

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA-CARTOGRÁFICA DE LA  
HOJA 6448 UBICADA AL SUR-ESTE DE FALCÓN ORIENTAL,  
MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Romero R.  
Ezequiel D.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geólogo.

Caracas, Enero 2019

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA-CARTOGRÁFICA DE LA HOJA 6448 UBICADA AL SUR-ESTE DE FALCÓN ORIENTAL, MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Enrique Toribio  
COTUTOR: Prof. Wilmer Lozada

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Romero R.  
Ezequiel D.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geólogo.

Caracas, Enero 2019

Caracas, 18 de Enero de 2019

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Ezequiel D. Romero R., titulado:

**“ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA-CARTOGRÁFICA DE LA HOJA 6448  
UBICADA AL SUR-ESTE DE FALCÓN ORIENTAL, MEDIANTE EL USO DE  
SENSORES REMOTOS”.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**



Prof. Renier Medero  
Jurado

Prof. Orlando Cabrera  
Jurado

Prof. Enrique Toribio  
Tutor-Coordinador

## DEDICATORIA

*A Dios, por guiarme en mi vida y darme la fuerza y la virtud de esperar.*

*A mis padres y hermanos por su apoyo, esfuerzo y sobre todo porque siempre creyeron en mí.*

*A mis familiares y amigos por tenderme esa mano amiga cuando más la necesite*

*A mis familiares: Damaez (mi querida sobrina), Maritza (mi amada tía) y Carmen Moreno (mi inolvidable abuela) porque siempre estuvieron ahí conmigo apoyándome. Lamentablemente hoy no están conmigo festejando este triunfo pero sé que desde el cielo están felices por haberlo logrado.*

*A todas aquellas personas que nunca dejaron de creer en mí*

**¡Lo que es de ser, tarde o temprano será!**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios, nuestro padre celestial, por permitirme alcanzar este gran logro que en muchas oportunidades vi difícil de alcanzar y por ponerme en el camino a personas maravillosas que a lo largo de mi vida siempre me han apoyado en todas mis metas.

A mi madre Maribel Ramírez. Mamá eres mi apoyo, mi admiración, mi ejemplo a seguir, mi otra mitad, la mujer que más amo en el mundo. Gracias por tu apoyo, por tus palabras. Siempre has creído en mí y eso es más que suficiente. Te amo mamá.

A mi padre Miguel Romero, a pesar de que eres de muy poco hablar siempre estás ahí apoyándome, a tu manera pero siempre estás ahí. Papá te quiero, te admiro y te respeto. Mil gracias por tu apoyo. Te amo viejo.

A mis hermanos: María Virginia y Alexander. Gracias por el apoyo incondicional, por las palabras de alientos, por confiar siempre en mí. Ambos son un ejemplo a seguir. Los amo con el alma y el corazón.

A mi familia de El Vigía - Mérida, Valencia, Los Teques y San Antonio. A todos mil gracias por el apoyo incondicional que me han dado a lo largo de mi vida; no saben cuánto me alegra poder contar con ustedes. No los cambiaría por nada ni por nadie. Los amo, Dios los bendiga.

A mi amada Universidad Central de Venezuela, la casa que vence la sombra. Mil gracias por todo lo que me proporcionaste a lo largo de mi carrera universitaria. Dios permita seguir cosechando triunfos junto contigo.

Al profesoral de la Facultad de Ingeniería, en especial a los de la escuela de Geología,

Minas y Geofísica. Gracias por los conocimientos impartidos, mi respeto y admiración a cada uno de ustedes.

A mi mentor y cotutor Wilmer Lozada. Profe infinitamente agradecido por su asesoría, amistad, paciencia, dedicación y esmero. De usted recibí gran ayuda, apoyo y motivación y fue para mí un excelente guía en la realización de esta investigación. De igual manera agradezco al Bachiller, amigo y futuro colega Juan Carlos Rojas y a los profesores Enrique Toribio, Mauricio Hernández, Jesús Monsalve, Franco Urbani, Ricardo Alezones, André Singer y Jesús Lemus por haber formado parte de mi trabajo de investigación. Gracias a cada uno por el apoyo incondicional y por la paciencia y dedicación al momento de asesorarme. Estaré siempre agradecido con ustedes.

A mis compañeros de escuela por el apoyo brindado durante la carrera, en especial a mis compañeras y grandes amigas Karleydis Salcedo, Michelle Mendoza, Alexmar Mejias y Marley Nava. Más de una vez nos tocó apoyarnos con la finalidad de alcanzar una meta en común y saber que lo logramos es un sentimiento que me llena de mucho orgullo. De igual manera agradezco a Efrain Caraballo, Andrea Luna, Yelaine Guerra, Lisbeth Cardoso, Jerina Aveldaño y Alejandro Zabala. El tiempo de Dios es perfecto pronto ustedes también estarán debajo de las nubes de Calder. A todos mil gracias.

A mis amigos Ángel Colmenares, Edwin Guerra y Geniver Campos. Gracias por el apoyo incondicional, por las palabras de aliento y por siempre creer en mí. Amigos como ustedes muy pocos. Gracias.

Finalmente y no menos importante a todas las personas que de una u otra forma siempre me brindaron su mano amiga y nunca dejaron de creer en mí.

**A todos mil gracias.**

**Este triunfo no es solo mío, también es de ustedes.**

**EZEQUIEL D. ROMERO R.**

**ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA-CARTOGRÁFICA DE LA HOJA 6448  
UBICADA AL SUR-ESTE DE FALCÓN ORIENTAL, MEDIANTE EL USO  
DE SENSORES REMOTOS”.**

**Tutor académico: Enrique Toribio**

**Cotutor: Wilmer Lozada**

**Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2019, 229p.**

**RESUMEN**

El tema central de esta investigación se enfocó en actualizar la cartografía geológica de una zona ubicada al sureste de Falcón oriental mediante el uso de imágenes satelitales y apoyados con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), correspondiente a la Hoja cartográfica 6448 a escala 1:100.000 de cartografía Nacional, la cual fue subdividida en 16 cartas a escala 1:25.000.

Los productos y subproductos alcanzados en esta investigación resultaron de la adquisición e incorporación de la data en el SIG y mediante el procesamiento digital de imágenes. Para ello se llevaron a cabo dos etapas simultáneas que se describen a continuación: La primera consistió en la digitalización, vectorización, elaboración de base atributiva e interpretación de data espacial; la segunda etapa consistió en el tratamiento digital de imágenes de percepción remota las cuales fueron preprocesadas para posteriormente aplicar diferentes algoritmos de procesamiento: clasificación, supervisada y no supervisada, combinación de bandas y álgebra de banda. En cada una de las fases de forma integrada se identificaron y delinearon rasgos geológicos de importancia.

Entre los subproductos obtenidos destacan la obtención de: Mapa topográfico digitalizado, Modelo Digital de Elevación (DEM), Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) y la imagen MNF. La integración e interpretación permitieron delinear unidades geomorfológicas, litoestratigráficas y estructuras que contribuyeron con actualizar a escala semidetallada la geología del área de estudio.

**Palabras clave:** Sensores Remotos, SIG, actualización geológica, cuenca de Falcón.

## ÍNDICE

	<i><b>Pág.</b></i>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	4
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
I.2 JUSTIFICACIÓN	5
I.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	7
I.3.1 Objetivo general	7
I.3.2 Objetivos específicos	7
I.4 ALCANCE	7
I.5 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	7
<b>CAPITULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	9
II.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	9
II.1.1 Antecedentes relacionados al área de estudio	9
II.1.2 Antecedentes relacionados a sensores remotos	12
II.2 ASPECTOS TEÓRICO-CONCEPTUALES	14
II.2.1 Definición y características del SIG	15
II.2.1.1 Formato vectorial y ráster	17
II.2.2 El Sistema de Teledetección	18
II.2.2.1 Campo eléctrico	21
II.2.2.2 Campo magnético	21
II.2.2.3 Energía electromagnética	22
II.2.2.4 Espectro electromagnético e interacción de la radiación electromagnética	23
II.2.3 Definición, características y tipos de sensores remotos	24
II.2.4 Imagen satelital	26
II.2.5 Características de las imágenes satelitales	27
II.2.6 Firma espectral	28
II.2.7 Procesamiento y etapas de imágenes	29
II.2.7.1 Etapa I: Pre-procesamiento	29
II.2.7.2 Etapa II: Extracción de información	29
II.2.8 Imágenes satelitales: Sensor LANDSAT-8	30

<b>CAPITULO III MARCO METODOLOGÍCO</b>	<b>33</b>
<b>III.1 FASE 1: Recopilación y homogenización de la información existente (bibliográfica y cartográfica) relacionado a la hoja topográfica 6448</b>	<b>33</b>
III.1.1 Recopilación bibliográfica	33
III.1.2 Datos de mapas previos	35
III.1.3 Datos de persección remota	36
<b>III.2 FASE 2: Preparación e Incorporación de data en el SIG y Software de procesamiento digital de imágenes</b>	<b>39</b>
III.2.1 Digitalización e interpretación de data espacial	39
III.2.1.1 Digitalización de las cartas topográficas	39
III.2.1.2 Digitalización de las cartas geológicas	41
III.2.2 Preprocesamiento de imágenes de percepción remota	41
III.2.2.1 Corrección atmosférica	42
III.2.2.2 Elaboración de mascara por nubes	44
<b>III.3 FASE 3.- Procesamiento de data</b>	<b>45</b>
III.3.1 Construcción de modelos digitales y capas temáticas	46
III.3.1.1 Modelo Digital de Elevación (DEM).	46
III.3.1.2 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS)	47
III.3.1.3 Capas temáticas	47
III.3.1.3.1 Capa Hipsometría	48
III.3.1.3.2 Capa Pendiente	48
III.3.1.3.3 Capa Orientación de laderas	49
III.3.1.3.4 Capa de Cuencas, Subcuencas y Densidad de drenaje	50
III.3.2 Procesamiento de imágenes satelitales	53
III.3.2.1 Tratamiento MNF, PPI y SAM	53
III.3.2.2 Combinación y algebra de banda	55
III.3.2.3 Clasificación no supervisada	55
III.3.2.3 Clasificación supervisada	57
<b>III.4 FASE 4: Integración de la Data</b>	<b>58</b>
III.4.1 Unidades de relieve	59
III.4.2 Rasgos estructurales	59
III.4.3 Rasgos geológicos en zonas con ausencia de información satelital	59
III.4.4 Rasgos litológicos	60
<b>III.5 FASE 5: Resultados</b>	<b>60</b>

<b>CAPITULO IV ASPECTOS FÍSICOS NATURALES Y GEOLOGÍA REGIONAL</b>	<b>61</b>
<b>IV.1 ASPECTOS FÍSICOS NATURALES</b>	<b>61</b>
IV.1.1 Relieve	62
IV.1.1.1 Región Natural: Sistema Coriano y sus márgenes	63
IV.1.1.2 Región Natural: Valles del noreste de Falcón	63
IV.1.2 El clima y su relación con las unidades presentes en la carta 6448	63
IV.1.3 Drenaje	70
IV.1.4 Suelos	71
IV.1.5 Vegetación	73
<b>IV.2 GEOLOGÍA REGIONAL</b>	<b>74</b>
IV.2.1 Placa tectónica del Caribe	74
IV.2.2 Cuenca de Falcón	76
IV.2.2.1 Modelos de evolución de la cuenca de Falcón	78
IV.2.2.2 Configuración estratigrafía de la cuenca de Falcón	79
IV.2.3 Estratigrafía local	85
IV.2.3.1 Maizos ígneos-metamórficos.	85
IV.2.3.2 Rocas sedimentarias	87
IV.2.3.3 Sedimentos no consolidados	94
<b>CAPITULO V RESULTADOS</b>	<b>95</b>
<b>V.1 DIGITALIZACIÓN, VECTORIZACIÓN INTERPRETACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA DATA ESPACIAL</b>	<b>95</b>
V.1.1 Mapa topográfico digitalizado	95
V.1.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)	101
V.1.3 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS)	105
V.1.4 Hipsometría	110
V.1.5 Pendiente	112
V.1.6 Orientación de laderas	114
V.1.7 Cuencas, subcuencas y densidad de drenaje	115
<b>V.2 PREPROCESAMIENTO Y PROCESAMIENTOS DE IMÁGENES SATELITALES</b>	<b>122</b>
V.2.1 Corrección atmosférica o Imagen FLAASH	123
V.2.2 Elaboración de la máscara para nubes	125
V.2.2.3 Imagen que procesa la fracción mínima de ruido (MNF)	127
V.2.2.4 Resultados del índice de pureza de pixel (PPI)	129
V.2.2.5 Imagen con N-dimensiones	130
V.2.6 Combinación y algebra de bandas	132

V.2.7 Clasificación No supervisada	138
V.2.8 Clasificación supervisada	140
V.2.9 Análisis de firma espectral	144
<b>CAPITULO VI INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>146</b>
<b>VI.1 ANÁLISIS TOPOGRÁFICO DE LA HOJA 6448</b>	<b>146</b>
VI.1.1 Unidad de Montañas	151
VI.1.1.1 Unidad de Montaña Alta	151
VI.1.1.1.1 Fila disectada	152
VI.1.1.1.2 Filas de base triangular	152
VI.1.1.1.3 Filas con forma de herradura:	153
VI.1.1.2 Unidad de Montaña Media	155
VI.1.1.2.1 Filas longitudinales irregulares	155
VI.1.1.2.2 Sistema de Lomeríos	156
VI.1.1.3 Unidad de Montaña Baja	158
VI.1.1.3.1 Fila de cresta convergente	158
VI.1.1.3.2 Filas espina de pescado	159
VI.1.1.3.3 Cerros alargados	159
VI.1.2 Unidad de Valle	161
VI.1.2.1 Valle Río Tocuyo	162
VI.1.2.2 Valle Río Aroa	163
VI.1.2.3 Valle Río Hueque	164
<b>VI.2 ANÁLISIS LITOLÓGICO DE LA HOJA 6448</b>	<b>166</b>
VI.2.1 Macizos ígneo-metamórficos	170
VI.2.2 Unidades Sedimentarias	174
VI.2.2.1 Formación Cerro Misión	174
VI.2.2.2 Grupo Agua Salada	175
VI.2.2.3 Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua	179
VI.2.3 Sedimentos no consolidados: Aluvión y Terraza	185
<b>VI.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA HOJA 6448</b>	<b>187</b>
VI.3.1 Marco Neotectónico del Área de Estudio	187
VI.3.2 Criterios y herramientas tomadas en cuenta para la de Interpretación Estructural	189
VI.3.3 Identificación y descripción de las estructuras de deformación	192
VI.3.3.1 Fallas de corrimiento orientadas OSO-ENE	192
VI.3.3.2 Fallas de Corrimiento orientadas E-O	194
VI.3.3.3 Retrocorrimientos subparalelos y con frentes opuestos a los corrimientos	194
VI.3.3.4 Fallas rumbo-deslizantes transpresivas	196

VI.3.3.5 Estructuras Duplex	199
VI.3.3.6 Pliegues	203
VI.4 INTERPRETACIÓN DE LOS CORTES GEOLÓGICOS	205
VI.4.1 Interpretación estructural del corte geológico AA´	208
VI.4.2 Interpretación estructural del corte geológico BB´	211
VI.5 EVOLUCIÓN TECTONO-ESTRATIGRÁFICA	213
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	216
Conclusiones	216
Recomendaciones	218
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	221
<b>ANEXOS</b>	230

## INDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1.1. Ubicación del área de estudio	8
Figura 2.1. Componentes de un SIG	15
Figura 2.2. Flujo característico de un SIG	16
Figura 2.3. Modelos de datos ráster y vectorial	17
Figura 2.4. Elementos esenciales de la teledetección	19
Figura 2.5. Componentes de un sistema de teledetección	20
Figura 2.6 El campo eléctrico	21
Figura 2.7 Líneas mostrando el campo magnético de un imán de barra, producidas por limaduras de hierro sobre papel	22
Figura 2.8. Energía electromagnética.	23
Figura 2.9. Representación de las longitudes de onda del espectro electromagnético	23
Figura 2.10. Interacción de la radiación electromagnética con la materia	24
Figura 2.11. Los sistemas de teledetección según fuente de energía electromagnética	25
Figura 2.12. Reflectancia espectral de un espectroradiómetro para diferente tipo de minerales y vegetación	28
Figura 3.1. Esquema metodológico de la investigación	34
Figura 3.2 Esquema de las cartas topográficas utilizadas en la investigación	35
Figura 3.3 Algunos de los mapas previos utilizados en la investigación	36

Figura 3.4. Imágenes utilizadas en la investigación	37
Figura 3.5 Portal de la U.S Geological Survey o Servicio Geológico de Estados Unidos	38
Figura 3.6. Ejemplos referente a la digitalización e interpretación de data espacial utilizado en la investigación	40
Figura 3.7. Ejemplo de actualización de curvas de nivel. Carta topográfica 6448-IV-NO	41
Figura 3.8. Proceso de selección del área de estudio dentro de la imagen satelital	42
Figura 3.9. Procedimiento de la calibración radiométrica	43
Figura 3.10. Procedimiento de la generación de la imagen con valores de reflectancia	44
Figura 3.11. Mascara de grises que coincide con las nubes mediante el análisis de componente.	45
Figura 3.12. Balance de densidad de nubes (todo lo blanco es nube)	46
Figura 3.13. Procedimiento para la generación del DEM.	47
Figura 3.14. Procedimiento para la generación de la capa de hipsometría, tomando en consideración la clasificación propuesta por Gamboa (1986)	48
Figura 3.15. Procedimiento para la generación de la capa de hipsometría, tomando en consideración la clasificación propuesta por Gamboa (1986)	49
Figura 3.16. Direcciones de orientación de laderas	50
Figura 3.17. Ejemplo de la conversión del DEM al ráster de orientación de ladera.	50
Figura 3.18. Procedimiento para la generación de la capa Cuencana hidrológica.	51
Figura 3.19. Procedimiento para la generación de la imagen Fracción Mínima de Ruido (MNF).	54
Figura 3.20. Procedimiento para la generación del Índice de Pureza de Pixel (PPI).	54
Figura 3.21. Procedimiento para la generación del Cartografiado del Ángulo Espectral (SAM).	55
Figura 3.22. Procedimiento para la ejecución de combinación y algebra de banda.	56
Figura 3.23. Procedimiento para la ejecución de la clasificación no supervisada.	56
Figura 3.24. Clases utilizadas en la investigación para realizar la clasificación supervisada.	57
Figura 3.25. Procedimiento para la ejecución de la clasificación supervisada	57
Figura 3.26. Procedimiento para la ejecución de la post-clasificación supervisada.	58
Figura 4.1 Las regiones naturales y su sistema de relaciones	61
Figura 4.2 Sierras y Serranías del Sistema Lara-Falcón-Yaracuy	63

Figura 4.3. Precipitación media mensual y anual en mm, en el periodo 1961 – 2000, en estaciones meteorológicas del sureste del estado Falcón	65
Figura 4.4 Precipitación promedio mensual del mes de Enero	66
Figura 4.5. Temperatura media mensual en °C, en el periodo 1970 – 2000, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón	67
Figura 4.6 Evaporación promedio mensual en mm, en el periodo 1970-200, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón. (Tomado de INAMEH, 2006).	68
Figura 4.7 Comparación de datos de precipitación, evaporación y temperatura de la estación Tocuyo de la Costa, Falcón	69
Figura 4.8. Configuración tectónica de región noreste de Suramérica-América Central y región del Caribe	75
Figura 4.9 Mapa de configuración tectónica y elementos estructurales, en el área de Falcón oriental, Costa Afuera y Antillas Holandesas.	77
Figura 4.10. Modelos de evolución para la cuenca de Falcón propuesto por Muessig (1984) y Macellari (1995)	78
Figura 4.11. Modelos de evolución para la cuenca de Falcón propuesto por Porras (2000)	79
Figura 4.12. Cuadro cronoestratigráfico de la región de Falcón septentrional	80
Figura 4.13. Mapa paleogeográfico correspondiente al Oligoceno en la región de interés	81
Figura 4.14. Mapa paleogeográfico correspondiente al Mioceno Temprano en la región de interés	82
Figura 4.15 Mapa paleogeográfico correspondiente al Mioceno Medio en la región de interés	83
Figura 4.16. Mapa paleogeográfico correspondiente al Mioceno Tardío en la región de interés.	84
Figura 4.17 Mapa paleogeográfico correspondiente al Plioceno en la región de interés	85
Figura 4.18 Mapa geológico de la zona de Yumare	86
Figura 4.19 Tabla de correlación correspondiente a la secuencia Agua Linda y Mene de Acosta	88
Figura 5.1. Mapa topográfico digitalizado correspondiente a la zona de estudio tomando como referencia las 16 cartas topográficas a escala 1:25.000.	96
Figura 5.2. Distinción entre las unidades de relieves presente en la zona de estudio.	97
Figura 5.3. Ejemplo de control litológico (U1: Litología muy competente, U3: Sedimentos no consolidados), ubicado al NO de la zona de estudio, mediante la interpretación del mapa topográfico.	98
Figura 5.4. Ejemplo de control litológico (U2: Litología muy competente, U3: Sedimentos no consolidados), ubicado al NE de la zona de estudio, mediante la interpretación del mapa topográfico.	98

Figura 5.5. Ejemplo de control estructural, ubicado al NO de la zona de estudio, mediante la interpretación del mapa topográfico.	100
Figura 5.6. Modelo Digital de Elevación (DEM) correspondiente a la zona de estudio partiendo de la digitalización de la 16 cartas topográficas a escala 1:25.000	101
Figura 5.7. Líneas de corte con diferente orientación	102
Figura 5.8. Corte topográfico A-B, donde destaca el comportamiento de la Unidad de relieve bajo.	103
Figura 5.9. Corte topográfico B-C, donde destaca el comportamiento de la Unidad de relieve intermedio.	103
Figura 5.10. Corte topográfico E-F, donde destaca el comportamiento de la Unidad de relieve alto.	104
Figura 5.11 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).	105
Figura 5.12 Unidades de relieve destacando los rasgos geológicos observados por el MDIS	106
Figura 5.13 Evidencias de contactos litológicos y capas guías observadas por el MDIS	107
Figura 5.14 Lineaciones presente en la zona de estudio mediante la interpretación de siete MDIS con ángulo de azimut cada 45° (45°, 90, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) y un ángulo de elevación del sol de 30° para cada uno	108
Figura 5.15 Área donde se visualizan las planchetas triangulares, ubicadas al sureste (SE) de la zona de estudio	109
Figura 5.16. Visualización en 3D, donde se observan las fallas y pliegues presentes en la zona de estudio mediante las interpretaciones del MDIS	110
Figura 5.17 Capa de hipsometría correspondiente a la zona de estudio partiendo de la reclasificación del Modelo de Elevación Digital (DEM) mediante los parámetros establecidos por Gamboa (1986)	111
Figura 5.18. Visualización en 3D, donde se observan la clasificación de montaña y valle de acuerdo a los criterios propuesto por Zinck (1986).	112
Figura 5.19. Capa pendiente correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM) mediante los parámetros establecidos por Gamboa (1986).	113
Figura 5.20 Visualización en 3D, donde se observan cornizas asociados a calizas.	113
Figura 5.21. Capa de orientación de laderas correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM)	114
Figura 5.21a. Ejemplo de eje de pliegue mediante la Capa temática Orientación de laderas	115
Figura 5.22 Cuencas presentes en la carta 6448 expresada en superficie y porcentajes	116

Figura 5.23 Cuencas correspondientes a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM)	116
Figura 5.24 Subcuencas correspondientes a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).	118
Figura 5.25 Patrón de drenaje dendrítico.	119
Figura 5.26 Densidad de drenaje correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).	120
Figura 5.27 Delimitación de Contactos litológicos al NO de la zona de estudio evidenciados mediante la capa de densidad de drenaje.	121
Figura 5.28 Patrón de drenaje subparalelo.	122
Figura 5.29. Comparación de la imagen LANDSAT-8 sin procesar y procesada (R-G-B: 4-3-2)	123
Figura 5.30. Imagen con corrección atmosférica o imagen Flaash correspondiente al área de estudio	124
Figura 5.31. Comparación de firma espectral correspondiente a la vegetación	125
Figura 5.32. Elaboración de la máscara para nubes correspondiente al área de estudio.	126
Figura 5.33. Imagen Fracción Mínima de Ruido (MNF) correspondiente a la zona de estudio partiendo de la imagen FLAASH (Combinación R-G-B: 4-3-2)	128
Figura 5.34. Imagen MNF con combinación R-G-B: 4-3-2. En las imágenes se destacan lineaciones (1), cambios litológicos (2) y accidentes topográficos (3)	129
Figura 5.35. Imagen Índice de Pureza de Pixel (PPI) correspondiente a la zona de estudio partiendo de la imagen MNF	130
Figura 5.36. Nube de puntos correspondiente a los píxeles de la imagen. Los píxeles de colores diferentes al blanco corresponden a los píxeles extremos.	131
Figura 5.37. Imagen Cartografiado del Angulo Espectral (SAM) correspondiente a la zona de estudio, generada con clases de bandas asociadas a la litología	132
Figura 5.38. Comparación visual entre las diferentes combinaciones de bandas en falso color, R-G-B: 5-6-4, 5-4-3, 6-4-5, 7-6-3.	134
Figura 5.39. Comparación visual entre las diferentes combinaciones de bandas en falso color, R-G-B: 5/4-6/7-4/3, 4/2-6/5-6/7, 6/4-5/7-3/5 y 4/6-6/7-7/5	135
Figura 5.40. Ejemplo de rasgos geológicos, ubicado al centro-este de la zona de estudio mediante la interpretación de la imagen LANDSAT-8 R-G-B: 5-6-4	137
Figura 5.41. Interpretación litológica a través de la imagen LANDSAT-8 R-G-B: 5-6-4 5/4-6/7-4/3.	137
Figura 5.42. Imagen Clasificación No-supervisada correspondiente a la zona de estudio, generada en función de 10 clases.	139

Figura 5.43. Imagen Clasificación Supervisada correspondiente a la zona de estudio, generada en función de 7 clases con características conocidas.	141
Figura 5.44. Comparación de la firma espectral la Formación Capadare-Casupal y Churuguara-Guacharaca.	145
Figura 5.45. Firma espectral correspondiente a los sedimentos del Cuaternario.	145
Figura 6.1. Diferentes niveles de percepción de un valle y de sus elementos componentes,	147
Figura 6.2 Mapa de Unidades Topográficas	150
Figura 6.3. Unidad de montaña alta	152
Figura 6.4. Unidad de montaña alta con sus respectivos perfiles topográficos.	154
Figura 6.5. Unidad de montaña media	155
Figura 6.6. Unidad de montaña media con sus respectivos perfiles topográficos.	157
Figura 6.7 Unidad de montaña baja	158
Figura 6.8. Unidad de Montaña baja con sus respectivos perfiles topográficos	160
Figura 6.9. Unidad de valle	161
Figura 6.10 Unidad de Valle con sus respectiva subdivisión	164
Figura 6.11. Tipos de relieve presente en la Hoja 6448 con su respectivo perfil topográfico	165
Figura 6.12. Mapa Litológico de la carta 6448. En base la integración e interpretación de los resultados obtenidos mediante sensores remotos y datos bibliográficos	167
Figura 6.13. Macizo Ígneo-metamórfico (Nomenclatura tomada de FUNVISIS (2013))	170
Figura 6.14. Expresión topográfica, MNF y MDIS del macizo ígneo-metamórfico	172
Figura 6.15. Comparación de los Macizo ígneo-metamórfico cartografiado en esta investigación con otros mapas	173
Figura 6.16. Expresión topográfica, MNF y MDIS de la Formación Cerro Misión	175
Figura 6.17. Grupo Agua Salada y formaciones adyacentes	176
Figura 6.18. Expresión topográfica, MNF y MDIS del Grupo Agua Salada	177
Figura 6.19. Comparación de la Formación Guacharaca cartografiada en esta investigación con otros mapas	178
Figura 6.20. Formaciones Casupal, Capadare y Ojo de Agua	179
Figura 6.21. Comportamiento del drenaje y expresión topográfica, MNF y MDIS de las Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua	182
Figura 6.22. Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua	182
Figura 6.23. Incongruencia entre el mapa de Guzmán & Morillo (2009) y el MDIS	183

Figura 6.24. Incongruencia entre los distintos mapas utilizados en esta investigación	184
Figura 6.25. Sedimentos no consolidados presente en la zona de estudio.	186
Figura 6.26. Principales fallas cuaternarias del noroccidente de Venezuela, destacando las fallas del Sistema Oca-Ancón (1) y Araurima (16) como posibles fallas controladoras de la cinemática de las estructuras del área de estudio	188
Figura 6.27. Lineaciones obtenidas mediante el Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) con orientación del sol cada 45°	190
Figura 6.28 Mapa Estructural de la Hoja 6448 con base a la integración e interpretación de los resultados obtenidos mediante sensores remotos y datos bibliográfico	191
Figura 6.29. Fallas de Corrimiento del sector nor-occidental del área con pliegues y retrocorrimientos asociado	193
Figura 6.30. Fallas de corrimiento del sector nor-oriental del área con pliegues y retrocorrimientos asociado	195
Figura 6.31. Modelo Riedel de deformación en un sistema de falla transcurrente dextral y sinistral	197
Figura 6.32. Fallas rumbo-deslizantes transpresivas.	198
Figura 6.33. Sistema de Fallas transcurrente que genera una estructura duplex según Fischer & Woodcock, 1986	200
Figura 6.34. Geometría de una estructura dúplex, interpretada al suroeste de la zona de estudio	201
Figura 6.35. Geometría parcial de una estructura dúplex, interpretado al centro este del área de estudio	202
Figura 6.36. Despegue y plegamiento de una secuencia estratigráfica sobre un basamento no deformado.	203
Figura 6.37. Pliegues anticlinales y sinclinales interpretados en la Hoja 6448	204
Figura 6.38 Mapa Geológico Actualizado correspondiente a la Hoja 6448 mediante el uso de sensores remoto y datos bibliográficos	205
Figura 6.39 Corte geológico A-A' que atraviesa oblicuamente el área de estudio con dirección NO-SE (L.G: Litología Gráfica, E.P: Espesores Promedio)	210
Figura 6.40. Corte geológico B-B' que atraviesa oblicuamente el área de estudio con dirección NNO-SSE (L.G: Litología Gráfica, E.P: Espesores Promedio)	212

## INDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 2.1. Antecedentes relacionados al área de estudio	10
Tabla 2.2. Antecedentes relacionados a sensores remotos	12
Tabla 2.3. Especificaciones de productos LDCM a Nivel 1	31
Tabla 2.4 Distribución de las bandas en OLI y TIRS	32
Tabla 3.1.- Porcentaje de cobertura nubosa de cada fecha adquirida para la imagen LANDSAT-8.	39
Tabla 3.2. Tipos de densidad y texturas del drenaje	52
Tabla 4.1. Grandes unidades de relieve de la carta 6448	63
Tabla 4.2. Precipitación media mensual y anual en mm, en el periodo 1961 – 2000, en estaciones meteorológicas del sureste del estado Falcón	64
Tabla 4.3. Temperatura media mensual y anual en °C, en el periodo 1970-2000, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón	66
Tabla 4.4. Evaporación media mensual y anual en mm, en el periodo 1970 – 2000, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón	67
Tabla 4.5 Taxonomía de Suelos de la carta 6448	72
Tabla 4.6. Unidades ígneo-metamórficas	87
Tabla 4.7. Descripción de las rocas sedimentarias presente en el área de estudio	89
Tabla 5.1. Información obtenida de los perfiles topográficos.	104
Tabla 5.2. Cuencas presentes en la carta 6448	117
Tabla 5.3. Descripción de las combinaciones de bandas utilizadas en la investigación.	134
Tabla 5.4. Descripción de las clases asignadas a la clasificación supervisada.	142
Tabla 5.5. Descripción de la separabilidad espectral.	144
Tabla 5.6. Descripción de la matriz de confusión.	144
Tabla 6.1 Niveles de clasificación del paisaje correspondiente a la zona de estudio.	148

## INTRODUCCIÓN

Entre las cuencas de Venezuela, la cuenca petrolífera de Falcón presenta la más baja producción de hidrocarburos líquidos. Sin embargo, en la zona se localizan pequeños campos con crudos parafínicos de alta calidad, muy valiosos por los derivados que se pueden obtener, además de significativas reservas de gas. Nuestro país, acostumbrado a la dependencia rentista del petróleo, ha enfocado especial interés en la prospección de hidrocarburos. Nuestras reservas de hidrocarburos nacionales están respaldadas en buena medida gracias a la última cuantificación realizada en la Faja Petrolífera del Orinoco; esto nos posiciona en un nivel privilegiado en lo que al panorama petrolero se refiere. Sin embargo, no debemos restar atención a la cuenca de Falcón, muy interesante y compleja desde el punto de vista geológico y que demanda una mayor actividad exploratoria para ser abordada con la interrelación de estudios geofísicos, geoquímicos y geológicos.

La Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela ha contribuido en la actualización de mapas geológicos de esta región noroccidental mediante la utilización de imágenes satelitales; sin embargo, son escasos los trabajos publicados realizados en el estado Falcón donde utilizan este tipo de herramienta (Guzmán y Morillo, 2009; Figueroa y Pérez, 2009; Galindo, 2014). Estas herramientas, permiten mejorar la calidad de la interpretación geológica en superficie, con metodologías donde se involucran clasificaciones supervisadas y no supervisadas, álgebra de bandas y combinación de bandas para resaltar información, entre otros.

El tema central de la investigación se enfoca en actualizar la cartografía geológica mediante el uso de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) de una zona del sureste de Falcón oriental, por lo que se toma como referencia la hoja cartográfica 6448 a escala 1:100.000, subdividida en 16 cartas a escala 1:25.000, con el fin de actualizar la cartografía geológica del área mediante la

integración de la interpretación cartográfica convencional y el análisis especializado por sensores remotos.

En este sentido, el proceso investigativo se estructuró en varios capítulos que se detallan a continuación: Capítulo I, Fundamentos de la investigación que contiene el planteamiento del problema, los antecedentes del problema, objetivos de la investigación: general y específicos, justificación e importancia de la investigación; capítulo II, contenido de los fundamentos teóricos, donde se detallan los elementos teóricos-conceptuales y descripciones de algunos trabajos previos que sustenta esta investigación.

Posteriormente, el capítulo III detalla el marco metodológico y refiere al tipo y diseño de la investigación, instrumentos y técnicas para la recolección de datos y el análisis de la información, fases para el procesamiento e interpretación de imágenes digitales y las técnicas aplicadas para la actualización de la información pertinente al análisis realizado.

Capítulo IV, Geografía física y Geología regional, concentra una caracterización general sobre el área de estudio, los elementos que intervienen en el análisis de imágenes de percepción remota, así como, el análisis teórico referido a la geología regional a fin de ser contrastado con la información generada por las herramientas SIG.

Capítulo V y VI, en estas secciones se presentan los resultados y análisis de los rasgos topográficos, estructurales y estratigráficos alcanzados de forma convencional, obtenida mediante la cartografía recopilada y posteriormente los derivados de las herramientas de teledetección: métodos de clasificaciones supervisadas y no supervisadas, modelos de elevación digital, álgebra de capas, combinaciones de banda, entre otros, a fin de realzar propiedades espectrales aplicadas al área de estudio que contribuyan con discriminar unidades litológicas. Luego en el capítulo de Análisis de

Resultados se evaluará comparativamente el alcance y eficiencia de tales herramientas y se mostrarán los resultados del procesamiento de las imágenes satelitales en conjunto con la información topográfica, litológica, rasgos estructurales para ser reflejados en la actualización cartográfica de la Hoja 6448.

Por último, se plantean una serie de conclusiones y recomendaciones con la finalidad de convalidar, complementar y optimizar los resultados a través de futuros proyectos de investigación, así como proponer ideas para superar limitaciones y ampliar la aplicabilidad de las herramientas de teledetección en estudios geológicos.

# CAPITULO I

## FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

### I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado Falcón es una importante región para el país desde el punto de vista de prospección de hidrocarburos y reúne una serie de características fisiográficas y geológicas de gran complejidad que demanda un exhaustivo estudio multidisciplinario (bioestratigrafía, interpretación sísmica, teledetección, sedimentología, tectónica, entre otros). Por ello, en los últimos años se han generado una serie de investigaciones científicas para estudiar y conocer sus características geológicas a escalas cada vez más detalladas para que sean aprovechadas con diversos fines. Algunos autores que han profundizado en las complejidades estructurales y estratigráficas propias de esta región son: Audemard, 1995; Porras, 2000, Guzmán & Morillo, 2009; Figueroa & Pérez, 2009; Galindo, 2014.

En este sentido, la Universidad Central de Venezuela a través de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, ha desarrollado una diversidad de trabajos técnicos compilatorios en busca de la actualización y verificación de la información geológica de interés para el país a diversas escalas de trabajo, pero cada vez más detalladas y precisas. Asimismo, se evidencia que, por diversas razones de carácter técnico y logístico, existen discrepancias y déficit de información en ciertas áreas del país; tal es el caso de la región sur este de Falcón oriental. Esta región ha sido estudiada por diversos autores (Creole, 1968; FUNVISIS, 2013, otros) mediante la forma tradicional utilizando: fotografías aéreas, interpretación de mapas topográficos, levantamientos de campo, análisis sedimentológicos entre otros; sin embargo, sus resultados en los distintos mapas geológicos generados hasta la actualidad, con la tecnología y herramientas disponibles, pueden requerir ser corregidos y actualizados. Por tal motivo, surge la necesidad de realizar una

actualización geológica-cartográfica más confiable, para lo cual se incluye en este estudio el aprovechamiento de las imágenes satelitales por sensores remotos y sus posibilidades de análisis para el estudio geológico que, de acuerdo a las características de cada sensor, puede permitir la observación a detalle de la complejidad estructural y estratigráfica del área.

## **I.2 JUSTIFICACIÓN**

El crecimiento de la población y sus actividades productivas demandan cada vez más el aprovechamiento del territorio por lo que resulta muy necesario e importante contar con una confiable data cartográfica-geológica del área al momento de realizar estudios de análisis de riesgos, minería, ambiente para el uso del terreno. Por otro lado, la actividad petrolera resulta la mayor fuente de ingresos económicos de la nación y es indispensable investigar, interpretar y modelar las características estructurales y estratigráficas de todas las cuencas del país. En este sentido en el presente estudio se enfoca en el estudio de una sección de la cuenca petrolífera de Falcón en busca de determinar y evaluar la productividad de las zonas del subsuelo de la cuenca con mayor probabilidad de entrapamiento y acumulación de petróleo. Con base a lo anteriormente expuesto se hace necesario la actualización cartográfica de la geología de esta área a escalas detalladas, de manera que proporcione la mayor cantidad de datos geológicos posibles y con alta confiabilidad de la información a usar al momento de planificar, por ejemplo la perforación de un pozo petrolero rentable.

Estos procesos de actualización cartográfica por su alta demanda deben ser cada vez más rápidos, automatizados y de mayor confiabilidad. A través de este estudio se busca aprovechar las bondades de herramientas de teledetección, no solo para fines cartográficos, sino también para estudios de análisis de interpretación geológica. Por otro lado, el uso de la técnica de procesamiento de imágenes satelitales por sensores remotos en la elaboración de mapas geológicos permitirá detectar ciertas divergencias o incongruencias que puedan existir entre las informaciones propuestas por los

diferentes autores que han realizado estudios geológicos previos en la zona, para lo cual se podrán proponer y seleccionar, con más detalle, los sitios de interés para levantamientos de verificación en campo.

La utilización de sensores de percepción remota mediante imágenes satelitales representa una herramienta poco aprovechada y muy valiosa para la realización de estudios geológicos. Mediante distintos procesos aplicados a la imagen satelital, se pueden resaltar características topográficas, hidrográficas, estructurales y litológicas a distancia, facilitando el análisis de áreas de difícil acceso o disminuyendo los costos logísticos para su estudio *in situ*, sin ser necesario, en algunos casos, el traslado hasta el área de interés; logrando así una cartografía de alta calidad tecnológica, acertada y rápida. Lo importante de esta técnica es que permite realizar una interpretación geológica de la zona aprovechando la información y el análisis de las imágenes, complementando el estudio y la actualización geológica, sobre todo, en zonas de difícil acceso.

