

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RECURSOS  
DIGITALES PARA PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES DE  
LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO.

**PROYECTO DE GRADO**

Previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN GEOLOGÍA**

Presentado por:

Michelle del Pilar Villalta Echeverría  
Ana Gabriela Viña Ortega

GUAYAQUIL – ECUADOR

2020

## DEDICATORIA

A Dios, a mi madre Carmen y a la memoria de padre Luis, por el amor, el apoyo incondicional, y sacrificio que han hecho para que yo pueda ser quien soy, por ser ejemplo de perseverancia y luz a lo largo de mi vida, esto logro es suyo, mío, nuestro.

A mi abuelita Laura por su amor, cariño y apoyo. A mis hermanos Madelaine y Luis, a mi querida prima Nadia y demás familiares por su amor y siempre estar presentes a lo largo de todas mis etapas.

*“Todos nuestros sueños pueden convertirse en realidad si tenemos el coraje de perseguirlos”*

- Walt Disney.

Michelle del Pilar Villalta Echeverría

## DEDICATORIA

A mis padres Carlos y Bertha, por el inmenso sacrificio que han hecho para que yo pueda prepararme y llegar hasta donde he llegado; soy quien soy gracias a ustedes y nunca encontraré palabras suficientes para agradecerles. A mi abuelita Bertha por su amor, por estar siempre pendiente de mí y de mi bienestar. A todas mis tías: Mercy, Zulema, Mery, Jeannethe, Ivonne, Linda, Yalila, Vilma y Gardenia, por estar presentes siempre a pesar de la distancia. Y de manera especial, a la memoria de mi tío Williams, por su apoyo incondicional a lo largo de todas mis etapas, por su gran corazón. Los amo a todos, este logro es nuestro.

Ana Gabriela Viña Ortega

## AGRADECIMIENTO

A nuestros padres, tías, hermanos(as) y familiares por el apoyo incondicional en esta etapa de nuestras vidas.

Al Ing. Erwin Larreta, por su paciencia, por su entrega y amor por la docencia, por su ayuda y guía incondicional durante este proceso y todo nuestro camino universitario, por creer en nuestras capacidades e incentivarnos a seguir creciendo, sin condiciones y a pesar de situaciones adversas. Porque gracias a él aprendimos que el mapa realmente Sí se hace solo.

Al PhD. Maurizio Mulas, por su apoyo durante todo este proceso, por sus palabras de aliento y su guía en el desarrollo y avance de este proyecto. De forma especial, gracias por ser un gran apoyo y guía no solo en lo académico y profesional.

A nuestros amigos, que hicieron más ameno y cálido nuestro tiempo en ESPOL.

Michelle del Pilar Villalta Echeverría  
Ana Gabriela Viña Ortega

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Michelle del Pilar Villalta Echeverría* y *Ana Gabriela Viña Ortega* damos nuestro consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Michelle del Pilar Villalta Echeverría

Ana Gabriela Viña Ortega

# EVALUADORES

**Maurizio Mulas, PhD.**  
PROFESOR TUTOR

**Erwin Larreta, Ing.**  
PROFESOR CO – TUTOR

---

**David Altamirano, Msc.**  
PROFESOR DE LA MATERIA  
INTEGRADORA

## RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla una metodología que, por medio del análisis de recursos digitales, permite la elaboración de un mapa geológico preliminar previo al trabajo de campo con la finalidad de optimizar tiempo y recursos. Dada las restricciones de movilidad, debido a la pandemia del Covid – 19, se concibe esta metodología ante la necesidad de no detener las actividades y poder continuar con el análisis de zonas de interés de forma remota.

La metodología consta de un primer análisis geomorfológico para entender el comportamiento de la zona, seguido del análisis de lineamientos para determinar estructuras como lineamientos y fallas geológicas. Estos procesos se realizan a partir de modelos de pendiente y rugosidad generados de un DEM. Luego se lleva a cabo el análisis geológico, en lo cual se realizan tres procesos. El primero es el tratamiento de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS, para obtener una zonificación mineral en base los índices de reflectividad, el segundo la obtención y análisis de un modelo  $Log_{10}$  del DEM para homogenizar la topografía de la zona y finalmente el análisis de patrones de rugosidad en un modelo TPI, realizando una discretización de los cambios topográficos del área para la delimitación de las unidades geológicas.

Por último, se procedió a asignar el nombre de formaciones a las unidades, generando así un mapa geológico preliminar a escala 1:100000. El proceso final de comparación de las unidades con el mapa geológico de la zona determinó una correspondencia del 78% entre ambos.

**Palabras Clave:** Metodología, geología, teledetección, recursos digitales, resolución espacial, cartografía, mapa geológico.

## **ABSTRACT**

*In this project, a methodology is developed that, through the analysis of digital resources, allows the preparation of a preliminary geological map prior to field work in order to optimize time and resources. Given the mobility restrictions, due to the Covid-19 pandemic, this methodology is conceived before the need to stop activities and to be able to continue with the analysis of areas of interest remotely.*

*The methodology consists of a first geomorphological analysis to understand the behavior of the area, followed by the analysis of lineaments to determine structures such as lineaments and geological faults. These processes are carried out from slope and roughness models generated from a DEM. Then the geological analysis is developed, in which three processes are broken down. The first is the treatment of Landsat 8 OLI / TIRS satellite images, to obtain a mineral zoning based on reflectivity indices, the second part is the obtaining and analysis of a  $Log_{10}$  DEM model to homogenize the topography of the area and finally the analysis of roughness patterns in a TPI model, performing a discretization of the topographic changes of the area for the delimitation of the geological units.*

*Finally, the units were named after formations, thus generating a preliminary geological map at a scale of 1: 100000. The final process of comparing the units with the geological map of the area determined a 78% correspondence between the two.*

**Keywords:** *Methodology, remote sensing, geology, digital resources, spatial resolution, cartography, geological map*



# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	VI
RESUMEN.....	VII
<i>ABSTRACT</i> .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ABREVIATURAS.....	XII
SIMBOLOGÍA.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos.....	3
1.5. Ubicación del área de estudio .....	3
CAPÍTULO 2.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Análisis Geomorfológico .....	5
2.2. Geomática .....	11
2.3. Fundamentos de Teledetección.....	13
2.4. Rugosidad y mapa de rugosidad .....	16
CAPÍTULO 3.....	18

3. MARCO GEOLÓGICO .....	18
3.1. Geología Regional.....	18
3.1.1. Rocas Metamórficas .....	18
3.1.2. Unidad Pallatanga.....	18
3.1.3. Unidad Yunguilla.....	18
3.1.4. Grupo Saraguro .....	18
3.1.5. Formación Chanlud.....	19
3.1.6. Formación Río Blanco .....	19
3.1.7. Formación Jubones .....	19
3.1.8. Grupo Ayancay .....	19
3.1.9. Formación Turi.....	20
3.1.10. Formación Turupamba .....	20
3.1.11. Formación Quimsacocha.....	20
3.1.12. Formación Tarqui .....	20
3.2. Geología Estructural.....	20
3.2.1. Sistema de Fallas: Bulubulú .....	21
3.2.2. Sistema de Fallas: Jubones.....	22
CAPÍTULO 4.....	23
4. DATOS Y METODOLOGÍA .....	23
Recursos digitales.....	23
Metodología .....	25
4.1.1. Análisis geomorfológico .....	26
4.1.1.1. Elaboración del DEM y el SLOPE .....	26
4.1.2. Análisis estructural.....	31
4.1.3. Análisis geológico .....	36
CAPÍTULO 5.....	47
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	47

5.1. Mapa geomorfológico .....	47
5.2. Lineamientos estructurales.....	49
5.3. Análisis de la geología.....	50
5.3.1. Alteraciones minerales .....	50
5.3.2. Unidades y mapa geológicos preliminar.....	52
5.4. Validación de los datos .....	53
CAPÍTULO 6.....	58
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
6.1. Conclusiones.....	58
6.2. Recomendaciones.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	60
APÉNDICES.....	65

## ABREVIATURAS

<b>AOI</b>	Area of Interest
<b>ASF</b>	Alaska Satellite Facilities
<b>DEM</b>	Modelo de Elevación Digital
<b>ERTS</b>	Earth Resources Technology Satellite
<b>ESRI</b>	Environmental System Research Institute
<b>ETM +</b>	Enhanced Thematic Mapper Plus
<b>FBD</b>	Fine Beam Dual
<b>Fm</b>	Formación
<b>HH</b>	Horizontal transmit and Horizontal receive
<b>HV</b>	Horizontal transmit and Vertical receive
<b>IGM</b>	Instituto Geográfico Militar
<b>MORB</b>	Mid Ocean Ridge Basalts
<b>OLI</b>	Operational Land Imager
<b>PALSAR</b>	Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar
<b>RGB</b>	Composición de bandas Rojo – Verde – Azul
<b>Shp</b>	Shapefile
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>SIN</b>	Sistema Nacional de Información
<b>TIRS</b>	Thermal Infrared Sensor
<b>TPI</b>	Topographic Position Index
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984

## SIMBOLOGÍA

°	Grados
'	Minutos
”	Segundos
%	Porcentaje
<i>μm</i>	Micrómetro
<b>am</b>	Ante Meridiem o antes del mediodía
<b>cm</b>	Centímetros
<b>E</b>	Este
<b>Ha</b>	Hectárea
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetros cuadrados
<b>m</b>	Metros
<b>m.s.n.m</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>Ma</b>	Millones de años
<b>N</b>	Norte
<b>NE</b>	Noreste
<b>NO</b>	Noroeste
<b>O</b>	Oeste
<b>S</b>	Sur
<b>SE</b>	Sureste
<b>SO</b>	Suroeste

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Ubicación de la zona de estudio.....	4
<b>Figura 1.2</b> Vista aérea de la zona de estudio.....	4
<b>Figura 2.1</b> Métodos de clasificación del relieve .....	9
<b>Figura 2.2</b> A) Características espectrales del óxido de hierro; y B) Características espectrales de los minerales de arcilla.....	16
<b>Figura 3.1</b> Tectonismo actual del NO Sudamericano .....	21
<b>Figura 4.1</b> Guía metodológica genera .....	25
<b>Figura 4.2</b> Flujo metodológico del análisis geomorfológico.....	26
<b>Figura 4.3</b> Modelo de pendiente del AOI .....	27
<b>Figura 4.4</b> Flujo metodológico del análisis estructural .....	31
<b>Figura 4.5</b> Representación del Modelo Digital de Elevación.....	32
<b>Figura 4.6</b> Índice de Posición Topográfico (TPI) tamaño de celda 7x7.....	33
<b>Figura 4.7</b> a) Lineamientos obtenidos mediante la extracción automatizada. b) Lineamientos despues de la depuración .....	35
<b>Figura 4.8</b> Flujo metodológico para el análisis geológico .....	36
<b>Figura 4.9</b> Flujo de la metodología de análisis de la imagen Landsat 8 OLI/TIRS.....	37
<b>Figura 4.10</b> Log 10 del DEM reclasificado a 12 clases .....	39
<b>Figura 4.11</b> Log 10 del DEM reclasificado en 12 clases en formato shapefile.....	39
<b>Figura 4.12</b> División a macroescala de acuerdo con los patrones de rugosidad .....	41
<b>Figura 4.13</b> Identificación de patrones a partir de la rugosidad del TPI .....	41
<b>Figura 4.14</b> Identificación de patrones de rugosidad zona SE.....	42
<b>Figura 4.15</b> Identificación de patrones de rugosidad zona centro Oeste .....	42
<b>Figura 4.16</b> Identificación de patrones de rugosidad zona NE.....	43
<b>Figura 4.17</b> Identificación de patrones de rugosidad centro sur .....	43

<b>Figura 4.18</b> Identificación de patrones de rugosidad en el centro del AOI.....	44
<b>Figura 5.1</b> Representación de las unidades geomorfológicas identificadas (resultado parcial).....	48
<b>Figura 5.2</b> Esquema de estructuras de la zona de estudio .....	49
<b>Figura 5.3</b> Imagen Satelital Landsat 8 OLI/TIRS; b) Bands ratios 6/7 (arcillas); c) Bands ratios 6/5 (ferrominerales) y d) Bands ratios 4/2 (Óxidos de hierro). .....	50
<b>Figura 5.4</b> Imagen Landsat 8, combinación RGB 6/7, 6/5, 4/2 .....	51
<b>Figura 5.5</b> Diferenciación a semi-detalle de los patrones y texturas de rugosidad .....	52
<b>Figura 5.6</b> Representación de las 33 unidades geológicas identificadas.....	53
<b>Figura 5.7</b> Sección obtenida del mapa geológico general de Ecuador. Geoportal IGM y b) Esquema de unidades geológicas.....	54
<b>Figura 5.8</b> Comparación entre el mapa de referencia y las unidades obtenidas .....	55
<b>Figura 5.9</b> Representación parcial de los resultados. ....	57
<b>Figura 6.1</b> Mapa geológico de Cuenca escala 1:100.000 (versión actual) .....	66
<b>Figura 6.2</b> Mapa geomorfológico de la zona de Cuenca .....	67
<b>Figura 6.3</b> Mapa geológico de la zona de Cuenca.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Coordenadas del AOI UTM WGS84.....	<b>3</b>
<b>Tabla 2.1</b> Clasificación de pendiente .....	<b>7</b>
<b>Tabla 2.2</b> Clasificación fisiográfica. ....	<b>7</b>
<b>Tabla 2.3</b> Clasificación de pendientes según Demek.....	<b>8</b>
<b>Tabla 2.4</b> Unidades Fisiográficas de la microcuenca Picuroyacu. ....	<b>9</b>
<b>Tabla 2.5</b> Clasificación del relieve siguiendo criterios geográfico-regionales.....	<b>10</b>
<b>Tabla 2.6</b> Distribución de las bandas en OLI y TIRS.....	<b>15</b>
<b>Tabla 4.1</b> Información de las imágenes DEM ALOS PALSAR. ....	<b>24</b>
<b>Tabla 4.2</b> Información de la imagen Landsat adquirida.....	<b>24</b>
<b>Tabla 4.3</b> Clasificación Fisiográfica que relaciona pendiente y desniveles .....	<b>28</b>
<b>Tabla 4.4</b> Clasificación fisiográfica de la zona de estudio. ....	<b>28</b>
<b>Tabla 4.5</b> Parámetros de ajuste del módulo LINE, PCI Geomatic.....	<b>34</b>
<b>Tabla 4.6</b> Parámetros válidos para generación de dato en la zona de estudio .....	<b>34</b>
<b>Tabla 4.7</b> Algoritmos de índices empleados.....	<b>38</b>
<b>Tabla 4.8</b> Comparación entre áreas.....	<b>46</b>
<b>Tabla 5.1</b> Estadísticas del análisis de longitud de los lineamientos .....	<b>49</b>
<b>Tabla 5.2</b> Porcentajes de similitud entre áreas .....	<b>56</b>
<b>Tabla 5.3</b> Equivalencias entre unidades del esquema y las formaciones geológicas ...	<b>56</b>



## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>(4.1)</b> Ecuación Terraza Baja Inundable (TBI) .....	29
<b>(4.2)</b> Ecuación Terraza Baja no Inundable (TBNI) .....	29
<b>(4.3)</b> Ecuación Terraza Media (TM) .....	29
<b>(4.4)</b> Ecuación Terraza Alta (TA) .....	29
<b>(4.5)</b> Ecuación Lomada (L) .....	29
<b>(4.6)</b> Ecuación Colina Disectada (CD) .....	29
<b>(4.7)</b> Ecuación Colina Fuertemente Disectada (CFD) .....	29
<b>(4.8)</b> Ecuación Montaña baja (MB) .....	29
<b>(4.9)</b> Ecuación Montaña alta (MA) .....	29
<b>(4.10)</b> Ecuación Llanura de Ablación (Lla) .....	29
<b>(4.11)</b> Ecuación para el calculo del porcentaje de coincidencia por unidad .....	45
<b>(4.12)</b> Ecuación para el calculo porcentaje de coincidencia general .....	45

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Para desarrollar esta metodología, se analizan métodos de análisis de datos e imágenes de manera remota a través de sistemas de información geográfica. La base bibliográfica parte del año 1859, en donde se registran las primeras fotografías aéreas, no es hasta la Segunda Guerra Mundial que se produce un desarrollo notable de las técnicas de teledetección. En 1972 se lanzan los primeros satélites de la serie ERTS y la teledetección empieza a tomar fuerza hasta llegar a la actualidad, en donde esta rama resulta una técnica de notable implantación en diferentes países en desarrollo, Europa, Estados Unidos, Canadá, Japón, Brasil y la India. (Chuvieco, 1995)

En 1987 Sabins en su libro "Sensores Remotos: Principios e Interpretación", explica las características de los sistemas, procesamiento de imágenes, exploración de recursos, aplicaciones ambientales, análisis de uso de suelo, cobertura vegetal y desastres naturales; además de procesos de rectificación y extracción de información de acuerdo con los principales objetivos de análisis.

El Centro Canadiense de Sensores Remotos, en 2004, define al análisis remoto como la ciencia de adquirir información acerca de la superficie de la Tierra sin estar directamente en contacto con ella. Esto es hecho a través del procesamiento, análisis y aplicación de la energía reflejada o emitida que es grabada por los sensores.

Por su parte, el origen de los sistemas de información geográfica se da en Canadá, cuando el senado creó un comité específico para examinar el uso de suelo en el país por motivo de la despoblación de las zonas rurales y la presión que ejercía el sector privado sobre el territorio. Es, entonces Roger Tomlinson quien idea y dirige el "Canada Geographic Information System", fundado en el año 1963. Un año más tarde se funda el "Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis", convirtiéndose en uno de los organismos más importantes en el desarrollo de la tecnología SIG. En 1980 se produce la expansión de la tecnología SIG por el aumento y la capacidad de proceso e los ordenadores y de la gestión de datos espaciales (Pérez, 2010).

En 1966, Bonham-Carter, en el capítulo 8 de su libro “Sistemas de Información Geográfica para Geocientíficos” analiza las operaciones de superposición en sus diferentes variantes, específicamente para casos de estudio geológico. Así, también estudia los mapas binarios o métodos de reclasificación de mapas con múltiples clases para generar mapas con dos clases; se describen métodos de análisis de correlación binaria con conceptos de probabilidad bayesiana y pesos de evidencia. (Bonham-Carter, 1996).

Rigol, por su parte, en 2011 presenta la aplicación de dos métodos de integración de datos espaciales, el método de suma ponderada multiclase y el de regresión logística múltiple, orientados a la investigación de depósitos metálicos en el sur de España. Se generaron mapas predictivos indicando las zonas con mayor potencial para contener depósitos minerales (Rigol et al., 2011).

## **1.2. Planteamiento del problema**

La situación socioeconómica por la que el mundo atraviesa en este 2020 ha sido, sin duda, uno de los retos más fuertes que nuestra generación tendrá que enfrentar. Diferentes naciones, entre ellas Ecuador, se han visto fuertemente perjudicadas. Según el proyecto de Ley Orgánica para el apoyo humanitario para combatir la crisis sanitaria derivada del Covid-19, Ecuador atraviesa su tercera crisis económica en 2 décadas. Esta situación obliga a las autoridades a realizar recortes presupuestarios y salariales en sectores fundamentales para nuestro desarrollo, como lo es la educación. Esto, sumado a las restricciones de movilidad, evidentemente afecta el desarrollo normal de actividades dentro de las instituciones de educación superior sin distinción de carreras.

Una de las ramas de estudio que se ha visto más afectada por toda esta situación es la Geología. Las dificultades para movilizarse e ir a campo no solo afecta a estudiantes sino también a investigadores, cartógrafos, geólogos de riesgo, mineros y todo profesional que necesite acceder a una zona para tomar datos y obtener información. Debido a esto, es importante desarrollar una metodología que le permita al geólogo (y todo profesional afín), optimizar tiempo, recursos y poder tener un panorama más claro de la zona previo a la visita de campo. El objetivo es que la metodología también pueda ser utilizada en investigación, desarrollo de mapas de peligros o estudio de zonas remotas o de difícil acceso, siendo también aplicable para localizar nuevas fuentes de interés geológico-minero, optimizando así, el tiempo de levantamiento geológico en campo.

### 1.3. Justificación

Con el desarrollo de esta metodología se busca implementar un método que permita realizar estudios de carácter geomorfológico, estructural y geológico de la zona NW de la provincia del Azuay.

Crear un mapa geológico a detalle a partir del análisis de shapefile de la zona de estudio, imágenes satelitales, softwares geológicos, información obtenida de estudios previos y literatura que permita estructurar una metodología adecuada.

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología mediante el análisis de recursos digitales de manera sistemática para la planificación y desarrollo de procesos remotos de levantamiento geológico.

#### 1.4.2. Objetivos Específicos

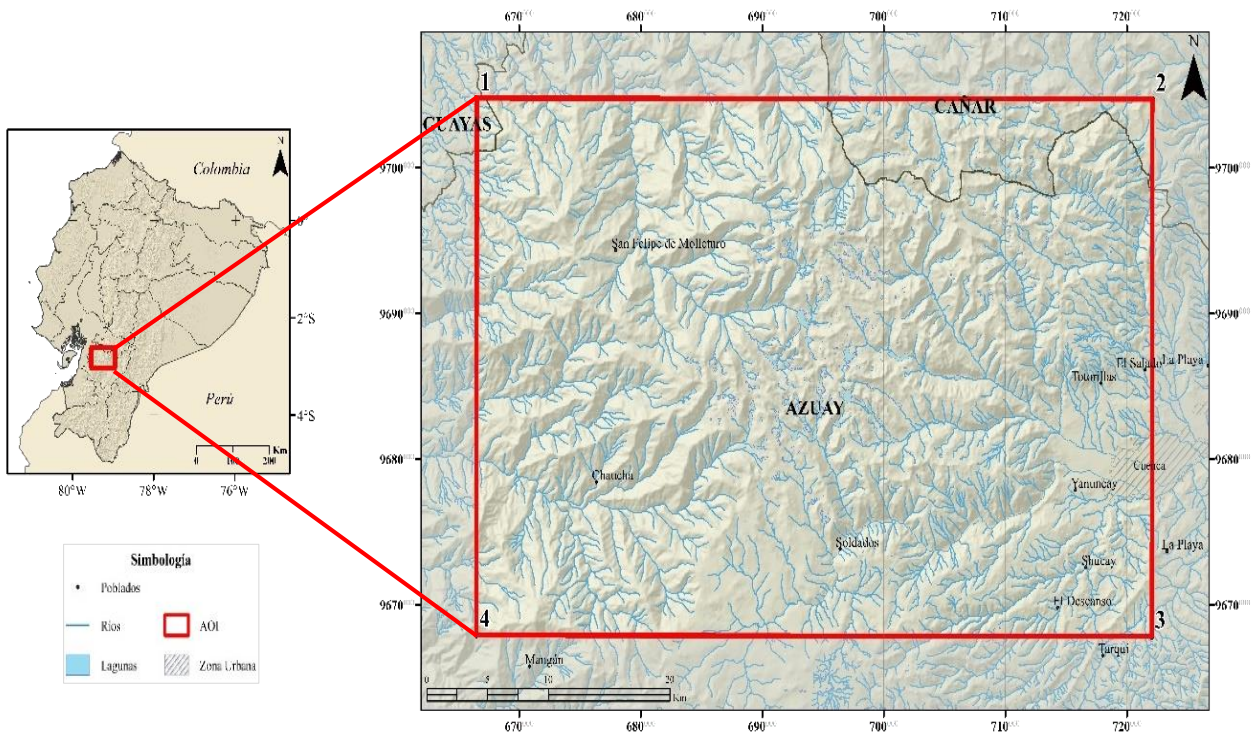
- Identificar nuevas fuentes de interés geológico-minero mediante el análisis de recursos digitales utilizando las propiedades de los depósitos.
- Seleccionar información disponible de la zona de estudio, para determinar las diferentes unidades geológicas.

### 1.5. Ubicación del área de estudio

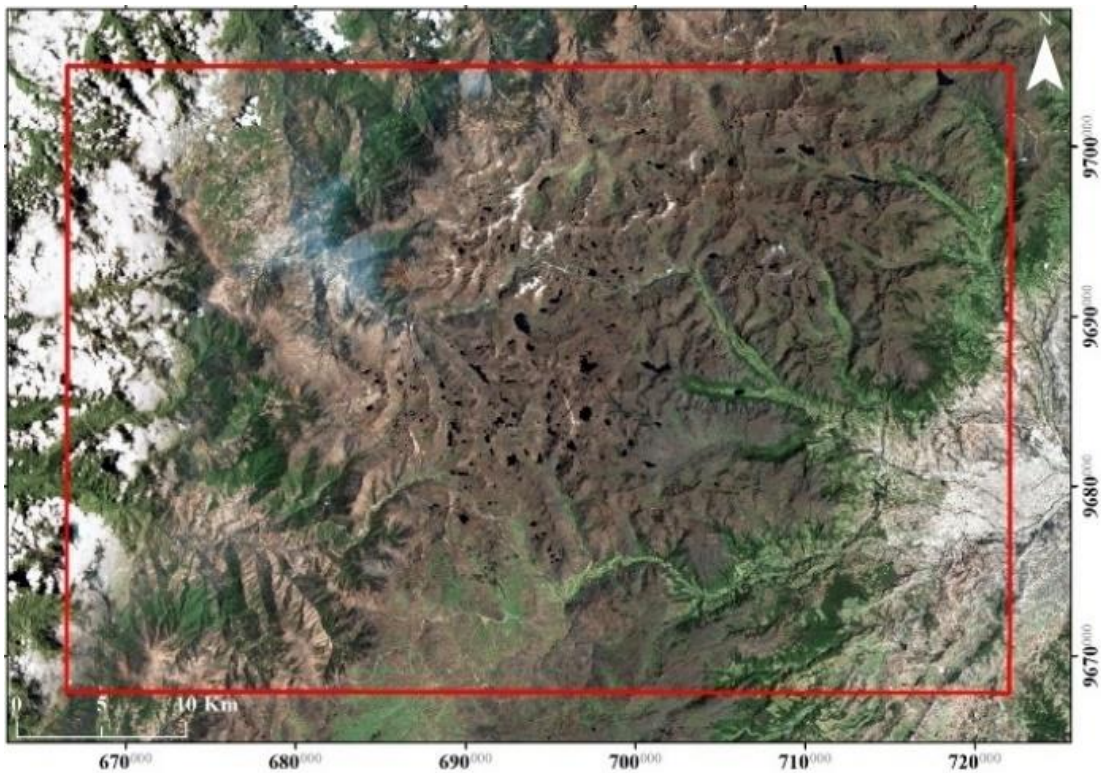
El área de estudio está ubicada en el centro sur ecuatoriano. Está localizada entre las latitudes 2°40'0" y 3°0'0" Sur y las longitudes 79°0'0" y 79°30'0" Oeste, cubriendo un área de 2049 km<sup>2</sup> de gran parte del N - O de la provincia del Azuay (Figura 1.1.), limitando con Cañar y Guayas. Las coordenadas que delimitan el área de estudio se presentan en la Tabla 1.1, estas se presentan en el sistema de coordenadas UTM WGS 1984 Zona 17S.

