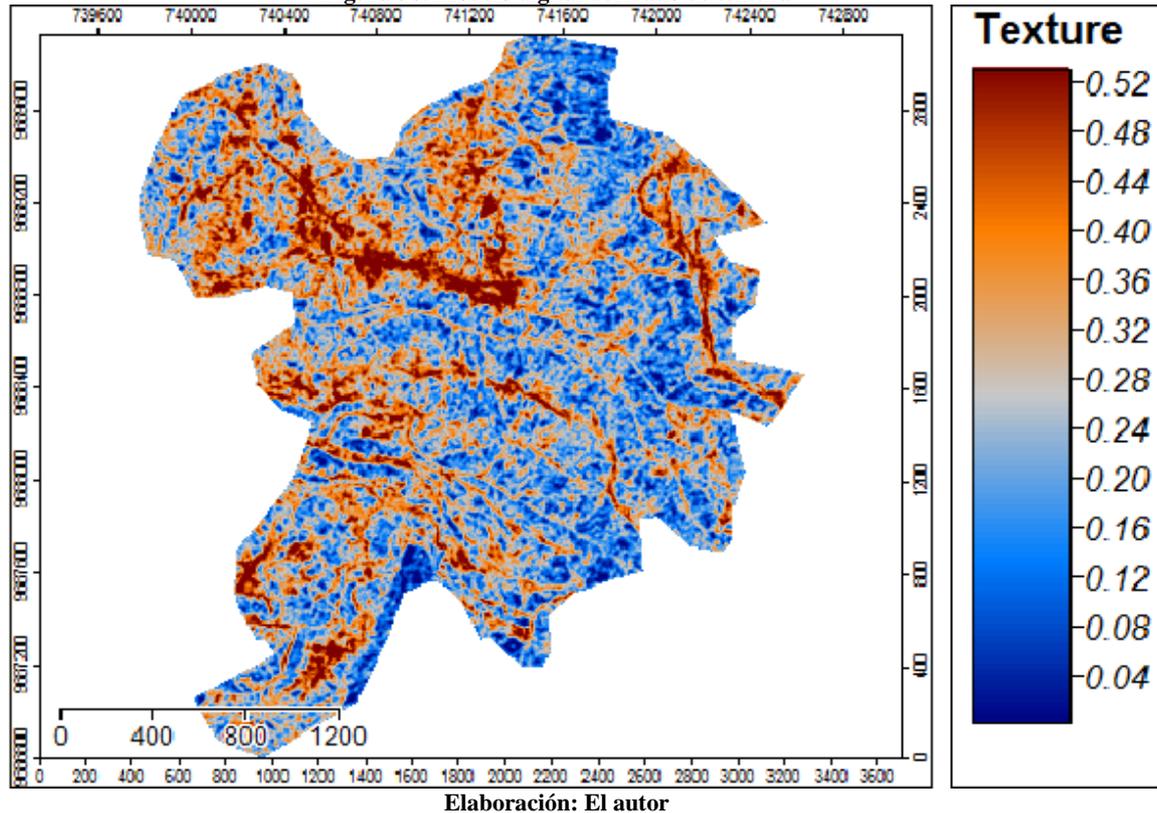
Al analizar estos valores en el área de estudio, se tienen pendientes que van desde 0 hasta 388.25%, y una media aritmética de 28,68%, la desviación estándar de 20.25 indica que la distribución de la pendiente no es uniforme.

Modelo derivado de convexidad: En el modelo digital derivado de convexidades, los valores de 0.36 a 0.5 corresponden convexidad negativa (áreas cóncavas), y los valores que van de 0.51 a 0.66 a convexidad alta (áreas convexas).



Modelo derivado de textura: Analizando el modelo derivado, el rango de la textura va 0.04 “textura gruesa” hasta 0.82 textura fina.

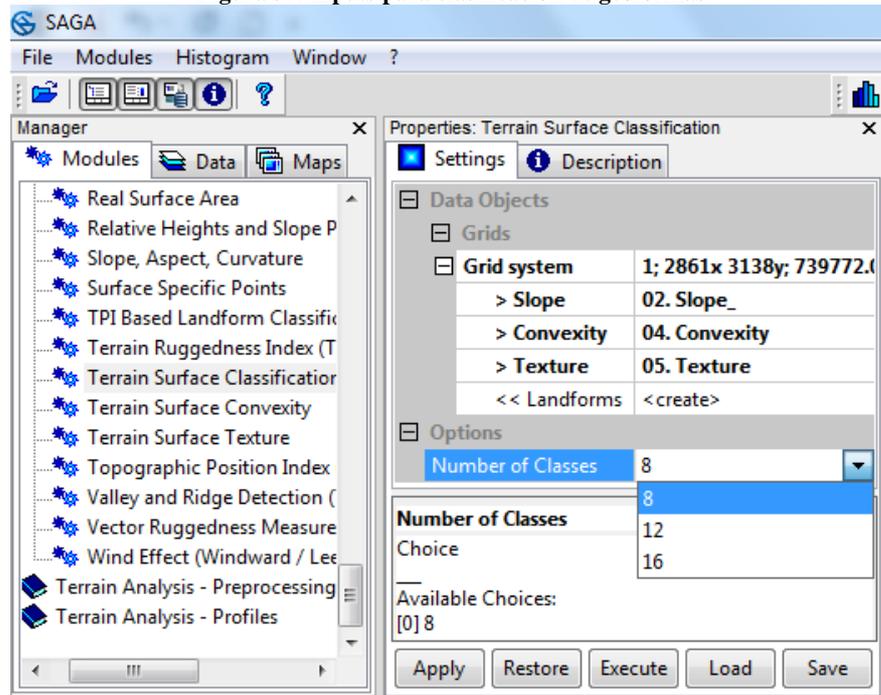
Figura 36. Modelo digital derivado de textura



4.2.2. Trazado del relieve

Generado los modelos digitales derivados de pendientes, convexidad y textura, se aplica el algoritmo de clasificación de la superficie del terreno; el nombre del algoritmo en el software SAGA GIS es "Terrain surface classification", y requiere como inputs el sistema de coordenadas del área de trabajo, el MDT y los modelos digitales derivados que se generaron en el análisis espacial. Posteriormente, se decide el número de clases en la que desea que el algoritmo clasifique, las opciones son 8, 12 o 16.

Figura 37. Inputs para clasificación de geformas



Elaboración: El autor

Los modelos derivados como el resultado de la clasificación tienen un formato de salida .sgrd (GRID SAGA), los archivos de datos .sdat y el archivo de proyección .prj, los cuales se almacenan en el temporal del ordenador. Por tanto, al finalizar el proceso se debe guardar el proyecto para luego poder continuar con los geoprocursos.

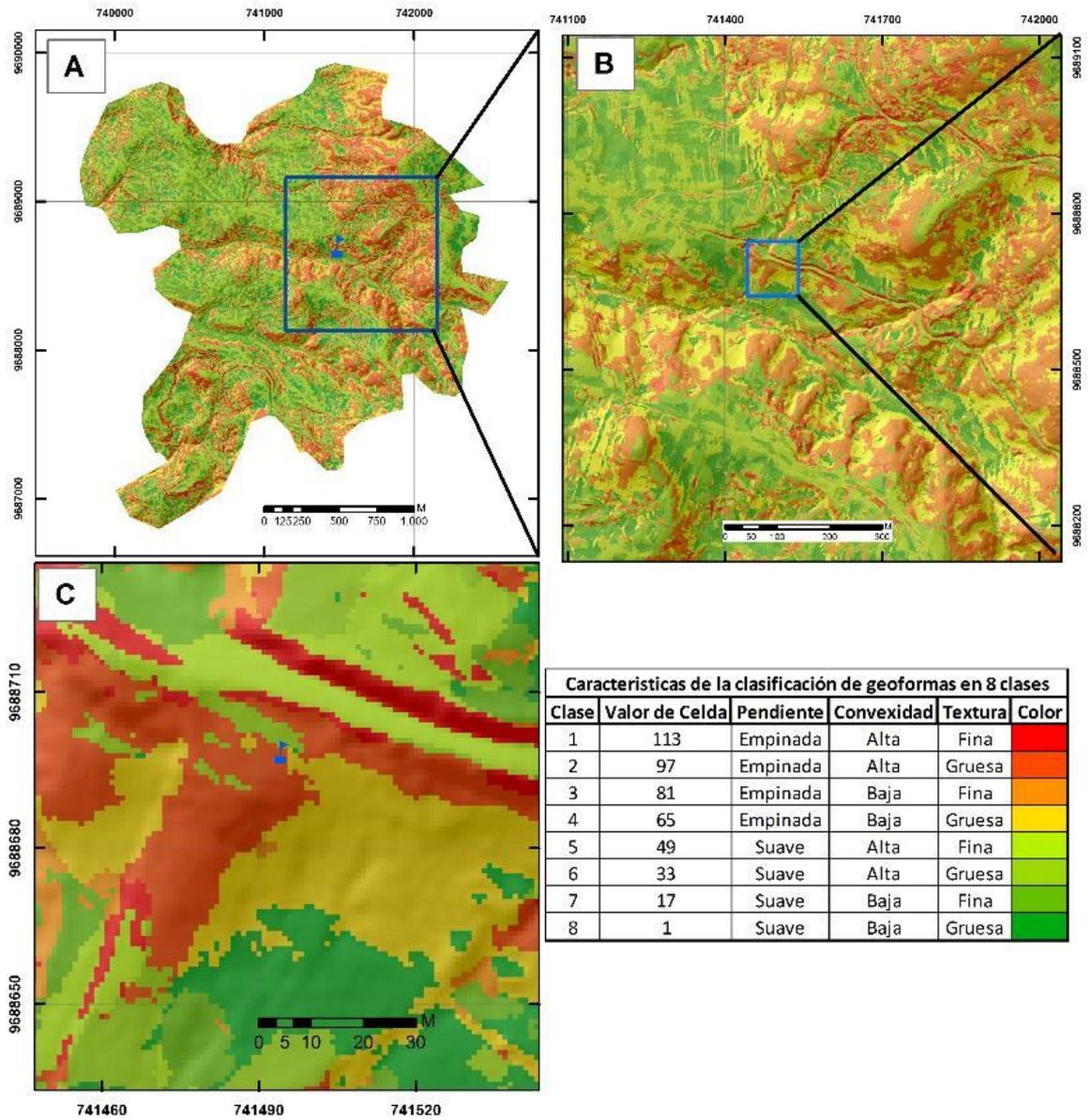
En la tabla 15 se visualiza los valores mínimos y máximos que aplicó el algoritmo para trazar las geformas del relieve.