En la hoja topográfica 6448, correspondiente a la zona de estudio, se evidencian elementos estructurales relacionados con el desplazamiento de la falla de Oca-Ancón que atraviesa de O a E la hoja inmediatamente ubicada al sur. Esta falla de carácter regional en conjunto con las fallas de Boconó, El Pilar y San Sebastián conforma la zona de mayor actividad (desplazamiento) en la interacción de las placas en nuestro país. El presente estudio aportará una actualización geológica-cartográfica más detallada e integral del área y en base a los resultados se propondrá la interpretación de un modelo de evolución tectono-estratigráfica del área.

## **I.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **I.3.1 Objetivo general**

Actualizar la cartografía geológica del área correspondiente a la hoja 6448 (Araurima), presentándola en 16 mapas a escala 1:25.000 mediante la integración de la interpretación cartográfica convencional a través del análisis por sensores remotos.

### **I.3.2 Objetivos específicos**

- Recopilar la cartografía topográfica y geológica correspondiente a la hoja topográfica 6448.
- Evaluar los rasgos estructurales y estratigráficos de la zona de estudio a través de la información geológica obtenida mediante la cartografía recopilada, mapas, fotografías aéreas e imágenes satelitales.
- Aplicar métodos como clasificaciones supervisadas y no supervisadas, modelos de elevación digital (DEM), algebra y combinaciones de bandas, para realzar propiedades espectrales.

## **I.4 Alcance**

La realización de este Trabajo Especial de Grado aportará información geológica actualizada de la Hoja 6448, ubicada en la zona sur este de Falcón oriental, cotejada y analizada mediante el empleo de imágenes satelitales. A partir del estudio se generara 16 mapas a escala 1:25000 representando características geológicas actualizadas del área de estudio

## **I.5 Ubicación de la Zona de Estudio**

La zona de estudio se ubica al sur-este de Falcón oriental abarcando la zona septentrional de los estados Lara y Yaracuy; en un área que abarca parte de los

municipios Silva, Bolívar, Acosta y Federación. Dicha área está comprendida en los siguientes puntos geográficos  $68^{\circ}30'0''$  a  $69^{\circ}0'0''$  (longitud oeste) y  $10^{\circ}40'0''$  a  $11^{\circ}0'0''$  (latitud norte) y dentro de la misma destacan los poblados Colonia de Araurima, La Concepción, Macanillal de Maporita, Yaracal, Riecito, Uriacora; además de los ríos Tocuyo, Araurima, Agua Linda, entre otros.

La zona de estudio está representada por un polígono que abarca la totalidad de la hoja cartográfica 6448. Dicho polígono representa una extensión aproximada de  $2.006 \text{ km}^2$  y está definido por los vértices A, B, C y D (Figura 1.1).

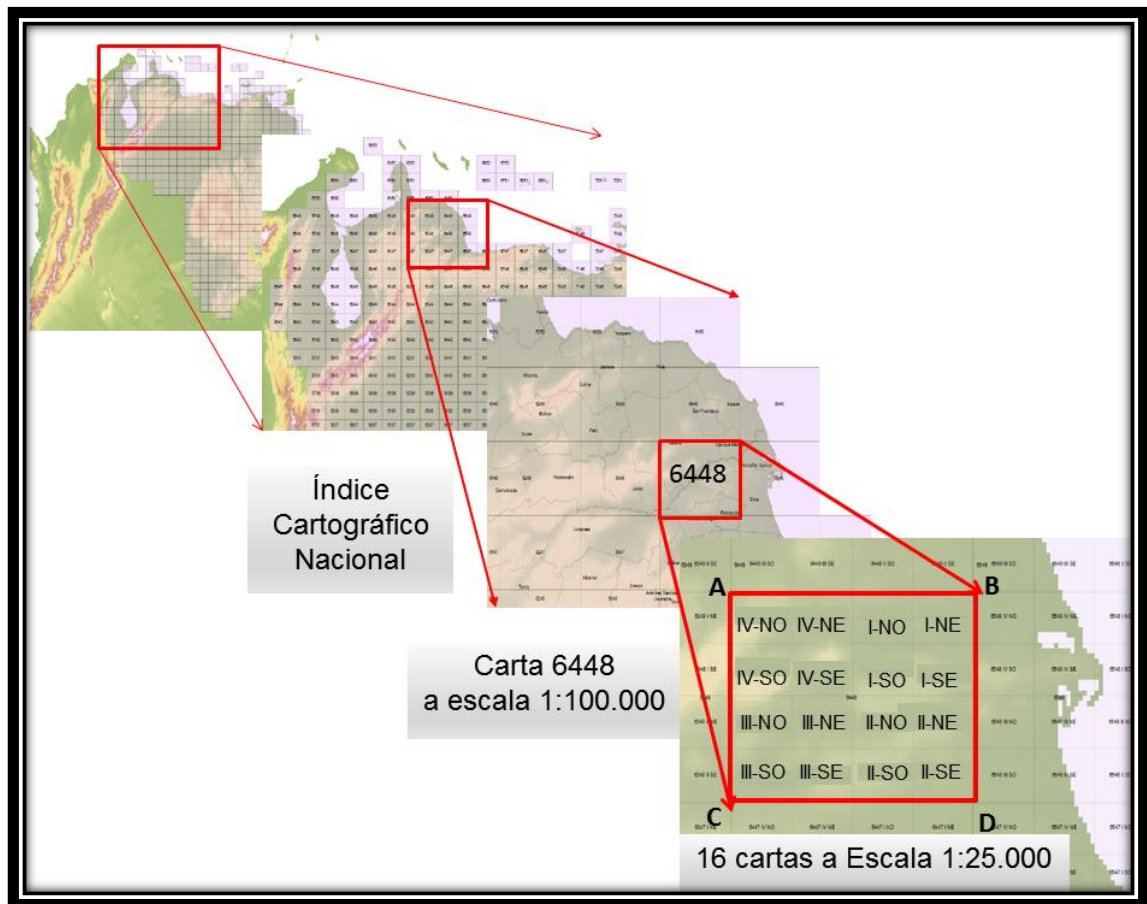


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio  
(Elaboración propia en base a IGVS B 2017).

## **CAPITULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

La investigación se centra en hacer uso de las herramientas de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la actualización de cartografía geológica. Antes de abordar los aspectos técnicos de estas herramientas se considerarán los aportes de investigaciones geológicas precedentes en el área, de interés para este estudio, en base a las técnicas utilizadas.

#### **II.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

A manera esquemática se presenta una breve descripción de los trabajos recopilados y revisados con vinculación al tema de la presente investigación a fin de considerar los aportes y requerimientos investigativos en materia de la geología de la zona y de técnicas de teledetección aplicadas a cartografiado e interpretaciones geológicas. Dichos trabajos se refieren según autor, año y título. Además se mencionan los aspectos más relevantes que fueron considerados para cada investigación.

##### **II.1.1 Antecedentes relacionados con la geología del área de estudio**

Los trabajos de la Tabla 2.1 muestran aspectos metodológicos y de información geológica de gran relevancia para la investigación; algunos coinciden con el área de estudio y generan, además de una compilación documental extensa, mapas geológicos a diversas escalas que son considerados en la actualización cartográfica.

Tabla 2.1. Antecedentes relacionados al área de estudio

Autor, año y título	Descripción de la investigación
<p><b>Renz, H.</b> <b>(1948)</b> “Stratigraphy and fauna of the Agua Salada Group, state of Falcón, Venezuela”</p>	<p>Realizó un estudio de la estratigrafía y fauna del grupo Agua Salada, donde define las localidades tipos y así mismo describe cuatro nuevas especies de foraminíferos.</p>
<p><b>Wheeler, C.</b> <b>(1960)</b> “Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno Inferior de Falcón Occidental y Nororiental”</p>	<p>Describió la estratigrafía del Oligoceno y Mioceno Inferior de Falcón Occidental y Nororiental aclarando las relaciones existentes en las diferentes áreas, con la finalidad de evitar malas correlaciones y duplicación de nombres en secciones equivalente.</p>
<p><b>Lorente, M.</b> <b>(1978)</b> “La caliza de Capadare y sus relaciones con la cuenca de Agua Salada, Estado Falcón”.</p>	<p>Propone designar formalmente a la caliza de Capadare como Formación Capadare, habiendo comprobado que corresponde a una facies carbonática dentro del Grupo Agua Salada, que se desarrolló en forma de bancos aislados (que alcanzaron los 190 m de espesor) sobre plataformas poco profundas (aproximadamente 30 m) dentro de una cuenca de profundidad batial.</p>
<p><b>Audemard, F.</b> <b>&amp; De Mena, J.</b> <b>(1985)</b> “Nueva interpretación estructural de Falcón oriental, en base a la integración de geología de superficie, información, de subsuelo, imágenes de radar, levantamientos gravimétricos y sísmicos”</p>	<p>Generan un modelo estructural con base a la integración de geología de superficie, levantamientos gravimétricos y sísmicos. Proponen que la cuenca de Falcón luego de su formación estuvo afectada por al menos tres regímenes compresivos, los cuales, le han otorgado a la cuenca su configuración actual y también sugieren, tomando información de otros autores, que la misma en la actualidad sigue estando afectada por la última fase compresiva.</p>
<p><b>Camacho, A.</b> <b>&amp; Mijares, M.</b> <b>(1989)</b> “Estudio geológico de la zona de Sanare Buena Vista, sector Agua Linda, distrito Silva, estado Falcón”</p>	<p>Estudiaron la geología de la zona de Sanare – Buena Vista, sector Agua Linda, distrito Silva (actual municipio Silva), estado Falcón, mediante el cual contribuyeron con el esclarecimiento de las relaciones estratigráficas que existen, edad y evaluación de posibles yacimientos fosfáticos de las rocas aflorantes en la zona.</p>

<p><b>Audemard, F.,                  Beltrán, C.,                  Rodríguez, J. A., &amp;                  Singer, A.                  (1994)</b>                  “Definición de la traza activa del sistema de fallas de Oca-Ancón, noroccidente de Venezuela”</p>	<p>El sistema destal de fallas de Oca-Ancón se extiende hacia el este sobre 650 km., desde Santa Marta (Colombia) hasta Boca de Aroa (Venezuela). Su traza activa se subdivide estructuralmente en cinco sectores: Santa Marta-Toas, Toas-Mene Mauroa, Mene Mauroa-Paraiso, Paraíso-Socrema y Socrema-Boca de Aroa, describiendo estos sectores sucesivamente del oeste hacia el este.</p>
<p><b>Audemard, F.                  (1997).</b>                  “Tectónica activa de la región septentrional de la cuenca invertida de Falcón, Venezuela occidental.”</p>	<p>A partir de datos microtectónicos medidos exclusivamente en las unidades Plio-Cuaternarias de Falcón septentrional se calculó el tensor de esfuerzos que es el responsable de la cinemática actual de cinco sistemas de fallas, el cual está caracterizado por un esfuerzo máximo horizontal de dirección NNO-SSE a N-S y un esfuerzo mínimo horizontal orientado ENE-SOS.</p>
<p><b>Penin, J.                  &amp; Villarroel, V.                  (2005)</b>                  “Integración y actualización geológica del área de Jacura y Capadare, estado Falcón”.</p>	<p>Realizaron una integración y actualización geológica de las áreas correspondientes a Jacura y Capadare, estado Falcón (Penin, J. &amp; Villarroel, V., 2005) y entre las poblaciones de Churuguara y Piedra Grande, estados Falcón y Lara (Esparis, E. &amp; Hernández, O.); partiendo de la digitalización de 16 hojas cartográficas a escala 1:25.000 para luego compilar e interpretar la información preexistente en un mapa geológico-cartográfico a escala 1:50.000.</p>
<p><b>Esparis, E.                  &amp; Hernández, O.                  (2005)</b>                  “Integración y actualización geológica del área comprendida entre las poblaciones de Churuguara y Piedra Grande, Estados Falcón y Lara”.</p>	<p>.</p>
<p><b>López, I.                  (2005)</b>                  “Integración y actualización geológico cartográfica de una zona ubicada al noreste del estado Falcón, entre los distritos: Zamora, Acosta, Miranda y Colina”.</p>	<p>Elaboró dos hojas geológicas-cartográficas a escala 1:50.000, partiendo de la digitalización de 21 hojas topográficas a escala 1:25.000. Permitiendo establecer zonas en las que se necesita ampliar, verificar u obtener información geológica, disponiéndose así de un documento único del norte de Falcón.</p>

<p><b>Nevado, F.</b> <b>(2012)</b></p> <p>“Integración geológico de la región Moroturo-Palmasola, estados Yaracuy y Lara”.</p>	<p>Realizó una integración geológica en la región Moroturo-Palmasola, estados Yaracuy y Lara, obteniendo quince (15) hojas geológicas a escala 1:25.000, digitalizadas, compiladas y reinterpretadas; y un mapa final geológico-cartográfico a escala 1:100.000. Este trabajo suministra cuatro cartas a escala 1:25.000 que en su zona norte coinciden con el área de estudio.</p>
--	---

## II.1.2 Antecedentes relacionados a sensores remotos

Tabla 2.2. Antecedentes relacionados a Sensores Remotos.

Autor, año y título	Descripción de la investigación
<p><b>Mitre, L.</b> <b>(1981)</b></p> <p>“Las imágenes LANDSAT-una herramienta útil en la interpretación geológico-estructural; un ejemplo en el noreste de México”</p>	<p>Hace especial referencia a las imágenes LANDSAT como una herramienta útil en la interpretación geológico-estructural en un ejemplo realizado al noreste de México. Como resultado en dicho trabajo logra demostrar un modelo geológico estructural mediante las lineaciones observadas a través de las imágenes LANDSAT.</p>
<p><b>Briceño, H.</b> <b>(1983)</b></p> <p>“Cartografía geológica en ambiente de selva utilizando técnicas de sensores remotos: Río Caroní, Venezuela”</p>	<p>Realiza una cartografía geológica en la cuenca de río Caroní y demuestra que la interpretación fotogeológica sobre imágenes de satélite y de radar permite la elaboración de mapas geológicos a nivel regional de una manera rápida y económica y que las estructuras geológicas tales como fallas, sistemas de diaclasas, pliegues y contactos geológicos pueden ser cartografiados con aceptable precisión.</p>
<p><b>Briceño, H.</b> <b>(1999)</b></p> <p>“El Macizo del Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: Geología, geomorfología, aspectos geoquímicos del Macizo del Chimantá”</p>	<p>Realizó un estudio en la zona de Puerto Ayacucho a través de las imágenes LANDSAT-5 en donde hace una integración entre las imágenes satelitales y fotografías aéreas como parte de su trabajo de ascenso.</p>
<p><b>Ramadam, T.</b> <b>(2002)</b></p> <p>“Exploration for uranium and thorium mineralizations at Wadi</p>	<p>Demostó la utilidad de las imágenes multiespectrales LANDSAT para la prospección de uranio y torio al ubicar yacimientos en la parte centro este de Egipto como parte de un trabajo conjunto entre la “<i>National Authority for Remote Sensing and Space Sciences</i>” y el “<i>National Center For</i></p>

<p>Um Laseifa Area Central Eastern Desert Egypt. Using Remote Sensing Technique”</p>	<p><i>Nuclear Safety and Radiation Control</i>”; ambas agencias egipcias.</p>
<p><b>Carrero, F. &amp; Infante, J. (2004)</b>                  “Clasificación mineralógica del Cerro Bolívar y el cuadrilátero San Isidro a través de análisis multiespectral, utilizando imágenes de satélite Landsat 7 ETM+”</p>	<p>Define en el escudo de Guayana, (región venezolana), mediante la aplicación de sensores remotos, rocas arqueozoicas y proterozoicas de muy diversas litologías, siendo alteradas en mayor o menor escala durante una serie de eventos tectónicos mayores, cuyos periodos orogénicos comprenden edades entre 800 y 3.600 m.a.</p>
<p><b>Gherzi, J. &amp; Guillón, D. (2008)</b>                  “Actualización geológica a través de las imágenes satelitales (LANDSAT 7 ETM) de la zona centro-occidental de la Sierra de Perijá entre las siguientes coordenadas: longitud (72°30-73°00) y latitud (10°20)”</p>	<p>Generó un mapa geológico actualizado a escala 1:100.000 de la zona centro-occidental de la Sierra de Perijá entre las coordenadas: longitud (72°30’-73°00’) y latitud (10°00’-10°20’), a través de la integración geológica entre los datos obtenidos de las imágenes satelitales (LANDSAT-7 ETM), y los datos recopilados en las bibliografías y trabajos previos consultados, donde quedó evidenciado la correspondencia de estas imágenes multiespectrales con la geología superficial de la zona de estudio descrita por otros autores previamente.</p>
<p><b>Guzman, Y. &amp; Morillo, Z. (2009)</b>                  “Actualización de la cartografía geológica de la zona oriental de Falcón, al sur del Alto de Esperanza-Guacharaca”</p>	<p>Realizó una actualización de la cartografía geológica en la parte oriental de Falcón al sur del alto La Esperanza-Guacharaca generando un mapa geológico a escala 1:50.000. Para ello fue necesario complementar la información de la cartografía geológica y unificar los criterios de los diferentes autores, mediante la interpretación de imágenes de radar, la clasificación supervisada y no supervisada de las imágenes LANDSAT-7 ETM, que ayudaron a realzar características geológicas en la zona, y finalmente, a generar el mapa geológico digitalizado a escala 1:50.000, bajo la plataforma ArcGIS.</p>
<p><b>Villanueva, A. (2011)</b>                  “Interpretación geológica mediante el uso de sensores remotos de una zona ubicada al sur de la ciudad de Puerto Ayacucho, Estado Amazonas”</p>	<p>Generó un mapa geológico a escala 1:100.000 de una zona ubicada al sur de la ciudad de Puerto Ayacucho, estado Amazona, a través la integración geológica de trabajos previos realizado en el área de estudio con los resultados obtenidos en el procesamiento de la imagen satelital (LANDSAT-7 ETM), donde mostró la correspondencia entre la geología superficial descrita en estudios previos y la interpretación de las imágenes multiespectrales.</p>

<p><b>Galindo, M.</b> <b>(2014)</b> “Integración de la cartografía geológica mediante imágenes satelitales hiperspectrales con datos de campo al surestede Urumaco, estado Falcón”</p>	<p>Realizó una integración de la cartografía geológica mediante imágenes satelitales hiperspectrales con datos de campo al sureste de Urumaco, estado Falcón, donde la adición de las imágenes de radar en el análisis estructural agregó una mayor exactitud a las condiciones estructurales del área de estudio, la combinación de todos los resultados dio como producto final un mapa geológico de la zona a escala 1:25.000. Dicho autor demostró la confiabilidad y el alto grado de detalle de las imágenes hiperspectrales frente a las imágenes multispectrales comunes, y de su aporte en las distribuciones desde un punto de vista espacial como herramienta suplementaria a los métodos de estudio tradicionales.</p>
--	--

## II.2 ASPECTOS TEÓRICO-CONCEPTUALES

En la actualidad, se puede afirmar que existe un mayor interés de la información proveniente de las denominadas geociencias. Este crecimiento ha sido influenciado entre otros elementos, por el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que han apoyado la plataforma académica por su versatilidad y por la capacidad que tienen para procesar grandes cantidades de información y otros procesos. Los términos percepción remota, teledetección o sensoramiento remoto hacen referencia al uso de tecnologías que pertenecen al campo de la **Geomática**. Este término se refiere al método integrado para la medición, análisis y manejo de los datos terrestres, denominados datos espaciales. Estos provienen de satélites que orbitan la tierra, sensores marinos y aerotransportados, así como instrumentos estacionarios de medición (Olaya, 2009).

El primer Sistema de Información Geográfica formalmente desarrollado aparece en Canadá, la idea surge del Departamento Federal de Energía y Recursos. Este sistema, denominado CGIS (*Canadian Geographical Information Systems*), fue desarrollado a principios de los 60 por Roger Tomlinson, quien dio forma a una herramienta que tenía por objeto el manejo de los datos del inventario geográfico canadiense y su análisis para la gestión del territorio rural. El desarrollo de Tomlinson

es pionero en este campo, y se considera oficialmente como el nacimiento del SIG. Es en este momento cuando se acuña el término, y Tomlinson es conocido popularmente desde entonces como “el padre del SIG” (Olaya, 2009).

### II.2.1 Definición y características del SIG

Un SIG o GIS (en su acrónimo inglés), es una integración organizada de *hardware*, *software*, datos geográficos y personal, diseñada para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (Olmos, 2010). Esta información debe encontrarse georeferenciada, lo que significa que debe poseer coordenadas geográficas (latitud-longitud) y reticulares, que permitan graficarla en mapas (Figura 2.1).



Figura 2.1. Componentes de un SIG (Tomado de Ministerio de desarrollo Social, Uruguay, 2015.  
Disponible en: [www.mides.gub.uy/82323/informacion-geografica](http://www.mides.gub.uy/82323/informacion-geografica)).

El SIG (Figura 2.2) funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede

saber su localización en la cartografía. El funcionamiento de un SIG pasa por las siguientes fases:

- Entrada de la información en el sistema, ya sea digital o pendiente de digitalización.
- Almacenamiento y actualización de las bases de datos geográficamente, es decir, georreferenciar la información mediante coordenadas geográficas de latitud y longitud.
- Análisis e interpretación de los datos georreferenciados.
- Salida de la información en forma de productos diferentes, que dependerán de las necesidades del usuario.

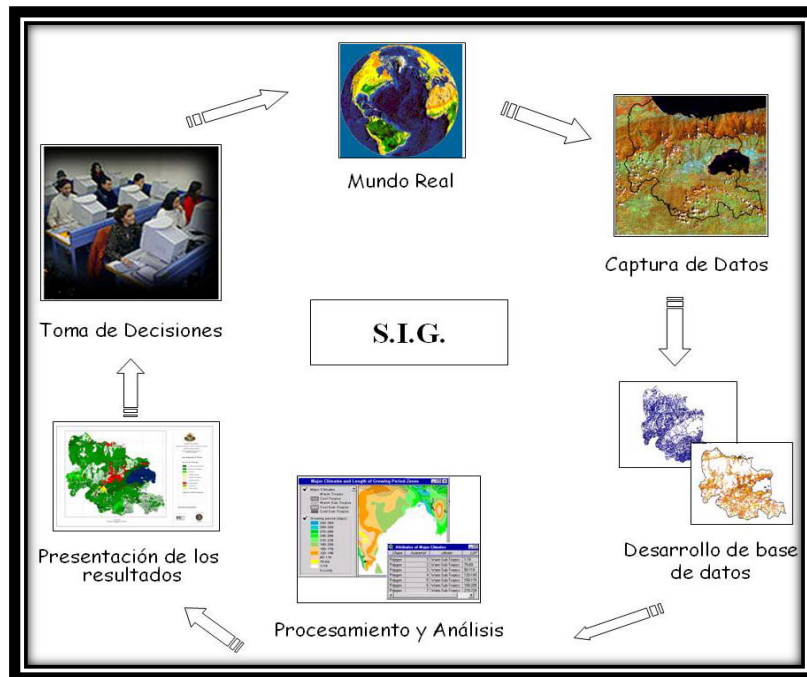


Figura 2.2. Flujo característico de un SIG (Tomada de curso introductorio a la geomática. Fundación Instituto De Ingeniería, 2005).

Los datos espaciales en un SIG pueden ser representados a través de dos formatos o sistemas espaciales: vectorial y ráster. Son dos formatos muy diferentes, que se distinguen en primer lugar por la manera de almacenar los objetos geográficos

(la base de datos geográfica); además, por el estilo de almacenar los atributos de estos objetos (la información temática) y; por último, por su apariencia (Olmos, 2010).

### II.2.1.1 Formato vectorial y ráster

En un SIG las características geográficas se expresan con frecuencia como vectores, manteniendo las características geométricas de las figuras. En los datos vectoriales el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos; es decir, de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. Por su parte los datos ráster son, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en mallas. El modelo de SIG ráster o de retícula se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor (Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar IGVS, 2008) (Figura 2.3).

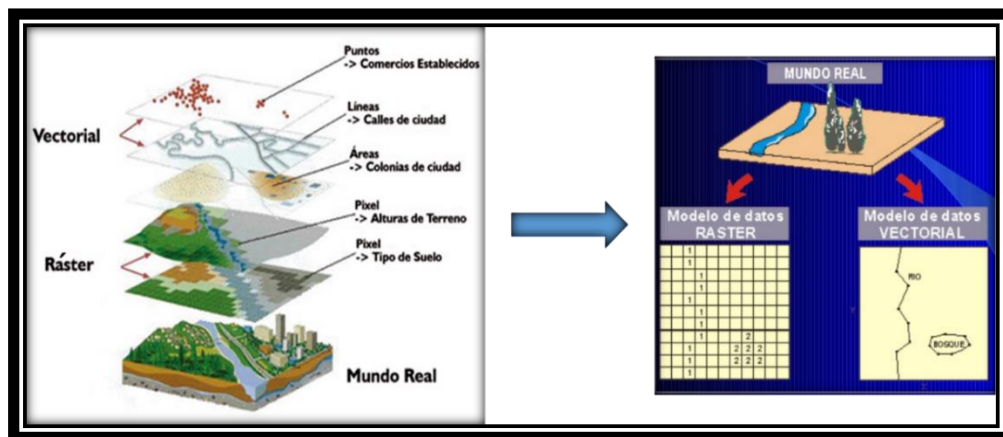


Figura 2.3. Modelos de datos ráster y vectorial (Tomado y modificado de curso introductorio a la geomática. Fundación Instituto De Ingeniería, 2005).

En la investigación geológica es frecuente disponer de grandes volúmenes de datos espaciales, a veces muy difíciles de obtener, los cuales pueden ser adecuadamente

tratados y analizados con ayuda de los SIG. Se puede decir, que la herramienta facilita y agiliza la elaboración de mapas de naturaleza geológica, que van desde aquellos que indican las zonas o puntos donde es posible la presencia de un recurso o de un proceso geológico relevante.

Por ello, se hace cada vez más necesario elaborar modelos espaciales predictivos que permitan la incorporación y combinación de las variables relevantes relacionadas con el fenómeno estudiado. Estos modelos, elaborados normalmente en entorno SIG, poseen naturaleza numérica diversa, que van desde modelos basados en la combinación de mapas mediante reglas lógicas, aritméticas, estadísticas o probabilísticas, hasta modelos más complejos basados en algoritmos de inteligencia artificial y minería de datos. En la presente investigación se busca aprovechar las bondades de los SIG y sus herramientas para la actualización geológica cartográfica.

### **II.2.2 El Sistema de Teledetección**

La teledetección es un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con el objeto (Álzate, 2001). La teledetección (Figura 2.4) constituye cuatro elementos esenciales:

- Una plataforma espacial para sostener el instrumento. Es el medio aéreo que se encuentra “a distancia” de la superficie de la Tierra. Pueden ser satélites, aviones y similares (1).
- El objeto que se va a observar, en nuestro caso el planeta (2).
- Un instrumento o sensor (cámara, escáneres, etc.) para observar el objeto, en este caso la Tierra (3).
- La información que se obtiene con los datos de la imagen. Al final es todo aquello que amplía nuestro conocimiento sobre nuestro planeta (la nubosidad

sobre Venezuela, la evolución del agujero de ozono, el avance de los desiertos, el progreso de la deforestación y muchas cosas más) (4).

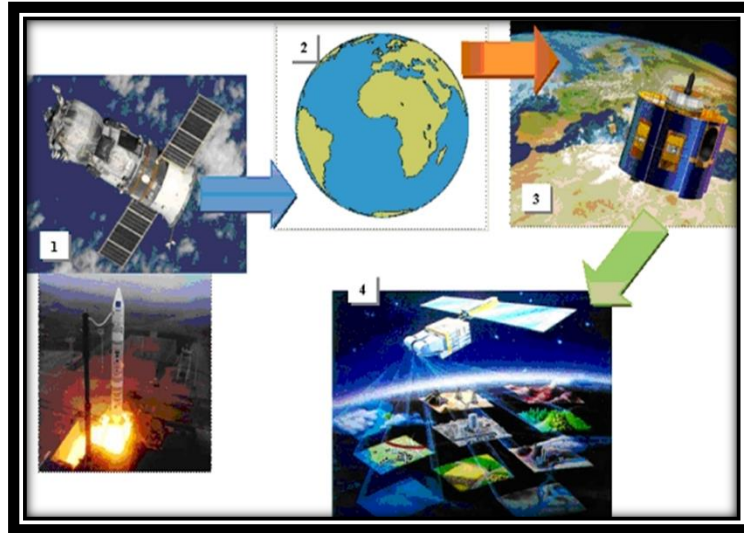


Figura 2.4. Elementos esenciales de la teledetección. (Disponible en:  
<https://comunidadrediam.wordpress.com/2014/09/18/teledeteccion-fundamentos-basicos/>)

Según Álzate (2001) el sistema de teledetección consta de componentes que se interrelacionan entre sí (Figura 2.5). A continuación, se describen cada uno de ellos.

- Fuente de energía: Es la que da origen al flujo energético que es detectado por el sensor.
- Radiación y la atmósfera: Para que la energía vaya de la fuente hacia el objeto, necesita atravesar e interactuar con la atmósfera. Esta interacción también sucederá cuando la energía retorne de vuelta desde el objeto al sensor.
- Interacción con el objeto de interés: Cuando la energía llega a la Tierra interactúa con el objeto de interés, conformado por las diferentes coberturas de la Tierra (superficie terrestre, atmósfera, océano), esta interacción se da en forma de algún fenómeno (reflexión, emisión, absorción).

- Sistema del sensor: Es el que capta, codifica y graba la radiación que devuelve el objeto en tierra, sin estar en contacto con él. Después envía al sistema de recepción en tierra, la energía grabada.
- Transmisión, recepción y procesamiento: Aquí los datos recibidos en forma digital, son preprocesados para obtener una imagen, bien sea en papel o en medio digital. Luego de este paso la imagen es interpretada, de forma visual o procesándola adicionalmente a través de técnicas digitales, para llegar al elemento final del proceso, el cual consiste en realizar aplicaciones con la información temática que se extrae de la imagen, entendiendo el comportamiento de los objetos que fueron censados allí, para la solución de algún problema en particular.

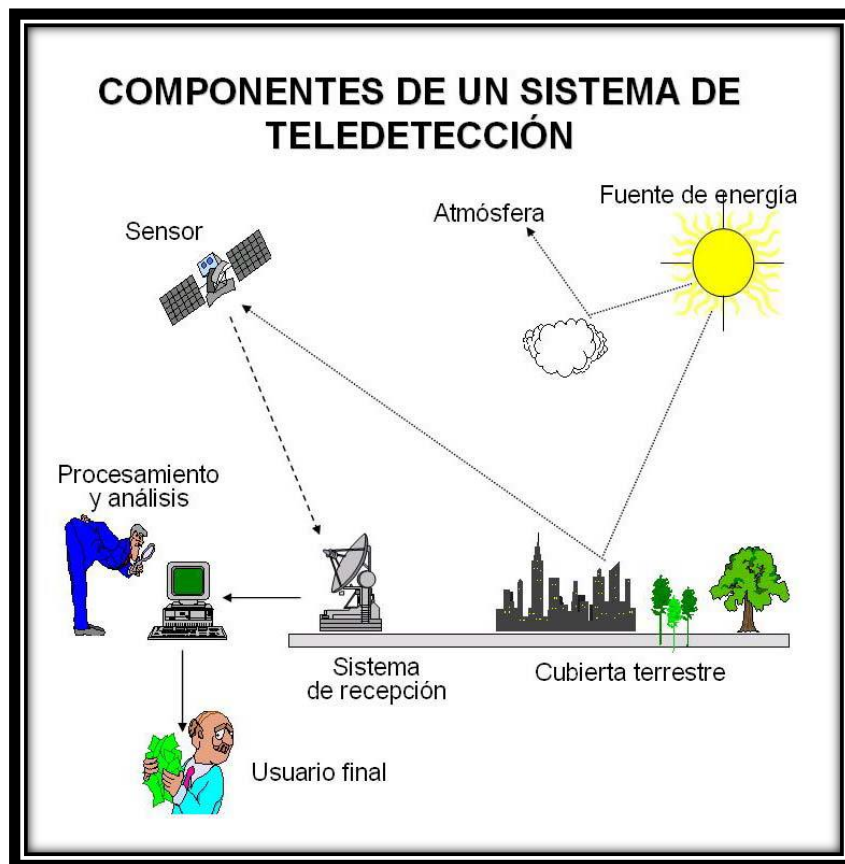


Figura 2.5. Componentes de un sistema de teledetección. (Tomada de curso introductorio a la geomática. Fundación Instituto De Ingeniería, 2005).

A continuación se describen varios conceptos de la física necesarios para entender el funcionamiento de los sistemas de teledetección:

### II.2.2.1 Campo eléctrico

Es una propiedad del espacio (Figura 2.6), debido a la cual una carga eléctrica puntual de valor " $q$ " sufrirá los efectos de una fuerza " $F$ " que vendrá dada por la siguiente ecuación:  $\vec{F} = q\vec{E}$ , donde " $E$ " es el mencionado campo eléctrico, que es, por tanto, una magnitud vectorial. Esta definición indica que el campo no es directamente medible, sino a través de la medición de la fuerza actuante sobre alguna carga. La idea de campo eléctrico fue propuesta por Michael Faraday al demostrar el principio de inducción electromagnética en el año 1832 (Acosta, 1975).

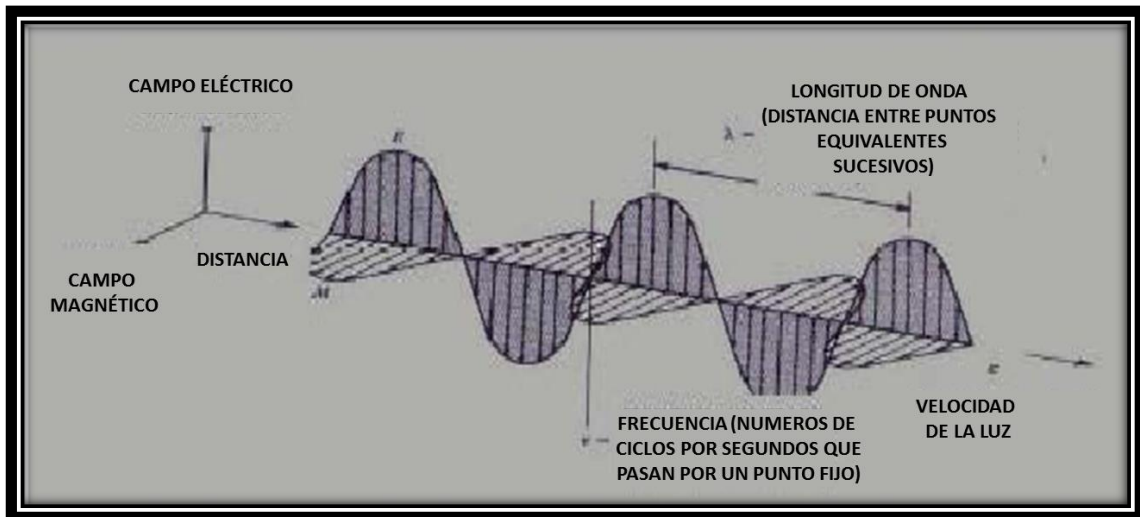


Figura 2.6 El campo eléctrico (Tomado de Díaz, 2014. Disponible en: <http://lageomatica.blogspot.com/2014/07/la-energia-electromagnetica.html>).

### II.2.2.2 Campo magnético

Es una propiedad del espacio por la cual una carga eléctrica puntual de valor  $q$  que se desplaza a una velocidad  $\vec{V}$ , sufre los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad como a una propiedad del campo, llamada inducción

magnética (o según algunos autores, densidad de flujo magnético). Así, dicha carga percibirá una fuerza descrita como:  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ . Nótese que tanto  $F$  como  $v$  y  $B$  son magnitudes vectoriales y el producto cruz es un producto vectorial que tiene como resultante un vector perpendicular tanto a  $v$  como a  $B$  (Acosta, 1975). La existencia de un campo magnético se pone en evidencia por la propiedad, localizada en el espacio, de orientar un magnetómetro (laminilla de acero imantado que puede girar libremente). La aguja de una brújula, que pone en evidencia la existencia del campo magnético terrestre, puede ser considerada un magnetómetro (Figura 2.7).

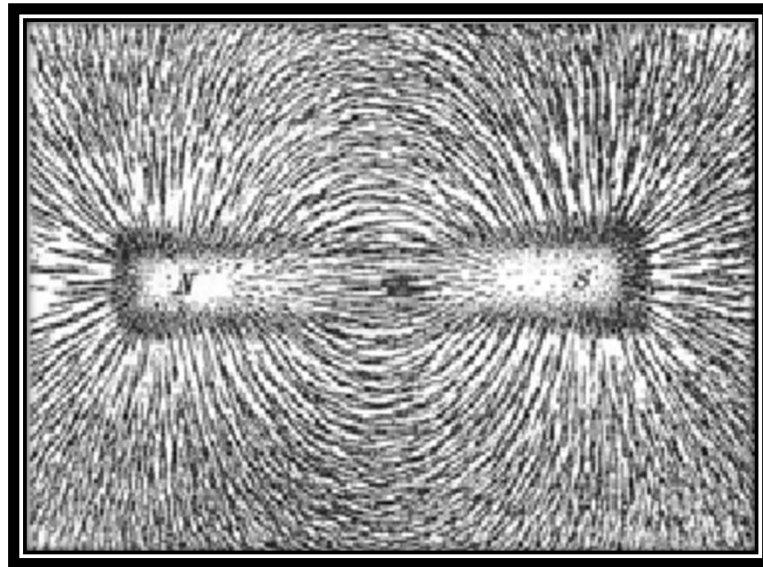


Figura 2.7 Líneas mostrando el campo magnético de un imán de barra, producidas por limaduras de hierro sobre papel. (Disponible en: [www.geociencias.unam.mx](http://www.geociencias.unam.mx)).

### II.2.2.3 Energía electromagnética

La energía electromagnética se produce por la oscilación o aceleración de una carga eléctrica. Cualquier objeto natural o sintético que se encuentre a una temperatura superior a 0 °K genera energía electromagnética. La energía electromagnética se propaga a la velocidad de la luz y tiene como parámetros característicos la frecuencia de oscilación y la longitud de onda (Figura 2.8).

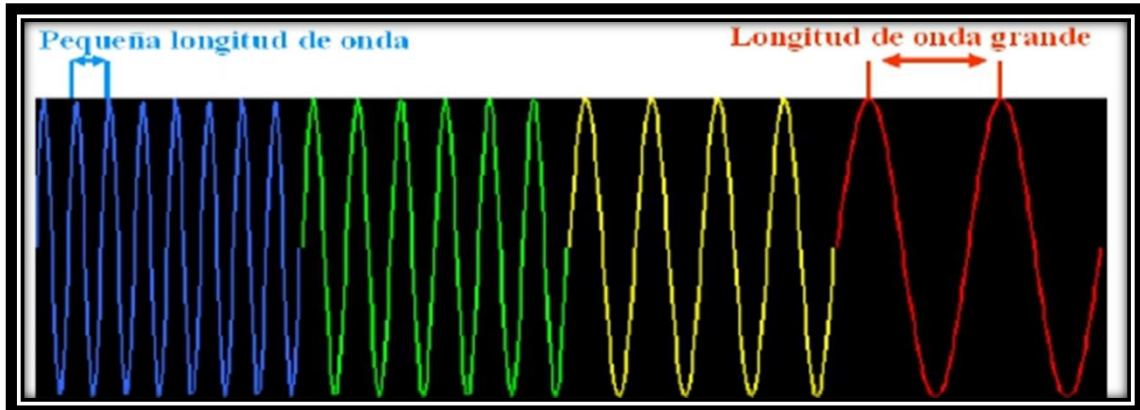


Figura 2.8. Energía electromagnética (Disponible en: [www.geociencias.unam.mx](http://www.geociencias.unam.mx)).

#### II.2.2.4 Espectro electromagnético e interacción de la radiación electromagnética

El espectro electromagnético es una representación organizada de la energía electromagnética, partiendo de longitudes de onda corta, algunos  $\mu\text{m}$ , (micrómetros) hasta valores altos en km (kilómetros) (Acosta, 1975) (Figura 2.9).