**Tabla 1.1** Coordenadas del AOI UTM WGS84

Punto	X [m]	Y [m]
1	666456	9704781
2	722103	9704781
3	722103	9662835
4	666456	9662835



**Figura 1.1** Ubicación de la zona de estudio.  
**Fuente:** Villalta, M., Viña, A., 2020.



**Figura 1.2** Vista aérea de la zona de estudio  
**Fuente:** Imagen Satelital Bing

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

Se explicarán conceptos básicos, así como técnicas y recursos necesarios que permiten un mejor entendimiento del desarrollo de este proyecto. En la primera parte se realiza una descripción de conceptos y procesos necesarios en la identificación y clasificación de geoformas. Además, se incluyen conceptos de geomática, explicando el funcionamiento del software y su algoritmo de reconocimiento de lineamientos. Por último, se explican los recursos digitales utilizados, sus principales características y usos para conocimiento del lector.

### 2.1. Análisis Geomorfológico

La geomorfología se define como la ciencia que estudia la configuración de la superficie terrestre analizando las formas del terreno, su geometría, los procesos que las originan y los elementos que estimulan su desarrollo (Aguiló et al., 2014). Según De Pedraza (1996), el objetivo principal de la geomorfología es deducir los antecedentes de la superficie terrestre y predecir posibles configuraciones futuras.

A partir de la ecuación planteada por Derbyshire (1979), se deben considerar: morfografía, morfogénesis y morfoevolución, para realizar un correcto análisis y clasificación del relieve. La **morfografía** implica aspectos geométricos, fisiográficos y topográficos del relieve. La **morfogénesis**, analiza aspectos genéticos del relieve según procesos exógenos como meteorización, glaciares, eólicos, fluviales. La **morfoevolución**, se basa en el análisis de secuencias morfológicas con el pasar del tiempo (De Pedraza, 1996).

El análisis de la morfografía del terreno es una parte importante de nuestro análisis geomorfológico dada las condiciones y parámetros geométricos de relieve, cuantificación y cualificación de las formas inmersas en ella. En base a esto se desarrollan clasificaciones en diferentes escalas, que tienen por objetivo configurar el terreno a través de la articulación de sus geometrías básicas y complejas. Las clasificaciones seleccionadas para un estudio geomorfológico dependerán de los objetivos de este y no existe una sola metodología o técnica estándar de aplicación. (Aguiló et al., 2014)

### **2.1.1. Morfografía**

La morfografía se encarga de los procedimientos utilizados para identificar el sistema de relaciones espaciales que caracterizan a las formas del terreno a través de la determinación de los atributos que dan lugar a la forma del relieve (De Pedraza, 1996). Es importante recalcar que para este objetivo de estudio se enmarca en la morfografía dentro de un análisis sectorial, es decir, aplicada a cada proceso. Por esto, se divide en: morfometría y fisiografía.

### **2.1.2. Morfometría o geometría del relieve**

Según De Pedraza (1996), la morfometría se encarga de catalogar los parámetros espaciales de categoría geométrica a través de procedimientos matemáticos. Algunos de estos son las dimensiones de las geoformas o su tipología. Es importante recalcar que todo análisis morfométrico debe estar basado en una unidad de referencia que es la pendiente del terreno.

### **2.1.3. Pendiente**

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno: mientras mayor sea su inclinación, mayor será el valor de la pendiente (Castro et al., 2013). Según Aguiló et al. (2014), la pendiente en sentido estricto se define como la inclinación de un terreno respecto a un plano horizontal. Esta se usa para diversas áreas de estudio y está basada en el cálculo del gradiente de pendiente, que las agrupa por clases, de manera que toda porción de terreno de igual pendiente tendrá un comportamiento similar ante la actividad propuesta. La pendiente puede establecerse en de forma cuantitativas, ya sea en grados o porcentaje; o de forma cualitativas, tratándose de una expresión textual. (De Pedraza, 1996) La forma más usual de representar un valor de pendiente es cuantitativa, relacionando grados y porcentajes, de tal manera que el 100% de inclinación representa un ángulo de 45°.

### **2.1.4. Clasificación morfométrica o basada en el valor cuantitativo de la Pendiente.**

La clasificación morfométrica, tiene como unidad de referencia el valor de la pendiente. Una de las clasificaciones de pendientes más utilizadas para usos agrarios es la propuesta por el Ministerio de Agricultura de España (Tabla 2.1.), que se basa en

cantidad de escorrentía, susceptibilidad a la erosión del suelo y aptitud para el uso de maquinaria agrícola, según Aguiló et al. (2014).

**Tabla 2.1** Clasificación de pendiente

Morfología	Pendiente (%)
1. Zonas llanas	< 3
2. Zonas con pendiente suave	3 – 10
3. Zonas con pendiente moderada	10 – 20
4. Zonas con pendiente fuerte	20 – 30
5. Zonas con pendiente muy fuerte	40 – 50
6. Zonas escarpadas	> 50

Clasificación propuesta por el Ministerio de Agricultura de España para la caracterización de la capacidad agrológica de los suelos de España. (Aguiló et al., 2014)

Otra de las clasificaciones más importantes es la utilizada en fisiografía (Tabla 2.2), que describe las diferentes formas de terreno, su magnitud y constitución superficial y utilizando como primer criterio la configuración topográfica o pendiente (Walsh, 2015).

**Tabla 2.2** Clasificación fisiográfica.

	Formas de relieve	Pendiente (%)	Símbolo
<b>PLANICIES DE VALLE</b>	Fondos de valle planos	0 - 4	Fvp
	Fondos de valle inclinados	4 - 8	Fvi
	Fondo de valle glaciales planos	0 - 4	Fgp
	Fondo de valle glaciales planos inclinados	4 - 8	Fgi
<b>LADERAS POCO ACCIDENTADAS</b>	Altiplanicies onduladas	8 - 15	Ao
	Laderas montañosas ligeramente empinadas	15 - 25	LI
<b>LADERAS ACCIDENTADAS</b>	Laderas montañosas moderadamente empinadas	25 - 45	Lm
	Laderas montañosas empinadas a escarpadas	>45	Le

Fuente Walsh, 2015

Esta clasificación presenta 3 conjuntos topográficos principales: planicies de valle, laderas poco accidentadas y laderas accidentadas. Las planicies de valle se refieren a las zonas suaves que se encuentran rodeadas por laderas de pendientes pronunciadas. Las laderas poco accidentadas se refieren también a zonas suaves, pero en superficies abiertas a media ladera o en su parte superior. Las laderas accidentadas son relieves montañosos con pendientes pronunciadas, presentes en la mayor parte de la región andina (Walsh, 2015). Otra clasificación importante es la propuesta por Demek (1972),



que presenta las pendientes y su relación con las formas (Tabla 2.3), procesos y actividades más comunes en Europa central.

**Tabla 2.3** Clasificación de pendientes según Demek.

Pendiente	Morfología más común	Procesos básicos
0° – 30°	Llanura aluvial, llanura proglaciaria, superficie de erosión y terrazas.	Ausencia de deslizamientos.
0°30' – 2°	Planicies onduladas, pediments y relieves tabulares.	Congelifluxión, regueros pocos incisivos y solifluxión incipiente.
2° – 5°	Ondulado en zonas de morrenas, drumlis, fondos de valle y relieve tabulares.	Movimiento en masa, solifluxión, procesos fluviales, inicio de erosión.
5° – 15°	Valles en montañas medias, morrenas terminales y relieves estructurales tipo cuevas.	Movimiento en masa, erosión en manto e inicio de deslizamiento.
15° – 25°	Laderas en montañas medias, escarpes de fallas, terrazas, etc. Relieves estructurales tipo cueva.	Peligro de destrucción del suelo; conos de deyección; deslizamientos y caídas.
25° – 35°	Relieves estructurales tipo hogbacks, crestas y acantilados costeros en areniscas, calizas o similares.	Erosión lineal muy incisiva, riesgo extremo de erosión del suelo, deslizamientos, caídas, avalanchas, etc.
35° – 55°	Escarpes en gargantas, crestas y acantilados en areniscas, calizas o similares.	Caídas en masa, deslizamientos y colapsos.
> 55°	Cornisas y acantilados en calizas, areniscas o similares.	Caídas, colapsos, deslizamientos y desagregación granular.

Fuente: Demek, 1972

### 2.1.5. Fisiografía o estructura del relieve

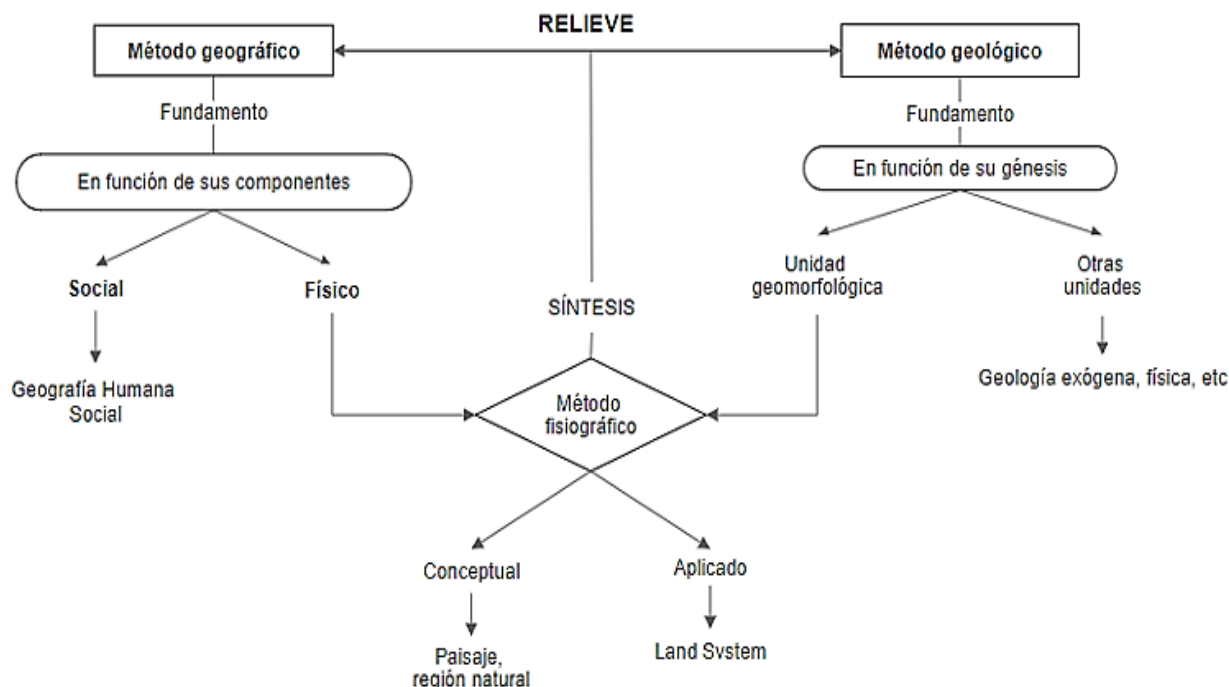
La fisiografía se encarga de determinar características que permitan establecer las formas del terreno en el contexto regional al que pertenecen (De Pedraza, 1996). Se usa en geomorfología para identificar y organizar una porción de terreno según unidades que presentan rasgos perfectamente diferenciados en comparación con los de su entorno. Por esto, los aspectos fundamentales de un análisis fisiográfico son la descripción y clasificación primaria del relieve.

### 2.1.6. Clasificación fisiográfica

Esta clasificación categoriza la estructura del relieve, y presenta dos tendencias específicas (Figura 2.1): las clasificaciones configuracionales y genéticas.

Las *clasificaciones configuracionales* o geográficas, se fundamentan en la delimitación de zonas basadas en la armonía de sus componentes: suelo, roca, flora o actividades antrópicas. Las *clasificaciones genéticas* o geológicas utilizan criterios geológicos para delimitar unidades geomorfológicas. Estos pueden ser: un agente, como la gravedad, un

río o un glaciar; su medio o ambiente, ya sea litoral, desierto, etc.; o sus productos, como terrazas, morrenas, aluviones (De Pedraza, 1996).



**Figura 2.1** Métodos de clasificación del relieve

Fuente Modificado De Pedraza, 1996

Un ejemplo claro clasificación fisiográfica genética es la utilizada en la microcuenca Picuroyacu (Pacco, 2010), en la que se encontraron tres grandes paisajes: planicie agradacional, relieve colinoso y relieve montañoso. Tanto la planicie agradacional como el relieve colinoso presentan sub-paisajes representados por terrazas y colinas bajas, medias y altas. Esta clasificación (Tabla 2.4) describe paisaje, sub-paisaje, unidad fisiográfica, pendiente y altitud.

**Tabla 2.4** Unidades Fisiográficas de la microcuenca Picuroyacu.

Gran Paisaje	Paisaje	Sub Paisaje	Unidad Fisiográfica	Pendiente (%)	Desnivel (m)
Planicie Agradacional	Aluvial de arena, limo y arcilla	Terraza Baja	Inundable	0-4	0 – 80
			No Inundable	0-8	
	Coluvial de arena, limo y arcilla	Terraza Media	Plana	0-8	80 – 300
			Ondulada	8-15	
		Terraza Alta	Plana	0-15	>300
			Ondulada	15-25	

Gran Paisaje	Paisaje	Sub Paisaje	Unidad Fisiográfica	Pendiente (%)	Desnivel (m)
Relieve Colinoso	Colina Denudacional de arcillolitas	Lomada	-	8 – 15	0 – 80
		Colina Baja	Ligeramente Disectada	15 – 25	0 – 100
			Moderadamente Disectada	25 – 50	
			Fuertemente Disectada	>50	
		Colina Alta	Ligeramente Disectada	15 – 25	100 – 300
			Moderadamente Disectada	25 – 50	
Fuertemente Disectada	>50				
Relieve Montañoso	Denudacional de arcillolitas y calizas	Montaña Baja	-	>25	300 – 1000

Fuente: Pacco, 2010

Un ejemplo de clasificación de relieve configuracional o de criterios geográfico se muestra en la Tabla 2.5, esta clasificación se realizó en las comarcas de la provincia de Segovia.

**Tabla 2.5** Clasificación del relieve siguiendo criterios geográfico-regionales

Zonas	Comarcas Naturales	Zonas	Comarcas Naturales
Ayllón – Riaza	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Relieve plegado</li> <li>2. Cabeceras de los ríos Riaza y Vadillo</li> <li>3. Llanuras onduladas del pie de la Sierra</li> <li>4. Valle del río Agusejo</li> <li>5. Páramos</li> </ol>	Campiñas onduladas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Campiñas cerealistas</li> <li>2. Valles de los ríos Pirón y Eresma</li> <li>3. Horst de Sta María</li> </ol>
Pedraza	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cabeceras de los ríos Riaza y Vadillo San Juan y Cega</li> <li>2. Superficie de piedemonte</li> </ol>	Tierra de pinares	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tierra de pinares</li> <li>2. Páramos del Norte</li> <li>3. Zonas endorreicas</li> </ol>
Segovia	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cabeceras de Eresma</li> <li>2. Superficie de piedemonte</li> <li>3. Atalaya – Matabueyes</li> </ol>	La Serrezuela	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limite Oeste</li> <li>2. Dorso de cuesta</li> <li>3. Frente de cuesta</li> <li>4. Limite Este</li> <li>5. Conglomerados</li> </ol>
Villacastín	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Valle del río Voltoya</li> <li>2. Alineación de Caloco</li> <li>3. Superficie de Villacastín</li> </ol>	Sepúlveda	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Valles</li> <li>2. Superficies culminantes</li> </ol>

Fuente: Bullón et al, 1977

## **2.2. Geomática**

### **2.2.1. PCI Geomatica**

PCI Geomatica es un software diseñado por la empresa PCI Geomatics que permite procesar datos de la superficie terrestre. Es un software de teledetección y fotogrametría que permite analizar y procesar imágenes satelitales de todo tipo de sensor aeroespacial. Además, el software ofrece funciones que permiten clasificar imágenes multiespectrales, además de funciones de geoprocesamiento raster, de análisis de datos de RADAR y posee un entorno de programación visual. PCI Geomatica es compatible con ArcGIS ya que la empresa PCI Geomatics mantiene relaciones de negocio con ESRI Inc. (PCI Geomatics, 2018)

### **2.2.2. Lineamientos en una imagen satelital**

En el análisis de una imagen satelital, los lineamientos pueden ser relacionados a estructuras artificiales como carreteras, canales, o ser debido a estructuras geológicas como fallas, fracturas, límites litológicos, disconformidades o redes de drenaje (ríos). Un lineamiento se mide por el gradiente de cambio en la intensidad de la imagen. Mediante la aplicación de filtros se pueden detectar bordes en una imagen, además se puede construir un método numérico para la detección de líneas a partir de estos filtros. Sin embargo, estos métodos no son tan preciso como el sistema visual humano.

Para el ojo humano, un lineamiento que varía en intensidad a lo largo de su longitud puede verse como un solo lineamiento largo, mientras que, para un método numérico, el mismo lineamiento puede aparecer como varias secciones cortas. Por ello, el desarrollo de un método numérico destinado a la extracción de lineamientos debe permitir cambios graduales o repentinos en el gradiente a lo largo del lineamiento, y también cambios menores de dirección (PCI Geomatics, 2020).

### **2.2.3. PCI Geomatic - Módulo Line**

El módulo LINE permite extraer entidades lineales de una imagen y las registra a manera de polilíneas en una capa vectorial. Está diseñado para extraer lineamientos de imágenes radar; sin embargo, también puede utilizarse para extraer lineamientos a partir de imágenes ópticas. LINE toma como entrada un solo canal de 8 bits, si se introduce una imagen de 16 o 32 bits en el canal de entrada, se escalará a 8 bits mediante un

proceso de escalado no lineal. El resultado de este módulo es un segmento vectorial, que contiene características lineales extraídas de la imagen.

El algoritmo de extracción de lineamientos implementado por este módulo consiste en tres pasos. Primero, se aplica un operador de detección de bordes a la imagen, produciendo una imagen de degradado. En segundo lugar, la imagen de degradado tiene un umbral para crear una imagen de borde binaria. Finalmente, las características lineales se extraen de la imagen de borde binario. Este último paso contiene muchos subpasos, como adelgazamiento de bordes, poda de curvas, segmentación de curvas recursivas y vinculación de curvas de proximidad (PCI Geomatics, 2020)

### 2.2.3.1. Parámetros del módulo LINE

- i. **RADI (Filter Radius):** especifica el tamaño del kernel (función gaussiana) como filtro en la detección de bordes (en píxeles). Representa el nivel más pequeño de detalle que se detectara en la imagen, a mayor valor asignado al RADI menos detalle y ruido resultan durante la detección de bordes (El-Sawy et. al, 2016). De acuerdo con PCI Geomatic (2020), el rango de valor admisible para este parámetro es de 0 a 8192.
- ii. **GTNR (Gradient threshold):** especifica el mínimo valor de gradiente dado a un píxel de borde con el cual se obtendrá una imagen binaria. El umbral para este parámetro va de 0 a 255. (El-Sawy et. al, 2016). Es importante que la imagen de borde tenga suficiente información, debido a que el proceso de extracción se basa en esta imagen.
- iii. **LTHR (Length threshold):** especifica la mínima longitud de curva en píxeles, que se considerará como lineamiento. (El - Sway et. al, 2016).
- iv. **FTHR (Line fitting error threshold):** es el umbral de ajuste de línea, que especifica el error máximo permitido (en píxeles) al ajustar una curva de píxeles a partir de una polilínea. A menor valor de FTNR se obtendrá un mejor ajuste y adaptación a los lineamientos, sin embargo, se obtienen segmentos de línea más cortos. Por ende, a mayor valor ingresado en este parámetro se obtendrán lineamientos más largos y rectos. Este parámetro admite un rango desde 0 a 8192. (El-Sawy et. al, 2016).
- v. **ATHR (Angular difference threshold):** es el ángulo máximo entre la unión de dos vectores. Es decir, es el ángulo máximo (en grados) entre segmentos de polilínea. El rango de este parámetro está entre 0 y 90. (El-Sawy et. al, 2016).

vi. **DTHR (Linking distance threshold)**: representa el umbral de distancia de enlace. este parámetro especifica la distancia máxima (en píxeles) entre dos vectores para que se enlacen. El rango de datos de este parámetro está entre 0 y 8192. (El-Sawy et. al, 2016).

## **2.3. Fundamentos de Teledetección**

### **2.3.1. Recursos Digitales**

Los recursos digitales pueden ser cualquier elemento que esté en formato digital, y pueda visualizarse y almacenarse en un dispositivo electrónico y pueda ser consultado de manera directa o por acceso a internet (Universidad de Navarra, 2016). Muchas revistas científicas, universidades, gobiernos o municipios ponen a disposición de la ciudadanía sus recursos digitales geológicos para usos diversos.

El Geoportal del IGM en Ecuador, proporciona recursos como un visor geográfico, secciones educativas, un catálogo de datos geográficos, nombres y descargas geográficas, servicios y proyectos de inversión en su sitio web.

### **2.3.2. Modelo de Elevación Digital (DEM)**

Es una representación digital de la elevación de la superficie terrestre con respecto a un datum de referencia dada. Con frecuencia se utilizan como representación digital de una superficie topográfica, puesto que es la forma más sencilla de hacerlo. A partir de la información contenida en el DEM, se pueden obtener otros productos o modelos derivados tales como: pendientes, sombreado (*Hillshade*) y el aspecto del terreno (Felicísimo, 1994).

Los *Hillshade* son modelos de Sombras, que muestran la superficie del terreno por medio del sombreado de laderas, este contraste de sombras genera un efecto de profundidad en los mapas mejorando la calidad visual de la cartografía permiten mejorar la calidad visual de un archivo (Vinuesa, 2012).

#### **2.3.2.1. DEM ALOS PALSAR**

ALOS era una misión de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) entre los años 2006 y 2011. Los DEM ALOS PALSAR son uno de los diversos productos disponibles a partir de la información captada por este satélite. Estos modelos de elevación digital son obtenidos a partir de información SAR de la banda L del sensor

PALSAR. PALSAR fue uno de los tres sensores de observación avanzada de la misión ALOS, desarrollado para contribuir en la observación precisa de la cobertura terrestre regional. Tiene dos modos de haz finos: FBS modo de polarización simple y FBD es el modo de polarización Dual (JAXA, 2008). Son DEM con una resolución espacial de 30m (baja resolución) y 12,5 m (alta resolución) con una periodicidad de 46 días

### **2.3.3. Imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS**

Landsat 8 orbita la Tierra en una órbita casi polar sincrónica con el sol, a una altitud de 705 km (438 millas), inclinada a 98,2 grados, y completa una órbita terrestre cada 99 minutos. El satélite tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 am +/- 15 minutos.

Landsat 8 adquiere alrededor de 740 escenas por día en el sistema de ruta / hilera del Sistema de Referencia Mundial – 2 (WRS – 2), con una superposición de franjas (o superposición lateral) que varía del 7 por ciento en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 por ciento en latitudes extremas. El tamaño de una escena de Landsat 8 es de 185 km x 180 km.

Dado que el sensor OLI captura datos con una precisión radiométrica mejorada en el rango de 12 bits, se mejora la relación señal/ruido. Esto se traduce en 4096 niveles de gris potenciales, en comparación con solo 256 niveles de gris en los instrumentos Landsat 1 – 7 de 8 bits. Una caracterización eficiente del estado y la condición de la superficie terrestre es posible a través del rendimiento mejorado de señal a ruido.

Los datos de 12 bits se escalan a números enteros de 16 bits y se entregan en los productos de datos de Nivel 1. Los productos se escalan a 55000 niveles de gris y se pueden escalar a la reflectancia y/o resplandor de la parte superior de la atmósfera (TOA) utilizando los coeficientes de cambio de escala radiométricos proporcionados en el archivo de metadatos del producto (USGS, 2017).

#### **2.3.3.1. Características de las bandas**

Las imágenes Landsat 8 OLI/TIRS incorpora 2 nuevas bandas con respecto las imágenes ETM+ y consta de 11 bandas. Las bandas 1 a 7 y 9 poseen una resolución espacial de 30m, la banda 1 es un canal visible en el azul profundo útil para estudios hídricos, aerosoles y de zonas costeras, la banda 9 es un canal infrarrojo útil en la detección de cirrus. La banda 8 (pancromática) tiene una resolución de 15m. Dos bandas

térmicas 10 y 11 con 100m de resolución, estas proporcionan información de la temperatura de la superficie de forma más precisas (Tabla 2.6) La resolución temporal es de 16 días, el tamaño de escena es de aproximadamente 106 x 114 km. (NASA, LANDSAT SCIENCE, 2014).

**Tabla 2.6** Distribución de las bandas en OLI y TIRS

SENSOR	BANDAS	LONGITUD DE ONDA ( $\mu\text{m}$ )	RESOLUCIÓN (m)
OLI	Banda 1 – Aerosol Costero	0,43 – 0,45	30
OLI	Banda 2 – Azul	0,45 – 0,51	30
OLI	Banda 3 – Verde	0,53 – 0,59	30
OLI	Banda 4 – Rojo	0,64 – 0,67	30
OLI	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0,85 – 0,88	30
OLI	Banda 6 – SWIR 1	1,57 – 1,65	30
OLI	Banda 7 – SWIR 2	2,11 – 2,29	30
OLI	Banda 8 – Pancromático	0,50 – 0,68	15
OLI	Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
TIRS	Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100
TIRS	Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100

Fuente: (Earth Observing System, 2013)

### 2.3.3.2. Composición de bandas en RGB

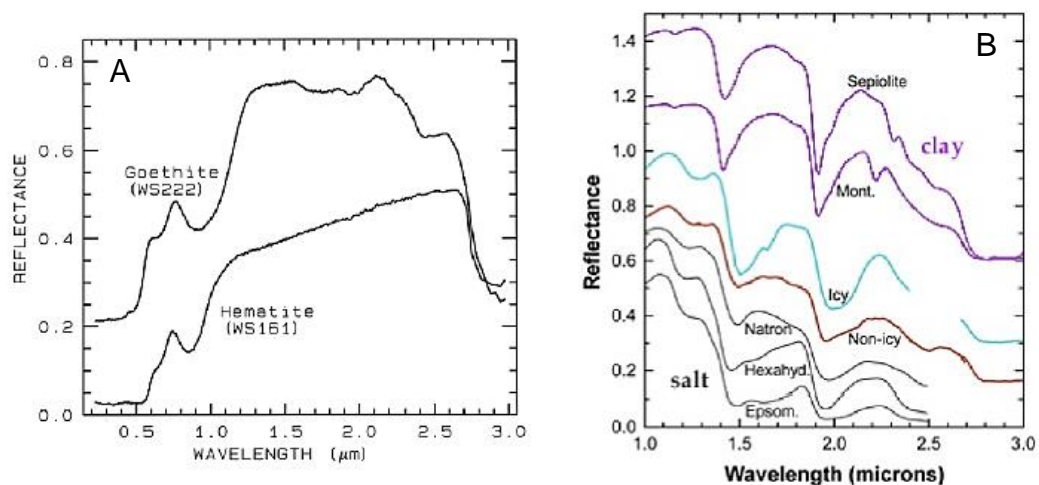
Es la combinación de bandas de las *imágenes de satélite* a través de los tres canales fundamentales: rojo, verde y azul. Las diferentes bandas se pueden combinar entre sí, lo que permite analizar la superficie terrestre en función de la respuesta de los elementos ante la emisión de su espectro (Chuvienco, 1996). Las bandas pueden combinarse entre ella y así generar imágenes real o falso color

### 2.3.3.3. Cociente de bandas

Es un método de gran utilidad para el preprocesamiento de imágenes satelitales, en especial en zonas en las cuales la topografía es muy irregular y por ende los efectos topográficos son importantes, ya que suprime cualquier efecto topográfico indeseado. Este realiza una división de los píxeles en una banda por los píxeles de una segunda banda. Actualmente, es un método muy utilizado en la construcción de índices espectrales usados en el monitoreo de coberturas de suelo, contaminación y contenido de minerales (Hung et al 2013).