Tabla 15. Valores mínimos y máximos de pendiente, convexidad y textura para 8 clases de geformas

Valor	Pendiente (%)		Convexidad (rad)		Textura (rad)	
	Suave	Empinada	Baja	Alta	Gruesa	Fina
mínimo	0	28,6881	0,059936907	0,508529784	0	0,265148399
máximo	28,6882	375,887316	0,508529783	0,981072545	0,265148398	0,842271268

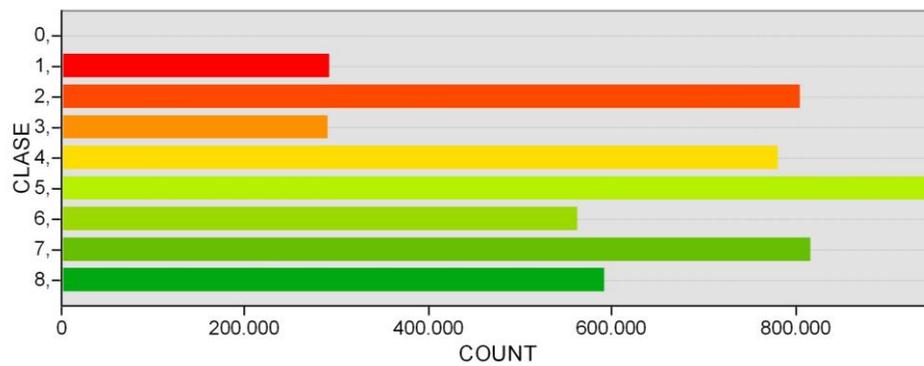
Elaboración: El autor

Figura 38. Trazado en 8 clases de geoformas del relieve



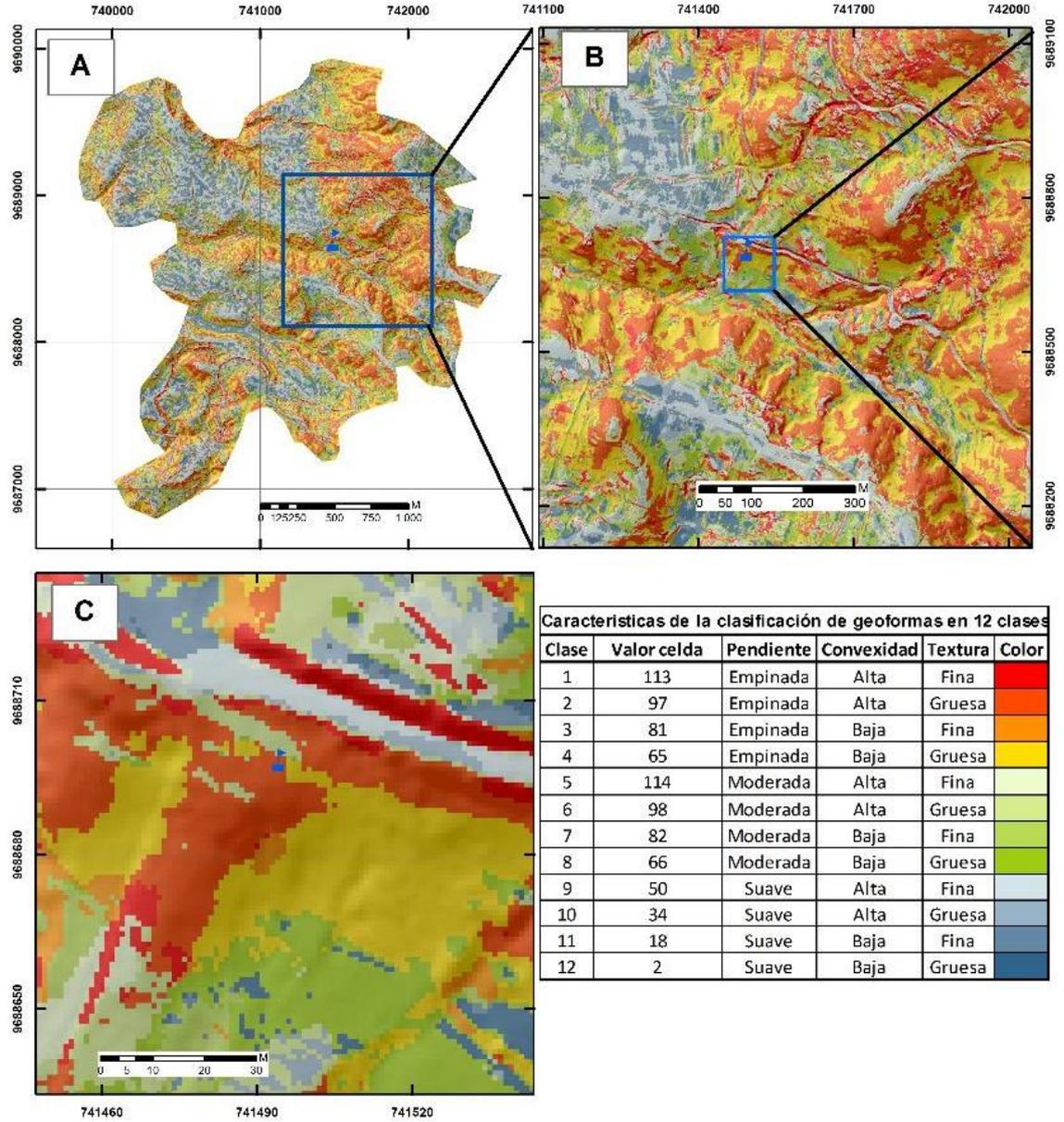
Elaboración: El autor

Figura 39. Histograma de clasificación de geoformas en 8 clases



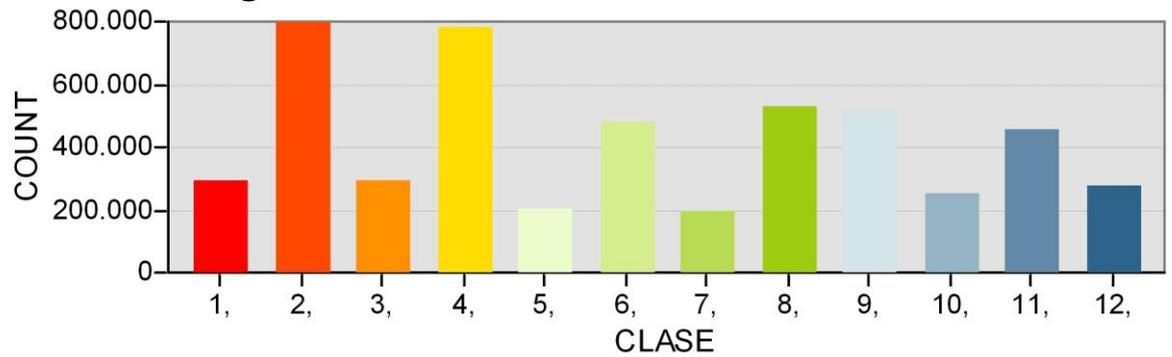
Elaboración: El autor

Figura 40. Trazado en 12 clases de geoformas del relieve



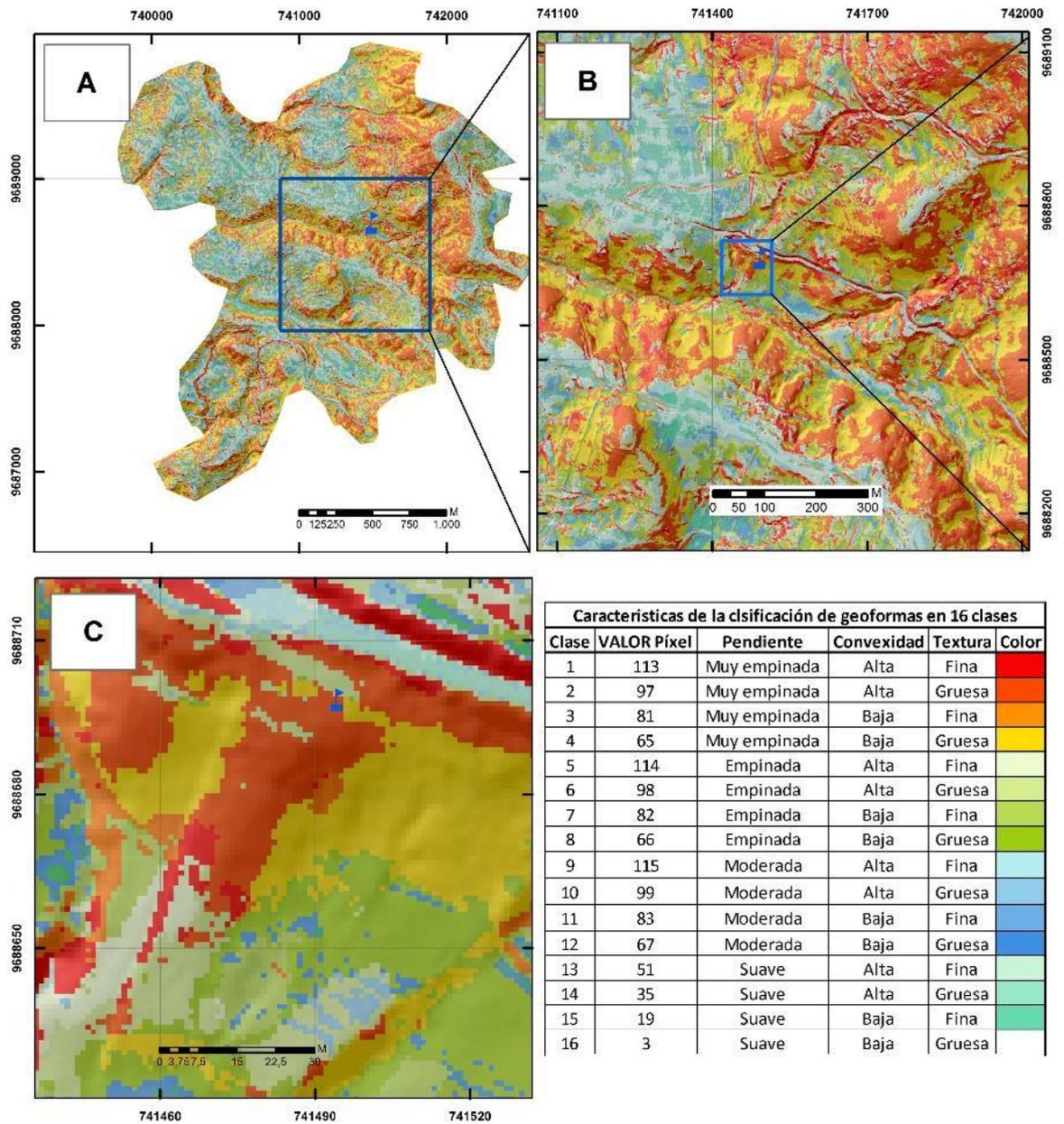
Elaboración: El autor

Figura 41. Histograma de clasificación en 12 clases de geoformas



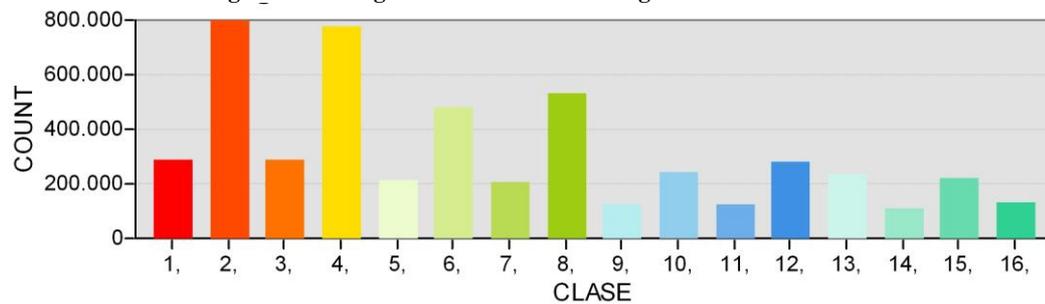
Elaboración: El autor

Figura 42. Trazado en 16 clases de geformas del relieve



Elaboración: El autor

Figura 43. Histograma de clasificación de geformas en 12 clases



Elaboración: El autor



Las figuras 38, 40 y 42 muestran las características que asumirá cada geoforma luego de combinar los MDT derivados. Es importante tener presente los valores de la celda, ya que estos servirán para identificar las geoformas en los siguientes geoprocesos.

Ejecutada la clasificación no supervisada de 8 clases de geoformas en el área de estudio (Figura 38) muestra que, cumple con las características de los modelos digitales derivados y el diagrama del algoritmo (Figura 24 y 25). El resultado generado es un valor específico para cada unidad, el cual representa características específicas de: pendiente (empinada o suave), convexidad (alta o baja) y textura (fina o gruesa), al aumentar la escala de visualización y sobreponer el modelo digital de sombras (fig. 38C), permite apreciar las características de cada unidad o geoformas del relieve generado.

El histograma de acumulación de celdas por valor de píxel (Figura 39) muestra la que, el área de estudio está dominada por las clases 5, 6, 7 y 8, en las que el factor determinante es la pendiente suave, convexidad (baja y alta) y textura (fina y gruesa), las mismas que pueden ser de aptitud agrícola y asentamientos humanos.

Posteriormente se aplicó el trazado con 12 clases de geoformas (Figura 40) en la que se dividirá la pendiente suave en; moderada y suave, el grupo de pendiente empinada se mantendrá igual al trazado con 8 clases de geoformas.

Al realizar el análisis del resultado de trazado en 12 clases de geoformas del relieve se determina que, la nueva clase con respecto a la clasificación de 8 geoformas es un grupo de “pendiente moderada”, derivada del grupo de la pendiente suave. Esto se comprueba al revisar los histogramas (Figuras 39 y 41), donde se observa que la cantidad de celdas (count) en las clases 1,2,

3 y 4 son iguales en los dos histogramas. Cumpliendo con la regla planteada en el algoritmo de la figura 24.

También se ejecutó la clasificación en 16 clases (Figura 42), en la que el grupo de pendiente suave en la clasificación de 12 clases será subdividida.