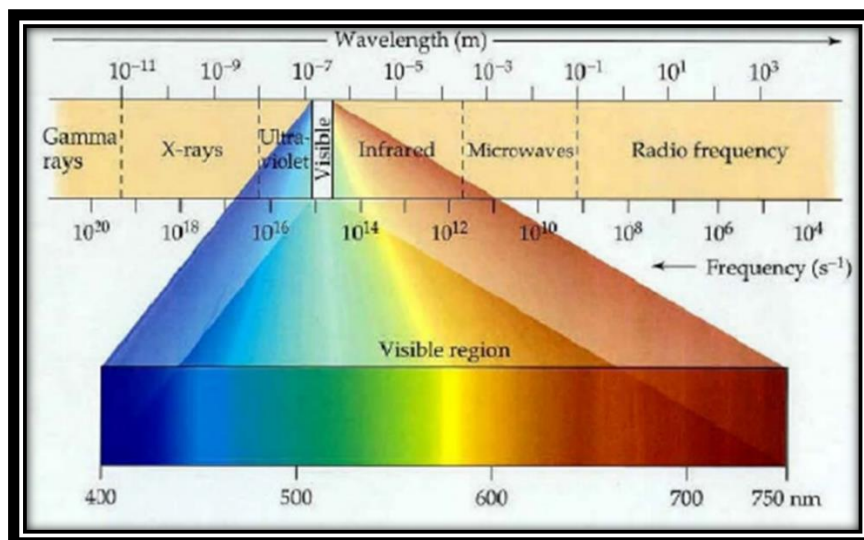


Figura 2.9. Representación de las longitudes de onda del espectro electromagnético (Tomado de Acosta, 1975).

La radiación electromagnética al interactuar con los objetos es modificada de manera que la energía resultante incorpora información que caracteriza al objeto y en consecuencia indirectamente permite su análisis (Méndez, 2002). De acuerdo a su longitud de onda, una parte de la radiación incidente en el objeto es dispersada en diferentes direcciones, otra es absorbida por la materia, otra es transmitida y otra reflejada (Figura 2.10).

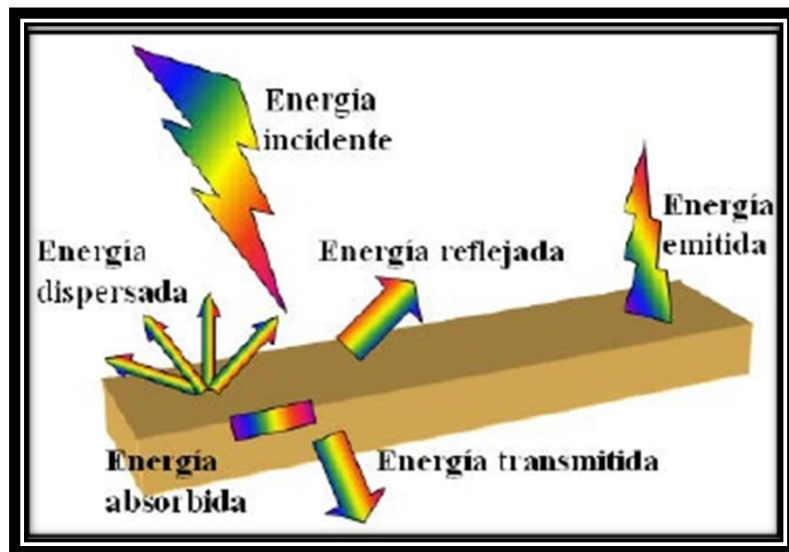


Figura 2.10. Interacción de la radiación electromagnética con la materia  
(Tomado de Méndez, 2002).

### II.2.3 Definición, características y tipos de sensores remotos

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para adquirir imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda. Según Álzate (2001), la fuente de energía más comúnmente utilizada en teledetección es el sol. La energía proveniente del sol puede ser reflejada por la Tierra (visible) o bien absorbida y luego emitida por la tierra (IR térmico).

Al ser la energía electromagnética la base de todos los sistemas de teledetección, es imprescindible, para su funcionamiento, la existencia de una fuente de energía que puede ser, según su origen, de tres tipos: (Figura 2.11)

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado) (i)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico) (ii)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar) (iii)

Álzate (2001) menciona que las técnicas basadas en los dos primeros tipos (i, ii) se conocen como teledetección pasiva y la última (iii) como teledetección activa.

- Sensores Pasivos: Son aquellos que reciben la energía reflejada o emitida por la Tierra cuando es iluminada por el Sol
- Sensores Activos: Proveen de su propia fuente de energía para “iluminar” la superficie terrestre. Estos sensores emiten radiación dirigida hacia el área de interés y luego detectan la porción de esa radiación que es reflejada.

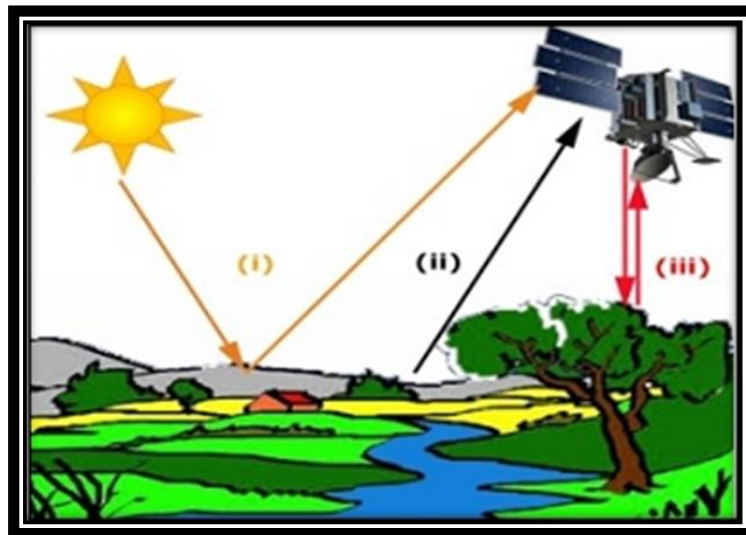


Figura 2.11. Los sistemas de teledetección según fuente de energía electromagnética (Tomada de curso introductorio a la geomática. Fundación Instituto De Ingeniería, 2005).

Según Campbell (1981), para que los sensores puedan obtener la información es necesario que estén montados sobre algún soporte o plataforma. Los satélites son las plataformas más comunes para sensores remotos, aunque también existen sensores remotos montados sobre aviones o sobre estructuras fijas (ej. radiómetros). Los satélites tienen características particulares que los diferencian entre ellos. La órbita de un satélite describe la manera que se ubica en relación a la tierra. Existen dos principales tipos de órbitas satelitales:

- **Geoestacionarios:** Se sitúa sobre la línea ecuatorial en una órbita de 3600 km de la Tierra. Permanece siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación. Ejemplos: los satélites de comunicación y observación meteorológica; por ejemplo, el Satélite Simón Bolívar.
- **Heliosincrónicos:** Se desplazan en orbitas generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es paralela al eje de rotación de la Tierra) de modo que aprovechando el movimiento de rotación terrestre puede captar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de la órbita. Estas orbitas solo son posibles entre 300 y 1500 km de altura. La orbita se diseña de forma que el satélite pase siempre sobre el mismo punto a la misma la hora local. Un satélite geoestacionario realiza una vuelta alrededor de nuestro planeta al mismo tiempo que éste efectúa una rotación completa alrededor de su propio eje. Las imágenes satelitales utilizadas en esta investigación provienen de este tipo de satélites.

#### **II.2.4 Imagen satelital**

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial mediante la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste, producto que posteriormente se transmite a estaciones

terrenas para su visualización, procesamiento y análisis. Esta imagen es una representación de la realidad en la forma de una matriz de datos, donde cada celda o pixel es una porción del área observada con un único valor (Méndez, 2002).

Una imagen satelital está compuesta por información proveniente de diferentes longitudes de onda, organizada en diferentes canales o bandas para un sensor determinado. De esta manera se obtiene información no solo en el espectro visible, sino también en otras longitudes de onda, a las cuales el ojo humano no es sensible. (Méndez, 2002)

### **II.2.5 Características de las imágenes satelitales**

Chuvieco (1995) expone lo siguiente:

- Resolución espacial: Designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen o como la mínima distancia entre dos objetos en el terreno que puede distinguir un sensor y que posteriormente puede ser identificada sobre la imagen.
- Tamaño de píxel: Está determinado por la resolución espacial y es el tamaño de la celda de la imagen, la cual cuenta con un único valor (información).
- Resolución espectral: Describe la habilidad del sensor para registrar diferentes intervalos de longitud de onda. Una imagen con mayor resolución espectral cuenta con más bandas que una imagen con menor resolución espectral, indistintamente de que el rango total de longitud de onda registrado sea el mismo.
- Resolución radiométrica: Describe la cantidad de información contenida en la imagen. Está determinado por la capacidad del sensor para registrar pequeñas variaciones de intensidad en la radiación registrada.

- Resolución temporal: Se refiere al tiempo que tarda el sensor en completar una órbita y por ende cada cuanto se toma una imagen.
- Firmas espectrales (curvas de reflectancia espectral).

### II.2.6 Firma espectral

Uno de los aspectos importante de la percepción remota es la adquisición del dato denominado curvas de reflectancia espectral o firmas espectrales, el cual registra el porcentaje de la energía incidente, típicamente luz solar, que se refleja por el material como una función de longitud de onda de la energía (Figura 2.12). El eje horizontal muestra la longitud de onda de la energía incidente, cuyas regiones va desde el espectro visible hasta el infrarrojo (IR), el eje vertical muestra el porcentaje de energía incidente que se refleja en la diferente longitud de onda. Las excursiones descendentes de la curva son llamadas absorción característica porque ellas representan la absorción de la energía incidente mientras que las excursiones altas son llamadas picos de reflectancia. Estas características espectrales son pistas valiosas para los reconocimientos de materiales tal como las rocas (Sabins, 2007)

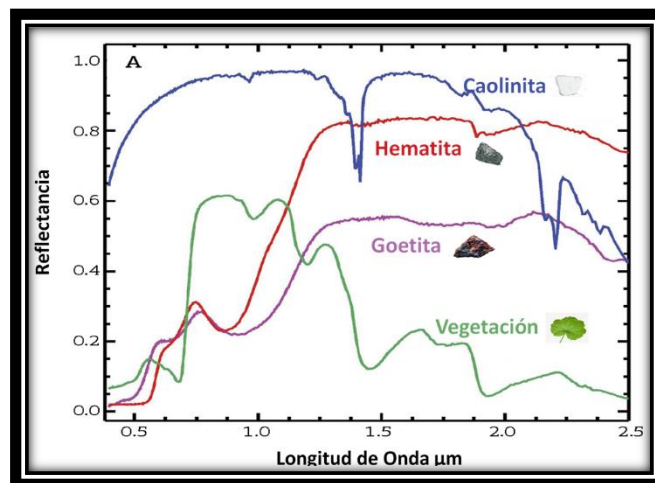


Figura 2.12. Reflectancia espectral de un espectroradiómetro para diferente tipo de minerales y vegetación (Disponible en: [www.espectroelectromagnetico/geo/ciencia.com](http://www.espectroelectromagnetico/geo/ciencia.com)).

## II.2.7 Procesamiento y etapas de imágenes

Según Campbell (1981), para el procesamiento de una imagen satelital es necesario, ante todo, obtener la información contenida de manera confiable. El pre-procesamiento corrige las distorsiones geométricas y radiométricas, mientras que el proceso de extracción de la información permite identificar y sintetizar la información deseada. El procesamiento de una imagen implica dos etapas:

### II.2.7.1 Etapa I: Pre-procesamiento.

- Georeferenciación: Asigna coordenadas y proyecciones específicas a la imagen, para posicionarla en un lugar de la Tierra correcto.
- Ortorectificación: Corrige las deformaciones espaciales debidas a la topografía y al ángulo de observación.
- Corregistro: Hace que dos o más imágenes sean comparables espacialmente, asignando a puntos comunes las mismas coordenadas.
- Calibración: Transforma valores de números digitales (DN) en valores de radiancia.
- Cálculo de reflectancia: Se obtiene a partir de imágenes de radiancia, corrigiendo por la geometría de iluminación y observación.

### II.2.7.2 Etapa II: Extracción de información

- El cociente entre bandas: Permite resaltar variaciones sutiles en la respuesta espectral de diferentes superficies y muestra la respuesta relativa de la superficie en las longitudes de onda analizadas, lo que facilita la comparación entre imágenes con diferentes valores absolutos (diferente brillo). Por ejemplo, conociendo que la vegetación refleja la radiación en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo cercano (N.IR) y absorbe en las longitudes de

onda correspondiente al rojo, se puede identificar la vegetación mediante un cociente entre estas bandas.

- Los índices de vegetación: En muchos casos, son cocientes entre bandas que brindan información sobre diferentes características de la vegetación. Uno de los índices más utilizados es el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

### **II.2.8 Imágenes satelitales: Sensor LANDSAT-8**

El programa LANDSAT, constituye una serie de misiones de observación de la Tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El programa LANDSAT ha revolucionado la forma de ver y estudiar nuestro planeta. Esta serie de datos, que se inició en 1972, es la más larga de la historia y continúa registrando los cambios en la superficie terrestre desde el espacio. LANDSAT ha sido el único sistema de satélite diseñado y operado para observar repetidas veces la cubierta de la tierra con una resolución moderada; de manera general cada pixel en su imagen tiene un tamaño con el que se podría cubrir un campo de béisbol.

En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “*Landsat Data Continuity Mission*” (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie LANDSAT y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la Tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multispectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores. Tras el lanzamiento, el satélite LDCM fue rebautizado como LANDSAT- 8.

Este sistema está compuesto de dos grandes segmentos: El observatorio; el cual consta de una plataforma con capacidad de carga de dos de sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico infrarrojo *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). OLI y TIRS recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales. El segundo segmento es el sistema terrestre, el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos.

Los datos de productos LANDSAT-8 son totalmente compatibles con todos los datos de los productos estándar a nivel 1 (ortorectificado) creados usando LANDSAT-1 al LANDSAT-7. A continuación (Tabla 2.3) se describen algunas de sus especificaciones generales:

Tabla 2.3. Especificaciones de productos LDCM a Nivel 1  
 (Tomado de Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2013).

Procesamiento:	Nivel 1 T-Corrección geométrica
Tamaño de píxel	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI.
Características de los datos	Formato de datos GeoTIFF Remuestreo por convolución cúbica (CC) Norte arriba (MAP) de orientación Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida) Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS Los valores de píxel en 16 bits
Entrega de datos	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP.
Tamaño de archivo	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

Las imágenes LANDSAT-8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de once bandas en total. Nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (Tabla. 2.4). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 km de este a oeste (106 km por 114 km).

Tabla 2.4 Distribución de las bandas en OLI y TIRS  
 (Tomado de Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, 2013).

BANDAS	Bandas	Longitud de onda	Resolución
		(micrómetros)	(metros)
LANDSAT 8 Operational LandImager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8- Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

\* Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30metros.

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

La metodología que se utilizó para el cumplimiento de cada uno de los objetivos está dividida en cinco fases que contemplan una recopilación y homogenización de la información existente (tanto bibliográfica como cartográfica), preparación e incorporación de la información a las herramientas, procesamiento de la información, integración de la data y presentación de los resultados (Figura 3.1).

#### **III.1 FASE 1: Recopilación y homogenización de la información existente (bibliográfica y cartográfica) relacionado a la Hoja 6448**

Esta etapa, consistió en la revisión y recopilación bibliográfica de diversos trabajos previos, boletines de índole científico, información calificada extraída de fuentes electrónicas, cartografía topográfica y geológica, fotografías aéreas, imágenes de radar e imágenes satelitales, relacionado con el tema de investigación y el área de estudio. El cumplimiento de esta etapa se efectuó de la siguiente manera:

##### **III.1.1 Recopilación bibliográfica**

La recopilación de trabajos previos, tesis, boletines y entre otros de índole científico, se obtuvieron de las distintas bibliotecas e institutos del país, vinculados a las ciencias de la Tierra, entre ellos: Biblioteca Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, y Biblioteca Alonso Gamero de la Facultad de Ciencias (ambas ubicadas en la Universidad Central de Venezuela), Instituto de Suelos de la Universidad de Los Andes (ULA), Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), Instituto Nacional de Geología y Minería de Venezuela (INGEOMIN), Fundación Venezolana de investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y del Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (INTEVEP).



Figura 3.1 Esquema metodológico de la investigación.

### III.1.2 Datos de mapas previos

La recopilación del material geológico-cartográfico, se obtuvo mediante el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), en el Instituto Nacional de Geología y Minería de Venezuela (INGEOMIN), Fundación Venezolana de investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y la base de datos cartográfica en formato digital de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV. Los mapas utilizados en esta investigación son los siguientes:

- Mapa topográfico de la Dirección de Cartografía Nacional a escala 1:100.000 del año 1968. Carta: 6448 “Araurima”
- Mapas topográficos de la Comisión Nacional de Aeromapas- Seravenca a escala 1: 25.000 del año 1964-1965 (Figura 3.2).

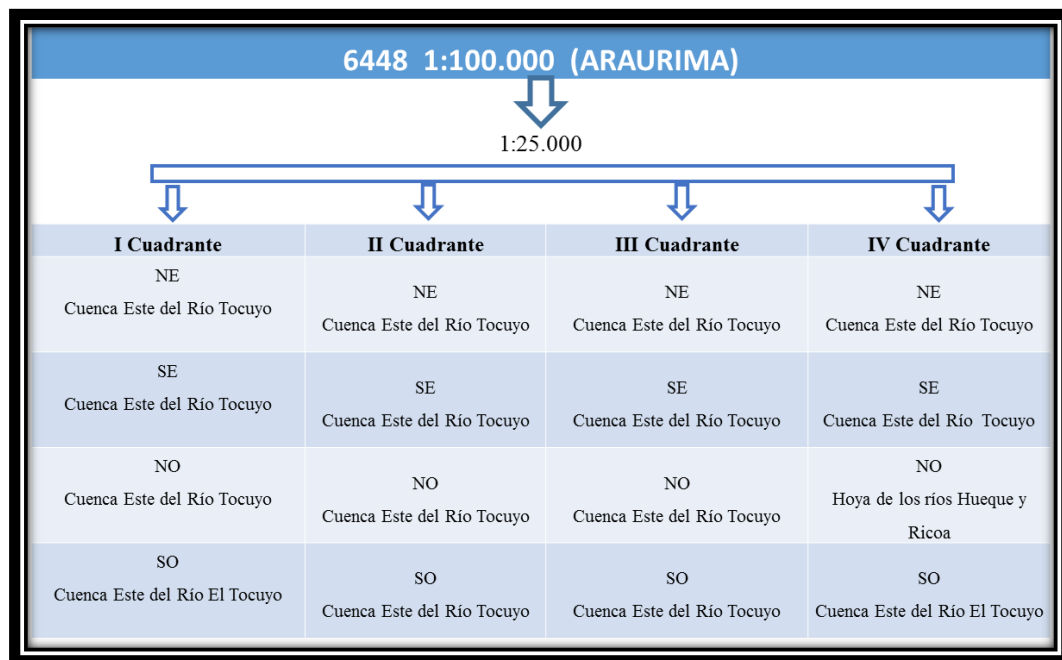


Figura 3.2. Esquema de las cartas topográficas utilizadas en la investigación.

- Mapas geológicos de la *Creole Petroleum Corporation* a escala 1: 50.000, del año 1968. Cartas: C-5-B, C-5-D, C-6-A y C-6-C.

- El Mapa geológico de Venezuela, a escala 1:750.000 (Hackley, C., Urbani, F., Karlsen, A.W., & Garrity, C.P., 2006).
- Mapa geológico actualizado de la zona oriental de Falcón, al sur del Alto La Esperanza- Guacharaca a escala 1:50000, perteneciente al Trabajo de Grado de Guzmán y Morillo (2009).
- Mapas geológicos de FUNVISIS a escala 1:25.000 del año 2013, pertenecientes al proyecto “Investigaciones geológicas en el norte de Venezuela” y GEODINOS, que se mencionan:
  - 6448 III-SO: Mapa geológico de Quebrada Cararapa
  - 6448 III-SE: Mapa geológico de Tarana
  - 6448 II-SO: Mapa geológico de San Quintin
  - 6448 II-SE: Mapa geológico de Salsipuedes

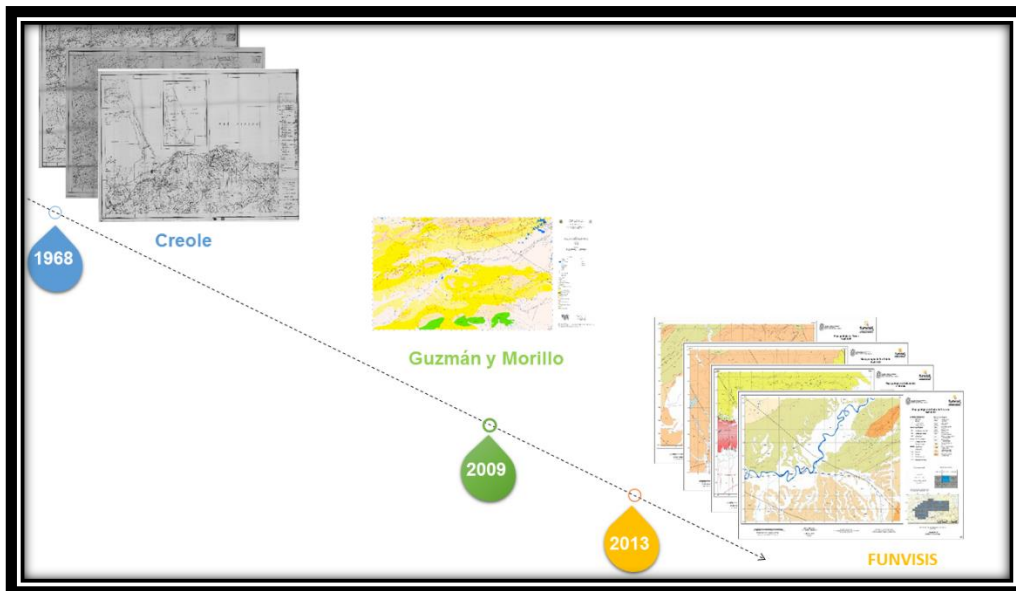


Figura 3.3. Algunos de los mapas previos utilizados en la investigación.

### III.1.3 Datos de percepción remota

Además de los mapas geológicos-cartográficos, se recopiló una imagen de radar, fotografías aéreas e imágenes satelitales: LANDSAD 8 y SASPLANET (Figura 3.4).

Las fotografías aéreas y la imagen de radar fueron suministradas por INGEOMIN, las mismas presentan las siguientes características:

- Fotografías aéreas correspondientes a la misión 020141 del año 1968, escala 1:50.000.
- Imagen de Radar de la hoja N° NC19-7 que corresponde a un Mosaico Semicontrolado de levantamiento de Radar, a escala 1:250.000, elaborado por Petróleos de Venezuela en el año 1977, la cual sirvió como referencia para identificar los grandes sistemas estructurales del área de estudio.

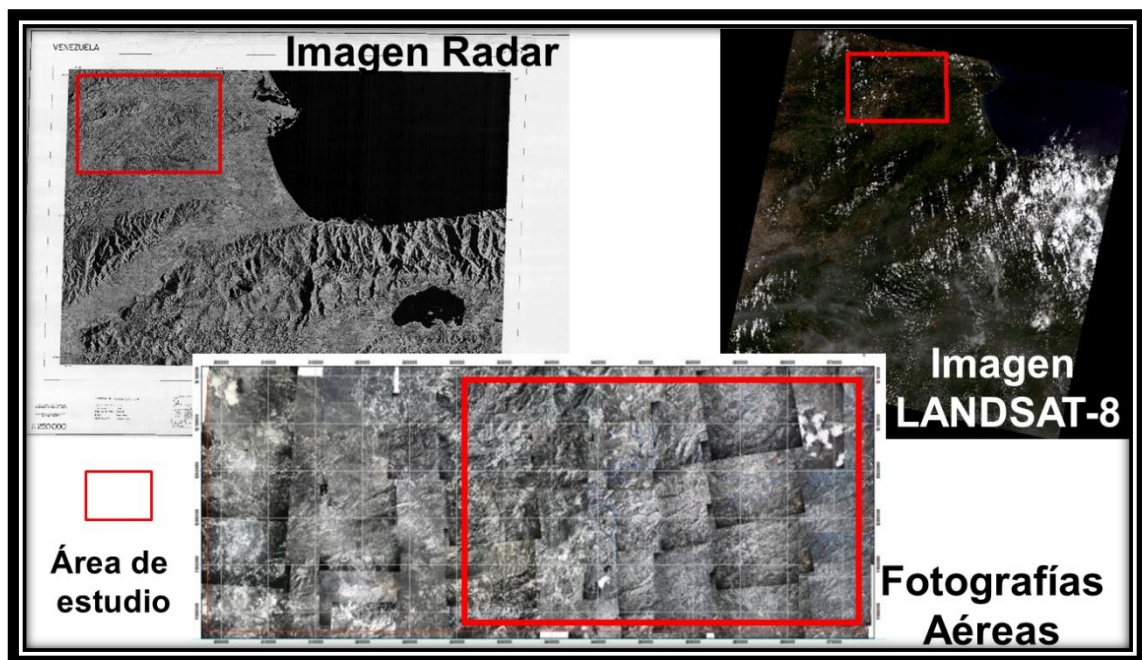


Figura 3.4. Imágenes utilizadas en la investigación.

Las imágenes, LANDSAT-8 y SASPLANET, utilizada en esta investigación se obtuvieron del servidor de datos *Earth Explorer*: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Figura 3.5). Tomando en cuenta los siguientes criterios:

1. Se seleccionó como instrumento el Landsat 8 OLI/TIRS
2. Se seleccionó la escena (Path 004 Row 053).
3. Se determinó el rango de fechas (1/ene/2014 – 31/mar/2018).
4. Se definió la cobertura de nubes <20%.

Con las especificaciones descritas se pre seleccionaron 5 imágenes LANDSAT, con cobertura nubosa variable. Para esta investigación se seleccionó la imagen LANDSAT 8 LC08\_L1TP\_005053\_2016290\_LGN que, aunque no es la que por defecto tenía el menor porcentaje de cobertura de nubes, es la que presentó menos nubes en el área de estudio (Tabla 3.1). Por su parte la imagen SASPLANET seleccionada corresponde a un mosaico de imagen debido a que presenta una resolución de 1 m de pixel, la misma sirvió para la actualización de la vialidad presente en la zona de estudio.

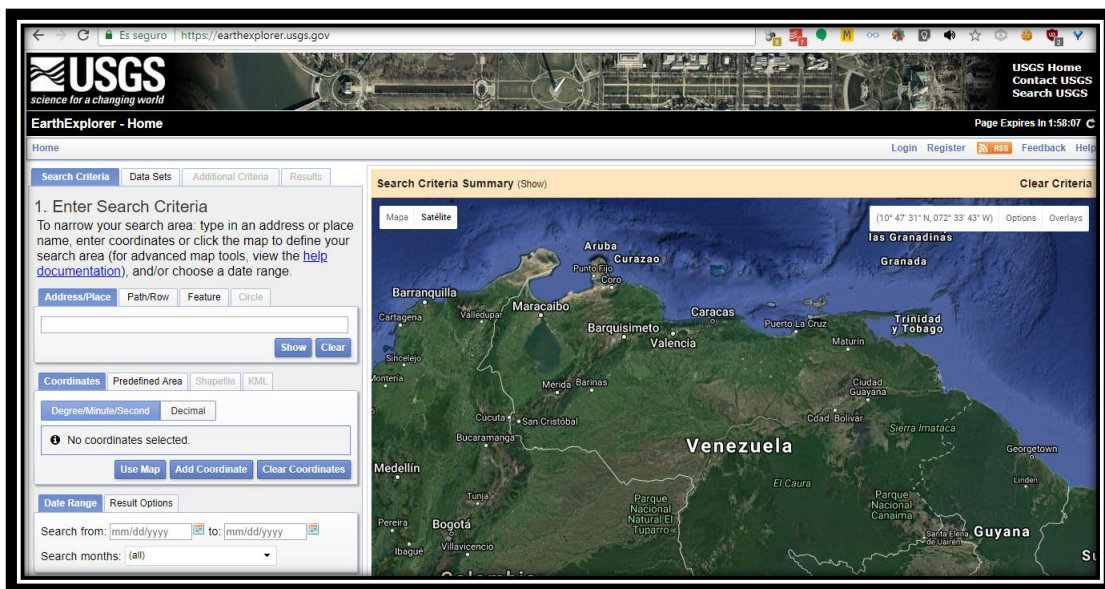


Figura 3.5. Portal de la *U.S Geological Survey* o Servicio Geológico de Estados Unidos.

Tabla 3.1.- Porcentaje de cobertura nubosa de cada fecha adquirida para la imagen LANDSA-8.

Identificador de la Imagen	Fecha	Cobertura Nubosa
LC08_L1TP_004053_20160212_20170330_01_T1	12/02/2016	11.01
LC08_L1TP_005053_20140112_20170426_01_T1	01/12/2014	12.55
LC08_L1TP_005053_20150216_20170412_01_T1	16/02/2015	14.30
LC08_L1TP_005053_20180208_20180221_01_T1	08/02/2018	36.01
LC08_L1TP_005053_2016290_LGN	16/10/2016	13.46

## III.2 FASE 2: Preparación e incorporación de data en el SIG y procesamiento digital de imágenes

Esta etapa comprende dos procesos: la digitalización de la cartografía base y el procesamiento de imágenes satelitales, la primera consistió en la vectorización de la cartografía base (mapa topográficos y geológicos) utilizando el software ArcGIS 10.3 y la segunda, en el procesamiento de imágenes satelitales mediante la utilización del software: ENVI 5.3.

### III.2.1 Digitalización e interpretación de data espacial

#### III.2.1.1 Digitalización de las cartas topográficas

Como primer paso se procedió a la georreferenciación de la cartografía base susceptible a ser actualizada, es decir, las 16 cartas a escala 1:25.000, disponibles en formato ráster (escaneados). Las cuales fueron georreferenciadas en coordenadas UTM WGS84 Huso 19, tomando al menos 16 puntos de control por cada carta. Con estos ráster, y luego de una interpretación visual se comenzó a vectorizar los elementos más importantes de las cartas topográficas, obteniendo las principales capas de información o *shapefile*. De estas cartas se vectorizaron las curvas de nivel, la hidrografía, vialidad

(líneas), toponimia (puntos), cuerpos de agua (polígonos), entre otros, y se diseñaron sus correspondientes bases de datos atributivas para ser integrada al SIG, este procedimiento contempló aproximadamente seis meses para su elaboración (Figura 3.6).

Las cartas topográficas 6448-IV-NO y 6448-II-NE presentaban zonas con vacíos de información (posiblemente por dificultades técnicas propias del levantamiento cartográfico para la época) las mismas, se completaron interpolando las curvas de nivel extraídas de un Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) de la NASA de resolución 12,5 m de pixel disponible en la página web <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/> (Figura 3.7). Esto era necesario para disponer de continuidad espacial de los elementos vectorizados.

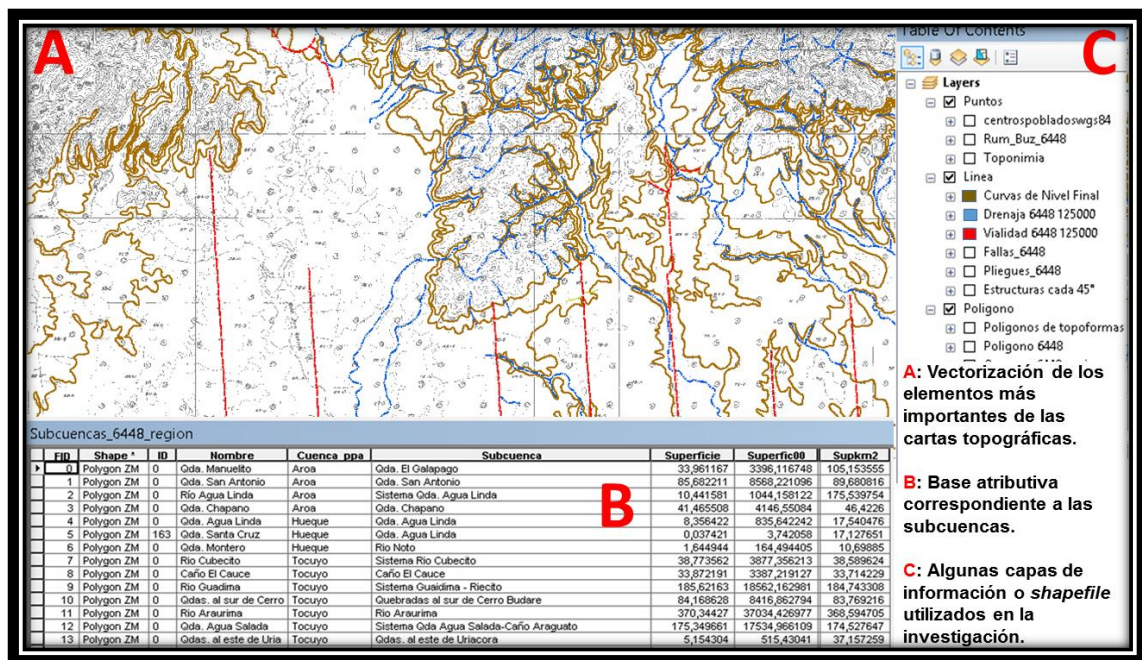


Figura 3.6. Ejemplos referente a la digitalización e interpretación de data espacial utilizado en la investigación.

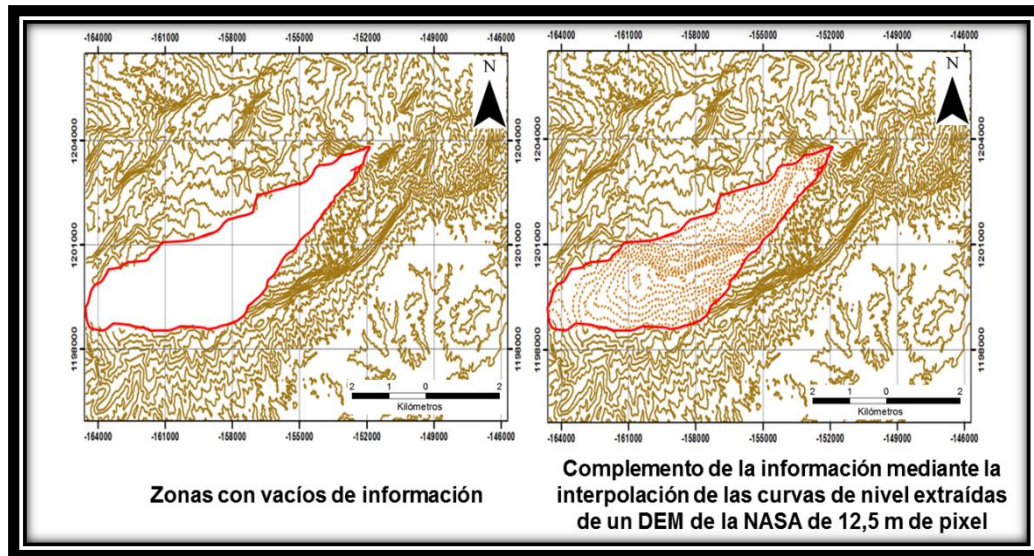


Figura 3.7. Ejemplo de actualización de curvas de nivel. Carta topográfica 6448-IV-NO.

### III.2.1.2 Digitalización de las cartas geológicas

Se procedió a georreferenciar las cartas geológicas disponibles para el área de estudio, para posteriormente vectorizar las capas o *shapefile*: correspondiente a formaciones litológicas (polígonos), fallas y pliegues (líneas) y rumbo-buzamiento (puntos). Tomados de la cartografía recopilada y de PDVSA-INTEVEP (2008).

### III.2.2 Preprocesamiento de imágenes de percepción remota

Con respecto al tratamiento digital de imagen satelital LANDSAT-8, es importante resaltar que el uso de las imágenes multiespectrales requiere de procesos necesarios (corrección atmosférica, elaboración de las máscaras por nubes) para su posterior interpretación. Por tal razón, después de seleccionar la imagen satelital correspondientes a las bandas suministradas por el satélite y el archivo metadata (aquel que contiene toda la información sobre la imagen) se procedió a realizar un corte o selección del área de estudio dentro de la imagen para agilizar su tratamiento digital (Figura 3.8). Este procedimiento como los derivados se generó utilizando el programa ENVI 5.3.

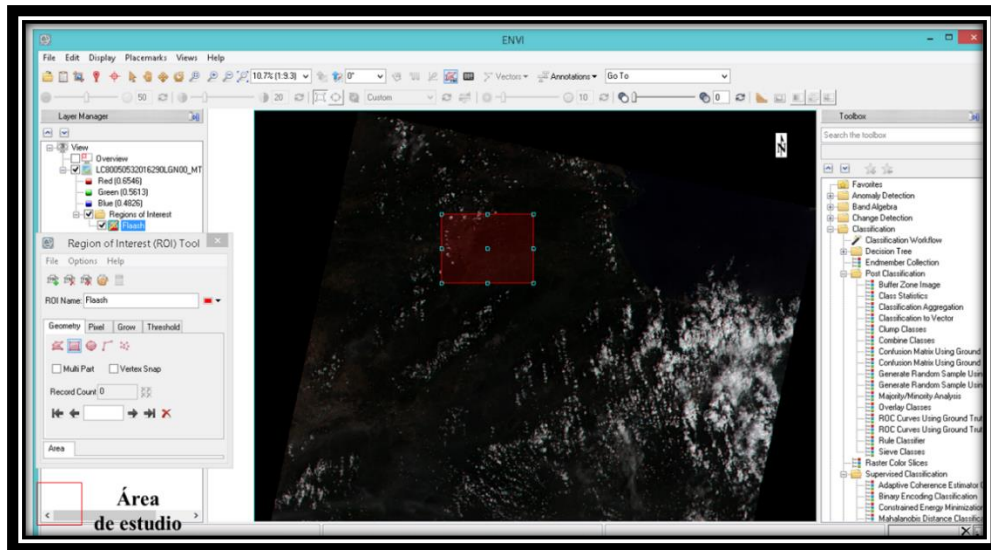


Figura 3.8. Proceso de selección del área de estudio dentro de la imagen satelital.

Posteriormente, se procedió a realizar la corrección atmosférica y la elaboración de máscara por nubes a la imagen generada en el paso anterior.

### III.2.2.1 Corrección atmosférica

Los datos que vienen almacenados en una imagen LANDSAT (o cualquier otra imagen obtenida mediante un sensor óptico), son valores o niveles digitales (ND), estos niveles digitales no representan de manera directa ninguna variable biofísica y, por tanto, no es conveniente que se obtenga ningún índice espectral usando estos valores “crudos o sin corregir” (Chuvieco, 1995).

Los llamados índices espectrales fueron desarrollados para trabajar con valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre. Los niveles digitales no proporcionan esta información de manera directa, por lo tanto, hay que convertir los valores ND en valores de reflectancia. (Chuvieco, 1995). Este proceso se realizó en dos etapas: 1 conversión de ND a radiancia: corrección radiométrica y 2 conversión de radiancia a reflectancia aparente: cálculo de la reflectancia en el sensor (Figura 3.9).

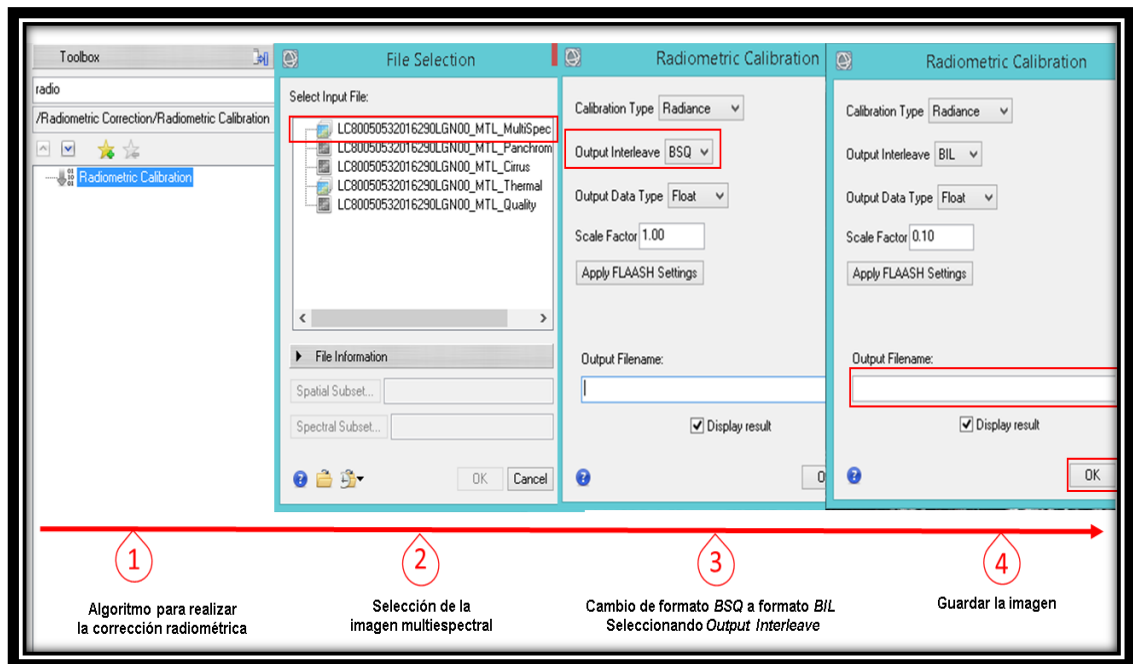


Figura 3.9. Procedimiento de la calibración radiométrica.