Un aspecto importante que permite conocer el comportamiento espectral del mineral es el realce de las diferencias espectrales entre las bandas empleadas. Por ejemplo: los minerales de arcilla tienen intensas bandas de absorción en 2,2 – 2,3  $\mu\text{m}$  del espectro (Figura 2.2), los Filosilicatos como la clorita, biotita y moscovita, también tienen bandas de absorción en esa región, al igual que yeso, jarosita y alunita. Todos estos minerales suelen formarse durante los procesos de alteración hidrotermal y, por tanto, constituyen una guía para la localización de rocas potencialmente mineralizadas.



**Figura 2.2** A) Características espectrales del óxido de hierro; y B) Características espectrales de los minerales de arcilla

#### 2.3.3.4. Comportamiento espectral de los minerales.

El comportamiento espectral de los minerales se rige de acuerdo a su color. A diferencia de los minerales oscuros, los minerales blancos tienen una reflectividad muy fuerte. Por otro lado, las micas en especial la biotita poseen una reflectancia baja. Cabe destacar que el estudio de los minerales mediante técnicas geomáticas permite detectar minerales de alteración que facilitan la ubicación de yacimientos, depósitos minerales y zonas de alteración hidrotermal (Hernández, 2007).

#### 2.4. Rugosidad y mapa de rugosidad

Para Bosque Sendra (1992), la rugosidad permite medir lo variado que es el relieve en un punto y en su entorno inmediato. La rugosidad del terreno no es un parámetro cuantitativo definido de forma precisa y específica. Es un parámetro cualitativo y bastante subjetivo, debido a que expresa la *uniformidad* o *variabilidad* del relieve de una zona. Es decir, no se puede definir con un valor numérico absoluto que represente la rugosidad

del terreno en un punto; pero sí, permite comparar la topografía de una región con respecto a otra, y de esa manera expresar la mayor o menor rugosidad relativa (Sánchez et al., 1998).

La interpretación de los modelos de rugosidad permite identificar, bajas rugosidades en un entorno de alineaciones de alta rugosidad, o puede también diferenciar rugosidades contrastadas en zonas extensas. Este parámetro permite identificar discontinuidades geomorfológicas, relacionadas con estructuras tectónicas y contactos geológicos a partir de rupturas de pendientes, alineación de cimas, encajamientos fluviales.

En general, al delimitar los contrastes entre rugosidades bajas y altas, se están delimitando todas las discontinuidades del relieve. Cuando el tamaño de la forma supera la resolución del modelo, se produce un contraste entre los valores extremos y no aparece los valores intermedios. Se pueden obtener dos características importantes en un mapa de rugosidad: formas lineales con rugosidad contrastada entre alta y baja, o áreas amplias con una rugosidad uniforme (Sánchez et al., 1998).

Las formas lineales suelen consistir en patrones de alta rugosidad, contenidas en zonas de menor rugosidad. Y estas por lo general pueden ser cimas de montañas lineales o redes hidrográficas o quebradas. Esto se debe a que es un parámetro sensible a las rupturas de pendientes y a los cambios bruscos de orientación. El contraste de rugosidad ocurre en zonas donde la pendiente cambia bruscamente. Estas áreas de rugosidad contrastada pueden reflejar diferencias en la litología, generando como consecuencia, una erosión diferencial y variación en el estilo estructural.

Desde el punto de vista morfoestructural, permite identificar morfologías, escarpes, y también alineaciones relacionadas con contactos litológicos o estructuras tectónicas. El análisis del terreno por medio de modelos de rugosidad pone en manifiesto la relación entre la estructura tectónica y las formas del relieve (Sánchez et al., 1998).

# CAPÍTULO 3

## 3. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio está caracterizada por la presencia de diversas unidades geológicas constituidas por diferentes litologías (Apéndice A, Figura 6.1).

### 3.1. Geología Regional

#### 3.1.1. Rocas Metamórficas

Materiales volcánicos recientes cubren superficialmente estas rocas. Afloran superficies erosionales generadas por la actividad del Sistema de Fallas Jubones. Existe declive en el grado de metamorfismo hacia el Este, estratos que contienen biotita y andalucita pasan a ser turbiditas no metamorizadas (Pratt et al., 1997). En San Pablo de Cebadas y Manú, el grado de metamorfismo varía desde muy bajo con la presencia de rocas meta-sedimentarias hasta rocas con un alto grado de metamorfismo (Aspden et al., 1995).

#### 3.1.2. Unidad Pallatanga

Se encuentra, en su mayoría, en los alrededores de Bella Rica y Tres Ranchos. Conformada por basaltos oceánicos (MORB) y hialoclastitas de color azul-verde (McCourt et al., 1998). Alteración hidrotermal pervasiva en las rocas, alto contenido de epidota, clorita, calcita, y pirita diseminada.

#### 3.1.3. Unidad Yunguilla

Está conformada por areniscas, lutitas y limolitas. La secuencia tiene un espesor de al menos 1,5 km en Cumbe (Woods, 1997). Gran parte de esta secuencia turbidítica aflora al sur de Ponce Enríquez en Cumbe, entre Manú y Selva Alegre, cerca de Pasaje (Wilkinson, 1997).

#### 3.1.4. Grupo Saraguro

Atraviesa la Cordillera Real con una extensión de 220 km. Aflora desde Riobamba hasta el Norte de Saraguro en el Sur. Posee un espesor variable, de 500 a 2000 metros. Está conformada por rocas volcanoclásticas y material volcánico ácido y tobas de composición andesítica a dacítica en la base. El tope contiene ignimbritas riolíticas que

evidencian enfriamiento columnar. Presenta intercalaciones de sedimentos de ambientes lacustre y fluvial. La edad de este grupo varía entre  $26,4 \pm 2,6$  Ma y  $19,1 \pm 1,4$  Ma. (Hungerbühler et al., 2002).

### **3.1.5. Formación Chanlud**

Comprende lavas andesíticas sub-horizontales con brechas volumétricas autoclásticas, piroclásticas o epiclásticas. Posee también intercalaciones menores de sedimentos volcánicos y tobas. La mayoría de los diques son de andesita, tienen dirección E-SE y en Patul son radiales. En el sector de Patul la formación alcanza un espesor de 1000 m. En sectores los flujos superiores son dacíticos y varios diques son basálticos.

### **3.1.6. Formación Río Blanco**

Está expuesta en la ruta Cuenca-Jesús María y alrededor del Río Blanco. En general, tiene rumbo NO y buza suavemente hacia el NE. Consiste principalmente de lavas andesíticas feldespáticas con hornblenda e hipersteno, brechas con intercalaciones de areniscas volcánicas, tobas de flujo de ceniza y algunas tobas dacíticas. Está intruida por pequeños cuerpos de metadiorita. Parte de la formación se depositó bajo el agua. Cerca de Río Blanco, la Formación sobreyace en discordancia angular con las rocas plegadas de la Unidad Chulo y al oeste de Hierba Buena descansa sobre la Unidad Pallatanga.

### **3.1.7. Formación Jubones**

Descansa sobre las formaciones Plancharumi y Soldados de manera discordante y está sobreyacida con una fuerte discordancia por la Formación Quimsacocha. Las mejores exposiciones ocurren al S y SE de Pimo con alrededor de 200 m de espesor de toba riolítica de flujo de ceniza, fuertemente soldada, muy rica en feldespato, cuarzo y biotita.

### **3.1.8. Grupo Ayancay**

Aflora al norte y sur de la ciudad de Cuenca, formando parte de la secuencia sedimentaria de la Cuenca de Cuenca. Es de origen fluvial, compuesta principalmente de areniscas, lutitas rojas y verdes, limolitas, capas de carbón y conglomerados. Este Grupo está conformado por las Formaciones Santa Rosa y Mangán.

### **3.1.9. Formación Turi**

Está compuesta de conglomerados andesíticos gruesos y brechosos, con poca litificación y estratificación horizontal. Tiene más de 300 metros de espesor que descansan directamente sobre el Grupo Saraguro, sobreyacida sobre la formación Quimsacocha. Está compuesto por intercalaciones de areniscas y limolitas tobáceas pálidas.

### **3.1.10. Formación Turupamba**

Comprende tobas y tobas retrabajadas ácidas con lapilli, cristales de cuarzo y fragmentos de carbón. Sobreyace a la formación Turi y posiblemente a la formación Quimsacocha.

### **3.1.11. Formación Quimsacocha**

Está compuesta por lavas y brechas andesíticas que buzcan radialmente hacia afuera de la caldera de Quimsacocha. Esta formación sobreyace sobre el grupo Saraguro y la formación Turi. Las rocas son de color gris-verde oscuro y anfíboles.

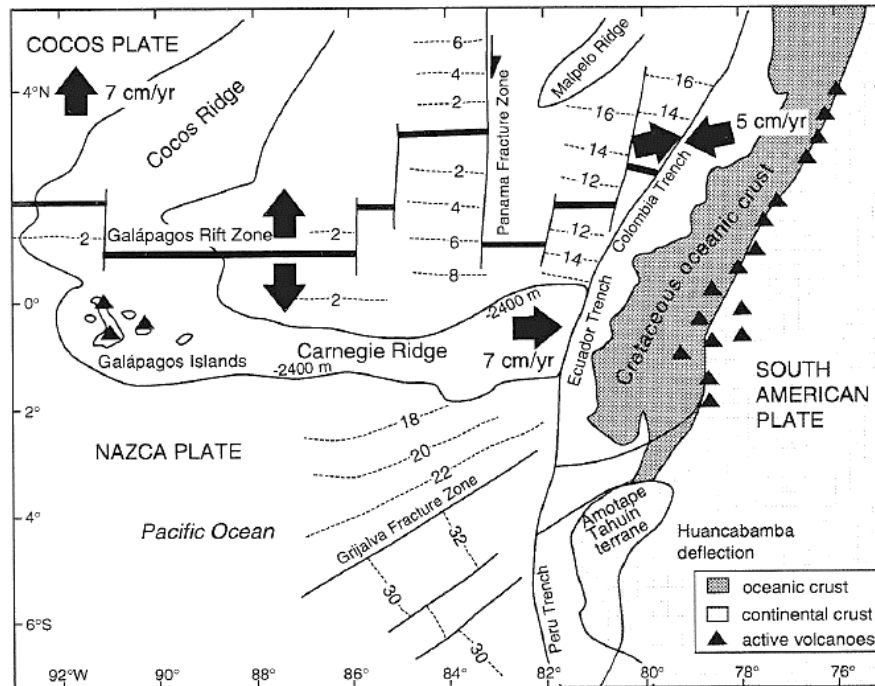
### **3.1.12. Formación Tarqui**

Comprende tobas ácidas rojas y blancas, poco consolidadas e intensamente meteorizadas que cubren las unidades más antiguas del área. Presenta cristales euhedrales bipiramidales expuestos. Debido a la intensa meteorización se dificulta reconocer la naturaleza original de los depósitos, éstos incluyen tobas masivas y estratificadas que contienen remanentes de lapilli de pómez.

## **3.2. Geología Estructural**

El marco estructural del Ecuador es el resultado del mecanismo de subducción al que está sometida la placa oceánica de Nazca con una deformación compresional y extensional; causando a su vez, el levantamiento y la deformación de los Andes, así como la morfología del margen continental (Figura 3.1). El movimiento de la placa de Nazca ocurre en sentido O – E en dirección al continente americano desde hace aproximadamente 70 Ma. a una velocidad de 6 – 7 cm/ año (Witt, 2007).

El desarrollo tectónico del Ecuador inicia tras la ruptura de la placa de Farallón en las placas de Nazca y Cocos hace 25 Ma. Ocurre un desplazamiento tectónico de la FCP (23 Ma.) de 100 km entre Pallatanga y Macuchi respecto al continente sudamericano. (Hungerbuhler, 1997)



**Figura 3.1** Tectonismo actual del NO Sudamericano

Fuente (Hungerbuhler, 1997)

Diversas fallas dominan la parte estructural del área de estudio. Desde el punto de vista regional, las direcciones principales son NE – SO. Localmente, predominan fallas paralelas con direcciones NO – SE, en menor escala NE-SO y muy pocas con E – O. Algunas de estas fallas marcan los límites entre varias unidades litoestratigráficas. “El Grupo Saraguro está fuertemente fracturado por fallas NO – SE e intruido por una multitud de diques con la misma orientación, al oeste de Cuenca. Esta serie de fracturas puede ser una característica superficial, que representan cizallas Reidel formadas en respuesta a movimientos dextrales a lo largo de fallas fundamentales NE – SO. (Dunkley et al., 1997). Los sistemas de fallas más importantes en la zona son: Bulubulú, Multitud, Pallatanga y Jubones.

### 3.2.1. Sistema de Fallas: Bulubulú

El sistema Bulubulú es el límite tectónico entre los terrenos de Pallatanga y Chaucha; se encuentra cubierto por las rocas el grupo Saraguro y esto hace complicada su localización. Fue denominado por Pratt et al. (1997) como Lineamiento Chaucha – Río Jerez, en su parte sur (Pratt et al., 2005).

El lineamiento es una representación geológica clara de que existe el sistema de falla Bulubulú, así como también los altos buzamientos de los estratos del Grupo Saraguro

debido a la actividad tectónica (Dunkley et al., 1997), el límite oriental de los afloramientos de la unidad Pallatanga y la separación de dominio de las formaciones Jubones y La Fortuna, lo que indica que la actividad de este 'límite' ha perdurado hasta al menos el Mioceno Temprano (Pratt et al., 1997).

### **3.2.2. Sistema de Fallas: Jubones**

Existen evidencias de que la falla Jubones ha sido interpretada no solo como una falla inversa sino también como una falla de transcurrancia sinistral. La falla Jubones es el límite entre el complejo metamórfico de El Oro y los basaltos de la Unidad Pallatanga. En la zona de Ushcurrumi la falla tiene una deflexión, donde se encuentra en contacto el basamento metamórfico y la Formación Santa Isabel, a su vez este se encuentra cubierto por el Grupo Saraguro (Pratt et al., 1997).

# CAPÍTULO 4

## 4. DATOS Y METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presenta la data utilizada durante el proceso realizado, así como el detalle de la metodología en su totalidad. El capítulo detalla el proceso de generación de nuestro esquema geomorfológico, esquema de estructuras, unidades litológicas y mapa geológico a semi-detalle. Se presenta un diagrama para cada proceso, para mejor entendimiento del lector.

### Recursos digitales

La información cartográfica, datos compilados y demás recursos digitales que se encuentran disponibles para el área de estudio comprenden la siguiente información:

- **Índice De Hojas Topográficas** a escala 1:50000 utilizadas en la compilación base de la zona de estudio:
  - i. SAN FELIPE DE MOLLETURO (NV – F1)
  - ii. CHIQUINTAD NV – F2
  - iii. CHAUCHA (NV – F3)
  - iv. CUENCA (NV – F4)
- **Cartografía base** en formato shapefile y pdf.
  - a) **Mapas geológicos**
    - Hoja geológica Cuenca (Hoja 53, CT – NV – F4) – escala 1:100000.
    - Hoja geológica Girón (Hoja 54, CT – NVI – B) – escala 1:100000.
    - Hoja geológica Gualaceo (Hoja 73 – C, Ñ V – E3) – escala 1:50000.
    - Hoja geológica Azogues (Hoja 73, CT – ÑV – e) – escala 1:100000, de Bristow et al. (1974).
    - Mapa Geológico Cordillera Occidental 2°- 3° escala 1:100000 de Dunkley et al. (1997).
    - Mapa Geológico Cordillera Occidental 3°- 4° escala 1:100000 de Pratt et al. (1997).



- b) Cartografía de libre acceso** a escala 1:50000 del IGM (formato shp), de las hojas topográficas mencionadas en el punto anterior.
- **Modelo Digital de Elevación**, generado con las curvas de nivel obtenidas de la cartografía del IGM a escala 1:50000. A partir de este se generó modelo un SLOPE.
  - **DEM ALOS PALSAR** de resolución espacial de 12,5 m obtenido de la plataforma de libre acceso [Alaska Satellite Facilities](#) de la NASA. Se necesitaron cuatro DEM ALOS (Tabla 4.1) para poder cubrir la zona, se realizó un mosaico con estos y posterior se recortó y se obtuvo el DEM ALOS para la zona de estudio. Con este se generó modelo Hillshade, Log 10 y TPI.
  - **Imagen multiespectral Landsat 8 OLI/TIRS**, (Tabla 4.2) esta imagen es de libre acceso y fue obtenida a través del sitio web EarthExplorer de la USGS.

**Tabla 4.1** Información de las imágenes DEM ALOS PALSAR.

DEM ALOS PALSAR	Fecha de adquisición	Resolución espacial	Beam Modes	Polarización	Dirección de Vuelo
ALPSRP248137130	21 / 09 / 2010	12,5m	FBD	HH + HV	Ascendente
ALPSRP248137120					
ALPSRP252367130	10 / 20 / 2010				
ALPSRP252367120					

Fuente: ASF DAAC, 2015

**Tabla 4.2** Información de la imagen Landsat adquirida

Atributos del DataSet	Valores
Fecha de Adquisición	2018/11/20
Categoría de la colección	T1
Numero de colección	1
WRS Path	010
WRS Row	062
Nadir/Off Nadir	NADIR
Roll Angle	-0,001
Start Time	2018:325:15: 27:10,6775710
Stop Time	2018:325:15: 27:42,4475680
Cobertura de nube	25,59 %
Sensor Identificador	OLI_TIRS
Proyección del mapa Level-1	UTM
Zona UTM	17
Datum	WGS84
Tamaño de celda (Pancromática)	15,00

Fuente: USGS, 2020

## Metodología

Las etapas realizadas durante el desarrollo del presente proyecto se observan en la Figura 4.1 y se detallan en las siguientes secciones.

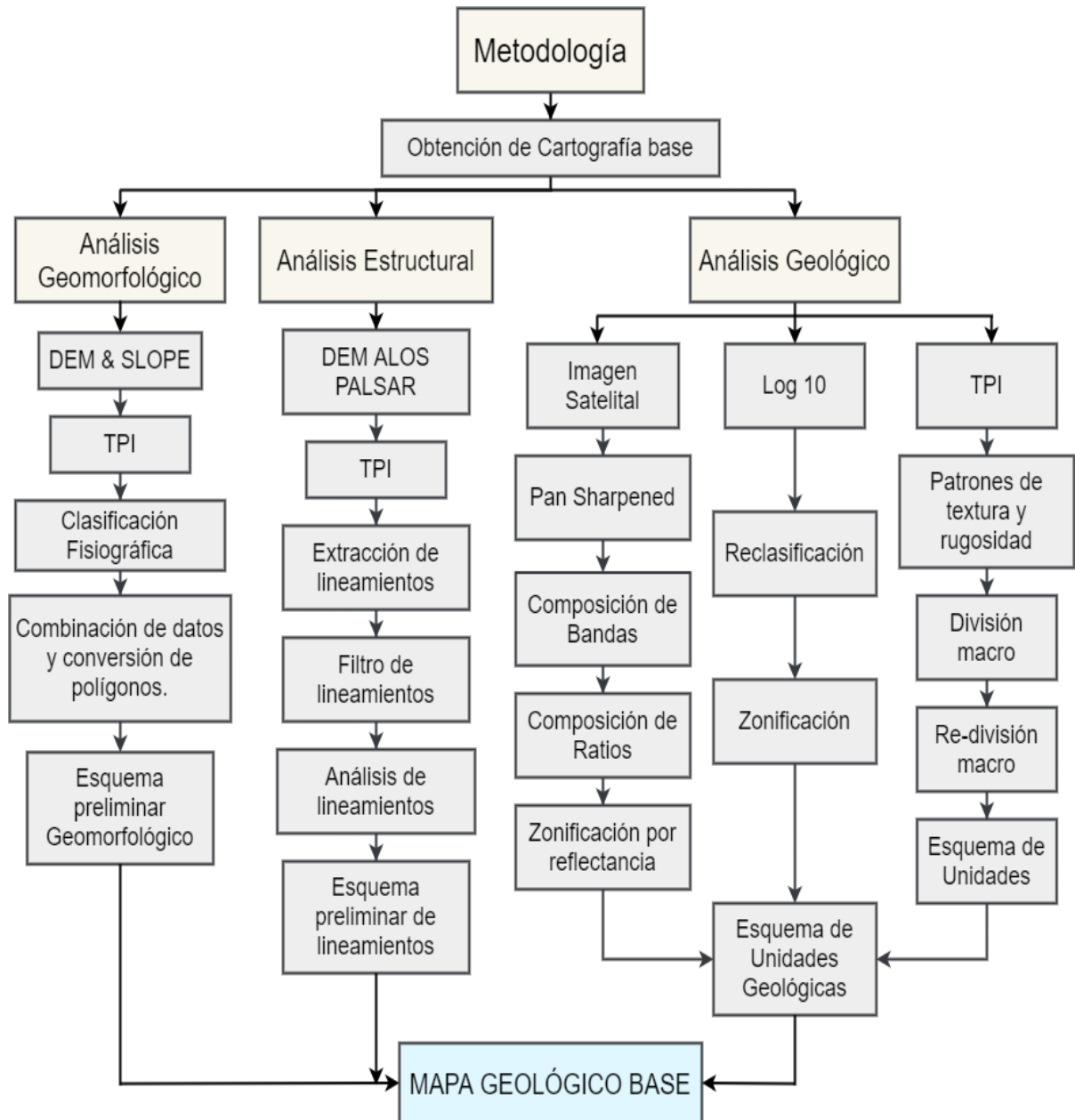


Figura 4.1 Guía metodológica genera

#### 4.1.1. Análisis geomorfológico

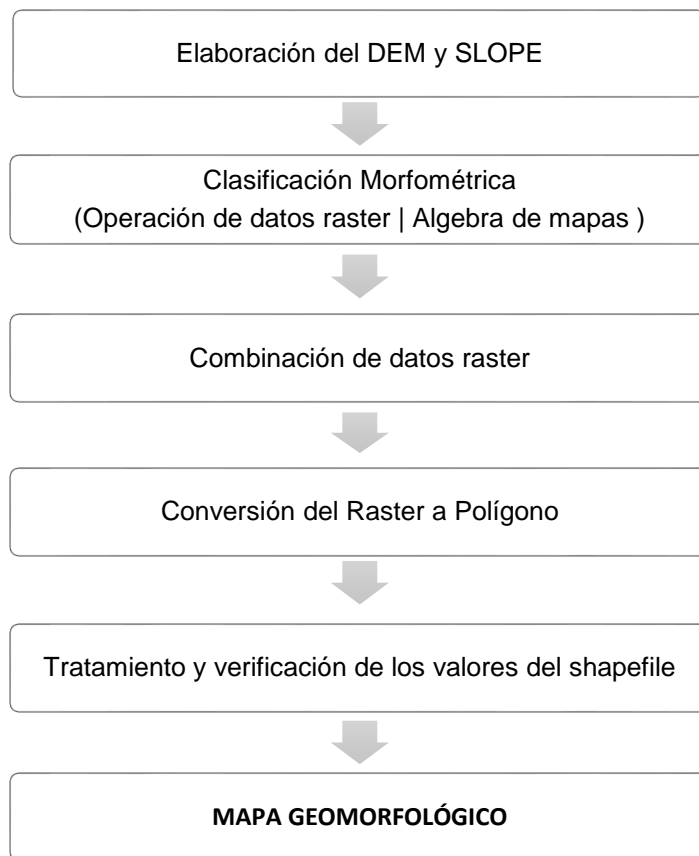


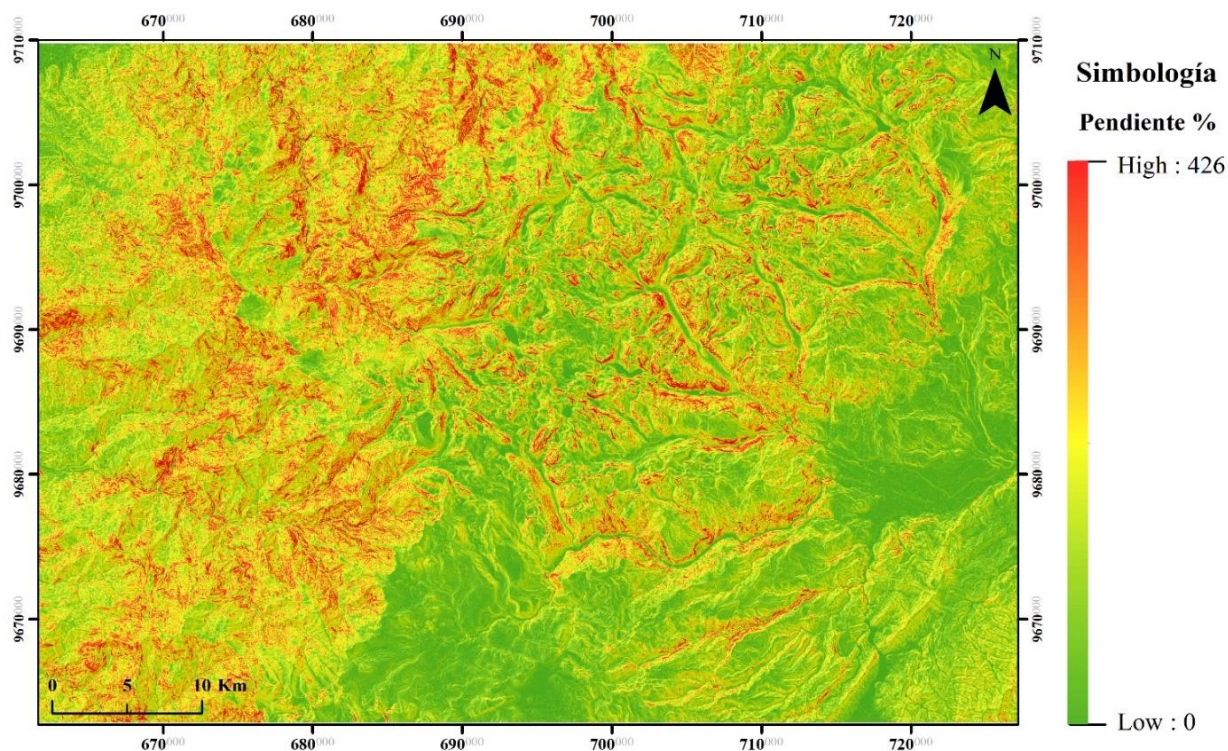
Figura 4.2: Flujo metodológico del análisis geomorfológico

##### 4.1.1.1. Elaboración del DEM y el SLOPE

Para la elaboración del Modelo Digital de Elevación, se utilizó las curvas de nivel a escala 1:50000 de la cartografía nacional. Los procesos se realizaron para la obtención del DEM se llevaron a cabo por medio de la caja de herramienta del software ESRI ArcGIS. Para un mejor resultado se transformó las curvas de nivel en puntos mediante la herramienta *'feature vertices to points'* de *Data Management Tools*. Luego se generó el DEM mediante la herramienta *'topo to raster'* de *Spatial Analyst* en esta si ingresan los puntos obtenidos previamente. Es importante colocar correctamente los campos; por motivos de capacidad y recursos para procesar la información se asigna un tamaño de celda de 50.