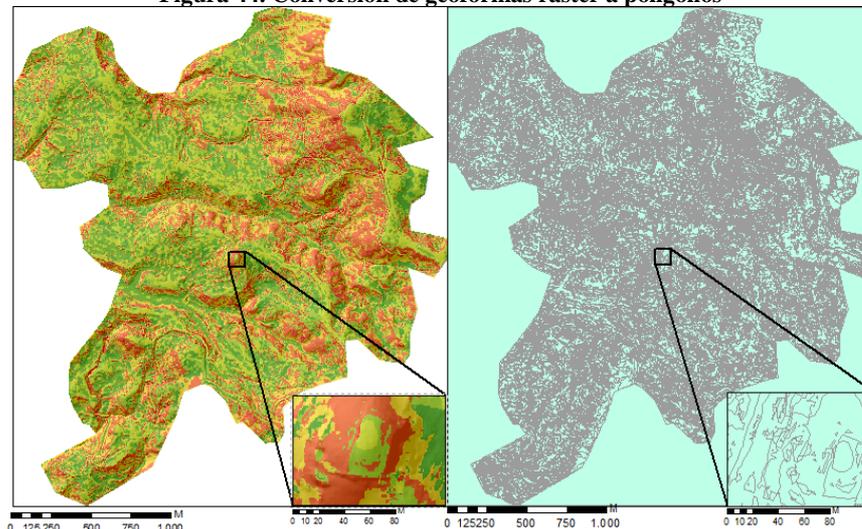
Al ejecutar el software en 16 clases de geoformas, permite analizar con mayor detalle las geoformas de relieve que tienen bajo grado de pendiente, por cuanto el algoritmo clasificó a la media del promedio de la tercera parte de la clasificación de 8 clases. Es decir se clasificó al grupo que tenía la pendiente suave cuando se ejecutó en 12 clases.

4.2.3. Análisis de componentes principales

Para el realizar este geoproceto, se utilizó el trazado de geoformas del relieve de 8 clases por cuanto el proceso es igual para el trazado en 12 o 16 clases de geoformas del relieve.

Vectorización: para aplicar las reglas topológicas y de presentación cartográfica se procedió a vectorizar, en este proceso se utilizó el Software ArcGis 10.2.1, el cual posee gran capacidad para geoprocesar rasters y vectores.

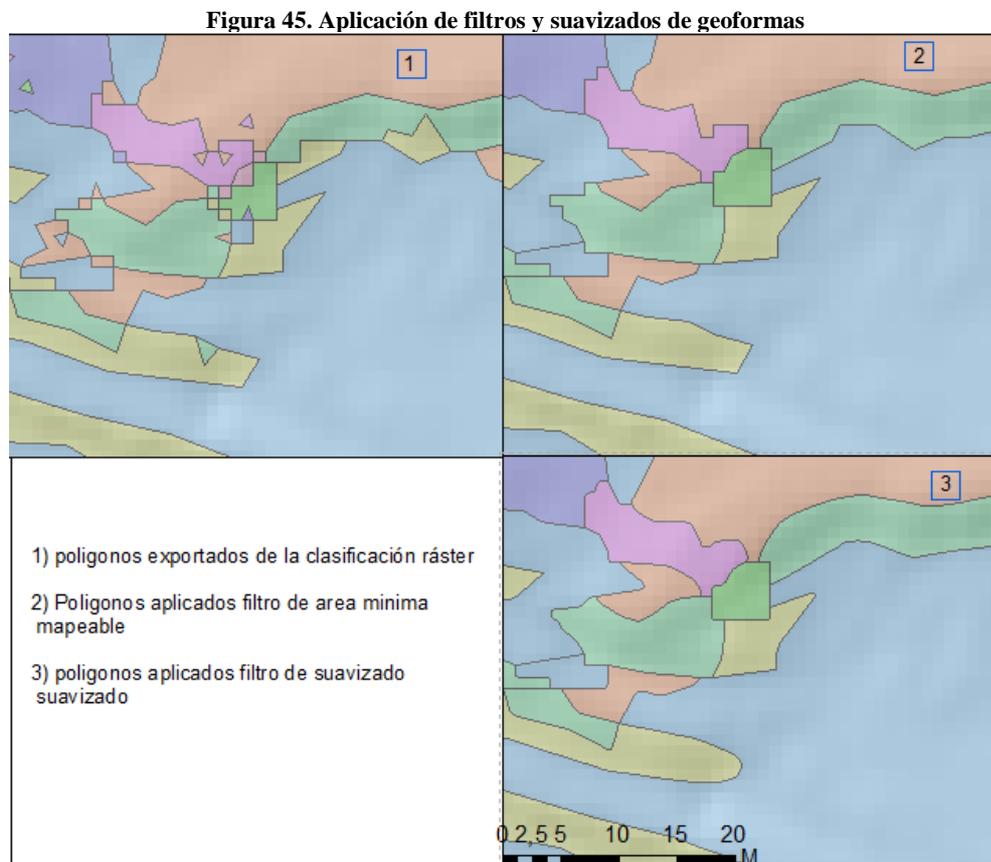
Figura 44. Conversión de geoformas raster a polígonos



Elaboración: El autor

Una vez convertido en polígono las geoformas del raster, se aplicó las reglas topológicas de área mínima cartografiada, el cual es 16 m² para MDT de 1m píxel resultante de agrupar 4 celdas en vertical y 4 horizontal.

Finalmente se aplicó un filtro de “suavizar polígonos” (smooth polygon), que suaviza ángulos cerrados en contornos de polígonos para mejorar la calidad estética o cartográfica.



Elaboración: El autor

De esta manera se ha realizado la cartografía preliminar de geoformas del relieve, la misma ha sido trazada de manera automática por software de sistemas de información geográfica.

4.3. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE GEOFORMAS DEL RELIEVE

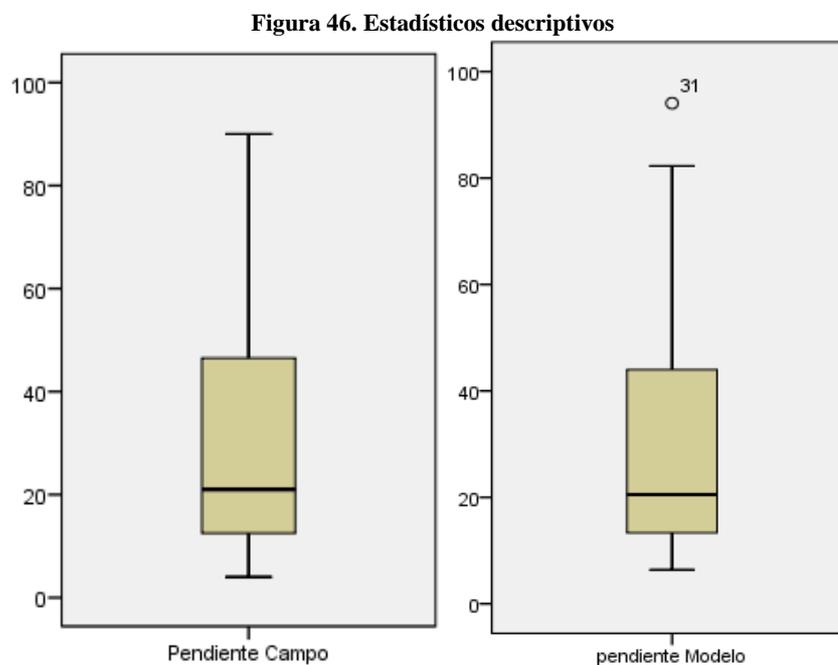
De acuerdo a los objetivos planteados, la verificación y validación de la cartografía preliminar de geoformas del relieve se realizó en dos fases, una

durante el proceso con ayuda de la tecnología disponible ortofotos visión estereoscópica y posteriormente con reconocimiento en campo, lo que permite comprobar la eficiencia o deficiencia del software y las técnicas empleadas para realizar el trazado automatizado de geoformas del relieve.

Los datos levantados en campo Anexo 8 y la información extraída del modelo digital de geoformas del terreno clasificado en 8 clases (Anexo 9) se tabularon y se procedió a realizar el análisis comparativo.

4.3.1. Análisis de información

Con la aplicación del margen de error al 5 %, se calculó los estadísticos descriptivos presentados en la Figura 46.



Elaboración: El autor

En el diagrama de cajas se analiza que el rango en las pendientes de campo es de 86 versus el rango de las pendientes generadas del MDT que es de 87, la mediana de la pendiente es de 21% para los datos tomados en campo y 20.51% para los datos de la pendiente generada a partir del MDT, y en



ambos casos se nota la acumulación de los datos por debajo de la mediana (Anexo 11).

Prueba de Normalidad

Tabla 16. Prueba de normalidad

	Estadístico	g.l.	Significancia		α
Pendiente Campo	,183	91	0.0000000050231	<	0.05
Pendiente Modelo	,197	91	0.00000000026668	<	0.05

Realizada la prueba de normalidad concluimos que los datos de pendiente tomados en campo y los extraídos del modelo no corresponden a una distribución normal, por lo cuanto el valor p es menor que el grado α de 0.05.

Análisis de prueba T Student para muestras relacionadas

Realizado el análisis de T Student para muestras relacionadas, se determinó que, la significancia lateral es de 0.995 mayor que 0.05 (5% error planteado), por tanto se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula “No existe una diferencia significativa entre la media de valores de pendiente medidos en el campo y la media de valores de pendiente obtenida del modelo digital de terreno (Tabla 17).

Tabla 17. Prueba de T-Student para muestras relacionadas.

	Diferencias emparejadas					t	g.l	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza				
				Inferior	Superior			
Pendiente Campo - Pendiente Modelo	,003144	4,3862250	,4598013	-,9103316	,9166195	,007	90	,995

Elaboración: El autor

Esta prueba estadística valida que la pendiente generada desde un MDT utilizada para trazar geofomas del relieve es relativamente igual a la pendiente que existe en la realidad en el terreno, garantizando que el

caracterizador pendiente trazara las clases de geoformas de manera eficiente.

Error medio cuadrático RMS

Calculado el análisis del RMS (Anexo 12) que es igual a 0,2292 ratifica la eficacia del método, ya que el valor límite es igual a la $\frac{1}{2}$ del valor de la celda (1m de píxel), es decir 0.5. Por lo tanto, la cartografía cumple con el requerimiento deseado “trazar automáticamente cartografía de geoformas del relieve a escala 1:1000”.

4.3.1.1. Análisis visual comparativo

El análisis visual permitió comparar la información cualitativa de las geoformas del relieve trazadas, a partir de un MDT en un SIG, con las geoformas del relieve que se pueden delinear en campo de forma manual.

El resultado de la visualización en visión anáglifo y 3D permitió comprobar que las geoformas trazadas automáticamente en un software SIG a partir de un MDT, son similares a las que se puede delinear de forma manual, como se puede visualizar en la Figura 47.

Figura 47. Validación de geoformas en modelo 3D y en fotografía

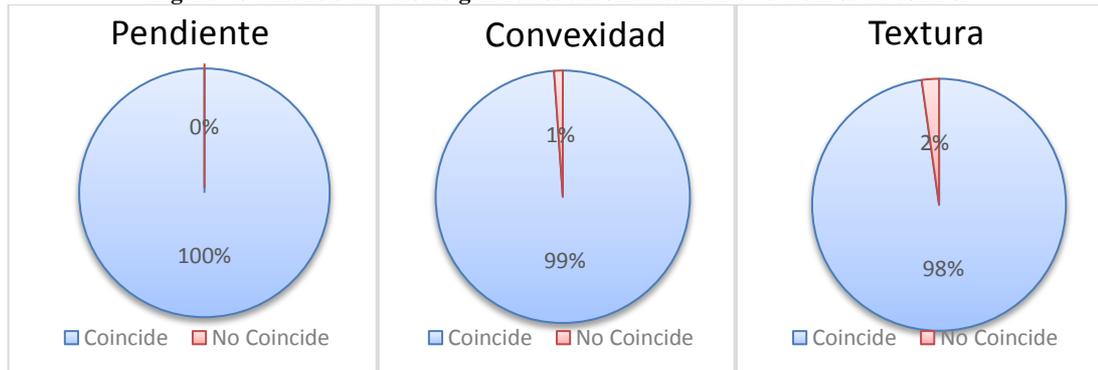


Elaboración: El autor

Realizada la valoración cualitativa a 91 puntos de control (Anexo 10), con la información levantada en campo y la extraída del modelo derivado de geoformas, se determina la eficacia del método de trazado de geoformas,

dando como resultado lo siguiente: la pendiente coincide en un 100%, convexidad en 99% y la textura el 98%, como se lo visualiza en la Figura 48.