Para la primera etapa mediante el algoritmo *Radiometric Calibration* se utilizó la escena multiespectral cambiando la imagen de formato *BSQ* a formato *BIL* (bandas intercaladas por líneas) (Figura 3.9). Por su parte, la segunda etapa mediante el algoritmo *FLAASH Atmospheric Correction* se generó una ventana emergente en la cual se utilizó la imagen en formato *BIL* para realizar la fusión de cada una de las bandas en un solo archivo o imagen para su fácil manejo, a su vez se agregaron datos de la imagen tales como: latitud, longitud, altitud del sensor, elevación de la superficie del terreno, tamaño del pixel, fecha y hora de vuelo en que se tomó la escena, (Figura 3.10). Cabe destacar que los valores agregados para obtener los valores de reflectancia se tomaron del archivo texto que viene dentro de la descarga de la escena satelital. La imagen resultante mediante este preprocesamiento es denominada imagen FLAASH, y es la base para los procesamientos posteriores.

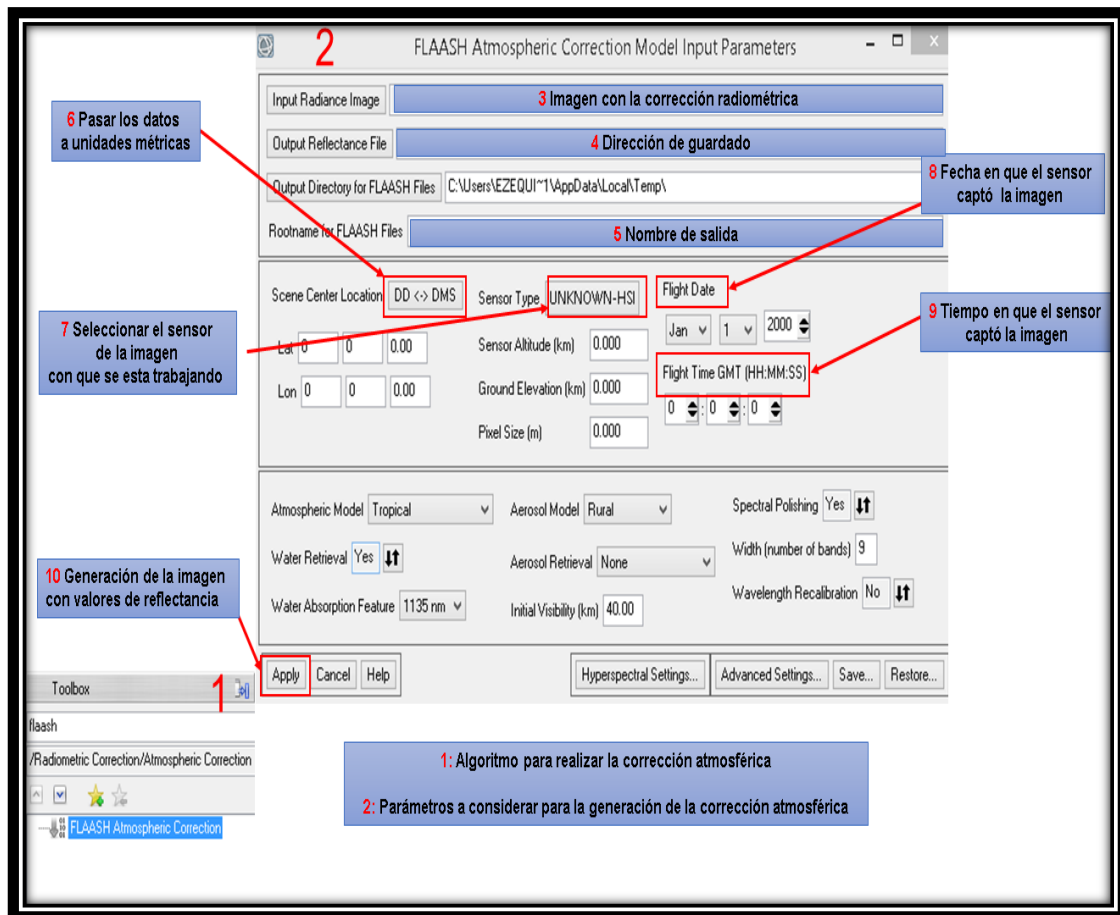


Figura 3.10. Procedimiento de la generación de la imagen con valores de reflectancia.

### III.2.2.2 Elaboración de máscara por nubes

En las imágenes multiespectrales se presenta mucha nubosidad que ocultan la información espectral de interés geocientífico. Es por esta razón, que se eliminan las nubes y sus sombras para el procesamiento geoestadístico de las imágenes multiespectrales (Chuvieco, 1995).

El proceso de la eliminación de nubes y sombras consistió en crear polígonos o “máscara” que las bordean para luego cortar dichos píxeles. Este proceso se realizó en dos etapas:

- La primera etapa consistió en diferenciar la nubosidad de cualquier otro elemento presente en la imagen satelital (drenaje, vegetación, entre otros) creando una máscara de la imagen en escala de grises (blanco y negro) mediante el análisis de componente. Posteriormente se seleccionó la banda de grises que coincidió con las nubes y no con otro elemento y finalmente se procedió a guardar la banda seleccionada. En esta investigación la banda que mejor se adaptaba en la coincidencia con las nubes fue la banda número 1 (Figura 3.11).

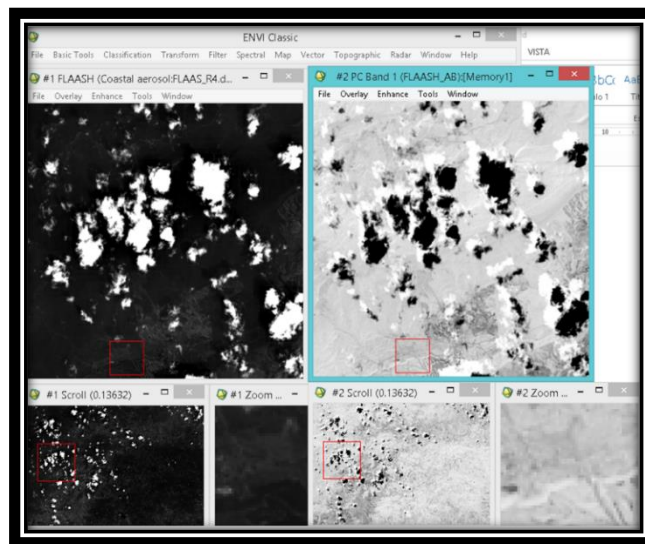


Figura 3.11. Máscara de grises que coincide con las nubes mediante el análisis de componente.

- La segunda etapa consistió en definir el porcentaje de la anomalía de nube que cubra el mayor porcentaje de nubosidad. En esta investigación se utilizó el 98% teniendo como resultado una máscara que representa solo la nubosidad.

### III.3 FASE 3: Procesamiento de Data

Esta fase se fundamentó en la generación de modelos digitales, capas temáticas e imágenes producto de procesamiento satelital. Al igual que la fase anterior consistió de dos etapas. Las mismas se describen a continuación:

### III.3.1 Construcción de modelos digitales y capas temáticas

Partiendo de la digitalización de las cartas topográficas a escala 1:25.000 resultantes de la fase anterior y haciendo uso del software ArcGIS 10.3, se procedió a la elaboración de modelos y capas temáticas complementarias creando los primeros subproductos geológicos que se citan a continuación:

#### III.3.1.1 Modelo Digital de Elevación (DEM).

Para la construcción de este producto se utilizó las curvas de nivel de toda el área de estudio, generando un DEM de 10 m de resolución espacial. El mismo se obtuvo mediante el algoritmo *Spatial Analyst Tools – Interpolation – Topo to Raster* (Figura 3.12).

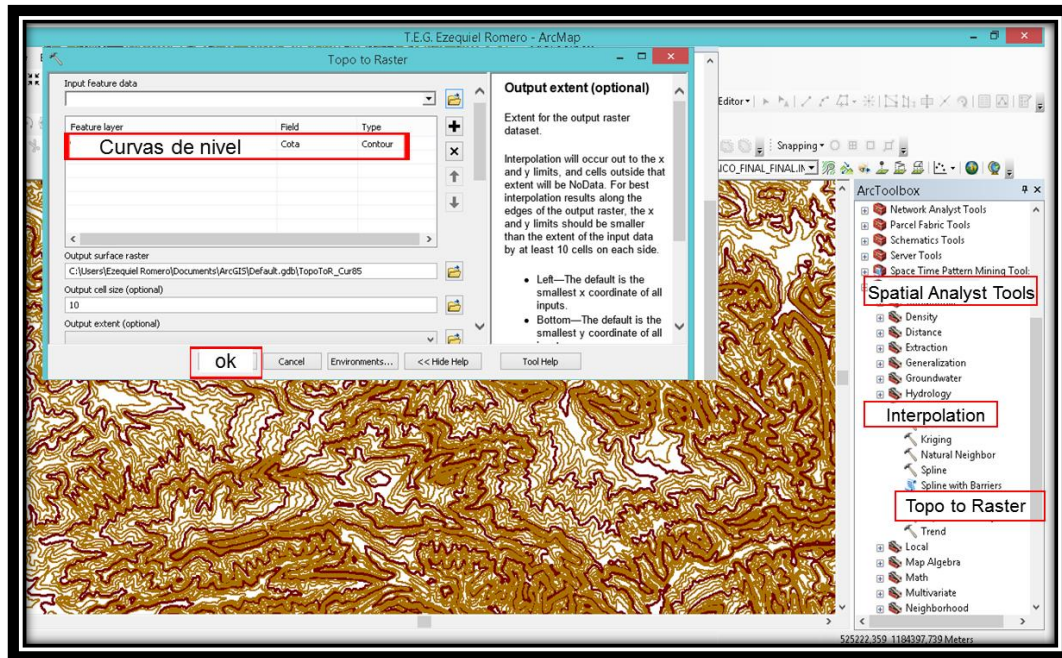


Figura 3.12. Procedimiento para la generación del DEM.

### III.3.1.2 Modelo Digital de Iluminación y Sombra

Tomando como base el DEM y utilizando las herramientas del SIG se generó un Modelo Digital de Iluminación y Sombras (MIDS) mediante el algoritmo *Spatial Analyst Tools – Surface – Hillshade*. El MDIS generado corresponde a un azimut de  $315^\circ$  y un ángulo de elevación del sol de  $45^\circ$  (Figura 3.13).

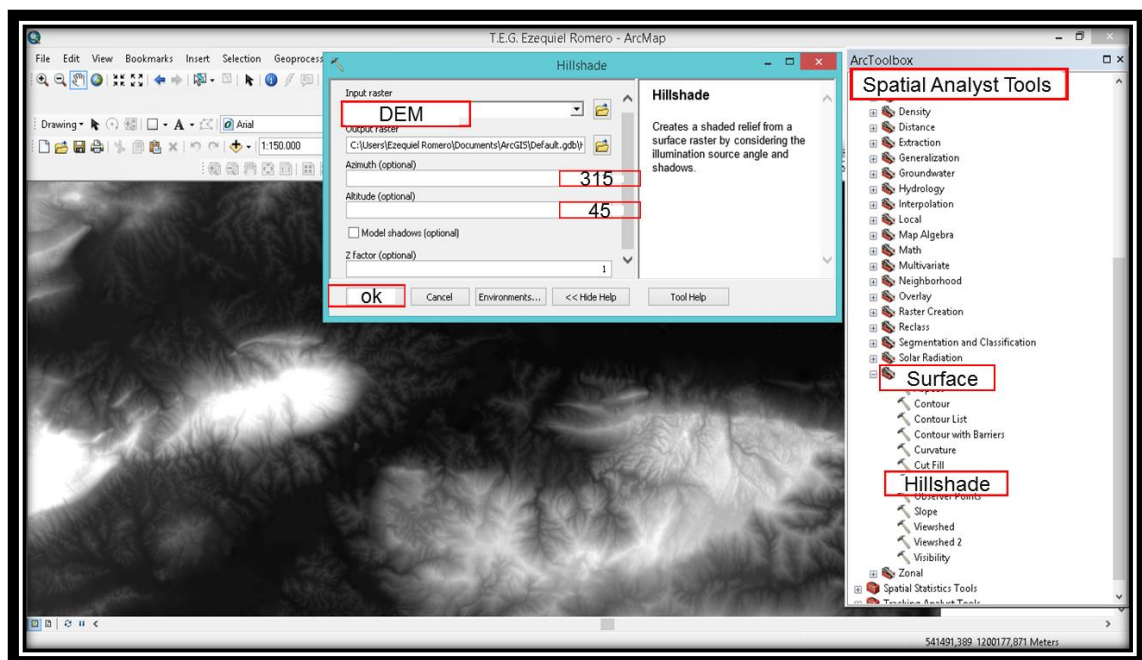


Figura 3.13 Procedimiento para la generación del MDIS.

### III.3.1.3 Capas temáticas

Las capas temáticas se construyeron a partir del DEM; en principio se generaron en formato ráster y posteriormente se convirtieron a formato vectorial para realizar mejores interpretaciones. Las capas temáticas creadas para esta investigación son las siguientes: hipsometría, pendientes, orientación de laderas, cuencas y subcuencas hidrográficas y densidad de drenaje. Las mismas se describen a continuación:

### III.3.1.3.1 Capa Hipsometría

La hipsometría es la representación de la altura mediante un tramado o coloreado. Es de gran importancia para la interpretación del relieve representado en los mapas topográficos, ya que mediante degradación de colores permite precisar con más detalles sus características (Gamboa, 1986). Utilizando el DEM se procedió a reclasificar en rangos o intervalos de altura de acuerdo al establecido por Gamboa (1986). El procedimiento de la reclasificación consistió mediante los algoritmos *Properties...-Symbology - Classified - Classify... - Method: Manual - Classes: 8 - Break Values: 0- 1200* (Figura 3.14).

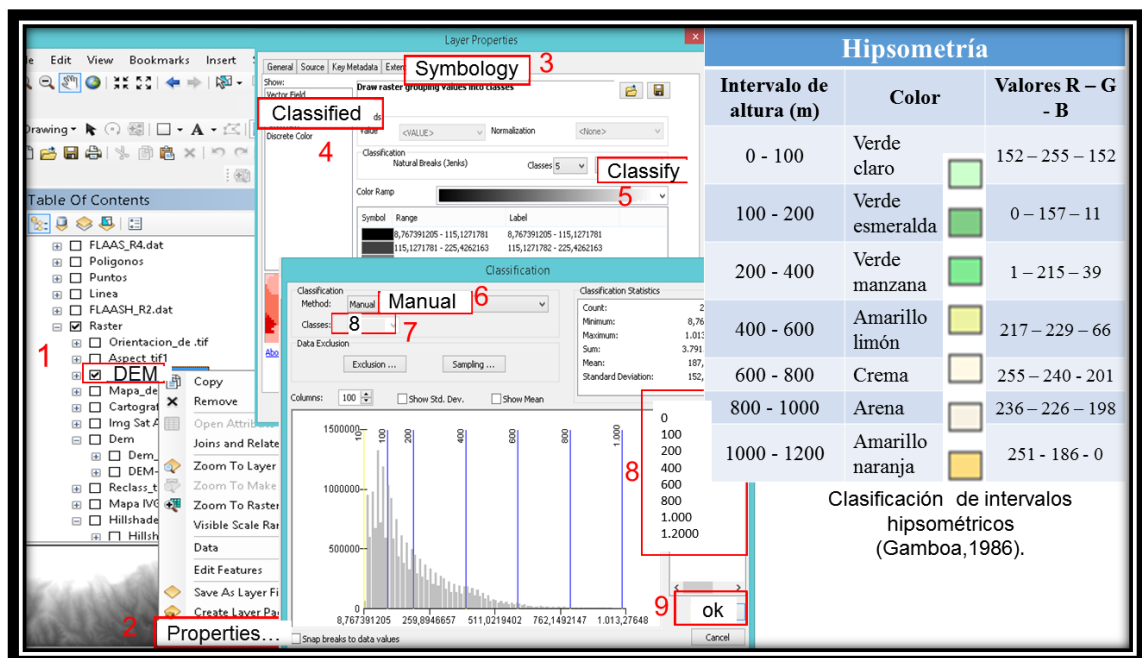


Figura 3.14. Procedimiento para la generación de la capa de hipsometría, tomando en consideración la clasificación propuesta por Gamboa (1986).

### III.3.1.3.2 Capa Pendiente

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno, a mayor inclinación mayor valor de pendiente, la misma puede ser expresada en porcentaje (%) o grados (°). Diversos autores (Gamboa, 1986; Carvajal, 2009 (citado por Servicio Geológico Colombiano SGC, 2012)) han generado varios sistemas de clasificación de

pendientes. Para efecto de esta investigación, el mapa de pendiente generado esta expresado en grados y su reclasificación está basada en la clasificación de Gamboa (1986) por ser la que mejor se ajusta a los fines de un estudio geológico. Esta clasificación contiene el código de colores con el cual se identificaron los sectores correspondientes a cada rango. El procedimiento de la capa pendiente consistió mediante los algoritmos *Spatial Analyst Tools – Surface – Slope* (Figura 3.15). La reclasificación se realizó de la misma manera que en la capa hipsometría.

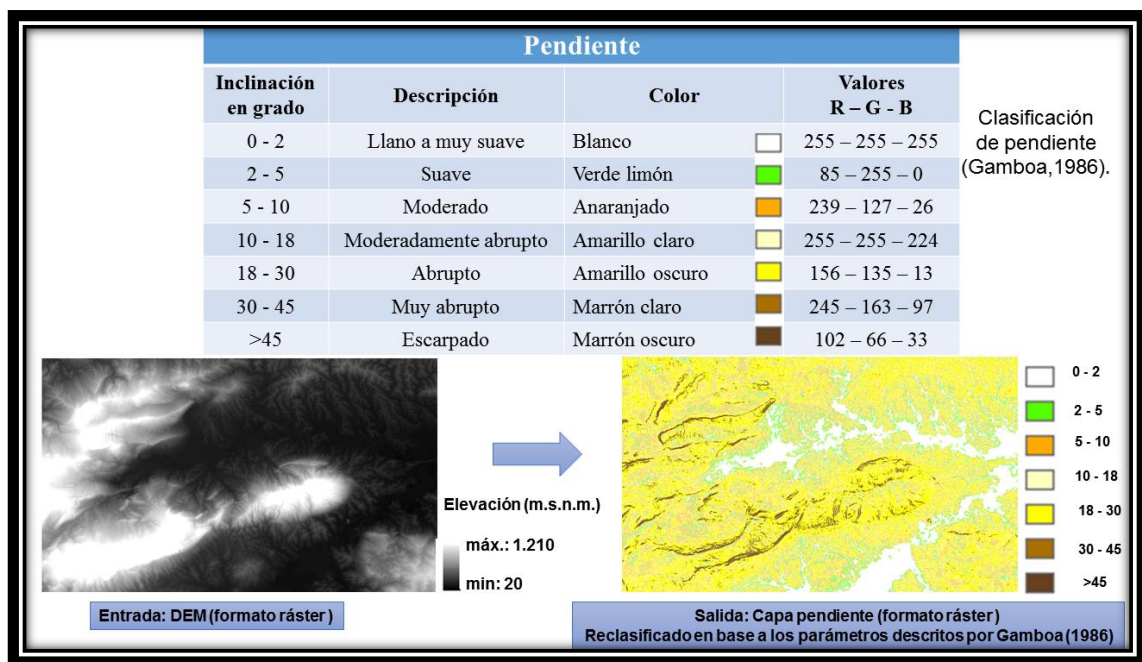


Figura 3.15. Procedimiento para la generación de la capa de hipsometría, tomando en consideración la clasificación propuesta por Gamboa (1986).

### III.3.1.3.3 Capa Orientación de laderas

La Orientación identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas, puede pensarse como la dirección de la pendiente. Los valores de cada celda del ráster de salida indican la dirección de la brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación. Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo (Figura 3.16). Las áreas planas que no

tienen dirección de pendiente descendente tienen un valor de -1. El valor de cada celda de un *dataset* de orientación indica la dirección a la que apunta la pendiente de la celda.

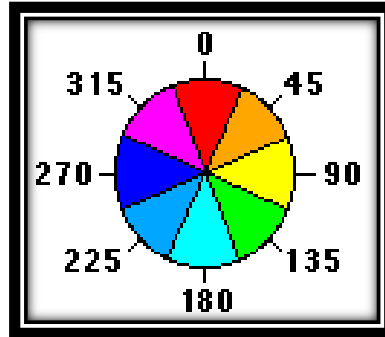


Figura 3.16. Direcciones de orientación de laderas.

El procedimiento de la capa Orientación de ladera consistió mediante los algoritmos *Spatial Analyst Tools – Surface – Aspect* (Figura 3.17).

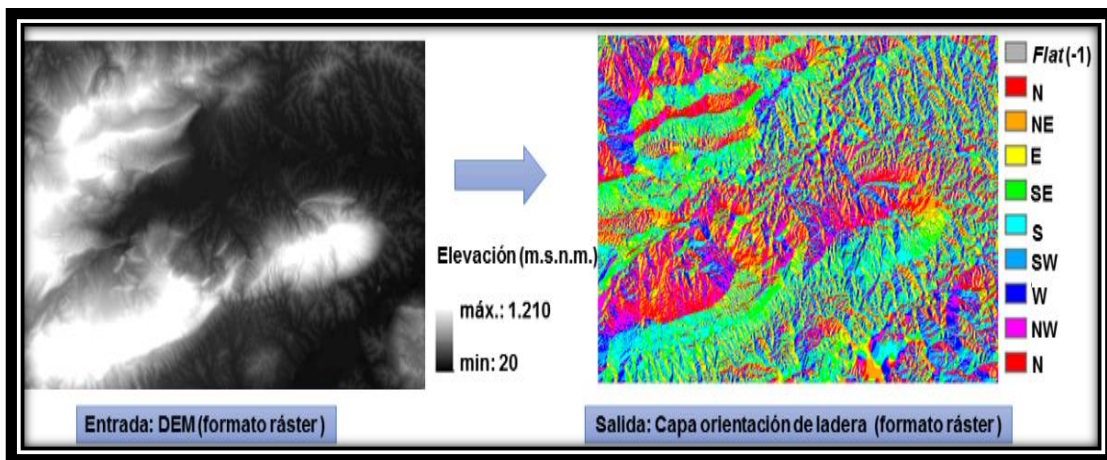


Figura 3.17. Ejemplo de la conversión del DEM al ráster de orientación de ladera.

#### III.3.1.3.4 Capa de Cuencas, Subcuencas y Densidad de drenaje

La capa correspondiente a la cuenca hidrográfica se creó ubicando los puntos de fluidez en los bordes de la ventana de análisis (desde donde manaría el agua del ráster) y también los sumideros, e identificando después el área de contribución sobre cada punto de fluidez. Esto dio como resultado un ráster de cuencas de drenaje. Para la

delimitación de las cuencas y subcuencas del área de estudio se utilizó la herramienta de *Hidrology* ubicada dentro del paquete de herramientas de *Spatial Analyst Tools*.

Como primer paso se seleccionó el algoritmo *Fill* para generar la capa *Fill* tomando como dato de entrada el DEM. Seguidamente se seleccionó el algoritmo *Flow Direction* para generar la capa correspondiente a la dirección de flujo tomando como dato de entrada la capa generada en el paso anterior. Posteriormente se utilizó el comando *Flow Accumulation* para generar la capa de acumulación de flujo (dato de entrada: capa correspondiente a la dirección de flujo). Finalmente, tomando como dato la capa de acumulación de flujo, se procedió a generar la capa de cuenca y subcuenca mediante el comando *Basin*. El resultado obtenido se transformó a vector (polígono) para así poder asignarle su base atributiva (Figura 3.18).

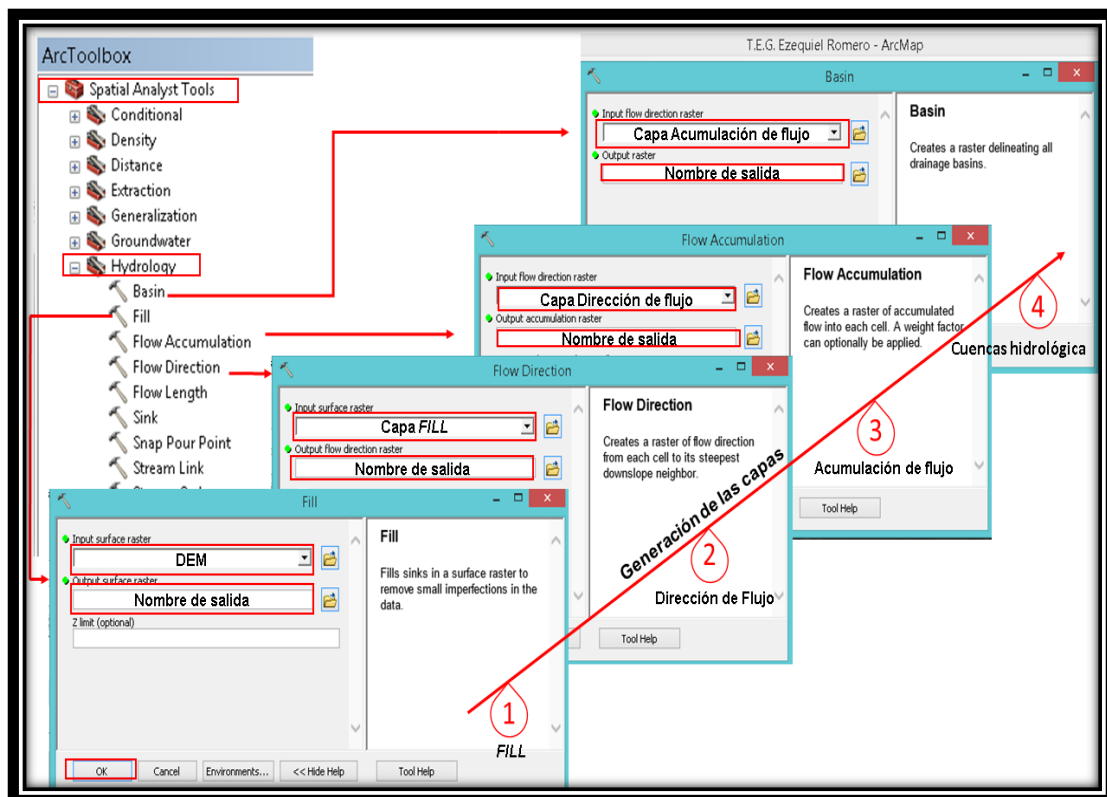





Figura 3.18. Procedimiento para la generación de la capa Cuencana hidrológica.

Con la delimitación y las líneas del drenaje se procedió a calcular la densidad de drenajes. Este proceso hace una rejilla que subdivide el drenaje por segmentos y calcula un centroide para cada segmento, en el que de manera automatizada realiza un cociente de la longitud de los drenajes entre las superficies derivadas del proceso usando una herramienta denominada *Geostatistical Analyst*. Al finalizar se pueden manipular los resultados obtenidos en cuantos rangos se desee (ESRI, 2018). Para esta investigación se establecieron tres rangos, que se definieron como bajo, medio y alto.

El calificativo usado en esta investigación para referirse a la densidad del drenaje estará sujeto al comportamiento de la textura de los afluentes pertenecientes a cada una de las cuencas. Es decir, un drenaje de textura fina implica un espaciamiento entre cauce muy estrecho, lo que indica una densidad alta. En un drenaje de textura media su espaciamiento es intermedio, asociado a una densidad media. Y finalmente, un drenaje de textura gruesa implica un gran espaciamiento entre sus cauces; por ende, su densidad es baja (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Tipos de densidad y texturas del drenaje presente en el área de estudio. Tomando como referencia la clasificación realizada por Gamboa (1986).

Densidad	Textura	Ejemplo
Baja	Gruesa	
Media	Media	
Alta	Fina	

### III.3.2 Procesamiento de imágenes satelitales

A partir de la imagen resultante (Imagen FLAASH) se realizó los siguientes procesamientos: Tratamiento de la fracción mínima de ruido (MNF), índice de pureza de pixel (PPI), cartografiado de ángulo espectral (SAM), combinación y álgebra de banda y clasificaciones: no supervisada y supervisada. Los mismos se describen a continuación:

#### III.3.2.1 Tratamiento de la fracción mínima de ruido (MNF), Índice de Pureza de Pixel (PPI) y Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM)

Estos procedimientos se realizaron de forma consecutiva, de forma dependiente mediante el algoritmo *Spectral Hourglass Wizard*. El primer procesamiento realizado es el MNF, el cual se tomó como base la imagen FLAASH y la elaboración de la máscara de nubes (Figura 3.19). Esta herramienta tiene como finalidad minimizar el ruido en la data espectral, obteniéndose una imagen más clara de la zona de estudio. El siguiente procesamiento es el Índice de Pureza de Pixel (PPI), con el fin de encontrar espectralmente píxeles puros o los píxeles extremos en los datos multiespectrales. Para la ejecución de este procesamiento se utilizó como base la imagen MNF generada en el paso anterior y nuevamente la máscara de nubes (Figura 3.20). Posterior al PPI, se realizó el procesamiento n-dimensiones. Este subproducto sirvió para agrupar en clases los píxeles puros que conforman la imagen, para finalmente aplicar el procedimiento del cartografiado del ángulo espectral (SAM) a las clases identificadas en este proceso (Figura 3.21).

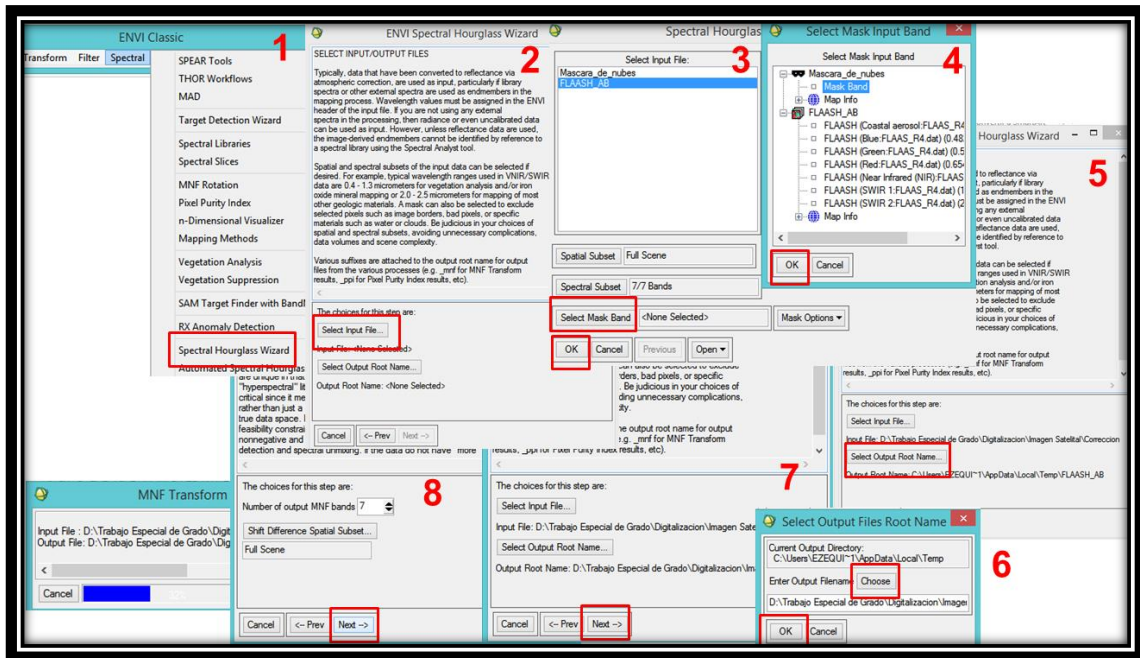


Figura 3.19. Procedimiento para la generación de la imagen Fracción Mínima de Ruido (MNF).

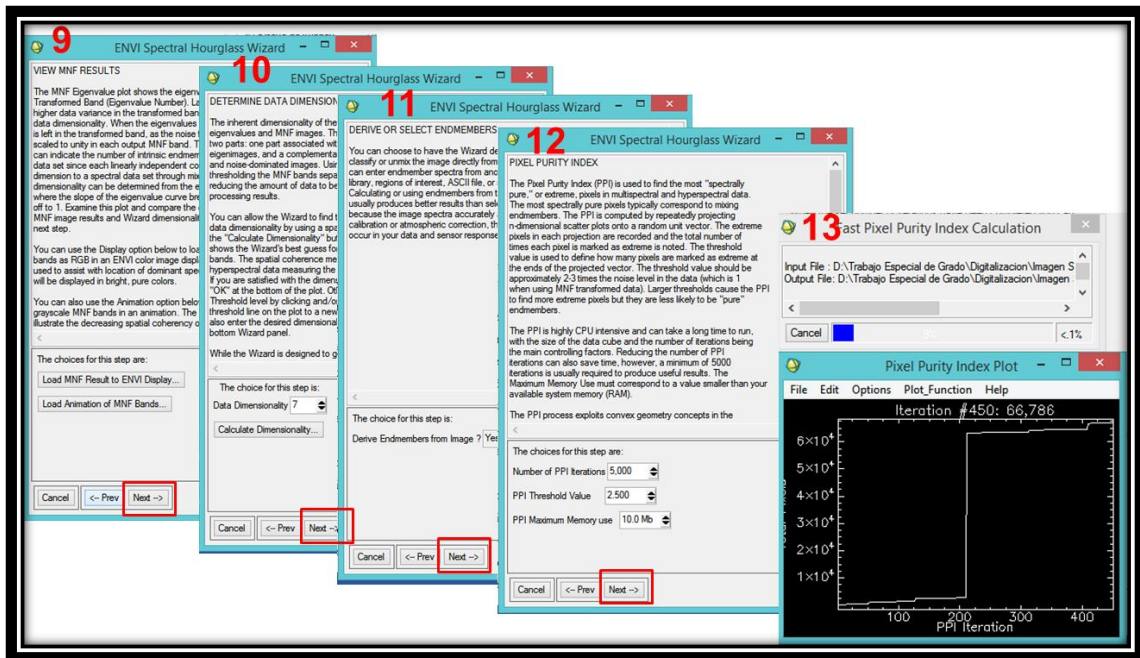


Figura 3.20. Procedimiento para la generación del Índice de Pureza de Pixel (PPI).

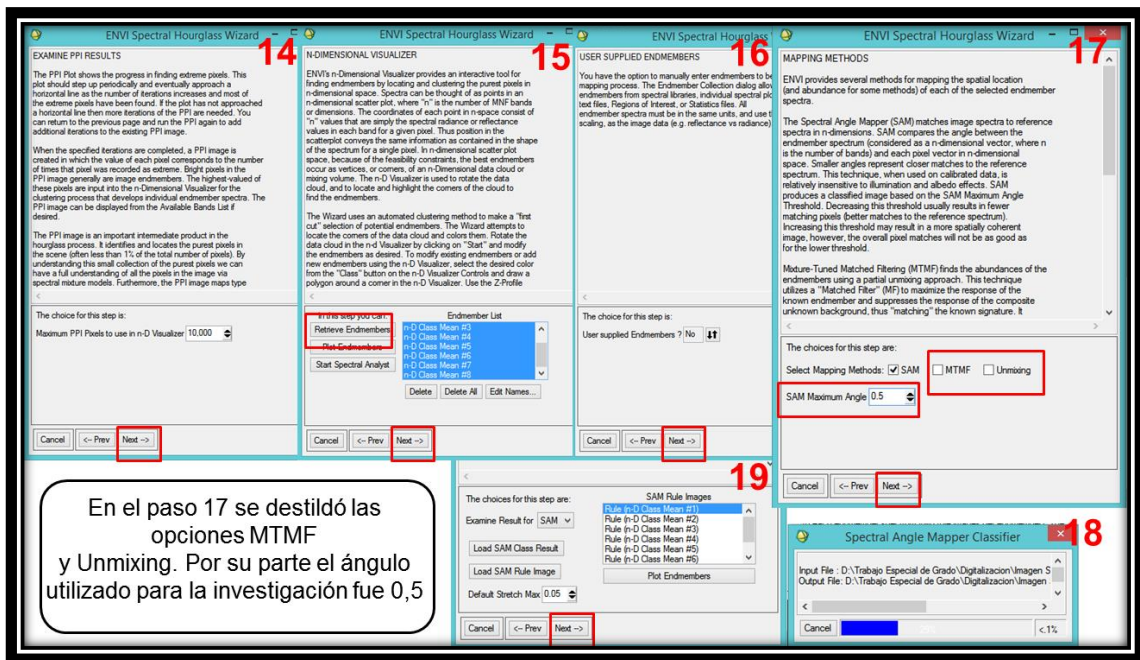


Figura 3.21. Procedimiento para la generación del Cartografiado del Ángulo Espectral (SAM).

### III.3.2.2 Combinación y Algebra de banda

El procedimiento de combinación de banda consistió en realizar combinaciones específicas de R-G-B y así obtener una imagen a color donde se realzan características geológicas presente en el área de estudio. Por su parte, el procedimiento correspondiente a algebra de banda consistió en aplicar una serie de cocientes entre bandas mediante el algoritmo *Band Algebra-Band Ratios* y luego combinarlas entre sí (Figura 3.22). Ambos procesos se realizaron tomando como base la imagen FLAASH

### III.3.2.3 Clasificación no supervisada

Este procedimiento, mediante el algoritmo, según su jerarquía *Classification - Unsupervised Classification - K-Means Classification* del software ENVI 5.3, consistió en organizar los pixeles con ciertas características similares en diez clases diferentes con la finalidad de discriminar espectralmente y visualmente la imagen en elementos temáticos. En esta clasificación el algoritmo de procesamiento reconoció

automáticamente las diez clases espectrales mostrando como resultado una agrupación de pixeles de características similares en un tono de color específico (Figura 3.23).

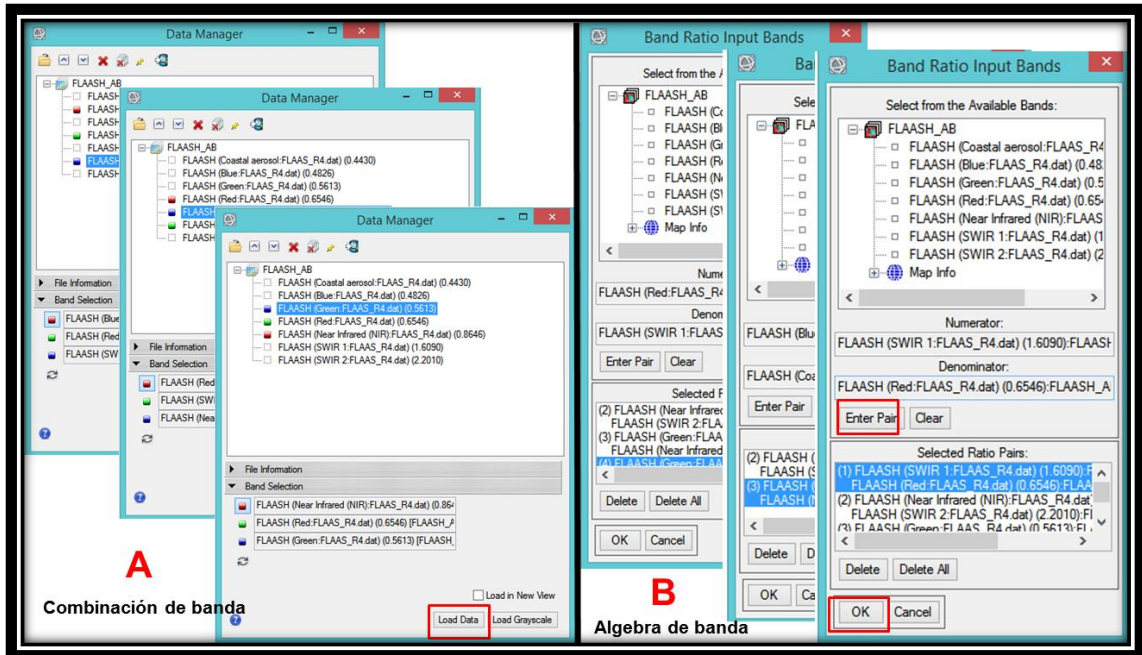


Figura 3.22. Procedimiento para la ejecución de combinación y algebra de banda.