Para generar el modelo de pendiente, se utilizó la herramienta *'slope'* de *Spatial Analyst Tools*, en esta herramienta el ráster de entrada es el DEM generado previamente. Este recurso permite identificar la diferencia de gradiente entre dos formas del relieve; es decir la relación entre la altitud y la distancia horizontal entre dos puntos y así entender mejor

el comportamiento de la forma del terreno (Figura 4.3). Se tiene la premisa de que mientras menor sea la pendiente, más plano será el terreno y por consiguiente mientras más alto el valor de la pendiente, más inclinado o empinado será el terreno.



**Figura 4.3** Modelo de pendiente del AOI

#### **4.1.1.2. Clasificación Morfométrica**

Para la clasificación morfométrica se usan el DEM y el SLOPE generados anteriormente. El SLOPE se utiliza para denotar las pendientes de la zona y el DEM se refiere al modelo digital de elevación con el cual se puede observar el comportamiento de los desniveles. En la Tabla 4.3, se muestra la clasificación fisiográfica generada a partir de la clasificación de Pacco, 2010. Esta metodología se basa en una relación entre la pendiente y el desnivel relativo de las cotas, este desnivel será tomado desde una cota base. La cota base se la debe comprobar, y esta depende del área de interés y de los objetivos de análisis de cada proyecto. En nuestro caso, la zona de estudio presenta superficies muy irregulares, con alturas que van desde los 35 m hasta zonas de alta montaña con alturas mayores a los 4500m. Por ello la cota base elegida corresponde a el valor de la altura media menos un medio de la desviación estándar.

**Tabla 4.3** Clasificación Fisiográfica que relaciona pendiente y desniveles

Clase	COD.	Sub Paisaje	Unidad Fisiográfica	Pendiente (%)	Desnivel (m)
1	TBI	Terraza Baja	Inundable	0 – 4	0 – 80
2	TBNI		No Inundable	4 – 8	
3	TM	Terraza Media	-	0 – 15	80 – 300
4	TA	Terraza Alta	-	0 – 25	300 – 1000
5	L	Lomada	-	8 – 15	0 – 80
6	CBD	Colina Baja	Disectada	15 – 50	0 – 100
7	CBFD		Fuertemente Disectada	>50	
8	CAD	Colina Alta	Disectada	15 – 50	100 – 300
9	CAFD		Fuertemente Disectada	>50	
10	MB	Montaña Baja	-	>25	300 – 1000
11	MA	Montaña Alta	-	>25	>1000
12	LLA	Llanura de Ablación	-	0 – 25	>3500

Fuente: Pacco, 2010.

Inicialmente se realizaba la distinción entre colinas altas y bajas disectadas y fuertemente disectadas, pero dada la escala de trabajo se obtenían resultados poco apreciables. Por ello se unificó esta clasificación y las unidades fisiográficas correspondientes al sub-paisaje de colina se definen como disectada y fuertemente disectada. Finalmente, la clasificación utilizada para el análisis de la geomorfología de la zona de estudio se observa a continuación (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4** Clasificación fisiográfica de la zona de estudio.

Clase	COD.	Sub-paisaje	Unidad Fisiográfica	Pendiente (%)	Desnivel (m)
1	TBI	Terraza Baja	Inundable	0 – 4	0 – 80
2	TBNI		No Inundable	4 – 8	
3	TM	Terraza Media	-	0 – 15	80 – 300

Clase	COD.	Sub-paisaje	Unidad Fisiográfica	Pendiente (%)	Desnivel (m)
4	TA	Terraza Alta	-	0 – 25	300 – 1000
5	L	Lomada	-	8 – 15	0 – 80
6	CD	Colina	Disectada	15 – 50	0 – 300
7	CFD		Fuertemente Disectada	>50	0 – 300
8	MB	Montaña Baja	-	>25	300 – 1000
9	MA	Montaña Alta	-	>25	>1000
10	LLA	Llanura de Ablación	-	0 – 25	>3600

A partir de la clasificación elaborada se procedió a realizar la identificación de las geoformas de la zona, mediante el uso de fórmulas que emplean los valores de pendiente y los desniveles (Tabla 4.4). En base a esto se generan 10 formulas, el valor de la cota base a utilizar es de 2490,63 m.s.n.m, a este valor se le sumaran los valores correspondientes a los desniveles de acuerdo a cada geoforma. Se obtienen las fórmulas:

$$TBI: (SLOPE \leq 4) \& [DEM \leq (80 + 2490,63)] \quad (4.1)$$

$$TBNI: (SLOPE > 4) \& (SLOPE \leq 8) \& [DEM \leq (80 + 2490,63)] \quad (4.2)$$

$$TM: (SLOPE \leq 15) \& [DEM > (80 + 2490,63)] \& [DEM \leq (300 + 2490,63)] \quad (4.3)$$

$$TA: (SLOPE \leq 25) \& [DEM > (300 + 2490,63)] \& (DEM \leq 3490,63) \quad (4.4)$$

$$L: (SLOPE > 8) \& (SLOPE \leq 15) \& [DEM < (80 + 2490,63)] \quad (4.5)$$

$$CD: (SLOPE > 15) \& (SLOPE \leq 50) \& [DEM \leq (300 + 2490,63)] \quad (4.6)$$

$$CFD: (SLOPE > 50) \& [DEM \leq (300 + 2490,63)] \quad (4.7)$$

$$MB: (SLOPE > 25) \& [DEM > (300 + 2490,63)] \& [DEM \leq (1000 + 2490,63)] \quad (4.8)$$

$$MA: (SLOPE > 25) \& [DEM > (1000 + 2490,63)] \quad (4.9)$$

$$LLA: (SLOPE \leq 25) \& (DEM > 3600) \quad (4.10)$$

Estas fórmulas se ingresan una por una en la herramienta 'ráster calculator', por cada fórmula se obtiene un ráster, dicho ráster es la representación de una geoforma; se guarda cada resultado con un código representativo.

#### **4.1.1.3. Combinación de datos ráster**

Una vez generados los ráster, se hace una combinación entre ellos mediante la herramienta '*combine*' de *Spatial Analyst*, con esto se generó un solo ráster que contiene los 12 productos geomorfológicos descritos previamente. Es importante mantener el orden al momento de ingresar los ráster para ser combinados. Una vez realizada la combinación, se selecciona la opción '*cubic convolution*', de la pestaña *Display* de propiedades del ráster, por medio de esta se logra suavizar la forma.

#### **4.1.1.4. Conversión del ráster a shapefile**

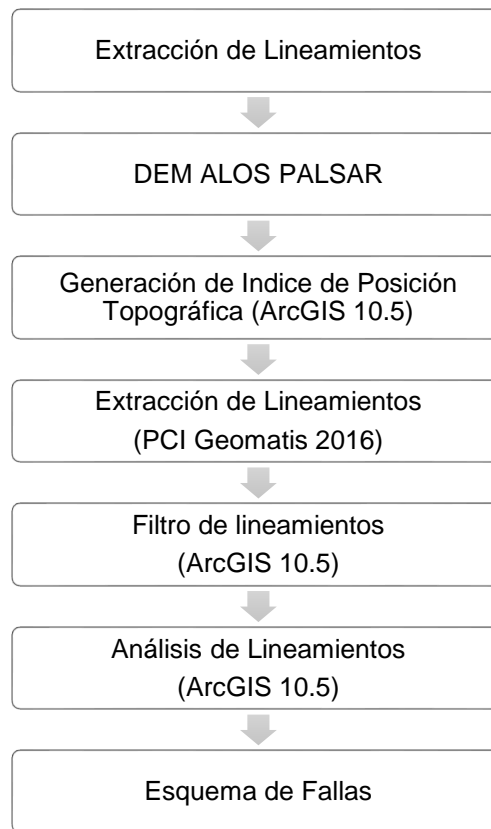
Se convirtió el ráster a shapefile de polígono por medio de la herramienta '*raster to polígono*'. Es necesario trabajar en formato shp, ya que en este se puede editar y realizar el cálculo de la geometría de los polígonos que representan las geoformas.

#### **4.1.1.5. Tratamiento y verificación de los valores del shapefile**

Una vez generado el shapefile de polígono que representa a las geoformas, se debe calcular el área de cada uno de los polígonos, luego se depuraron aquellos con áreas menores a 1Ha. Este paso se realizó mediante la herramienta "*Eliminate*" de *Data Management Tools*. Luego se creó un nuevo campo de tipo texto, dentro de la tabla de atributos del shapefile, en este se asignaron los nombres de las geoformas.

Se realizó una comparación entre el *gridcode* del polígono (tabla de atributos del shp) y los Value del ráster de la combinación, se analizó la equivalencia entre el valor de *gridcode* con respecto a las geoformas representadas por el value del ráster resultante de la combinación. Una vez identificada a que geoforma corresponde cada valor de *gridcode*, se añadió a la columna de descripción del shapefile la abreviatura correspondiente de cada producto geomorfológico. Luego se realiza un "*Dissolve*". Finalmente se representa el resultado obtenido de las unidades geomorfológicas a manera de mapa (Apéndice A, Figura 6.1).

#### 4.1.2. Análisis estructural



**Figura 4.4** Flujo metodológico del análisis estructural

Para este apartado se realizó la identificación de lineamientos geológicos. Por medio del tratamiento de una modelo TPI se obtuvieron de forma automatizada lineamientos estructurales mediante un software de geomática, seguido de un post análisis cartográfico realizado en SIG que permitió clasificar los lineamientos obtenidos como lineamientos geológicos (Figura 4.3).

En el presente trabajo se considerarán las propuestas realizadas por: Das et al. (2018), Abdullah et al. (2013), De Oliveira Andrade Filho et al. (2012), El-Sawy et al. (2016), Carrillo de la Cruz et al. (2015), Hashim (2012) y Prasad et al. (2013); como la base para el reconocimiento los lineamientos de la zona de estudio. Sin embargo, para mejores resultados se realizaron algunas modificaciones con respecto a los insumos empleados para el análisis.

Para la identificación y mapeo de los lineamientos de la zona de estudio, se utilizó el Modelo Digital de elevación ALOS PALSAR (ASF, 2017), obtenido desde sitio web de [Alaska Satellite Facilities](#) (ASF, 2017). Se optó por estas imágenes en lugar de las



imágenes LANDSAT como lo sugiere la bibliografía, debido a que las imágenes del DEM ALOS PALSAR ofrecen una resolución espacial de 12,5 m; lo que permite visualizar con mayor detalle el entorno topográfico. Además, la precisión de los lineamientos extraídos depende mucho de la resolución espacial de las imágenes utilizadas, es decir, se obtendrán mejores resultados al emplear imágenes de mayor resolución (Prasad et al., 2013). Para cubrir la zona de estudio se utilizaron 4 imágenes DEM ALOS, las cuales posteriormente se unieron unidas mediante la herramienta de mosaico de un programa SIG.

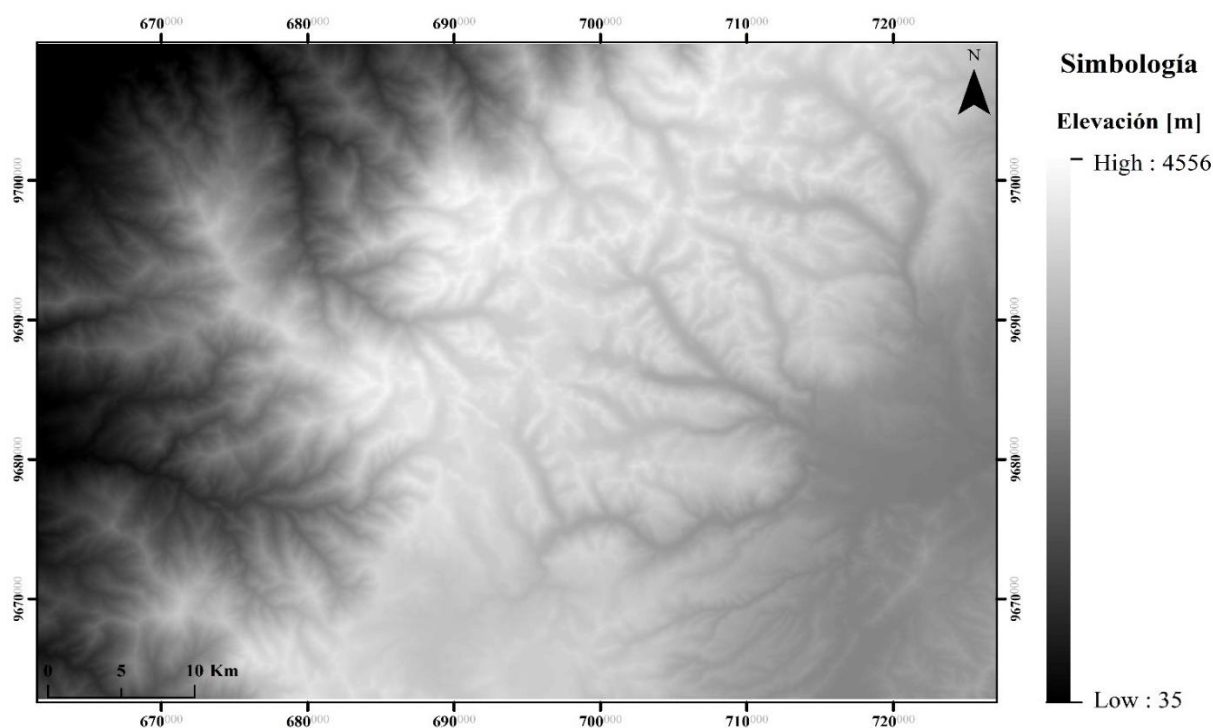


Figura 4.5 Representación del Modelo Digital de Elevación

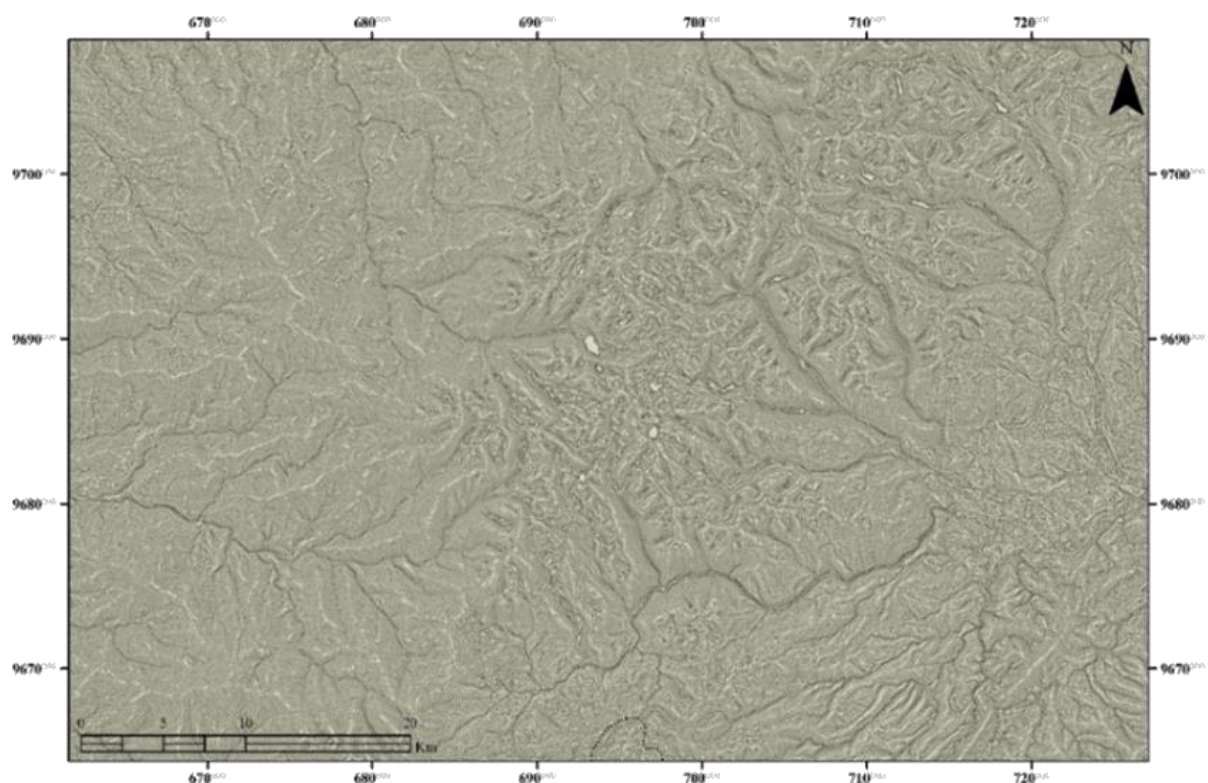
#### 4.1.2.1. Procesamiento del DEM

Una vez obtenido el DEM del área de estudio, se optó por la generación del **ÍNDICE DE POSICIÓN TOPOGRÁFICA (TPI)**, en lugar de la imagen de relieve Hillshade como señala Das (2018), debido a que al emplear el Hillshade se debían generar diversos modelos con diferentes ángulos de azimut y de esa manera asegurar un mejor resultado al realizar la extracción de los lineamientos. Dado, a que nuestra zona de estudio es muy accidentada emplear el Hillshade no fue una opción viable.

Se realizó el análisis del Modelo Digital del Terreno mediante el **ÍNDICE DE POSICIÓN TOPOGRÁFICA (TPI)** (Figura 4.6) con tamaño de celda de 7x7, debido a que esta

herramienta permite discriminar zonas llanas, de zonas de pendiente pronunciada; permitiendo así diferenciar zonas que corresponden a cimas de montañas o, por lo contrario, zonas de valles.

De acuerdo con el tamaño de celda (píxel o distancia) utilizado en el análisis de vecindad que realiza el TPI, se obtendrán resultados determinados. Mientras más pequeño el tamaño de celda mayor precisión y detalle al identificar zonas. Rangos de valores más amplios generaran un TPI más general que no realza los accidentes geográficos pequeños (Roberto, 2017).



**Figura 4.6** Índice de Posición Topográfico (TPI) tamaño de celda 7x7

#### **4.1.2.2. Extracción de los lineamientos**

Luego de obtener el Índice Topográfico, se procedió a realizar la extracción automatizada de los lineamientos. Para esto se utilizó el módulo LINE de una versión demo del software PCI Geomatic (2016). La longitud y cantidad de lineamientos extraídos depende de los parámetros de entrada que se asignen al módulo LINE. El algoritmo que emplea LINE de PCI Geomatic, consiste en tres etapas: detección de bordes, umbrales y finalmente extracción de curva (Abdullah et al.,2013). Los parámetros del algoritmo utilizados para el procesamiento se muestran en la Tabla 4.5:

**Tabla 4.5** Parámetros de ajuste del módulo LINE, PCI Geomatic

<b>Parámetros</b>	
<b>RADI</b>	Radio de filtro en píxeles
<b>GTHR</b>	Umbral de gradiente de borde
<b>LTHR</b>	Umbral de la longitud de la curva
<b>FTHR</b>	Umbral de error de ajuste de línea
<b>ATHR</b>	Umbral de diferencia angular
<b>DTHR</b>	Umbral para vincular la distancia

Fuente: *PCI Geomatic Manual, 2013*

La extracción de lineamientos se llevó a cabo modificando los parámetros antes mencionados. Se obtuvieron 3 conjuntos de valores umbral que se ajustaban a la zona de estudio (Tabla 4.6). Los parámetros obtenidos se muestran a continuación:

**Tabla 4.6** Parámetros válidos para generación de dato en la zona de estudio

<b>Parámetros</b>	V1	V2	V3
<b>RADI</b>	20	20	20
<b>GTHR</b>	100	100	100
<b>LTHR</b>	30	40	30
<b>FTHR</b>	10	10	10
<b>ATHR</b>	30	30	30
<b>DTHR</b>	10	40	30

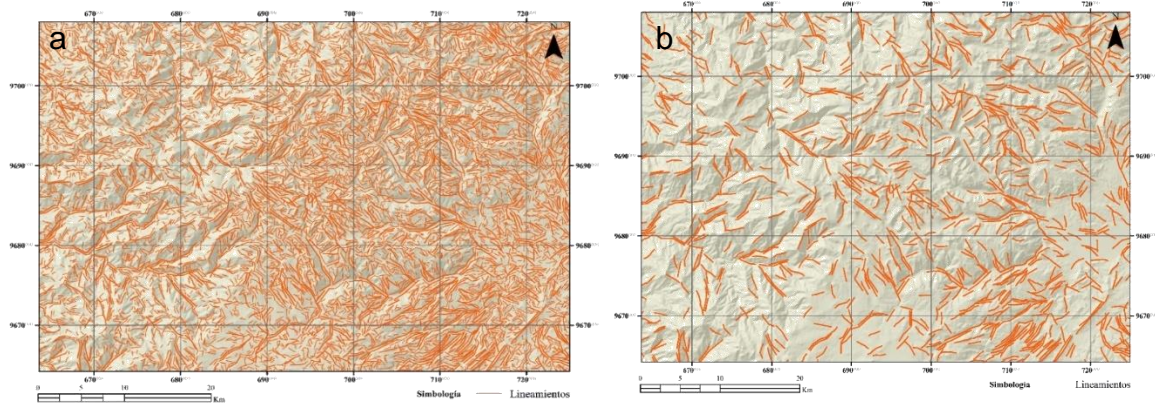
A pesar de que los lineamientos obtenidos con los 3 grupos de parámetros se ajustaban a la zona, se seleccionan los lineamientos adquiridos con los parámetros V3 (Tabla 4.6) ya que se percibe mantienen una mayor relación con las estructuras de la zona. Los resultados obtenidos en PCI se exportan a formato Shapefile, para luego ser analizados en un software SIG.

#### **4.1.2.3. Filtro de los Lineamientos**

Tal y como se observa en la Figura 4.7a se obtiene una gran densidad de líneas, esto es debido, a que al extraer automáticamente los lineamientos el programa utilizado muestra todas las posibles características lineales. Dada la extensión del área de estudio y la escala de trabajo (1:50000), se procedió a filtrar los lineamientos acordes a su longitud; inicialmente se depuraron estructuras menores a 500m debido a que visualmente no eran representativas.

Luego de realizado este paso, se observó que persistían grandes cantidades de lineamientos de extensión poco considerable que generaban ruido y alteraban la visibilidad de las estructuras significativas. Por ello, se continuó depurando el contenido

de lineamientos, hasta que se observó que los lineamientos mayores a 1400m del parámetro V3 se adaptan a mejor al relieve de la zona de estudio sin generar datos que perturben la visibilidad. Este proceso se ejecutó en un software SIG.



**Figura 4.7** a) Lineamientos obtenidos mediante la extracción automatizada. b) Lineamientos después de la depuración

#### 4.1.2.4. Clasificación de los Lineamientos

Una vez realizado el filtro, se obtiene una imagen limpia. Para este punto, se clasificaron los lineamientos como estructuras geológicas, puesto que hasta aquí solo eran líneas que exhibían la forma del terreno. En este apartado se utilizaron estos lineamientos como guías para determinar lineamientos geológicos y fallas (inferidas) en la zona. La interpretación estructural se basó en criterios visuales, tales como: el cambio de la forma del relieve, rupturas del terreno y los cambios de patrones de drenaje.

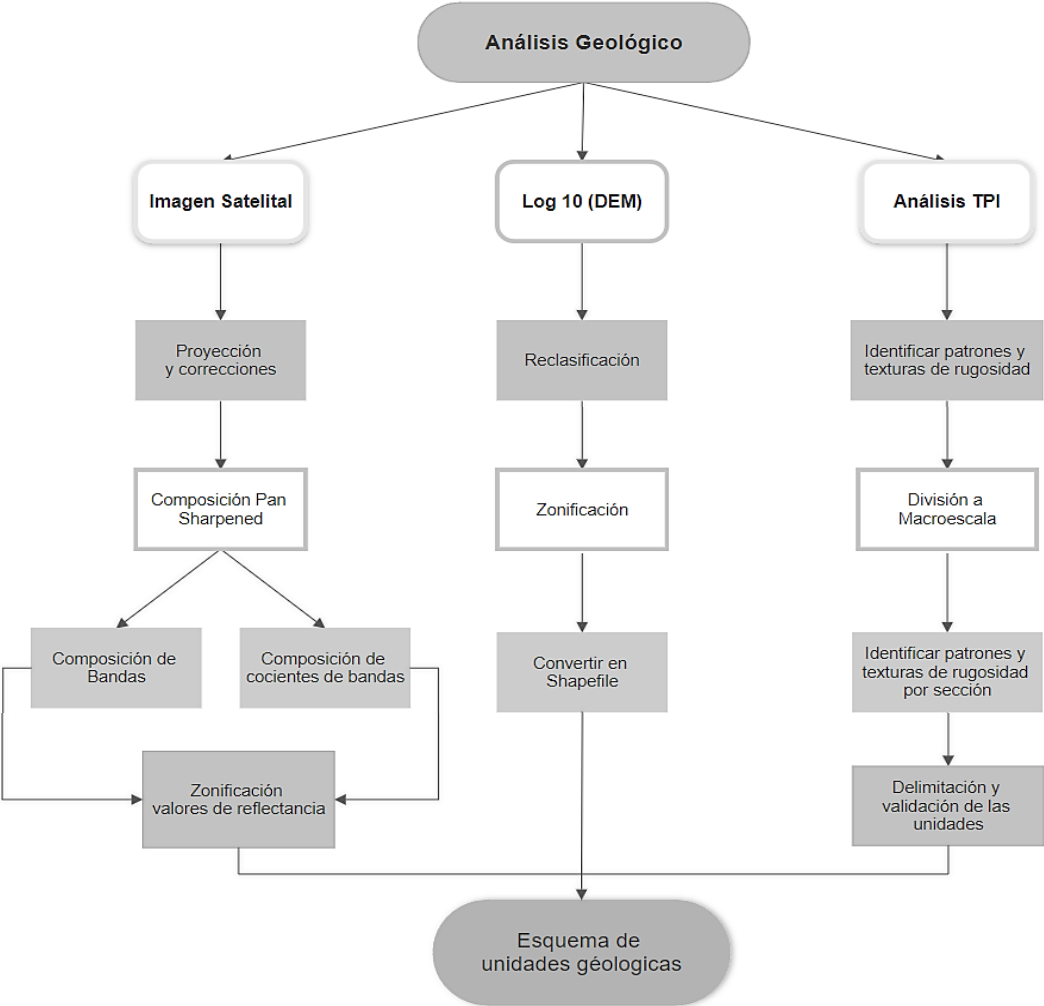
García et al. (2008) establece que los patrones de drenaje pueden ser grandes indicadores de características estructurales de una zona, de acuerdo a lo siguiente:

- i. Las desviaciones desde un patrón dendrítico al gradiente topográfico regional son consideradas drenajes anómalos, los cuales a su vez pueden producto de discontinuidades estructurales y litológicas
- ii. Los ríos definen sus valles a lo largo de zonas de debilidad, estas zonas de debilidad pueden ser originadas por el tipo de litología o también por la presencia de estructuras tectónicas como fallas y fracturas.