Figura 48. Análisis de valores generados automáticamente vs. Puntos de control



Elaboración: El autor

4.3.1.2. Análisis de inconsistencias

El resultado expresa alta confianza. Sin embargo, se realizó un análisis específico de los puntos de control, donde no coincide la convexidad y textura; esta comparación se la efectuó con las fotografías que se tomaron en el reconocimiento de campo y con las ortofotos tomadas en el vuelo combinado.

Al comparar una fotografía actual con una ortofoto tomada en el vuelo combinado LIDAR, se puede determinar que la causa fue ocasionada por remoción de la tierra luego que fue levantada la información (Figura 49).

Figura 49. Verificación de inconsistencias 1



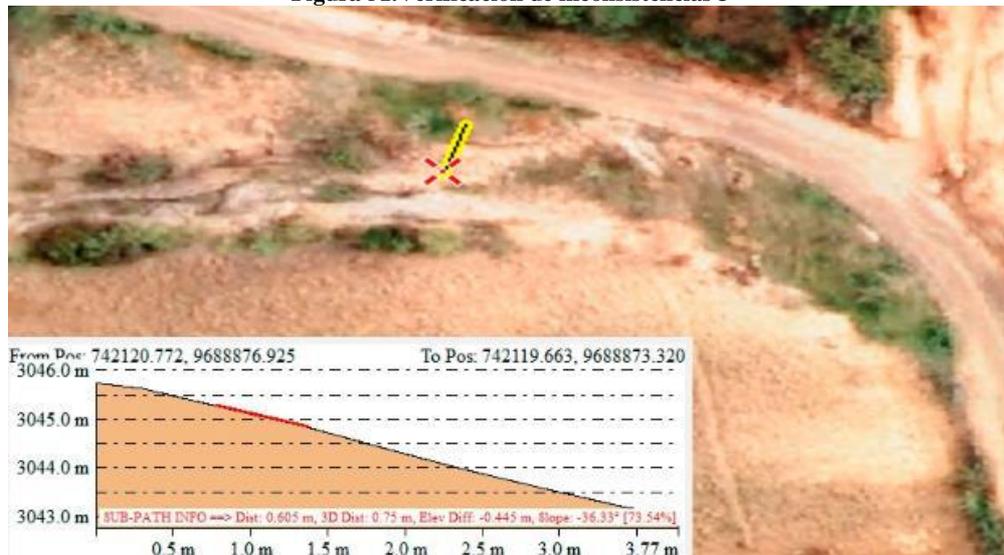
Elaboración: El autor

En la Figura 50 se puede visualizar que, el cambio del relieve es ocasionado por actividad humana con uso de maquinaria, al ampliar la frontera agrícola en áreas vulnerables a esta actividad.

Figura 50. Verificación de inconsistencias 2

Elaboración: El autor

Al comparar la foto con la ortofoto en una visualización 3D se aprecia que hay una considerable área de terreno desaparecido, la ortofoto es tomada en el año 2012 y la fotografía en el año 2014; realizada la medición de la pendiente, se determinó que el área alterada corresponde a una pendiente de sobre el 70% (Figura 51).

Figura 51. Verificación de inconsistencias 3

Elaboración: El autor

De esta manera se ha evaluado el método de trazado de geformas, el cual tiene alta eficiencia en el trazado, por tanto los resultados que se obtengan dependerán del detalle de la información base. Además queda a criterio del técnico el uso de 8, 12 o 16 clases de geformas.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- 1) Con los resultados obtenidos se acepta la hipótesis planteada en el estudio, que, los sistemas de información geográfica apoyados en un modelo digital de terreno, permiten el trazado automatizado de las geoformas del relieve.
- 2) El trazado automatizado de las geoformas del relieve es posible realizarlo en menor tiempo que cuando se opta por delimitación manual, por tanto se reduce el factor económico y los errores humanos que son comunes en el delineado manual.
- 3) Utilizando un MDT de 1 metro de píxel generado a partir de información LIDAR de 10000 puntos/ Ha. promedio, es posible diferenciar geoformas a nivel de parcela, ya que las unidades mínimas mapeables es de 16m²; para generalizar unidades se puede modificar el tamaño del píxel en el MDT.
- 4) Con la tecnología actual tanto en hardware, software y equipos de levantamiento topográfico es posible trabajar a escalas “muy grandes” 1:1000, porque se genera información de alto detalle, y procesar este tipo de información es posible al utilizar métodos automáticos, siempre y cuando con personal capacitado.
- 5) El resultado de la investigación “Automatización del trazado de geoformas del relieve mediante SIG, a partir de un MDT” es un instrumento básico para orientar actividades o proyectos integrales, de carácter agronómico, amenazas naturales, ambientales, entre otros.
- 6) En la generación de mapas de suelos, el análisis implica el estudio de: Geología, Climatología, Hidrología, Cobertura Vegetal, Hidrología, Química del Suelo y Geomorfología. Es decir, la metodología propuesta en la presente tesis, es una parte de la geomorfología, sin embargo es un aporte importante para el levantamiento de



información del suelo y análisis multi-criterio de acuerdo a su forma fisiográfica.

- 7) La investigación desarrollada servirá a los usuarios con conocimientos en cartografía, geomorfología, geología y SIG, como una guía para generar otras metodologías en el registro de información del suelo, tanto en el estado actual como su evolución o deterioro.
- 8) Es posible utilizar software libre SAGA GIS administrando eficientemente la información y formatos de la información. En los softwares comerciales sus licencias tienen precios altos lo que es una limitante a los usuarios.



5.2. Recomendaciones

La fidelidad de una clasificación automatizada de la topografía depende fundamentalmente de la exactitud del MDT. Con datos de elevación del terreno de calidad uniforme se obtiene los mejores resultados, por tanto es de vital importancia revisar la información base.

Se recomienda que se realice estudios a de levantamientos de suelos, tanto con MDT de 1m y MDT generalizado a 5 m de píxel, para analizar la relación de los suelos con cada una de las geoformas obtenidas en el presente estudio.

El trazado automatizado de geoformas del relieve no sustituye a la interpretación geomorfológica, pero sí es una herramienta de apoyo, puesto que si el propósito del estudio es delimitar unidades geomorfológicas, ambientales o del paisaje, se debe tener en cuenta áreas de análisis como son la geología, edafología, uso del suelo, etc.

Se impulsa a que se aplique esta metodología en el mapeo de suelos, ya que las geoformas tienen un componente interno (hipogeo) y un componente externo (epigeo), en relación a la superficie del terreno. El componente interno es el material de la geoforma (contenido), cuyas características conllevan información genética y estratigráfica (cronológica).



Bibliografía

- CLIRSEN. (2009). *Generación de geoinformación para la gestión del territorio y valoración de tierras rurales de la cuenca del río Guayas escala 1:25000*.
- Dávila, A. (23 de Marzo de 2013). *La cartografía básica*. Recuperado el 06 de Noviembre de 2013, de IGM Educativos Cartográficos - Geográficos: http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/?wpfb_dl=103
- Dijkshoorn, K., Huting, j., & Tempel, P. (2005). *Update of the 1:5 million soil and terrain databased for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC;VERSION2.0)*. Wageningen: ISRIC - Wold Soil Information.
- ESRI. (2012). *Pensando en el SIG: Planificación del sistema de información geográfica dirigida a gerentes*. (Tomlinson, Ed.) Recuperado el 06 de Noviembre de 2013, de Esri Press: http://downloads2.esri.com/ESRIpress/images/147/think3_ch1_SP.pdf
- Esri. (9 de noviembre de 2013). *ArcGIS Resources*. Recuperado el 20 de Enero de 2014, de Ayuda de ArcGIS 10.1: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/009z000000vs000000/>
- Fallas, J. (2007). *Modelos Digitales de Elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*.
- FAO. (2009). *Gía para la descripción de suelos* (Cuarta Edición ed.). (R. Vargas Rojas, Trad.) Roma, Italia.
- Felicísimo, A. (2006). El modelo digital de elevaciones., (pág. 27). Oviedo.
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos digitales del terreno*. Oviedo: Pentalfa.



- Fernández, I., & Coppel. (2001). *Localización geográfica. Las coordenadas geográficas y la proyección UTM*. Palencia: Universidad de Valladolid.
- Franklin, S., & Peddle, D. (1987). *Computers & Geosciences; texture analysis of digital image data using spacial cooccurrence* (Vol. 13(3)).
- Hammond, E. H. (1954). Small-scale continental landform maps. *Assoc. Am.*, 33 - 42.
- Helgl, T., & Reuter, H. I. (2009). *Developments in soil science: Geomorphometry; concepts, software, aplicaciones* (Vol. 33). Amsterdam: British Library Cataloguing-in-Publication Data.
- Hidrográfica©. (21 de Octubre de 2001). *Geomática, definición*. Recuperado el 06 de Noviembre de 2013, de HIDROGRÁFICA: www.members.tripod.com/hidrografica/geomatica.htm
- INEGI. (2013). *Modelos digitales de elevación (MDE)*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2013, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía - México: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- Iwahashi, J., & Pike B, R. J. (2007). Automated classifications of topograp hy from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *ScienceDirect*, 409 - 440.
- Iwahashi, J., Watanabe, S., & Furuya, T. (2001). Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan. *ScienceDirect*, 27, 851 - 865.
- Londoño Arango, C. (2001). *Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales - caracterización-planificación-administración*. Ibagué: UNIVERSIDAD DEL TOLIMA.



- Martínez, F. (2011). *Delineado automatizado de formas del relieve mediante el procesamiento de un MDE en un SIG*. Comisión Federal de Electricidad, Centro de Anteproyectos del Pacífico Sur, México.
- Miller, C. L., & Laframme, R. A. (1958). *The digital terrain model - Theory and application*. Massachusetts.
- Olaya, v. (2011). *Sistemas de información geográfica*. Santander: SEXTANTE.
- Paredes, N. (1986). Determinación del datum vertical en la Libertad, Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico* (pág. 205). Quito: INOCAR.
- Pike et al. (1995). *Geomorphometry; progress, practice and prospect*.
- Priego, Á., Bocco, G., Mendoza, M., & Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje*. México.
- Reuter, H. I., Wendroth, O., & Kersebaum, K. C. (3 de January de 2006). Optimisation of relief classification for different levels of generalisation. *ELSEVIER*, 79 - 89. Recuperado el 22 de Febrero de 2014, de <http://home.shirazu.ac.ir/~kompani/geomorphology/geomorphology-lec-papers-mehr88/reuter-reliefclassification-geomorph2006.pdf>
- Salitchev, K. A. (1979). *Cartografía*. Habana - Cuba: Pueblo y Educación.
- Sastre Olmos, P. (2010). *Sistemas de información geográfica (SIG) técnicas básicas para estudios de biodiversidad*. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Schoenberger, P. J., Wysocki, D. A., & Benham, E. C. (2002). *Field book for describing and sampling soils, version 2.0*. Lincoln, NE: Natural Resources Conservation Service, National Soil Center.



STEREOCARTO. (2013). *Productos y servicios*. Obtenido de LIDAR aéreo:
<http://www.stereocarto.com/es/productos/producto.php?id=11>

Tricart, J. (1965a). *Principes et methodes de la geomorphologie*. Paris: Masson.

UNEP-ISSS-ISRIC-FAO. (1996). *Bases digitales de datos de suelo y terreno a nivel mundial y nacional (SOTER)*. Roma: Informe sobre recursos mundiales de suelo No. 74.1.

Universidad de Sevilla. (2010). *Cartografía en geografía física*. departamento de geografía física y AGR, Sevilla.

Vásquez Areas, M. (2009). La geomática y su importancia en el desarrollo de los pueblos. *REVISMAR*, 268.

Verstappen, H., & Van Zuidam, R. A. (1991). *El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos*. Publicaciones ITC.

Weibel, R., & Heller, M. (1993). *Modelos digitales del terreno*. Oxford: Oxford University Press.

Winckell, A., Zebrowski, C., & Sourdat, M. (1997). *Los paisajes naturales del Ecuador* (Vol. Volumen 1). Quito, Ecuador.

Zinck, J., & Urriola, P. L. (1970). *Origen y evolucion de la formación mesa. Un enfoque edafológico*. Venezuela: Ministerio de Obras Públicas.