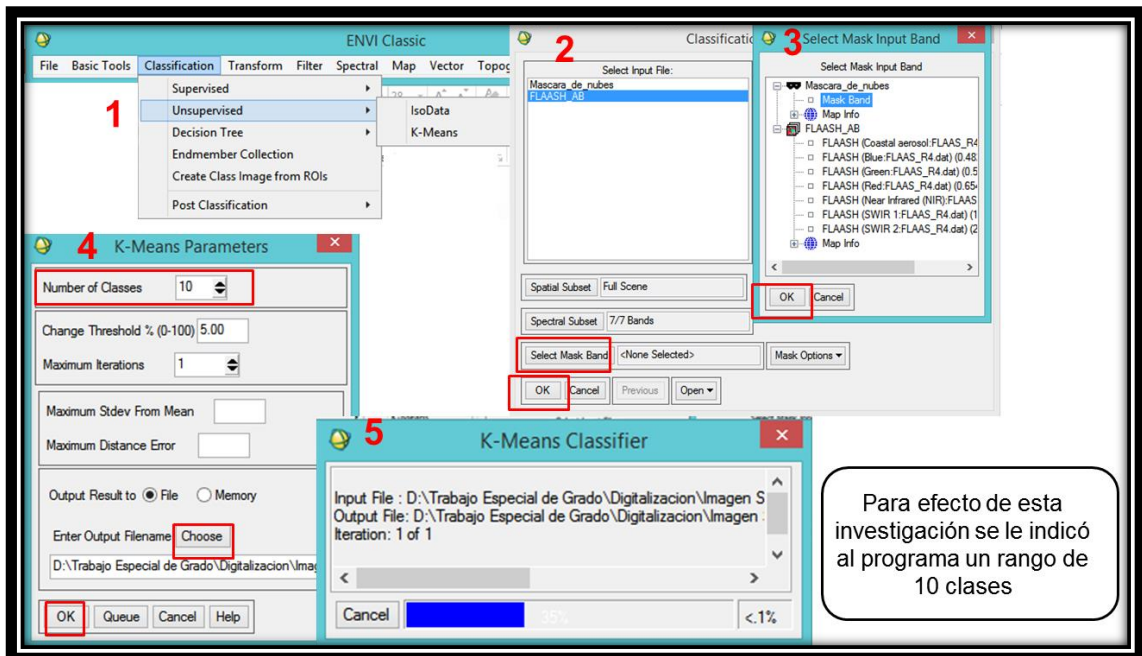


Figura 3.23. Procedimiento para la ejecución de la clasificación no supervisada.

### III.3.2.4 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada a diferencia de la no supervisada consistió en agrupar clases a partir de patrones conocidos. Para efectos de esta investigación se asignaron siete clases de acuerdo a las características conocidas del área de estudio (Figura 3.24). Este procedimiento se realizó mediante los algoritmos según su jerarquía *Classification - Supervised Classification - Maximum Likelihood Classification* del software Envi 5.3. (Figura 3.25).



Figura 3.24. Clases utilizadas en la investigación para realizar la clasificación supervisada.

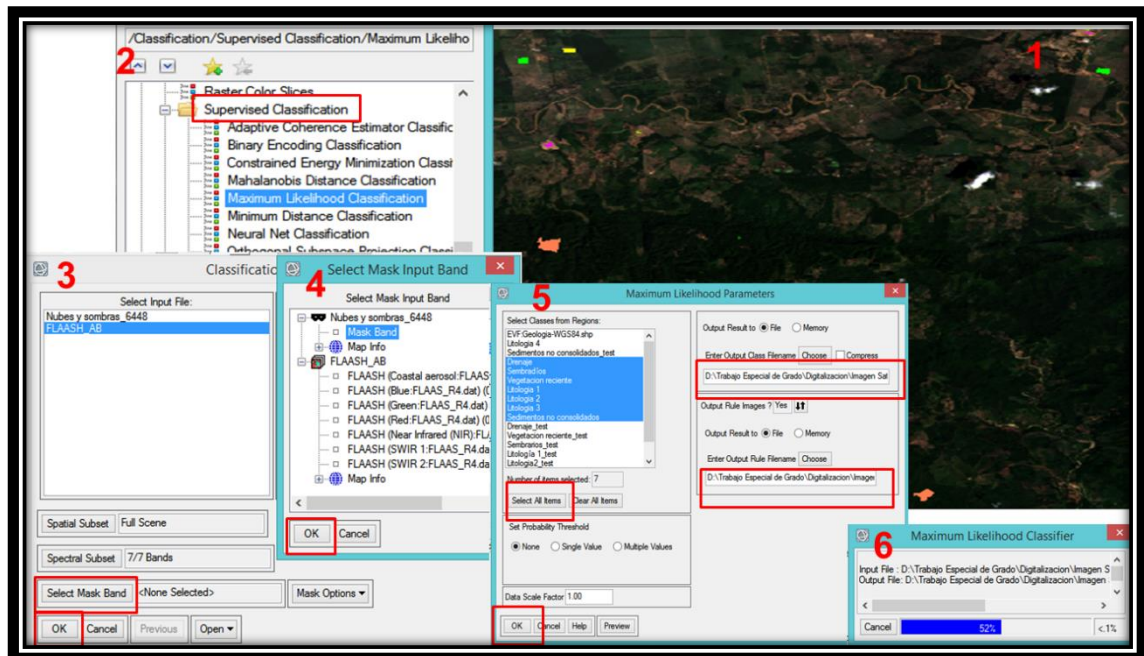


Figura 3.25. Procedimiento para la ejecución de la clasificación supervisada

Posteriormente a la clasificación supervisada, se procedió a realizar la post clasificación, el cual consistió en determinar que la clasificación realizada es correcta. Este procesamiento se realizó mediante el algoritmo *Post Classification*, determinando en primer lugar la matriz de confusión mediante el algoritmo *Confusion Matrix Using Ground Truth Rois* (Figura 3.28-A). Finalmente, se realizó el filtrado de mayoría (*majority filter*), para evitar el efecto pimienta presente en la imagen generada, es decir eliminar los píxeles aislados y así obtener una imagen de mayor calidad visual, lo cual es importante al momento de su interpretación. Este procedimiento se realizó mediante el algoritmo *Majority/Minority Analysis* (Figura 3.26-B).

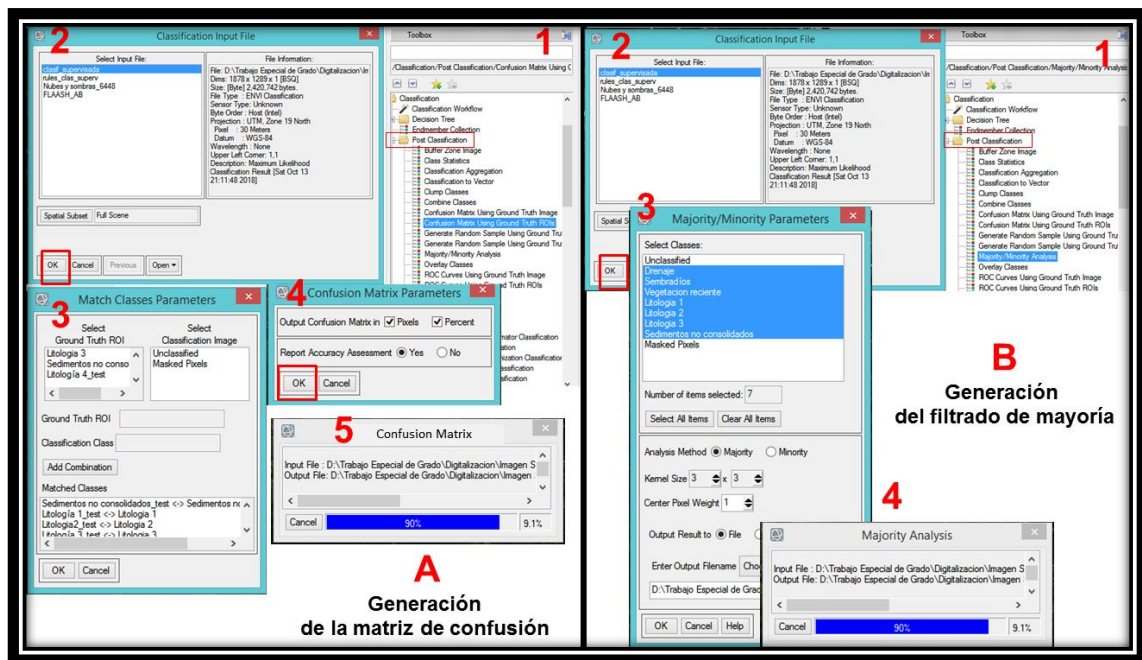


Figura 3.26. Procedimiento para la ejecución de la post-clasificación supervisada.

### III.4 FASE 4: Integración de la Data

Esta fase corresponde al análisis e integración de los subproductos obtenidos en las fases anteriores para así generar la construcción de mapas: relieve, litología y geológico estructural y además cortes geológicos. Esto requirió el análisis e interpretación de unidades de relieve, rasgos estructurales y tipos litológicos en la zona.

### **III.4.1 Unidades de relieve**

El análisis de las unidades de relieve se realizó mediante la interpretación e integración de las capas temáticas hipsometría, pendiente, cuenca y orientación de laderas; al igual que la interpretación del Modelo Digital de Elevación (DEM) y el Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS), obteniendo como primer resultado el mapa de unidades de relieve.

### **III.4.2 Rasgos estructurales**

La interpretación de los rasgos estructurales estuvo basada principalmente en la interpretación del mapa de drenaje, orientación de laderas, imagen de radar y el MDIS. Siendo el MDIS el subproducto generado que mayor información aportó debido a que se generaron siete MDIS. Estos presentaron ángulo de azimut cada 45° (45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) y un ángulo de elevación del sol de 30° para cada uno, lo cual permitió realizar la vectorización de lineaciones y trazas presente en la carta 6448 desde distintos ángulos, para luego realizar la interpretación y vectorización de pliegues y fallas.

### **III.4.3 Rasgos geológicos en zonas con ausencia de información satelital**

Para cubrir estos vacíos de información se procedió a usar interpretación fotogeológica utilizando las fotografías aéreas correspondientes a la misión 020141 del año 1968, a escala 1:50.000. Debido a que la recopilación de las fotografías aéreas fue de difícil acceso y su adquisición monetaria para la fecha era elevada, se procedió a concentrar su uso solo para la interpretación de los rasgos geológicos en las zonas donde las imágenes satelitales, radar, DEM y MDIS no proporcionaban información contundente. Este procedimiento se realizó en las instalaciones de INGEOMIN usando el método de la estereoscopia.

#### **III.4.4 Rasgos litológicos**

Consistió en la integración e interpretación de los resultados obtenidos en la fase 3 (DEM, MDIS, capas temáticas, imagen FLAASH, MNF, SAM, combinación de banda, algebra de banda clasificación supervisada, no supervisada) sumado a la descripción de trabajos previos realizados por distintos autores. La interpretación se realizó mediante el solapamiento de los mapa geológico recopilados (Creole (1968), Guzmán & Morillo (2009) y FUNVISIS (2013)) sobre cada uno de los resultados obtenidos en la fase III, junto con la información bibliográfica recopilada.

#### **III.5 FASE 5: Resultados**

Esta fase consistió en la realización de los 16 mapas geológicos actualizados a escala 1:25.000 de la carta 6448 mediante el uso de sensores remotos al igual que la realización de un informe técnico.

Para la generación de los 16 mapas geológicos se procedió a integrar todos los datos pertinentes de las diferentes imágenes tratadas (combinación de banda, algebra de capa, MNF, SAM y clasificación supervisada y no supervisada) y todos los subproductos obtenidos mediante la digitalización de la data espacial (hipsometría, pendiente, orientación de laderas, cuencas, subcuencas y densidad de drenaje, mapas de unidades de relieve, estructural, contactos litológicos y corte geológico). Para ello, se convirtió de formato ráster a formato vectorial las clases temáticas obtenidas a archivos tipo *Shaphefile*, lo cual sirvió de base digital para la elaboración de los mapas.

## CAPITULO IV

### ASPECTOS FÍSICOS NATURALES Y GEOLOGÍA REGIONAL

En este capítulo, se inicia el análisis comenzando con una descripción general de las distintas variables relacionadas con aspectos físicos como relieve, clima, drenaje, vegetación y suelos, para luego abordar los aspectos de la geología regional correspondientes al área de estudio.

#### IV.1 ASPECTOS FÍSICOS NATURALES

La geografía física de una región está definida por el conjunto de características físico-naturales que identifican y definen dicha área, relacionándolas con su ubicación geográfica. (Manduca, 2004) (Figura 4.1).

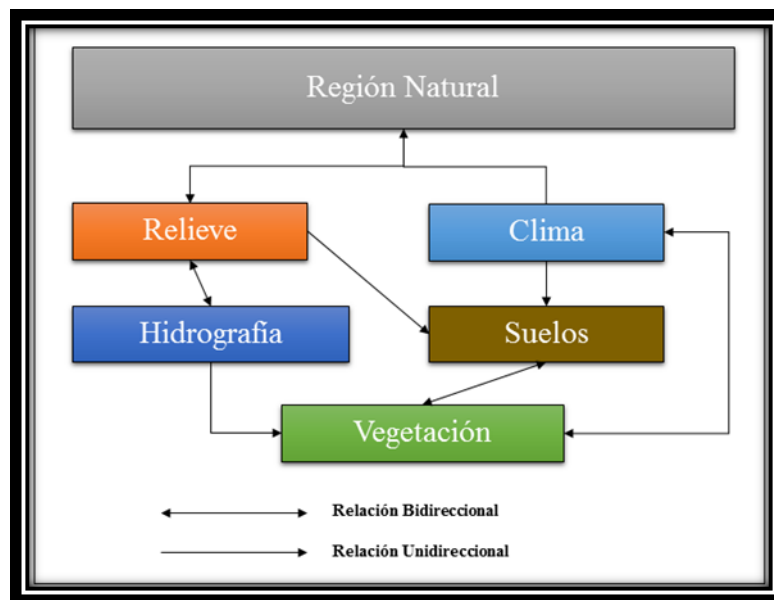


Figura 4.1 Las regiones naturales y su sistema de relaciones (Tomado de Manduca, 2004).

A continuación se describirá la geografía física de la zona de estudio, enmarcada dentro de la parte occidental del estado Falcón.

#### **IV.1.1 Relieve**

El estado Falcón se encuentra ubicado en el noroeste de Venezuela, formando parte de la región centro occidental del país (Falcón, Lara, Yaracuy, Cojedes y Portuguesa). Fisiográficamente el estado Falcón, de acuerdo a la clasificación de Cárdenas (citado por Zinck, 1981), está constituido en gran medida por la provincia correspondiente al Sistema Coriano y sus márgenes. Este sistema es el último sistema montañoso que aparece sobre el modelado venezolano, se encuentra en la parte septentrional de los Andes y en el inicio de la Cordillera de la Costa, es un sector de transición de relieve variado y poco elevado. Está constituido por dos subsistemas orográficos, el del norte, paralelo al mar y el del sur, que comparte con el estado Lara. La sumatoria de ambos domina la mayor parte del territorio falconiano y asimismo presenta ramales montañosos importantes dentro del área en estudio. Estas formaciones montañosas tienen una dirección general suroeste a noreste.

El Sistema Coriano, también llamado Formación Falcón-Lara ocupa una extensión territorial de 52.000 km<sup>2</sup> aproximadamente y expresa un relieve muy montañoso con varias serranías, valles y llanuras. Según la clasificación taxonómica de Zinck (1981), se procedió a delimitar las regiones y subregiones naturales presentes en las 16 hojas correspondientes a la carta 6448 con la finalidad de presentar posteriormente un análisis más detallado.

Para la caracterización fisiográfica, Cárdenas (citado por Zinck, 1981) clasifica el Sistema Coriano en cuatro regiones naturales: Península de Paraguaná, Depresiones intermontanas (Barquisimeto, Carora, Yaracuy), las Sierras Corianas y el Litoral Falconiano. A efectos de esta investigación, para el Litoral Falconiano se considera la subdivisión realizada por Sistemas Ambientales Venezolanos SAV (1983) y Arismendi (2008), donde se divide en dos regiones: La llanura costera noroccidental y los valles del noreste. Esta última unidad se encuentra presente en la carta 6448 (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Grandes unidades de relieve de la carta 6448 (Tomado en base a SAV (1983). Regiones Naturales: 16 Macizo Coriano Subhúmedo y 17 Valles Marítimos Occidentales)

Provincia Fisiográfica	Región Natural		Subregión Natural
Cordillera de la Costa	Macizo Coriano subhúmedo	Sistema Coriano y sus márgenes	Montañas con clima premontano húmedo y seco de las Serranías de Bobare, Buena Vista y Baragua
	Valles Marítimos Occidentales	Valles del noreste de Falcón	Valles del noreste de Falcón, bajos con clima tropical seco del río Tocuyo, Araurima, Aroa

Entre las Sierras Corianas se encuentran: Siruma, San Luis, Aroa, Buena Vista y Baragua, y Serranía de Bobare. Estas dos últimas están incluidas en el área de estudio. A pesar de que este sistema de montaña alcanza altura hasta 1500 m.s.n.m., en la zona de estudio las elevaciones más altas corresponden a 1200 m.s.n.m. (Figura 4.2)

#### IV.1.1.1 Región Natural: Sistema Coriano y sus márgenes

Este Sistema se encuentra en la parte septentrional de los Andes y en el inicio de la Cordillera de la Costa. Es un sector de transición de relieve variado y poco elevado (Figura 4.2). Está constituido por dos subsistemas orográficos: el del norte, paralelo al mar y el del sur, que comparte con el estado Lara. La sumatoria de ambos domina la mayor parte del territorio falconiano y presenta ramales montañosos importantes dentro del área en estudio, orientados con una dirección general suroeste a noreste. El subsistema del sur se inicia en el cerro Cerrón (1.990 m.s.n.m.), donde convergen los estados Falcón, Lara y Zulia. De allí avanza hacia el este por la cordillera de Buena Vista expresado en las montañas de Churuguara para terminar en elevaciones algo superiores a los 500 m.s.n.m., al sur de Jacura.

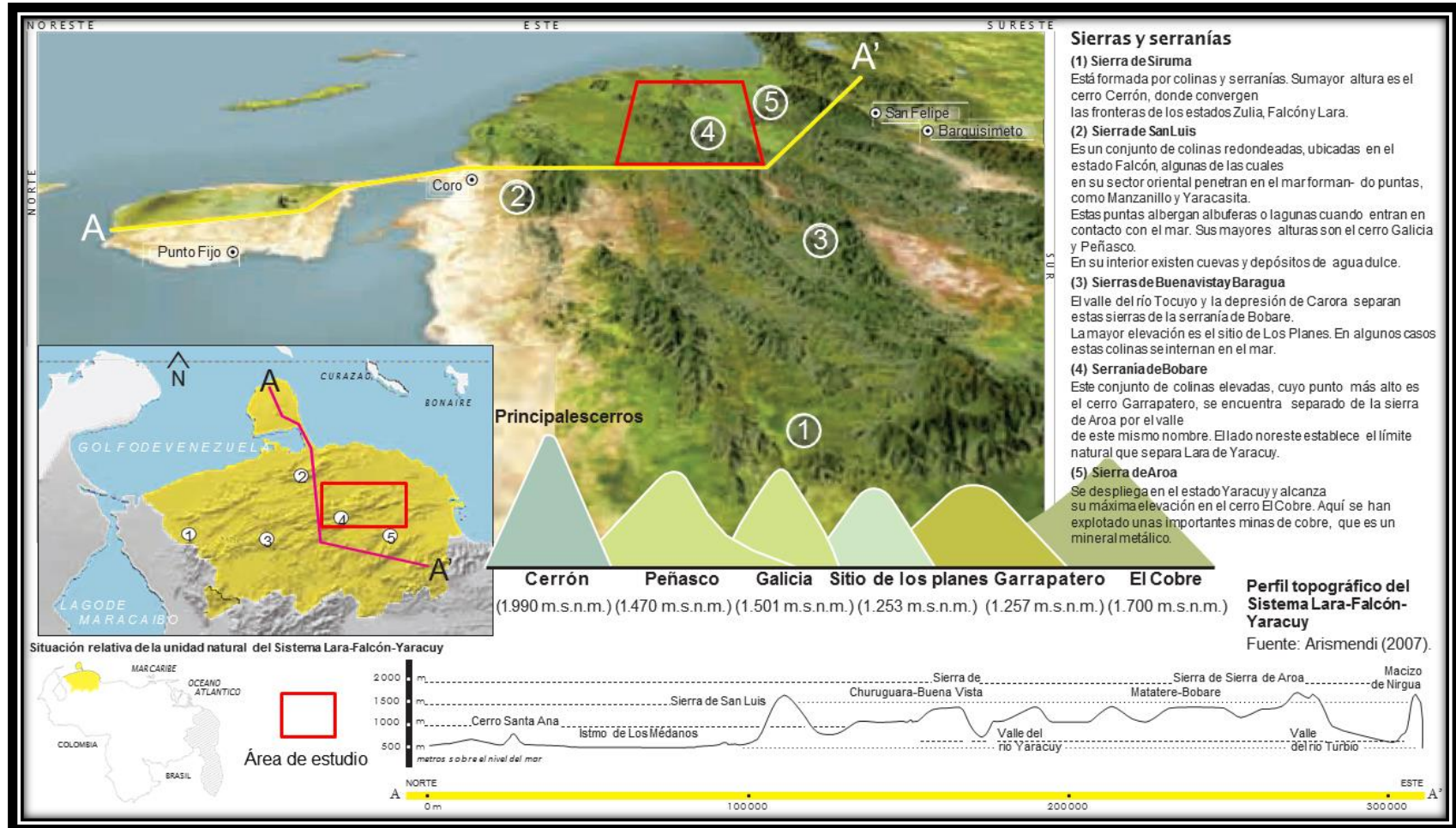


Figura 4.2 Sierras y Serranías del Sistema Lara-Falcón-Yaracuy

[http://bibliofep.fundacionempresaspolargp.org/media/16863/geo\\_u2\\_176\\_lara\\_falcon\\_yaracuy\\_relieve.pdf](http://bibliofep.fundacionempresaspolargp.org/media/16863/geo_u2_176_lara_falcon_yaracuy_relieve.pdf)

#### IV.1.1.2 Región Natural: Valles del noreste de Falcón

La zona de estudio está dominada por el valle del río Tocuyo en su parte central, que unido a las cuencas formadas por los ríos Aroa, Hueque y Tucurere, conforman los valles del noreste. Estos ríos discurren en forma sub-paralela en dirección general suroeste al noreste hasta llegar al mar. Esta gran unidad cubre una superficie de 6.250 km<sup>2</sup>, lo que representa el 25,2% de la superficie del estado. Es conveniente señalar que el río Tocuyo tiene sus nacientes en los límites entre Lara y Trujillo, trayendo aguas de los páramos de Cendé (3.583 m.s.n.m.), Jabón (3.503 m.s.n.m.) y de Las Rosas. El límite superior de la altitud de la región es la curva de nivel de los 200 m.s.n.m., aunque con diversas variantes. En general, tienen entrantes y salientes que se derivan de la configuración de las estribaciones montañosas que además sirven como separadores entre los diversos valles.

#### IV.1.2 El clima y su relación con las unidades presentes en la carta 6448

El estado Falcón, por sus condiciones fisiográficas, no posee fuertes contrastes climáticos, se mantiene dentro de condiciones de tropicalidad muy uniformes en casi toda la región, donde las características climáticas son determinadas por la latitud, la proximidad al mar y el relieve, entre otras. Las variaciones que presenta el área, se hacen evidentes al estudiar los elementos climáticos de este a oeste donde pueden observarse que la incidencia de los vientos alisios, la influencia marítima, y la topografía de la Serranía de Bobare ejercen sus modificaciones, entre otros factores. (Díaz, 2008)

El análisis de la precipitación, la temperatura y la evaporación en la región han significado un reto por la escasa y deficiente información de registros climáticos que existen. Sin embargo, para hacer un estudio general de las condiciones climáticas en el área de estudio, se han seleccionado cinco estaciones meteorológicas representativas. En ellas la precipitación es uno de los elementos que se observa posee mayor

distribución de registros, tal vez debido a la conformación de la red de estaciones. Con respecto a estos registros, se presentan los valores mostrados por la estación Araurima, ubicada dentro del área de estudio, y otras estaciones cercanas tales como Píritu, Curarí, Las Lapas y Tocuyo de la Costa (Tabla 4.2). Dichos valores son extraídos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMEH (2006).

Tabla 4.2. Precipitación media mensual y anual en mm, en el período 1961 – 2000, en estaciones meteorológicas del sureste del estado Falcón (Tomado de INAMEH, 2006).

Región sureste del estado Falcón													
Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Araurima	87.0	56.0	38.9	91.0	104.7	148.0	166.5	129.6	98.8	116.5	183.2	219.5	1439.6
Píritu	76.1	62.7	33.9	55.5	77.7	93.9	82.7	80.4	62.6	98.3	127.1	192.3	1043.3
Curari	58.9	49.6	21.5	45.5	51.8	68.2	82.1	62.9	48.6	83.7	125.8	143.9	842.5
Las Lapas	91.3	55.7	49.3	73.3	74.2	94.0	88.9	118.3	85.7	169.5	223.5	224.4	1348.1
Tocuyo de la Costa	48.0	26.8	32.5	54.8	62.1	47.1	58.2	61.8	92.2	130.3	205.9	150.2	969.8

La precipitación se ve afectada en sus valores durante el año por la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical), con una distribución bimodal de las lluvias, mostrando un incremento significativo de las precipitaciones hacia los meses de mayo, junio y julio, una caída en las precipitaciones entre agosto y septiembre, para luego alcanzar su punto máximo en los meses de noviembre y diciembre. Los meses más secos son los comprendidos entre enero y marzo.

La precipitación promedio anual de las estaciones indica que el área presenta una alta pluviosidad, con datos superiores a los 1.300 mm anuales en algunas estaciones, lo que incide en una alta nubosidad durante casi todo el año, generando dificultad en la programación de vuelos para cartografía y para la selección de imágenes satelitales (Figura 4.3).

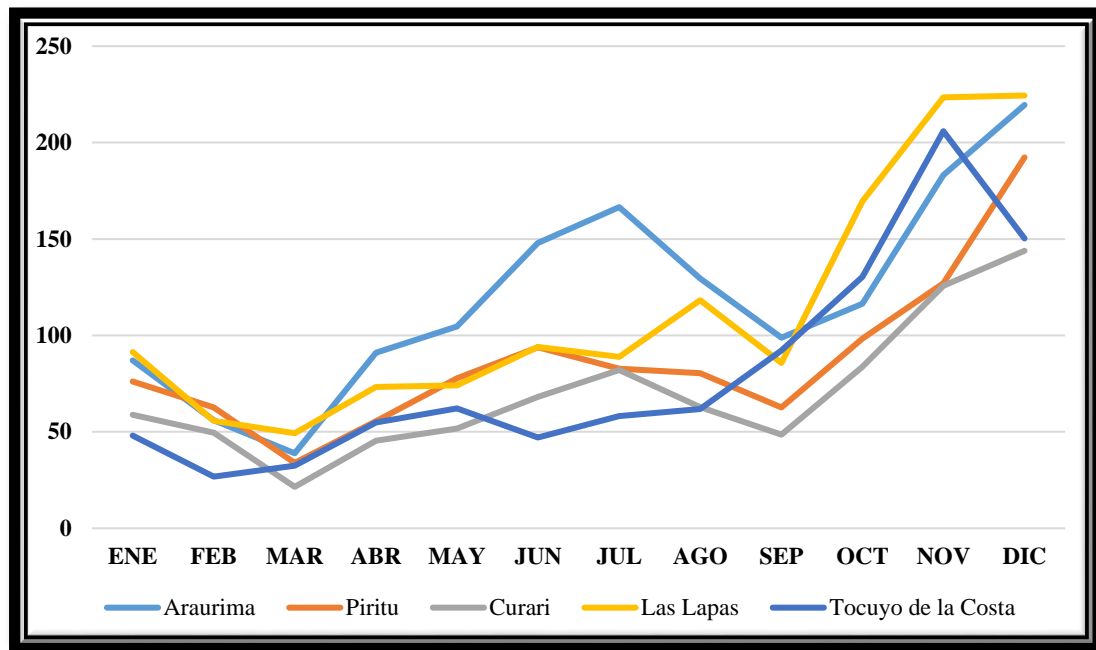


Figura 4.3. Precipitación media mensual y anual en mm, en el periodo 1961 – 2000, en estaciones meteorológicas del sureste del estado Falcón (Tomado de INAMEH, 2006).

Como puede observarse en la figura anterior, la variación de los niveles de precipitación durante el año, al sureste del estado Falcón, señala un aumento de las precipitaciones entre los meses de junio, julio y parte de agosto, que luego disminuyen en septiembre para luego volver a subir y alcanzar un pico principal en noviembre y diciembre. El período de sequía principal es a comienzo del año, en los meses de enero, febrero y marzo y luego vuelven a ceder las precipitaciones considerablemente en los meses de agosto y septiembre (Figura 4.4).

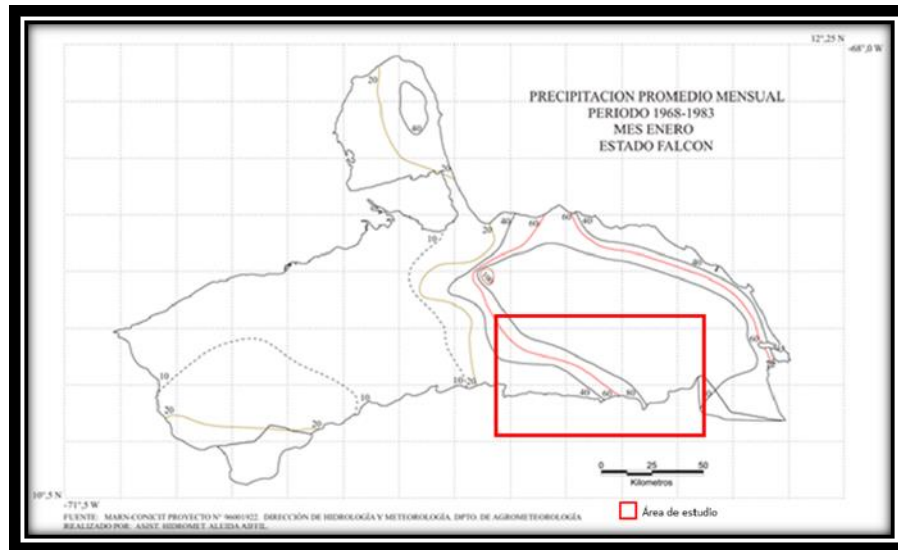


Figura 4.4 Precipitación promedio mensual del mes de Enero (mes más seco) estado Falcón (Tomado de [www.inameh.gob.ve](http://www.inameh.gob.ve)).

Otra variable relevante a considerar para identificar la zona climática es la temperatura. Para evaluar su variación anual se consideraron los datos de las estaciones más cercanas al área de estudio. (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Temperatura media mensual y anual en °C, en el periodo 1970-2000, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón (Tomado de INAMEH, 2006).

Región sureste del estado Falcón													
Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
La Negrita	23.2	23.6	24.0	25.0	25.7	26.1	25.5	25.7	25.4	24.8	24.4	23.5	24.7
Agua Clara	20.0	21.2	21.4	23.0	23.6	24.5	24.0	23.9	23.4	23.0	22.4	21.2	22.4
Tocuyo de la Costa	26.7	28.0	27.7	27.6	27.5	27.7	28.3	28.4	28.4	28.1	26.7	26.6	27.0

Con base al análisis de los datos aportados por las estaciones meteorológicas anteriores, se observa la poca oscilación en el año de la temperatura dentro de los diferentes sectores de la región, diferenciándose temperaturas más altas hacia la costa, con un promedio de 27°C (Estación Tocuyo de la Costa) y con una disminución hacia

las áreas montañosas en razón a la altitud, con promedio cercano a 22°C, registrado en la estación Agua Clara. A pesar que la temperatura no establece diferencias significativas durante el año como lo hace la precipitación, se observa, en todas las estaciones, que los meses con más bajas temperaturas son diciembre, enero y febrero. (Figura 4.5).

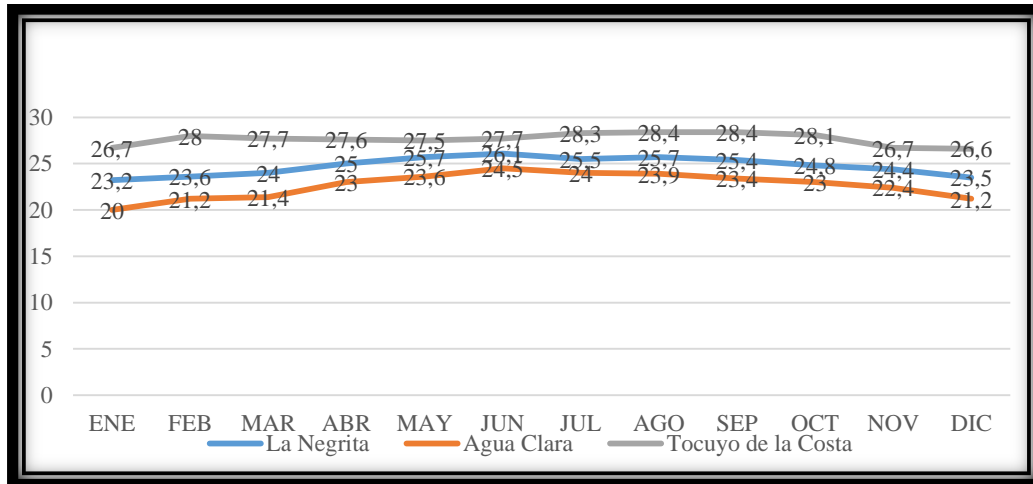


Figura 4.5. Temperatura media mensual en °C, en el periodo 1970 – 2000, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón (Tomado de INAMEH, 2006).

Un dato que debe destacarse de los registrados en las estaciones meteorológicas estudiadas es la evaporación media anual, la cual es significativamente superior a la precipitación media anual, incluso en las áreas montañosas (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Evaporación media mensual y anual en mm, en el periodo 1970-2000, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón (Tomado de INAMEH, 2006).

Región sureste del estado Falcón													
Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Pedregal	213.2	218.0	250.8	231.3	229.2	242.8	262.7	256.0	221.9	187.3	183.6	193.8	2690.6
Mapara	136.3	146.0	187.5	161.3	181.2	172.8	182.7	208.8	203.2	172.9	144.3	132.2	2029.3
La Negrita	260.3	270.8	321.9	294.9	302.2	301.5	310.7	316.1	287.6	254.9	215.4	227.0	3363.3
Agua Clara	232.2	234.5	280.9	254.0	279.8	284.6	311.7	313.2	284.0	234.9	197.8	205.7	3113.3
Tocuyo de la Costa	164.3	160.5	185.9	181.2	184.8	185.0	198.7	200.7	196.0	184.6	161.9	160.4	2164.1

La evaporación tiene un comportamiento inverso al comportamiento de la precipitación. Presenta un incremento significativo en marzo y agosto coincidiendo con los meses de muy bajas precipitaciones.

La evaporación promedio anual de las estaciones indica que el área presenta una alta evaporación, con datos superiores a los 2000 mm anuales en algunas estaciones (Figura 4.6).

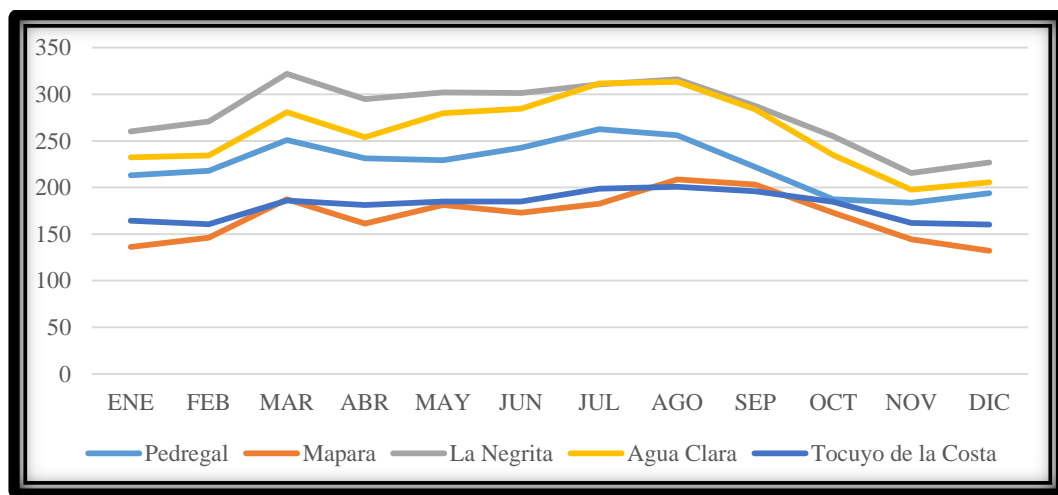


Figura 4.6 Evaporación promedio mensual en mm, en el periodo 1970-200, en estaciones meteorológicas del centro y sureste del estado Falcón. (Tomado de INAMEH, 2006).

Como puede observarse en la figura anterior, existe un pico principal en marzo, iniciando el primer período seco entre enero y marzo y un segundo incremento significativo hacia agosto, período en el que disminuye la pluviosidad.

Si se analiza la combinación de las tres variables para una estación, como por ejemplo la estación Tocuyo de la Costa, puede apreciarse que en el área de estudio se generan climas mayormente secos hacia el área costera, mientras que hacia el área montañosa las precipitaciones son mayores (Figura 4.7).

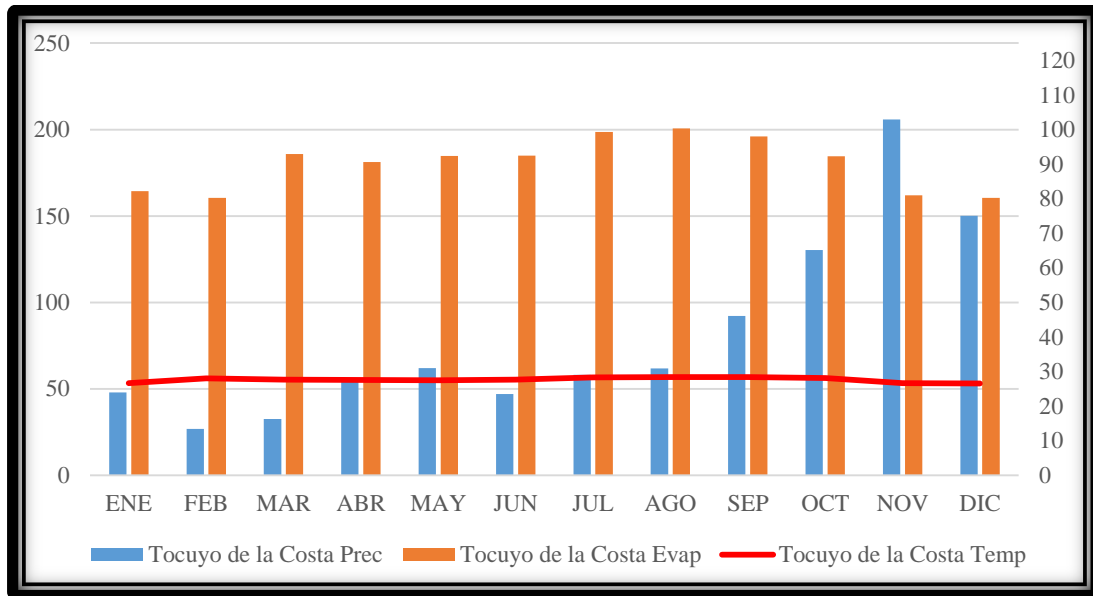


Figura 4.7 Comparación de datos de precipitación, evaporación y temperatura de la estación Tocuyo de la Costa, Falcón. (Tomado de INAMEH, 2006).

Según la distribución anual de estos valores de precipitaciones y temperatura, la clasificación de zonas de vida Holdridge son las de Bosque seco Tropical (bs-T) y bosque muy seco tropical (bms.T), donde el tipo de vegetación que predomina son arbustales espinosos, (espinares y cardonales) y bosques secos a semicaducifolios (que pierden las hojas en el período seco).