El trabajo consistió en la interpretación estructural de los lineamientos, en base a criterios visuales como cambios en la forma del relieve, quebradas muy profundas y lineales, cambios en los patrones de drenaje, la morfología de los cauces de los ríos, comportamiento muy lineal y alineaciones de las cimas de las montañas, rupturas del

terreno. El análisis de los lineamientos se realizó mediante la interpretación de estos en Google Earth y en un software SIG, luego se definió cuál de estos exhibían un comportamiento estructural y se catalogaron estas estructuras en dos grupos: fallas inferidas y lineamientos geológicos. Una vez obtenido nuestro sistema de estructuras del sector, se realizó una verificación y comparación de los resultados con la cartografía geológica de la zona, tales como el de Dunkley (1997) y la hoja geológica de Cuenca (2017). Finalmente, se realizó un esquema de fallas de la zona.

**4.1.3. Análisis geológico**



**Figura 4.8** Flujo metodológico para el análisis geológico

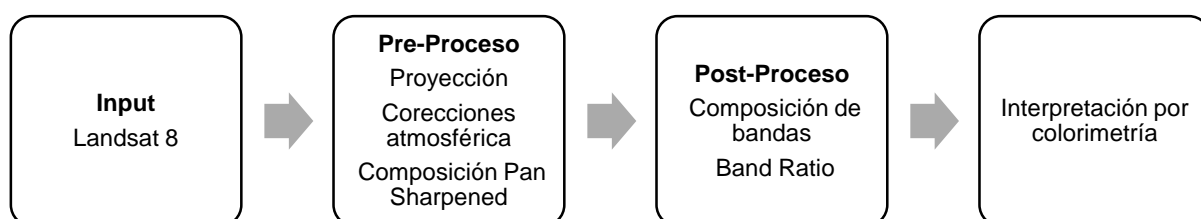
Para esta fase se realizaron tres diferentes procesos (Figura 4.8) y con estos se logró discriminar y definir las variaciones litológicas existentes en la zona de estudio. El primer proceso consistió en el análisis de imágenes satelitales, por medio de este se realizó una

primera zonificación de los materiales del área de interés, en base a sus valores de reflectancia.

Además, con este análisis fue posible identificar zonas de interés mineral útiles para la exploración geológica y minera. En el segundo proceso se realizó un  $\text{Log}_{10}$  del modelo DEM, con el cual se homogeniza la topografía de la zona y permite observar de mejor manera las variaciones que sirvieron como guía para determinar algunos cambios litológicos. Para la tercera parte, se llevó a cabo una discretización de la topografía mediante el análisis y diferenciación de la rugosidad y textura del TPI. Esta discretización ayudo a diferenciar zonas en las cuales existen cambios en el comportamiento de la topografía.

#### 4.1.3.1. Procesamiento de la imagen Landsat 8

Para el análisis de la imagen satelital, se utilizó una imagen LANDSAT 8 OLI/TIRS Level tomada en nov del 2018, obtenida de desde el sitio web de la USGS EarthExplorer. Se opto realizar el procedimiento con esta imagen, sobre la imagen ASTER, debido a que las imágenes ASTER coincidentes con la zona de estudio presentaban una nubosidad mayor al 30%, además de que se necesitaban 6 imágenes para poder cubrir en su totalidad el AOI y estas presentaban una ventana temporal muy grande entre ellas. La imagen Landsat utilizada Para este análisis se considerarán las metodologías propuestas por: Mohy et al. (2017), Al-Nahmi et al. (2016), Hung et al. (2013) y Chica-Olmo (2002); como la base para el reconocimiento de la zona de estudio.



**Figura 4.9** Flujo de la metodología de análisis de la imagen Landsat 8 OLI/TIRS.

Los procesos antes descritos (Figura 4.9), se realizan en el software ArcGIS. El primer paso es proyectar la imagen al sistema WGS 1984 Zona 17 S, luego se hicieron las correcciones necesarias y se realizó un Pan sharpened con la banda pancromática para mejorar el detalle. Las bandas de las imágenes Landsat 8 que ayudan en el análisis geológico son:

- Banda 7 adsorbe los valores de los minerales arcillosos, sulfatos y óxidos.
- Banda 6 discrimina suelo de la roca, da indicios de contenido de hierro.
- Banda 4 discrimina el suelo de la vegetación.

Para la obtención de los resultados de la primera fase del análisis geológico, se realizó la composición de bandas RGB, y la composición RGB de los cocientes de bandas.

El **cociente de bandas** es un método muy utilizado en la construcción de índices espectrales usados en el monitoreo de coberturas de suelo, contaminación y contenido de minerales (Hung et al., 2013). Siendo un aspecto importante para considerar, debido a que permite conocer el comportamiento espectral de los minerales mediante el realce de las diferencias espectrales entre las bandas empleadas. La relación entre la banda 6 (1,56 – 1,65  $\mu\text{m}$ ) y 7 (2,11 – 2,29  $\mu\text{m}$ ) de la imagen Landsat 8 OLI/TIRS permite detectar la presencia de filosilicatos como un grupo, esto se debe a que estas bandas son absorbidas. Los minerales de óxidos de hierro, tales como hematita, goethita y jarosita, comúnmente se forman durante procesos de alteración hidrotermal. El cociente entre las bandas 4 y 2 ayuda en el reconocimiento de los minerales de óxido de hierro debido a la alta reflectancia en la banda 4 (0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ) (Hernández et al., 2002).

Una vez considerados diversos valores de cocientes de bandas, se selecciona el método para construir índices espectrales de Chica – Olmo (Tabla 4.7), debido a que este permite mapear la distribución de óxido de hierro, minerales ferrosos y minerales de arcilla.

**Tabla 4.7** Algoritmos de índices empleados

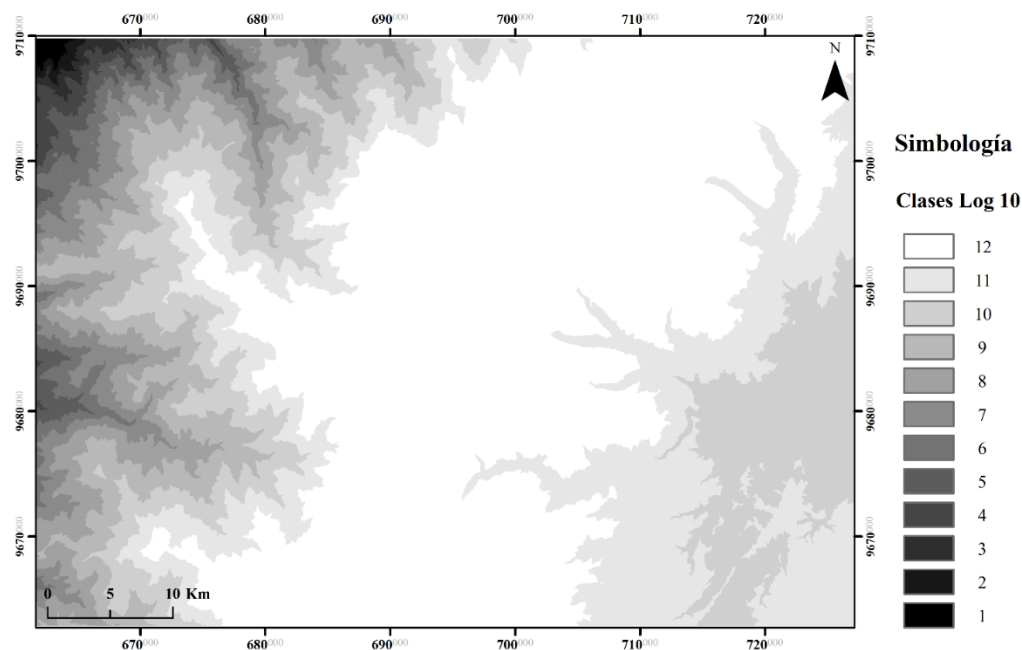
Canales	Ratios	Representación
Red	6/7	Minerales arcillosos
Green	6/5	Minerales ferrosos
Blue	4/2	Óxido de hierro

Fuente Chica – Olmo, 2002

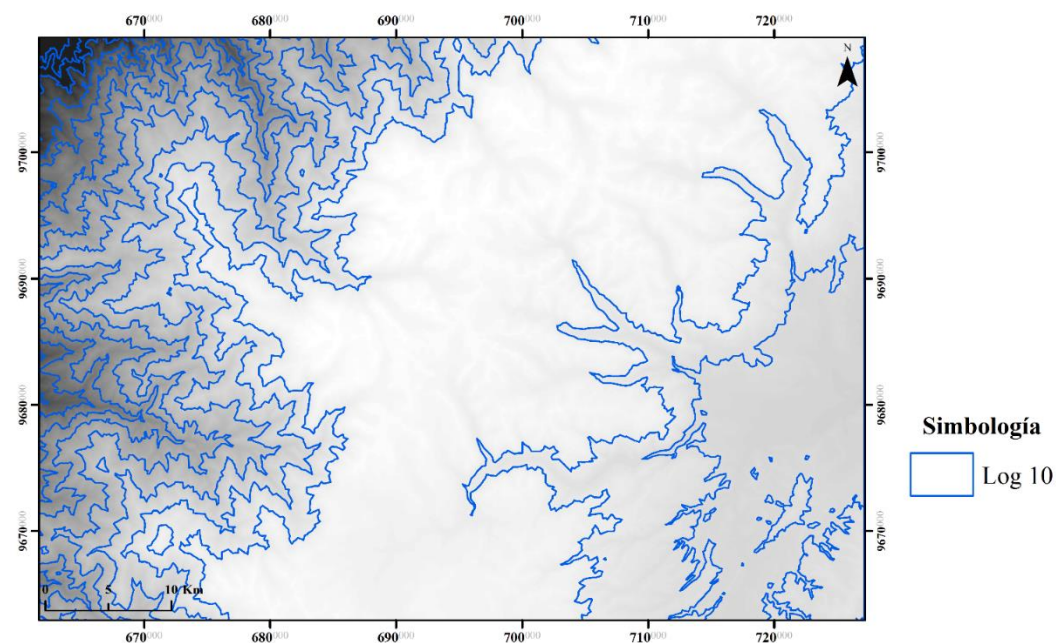
#### 4.1.3.2. $\text{Log}_{10}$ del DEM

Mediante el  $\text{Log}_{10}$  del DEM se realizó una homogenización del terreno, este permite tener una mejor comprensión del comportamiento de la zona. Se generó este recurso mediante la calculadora ráster de un software SIG, se ingresó la función  $\text{Log}_{10}(\text{DEM})$ . Luego se realizaron algunas reclasificaciones al  $\text{Log}_{10}$  del DEM, se fueron probando

raster de diferentes clases entre estos, raster con 12, 15, 25 y 30 clases. A su vez, se analizó cuál de estos se adaptaba mejor a las condiciones topográficas de la zona, siendo el raster de 12 clases (Figura 4.10), con el cual se realiza una mejor zonificación del área. Una ventaja del uso del  $\text{Log}_{10}$  es que al estar en formato ráster puede ser llevado a formato shapefile (Figura 4.11), reduciendo así el tiempo de dibujo de los contactos.



**Figura 4.10** Log 10 del DEM reclasificado a 12 clases



**Figura 4.11** Log 10 del DEM reclasificado en 12 clases en formato shapefile

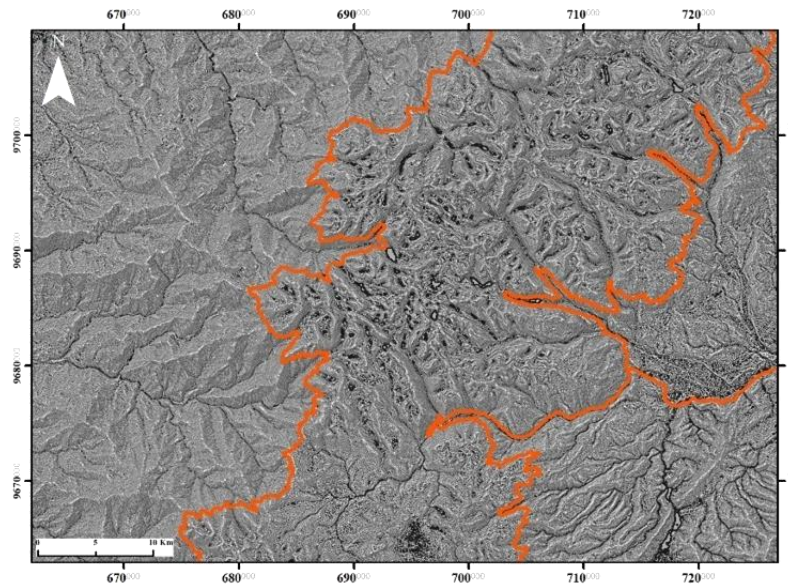


#### **4.1.3.3. Identificación de las unidades geológicas**

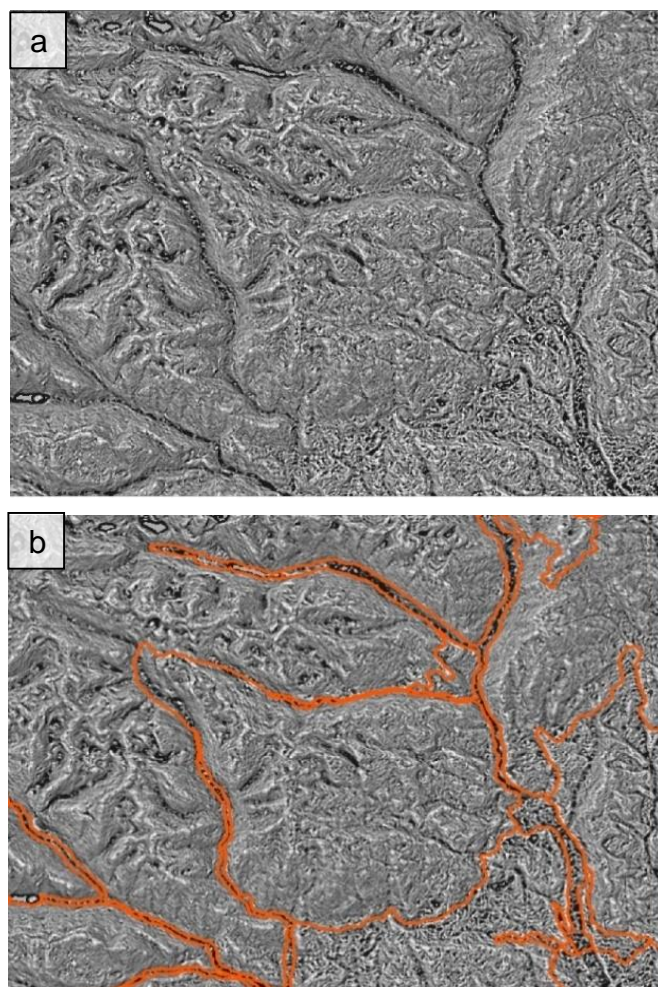
Sánchez (1998) propone un análisis de la variabilidad del relieve a partir de modelos digitales del terreno; es decir, el tratamiento de datos topográficos a partir de un DEM, este proceso permite por medio del análisis de la rugosidad elaborar una imagen en la cual se muestre la variabilidad topográfica de una zona. De acuerdo con lo anteriormente descrito, nuestro trabajo se basó en el análisis, diferenciación y delimitación de áreas contrastada entre alta, baja y media rugosidad.

Estos cambios en los patrones y texturas de rugosidad evidencian una variabilidad topográfica; a su vez estos cambios en la forma del terreno (Dirik, 2005) pueden ser considerados como una característica para identificar y delimitar cambios geológicos. Es decir, se realiza una discretización topográfica con la finalidad de diferenciar los cambios litológicos y de esa manera poder definir las diferentes unidades geológicas presentes en la zona. La identificación de los patrones de rugosidad se realizó mediante el empleo del Índice de Posición Topográfica, los patrones identificados se van dibujando ya sea en físico sobre una imagen del TPI, o de forma digital en formato shapefile mediante un software SIG.

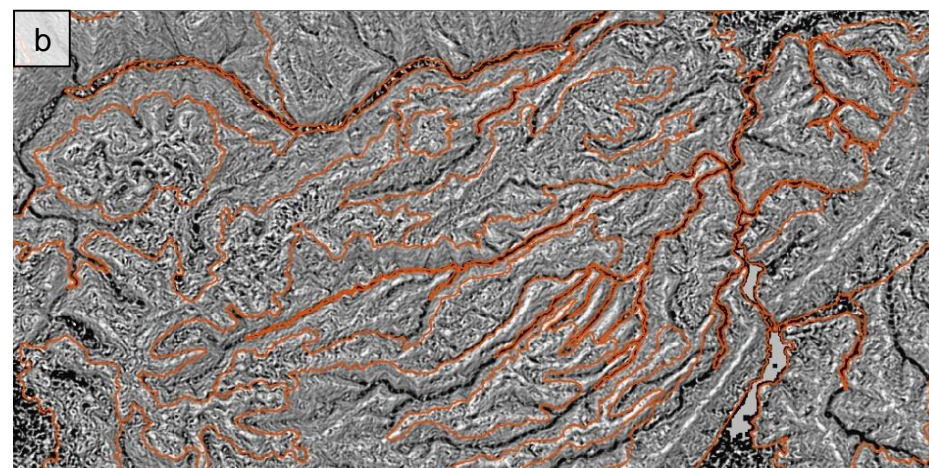
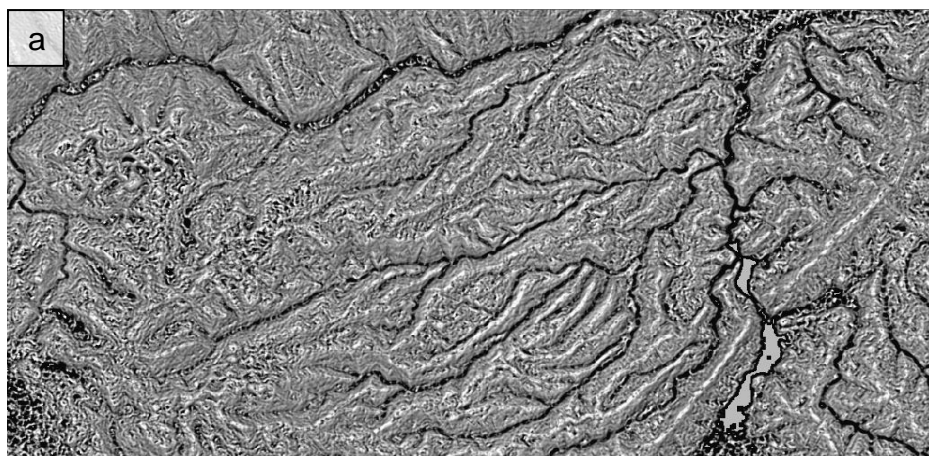
Dependiendo de la extensión del área de estudio, puede realizarse inicialmente una diferenciación a macroescala, de tal forma que se establezcan regiones que evidencien un comportamiento aparentemente similar y así tener una mejor apreciación del comportamiento general de la zona (Figura 4.12). Posterior a eso, se realizó la zonificación con un mayor detalle (Figura 4.13 a 4.18) en las regiones previamente identificadas. Una vez delimitados los cambios de patrones, se generaron áreas con características de rugosidad similares, estas áreas se denominaron unidades y a su vez se les asignó un número a cada una, con la finalidad de tener un mejor registro de estas.



**Figura 4.12** División a macroescala de acuerdo con los patrones de rugosidad

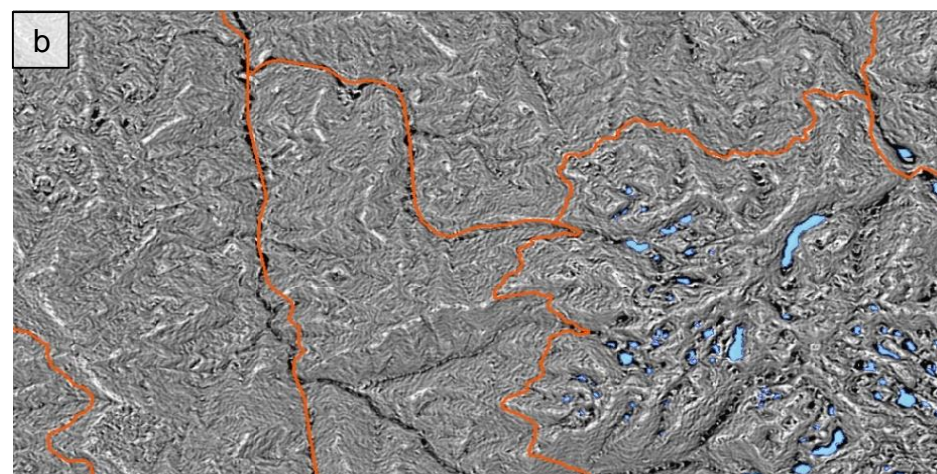
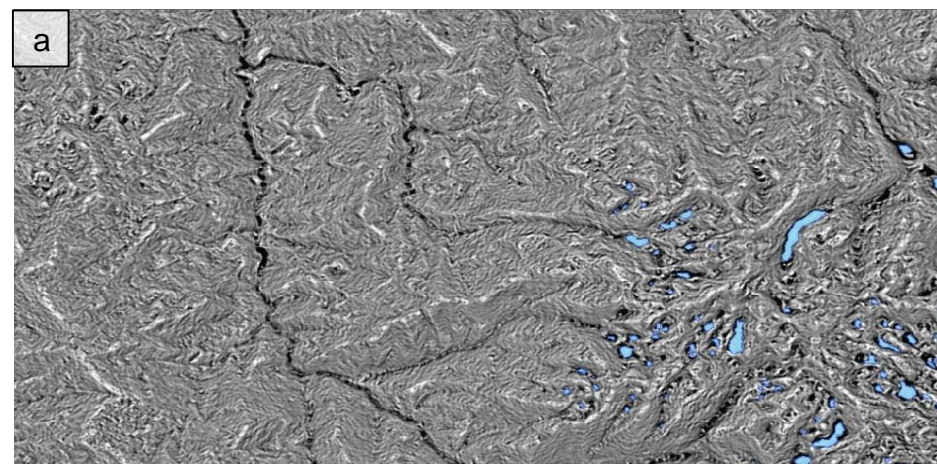


**Figura 4.13** Identificación de patrones a partir de la rugosidad del TPI  
 (a) Vista de una sección Este del TPI; (b) Patrones identificados que delimitan diferentes texturas de rugosidad



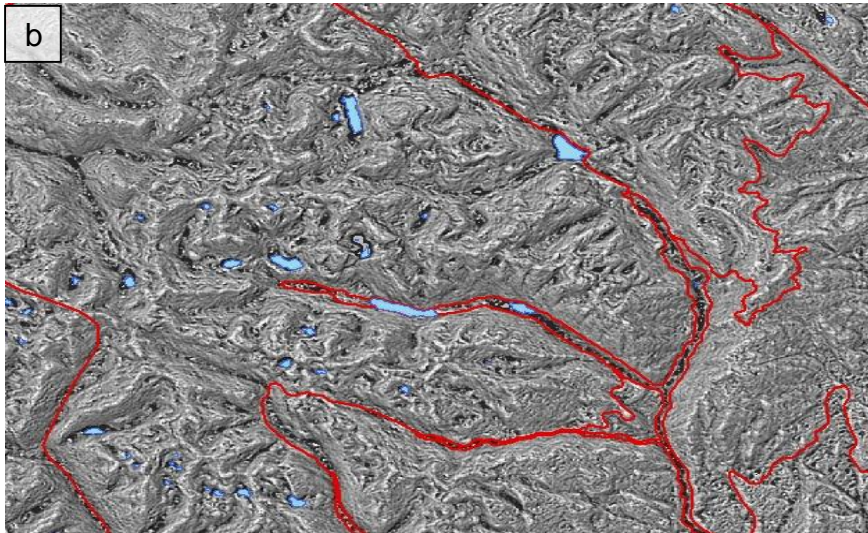
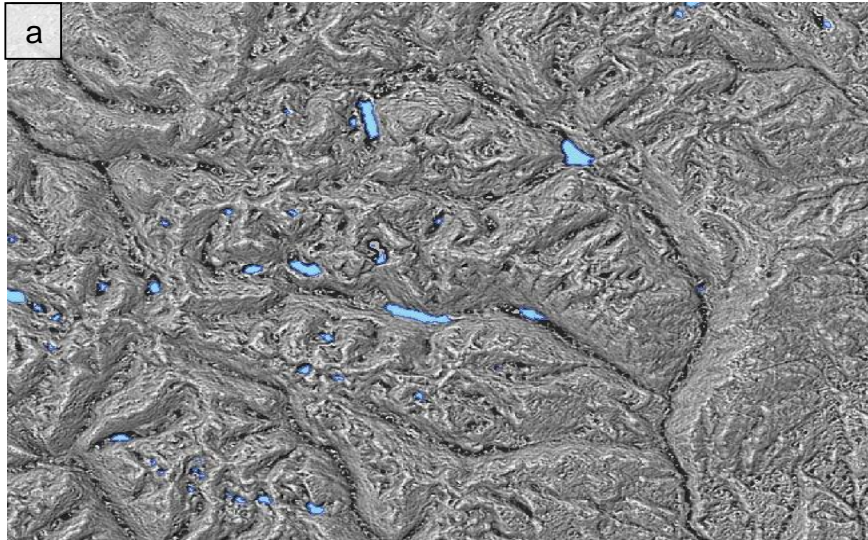
**Figura 4.14** Identificación de patrones de rugosidad zona SE

a) Vista del TPI sin la delimitación de secciones; b) Patrones identificados entre rugosidad alta y baja en la zona SE