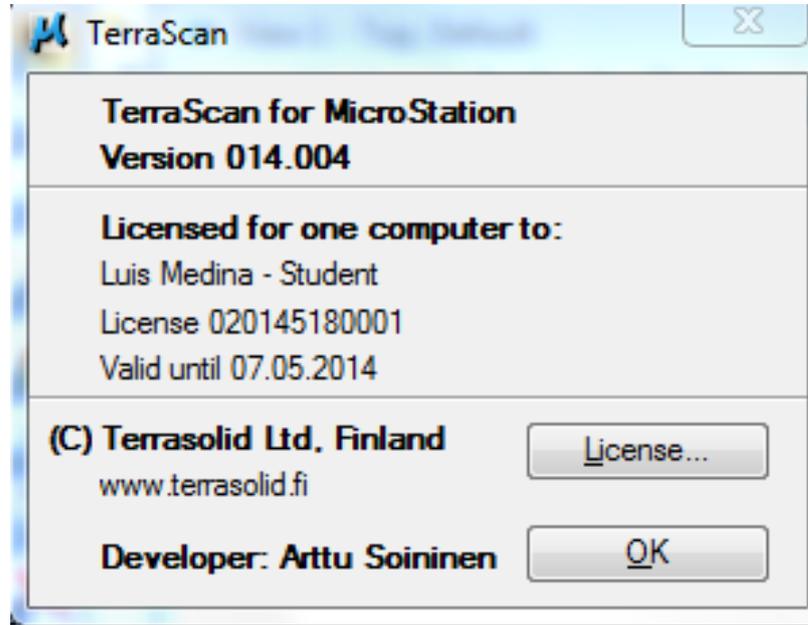
ANEXOS



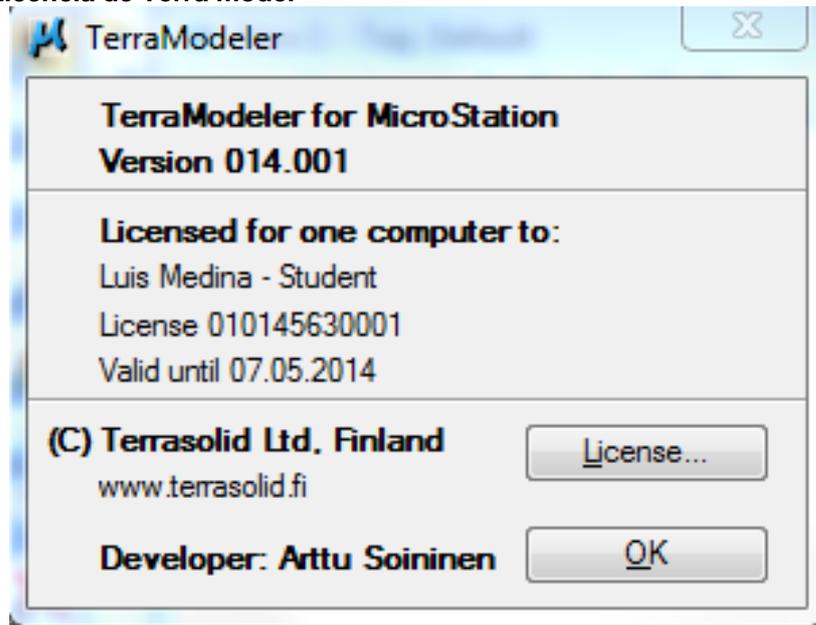
Anexo 1. Valoración de software

Software	TIPO DE TINFORMACIÓN				VAL.	Análisis Morfométrico			VAL.
	Imagen	Raster	vectorial	LIDAR		Pend.	Conv.	Rug.	
ABACO DbMAP	1	1	1	1	4	1			1
ArcGIS	1	1	1	1	4	1	1		2
Autodesk Map	1	1	1	1	4	1			1
DIDGER 4			1		1	1			1
ENVI	1		1	1	3				0
ERDAS	1			1	2	1			1
Geomedia	1	1	1		3				0
GLOBAL MAPPER	1	1	1	1	4	1	1		2
GRASS	1		1	1	3	1	1		2
gvSIG	1	1	1		3	1			1
IDRISI	1		1		2	1			1
ILWIS	1		1		2				0
JUMP			1		1				0
Kosmo		1	1		2				0
LatinoGis		1	1		2				0
Manifold	1				1				0
MAP MAKER	1		1		2				0
MapGuide Open Source			1		1				0
MapInfo	1		1		2				0
MapWindow GIS		1	1		2				0
MicroStation Geographics / Bentley Map	1	1	1	1	4				0
MiraMon	1	1	1		3				0
PCI Geomatic	1		1		2				0
Quantum GIS	1	1	1		3				0
SAGA GIS	1	1	1		3	1	1	1	3
SavGIS	1		1		2				0
SEXTANTE	1		1	1	3	1	1	1	3
SITAL			1		1				0
SPRING	1	1	1		3				0
SuperGIS	1	1	1		3				0
Surfer 8		1	1		2				0
TatukGIS		1	1		2				0
TNTMips		1	1	1	3	1	1		2
uDIG	1	1	1		3				0

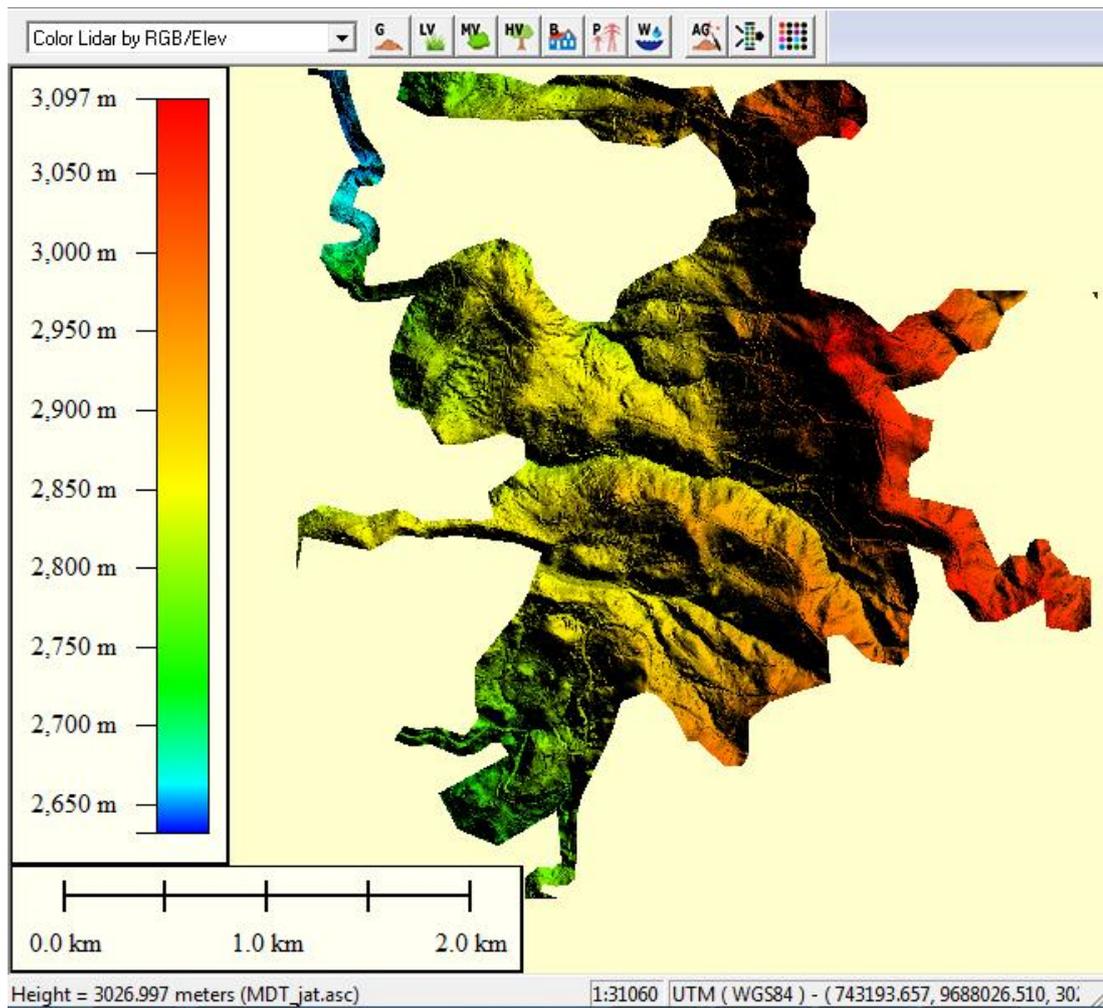
Anexo 2. Licencia de Terra Scan



Anexo 3. Licencia de Terra model



Anexo 4. MDT generado a partir de puntos LIDAR.



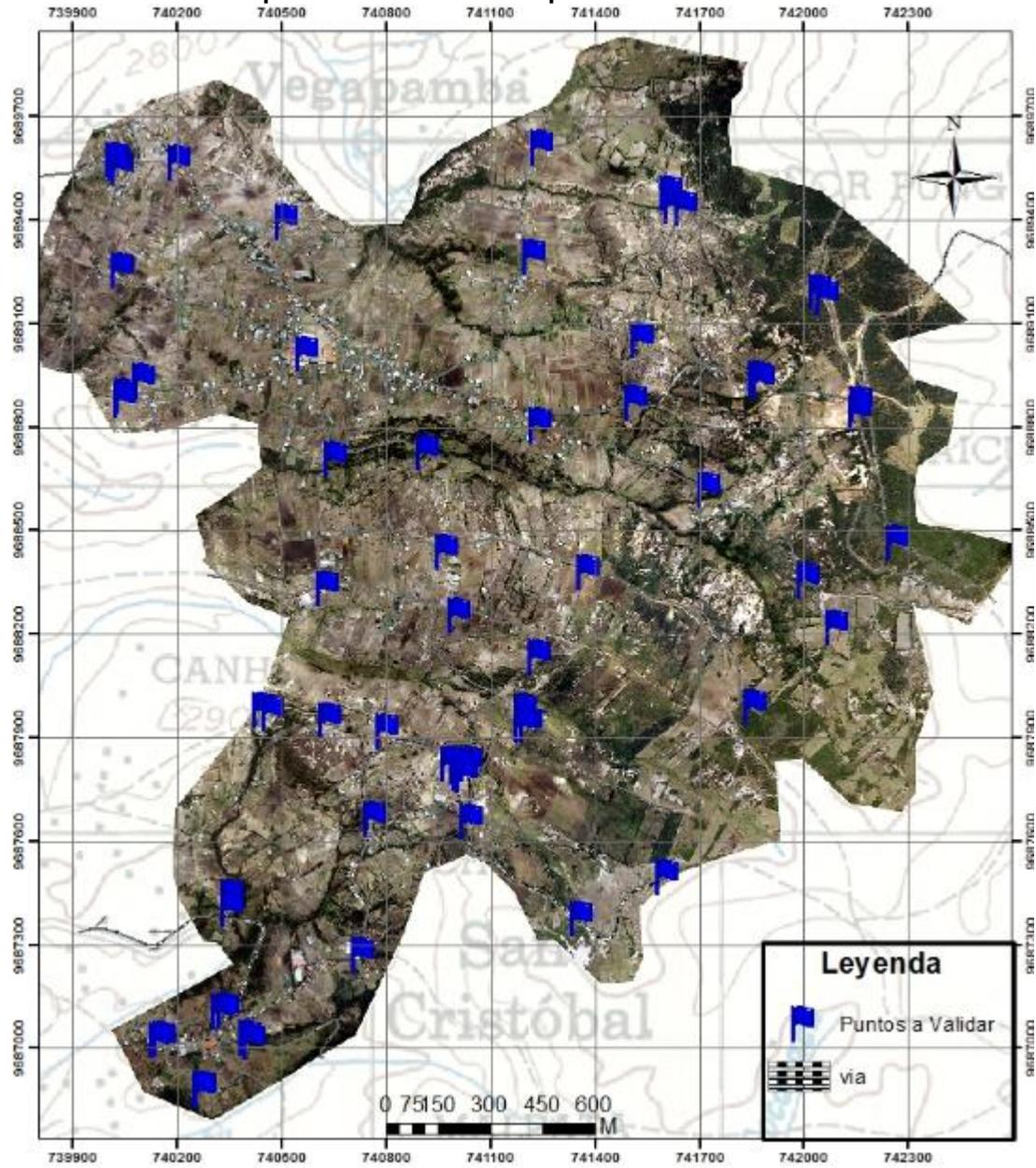
Anexo 5. Ficha de campo

Punto #		Código grid	
	Coordenadas		
X		Y	
Altura			
Lecturas/geoforma		Pendiente (%)	convexidad (a-b) textura (f-g)
1			
2			
3			
4			
Promedio			
Observaciones:			