Es conveniente tomar en consideración que la selección de imágenes satelitales de mejor calidad debería realizarse durante un período de sequía, en el que hay menor cobertura vegetal y disminuyen la humedad y nubosidad, factores éstos que generan distorsión en la respuesta espectral.

Las características topográficas y climáticas tienen una incidencia directa en la conformación de los patrones de drenaje y en los cambios de vegetación, los cuales son indicadores de importancia para identificar control estructural por presencia de fallas y las variaciones de litología y sus zonas de contacto.

### **IV.1.3 Drenaje**

El oriente del estado Falcón presenta escasos recursos hídricos. Estos se concentran en las vertientes sureste y noroeste de la sierra de San Luis, donde se encuentran ubicados los embalses Las Barrancas, El Isiro y Hueque III, principales abastecedores del preciado líquido en la zona. Los tributarios y quebradas se distribuyen en las cuencas de los ríos Yaracuy, Aroa, Tocuyo, Araurima, Hueque, Mitare, Paraíso, Matícora y Sanare, que drenan hacia las vertientes del golfo de Venezuela y del Mar Caribe (Arismendi, 2008). De los tributarios mencionados, en la zona de estudio se encuentran los ríos Tocuyo y Araurima.

La zona de estudio tiene como colector principal el río Tocuyo. Este río es el más importante de los ríos que cruzan el territorio del estado Falcón desde el punto de vista de su caudal, ya que mantiene flujo durante todo el año, con aporte de ríos menores tributarios que vienen desde los estados Trujillo y Lara. Con dirección franca al este, al entrar a la entidad toma dirección SO-NE (sentido que mantiene en la Hoja 6448) hasta desembocar en el Mar Caribe.

Los tributarios y quebradas que se distribuyen en la carta 6448 corresponden a las cuencas de los ríos Tocuyo y Aroa. La cuenca del río Tocuyo, donde también está incluido el río Araurima, es la principal y ocupa aproximadamente un 80%; mientras que el otro 20% aproximado está representado por la cuenca del río Aroa.

Entre los tributarios y quebradas de mayor relevancia que desembocan en el río Tocuyo se tiene el río Araurima, quebrada Agua Salada y Caño El Cauce, (con dirección de flujo de aguas arriba a aguas abajo NO-SE), además del río Guaidima y las quebradas Charal, Guaca y Tigre (con dirección de flujo de aguas arriba a aguas abajo SE-NE), mostrando patrones de drenaje paralelo, subparalelos y dendríticos. Por su parte, los tributarios y quebradas de mayor relevancia que desembocan en el río Aroa corresponden al río Agua Linda y a las quebradas, Chapano, San Antonio y Manuelito,

presentando dirección preferencial de flujo aguas abajo NO-SE, con un patrón de drenaje dominante dendrítico.

#### **IV.1.4 Suelos**

Los diversos tipos de suelos son la consecuencia de la interacción de varios factores bioclimáticos, el relieve y el material parental (Gracciano, Vilorio & Rosales, 2007). El suelo de referencia según estos autores para el estado Falcón, se ubica en un ambiente árido, con perfil de meteorización moderadamente profundo (75 a 100 cm), de texturas medias a finas y cuyo contenido de arcilla no incrementa significativamente con la profundidad. Estos poseen bajos contenidos de materia orgánica en los horizontes superficiales, su porcentaje de saturación con bases es moderado a alto y la reacción es neutra a ligeramente alcalina.

De estas características, junto a las climatológicas y de drenaje condicionadas por los elementos geológicos presentes en el área, se derivan 21 categorías de taxonomías o agrupaciones de tipos de suelo a saber (Tabla 4.5).

Los suelos predominantes en el área son definidos por el clima seco, donde existe déficit hídrico por más de siete meses al año. Son suelos variables en profundidad, de textura fina predominante, poco permeables y con problemas de salinidad y susceptibles a degradarse. En las áreas con mayor precipitación hacia la zona noroeste del área de estudio, los suelos son de profundidad variable de mediana a baja fertilidad, y texturas variables. Estos elementos característicos de los suelos se reflejan en el comportamiento de la vegetación y pueden ser percibidos por los sensores, ya sea como suelo desnudo o con un tipo de vegetación resultante.

Tabla 4.5 Taxonomía de Suelos de la carta 6448 (Tomado en base a SAV, 1983 y Gracciano, Viloría & Rosales, 2007).

Taxonomía de Suelos	Características Generales
Chromusterts, Ustifluvents, Tropaquents	Suelos de texturas arcillosas, pH desde moderadamente ácido a moderadamente alcalino, medio a bajo contenido de fósforo y potasio y bajo contenido de materia orgánica.
Dystropepts, Haplustalfs, Ustorthents	Suelos con texturas medias, el drenaje externo, interno y permeabilidad es moderada a rápida, bajo contenido en materia orgánica y fosforo, pH ligeramente ácido
Haplustalfs, Ustorthents, Ustropepts, Ustifluvents	Texturas medias con incremento de arcilla a medida que aumenta la profundidad. pH neutro a ligeramente alcalino o ácido, fertilidad de baja a buena y sin presencia de sales
Humitropepts, Chromusterts, Ustropepts, Usterts, Tropepts, Orthents	Texturas arcillosas, pH variado de ácido a ligeramente alcalino, intercalaciones de areniscas
Orthents, Dystropepts, Haplustalfs Cemiles, Ustorthents	Suelos no presentan problemas de erosión, con texturas predominantemente medias e incremento de arcilla en profundidad
Orthents, Tropepts, Ustalfs, Ustox, Haplustalfs, Ustorthents	En las vertientes de mayor pendiente predominan los afloramientos rocosos y los procesos podogénico son escasos
Orthents, Tropepts, Ustalfs, Ustults, Ustolls	Suelos poco profundos, con pedregosidad superficial y en el perfil, afloramientos rocosos. Existen además suelos de texturas finas, con moteados y pH ácido, moderada a baja fertilidad
Orthents, Tropepts, Ustox, Ustalfs	Suelos formados "in situ" de variable profundidad y desarrollo
Orthents, Tropepts, Ustox, Ustalfs, Haplustalfs, Ustorthents	Suelos de texturas medias con incremento de arcilla a medida que aumenta la profundidad. Afloramientos rocosos. pH neutro en el horizonte superficial. Suelos de baja fertilidad
Plinthdults, Plinthalfs, Tropudalfs, Tropaqualfs	Texturas medias superficialmente, incremento de arcilla a profundidad, horizonte de plintita, débilmente estructurado, permeabilidad y drenaje interno lento, drenaje externo moderado, pH moderadamente ácido a fuertemente ácido, baja fertilidad, y baj
Plinthudults	Suelos de texturas medias con incremento de arcilla, horizonte de plintita, pH de moderada a fuertemente ácido.
Tropaquepts, Ustropepts, Tropofluvents, Ustifluvents	Suelos medios y de texturas finas (arcillosos y arcillo - limosos)
Tropepts	Suelos líticos, de texturas medias y estructura de fuerte desarrollo originados a partir de roca caliza. Presencia de horizonte oscuro por acumulación de materia orgánica
Tropepts, Orthents, Ustalfs, Ustults, Udalfs	Gran complejidad de suelos, como consecuencia del relieve, litología, régimen climático, cubierta vegetal
Urterts, Tropepts, Orthents	Suelos arcillosos, alto contenido de materia orgánica, pH neutro a ligeramente ácido, presentan agrietamiento y autoinversión
Urterts, Tropepts, Orthents, Humitropepts, Chromusterts, Ustropepts, Camborthids	Suelos arcillosos formados a partir de lutitas y síferas, pH de neutro a ligeramente ácido, alto contenido de carbono orgánico, baja saturación con bases y en algunos sectores, afloramientos rocosos
Usterts, Tropepts, Orthents	Suelos fundamentalmente arcillosos, con alto contenido de materia orgánica, pH neutro a ligeramente ácido
Usterts, Tropepts, Orthents, Ustalfs, Ustults	Suelos de texturas arcillosas margosas, con intercalaciones de areniscas y lutitas de colores abigarrados, alto contenido de materia orgánica, pH neutro a ligeramente ácido
Ustolls	Suelos líticos, de texturas medias y estructura de fuerte desarrollo originados a partir de roca caliza. Presencia de horizonte oscuro por acumulación de materia orgánica
Ustolls, Tropepts, Orthents	Suelos líticos originados a partir de roca caliza, presencia de un horizonte de acumulación de materia orgánica, textura medio y estructura de fuerte desarrollo. También se localizan suelos arcillosos, pH neutro a ligeramente ácido
Ustropepts, Chromusterts	Suelos de texturas medias y arcillosas, pH de neutro a ligeramente alcalino con contenido de materia orgánica en el horizonte, permeabilidad de moderada a lenta y buena fertilidad

#### **IV.1.5 Vegetación**

La diversidad de paisajes presentes en el estado muestra una variedad de formaciones vegetales influenciadas por el relieve, los tipos de suelos y las condiciones climáticas. El área de estudio representa un sector de transición entre las zonas más bajas cercanas a la costa y los sistemas montañosos al sur del estado Falcón; por ello, dadas las características de precipitación, temperatura y altitud, el bioclima predominante corresponde al bosque seco tropical seguido del bosque húmedo premontano, localizado hacia el noroeste del estado (SAV, 1983; Huber, 2007).

Asimismo, según la clasificación de Huber (2007), la carta 6448 está inmersa en la subregión C1 (Sistema de Colinas Lara-Falcón), y en ella se diferencian los siguientes tipos de vegetación:

- Los bosques tropófilos semi-decíduos estacionales son bosques bajos con 1 a 2 estratos arbóreos y un sotobosque relativamente denso, ubicado generalmente hacia los valles.
- Los bosques tropófilos (bajos y medios), decíduos alcanzan entre 8 y 15 m de altura y son relativamente abiertos con sotobosque denso.
- La vegetación restante corresponde con espacios que, por su potencialidad agrícola, han sido intervenidos a través de cultivos y para el aprovechamiento pecuario.

Cabe destacar que los cambios en la vegetación son indicios que señalan aspectos relevantes de la geología del área a ser considerados para la actualización cartográfica. De allí que este elemento sea importante considerarlo al momento de realizar el análisis selectivo de imágenes digitales, tomando en cuenta que resulta conveniente, para la interpretación geológica con base a esta herramienta, detectar las áreas de la superficie con cobertura vegetal escasa o ausente. De otra forma, de no detectarse suelos desnudos, es posible inferir algunas características litológicas analizando las variaciones puntuales de los grupos vegetales presentes en el área.

## IV.2 GEOLOGÍA REGIONAL

### IV.2.1 Placa tectónica del Caribe

La placa Caribe se sitúa aproximadamente entre las longitudes de 60°O y 90°O y entre las latitudes de 10°N y 20°N. Dentro del grupo de grandes placas litosféricas, la placa Caribe representa una de las de menor superficie (4.000.000 km<sup>2</sup> aproximadamente), Caribe es una región bastante compleja e intensamente deformada; sin embargo, presenta una forma aproximadamente rectangular que comprende al mar Caribe, Centroamérica y el borde norte de Suramérica, constituyendo una pequeña porción litosférica entre las placas de Norteamérica, Suramérica, Cocos y Nazca (Molnar & Sykes, 1969). Esta placa representa una región bastante compleja e intensamente deformada debido a su posición geotectónica en la región caribeña. Ocupa una extensión de aproximadamente 3000 km en dirección E-O y 800 km en dirección N-S, entre Norteamérica y Suramérica (Bachmann, 2001) (Figura 4.8).

Con base a datos de sismicidad, gravimetría, flexión litosférica, entre otros, los límites este y oeste de la placa Caribe están definidos con precisión, esto se debe a que estas zonas están representadas por zonas de subducción que alcanzan la astenósfera terrestre. Por otro lado, al norte (desde Guatemala hasta las Antillas Mayores) y al sur de la placa (en el norte de Venezuela), los límites corresponden a un sistema transpresivo sinistral y dextral respectivamente, y se extienden alrededor de 300 km. Sin embargo; estos límites, en especial el ubicado al sur, no tienen una delimitación concluyente con respecto a su placa contigua, es decir, no se comprueba la existencia de un plano de ruptura que llegue hasta la astenósfera y que represente un límite plausible entre las placas.

Según las investigaciones de Speed et al. (1991) la posición y la cinemática de los límites entre las placas Suramérica-Caribe y Norteamérica-Caribe son inciertas, principalmente en el norte de Venezuela.

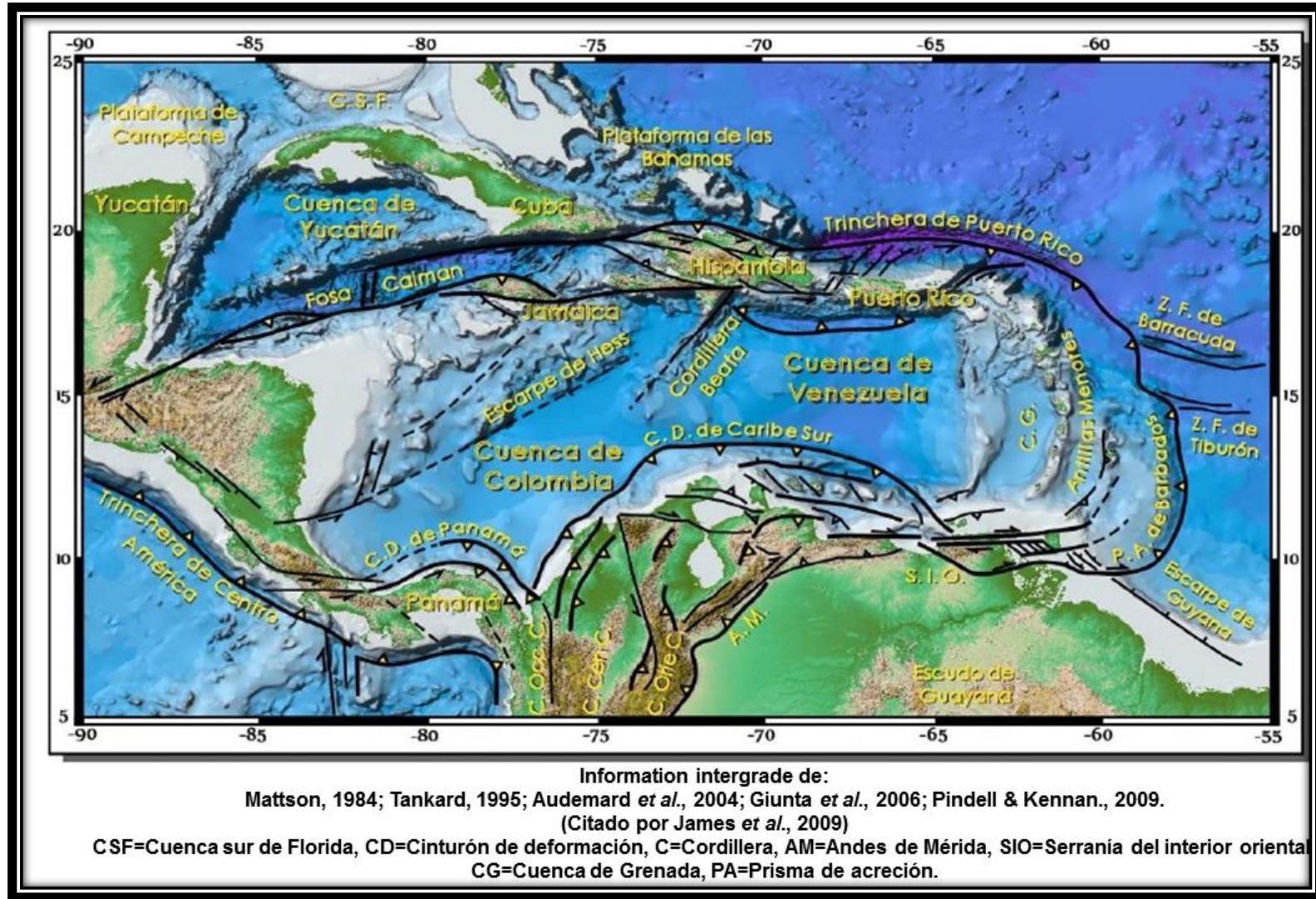


Figura 4.8. Configuración tectónica de región noreste de Suramérica-América Central y región del Caribe (Tomado de Toribio, 2012)

Además de las dificultades que existen a la hora de considerar los límites norte y sur de la placa Caribe y a pesar de los estudios geológicos y geofísicos que se han realizado en la región para intentar solventar las diferencias, existen discrepancias acerca de la evolución geodinámica de la placa Caribe. Las dos corrientes de pensamientos que explican, a través de modelos y teorías, el origen de la placa Caribe, convergen en una aseveración, y es que, el evento que originó la inundación basáltica ocurrió durante el Mesozoico Tardío.

Indistintamente de estas teorías de pensamiento desarrollado por diversos autores (Pindell & Barret, 1990; Pindell & Kenann, 2001; Pindell *et al.*, 2005) sobre el origen de la Placa Caribe, es importante destacar que, entre los elementos tectónicos presentes en la región, se encuentran un conjunto de cuencas y subcuencas limitadas por elementos positivos. Los elementos regionales más relevantes son:

- Hacia el norte: El alto de Paraguaná, el conjunto de altos o islas (Aruba, Bonaire y Curazao) y el alto del archipiélago de las Aves.
- Hacia el este: El alto de Guachara y el alto de Cerro Misión.
- Zona central: El alto de Coro.

Las depresiones que fueron controladas por estos altos estructurales son: las cuencas de Aruba, Curazao, Bonaire, Urumaco, Paraguaná y Falcón, esta última la de interés para esta investigación con sus subcuencas sociadas: Agua Salada, el Tocuyo, Casupal (dentro del área de estudio) y también la Ensenada de La Vela (Audemard, 1993) (Figura 4.9).

## **IV 2.2 Cuenca de Falcón**

La cuenca de Falcón es el elemento estructural más importante en el área de estudio, esta se ubica al noreste de la cuenca de Maracaibo en Venezuela noroccidental. Abarca una extensión geográfica de aproximadamente 36.000 km<sup>2</sup> y un volumen de sedimentos de 160.000 km<sup>3</sup>. Posee su mayor longitud entre La Victoria y Boca Tocuyo,

cerca de 320 km, y su mayor anchura se ubica entre la ensenada de La Vela de Coro y Churuguara, alcanzando unos 100 km. (Gonzales De Juana *et al*, 1980). Ésta, al igual que las demás cuencas señaladas, registra una sedimentación de estratos del Cenozoico. La cuenca abarca toda la región central de lo que en la actualidad conforma al estado Falcón.

La cuenca de Falcón limita al norte con las islas de las Antillas Holandesas y las islas venezolanas de Las Aves, Los Roques y La Orchila; al sur con las regiones elevadas de la Plataforma de La Guaira y la Cordillera de La Costa y hacia el este, un alto del basamento, que parece ser la prolongación sur de La Orchila, la separa de la cuenca de La Blanquilla. (Porrás, 2000).

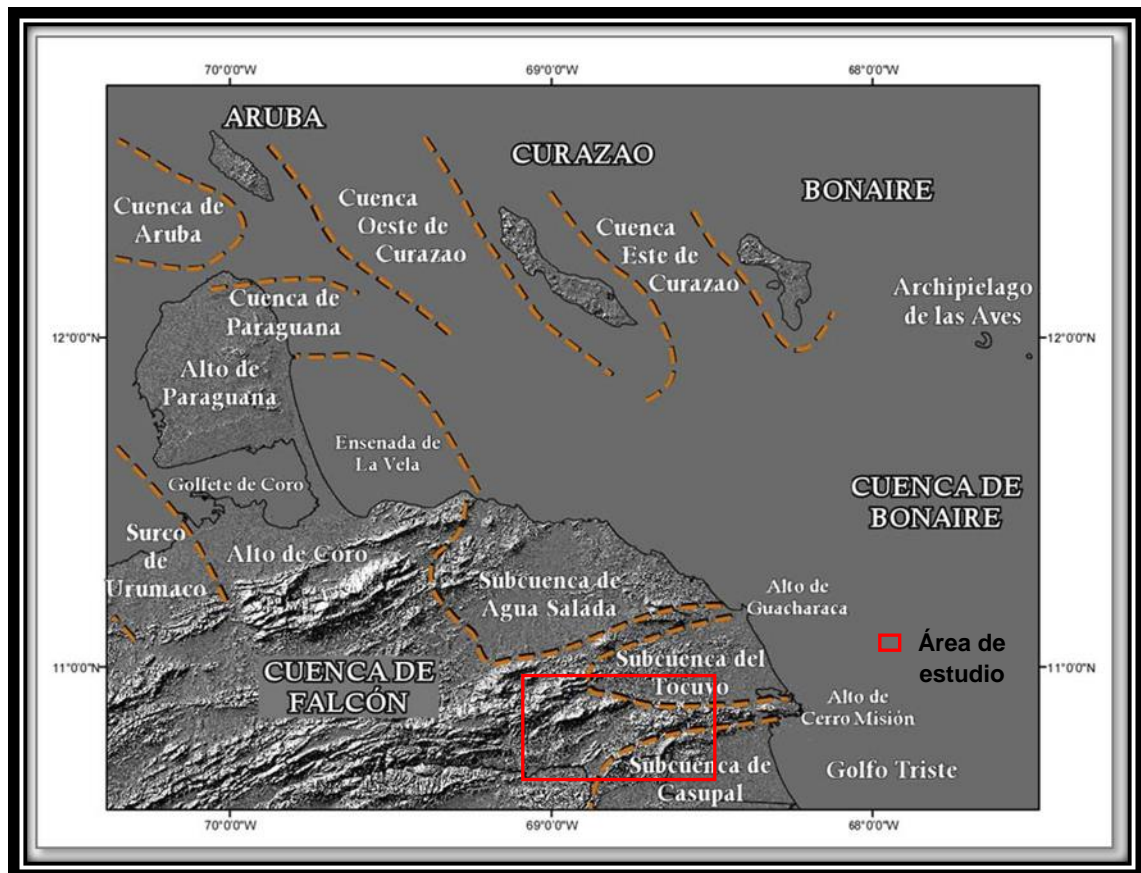


Figura 4.9 Mapa de configuración tectónica y elementos estructurales, en el área de Falcón oriental, Costa Afuera y Antillas Holandesas. (Tomado y modificado: Toribio, 2012).

#### IV 2.2.1 Modelos de evolución de la cuenca de Falcón

En cuanto a los modelos de evolución, la cuenca de Falcón presenta disyuntivas, debido a la diversidad de teorías que se han presentado desde el principio del siglo XX, periodo en el cual comienza la exploración petrolera en esa región (Figuras 4.10 y 4.11). Entre las hipótesis planteadas se tienen las siguientes:

- Muessig (1984): Señala que la cuenca de Falcón se originó en el Cenozoico como consecuencia de efectos transtensionales relacionados con fallas transcurrentes como las Fallas de Oca y San Sebastián.
- Macellari (1995): Postuló que la cuenca evolucionó a partir de desplazamientos laterales durante el Eoceno originando una serie de cuencas *pull apart* episuturales.

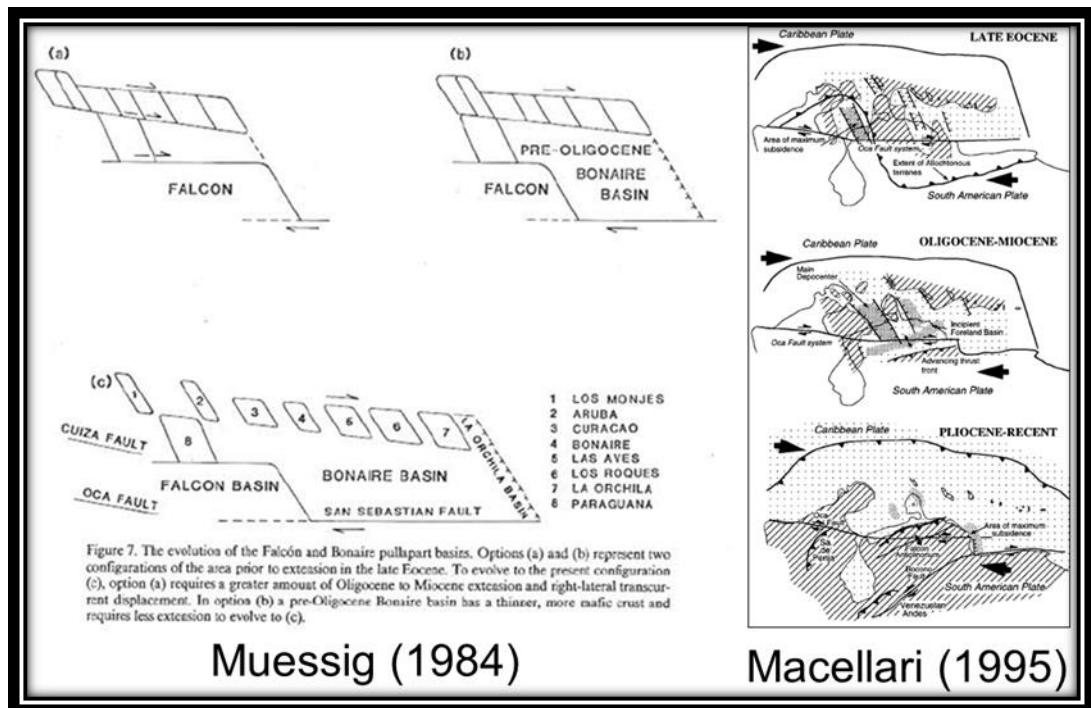


Figura 4.10. Modelos de evolución para la cuenca de Falcón propuesto por Muessig (1984) y Macellari (1995) (Tomado de Muessig, 1984 y Macellari, 1995).

- Audemard (1995): Atribuye el origen de la cuenca a una fase rifting de edad Eoceno Tardío-Oligoceno generalizada en todo el margen septentrional venezolano.
- Porras (2000): Razona que el origen de la cuenca Falcón-Bonaire está vinculado a colapsos extensionales internos dentro de una cuenca detrás de arco (*back arc*), en un orógeno en flotación que colisionó oblicuamente con el extremo noroccidental de la placa suramericana, suturándose diacrónicamente de oeste a este desde el Cretácico Tardío hasta comienzo del Mioceno temprano.

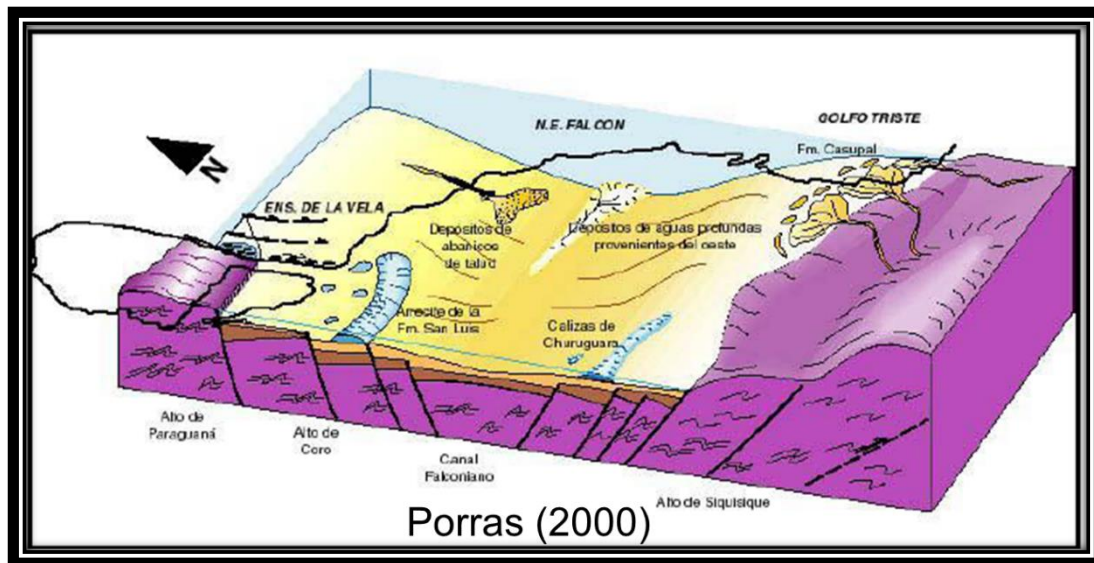


Figura 4.11. Modelos de evolución para la cuenca de Falcón propuesto por Porras (2000) (Tomado de Porras, 2000).

#### IV 2.2.2 Configuración estratigráfica de la cuenca de Falcón

La configuración estratigráfica de los depósitos que rellenan la cuenca de Falcón durante su formación es compleja, pues las facies depositacionales cambian drásticamente, tanto vertical como lateralmente (Carnevali *et al.*, 2000 citado por Toribio, 2012). Esto origina amplias descripciones de las unidades litoestratigráficas reconocidas en afloramientos y en pozos, y en consecuencia abundantes unidades formacionales son indeterminadas (Figura 4.12).

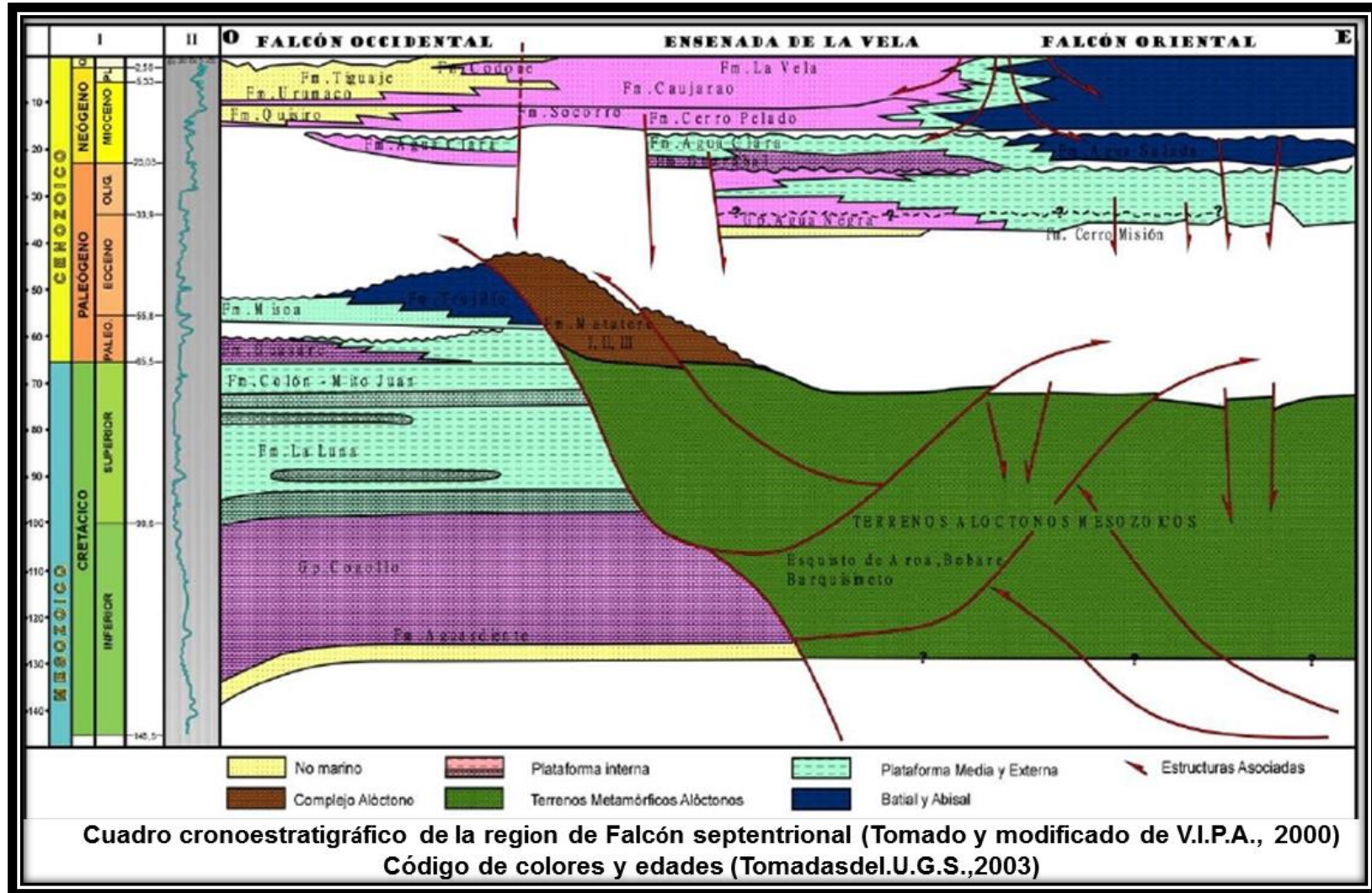


Figura 4.12. Cuadro cronoestratigráfico de la región de Falcón septentrional (Tomado de Toribio, 2012)

Los primeros sedimentos depositados en la cuenca se distribuyeron sobre un ambiente de aguas someras. Estos pertenecen a la Formación Cerro Misión ubicadas al sureste de la cuenca. Sobre las anteriores rocas se encuentra la secuencia estratigráfica Oligoceno-Mioceno Inferior (Boesis & Goddar, 1991). Este período se caracterizó por una continua subsidencia y una invasión progresiva del mar desde el noreste. Díaz De Gamero (1977) menciona que las rocas Oligocenas, a diferencia de las más antiguas, afloran extensamente en el centro de la cuenca de Falcón, en una ancha franja de dirección N70°E entre la Sierra de San Luis y Churuguara (Figura 4.13).

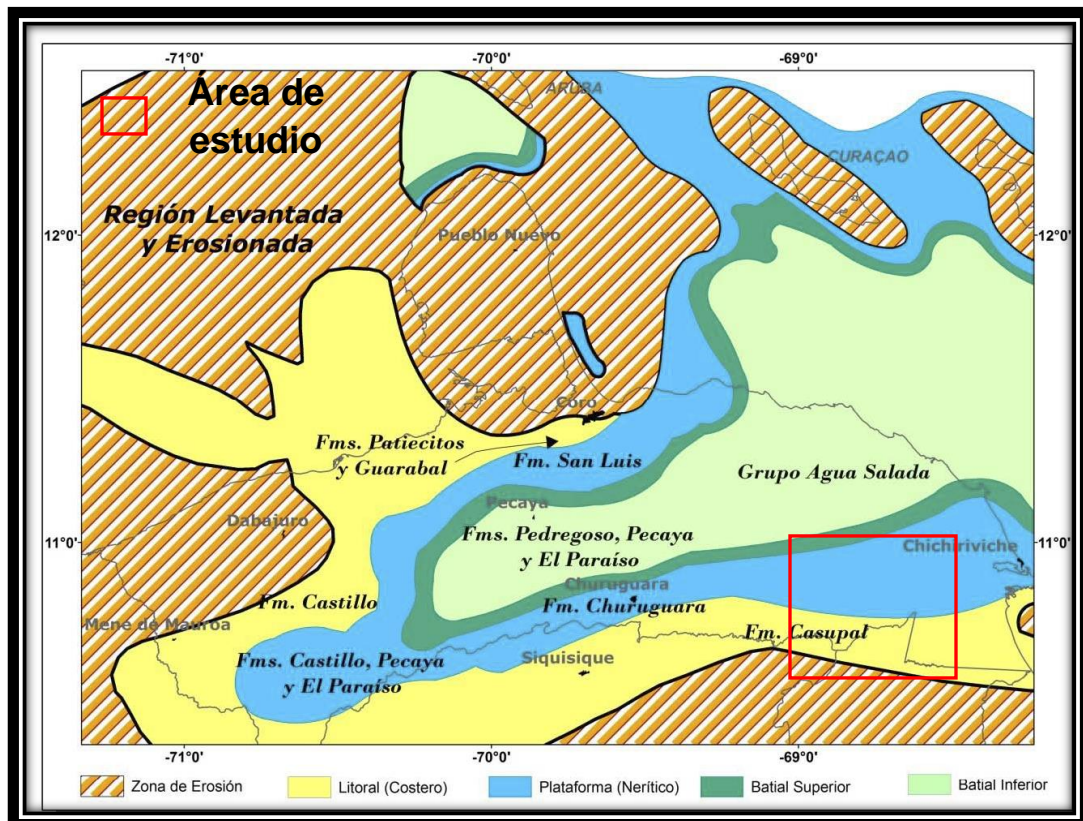


Figura 4.13. Mapa paleogeográfico correspondiente al Oligoceno en la región de interés.

(Tomado de Toribio, 2012).

A Finales de Mioceno Temprano, ocurre un cambio significativo en la paleogeografía de la cuenca de Falcón, el cual está representado por la disminución en la paleobatimetría que evidencia un levantamiento generalizado al sur y oeste (Díaz De

Gamero, 1985). Por su parte, Macellari (1995) menciona que después de este evento se renovó la subsidencia iniciando un nuevo ciclo de sedimentación, el cual es el primero que cubrió por entero la cuenca incluyendo relieve topográfico como la plataforma de Dabajuro y la Península de Paraguaná (Figura 4.14).

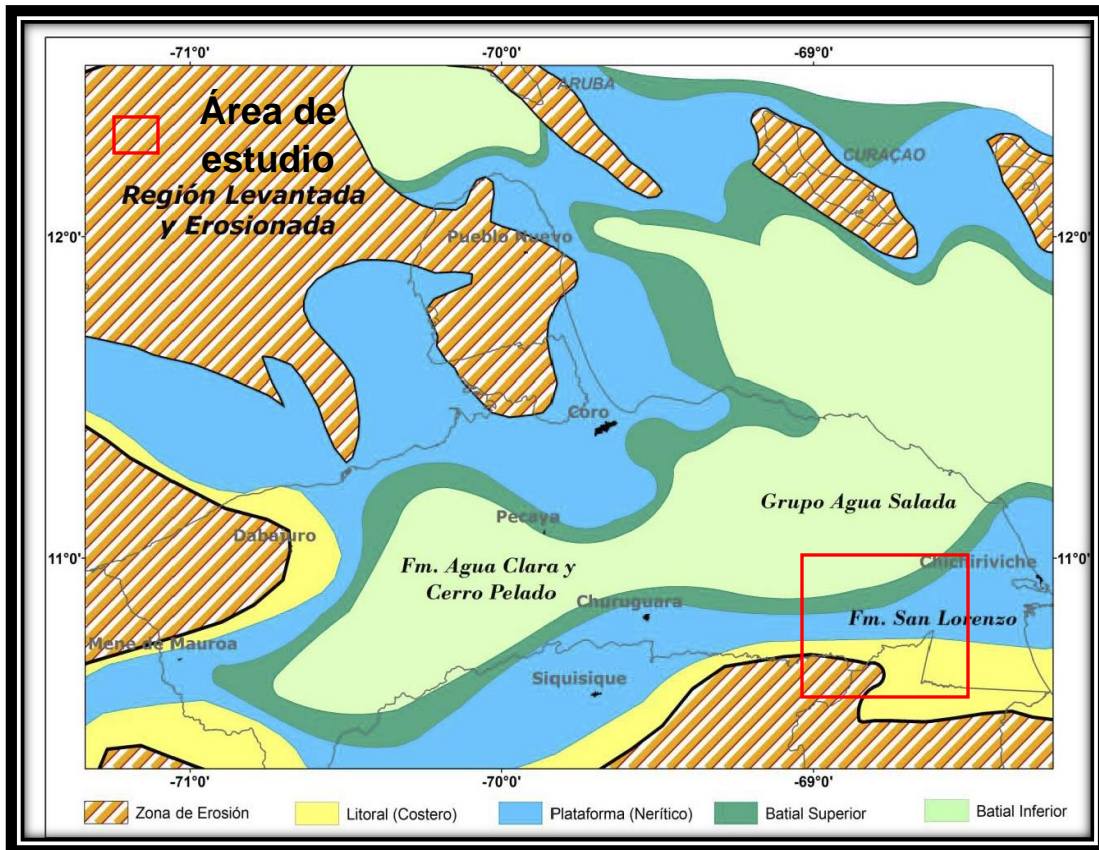


Figura 4.14. Mapa paleogeográfico correspondiente al Mioceno Temprano en la región de interés.  
(Tomado de Toribio, 2012).

La depositación asociada al Mioceno medio se va haciendo regresiva en un contexto regional. Estos depósitos son en general marino somero con influencia continental al norte de Falcón, mientras que al este su tendencia permanece netamente marina (González De Juana *et al.*, 1980 citado por Toribio, 2012) (Figura 4.15).