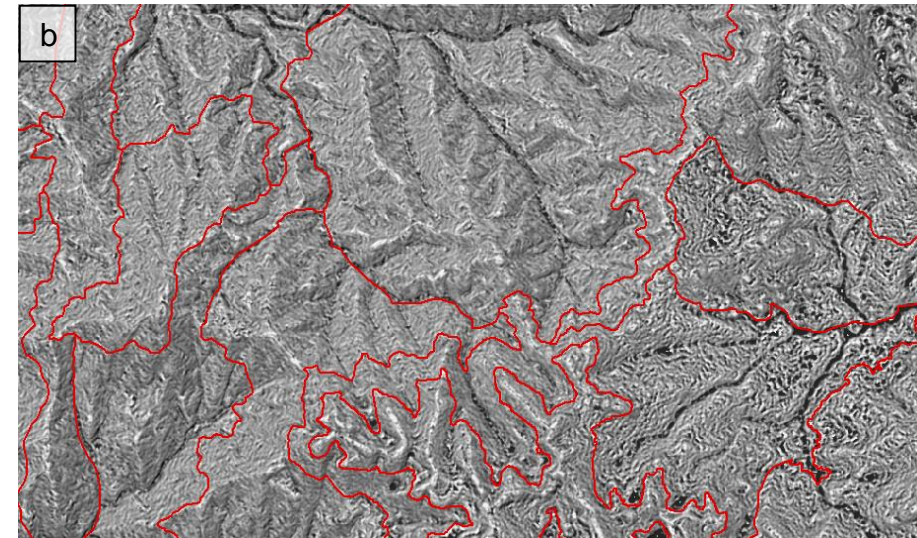
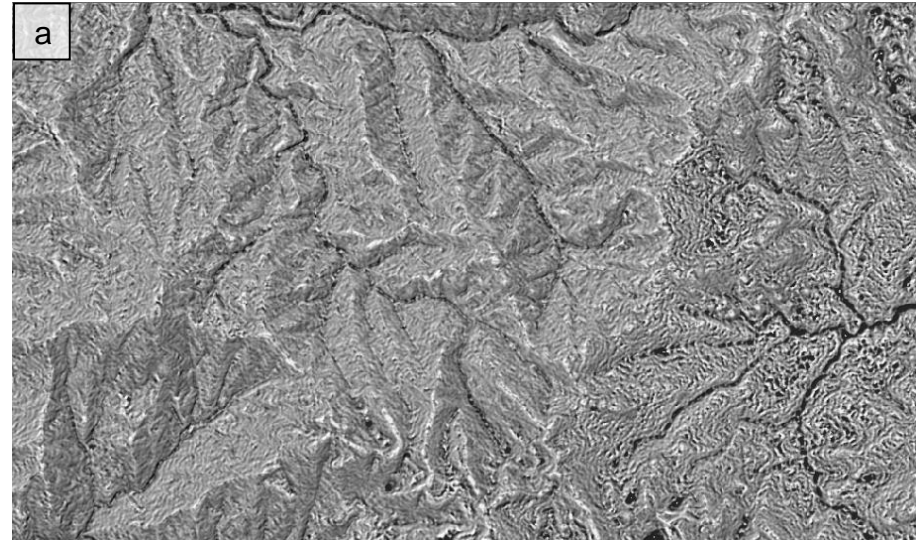


**Figura 4.15** Identificación de patrones de rugosidad zona centro Oeste

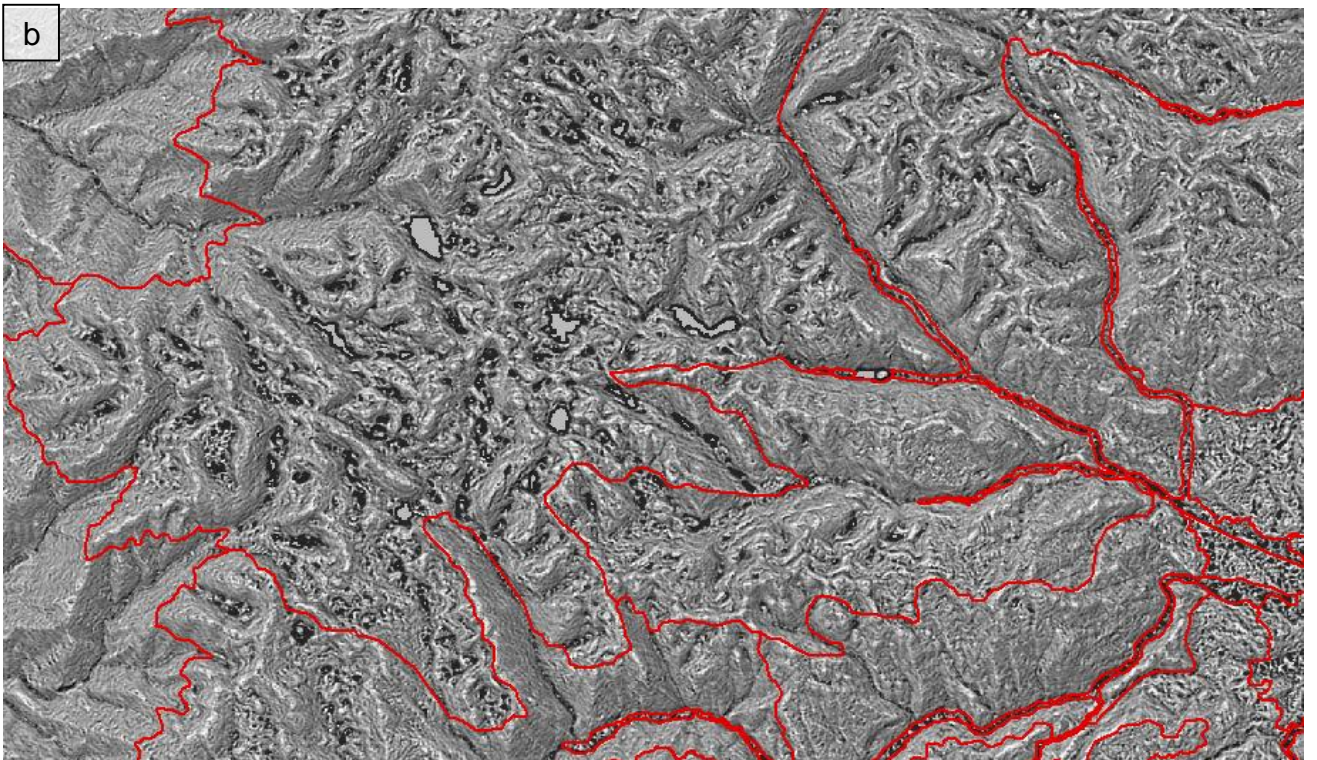
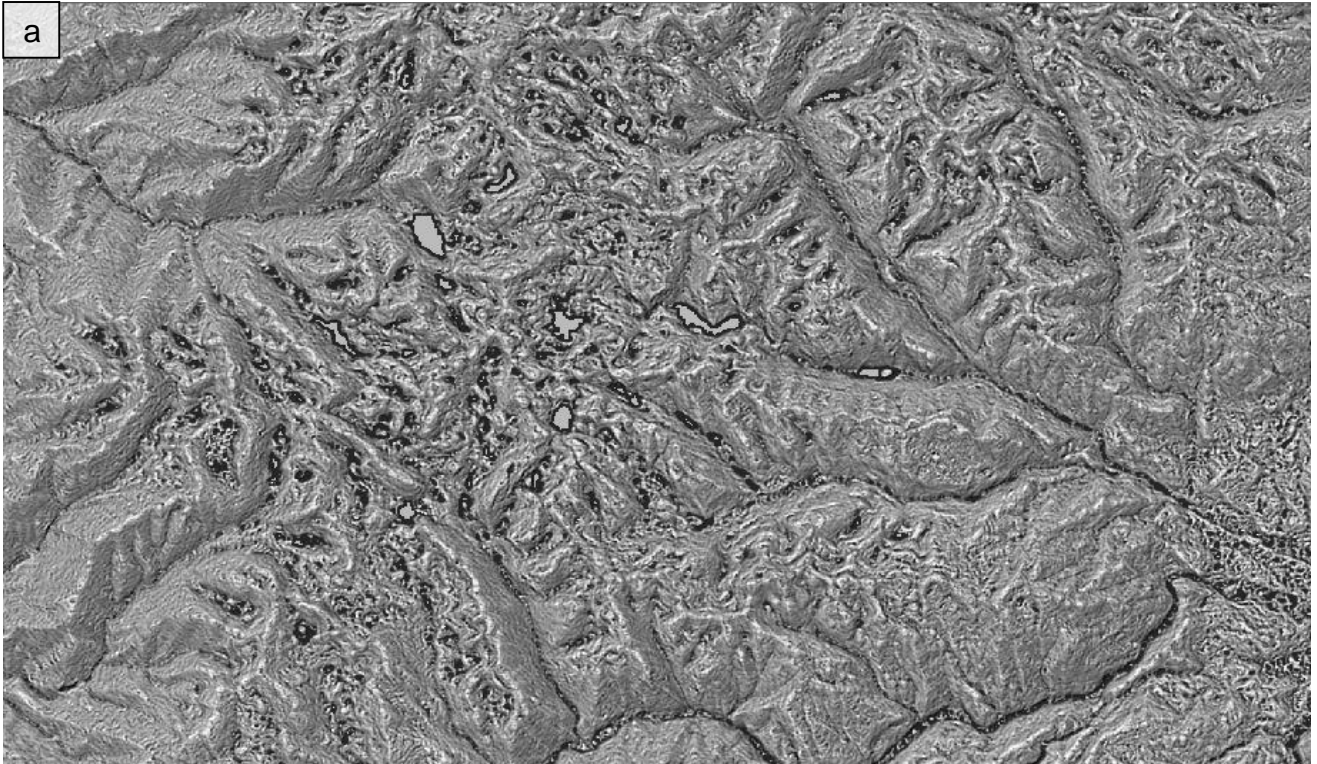
a) Vista del TPI sin la delimitación de secciones; b) Patrones y cambios de texturas identificados entre rugosidad alta y baja en la zona centro Oeste



**Figura 4.16** Identificación de patrones de rugosidad zona NE  
a) Vista del TPI sin la delimitación de secciones; b) Patrones y cambios de texturas identificados entre rugosidad alta y baja en la zona NE



**Figura 4.17** Identificación de patrones de rugosidad centro sur  
a) Vista del TPI sin la delimitación de secciones; b) Patrones y cambios de texturas identificados entre rugosidad alta y baja en la zona centro sur



**Figura 4.18** Identificación de patrones de rugosidad en el centro del AOI

a) Vista del TPI sin la delimitación de secciones; b) Patrones y cambios de texturas identificados entre rugosidad alta, media y baja en la zona central del AOI

#### 4.1.3.4. Ajuste de las unidades

Luego se realizó un ajuste en la delimitación de las unidades identificadas previamente, para este punto se redefinieron algunas formas y contactos entre unidades. Para ello, se tuvieron en consideraron los cambios en las morfologías de los drenajes, el comportamiento lagunar, las geoformas y las estructuras tectónicas (fallas y lineamientos) de la zona.

De esta manera, incorporando la información de todos los procesos realizados para este análisis se genera el esquema de unidades geológicas; este esquema incorpora información no solo geológica, sino estructural y cartográfica en general (vías, ríos, poblados entre otros).

#### 4.1.3.5. Validación de la información

Para validar las unidades, se realizó una comparación del esquema de unidades obtenido previamente con la cartografía geológica disponible de la zona, con el fin de conocer similitudes o diferencias entre estos y así poder definir el porcentaje de similitud existente. Esta comparación se realiza con respecto a: una sección del mapa Geológico de Ecuador, a la información de la carta geológica CUENCA a escala 1:100000 en formato digital obtenido de la página del Sistema Nacional de Información ([SNI](#)), y con la actualización de la Hoja Geológico de Cuenca (HOJA 53 CT NV F4) a escala 1:100000.

Se calcula un porcentaje de similitud entre la Hoja Geológica actual de Cuenca y nuestro esquema de unidades. Este porcentaje se calcula como un promedio (*ec.* 4.12) de los porcentajes de coincidencia (*ec.* 4.11) de área entre algunas unidades y formaciones. Se realizó este proceso con 5 secciones de nuestro esquema y sus correspondientes en la cartografía base (Tabla 4.8).

$$\% \text{ por unidad} \cong \frac{\text{área}_{\text{Unidad}}}{\text{área}_{\text{Formación}}} \cdot 100 \quad (4.11)$$

$$\% \text{ general} = \frac{\sum_{i=1}^n \% \text{ por unidad } i}{n} \quad (4.12)$$

**Tabla 4.8** Comparación entre áreas

<b>Unidades</b>	<b>Área [Ha]</b>	<b>Formación</b>	<b>Área [Ha]</b>
U <sub>6</sub>	8511	Turi	<b>9736</b>
U <sub>8</sub>	3197	Quinsacocha	4435
U <sub>20</sub>	8454	Intrusivo de Diorita	12166
U <sub>21</sub>	27233	Chanlud	37835
U <sub>24</sub>	9650	Plancharumi	10251

La finalidad de realizar la comparación y establecer las similitudes con la cartografía, es poder a nuestras unidades reconocerlas como formaciones geológicas. Para establecer la equivalencia entre nuestras unidades y las formaciones se superpusieron los mapas y se analizaron las áreas coincidentes, a partir de esto se asignó a las unidades el nombre de la formación con mayor coincidencia en cuanto a la posición y dado el caso de que alguna de las unidades cubra dos formaciones se asignara a la unidad el nombre de la formación de mayor área.

#### **4.1.4. Elaboración del mapa geológico base**

Una vez obtenida la equivalencia de las unidades con respecto a las formaciones geológicas de la zona, la información debe ser presentada como un mapa geológico, esta representación se realiza en software SIG. Dada las condiciones y escala en que se trabajó, lo que se obtiene es un mapa geológico base o preliminar. Es preliminar debido a que aún debe de corroborarse mediante el trabajo de campo.

Una de las consideraciones de gran importancia es la correcta asignación de colores: estos se asignaron de acuerdo con la edad geocronológica. El mapa debe de contar con su respectiva leyenda y simbología. Dentro de la simbología está inmersa una representación cronoestratigráfica de las formaciones del área de estudio, los símbolos geológicos y cartográficos utilizados.

# CAPÍTULO 5

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el análisis de resultados, se revisa en detalle lo que se obtuvo a partir de la aplicación de la metodología. Se realiza una explicación de los resultados obtenidos en las diferentes fases de desarrollo del proyecto: geomorfológico, de estructuras y de unidades. Además, se presenta el mapa geológico como resultado final de todo el proceso, se analizan las zonas y el porqué de los resultados.

En el análisis geomorfológico se explica la clasificación fisiográfica obtenida con 10 clases, con sus respectivas pendientes y desniveles. Se analiza también, el esquema de estructuras, en el que se marcaron los lineamientos y fallas inferidas de la zona.

### 5.1. Mapa geomorfológico

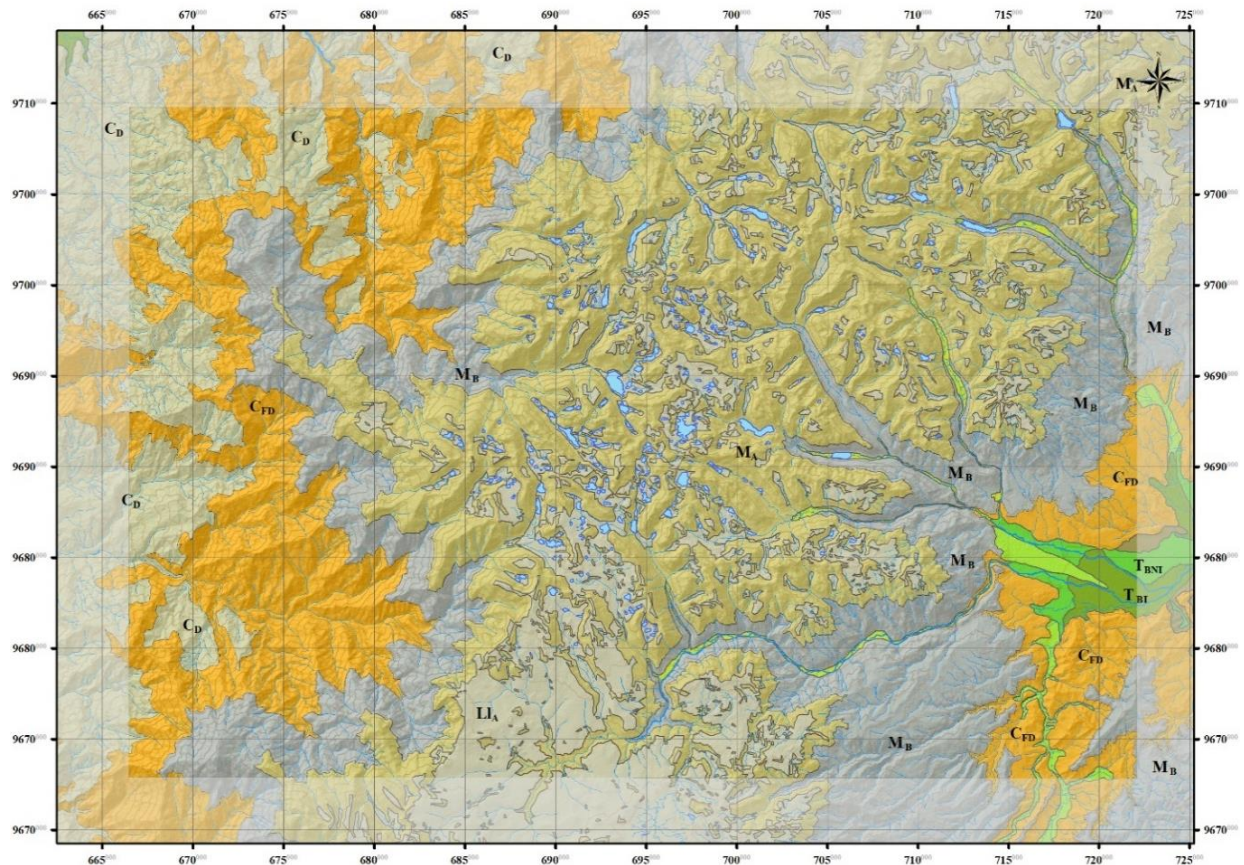
Una vez realizado el procedimiento descrito para esta fase del estudio, se redefinió la clasificación geomorfológica, para la unidad fisiográfica correspondientes a colinas. Se identificaron 10 unidades fisiográficas, entre terrazas bajas, medias y altas, lomadas, colinas, montañas bajas, montañas altas y llanuras de ablación.

La zona de estudio se caracteriza por presentar superficies irregulares, con variaciones de elevaciones que van desde los 37 m.s.n.m en la parte NO hasta los 4500 m.s.n.m en la parte central (Parque cajas). El relieve general corresponde a un relieve de montaña, dentro de este se pueden diferenciar paisajes: como el piedemonte en el sector Oeste de la zona de estudio que corresponde a las estribaciones de la cordillera Occidental hacia la planicie costera y a su vez este comprende los sub-paisajes colinados, en la zona centro se tiene paisajes propios de relieves de Cordillera, dentro del cual se encuentran sub-paisajes de montaña.

Los paisajes colinados se encuentran principalmente al oeste, evidencian zonas de alta pendiente y desniveles que van de 0 a 300m, que se clasificaron como colinas disectadas y fuertemente disectadas. Las terrazas clasificadas (Figura 5.1) como inundables y no inundables y las colinas se clasifican como disectadas y fuertemente disectadas puesto que dependen de las características del terreno.



Cada sub-paisaje se encuentra clasificado por su respectivo valor de pendiente y desnivel, a partir de estos resultados se elabora el esquema geomorfológico del área de interés. Ambos valores están relacionados de tal manera que permiten diferenciar las geoformas de la zona de estudio.



**Figura 5.1** Representación de las unidades geomorfológicas identificadas (resultado parcial)

Se puede ver en la Figura 5.1 que la parte central, que está representada con color café claro, tiene un comportamiento geomorfológico similar, y esto se lo clasificó como montaña alta. Dentro de esta, se diferencia un comportamiento semi horizontal correspondiente a la cima de la montaña alta, esto en base al ambiente e información bibliográfica del medio se establece como una zona glacial.

La zona de Cuenca, con color verde claro y verde oliva, corresponde a las zonas intramontanas, presenta depresiones que, dada la actividad fluvial, genera la formación de terrazas medias y terrazas bajas no inundables. De color verde se observan las terrazas altas. Los resultados obtenidos de esta fase del estudio se presentan en forma de mapa, esta representación se la puede observar en el Apéndice A Figura 6.3.

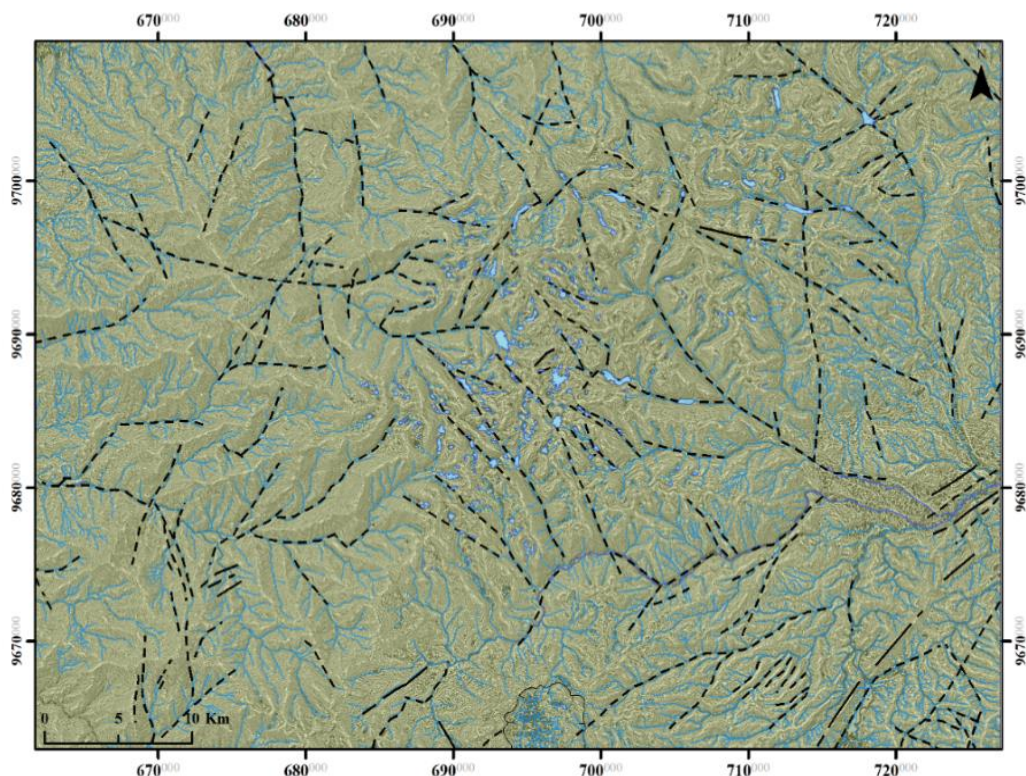
## 5.2. Lineamientos estructurales

Con la extracción automatizada se obtuvieron un total de 8983 líneas que de acuerdo con los parámetros ingresados se adaptaban a las variaciones y linealidades del AOI, en la Tabla 5.1 se muestra la estadística de los resultados obtenidos.

**Tabla 5.1** Estadísticas del análisis de longitud de los lineamientos

<b>Total de Lineamientos</b>	8983
<b>Longitud Mínima</b>	374
<b>Longitud Máxima</b>	6149,25
<b>Longitud Promedio</b>	827,14

Posteriormente se filtraron y eliminaron los lineamientos que no eran representativos, llegando a dejar aquellos lineamientos mayores a 1400 m, estos eran los lineamientos que mejor se adaptaban al AOI. Luego se realizó un análisis de estos, inicialmente se establecieron como líneas de fallas aquellos lineamientos que marcaban zonas de quebradas que exhibían un comportamiento lineal y mantenían una gran extensión longitudinal. También se analizó el comportamiento lineal de las elevaciones, relacionando que esta forzada linealidad está asociada con la presencia de fallas debido a la actividad morfo-tectónica del sector.

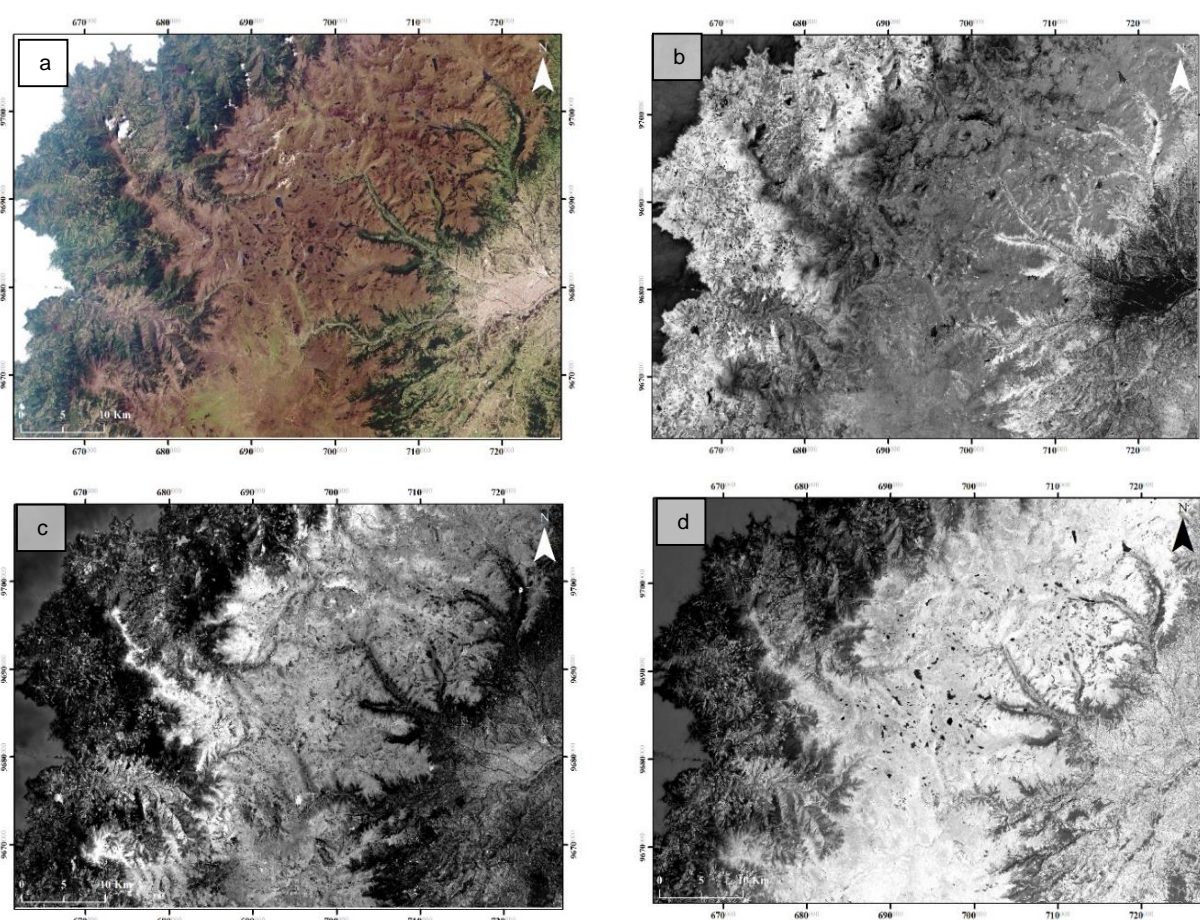


**Figura 5.2** Esquema de estructuras de la zona de estudio

Hasta este punto, el resultado obtenido solo podría considerarse como lineamientos estructurales; posteriormente, se designaron como fallas inferidas aquellas en las que era evidente el alineamiento de los ríos y el desplazamiento de sus cauces, finalmente se elaboró un esquema de las estructuras de la zona (Figura 5.2). De los resultados obtenidos, se distingue que las estructuras de la zona presentan una orientación predominante en sentido NO – SE y en menor escala en sentido NE – SO.