Anexo 6. Equipo utilizado en campo



Anexo 7. Itinerario de puntos a validar en campo





Anexo 8. Tabulación de información levantada en campo

Coordenadas			Punto	Referencia	Código Grid	Pendiente %	Pendiente		Textura	Observación
X	Y	Z	Control				Descripción	Convexidad		
741238,5614	9689633,1495	2867,7070	PC01	5668	113	40	empinada	alta	fina	bordo de vía
741246,7304	9689633,6787	3867,8049	PC02	5668	17	10	suave	baja	fina	zona arable
741241,2734	9689630,1068	2867,8689	PC03	5668	49	2	suave	alta	fina	cultivo ciclo corto
740016,4320	9689595,3495	2809,0822	PC04	5752	81	70	empinada	baja	fina	talud
740016,8432	9689590,7345	2803,9390	PC05	5752	17	25	suave	baja	fina	pasto
740025,8870	9689583,5013	2810,0645	PC06	5750	113	110	empinada	alta	fina	canal colector
740042,4479	9689584,0583	2807,6615	PC07	5749	81	45	empinada	baja	fina	arboles
740036,0784	9689576,4337	2804,5811	PC08	5749	17	13	suave	baja	fina	llano
740194,0129	9689571,8145	2846,1919	PC09	5662	49	5	suave	alta	fina	cultivo Maíz
740192,2931	9689560,4374	2845,7271	PC10	5662	1	7	suave	baja	gruesa	Maíz
741624,1946	9689496,0311	2953,4331	PC11	5757	65	55	empinada	baja	gruesa	Maíz
741623,7063	9689488,1947	2955,0644	PC12	5757	97	60	empinada	alta	gruesa	en recuperación
741650,9907	9689437,8769	2953,3667	PC13	5758	17	8	suave	baja	fina	llano, Ciénega
740512,8985	9689418,0959	2878,1804	PC14	5753	33	27	suave	alta	gruesa	cementerio
741612,9894	9689414,6451	2948,8010	PC15	5756	113	70	empinada	alta	fina	recuperación, ladera
741233,8319	9689309,3914	2868,0010	PC16	5667	17	7	suave	baja	fina	parte plana
741220,2059	9689307,6716	2867,5840	PC17	5667	49	8	suave	alta	fina	vía
740033,2474	9689267,3627	2823,1851	PC18	5664	49	4	suave	alta	fina	Maíz
742063,0598	9689222,0148	3069,3240	PC19	5766	33	12	suave	alta	gruesa	pasto
742075,5935	9689222,2734	3071,7311	PC20	5767	1	20	suave	baja	gruesa	pasto



UNIVERSIDAD DE CUENCA

742002,6968	9689192,5179	3074,4805	PC21	5768	17	20	suave	baja	fina	vegetación baja
741529,5275	9689070,8738	2941,4086	PC22	5755	65	70	empinada	baja	gruesa	en recuperación
741868,2098	9688961,4268	3009,7420	PC23	5760	1	11	suave	baja	gruesa	pasto
741874,0164	9688953,4640	3009,1240	PC24	5761	33	14	suave	alta	gruesa	pasto y maleza
741868,6586	9688950,7255	3008,3250	PC25	5761	49	18	suave	alta	fina	pasto
740058,3365	9688939,2192	2832,2810	PC26	5746	113	68	empinada	alta	fina	erosionado
740082,0962	9688935,7267	2829,0801	PC27	5746	17	18	suave	baja	fina	pasto
740073,4793	9688924,9442	2837,8801	PC28	5746	65	55	empinada	baja	gruesa	talud
742154,5462	9688899,0470	3055,3201	PC29	5764	113	70	empinada	alta	fina	erosionado pendiente fuerte
742147,8787	9688896,0837	3053,2271	PC30	5764	49	27	suave	alta	fina	erosionado
741503,4280	9688887,3243	2929,6409	PC31	5754	113	50	empinada	alta	fina	en regeneración
742163,4891	9688886,4528	3056,9460	PC32	5765	97	90	empinada	alta	gruesa	erosionado
742136,5419	9688851,8612	3052,3911	PC33	5763	65	60	empinada	baja	fina	Arado- alterado
741236,0258	9688818,9614	2889,0640	PC34	5677	113	68	empinada	alta	fina	limite, maíz -vía
740897,1121	9688763,7196	2840,1970	PC35	5659	81	32	empinada	baja	fina	Bosque
740900,8162	9688757,3696	2840,1970	PC36	5659	17	10	suave	baja	fina	Cultivo Maíz
740642,3429	9688727,3117	2849,8812	PC37	5739	113	70	empinada	alta	fina	quebrada, pasto
740634,9447	9688723,3000	2843,9409	PC38	5745	33	16	suave	alta	gruesa	pasto, chilca
742246,6127	9688481,7340	3047,6305	PC39	5769	17	20	suave	baja	fina	arbustos
740993,2002	9688476,4596	2900,0559	PC40	5633	113	57	empinada	alta	fina	cultivo Maíz
740980,2630	9688476,2327	2900,8430	PC41	5633	81	49	empinada	baja	fina	Corte
740968,8859	9688463,1358	2898,1150	PC42	5633	17	2	suave	baja	fina	plano
741238,1551	9688358,4929	2948,8569	PC43	5654	49	7	suave	alta	fina	loma



UNIVERSIDAD DE CUENCA

740622,0410	9688347,9257	2870,8089	PC44	5738	17	8	suave	baja	fina	avena
741856,4762	9688316,2977	2916,0840	PC45	5681	97	70	empinada	alta	gruesa	ladera
740986,7852	9688266,0360	2877,1473	PC46	5733	17	12	suave	baja	fina	maíz, arveja
740991,2269	9688249,0869	2884,2199	PC47	5733	81	60	empinada	baja	fina	degradado, roca, pasto
742072,8032	9688212,4783	2966,8459	PC48	5680	17	15	suave	baja	fina	pasto
742076,5868	9688204,1175	2966,9199	PC49	5679	49	22	suave	alta	fina	pasto y cultivo
741215,1951	9688147,0926	2906,5343	PC50	5732	49	15	suave	alta	fina	barbecho
741171,4615	9688067,2478	2878,0430	PC51	5624	65	53	empinada	baja	gruesa	Maíz, Pasto
741194,2157	9688037,8790	2867,6809	PC52	5624	1	8	suave	baja	gruesa	terrazza
741183,1032	9688023,5915	2864,2620	PC53	5624	17	4	suave	baja	fina	Fondo de valle
741839,4617	9688006,5831	2968,6621	PC54	5640	17	8	suave	baja	fina	reservorio, plano
741833,9054	9688003,1700	2968,7930	PC55	5640	113	49	empinada	alta	fina	borde reservorio
740434,6957	9687995,7574	2853,2147	PC56	5725	113	100	empinada	alta	fina	roca
740455,5160	9687987,1958	2849,0143	PC57	5726	81	68	empinada	baja	fina	llano
740448,5194	9687981,4527	2849,3203	PC58	5726	17	9	suave	baja	fina	maíz, ciclo corto
740789,8860	9687944,1584	2871,1602	PC59	5729	17	7	suave	baja	fina	pasto
740623,9859	9687938,5317	2846,8269	PC60	5728	17	5	suave	baja	fina	fondo de valle
741148,1076	9687931,8117	2869,0930	PC61	5631	1	18	suave	baja	gruesa	valle
741125,4856	9687928,5044	2869,8000	PC62	5631	65	33	empinada	baja	gruesa	arado
740630,2231	9687928,8807	2859,0318	PC63	5728	81	67	empinada	baja	fina	zona degradada
741180,7396	9687914,9467	2874,0190	PC64	5628	1	4	suave	baja	gruesa	campo arado
741176,2946	9687905,8450	2872,9089	PC65	5628	17	8	suave	baja	fina	pasto
740998,9050	9687841,1550	2887,9980	PC66	5597	81	53	empinada	baja	fina	cantera



UNIVERSIDAD DE CUENCA

740996,2062	9687834,4874	2889,6741	PC67	5601	17	3	suave	baja	fina	piedra pómez
740979,5374	9687831,8681	2894,7390	PC68	5602	113	130	empinada	alta	fina	piedra pómez
740974,4574	9687827,4231	2896,9050	PC69	5603	49	27	suave	alta	fina	suelo descanso
741000,3337	9687811,5480	2898,7251	PC70	5610	65	39	empinada	baja	gruesa	suelo descanso
740993,6662	9687808,1349	2900,7700	PC71	5610	97	51	empinada	alta	gruesa	suelo descanso
741015,5982	9687701,6445	2901,3779	PC72	5611	49	4	suave	alta	fina	planada alta
741010,7563	9687694,6595	2901,2839	PC73	5611	33	8	suave	alta	gruesa	vía y planada
740752,9618	9687683,6567	2848,7333	PC74	5724	113	60	empinada	alta	fina	llano quebrada
741568,5348	9687514,7980	2961,1311	PC75	5730	65	40	empinada	baja	gruesa	paso
741585,2191	9687508,5152	2978,9975	PC76	5730	97	60	empinada	alta	gruesa	llano, chilcas
740339,9773	9687452,2209	2780,5581	PC77	5586	49	5	suave	alta	fina	pasto
740344,8986	9687405,2044	2775,8540	PC78	5592	97	70	empinada	alta	gruesa	ladera
741358,5269	9687370,7639	2947,1227	PC79	5731	113	60	empinada	alta	fina	llano, quebrada, chilcas
740710,0235	9687295,8955	2816,0123	PC80	5723	17	5	suave	baja	fina	patio - alterado
740720,9543	9687293,6367	2810,8201	PC81	5723	81	70	empinada	alta	gruesa	talud - alterado
740331,8376	9687112,7748	2768,1815	PC82	5718	81	52	empinada	baja	fina	cultivo maíz
740309,0547	9687107,9007	2767,8647	PC83	5717	113	117	empinada	alta	fina	borde vía
740146,5702	9687050,2278	2750,8648	PC84	5719	1	16	suave	baja	gruesa	pasto
740149,4394	9687045,1375	2748,6660	PC85	5720	17	20	suave	baja	fina	pasto
740380,7197	9687043,9645	2780,8029	PC86	5595	33	7	suave	alta	gruesa	uso agrícola
740141,8651	9687039,4252	2748,7326	PC87	5720	81	47	empinada	baja	fina	pasto
740392,8112	9687036,1365	2781,2690	PC88	5596	81	55	empinada	baja	fina	uso agrícola
740239,6462	9686907,8560	2755,0593	PC89	5721	33	11	suave	alta	gruesa	pasto



740254,6641	9686905,3876	2749,2791	PC90	5722	113	58	empinada	alta	fina	pasto
740253,7645	9686899,0376	2747,8750	PC91	5722	49	21	suave	alta	fina	pasto

Anexo 9. Datos extraídos del trazado automatizado de formas del relieve

Coordenadas			Punto de	Landforms	Valores MDT Derivados			Descripción de los valores MDT derivados		
X	Y	Z	Control	SAGA	Pendiente	Convexidad	Textura	Pendiente	Convexidad	textura
741238,5614	9689633,1495	2867,7070	PC01	113	37,30	0,54	0,55	Empinada	Alta	Fina
741246,7304	9689633,6787	3867,8049	PC02	17	10,50	0,47	0,38	Suave	Baja	Fina
741241,2734	9689630,1068	2867,8689	PC03	49	6,48	0,53	0,50	Suave	Alta	Fina
740016,4320	9689595,3495	2809,0822	PC04	81	84,83	0,44	0,28	Empinada	Baja	Fina
740016,8432	9689590,7345	2803,9390	PC05	17	11,01	0,41	0,36	Suave	Baja	Fina
740025,8870	9689583,5013	2810,0645	PC06	113	27,99	0,53	0,53	Empinada	Alta	Fina
740042,4479	9689584,0583	2807,6615	PC07	81	35,96	0,39	0,37	Empinada	Baja	Fina
740036,0784	9689576,4337	2804,5811	PC08	17	2,49	0,39	0,35	Suave	Baja	Fina
740194,0129	9689571,8145	2846,1919	PC09	49	13,85	0,57	0,39	Suave	Alta	Fina
740192,2931	9689560,4374	2845,7271	PC10	1	10,75	0,49	0,18	Suave	Baja	Gruesa
741624,1946	9689496,0311	2953,4331	PC11	65	35,46	0,48	0,12	Empinada	Baja	Gruesa
741623,7063	9689488,1947	2955,0644	PC12	97	47,37	0,53	0,21	Empinada	Alta	Gruesa
741650,9907	9689437,8769	2953,3667	PC13	17	4,30	0,44	0,32	Suave	Baja	Fina
740512,8985	9689418,0959	2878,1804	PC14	33	25,00	0,54	0,18	Suave	Alta	Gruesa
741612,9894	9689414,6451	2948,8010	PC15	113	36,43	0,52	0,30	Empinada	Alta	Fina
741233,8319	9689309,3914	2868,0010	PC16	17	5,51	0,46	0,42	Suave	Baja	Fina
741220,2059	9689307,6716	2867,5840	PC17	49	1,60	0,53	0,68	Suave	Alta	Fina