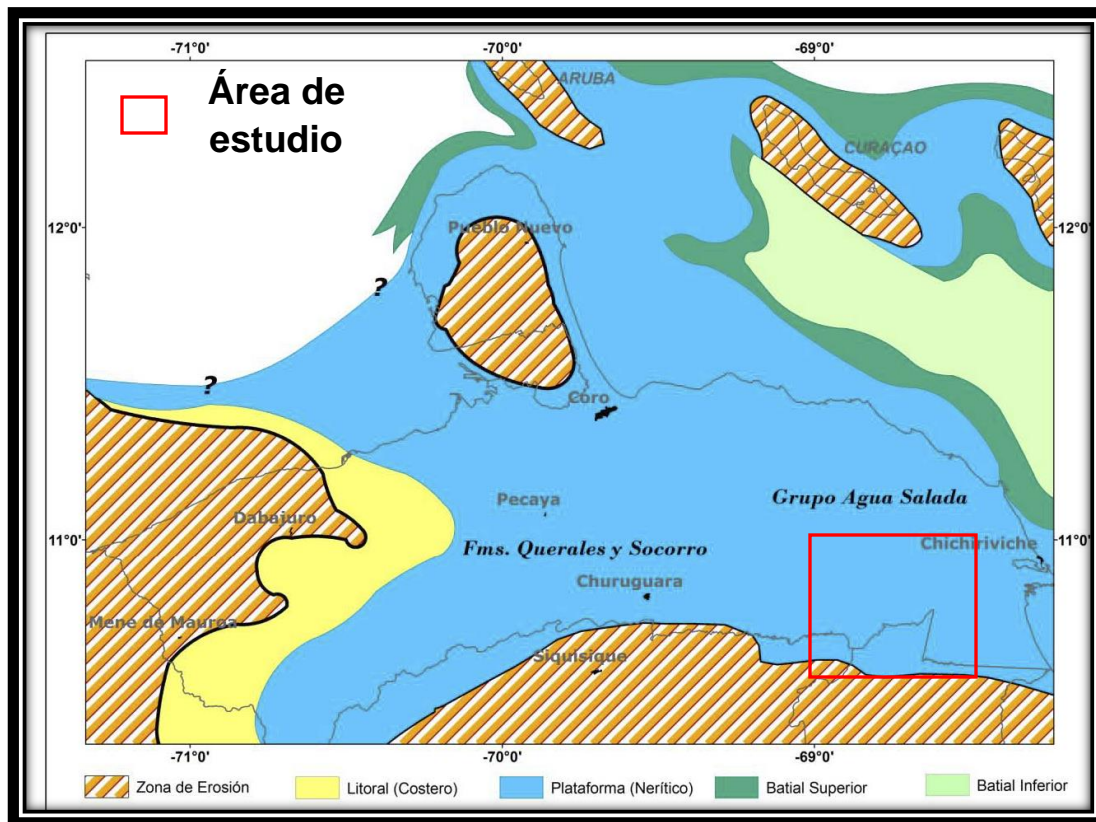


Figura 4.15 Mapa paleogeográfico correspondiente al Mioceno Medio en la región de interés.  
(Tomado de Toribio, 2012).

A partir del Mioceno Tardío la sedimentación estuvo restringida exclusivamente al flanco norte del anticlinorio de Falcón: Los ambientes sedimentarios se fueron haciendo progresivamente menos marinos y cada vez más continentales, tanto en forma vertical como lateral. El estudio tectónico y las síntesis críticas de los datos estratigráficos de la cuenca de Falcón han puesto en manifiesto la existencia de una evolución polifásica durante el Cenozoico. (Audemard, 1993). (Figura 4.16)

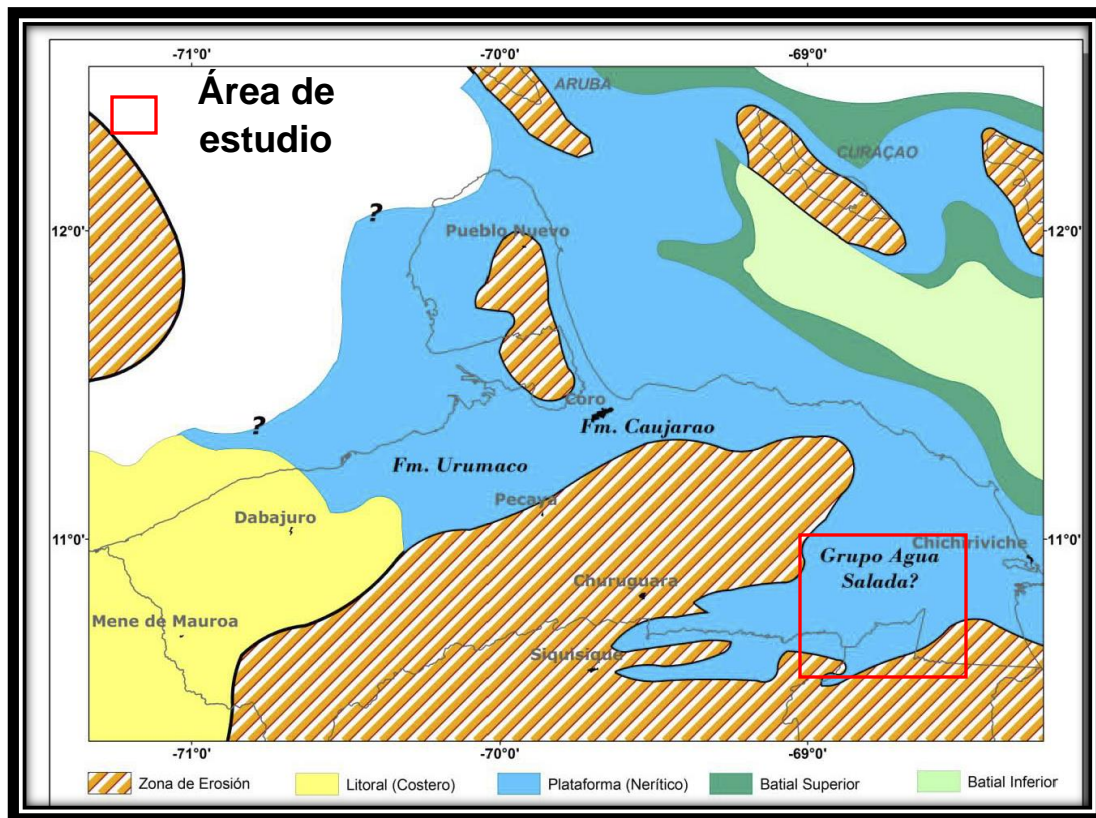


Figura 4.16. Mapa paleogeográfico correspondiente al Mioceno Tardío en la región de interés.  
(Tomado de Toribio, 2012).

Audemard (1995) menciona que en el límite Mioceno-Plioceno una nueva fase compresiva vuelve a afectar la cuenca de Falcón, siendo esta fase la responsable de la discordancia que separa a las formaciones superiores del Grupo La Puerta, Codore y El Veral de las formaciones inferiores del Grupo La Puerta, Urumaco y Caujarao.-Este conjunto es globalmente menos marino que el precedente. Finalmente, el mismo autor menciona que “el conjunto Plioceno-Cuaternario es excepcionalmente continental”, exceptuando las zonas actualmente sumergidas parcial o totalmente durante los máximos marinos interglaciares. Por ende, este conjunto está compuesto por depósitos continentales, restringidos a la plataforma de Dabajuro y al sector norcentral del estado Falcón y por depósitos marinos asociados a la costa actual y a la península de Paraguaná” (Figura 4.17).

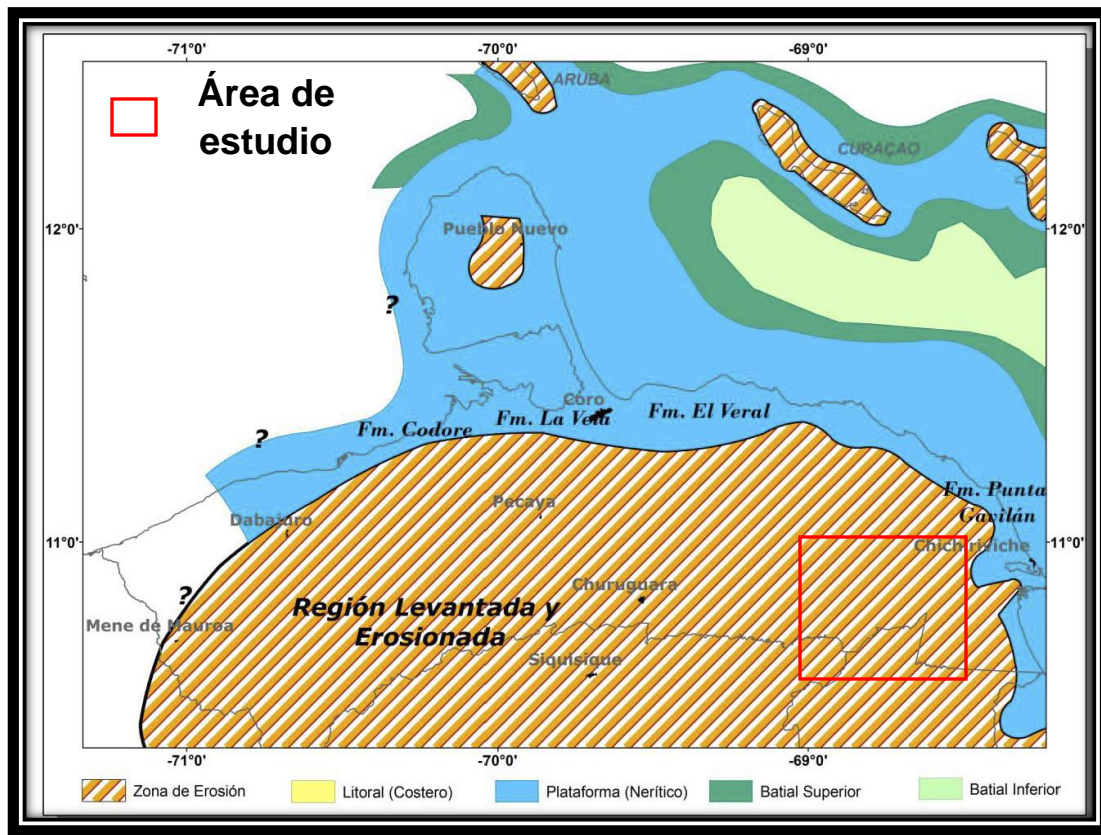


Figura 4.17. Mapa paleogeográfico correspondiente al Plioceno en la región de interés.  
(Tomado de Toribio, 2012).

### IV.2.3 Estratigrafía local

La litología aflorante en la zona de estudio corresponde a: Macizo ígneo metamórfico, rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados.

#### IV.2.3.1 Macizos ígneos-metamórficos.

Los macizos ígneos-metamórficos se encuentran hacia el sureste de la zona de estudio en el límite entre los estados Falcón y Yaracuy. Según Lozano & Mussari (2007), las rocas ígneo-metamórficas aflorantes en la zona pertenecen al complejo orográfico de la región norte costera del país, que está formado por una superposición de napas. Diversos autores (Bellizzia & Rodríguez, 1976, Urbani et al, 2007 y Lozano

& Mussari, 2007) han estudiado esta unidad (Figura 4.18 y tabla 4.6) convergiendo en lo siguiente:

- En el macizo Tarana (A) se encuentra la unidad Esquisto de Aroa, correspondiente a la Napa Caracas debido a la similitud del Esquisto de Aroa con el Esquisto de Las Mercedes de la Asociación Metasedimentaria Caracas.
- En el macizo San Quintín (B) se encuentran las unidades Meta-gabro anortosítico de Yumare y Metavolcánicas de San Quintín.
- En los macizos La Zurda (C) y Salsipuede (D) se encuentra la unidad Metagabro anortosítico de Yumare, Estos dos últimos cerros fueron interpretados como correspondientes a la Napa Caucagua-El Tinaco-Yumare-Siquisique, llamado así por Bellizzia y Rodríguez (1976).

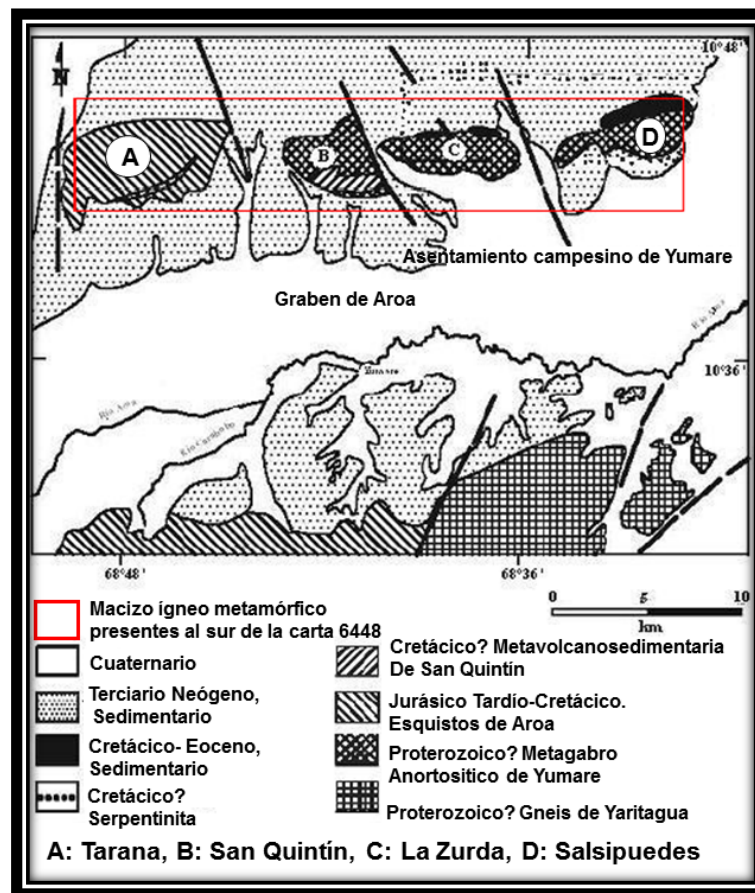


Figura 4.18 Mapa geológico de la zona de Yumare (Tomado de Urbani *et al.*, 2007)

Tabla 4.6. Unidades ígneo-metamórficas (Tomado de Lozano & Mussari, 2007).

Edad	Litología		Unidad
Cretácico	En el macizo Tarana aflora un cuerpo de serpentinita, emplazado tectónicamente dentro del esquistos de Aroa, cuya mineralogía representativa es antigorita + ortopiroxeno + crisotilo + talco ± magnetita y su protolito es roca ultramáfica.		Serpentinita
	Secuencia de esquistos carbonáticos grafitosos, filita grafitosa, esquistos cuarzo-micáceo grafitoso, caliza laminada, caliza maciza y horizontes de esquistos verde, estos últimos compuestos por zoisita, clinozoisita, epidoto, feldespatos, actinolita, clorita, calcita y cuarzo.		Esquistos de Aroa
Jurásico Tardío-Cretácico	La unidad comprende un conjunto de rocas volcánicas máficas débilmente metamorizadas y una secuencia metasedimentaria de metarenisca, metalimolita, filita y escasos metaconglomerados.		Complejo San Quintín
Precámbrico (Proterozoico tardío?)	San Quintín	Rocas félsicas: metatrandhjemita y metaanortosita, rocas máficas: metagabro, metamonzogabro y meta-cuarzo-gabro y rocas ultramáficas: metahornblendita.	Complejo Yumare
	La Zurda	Rocas félsicas: metagranodiorita, metamonzonita, metamonzogranito, metagranito microclínico y metaleucogranito microclínico, rocas máficas: metagabro, meta-cuarzo-gabro, metamonzogabro y meta-cuarzo-monzogabro y rocas ultramáficas: metaclinopiroxenita.	
	Salsipuede	Rocas cuarzo feldespáticas: esquistos cuarzo-feldespático-micáceo, rocas félsicas: metatrandhjemita y metatonalita y rocas máficas: metagabro y gneis hornbléndicoepidótico.	

#### IV.2.3.1 Rocas sedimentarias

Respecto a las rocas sedimentarias, según la tabla de correlación mostrada por la Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología CVET, (1970), corresponde a la secuencia estratigráfica Mene de Acosta y Agua Linda de edad Eoceno-Mioceno. (Figura 4.19) Es importante resaltar que la secuencia estratigráfica de la sección Agua Linda aflora completamente en la zona de estudio. La misma está distribuido en la Hoja 6448 en dirección preferencial OSO-ENE. Por su parte, la secuencia Mene de Acosta no aflora completamente debido a que su depositación geográfica se encuentra al norte de Falcón Oriental.

Mene de Acosta		Agua Linda	Época		
			TARDÍO	P L I O C E N O	
			TEMPRANO		
OJO DE AGUA			TARDÍO	M I O C E N O	
GRUPO AGUA SALADA	P O N O N	HUSO			
		HUSITO			
		POLICARPIO	CAPADARE		MEDIO
	SAN LORENZO	MENECITO	AGUA LINDA		
	EL SALTO	CASUPAL	TEMPRANO		
	GUACHARACA		TARDÍO	O L I G O C E N O	
			MEDIO		
			TEMPRANO		
	CERRO MISIÓN ?		TARDÍO	E O C E N O	
			MEDIO		

Figura 4.19 Tabla de correlación correspondiente a la secuencia Agua Linda y Mene de Acosta  
 (Tomado de Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología CVET, 1970))

A continuación, se describe la litología presente en el área de estudio tomando en consideración edad, unidades litoestratigráficas, litología y espesor, ambientes sedimentarios, localidad tipo, correlación y contactos.

Tabla 4.7. Descripción de las rocas sedimentarias presente en el área de estudio


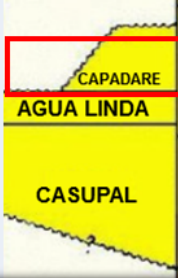
ÉPOCA	UNIDADES	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO TARDIO	OJO DE AGUA	Renz (1956). La Formación consiste predominantemente de areniscas micáceas interestratificadas con arcillas, conglomerados, calizas arenosas y nodulares, con ostras y otros moluscos. El mismo autor define el espesor de la formación entre un rango de 1 y 200 m.	La Formación se depositó en aguas salobres a marinas muy someras, no lejos de la costa (Renz, 1956). 	La localidad tipo se encuentra en el cerro Ojo de Agua de Pozón, distrito Acosta, estado Falcón y la sección tipo se encuentra en la continuación hacia el sur de Loma Luca, sección tipo de la Formación Pozón (Renz, 1956). Hoja de Cartografía Nacional N° 6448, escala 1:100.000.	Renz (1948) la correlaciona con la Formación La Vela de Falcón central, pero, por su edad, parece más bien corresponder a la parte superior de la Formación Caujarao. La Formación Ojo de Agua se encuentra en contacto concordante con la Formación Pozón infrayacente, estando el contacto entre las dos formaciones a nivel de la base de la primera arena masiva. Hacia el oeste del anticlinal de Pozón-El Mene de Acosta, la Formación se interdigita con las arcillas del Miembro Huso (Formación Pozón), hasta reemplazarlas totalmente. Hacia el este ocurre al contrario, pues las arcillas del Miembro Huso se interdigitan con la Formación Ojo de Agua, hasta reemplazarla (Renz, 1948 y 1956).
MIOCENO MEDIO	CAPADARE	Diaz De Gamero (1985) describe la caliza de Capadare en los cerros Capadare, Mirimire y Jacura como de color claro, compuesta mayormente por algas, con foraminíferos y fragmentos bioclásticos diversos. Diaz De Gamero (1985) reporta espesores variables entre 150 y 300 m. Se ha medido un espesor de 144 m en el cerro Chichiriviche (Lamus <i>et al.</i> , 1989). Más hacia el oeste en los cerros Agua Linda, Riecito y Misión se reportan 135 m (Senn, 1935).	Diaz De Gamero (1985) deduce que las calizas son el resultado de desarrollos carbonáticos aislados, sin influencia de la costa y del continente, en condiciones de mar completamente abierto, de aguas claras y energía moderada, bien oxigenadas, en un clima tropical.	La formación tiene su localidad tipo en el cerro Capadare, distrito Acosta del estado Falcón, 	La Formación Capadare se correlaciona cronoestratigráficamente con el Miembro de Arcillas de Huso de la Formación Pozón (Renz, 1948). Diaz De Gamero (1985) la correlaciona con la Formación Socorro de Falcón norcentral. El contacto inferior es discordante con las formaciones Casupal y Agua Linda. Diaz De Gamero (1985) reporta contacto transicional de lutitas moderadamente calcáreas a muy calcáreas y calizas en varias localidades al este del río Hueque. Gonzalez De Juana <i>et al.</i> (1980) mencionan que el contacto superior, con la Formación Capadare es concordante y transicional diacrónico.

Tabla 4.7. Continuación Descripción de las rocas sedimentarias presente en el área de estudio


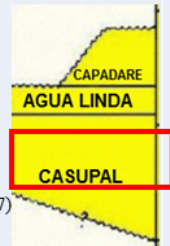
ÉPOCA	UNIDADES	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO MEDIO	AGUA LINDA	La Formación Agua Linda consiste en una intercalación de arcillas, lutitas y calizas con menor proporción de conglomerados calcáreos, areniscas calcáreas y limolitas. Las lutitas y arcillas que constituyen la mayor parte de la formación, son calcáreas, limosas o arenosas, de color gris verdoso a gris azulado, micáceas y/o yesíferas, incluyendo concreciones, restos de plantas y conchas pequeñas; frecuentemente tienen olor a petróleo. Méndez (1967) indica un espesor de 1295 m, valor estimado ya que en la sección tipo no aflora la base ni el tope.	La Formación Agua Linda representa ambientes marinos similares a los de la Formación Pozón, pero menos profundos y más cercanos a la costa. En tanto el ambiente de la Formación Casupal infrayacente, es de carácter más continental e indica una transgresión marina durante el Mioceno Medio, hacia el borde sur de la subcuenca de Casupal (González De Juana <i>et al.</i> , 1980).	Méndez (1967) propuso como sección tipo, la que aflora en la quebrada El Silencio, tributaria del río Guachipano, a 2 km al este de la confluencia de dicho río con el río Los Cumarebos, donde se origina el río Agua Linda, al sur de cerro Misión, distrito Silva, estado Falcón. Hoja 6448, esc. 1:100.000, Cartografía Nacional.	Méndez (1967) correlaciona la Formación Agua Linda con el Miembro Husito de la Formación Pozón de la cuenca de Agua Salada.  La Formación Agua Linda yace concordantemente sobre la Formación Casupal, aunque el contacto no es visible en la sección tipo, sino en las tributarias del lado sur de la quebrada Casupal, al este de dicha sección. En el tope, la formación está cubierta discordantemente por la Formación Capadare.  
MIOCENO MEDIO-TEMPRANO	CASUPAL	Wheeler (1960, 1963) indica que la Formación Casupal en su área tipo se divide en dos miembros: el inferior se caracteriza por la predominancia de areniscas de grano fino y arcillas, la presencia de material carbonoso y por la estratificación en capas delgadas a medias. El miembro superior contiene areniscas de grano grueso y conglomerados, menos material carbonoso, ausencia de carbones y estratificación en capas masivas.	Los sedimentos de la Formación Casupal representan una facies de sedimentación piemontina costera con influencia marina litoral restringida (González De Juana, <i>et al.</i> , 1980).	Región al norte del rancho Casupal, en la confluencia de los ríos Guachipano y Los Cumarebos, al sur del cerro Misión, distrito Silva del estado Falcón, Méndez (1967)  	Wheeler (1960, 1963) detalla extensamente la equivalencia de la Formación Casupal con la parte inferior de las Formaciones Churuguara y El Paraíso al noroeste del área tipo de la Formación, pero esto no parece concordar con la determinación de edad de Méndez (1967). Wheeler (1960, 1963) anota que el contacto inferior se desconoce en la localidad tipo, pero que más al sur la Formación Casupal yace discordantemente sobre rocas eocenas.

Tabla 4.7. Continuación Descripción de las rocas sedimentarias presente en el área de estudio

ÉPOCA	UNIDADES	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO MEDIO-TARDIO	POZÓN	<p>Renz, (1948) describe a la Formación Pozón de la siguiente manera:                      El Miembro Policarpio está compuesto de arcillas fosilíferas mal estratificadas; arcillas margosas y arenas glauconíticas, con concreciones ferruginosas y de marga blanca. Por su parte el Miembro Husito está compuesto por arcillas margosas de color gris pardo a marrón chocolate, intercaladas con abundantes margas de foraminíferos, más frecuentes hacia arriba, y un horizonte de concreciones de marga consolidada blanca y amarilla. Toda la sección contiene granos diseminados de glauconita.                      Finalmente, el Miembro Huso está compuesto de arcillas no calcáreas que meteorizan a gris y rojo, con intercalaciones de margas y arcillas calcáreas amarillas, con lentejones delgados de arena calcárea de grano fino hacia el tope.</p>	<p>Mendoza (2005) describe lo siguiente:                      En el Miembro Huso los primeros 160 m de la sección corresponde a la Zona de <i>Rubulus semi</i> de ambiente litoral-nerítico de unos 100 m. de profundidad; sigue la disminución de la profundidad del mar con la Zona de <i>Textularia paramensis</i> que se desarrolla en aguas marinas de menos de 50 metros de profundidad y los 50 m. superiores se acumularon en aguas muy poco profundas cercanas a la costa, de condiciones marinas a lagunares.                      El Miembro Husito fue depositado en condiciones marinas abiertas plataformales.                      El Miembro Policarpio es de ambientes marinos plataformales, ligeramente profundos.</p>	<p>Entre la estación trigonométrica de Pozón y el cerro Ojo de Agua, en dirección norte-sur, a lo largo de la vertiente de la Loma Luca, entre afluentes de la quebrada Agua Salada, al oeste, y de la quebrada Araguata, al este. Hoja de Cartografía Nacional N° 6448, a escala 1:100.000.</p>	<p>La Formación Pozón es concordante con la suprayacente Formación Ojo de Agua y con la infrayacente Formación San Lorenzo (Mendoza, 2005).</p>



Tabla 4.7. Continuación Descripción de las rocas sedimentarias presente en el área de estudio

ÉPOCA	UNIDADES	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO MEDIO-TEMPRANO	SAN LORENZO	Renz (1948) describe la litología de la Formación San Lorenzo de la siguiente manera: El Miembro El Salto está formado por capas lenticulares de areniscas, localmente glauconíticas, de hasta 10 m de espesor intercalados con arcillitas limosas y limolitas de color gris azulado. Tiene un espesor de 262 m. Por su parte el Miembro Menecito está constituido por una secuencia de arcillitas grises, arcillitas glauconíticas verdosas y margosas con yeso selenita distribuido en toda la secuencia. Su espesor es de 138 m.	Díaz de Gamero (1985) interpreta las areniscas del Miembro El Salto como relacionadas con el rápido avance de un delta digitado, en un área de aguas relativamente profundas. El ambiente del Miembro Menecito varía de marino abierto a plataforma a evaporítico. (Mendoza, 2005)	Según Renz (1948) la localidad y sección tipo de la Formación San Lorenzo se encuentra en el pozo El Mene N 47	La Formación San Lorenzo es concordante y transicional sobre la Formación Guacharaca e infrayace a la Formación Pozón. El contacto entre los dos miembros El Salto y Menecito es concordante, Blow (1959).
OLIGOCENO	GUACHARACA	La Formación Guacharaca se compone de una zona superior de areniscas glauconíticas de 1,5 m. a 6 m. de espesor conocidas como Arenas de Guayabal-La Danta Suter (1947), Por su parte Wheeler (1960) menciona que, al norte del alto de Guacharaca la formación consiste, de base a tope, de lutitas y arcillas con frecuentes interestratificaciones de capas delgadas de arenisca de grano fino (Miembro La Danta), seguidas de margas (Miembro Tucurere) y arcillas (Miembro Cotiza)	Ambientes relativamente profundos con esporádicos aportes de clásticos (Renz, 1948).	Alto de Guacharaca, flanco sur, distrito Acosta, Falcón Oriental Renz (1948).	Las relaciones estratigráficas según Renz (1948) son de concordancia, tanto en su base como en su tope. De acuerdo a Wheeler (1960, 1963), el contacto inferior es de discordancia con la Formación Cerro Misión, del Eoceno, aunque esta relación no es evidente en campo. Wheeler (1960) correlaciona la Formación Guacharaca con las formaciones El Paraíso y Pecaya de Falcón central, en lo que coincide Díaz De Gamero (1985); se correlaciona asimismo con la Formación Churuguara del borde sur de la cuenca.



Tabla 4.7. Continuación Descripción de las rocas sedimentarias presente en el área de estudio

ÉPOCA	UNIDADES	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
EOCENO	CERRO MISIÓN	La Formación Cerro Misión consiste de lutitas calcáreas, de color gris oscuro cuyo espesor supera los 400 m. Renz (1948). Por su parte, Hunter (1972), asevera que es una lutita marina de color gris oscuro, calcárea, ricamente microfosilífera.	La microfauna béntica reportada por Camacho <i>et al.</i> (1989) es indicativa de profundidades batiales.	<p>Cerro Misión, distrito Silva, estado Falcón.</p>	<p>Wheeler (1960, 1963) correlaciona esta unidad, con la Formación Jarillal del grupo Agua Negra de Falcón sur central. Según Renz (1948), la sección sedimentaria del Terciario en Falcón oriental comienza con la Formación Cerro Misión (u otras formaciones equivalentes), que parece suprayacer transgresivamente sobre formaciones más antiguas de edad desconocida.</p> <p>El mismo autor (Renz, 1959), dice que la base de Cerro Misión no está expuesta y que dicha formación, grada concordantemente hacia arriba a la Formación Guacharaca. El contacto inferior se desconoce en su localidad tipo. Hunter (1972), en un estudio efectuado en el alto de Esperanza-Guacharaca, lo coloca como discordante encima de una secuencia flysch de edad Eoceno Medio. Suter (1947) considera el contacto superior con la Formación Guacharaca como discordante, al igual que Wheeler (1960, 1963).</p>

#### IV.2.3.3 Sedimentos no consolidados

Gran parte del área está cubierta por sedimentos granulares sueltos, que comprenden aluvión reciente, aluvión antiguo, terrazas y depósitos piemontinos. El primero, compuesto de gravas, arenas, limos y arcillas, se restringe a las zonas inundables topográficamente bajas que ocupan las partes centrales a lo largo de los valles. El aluvión antiguo tiene composición litológica similar y cubre la mayor parte del área de los valles. Los depósitos de terrazas, diseminados en los topes de pequeñas colinas o en las partes altas de las laderas, consisten en gravas gruesas mal escogidas con cantidades variables de arena, limo y arcilla, a veces débilmente estratificadas. Los depósitos piemontinos, peñones, gravas, arenas, limos, arcillas, ocasionalmente con débil estratificación, se distribuyen irregularmente en las laderas de las colinas (Bellizzia & Rodríguez, 1976).

## CAPITULO V

### RESULTADOS

Los resultados alcanzados en esta investigación correspondieron a la preparación e incorporación de la data en el SIG y *software* de procesamiento digital de imágenes, desarrollados en dos etapas simultáneas. La primera consistió en la digitalización, vectorización e interpretación de data espacial, elaboración de base de datos atributiva e integración de base de datos espacial y atributiva en el SIG. Por su parte, la segunda etapa consistió en el tratamiento de imágenes de percepción remota. En la cual en cada una de las fases de forma individual o integrada se identificaron y delinearón todos los rasgos geológicos de importancia, lo que conlleva a la actualización geológica del área de estudio.

#### V.1 DIGITALIZACIÓN, VECTORIZACIÓN, INTERPRETACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA DATA ESPACIAL

Los resultados obtenidos consistieron en la digitalización, vectorización e interpretación de 16 cartas a escala 1:25.000 correspondiente a la Hoja 6448. Partiendo de lo anterior; se procedió a la elaboración de modelos digitales y capas temáticas complementarias creando los primeros subproductos geológicos.

A continuación se describen cada uno de los resultados obtenidos en esta etapa.

##### V.1.1 Mapa topográfico digitalizado

Es el primer producto obtenido y el primordial en los demás procesos y generación de los posteriores resultados (Figura 5.1). Con la ayuda de este producto se procedió a analizar el comportamiento del relieve, estructuras y litología presente en la zona de estudio. Dicho análisis, se realizó mediante la interpretación y comportamiento de las curvas de nivel (altura, uniformidad, curvas principales, inferidas, de depresión,

entre otros) y del drenaje (forma de los arroyos, densidad de la red y uniformidad de la misma).

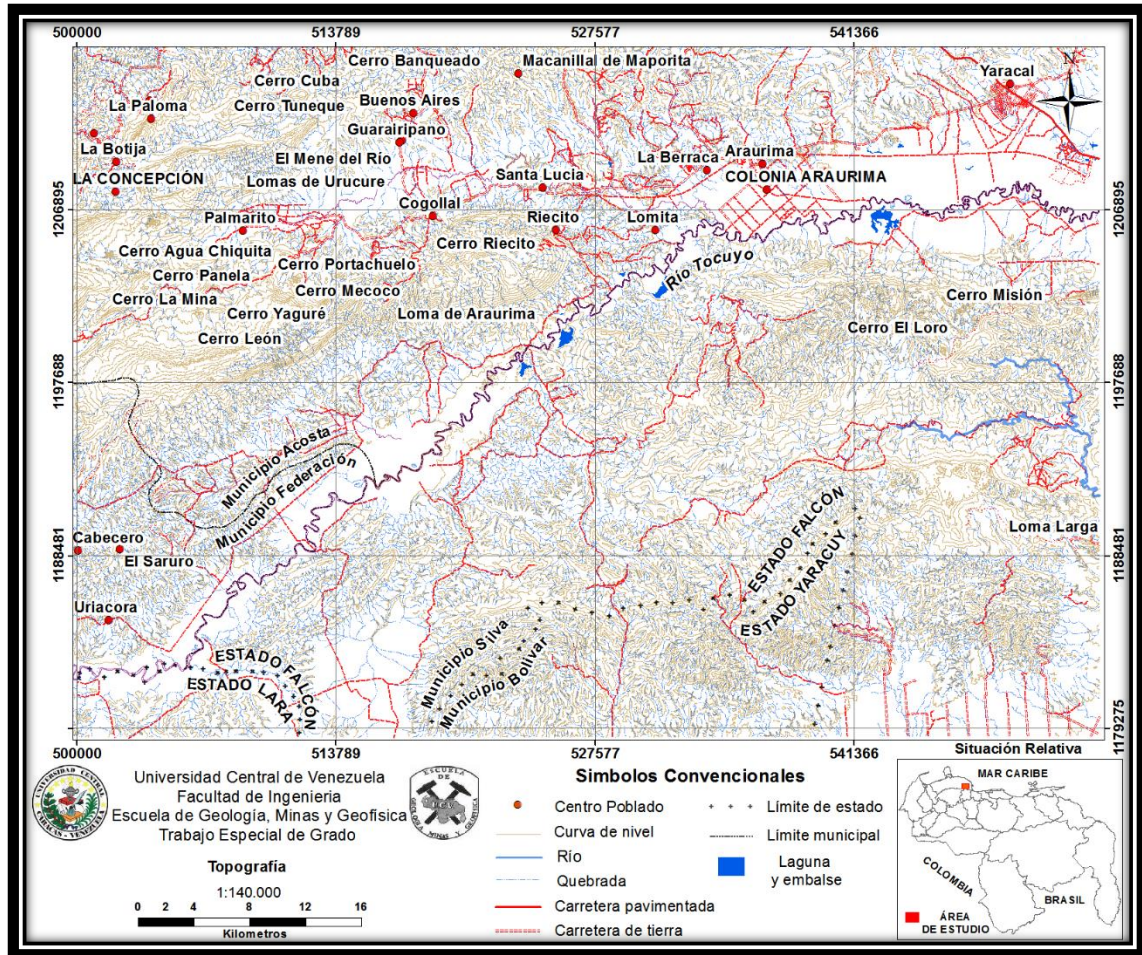


Figura 5.1. Mapa topográfico digitalizado correspondiente a la zona de estudio tomando como referencia las 16 cartas topográficas a escala 1:25.000.

Como primer análisis, el valor y comportamiento de las curvas de nivel permitió diferenciar las zonas de alto relieve de las de bajo relieve (Figura 5.2), logrando clasificar el relieve de la zona de estudio en tres unidades: Alto (Ubicado al NO), intermedio (al SE) y bajo (al centro, en dirección NE-SE), de igual manera se pudo clasificar a la unidad de relieve alto e intermedio en un tipo de paisaje de montaña: Alta (ubicada al NO de la zona de estudio), media (al SE) y baja (al NE y SO) y a la unidad

de relieve bajo en un tipo de paisaje de valle (ubicada al centro, en dirección NE-SE). Las clasificaciones anteriores se hicieron en base a los criterios tomados por Zinck (1981).

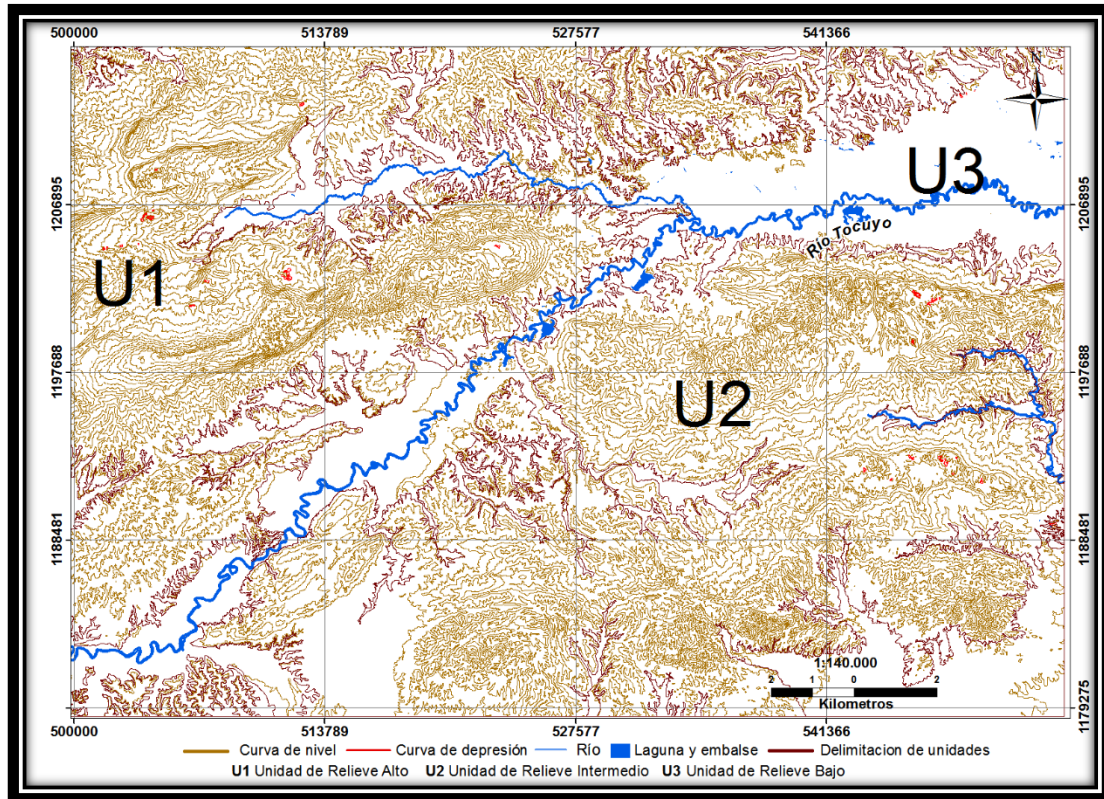


Figura 5.2. Distinción entre las unidades de relieves presente en la zona de estudio.

La generación del mapa topográfico también permitió determinar controles litológicos. Al NO del área de estudio, en algunas zonas (Lomas de Urucure y Cerro León), las curvas de nivel poseen poco espaciado (curvas poco distanciada), lo que es indicativo de un relieve abrupto, en algunos casos escarpados, lo que concierne a un tipo de litología muy competente. Por otro lado, en la misma zona, se pudo observar curvas de depresión definiendo un relieve conocido como *kárstico*, debido a fenómenos de disolución de material ricos en carbonatos. En este mismo orden de idea, se evidencia con facilidad un cambio litológico entre la zona alta y baja de este sector; el drenaje en la zona más abrupta presenta un patrón subparalelo de gran espaciado entre

los arroyos, definiendo una densidad baja característicos de litología competentes, mientras que hacia la zona bajas la red de drenaje es densa y uniforme en sentido NE-SO característico de una litología menos competente (Figura 5.3).