### 5.3. Análisis de la geología

#### 5.3.1. Alteraciones minerales

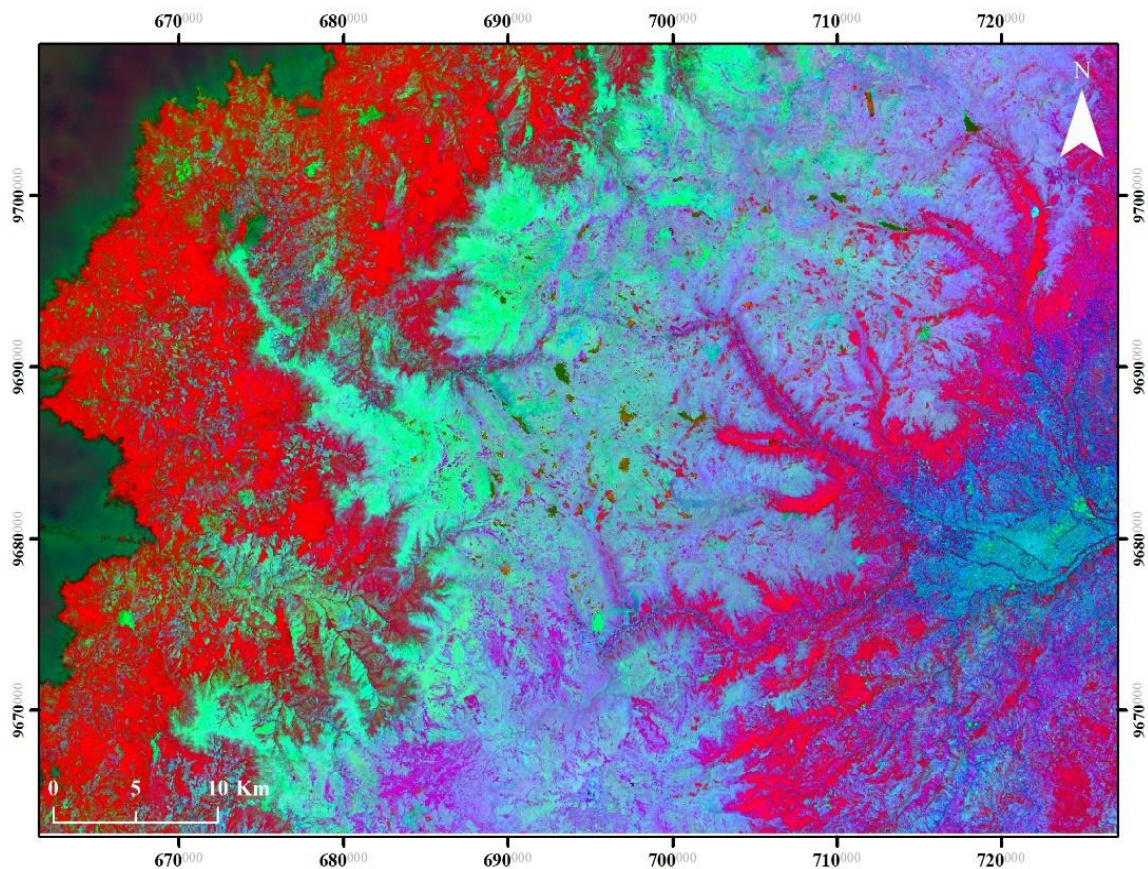


**Figura 5.3** Imagen Satelital Landsat 8 OLI/TIRS; b) Bands ratios 6/7 (arcillas); c) Bands ratios 6/5 (ferrominerales) y d) Bands ratios 4/2 (Óxidos de hierro).

El cociente entre la banda 6 y 7, permite discriminar en tonos brillantes rocas alteradas que presentan abundante contenido de arcilla (Figura 5.3b). La relación de bandas 6/5 destaca los ferro-minerales en tonos brillantes (Figura 5.3c). La relación de bandas 4/2 resalta las zonas con mayor contenido de minerales de óxidos, en la Figura 5.3d las zonas que respondieron positivamente a este índice se muestran principalmente de color

blanco y en tonos claro. Empleando la relación Chica-Olmo los cocientes de bandas 6/7, 6/5 y 4/2 en RGB, no solo se logró distinguir variaciones litológicas del AOI, sino que se identificaron de acuerdo con Sabins (1999) potenciales zonas con presencia de alteración hidrotermal.

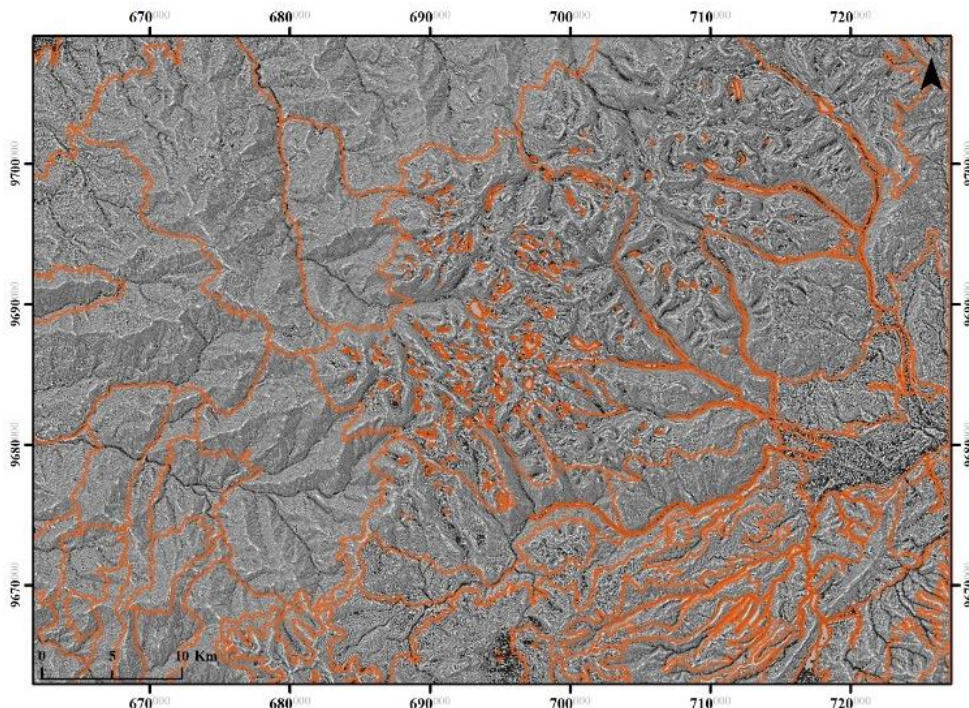
Con el cociente 4/2 se reconocen zonas ricas en óxidos siendo posible encontrar óxidos como hematita, limonita y jarosita, dado su alta reflectancia en el azul. La ratio 6/7 se utilizó para discriminar minerales arcillosos tales como caolinita, illita y montmorillonita, mostrando una gran reflectividad en rojo, estos minerales se muestran en rojo y sus tonalidades en la Figura 5.4; mientras que, el cociente 6/5 muestra alta reflectancia en ferro-minerales. En las zonas magentas y sus tonalidades se tienen óxidos de hierro y arcillas, en tonalidades de azul se distinguen zonas ricas en óxidos de hierro, de color cian se distinguen sectores ricos en óxidos de hierro con ferro-minerales; de verde claro se observan los sectores con ferro-minerales y minerales de arcillas, las tonalidades verdes señalan arcillas en rocas alteradas (Figura 5.4). Siendo las zonas magentas y verde claro las zonas potenciales de roca alterada hidrotermalmente.



**Figura 5.4** Imagen Landsat 8, combinación RGB 6/7, 6/5, 4/2

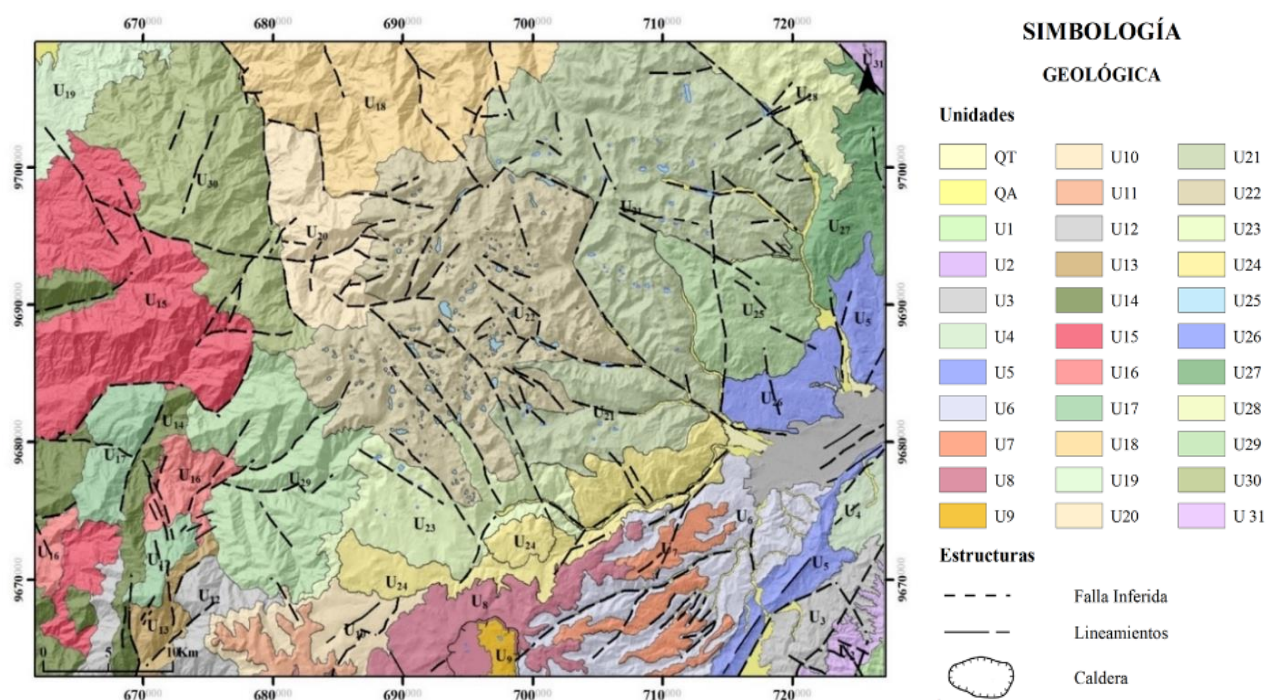
### 5.3.2. Unidades y mapa geológicos preliminar

A partir del análisis de los patrones y texturas de **rugosidad del AOI**, inicialmente se dividió la zona de forma macroscópica en 4 regiones contrastantes, con la finalidad de mejorar el entendimiento del área. Luego continuando con el análisis textural, de continuidad de la rugosidad del TPI, se prosiguió con un análisis a mayor detalle llegando a diferenciar 33 secciones (Figura 5.5), cada unidad presenta un comportamiento distinto de acuerdo con cambios en los patrones y las texturas en el TPI. Las zonas laterales del AOI presentan un gran contraste entre rugosidades altas y bajas, permitiendo así identificar de mejor manera los cambios y por consiguiente definir las unidades. Por otro lado, se tiene la zona central del área de estudio, esta zona es amplia y mantiene un comportamiento muy similar en toda su extensión, es decir no se evidencian contrastes de rugosidad, ni cambios texturales que permitan establecer unidades, esto se debe a que son zonas amplias que presentan una más rugosidad homogénea. La delimitación en la zona central fue posible en gran medida al comportamiento lagunar y cambio en el patrón de drenaje. Siguiendo este proceso de reconocer patrones y cambios de texturas de la rugosidad, se analiza con cautela toda la zona y se obtiene la delimitación de secciones diferenciadas que evidencian claramente los contrastes de rugosidad (Figura 5.5).



**Figura 5.5** Diferenciación a semi-detalle de los patrones y texturas de rugosidad

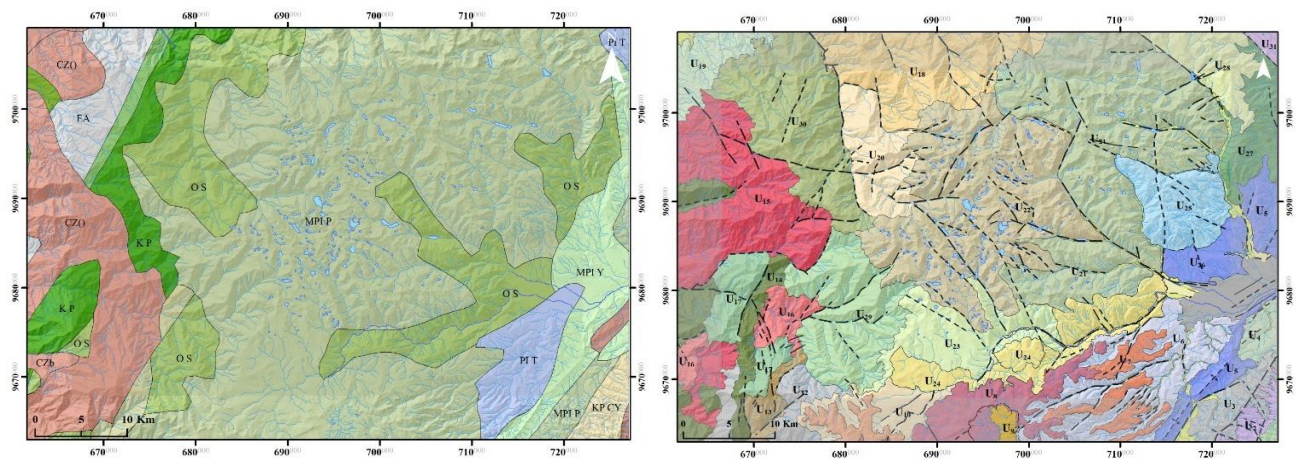
Con este proceso lo que se realizó, fue una discretización de unidades en base a los cambios topográficos de la zona y estos cambios se los reconoce en base a los cambios de rugosidad dentro del TPI. A su vez, estas unidades también serán consideradas como unidades geológicas. Sin embargo, para ser reconocidas propiamente como unidades geológicas estas deben delimitarse teniendo en consideración todos los recursos previamente obtenidos, desde el análisis geomorfológico, estructural y de las imágenes satelitales. Así, se diferenció que algunos contactos entre unidades eran tectónicos, es decir estaban delimitadas por fallas. Posteriormente, se realizó un esquema (Figura 5.6) en el cual se muestran las unidades obtenidas mediante el proceso de identificación de los cambios de rugosidad; se define estas unidades como unidades geológicas dada las consideraciones expuestas previamente.



**Figura 5.6** Representación de las 33 unidades geológicas identificadas

#### 5.4. Validación de los datos

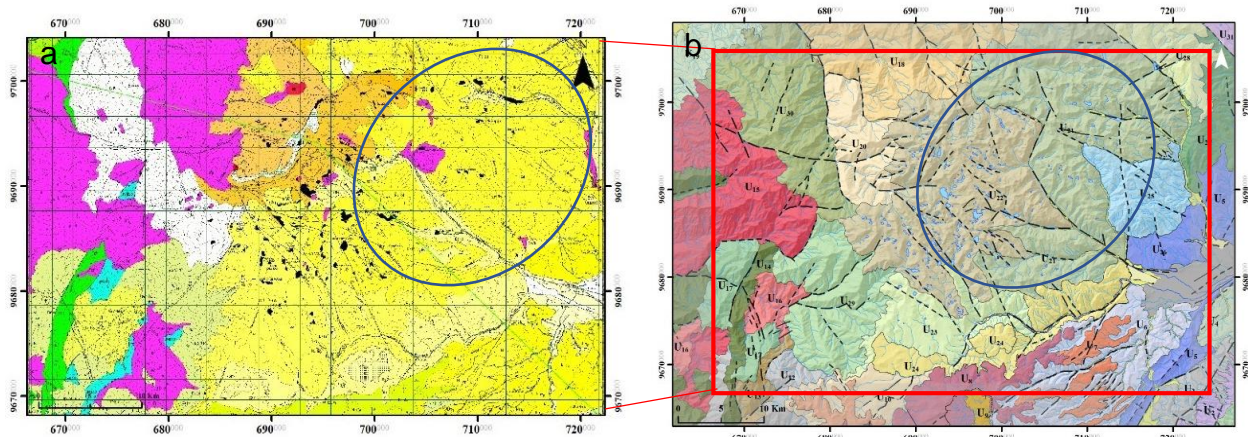
Al realizar la comparación de las unidades obtenidas, con la sección del mapa Geológico de Ecuador, se observa que las similitudes son mínimas, si bien en la Figura 5.7a se observa que las formaciones son muy generales con respecto a la Figura 5.7b, se puede acotar que mantienen relación en el comportamiento general en cuanto a la distribución de las formaciones en la zona Este y Oeste del área de estudio.



**Figura 5.7** Sección obtenida del mapa geológico general de Ecuador. Geoportal IGM y b) Esquema de unidades geológicas.

Se realizó una comparación con el mapa geológico actual de Cuenca a escala 1:100000, durante este cotejo se observan grandes similitudes sobre todo en los extremos E y O del área de estudio. Sin embargo, la parte central de nuestro esquema se encuentra con menos detalle. En el mapa geológico de Cuenca la formación Chanlud abarca una gran extensión, cubriendo gran parte de la zona centro y NE de la hoja geológica (Figura 5.8a), de acuerdo con la metodología aplicada se diferenciaron comportamientos diferentes en esa zona y se identifican tres unidades (Figura 5.8a), las cuales son denominadas como 21, 22 y 25. Al SO el Grupo Saraguro indiferenciado abarca diferentes zonas dentro del área de estudio de acuerdo a el mapa de referencia, siguiendo nuestro proceso se observó que cada una de esas zonas mantiene comportamientos y características diferentes, razón por la cual se definieron como unidades diferentes y estas son las unidades 12, 17 y 29.

Estas distinciones se realizan debido a que nuestro análisis es principalmente de acuerdo al comportamiento y variaciones topográficas de la zona de interés. Por ello existen algunas posibilidades o realmente son unidades distintas y por ende se podrían definir nuevas formaciones, o lo que ocurre es que es la misma formación, pero en litofacies o eventos diferentes. Esto solo puede confirmarse mediante trabajo de campo.



**Figura 5.8** Comparación entre el mapa de referencia y las unidades obtenidas

a) Mapa Geológico de Cuenca 1:100000. Geoportal IGM y b) Esquema de Unidades Geológicas. En la imagen (a) se presenta de azul la zona correspondiente a la Fm Chanlud, al observar la imagen (b) se nota que esta zona está dividida en 3 unidades distintas.

Luego de realizar el análisis visual, se realizó una comparación de áreas con el fin de poder establecer un porcentaje de similitud entre el mapa actual y el resultado que se obtuvo al seguir nuestra metodología. En la Tabla 5.2 se muestra el porcentaje que se obtuvo de forma individual al comparar 5 secciones de nuestro esquema con sus correspondientes en la cartografía base. Luego se promediaron los porcentajes de coincidencia y se obtuvo un porcentaje de similitud general. De esta forma se obtiene que el esquema de unidades tiene un **78%** de similitud con el mapa geológico actual de Cuenca. Se realizan las comparaciones para establecer la equivalencia entre las unidades y las formaciones de la cartografía base. Con la finalidad de poder asignar a las unidades el nombre de la formación con mayor similitud y correspondencia (Tabla 5.3); para asignar los nombres se tuvieron las siguientes consideraciones:

- La unidad recibe el nombre de la formación con mayor similitud y correspondencia geográfica.
- Si una unidad cubre dos o más formaciones del mapa de referencia, esta toma el nombre de la formación de mayor área.
- Si se tienen diferentes unidades y al contrarrestar con el mapa base de referencia estas corresponden a una sola formación, se asigna el nombre de esa formación, pero se hace una distinción numérica y de color.

La última consideración representa el caso de las unidades que tienen correspondencia con la Fm Chanlud y el Grupo Saraguro, por ejemplo, como se observa en la Tabla 5.3 toman el nombre de la formación Chanlud las unidades 21, 22 y 25 pero se las diferencian en la simbología siendo OScd1 la Unidad 22, OScd2 la Unidad 21 y OScd3 la Unidad 25.



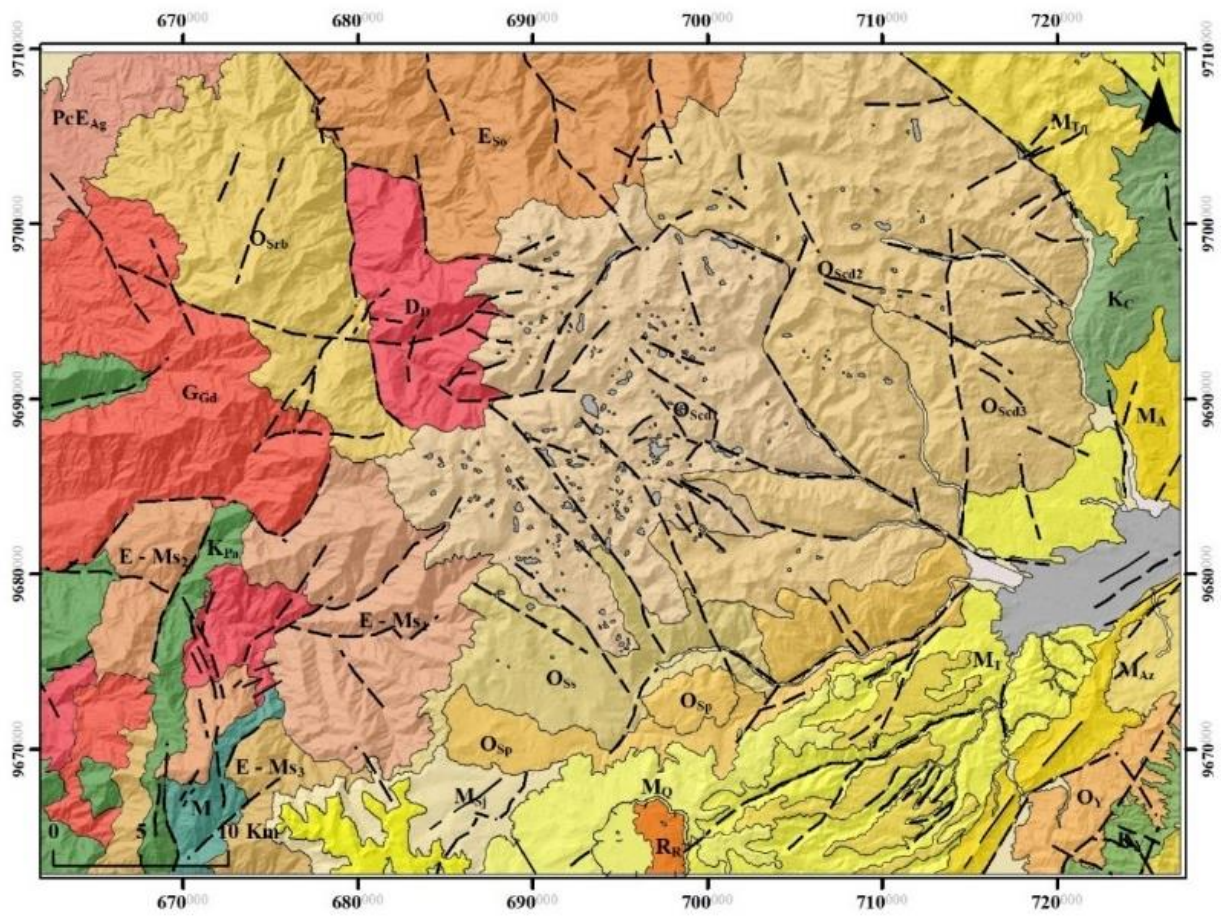
Luego se asignan los nombres de las formaciones a cada unidad y se les da colores, los colores asignados fueron cuidadosamente seleccionados de acuerdo con la edad geocronológica de las formaciones (Figura 5.9). Finalmente, se presentan los resultados obtenidos mediante un mapa, en este mapa se debe incorporar también el resultado obtenido del análisis estructural, es decir también se deben representar las fallas y lineamientos identificados. Al ser este un mapa geológico base o preliminar, se representó bajo los estándares cartográficos respetando colores, simbologías y elementos propios de un mapa un mapa geológico (Apéndice C, Figura 6.13).

**Tabla 5.2** Porcentajes de similitud entre áreas

Unidades	Área [Ha]	Formaciones	Área [Ha]	% de coincidencia entre áreas	Promedio % de coincidencia
<i>U<sub>6</sub></i>	8,511	Turi	<b>9736</b>	87	<b>78</b>
<i>U<sub>8</sub></i>	3,197	Quinsacocha	4435	72	
<i>U<sub>20</sub></i>	8,454	Intrusivo de Diorita	12166	69	
<i>U<sub>21</sub></i>	27,233	Chanlud	37835	72	
<i>U<sub>24</sub></i>	9,650	Plancharumi	10251	94	

**Tabla 5.3** Equivalencias entre unidades del esquema y las formaciones geológicas

Unidades	Formaciones	Simbología	Unidades	Formaciones	Simbología
Qt	Terrazas	Qt	U16	Diorita	DD
Qa	Depósito Aluvial	Qa	U17	G Saraguro	E - Ms 2
U1	Tarqui	MTq	U18	Ocaña	Eso
U2	Yunguilla	Ky	U19	Grupo Angamarca	PcEAg
U3	Unidad Yunga	OY	U20	Diorita	DD
U4	Azogues y Biblian	Maz	U21	Chanlud	OScd2
U5	Grupo Ayancay	MA	U22	Chanlud	OScd1
U6	Turi	MT	U23	Soldados	Oss
U7	Tarqui	MTq	U24	Plancharumi	Osp
U8	Quinsacocha	MQ	U25	Chanlud	OScd3
U9	Riolita	RR	U26	Turi	MT
U10	Jubones	MSj	U27	Célica	Kc
U11	Turupamba	Mtu	U28	Tarqui	MTq
U12	G Saraguro	E - Ms 3	U29	G Saraguro	E - Ms 1
U13	Metamórfico	M	U30	Rio Blanco	Osrb
U14	Unidad Pallatanga	Kpa	U31	Turi	MT
U15	Granodiorita	GGd			



**Figura 5.9** Representación parcial de los resultados.

En esta imagen se observan los colores y simbología asignadas, además de las estructuras (fallas y lineamientos) representadas por las líneas negras segmentadas.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

En este trabajo de materia integradora hemos presentado una metodología que permitió generar un mapa geológico preliminar del sector de estudio.

Según nuestro análisis comparativo, las unidades obtenidas corresponden a las formaciones Tarqui, Turi, Quinsacocha, Jubones, Turupamba, Ocaña, Chanlud, Soldados, Rio Blanco, Azogues, Biblián, Pallatanga, grupo Saraguro y Ayancay, y unidad Yunda. Además de depósitos aluviales y terrazas, y también intrusivos de granodiorita y diorita. Estas son las formaciones más representativas de la zona, y son las que se espera encontrar cuando se realice la comprobación, en una salida de campo.

Esta metodología permitirá obtener datos previos y así optimizar los recursos por una sucesiva fase de campo.

La comparación entre el mapa generado y el mapa geológico actual de la carta de Cuenca, determino un 78% de coincidencia.

Esta metodología puede ser aplicada en la planificación de visitas técnicas, salidas de campo, estudios, investigación permitiendo ahorrar tiempo y dinero, puesto que las estaciones pueden planificarse mejor.