UNIVERSIDAD DE CUENCA

740033,2474	9689267,3627	2823,1851	PC18	49	11,85	0,56	0,47	Suave	Alta	Fina
742063,0598	9689222,0148	3069,3240	PC19	33	20,42	0,56	0,12	Suave	Alta	Gruesa
742075,5935	9689222,2734	3071,7311	PC20	1	8,91	0,44	0,22	Suave	Baja	Gruesa
742002,6968	9689192,5179	3074,4805	PC21	17	13,51	0,41	0,33	Suave	Baja	Fina
741529,5275	9689070,8738	2941,4086	PC22	65	64,05	0,51	0,26	Empinada	Baja	Gruesa
741868,2098	9688961,4268	3009,7420	PC23	1	9,22	0,46	0,23	Suave	Baja	Gruesa
741874,0164	9688953,4640	3009,1240	PC24	33	16,92	0,56	0,24	Suave	Alta	Gruesa
741868,6586	9688950,7255	3008,3250	PC25	49	16,49	0,52	0,34	Suave	Alta	Fina
740058,3365	9688939,2192	2832,2810	PC26	113	46,40	0,55	0,34	Empinada	Alta	Fina
740082,0962	9688935,7267	2829,0801	PC27	17	5,10	0,38	0,38	Suave	Baja	Fina
740073,4793	9688924,9442	2837,8801	PC28	65	46,03	0,40	0,20	Empinada	Baja	Gruesa
742154,5462	9688899,0470	3055,3201	PC29	113	36,71	0,58	0,46	Empinada	Alta	Fina
742147,8787	9688896,0837	3053,2271	PC30	49	8,46	0,53	0,44	Suave	Alta	Fina
741503,4280	9688887,3243	2929,6409	PC31	113	109,47	0,55	0,30	Empinada	Alta	Fina
742163,4891	9688886,4528	3056,9460	PC32	97	55,62	0,58	0,21	Empinada	Alta	Gruesa
742136,5419	9688851,8612	3052,3911	PC33	65	30,60	0,47	0,11	Empinada	Baja	Gruesa
741236,0258	9688818,9614	2889,0640	PC34	113	56,56	0,53	0,52	Empinada	Alta	Fina
740897,1121	9688763,7196	2840,1970	PC35	81	35,21	0,46	0,32	Empinada	Baja	Fina
740900,8162	9688757,3696	2840,1970	PC36	17	3,55	0,39	0,37	Suave	Baja	Fina
740642,3429	9688727,3117	2849,8812	PC37	113	54,79	0,63	0,34	Empinada	Alta	Fina
740634,9447	9688723,3000	2843,9409	PC38	33	23,99	0,57	0,21	Suave	Alta	Gruesa
742246,6127	9688481,7340	3047,6305	PC39	17	10,42	0,48	0,42	Suave	Baja	Fina
740993,2002	9688476,4596	2900,0559	PC40	113	32,80	0,53	0,41	Empinada	Alta	Fina



UNIVERSIDAD DE CUENCA

740980,2630	9688476,2327	2900,8430	PC41	81	56,86	0,45	0,43	Empinada	Baja	Fina
740968,8859	9688463,1358	2898,1150	PC42	17	6,25	0,45	0,62	Suave	Baja	Fina
741238,1551	9688358,4929	2948,8569	PC43	49	6,32	0,83	0,35	Suave	Alta	Fina
740622,0410	9688347,9257	2870,8089	PC44	17	4,27	0,41	0,63	Suave	Baja	Fina
741856,4762	9688316,2977	2916,0840	PC45	97	38,19	0,54	0,23	Empinada	Alta	Gruesa
740986,7852	9688266,0360	2877,1473	PC46	17	4,74	0,43	0,46	Suave	Baja	Fina
740991,2269	9688249,0869	2884,2199	PC47	17	21,19	0,46	0,41	Suave	Baja	Fina
742072,8032	9688212,4783	2966,8459	PC48	17	14,74	0,45	0,32	Suave	Baja	Fina
742076,5868	9688204,1175	2966,9199	PC49	49	14,05	0,51	0,38	Suave	Alta	Fina
741215,1951	9688147,0926	2906,5343	PC50	49	7,33	0,55	0,37	Suave	Alta	Fina
741171,4615	9688067,2478	2878,0430	PC51	65	47,93	0,38	0,07	Empinada	Baja	Gruesa
741194,2157	9688037,8790	2867,6809	PC52	1	14,61	0,44	0,20	Suave	Baja	Gruesa
741183,1032	9688023,5915	2864,2620	PC53	17	3,44	0,34	0,35	Suave	Baja	Fina
741839,4617	9688006,5831	2968,6621	PC54	17	12,26	0,50	0,32	Suave	Baja	Fina
741833,9054	9688003,1700	2968,7930	PC55	113	39,59	0,53	0,33	Empinada	Alta	Fina
740434,6957	9687995,7574	2853,2147	PC56	113	74,95	0,52	0,44	Empinada	Alta	Fina
740455,5160	9687987,1958	2849,0143	PC57	81	40,84	0,45	0,43	Empinada	Baja	Fina
740448,5194	9687981,4527	2849,3203	PC58	17	11,60	0,42	0,33	Suave	Baja	Fina
740789,8860	9687944,1584	2871,1602	PC59	17	20,71	0,45	0,36	Suave	Baja	Fina
740623,9859	9687938,5317	2846,8269	PC60	17	1,65	0,26	0,36	Suave	Baja	Fina
741148,1076	9687931,8117	2869,0930	PC61	1	22,57	0,41	0,18	Suave	Baja	Gruesa
741125,4856	9687928,5044	2869,8000	PC62	65	50,22	0,43	0,04	Empinada	Baja	Gruesa
740630,2231	9687928,8807	2859,0318	PC63	81	66,71	0,46	0,38	Empinada	Baja	Fina



UNIVERSIDAD DE CUENCA

741180,7396	9687914,9467	2874,0190	PC64	1	14,24	0,45	0,23	Suave	Baja	Gruesa
741176,2946	9687905,8450	2872,9089	PC65	17	5,28	0,40	0,33	Suave	Baja	Fina
740998,9050	9687841,1550	2887,9980	PC66	81	52,37	0,50	0,38	Empinada	Baja	Fina
740996,2062	9687834,4874	2889,6741	PC67	17	1,21	0,42	0,37	Suave	Baja	Fina
740979,5374	9687831,8681	2894,7390	PC68	113	61,60	0,62	0,35	Empinada	Alta	Fina
740974,4574	9687827,4231	2896,9050	PC69	49	23,40	0,69	0,34	Suave	Alta	Fina
741000,3337	9687811,5480	2898,7251	PC70	65	28,94	0,49	0,21	Empinada	Baja	Gruesa
740993,6662	9687808,1349	2900,7700	PC71	97	50,39	0,53	0,21	Empinada	Alta	Gruesa
741015,5982	9687701,6445	2901,3779	PC72	49	2,58	0,77	0,34	Suave	Alta	Fina
741010,7563	9687694,6595	2901,2839	PC73	33	3,62	0,52	0,23	Suave	Alta	Gruesa
740752,9618	9687683,6567	2848,7333	PC74	113	62,76	0,56	0,37	Empinada	Alta	Fina
741568,5348	9687514,7980	2961,1311	PC75	65	56,29	0,36	0,14	Empinada	Baja	Gruesa
741585,2191	9687508,5152	2978,9975	PC76	97	69,51	0,66	0,15	Empinada	Alta	Gruesa
740339,9773	9687452,2209	2780,5581	PC77	49	4,43	0,53	0,39	Suave	Alta	Fina
740344,8986	9687405,2044	2775,8540	PC78	97	51,96	0,72	0,17	Empinada	Alta	Gruesa
741358,5269	9687370,7639	2947,1227	PC79	113	66,45	0,54	0,31	Empinada	Alta	Fina
740710,0235	9687295,8955	2816,0123	PC80	17	2,74	0,50	0,42	Suave	Baja	Fina
740720,9543	9687293,6367	2810,8201	PC81	81	37,15	0,43	0,41	Empinada	Baja	Fina
740331,8376	9687112,7748	2768,1815	PC82	81	54,00	0,45	0,29	Empinada	Baja	Fina
740309,0547	9687107,9007	2767,8647	PC83	113	57,64	0,55	0,30	Empinada	Alta	Fina
740146,5702	9687050,2278	2750,8648	PC84	1	17,47	0,49	0,17	Suave	Baja	Gruesa
740149,4394	9687045,1375	2748,6660	PC85	81	29,15	0,45	0,29	Empinada	Baja	Fina
740380,7197	9687043,9645	2780,8029	PC86	49	7,86	0,57	0,29	Suave	Alta	Fina



740141,8651	9687039,4252	2748,7326	PC87	81	37,09	0,41	0,27	Empinada	Baja	Fina
740392,8112	9687036,1365	2781,2690	PC88	81	47,54	0,50	0,30	Empinada	Baja	Fina
740239,6462	9686907,8560	2755,0593	PC89	33	16,65	0,64	0,23	Suave	Alta	Gruesa
740254,6641	9686905,3876	2749,2791	PC90	113	40,45	0,54	0,34	Empinada	Alta	Fina
740253,7645	9686899,0376	2747,8750	PC91	49	15,60	0,54	0,35	Suave	Alta	Fina

Anexo 10. Comparación de datos levantados en campo Vs. Datos extraídos de MDT derivados.

Punto	Control	referencia	Valores de campo			Valores MDT derivados			Valoración		
			Pendiente	Convexidad	Textura	Pendiente	Convexidad	textura	Pendiente	Convexidad	textura
PC01		5668	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC02		5668	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC03		5668	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC04		5752	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC05		5752	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC06		5750	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC07		5749	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC08		5749	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC09		5662	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC10		5662	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC11		5757	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC12		5757	empinada	alta	gruesa	Empinada	Alta	Gruesa	1	1	1
PC13		5758	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC14		5753	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Gruesa	1	1	1



UNIVERSIDAD DE CUENCA

PC15	5756	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC16	5667	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC17	5667	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC18	5664	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC19	5766	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Gruesa	1	1	1
PC20	5767	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC21	5768	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC22	5755	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC23	5760	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC24	5761	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Gruesa	1	1	1
PC25	5761	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC26	5746	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC27	5746	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC28	5746	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC29	5764	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC30	5764	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC31	5754	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC32	5765	empinada	alta	gruesa	Empinada	Alta	Gruesa	1	1	1
PC33	5763	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	0
PC34	5677	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC35	5659	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC36	5659	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC37	5739	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1



UNIVERSIDAD DE CUENCA

PC38	5745	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Gruesa	1	1	1
PC39	5769	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC40	5633	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC41	5633	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC42	5633	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC43	5654	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC44	5738	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC45	5681	empinada	alta	gruesa	Empinada	Alta	Gruesa	1	1	1
PC46	5733	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC47	5733	empinada	baja	fina	Suave	Baja	Fina	0	1	1
PC48	5680	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC49	5679	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC50	5732	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC51	5624	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC52	5624	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC53	5624	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC54	5640	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC55	5640	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC56	5725	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC57	5726	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC58	5726	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC59	5729	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC60	5728	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1



UNIVERSIDAD DE CUENCA

PC61	5631	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC62	5631	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC63	5728	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC64	5628	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC65	5628	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC66	5597	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC67	5601	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC68	5602	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC69	5603	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC70	5610	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC71	5610	empinada	alta	gruesa	Empinada	Alta	Gruesa	1	1	1
PC72	5611	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC73	5611	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Gruesa	1	1	1
PC74	5724	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC75	5730	empinada	baja	gruesa	Empinada	Baja	Gruesa	1	1	1
PC76	5730	empinada	alta	gruesa	Empinada	Alta	Gruesa	1	1	1
PC77	5586	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1
PC78	5592	empinada	alta	gruesa	Empinada	Alta	Gruesa	1	1	1
PC79	5731	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC80	5723	suave	baja	fina	Suave	Baja	Fina	1	1	1
PC81	5723	empinada	alta	gruesa	Empinada	Baja	Fina	1	0	0
PC82	5718	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC83	5717	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1



UNIVERSIDAD DE CUENCA

PC84	5719	suave	baja	gruesa	Suave	Baja	Gruesa	1	1	1
PC85	5720	suave	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	0	1	1
PC86	5595	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Fina	1	1	0
PC87	5720	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC88	5596	empinada	baja	fina	Empinada	Baja	Fina	1	1	1
PC89	5721	suave	alta	gruesa	Suave	Alta	Gruesa	1	1	1
PC90	5722	empinada	alta	fina	Empinada	Alta	Fina	1	1	1
PC91	5722	suave	alta	fina	Suave	Alta	Fina	1	1	1



Anexo 11. Estadísticos descriptivos

		Estadístico	Error estándar	
Pendiente Campo	Media	30,016	2,1307	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	25,783	
		Límite superior	34,250	
	Media recortada al 5%	28,833		
	Mediana	21,000		
	Varianza	413,136		
	Desviación estándar	20,3257		
	Mínimo	4,0		
	Máximo	90,0		
	Rango	86,0		
	Rango intercuartil	36,0		
	Asimetría	,681	,253	
	Curtosis	-,422	,500	
Pendiente Modelo	Media	30,013340	2,0448526	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	25,950883	
		Límite superior	34,075796	
	Media recortada al 5%	28,601977		
	Mediana	20,510000		
	Varianza	380,509		
	Desviación estándar	19,5066502		
	Mínimo	6,3900		
	Máximo	94,0600		
	Rango	87,6700		
	Rango intercuartil	30,9300		
	Asimetría	,887	,253	
	Curtosis	,270	,500	

Anexo 12. Cálculo del RMS de pendiente

Código	Pendiente Campo	pendiente Modelo	Diferencia	(Dif.) ²
PC01	35	35,30	0,30	0,09
PC02	10	10,50	0,50	0,25
PC03	8	10,80	2,80	7,84
PC04	70	75,18	5,18	26,83
PC05	19	17,42	-1,58	2,50



PC06	50	46,48	-3,52	12,39
PC07	52	54,68	2,68	7,18
PC08	13	15,15	2,15	4,62
PC09	11,5	15,40	3,90	15,21
PC10	10	13,03	3,03	9,18
PC11	55	52,76	-2,24	5,02
PC12	60	61,20	1,20	1,44
PC13	11	14,66	3,66	13,40
PC14	23	18,60	-4,40	19,36
PC15	50	45,62	-4,38	19,18
PC16	7	11,52	4,52	20,43
PC17	8	10,40	2,40	5,76
PC18	8	9,12	1,12	1,25
PC19	12	14,50	2,50	6,25
PC20	20	17,83	-2,17	4,71
PC21	20	11,69	-8,31	69,06
PC22	50	49,39	-0,61	0,37
PC23	11	16,27	5,27	27,77
PC24	14	19,66	5,66	32,04
PC25	18	17,06	-0,94	0,88
PC26	40	38,60	-1,40	1,96
PC27	14	10,41	-3,59	12,89
PC28	50	44,98	-5,02	25,20
PC29	40	38,97	-1,03	1,06
PC30	17	18,06	1,06	1,12
PC31	80	94,06	14,06	197,68
PC32	50	48,55	-1,45	2,10
PC33	36	38,19	2,19	4,80
PC34	45	47,85	2,85	8,12
PC35	32	34,03	2,03	4,12
PC36	17	17,21	0,21	0,04
PC37	41	40,75	-0,25	0,06
PC38	16	18,68	2,68	7,18
PC39	8	7,90	-0,10	0,01
PC40	36	37,76	1,76	3,10
PC41	48	45,55	-2,45	6,00
PC42	8	12,93	4,93	24,30
PC43	10	11,49	1,49	2,22
PC44	9	11,82	2,82	7,95
PC45	50	48,30	-1,70	2,89



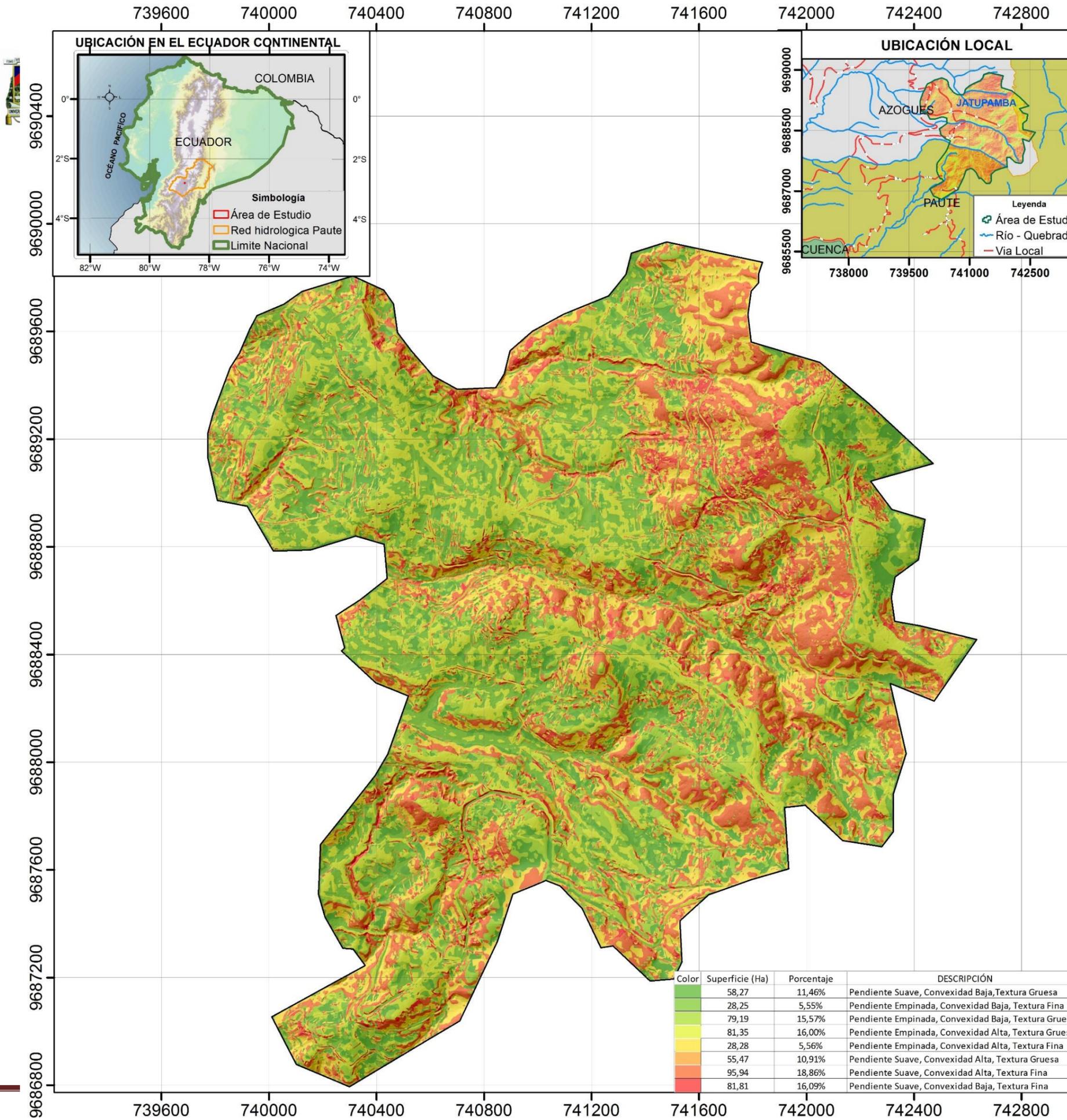
PC46	12	10,05	-1,95	3,80
PC47	42	40,10	-1,90	3,61
PC48	15	12,35	-2,65	7,02
PC49	22	15,34	-6,66	44,36
PC50	15	12,66	-2,34	5,48
PC51	53	55,58	2,58	6,66
PC52	18	17,56	-0,44	0,19
PC53	14	13,88	-0,12	0,01
PC54	18	16,95	-1,05	1,10
PC55	39	38,75	-0,25	0,06
PC56	70	64,12	-5,88	34,57
PC57	40	38,85	-1,15	1,32
PC58	11	13,50	2,50	6,25
PC59	7	10,98	3,98	15,84
PC60	10	11,23	1,23	1,51
PC61	18	17,06	-0,94	0,88
PC62	36	39,15	3,15	9,92
PC63	57	51,64	-5,36	28,73
PC64	16	18,33	2,33	5,43
PC65	14	16,80	2,80	7,84
PC66	63	67,40	4,40	19,36
PC67	5	8,48	3,48	12,11
PC68	90	82,25	-7,75	60,06
PC69	25	23,16	-1,84	3,39
PC70	39	43,93	4,93	24,30
PC71	45	42,16	-2,84	8,07
PC72	4	6,39	2,39	5,71
PC73	15	13,14	-1,86	3,46
PC74	40	39,46	-0,54	0,29
PC75	36	44,07	8,07	65,12
PC76	60	60,57	0,57	0,32
PC77	7	9,90	2,90	8,41
PC78	50	40,39	-9,61	92,35
PC79	60	54,16	-5,84	34,11
PC80	5	6,77	1,77	3,13
PC81	55	32,84	-22,16	491,07
PC82	52	49,07	-2,93	8,58
PC83	64	59,35	-4,65	21,62
PC84	16	21,35	5,35	28,62
PC85	20	19,19	-0,81	0,66



PC86	11	12,42	1,42	2,02
PC87	34	31,61	-2,39	5,71
PC88	40	39,93	-0,07	0,00
PC89	17	20,51	3,51	12,32
PC90	38	35,12	-2,88	8,29
PC91	21	22,40	1,40	1,96
			Σ	1731,51
			n	91
			EMC	0,22924951



Mapa de Trazado de geoformas




Universidad de Cuenca Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo

Título: Automatización del trazado de geoformas del relieve mediante sistemas de información geográfica a partir de un modelo digital de terreno

Ejecuta: Luis Ivan Medina Cajamarca **Dirección:** Ing. Eduardo Tacuri Espinoza Director de Tesis

Contiene: Mapa de 8 clases de Geoformas del relieve a partir de un MDT de 1m pixel **Archivo:** C:\tesis\Tesis_SIGMAPAS\01_PSI_Mapa_de_geoformas_8_1m

Fuente: Información LIDAR proyecto PUMA **Mapa N°:** 001 **Fecha:** Octubre de 2014

Luis Ivan Medina Cajamarca Eduardo Tacuri Espinoza DIRECTOR DE TESIS

LEYENDA TEMÁTICA

- Pendiente Suave, Convexidad Baja, Textura Gruesa
- Pendiente Suave, Convexidad Baja, Textura Fina
- Pendiente Suave, Convexidad Alta, Textura Gruesa
- Pendiente Suave, Convexidad Alta, Textura Fina
- Pendiente Empinada, Convexidad Baja, Textura Gruesa
- Pendiente Empinada, Convexidad Baja, Textura Fina
- Pendiente Empinada, Convexidad Alta, Textura Gruesa
- Pendiente Empinada, Convexidad Alta, Textura Fina

SÍMBOLOS CONVENCIONALES

 Área de Estudio

ESCALAS Y PROYECCIÓN

Escala de impresión: 1:15.000

Escala Gráfica:



0 125 250 500 750 1.000 M

Elipsoide.....Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)
 Cuadrícula.....300 metros, UTM, Zona 17 Sur.
 Proyección.....Universal Transversa de Mercator.
 Datum Vertical.....Nivel Medio del Mar.
 Datum Horizontal.....Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)