Los resultados que se obtienen con esta metodología se pueden utilizar para crear un mapa de distribución de minerales arcillosos, ferrosos y óxidos de hierro, para la minería y exploración de minerales. Las combinaciones realizadas permiten diferenciar zonas de posible interés, puesto que construimos índices espectrales que nos permiten mapear la distribución de minerales.

## **6.2. Recomendaciones**

Se recuerda que esta metodología no va a remplazar el trabajo de campo y su validación en el terreno.

El detalle obtenido en la diferenciación de las unidades depende directamente de la resolución de la cartografía base utilizada. Esto, porque al tener data con más información, la metodología genera mejores resultados y detalle.

Para obtener mejores resultados, se recomienda trabajar con data de mayor resolución espacial, estas por lo general son de paga. Por ello, es fundamental balancear el presupuesto y ver que resulta más rentable, sí comprar imágenes de mayor resolución o usar las disponible en la red.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, A., Nasser, S. and Ghaleeb, A. (2013) Landsat ETM-7 for Lineament Mapping Using Automatic Extraction Technique in the SW Part Taiz Area, Yemen. *Global Journal of Human Social Science (B)*, XIII, 35-38
- Aguiló et al., M. (2014). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar.
- Al-Nahmi, F., Alami, O. B., Baidder, L., Khanbari, K., Rhinane, H., & Hilali, A. (2016). Using Remote Sensing for Lineament Extraction in Al Maghrabah Area-Hajjah, Yemen. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 137.
- Bonham-Carter, G. F. (1996). *Geographic Information Systems for geoscientists. Modelling with GIS*. New York: Elsevier Science Ltd.
- Bristow, C.R and Guevara, S., 1974. *Mapa Geológico del Ecuador, hoja de Azogues, escala 1:50000*: Quito, Instituto Geográfico Militar (IGM), Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (MRNE), Dirección General de Geología y Minas (DGGM), Institute of Geological Sciences London (IGS).
- Bosque Sendra, J. (1992): *Sistemas de información geográfica*. Ed. Rialp, Madrid, 451 p.
- Bullón, T., & Sanz, C. (1977). En *Los paisajes naturales de Segovia, Ávila, Toledo y Cáceres* (págs. 10-47). Madrid: IEAL.
- Canada Centre for Remote Sensing. (2004). *Fundamentals of Remote Sensing*. Toronto: Natural Resources Canadá.
- Castro, R., Romero, M., Loarte, G., & Galeas, R. (2013). *Modelo de Unidades Geomorfológicas para la representación cartográfica de ecosistemas del Ecuador continental*. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Chica-Olmo, M., Abarca, F., & Rigol, J. P. (2002). *Development of a decision support system based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area*

- identification in SE Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 23(22), 4801-4814.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones RIALP, S.A., Madrid
- Chuvieco, E. (2006). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Editorial Ariel, S.A., Barcelona
- Das, S., Pardeshi, S. D., Kulkarni, P. P., & Doke, A. (2018). Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 160.
- De la Cruz, J. L. C., Alcázar, F. D. J. E., Camacho, A. Z., & Cornú, F. J. N. (2015). Interpretación de lineamientos estructurales en Nayarit, México, aplicando sensores remotos y software libre. *GEOS*, 35(2).
- De Oliveira Andrades Filho, C., & De Fátima Rossetti, D. (2012). Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 33(4), 1058-1077.
- Pedraza Gilsanz, J. D. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones* (No. 551.4 PED).
- Demek, J. (1972). *Manual of Detailed Geomorphological Mapping*. Praga: Academia.
- Dirik, K. (2005). *Advanced photogeology—lecture notes*. Geological Engineering Dept., Hacettepe *University*.
- Dunkley, P N & Gaibor, A. 1997. Informe No 2, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Geology of the Western Cordillera of Ecuador between 2-3° S.
- Earth Observing System. (2013). Earth Observing System. Obtenido de LANDSAT 8: <https://eos.com/landsat-8/es/>
- Eguez, A. &. (2003). Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore region: International Lithosphere Program Task Group II-2—Major active faults of the world. US Geol. Surv.

- El-Sawy, K., Ibrahim, A. M., El-Bastawesy, M. A., & El-Saud, W. A. (2016). Automated, manual lineaments extraction and geospatial analysis for Cairo-Suez district (Northeastern Cairo-Egypt), using remote sensing and GIS. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(5), 491-500.
- Felicísimo, A.M. (1994). Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las Ciencias Ambientales. Ed. Pentalfa, Oviedo, 220 p.
- Hashim, M., Ahmad, S., Johari, M. A. M., & Pour, A. B. (2013). Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. *Advances in Space Research*, 51(5), 874-890.
- Hernández, A. M., & Moragues, J. A. (2002). Uso de la información espacial para cartografía, geología y producción minera. *Ciclo V. Comisión Nacional de Asuntos Espaciales (CONAE)*.
- Hung, T. L., & Varvarina, E. A. (2013). METHOD OF MONITORING MINERALS USING REMOTE SENSING DATA BASED ON SPECTRAL INDEX. *Вестник Орловского государственного аграрного университета*, (6), 44-48.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Heller, F., & Ford, M. (1995). An integrated study of fill and deformation in the Andean intermontane basin of Nabón (Late Miocene), southern Ecuador. *Sedimentary Geology*, 96(3-4), 257-279.
- Hungerbühler, D. (1997). Neogene basins in the Andes of southern Ecuador: evolution, deformation, and regional tectonic implications (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., ... & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 75-124.
- JAXA. (2008). ALOS Data Users Handbook. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) , Tsukuba. Obtenido de [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos\\_userhb\\_en.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/alos_userhb_en.pdf)

- Mohy, H., Basta, F. F., Saber, S. G., & El Sobky, A. F. A. (2017). Using Landsat 8 and ASTER Data for lithological Discrimination and Mapping in Wadi Hamad area, North Eastern Desert, Egypt. *J. Am. Sci*, 13, 1-13.
- NASA. (2014). *LANDSAT SCIENCE*. Recuperado el 01 de agosto de 2020, de LANDSAT 8 Overview: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/LANDSAT 8/LANDSAT 8-overview/>.
- Pacco, E. (2010). Capacidad de uso mayor para determinar conflictos de uso de la tierra en la microcuenca Picuroyacu, Tingo María - Perú. Tingo María: Universidad Agraria de la Selva Tingo María.
- PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_high\_res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC 04 Julio 2020. DOI: 10.5067/Z97HFCNKR6VA
- PCI Geomatics. (2018). *Geomatica Training Guide*. Recuperado el 12 de Agosto de 2020, de Geomatica I Course guide: <https://www.pcigeomatics.com/pdf/TrainingGuide-Geomatica-1.pdf>
- PCI Geomatics. (2020). *PCI Geomatics*. Recuperado el 12 de Agosto de 2020, de LINE: [https://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/references/pciFunction\\_r/python/P\\_line.html](https://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/references/pciFunction_r/python/P_line.html)
- Pérez, F. (2010). Investigación y desarrollo de Modelos de Datos y Estructuras Lógicas de la información para la implantación del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) en formato digital. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Prasad, A. D., Jain, K., & Gairola, A. (2013). Mapping of lineaments and knowledge base preparation using geomatics techniques for part of the Godavari and Tapi basins, India: A case study. *International Journal of Computer Applications*, 70(9).
- Pratt, E; Figueroa, J & Flores, B. (1997). Informe N° 1, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica: Mapa escala 1: 200.000. Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 3° S and 4° S. CODIGEM -BGS, Quito – Ecuador 58 pp.
- Pratt, W. T., Duque, P., & Ponce, M. (2005). An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 399(1-4), 251-278.



- Rigol, J., Checa, O., Pardo, E., & Rodríguez, V. &. (2011). Análisis e integración de datos espaciales en investigación de recursos geológicos mediante Sistemas de Información Geográfica. Jaén: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Roberto. (17 de sept de 2017). Gis and Beers. Obtenido de Cálculo del Índice de Posición Topográfica TPI: <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-de-posicion-topografica-tpi/>
- Sánchez Serrano, F., Tejero López, R., & Bergamín de la Viña, J. F. (1998). Análisis de la variabilidad del relieve a partir de modelos digitales del terreno. Revista de la Sociedad Geológica de España, 11(1-2), 139-149.
- Sabins, F. (1987). Remote Sensing: Principles and Interpretation. New York: W. H. Freeman and Company.
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. Ore geology reviews, 14(3-4), 157-183.
- Sánchez Serrano, F., Tejero López, R., & Bergamín de la Viña, J. F. (1998). Análisis de la variabilidad del relieve a partir de modelos digitales del terreno. Revista de la Sociedad Geológica de España, 11(1-2), 139-149.
- Walsh. (2015). Geomorfología y Riesgo Físico. En G. S. Peruano, Modificación del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto "Mejoras a la Seguridad Energética del País y Desarrollo del Gasoducto Sur Peruano - Componentes Auxiliares" (págs. 84-95). Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- Witt, C. (2007). Constraints on the tectonic evolution of the north andean block trailing tail: Evolution of the gulf of Guayaquil-Tumbes basin and the intermontane basins of the central ecuadorian andes. Paris.

# APÉNDICES

APENDICE A: Mapas

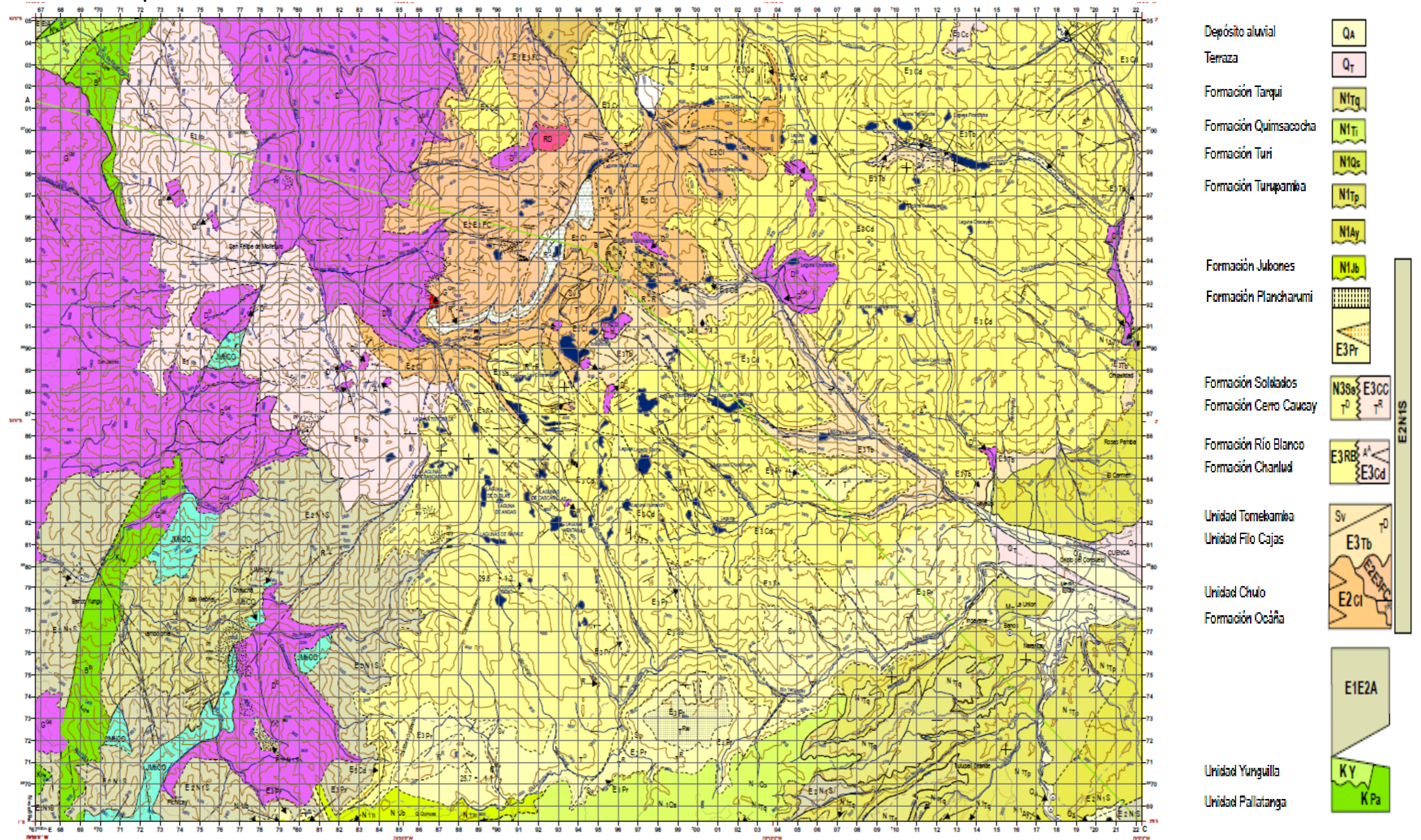
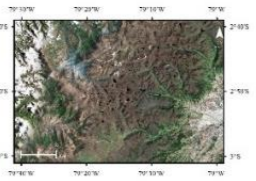
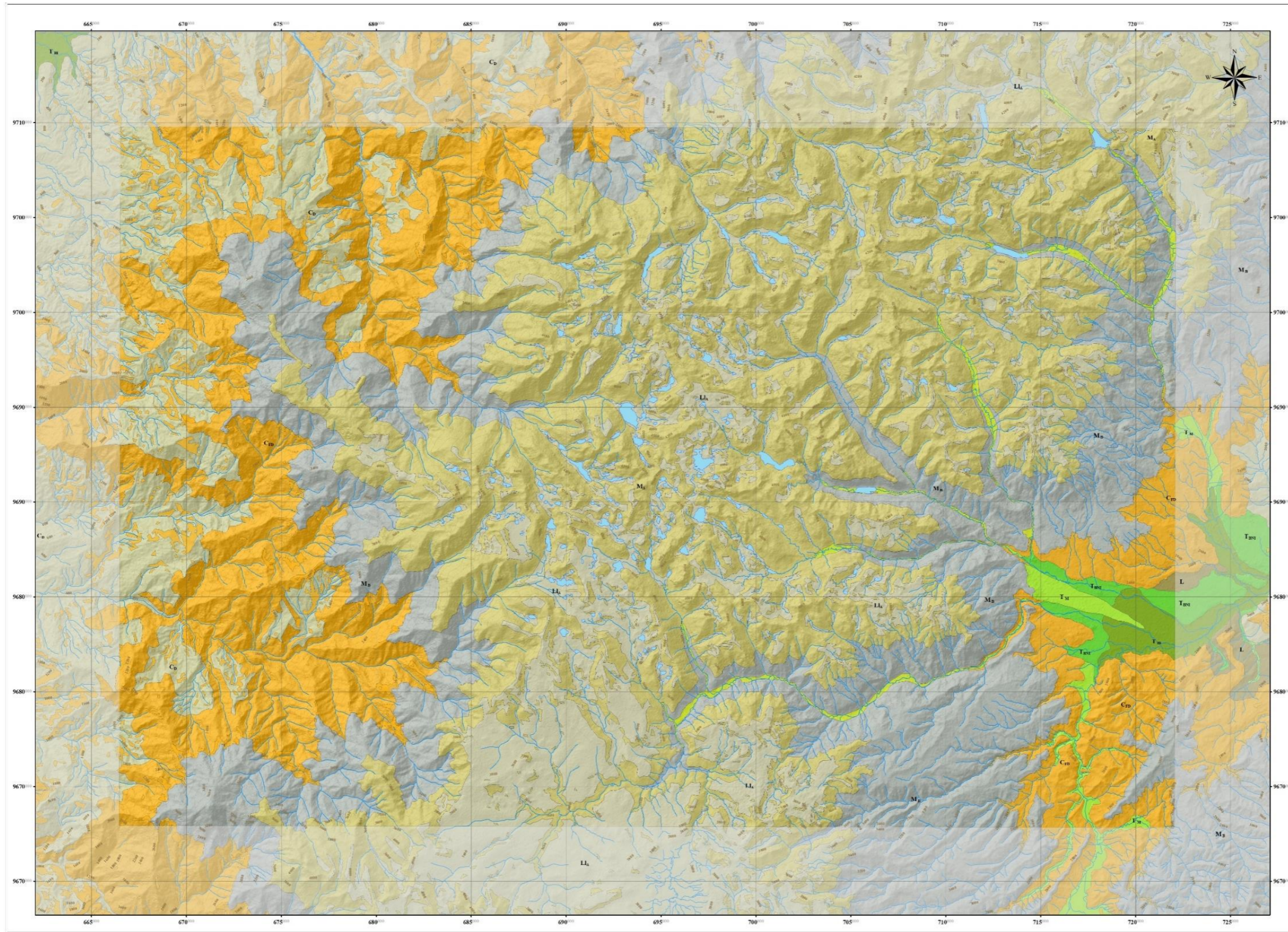


Figura 6.1 Mapa geológico de Cuenca escala 1:100.000 (versión actual)

Fuente: IGM 2007

ESCALA 1:100.000

MAPA GEOMORFOLÓGICO BASE



SIMBOLOGÍA

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

- T<sub>BI</sub> Terraza Baja Inundable
- T<sub>BNI</sub> Terraza Baja No Inundable
- T<sub>M</sub> Terraza Media
- T<sub>A</sub> Terraza Alta
- L Lomada
- C<sub>D</sub> Colina Disectada
- C<sub>FD</sub> Colina Fuertemente Disectada
- M<sub>B</sub> Montaña Baja
- M<sub>A</sub> Montaña Alta
- Ll<sub>A</sub> Llanura de Ablación

SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA

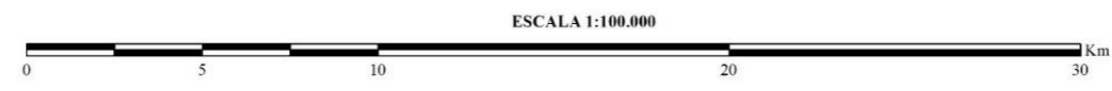
- Hidrografía**
- Ríos
  - Lagunas
- Topografía**
- Curvas de Nivel Principales
  - Curvas de Nivel Secundarias

INDICE DE HOJAS TOPOGRÁFICAS UTILIZADAS EN LA COMPILACIÓN BASE ESCALA 1:50.000

1:50.000 HOJA TOPOGRÁFICA MOLLELINDO (NV-F1)	1:50.000 HOJA TOPOGRÁFICA CHIQUENTAD (NV-F2)
1:50.000 HOJA TOPOGRÁFICA CHAUCHA (NV-F3)	1:50.000 HOJA TOPOGRÁFICA CIENCA (NV-F4)

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500.000.0000  
 False Northing: 10.000.000.0000  
 Central Meridian: -81.0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL)  
 AÑO DE REALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA: 2020  
 Autores: Villalta, Michelle y Viña, Gabriela

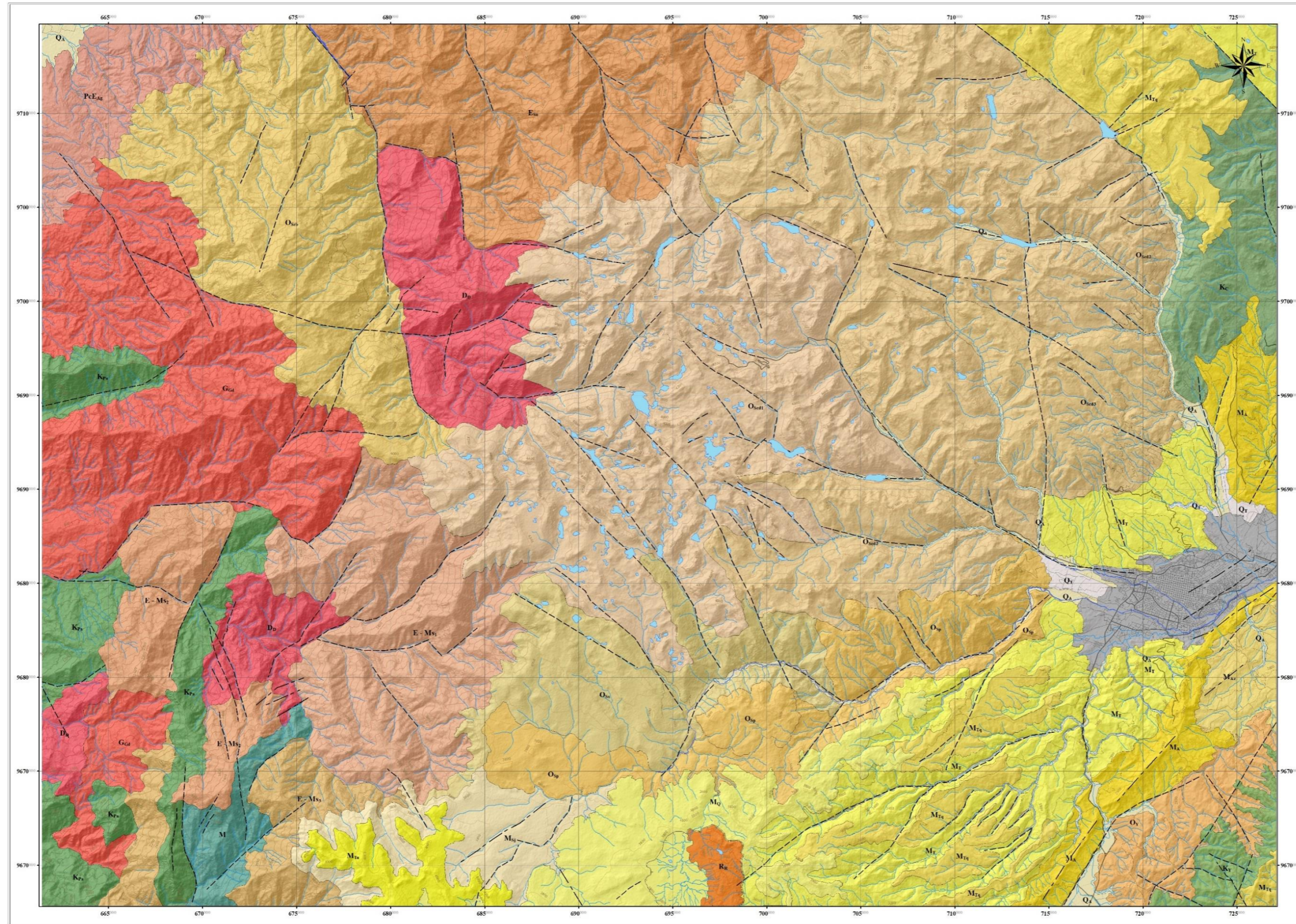


CURVAS DE NIVEL CON INTERVALOS CADA 200 m  
 CURVAS DE NIVEL SECUNDARIAS CON INTERVALOS CADA 40 m

Figura 6.2 Mapa geomorfológico de la zona de Cuenca

ESCALA 1:100.000

MAPA GEOLÓGICO BASE DEL SECTOR DE CUENCA



MAPA GENERAL DE UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA

SECCIÓN VERTICAL GENERALIZADA

Q <sub>A</sub>	Deposito Aluvial	CLAYBARNO
Q <sub>T</sub>	Terraza	
M <sub>10</sub>	Lavas, tobas, piroclastos	MIOCENO
M <sub>9</sub>	Lavas, tobas andesíticas	
M <sub>7</sub>	Conglomerados andesíticos, arcénicas y limolitas	
M <sub>5</sub>	Tobas, igníbricos ramificados y fragmentos de carbón	
M <sub>4</sub>	Limonitas, microm conglomerados, tobas y limolitas	
M <sub>3</sub>	Arénicas, lavas verdes y rojas, limolitas, capas de carbón y conglomerados	
M <sub>2</sub>	Tobas riolíticas ricas en cristales	OLIGOCENO
O <sub>sp</sub>	Tobas riolíticas soldadas, lavas y brechas, litas y arcénicas, depósitos volcanocéntricos riolíticos	
O <sub>sa</sub>	Tobas dacíticas ricas en cristales	
O <sub>sb</sub>	Lavas andesíticas, tobas, brechas y arcénicas	
O <sub>sd1</sub>	Andesitas, lavas y brechas	GRUPO SARGURO
O <sub>sd2</sub>		
O <sub>sd3</sub>		
O <sub>v</sub>	Flojas dacíticas, igníbricos vitreos y tobas dacíticas	BOCENO
E <sub>ca</sub>	Tobas dacíticas a riolíticas	
E-M <sub>2</sub>	Grupo Sarguro Indefinido	
E-M <sub>1</sub>		
E-M <sub>3</sub>	Arénicas turbidíticas	GRUPO AQUEGUES
E-M <sub>4</sub>		
K <sub>1</sub>	Arénicas finas, litas, limolitas, argilitas	CRETÁCICO
K <sub>2</sub>	Lavas basálticas, hialoclastita	
K <sub>3</sub>	Andesitas y tobas	
M	Filias, argilitas bituminosas y monzonitas	Rocas Metamórficas

ROCAS INTRUSIVAS

G <sub>ca</sub>	Graodioritas	D <sub>2</sub>	Dioritas	R <sub>1</sub>	Riolitas
-----------------	--------------	----------------	----------	----------------	----------

SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA

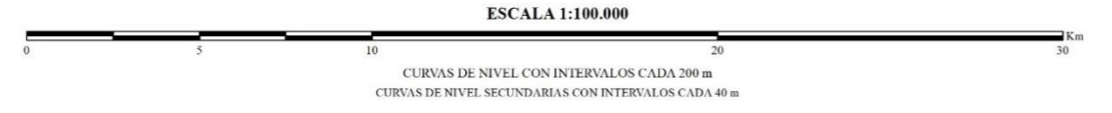
—	Coturneo geológico inferido	- - -	Falla Inferida
○	Caldera	- · - · -	Limonitas

SIMBOLOGÍA ESPECÍFICA

Hipografía	Avantamientos Humanos
Rios	Zona Urbana (Casaca)
Lagos	Vías
Hipografía	Ram. Primarias
Curvas de Nivel Principales	Ram. Secundarias / Local

INDICE DE HOJAS TOPOGRÁFICAS UTILIZADAS EN LA COMPILACIÓN BASE ESCALA 1:50.000		INDICE DE MAPAS GEOLÓGICOS ESCALA 1:100.000	
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA MOLETTURO (NV - F1)	SV - C	NARANJAL HOJA 14
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA CUENCA (NV - F3)	SV - D	GEALLETURO HOJA 52
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA CUENCA (NV - F4)	SV - P	TENGUEL HOJA 15
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA CUENCA (NV - F4)	SV - C	CASAR HOJA 72
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA CUENCA (NV - F4)	SV - B	GIROÑ HOJA 91
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA CUENCA (NV - F4)	SV - D	AZOGUES HOJA 73
1:50.000	HOJA TOPOGRÁFICA CUENCA (NV - F4)	SV - A	SIGIO HOJA 74

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL)  
AÑO DE REALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA: 2020  
Autores: Villalta, Michelle y Viña, Gabriela



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S  
Projection: Transverse Mercator  
Datum: WGS 1984  
False Easting: 500.000.000  
False Northing: 10.000.000.000  
Central Meridian: -81.00000  
Scale Factor: 0.9996  
Units: Meter

Figura 6.3 Mapa geológico de la zona de Cuenca