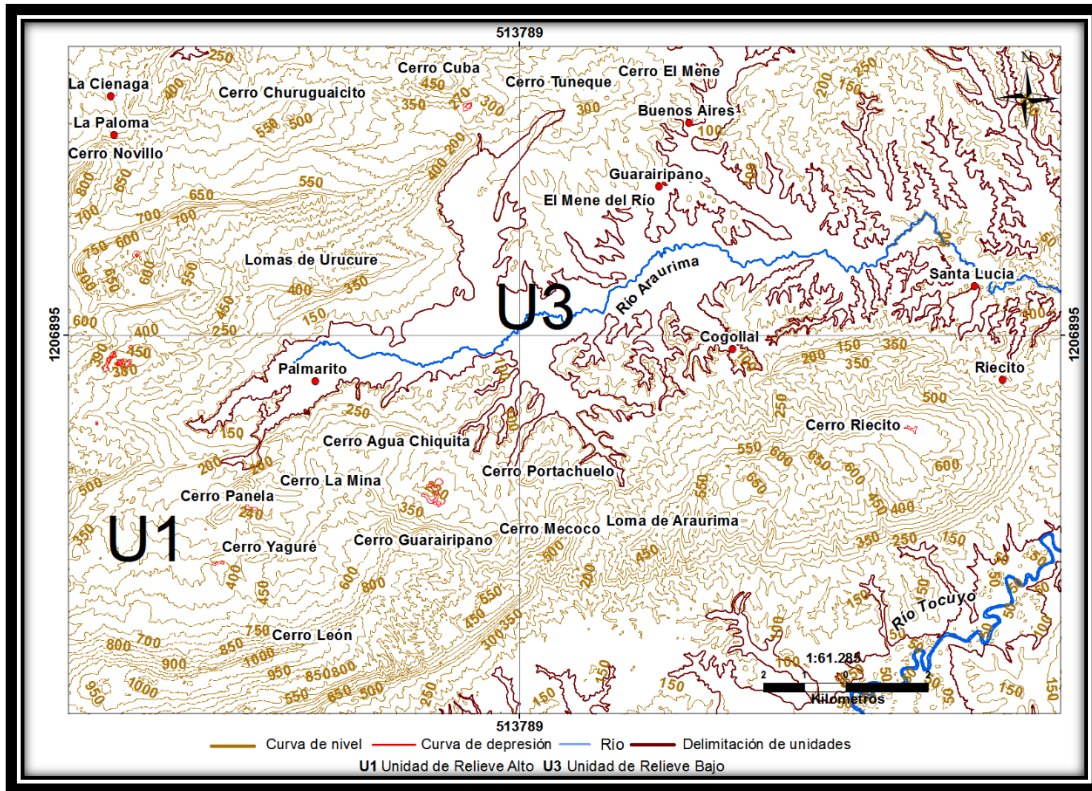


Figura 5.3. Ejemplo de control litológico (U1: Litología muy competente, U3: Sedimentos no consolidados), ubicado al NO de la zona de estudio, mediante la interpretación del mapa topográfico.

Por su parte, al centro de la carta 6448 en dirección NE-SO las curvas de nivel se encuentran muy distanciadas de forma irregular, donde los cambios en dichas curvas indican la delimitación del material arrastrado y depositados por el río principal o quebradas, estando constituido por sedimentos de arenas, gravas, arcillas o combinaciones de ellas, es decir constituida por litología menos competente. En esta misma zona, se observan como el río Tocuyo divaga por las amplias planicie, el mismo, posee forma sinuosa meandriforme, con cambio y migración lateral en el tiempo, lo cual depende de un complejo equilibrio entre el aporte de sedimento, la erosión y de los efectos de la creciente. Además se puede observar como el río Tocuyo, en algunas

zonas, al pasar el tiempo se cerró y quedó abandonado, formando algunas lagunas que en general constituyen un hábitat particular, por tales razones la unidad de relieve bajo está relacionada a sedimentos no consolidados o a litología poco competente (Figura 5.4).

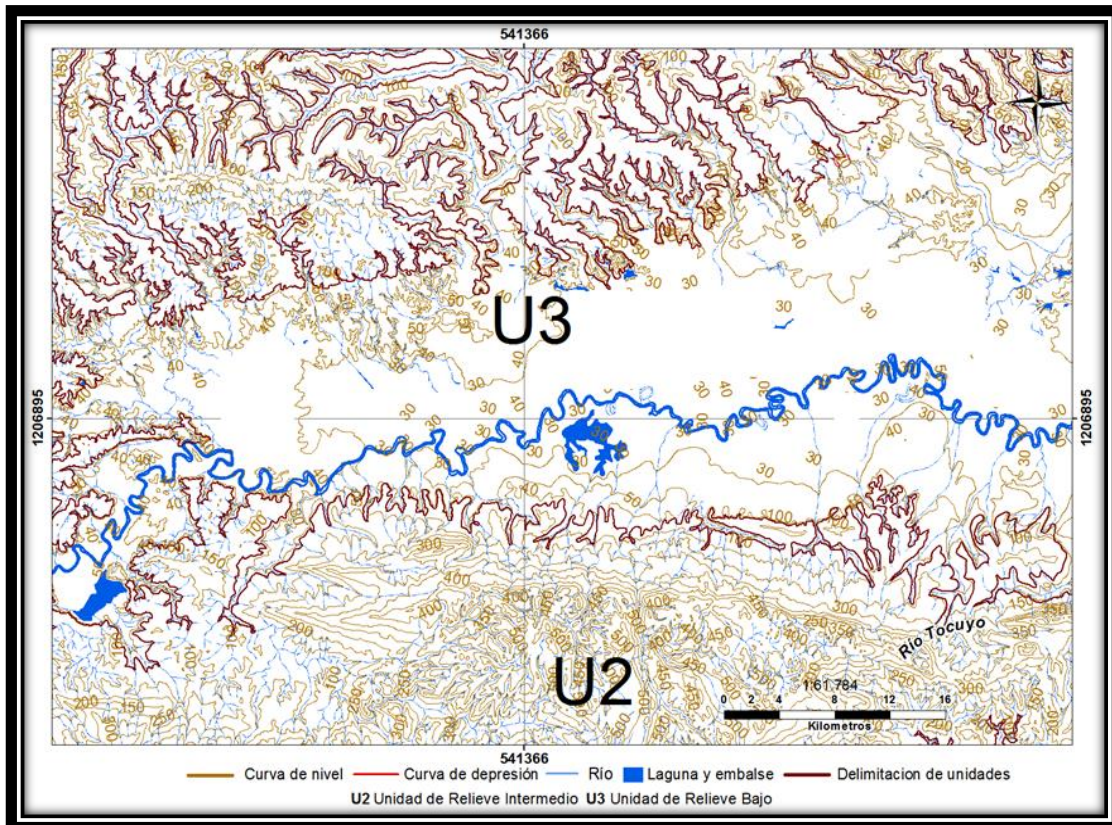


Figura 5.4. Ejemplo de control litológico (U2: Litología muy competente, U3: Sedimentos no consolidados), ubicado al NE de la zona de estudio, mediante la interpretación del mapa topográfico.

Finalmente, mediante el mapa topográfico se pudo observar evidencias de estructuras geológicas, las cuales son de dos tipos: Por plegamiento y por fracturación. El control estructural se evidencia con facilidad al NO de la zona de estudio donde los ríos Araurima y Tocuyo se encuentran adaptados a la topografía y drenan principalmente por los materiales más blandos (drenaje subsecuentes). Por otra parte, el trazado de las curvas de nivel de la topografía que se encuentra entre ambos ríos presenta numerosas estribaciones controladas por los arroyos que siguen la dirección

de la pendiente topográfica (drenaje consecuente) lo que indica la dirección del buzamiento de las capas presente en esa zona. En este mismo orden de idea, se pueden observar en esta zona desplazamientos de filas, cuyas formas que contrastan lateralmente no presentan continuidad; Otra característica, es el contraste de la topografía entre la Unidad de relieve alto (U1) y la unidad de relieve bajo (U3). La U1 presenta forma alargada dominada por un relieve abrupto; mientras que, la U3 posee una forma irregular heterogénea en toda su extensión dominada por un relieve suave o llano. Como ultima evidencia de control estructural observada en esta región es el cambio brusco del río Araurima durante su trayectoria, en donde el material afectado por la fractura facilita la erosión permitiendo la formación del valle. (Figura 5.5).

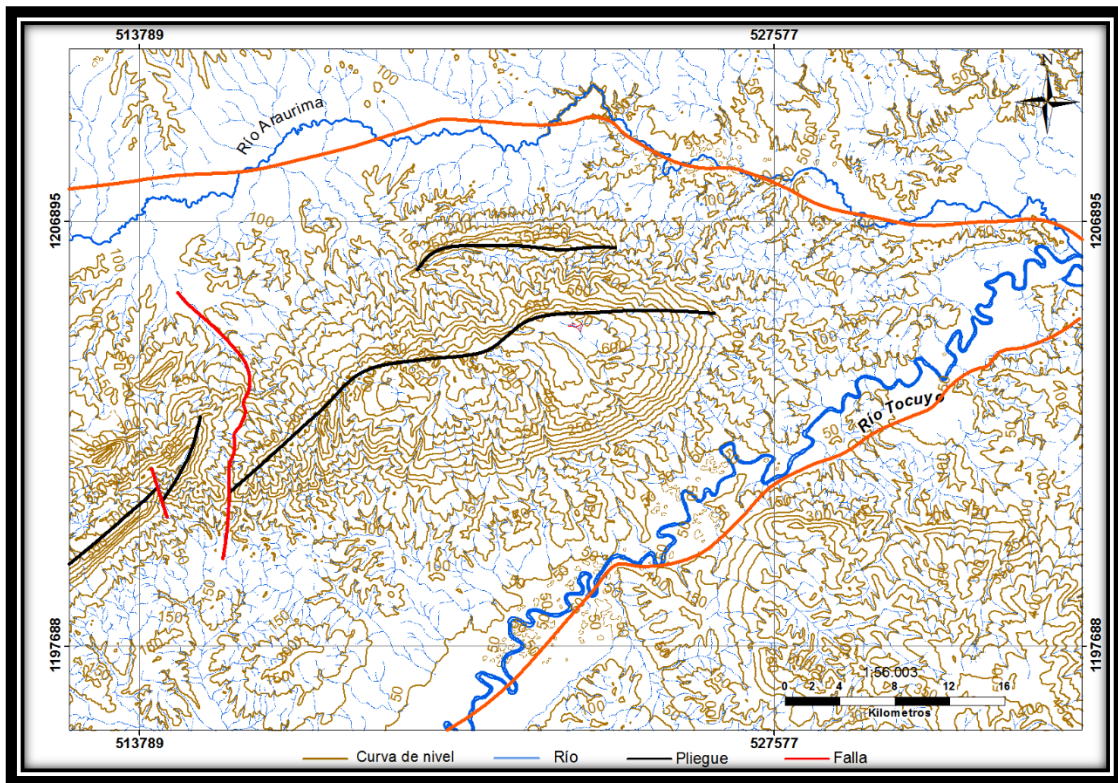


Figura 5.5. Ejemplo de control estructural, ubicado al NO de la zona de estudio, mediante la interpretación del mapa topográfico.

### V.1.2 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Con la utilización de este producto, al igual que en el mapa topográfico se pudo observar la diferenciación de las unidades de relieve, donde los colores blanco intenso representa la unidad de relieve alto (U1), los colores blanco suave relieve intermedio (U2) y el color negro relieve bajo (U3) (Figura 5.6). Además, tomando como referencia el DEM se realizaron tres líneas de corte con diferente orientación (Figura 5.7) para luego, mediante el algoritmo *Profile Graph* del grupo de herramientas del *software* ArcGIS 10.3, se realizaran los correspondientes perfiles topográficos.

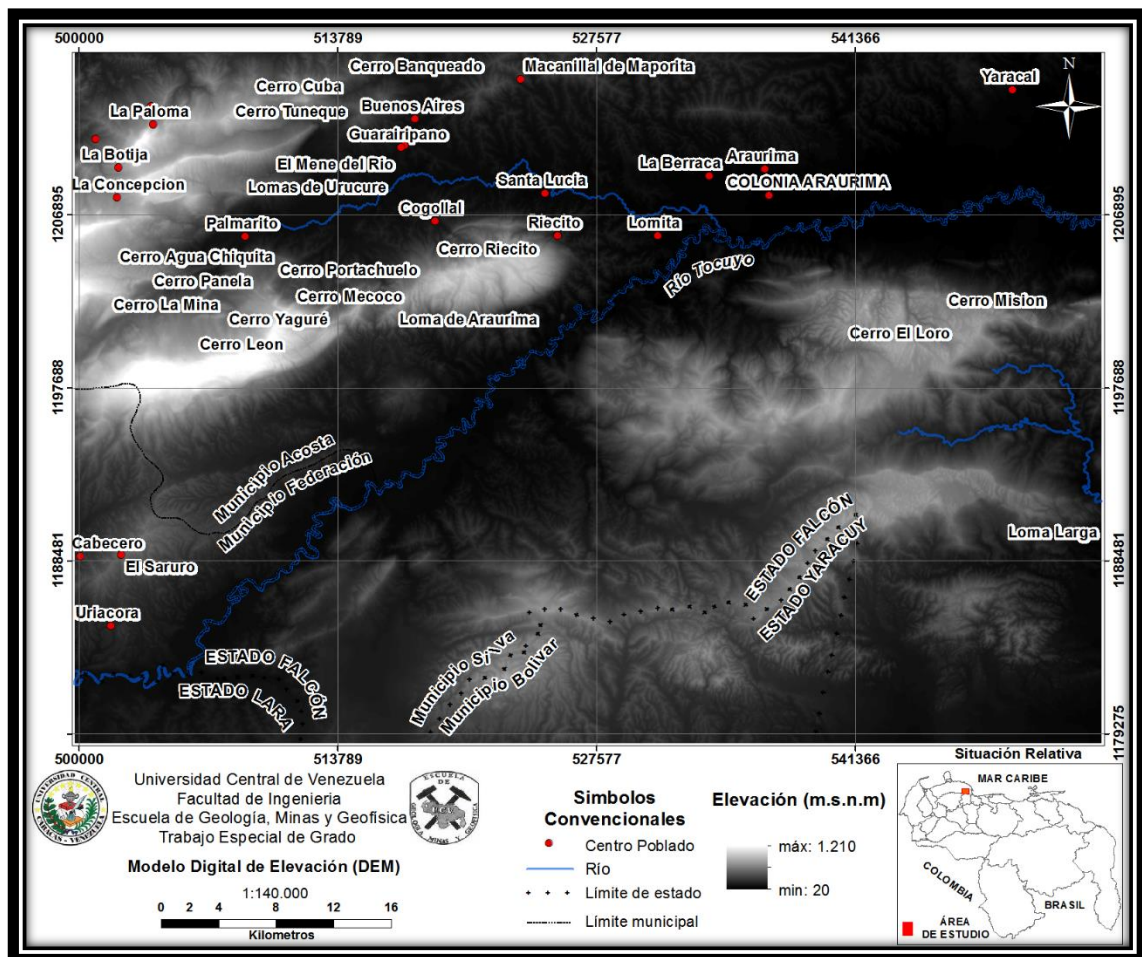


Figura 5.6. Modelo Digital de Elevación (DEM) correspondiente a la zona de estudio partiendo de la digitalización de la 16 cartas topográficas a escala 1:25.000.

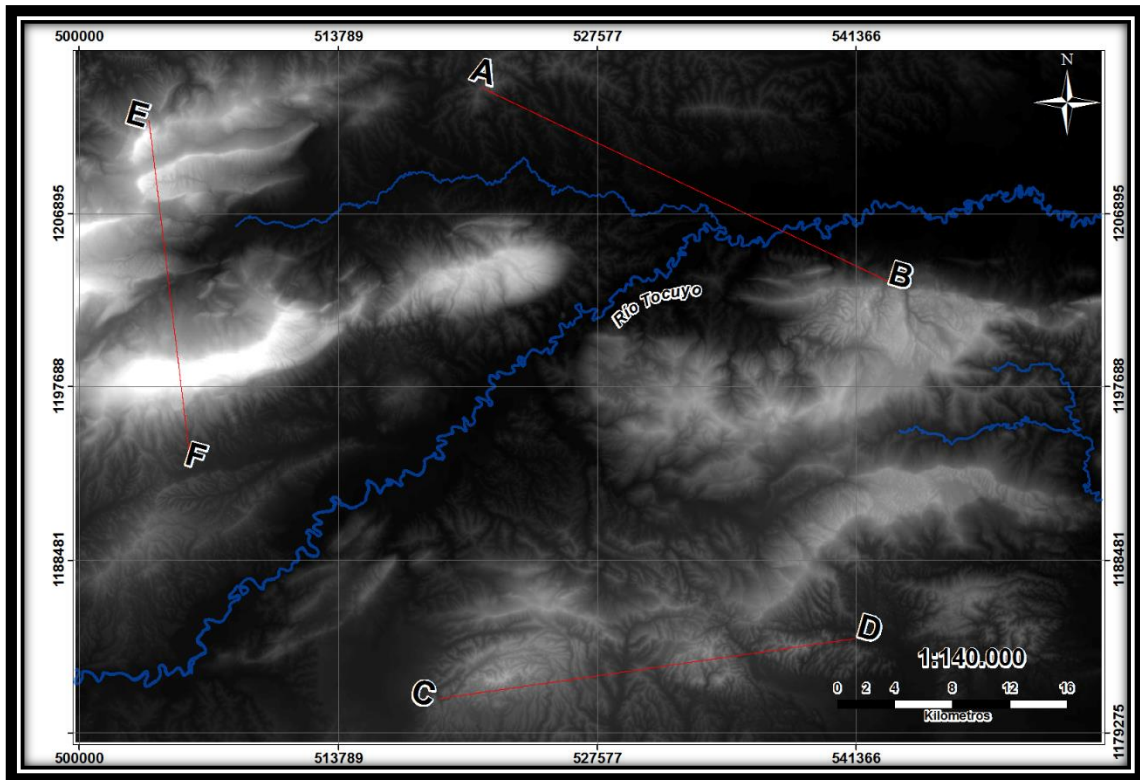


Figura 5.7. Líneas de corte con diferente orientación

Los perfiles topográficos obtenidos permitieron representar el relieve de la zona de estudio en dos dimensiones (2D). Con la ayuda de los mismos, se pudo observar como a lo largo del perfil topográfico la pendiente y la forma del terreno puede ser delimitada de acuerdo a su expresión, infiriendo contactos litológicos y estructurales. Además, la semejanza en cota o formas topográficas permitieron delimitar tramos o sectores de similares condiciones geológicas. Las formas distintas observadas en los perfiles topográficos corresponden a relieve plano, ondulado y montañoso.

En el relieve plano correspondiente a la U3 (Figura 5.8), se observa una línea casi horizontal con poca pendiente relacionada con una amplia llanura aluvial o valle aluvial. Este tipo de perfil permite relacionarlo con materiales correspondiente a suelos aluviales, depositados por ríos y quebradas evidenciando la presencia de litología de carácter arenoso es decir poco competente lo que confirma lo observado con el mapa topográfico.

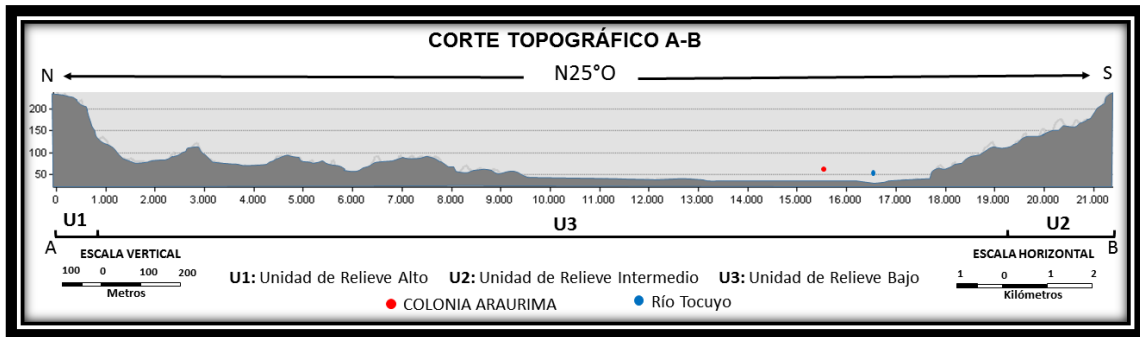


Figura 5.8. Corte topográfico A-B, donde destaca el comportamiento de la Unidad de relieve bajo.

Por su parte, en el relieve ondulado (Figura 5.9) se observan cerros o colinas consecutivas donde las cotas más bajas corresponden a cauces de quebradas, las cuales permiten relacionarla con fracturas o fallas presente en ese sector. La pendiente moderada de la ladera está relacionada a litología de alta competencia.

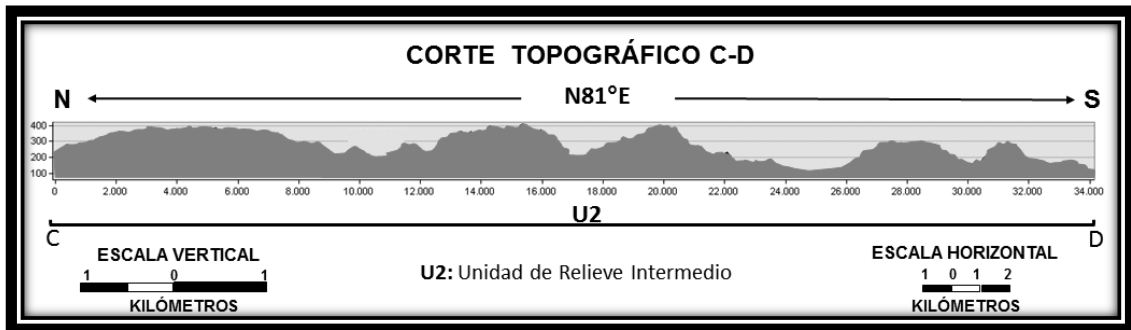


Figura 5.9. Corte topográfico B-C, donde destaca el comportamiento de la Unidad de relieve intermedio.

Finalmente, en el relieve montañoso (Figura 5.10), se observan pendientes fuertes con grandes diferencias de cotas, el cual debe su control geológico a la presencia de rocas duras de alta resistencia a los agentes erosivos, donde en general los cauces de las quebradas poseen un perfil longitudinal de alta pendiente, relacionados a saltos y cascadas controlados por escarpado de rocas.

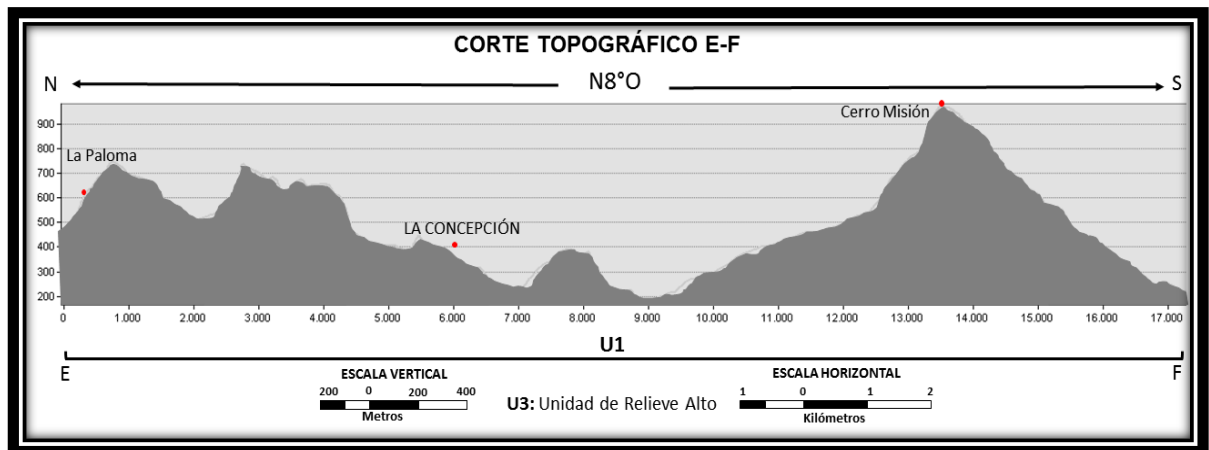


Figura 5.10. Corte topográfico E-F, donde destaca el comportamiento de la Unidad de relieve alto.

La interpretación de los perfiles topográficos permitió clasificar la zona de estudio de la siguiente manera:

Tabla 5.1. Información obtenida de los perfiles topográficos.

UNIDAD DE RELIEVE	LADERA	CRESTA	ZONA FRACTURA	LITOLOGÍA
Alto	Abrupto - escarpado	Aguda	Muy alta	Muy competente
Intermedio	Moderado - abrupto	Redondeada	Moderado	Competente
Bajo	Suave o llano	No aplica	Baja	No competente

En otro orden de ideas, el DEM permitió observar en tres dimensiones (3D) cada una de las capas temáticas posteriores a la de este modelo (Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS), hipsometría, pendiente, orientación de laderas, entre otros), esto fue posible con la ayuda de la herramienta *ArcScene* (aplicación del software *ArcGIS 10.3*). Con la ayuda de esta herramienta se lograron determinar rasgos estructurales como corrimientos, retrocorrimientos, fallas locales y pliegues, que no se lograban observar con facilidad en visión 2D. De igual manera se observó la topografía en distintos ángulos permitiendo visualizar con mayor detalle el comportamiento de las laderas y crestas de las topofomas presentes en la zona de estudio (Figuras 5.16, 5.18, y 5.20).

### V.1.3 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS)

El sombreado del relieve se utilizó para realzar visualmente los elementos del terreno simulando los efectos de iluminación de la luz del sol sobre la superficie del terreno, el mismo, estima valores de reflectancia de la superficie a partir de la posición del sol a cualquier altitud y en cualquier azimut. El MDIS generado corresponde a un ángulo de elevación del sol de  $315^\circ$  y un azimut de  $45^\circ$  con una resolución de 10 m de pixel (Figura 5.11). Este producto, constituyó una herramienta muy importante y de gran utilidad a lo largo de la investigación debido a que con las observaciones de tono, texturas y forma proporcionó información de índole topográfica, estructural y litológica.

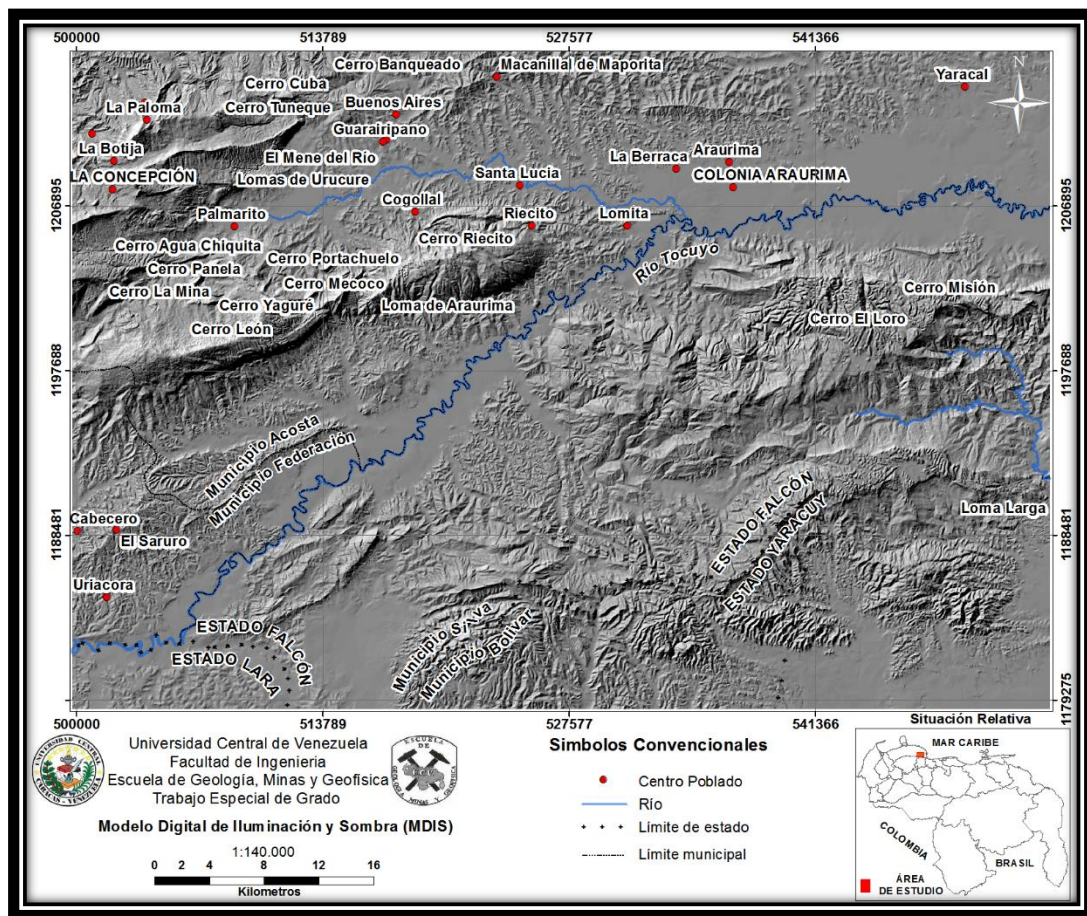


Figura 5.11 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).

La diferencia de tono, textura y formas mostradas por el MDIS ayudó a la subdivisión de las unidades de relieve. La unidad de relieve alto (U1) presenta formas alargadas bastante similares entre sí con orientación preferencial NE-SO conformadas por un mismo tipo de relieve cuyos tonos oscuros está relacionado a pendientes escarpadas. Por su parte, la unidad de relieve intermedio (U2) muestra formas y textura heterogénea presentando dentro de la misma unidad tipos de relieve diferentes asociados a filas, cerros y colinas. Finalmente, la unidad de relieve bajo (U3) aunque muestra una textura homogénea en toda su extensión, se pueden observar algunos desniveles, los mismos son asociados a terrazas. Por otro lado, con la ayuda del MDIS se logró identificar elementos topográficos como: Líneas de cresta, estribaciones y entallamientos de los drenajes; que no lograron identificarse con facilidad con el mapa topográfico (Figura 5.12).

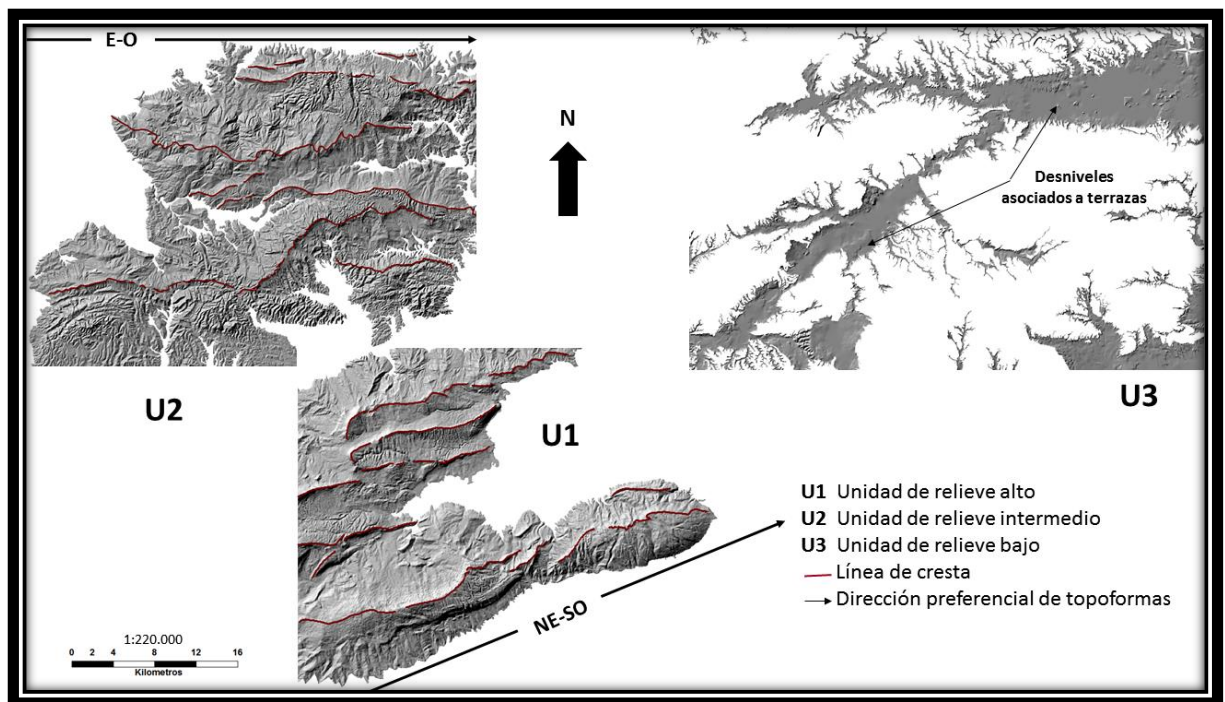


Figura 5.12 Unidades de relieve destacando los rasgos geológicos observados por el MDIS.

Desde el punto de vista litológico, la textura observada en el MDIS permitió determinar asociaciones y contactos en toda la zona de estudio. La textura lisa correspondiente a la U3 está asociada sedimentos no consolidados. Por su parte, la U1 muestra un contacto litológico bastante evidente entre las estibaciones que están al pie de la montaña y la parte alta de la misma observadas entre el Cerro Riecito y Lomita, de igual manera el escarpe observado en esa unidad determina un contacto litológico ya que corresponde a un relieve diferencial debido a que la modelación del terreno observado presenta los materiales más consistente en un relieve superior a los materiales más blandos. Además, con la ayuda del MDIS se pudo observar el comportamiento de las trazas de capas guías lo cual también fue un indicativo para la delimitación de contacto litológico (Figura 5.13).

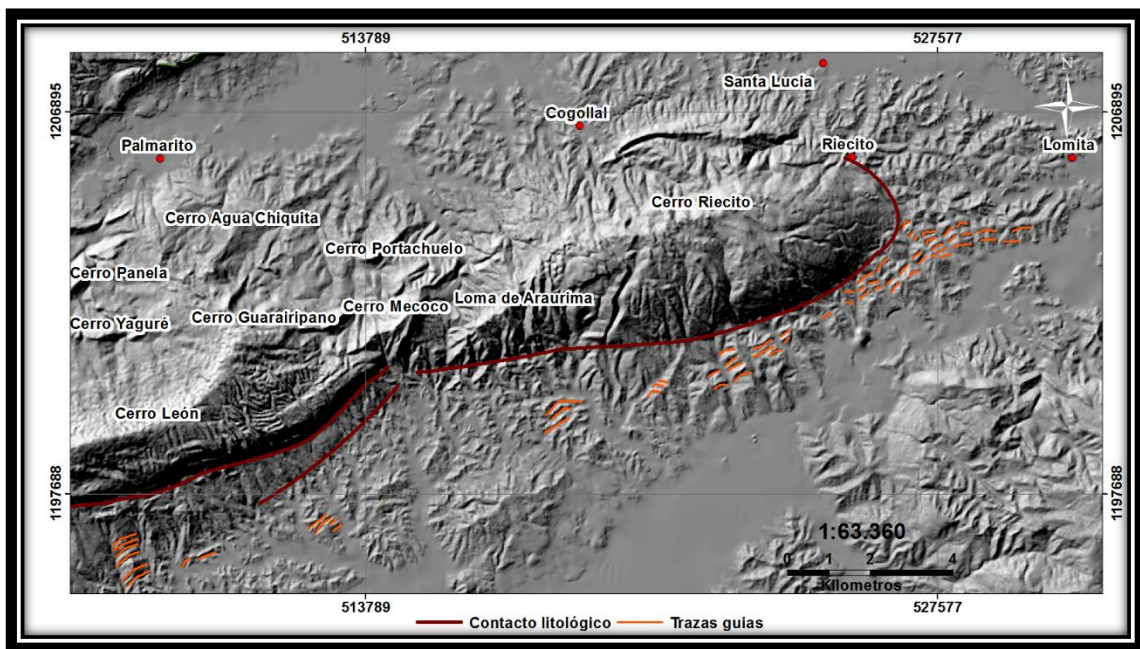


Figura 5.13 Evidencias de contactos litológicos y capas guías observadas por el MDIS

Respecto a los rasgos estructurales, cabe destacar que todas las evidencias mostradas por el MDIS se lograron con la ayuda de la generación de siete MDIS, estos presentaron ángulo de azimut cada 45° (45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) y un ángulo de elevación del sol de 30° para cada uno, con la finalidad de observar de

acuerdo a la orientación del sol todas las lineaciones y fracturas presente en la zona de estudio (Figura 5.14). Debido a su alta resolución de 10 m de pixel se pudo observar como al noroeste (NO) y sureste (SE) de la zona de estudio asociado a la unidad de relieve alto (U1) e intermedio (U2) respectivamente se encuentra fuertemente fracturado, en ellas se pudo determinar 640 lineaciones la cual están asociadas a pliegues y fallas (Figura 5.14).

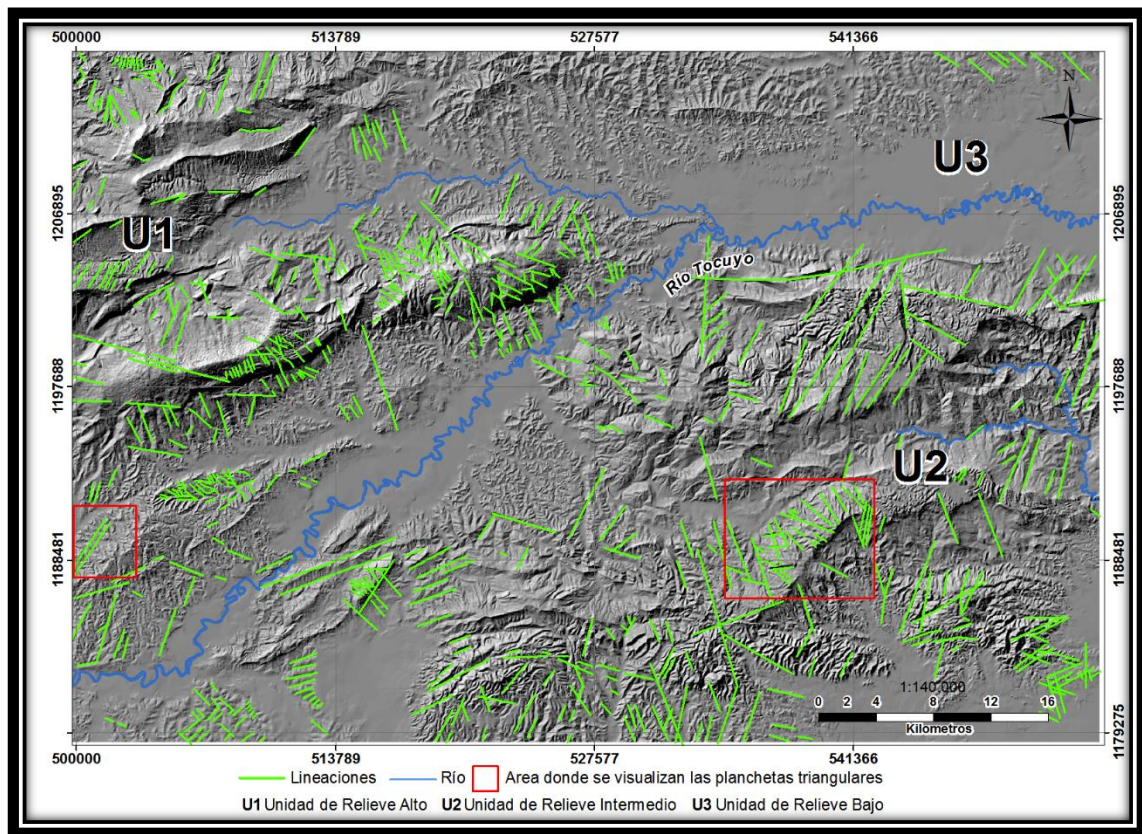


Figura 5.14 Lineaciones presente en la zona de estudio mediante la interpretación de siete MDIS con ángulo de azimut cada 45° (45°, 90, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) y un ángulo de elevación del sol de 30° para cada uno.

En ambas unidades (U1 y U2) se logran evidenciar planchetas triangulares, siendo en la U2 donde se observan con mayor facilidad, en el cual, las laderas al pie de la montaña están limitadas por quebradas transversales de cauces profundos presentando dichas laderas forma triangular. La superficie es el resultado de las

presencias de fallas geológicas, donde su orientación e inclinación coincide con las planchetas y además dicha ladera están controlada por rocas de mayor resistencia, donde la roca triturada que limitaría al plano de falla sería sometida fácilmente a procesos de erosión (Figura 5.15).

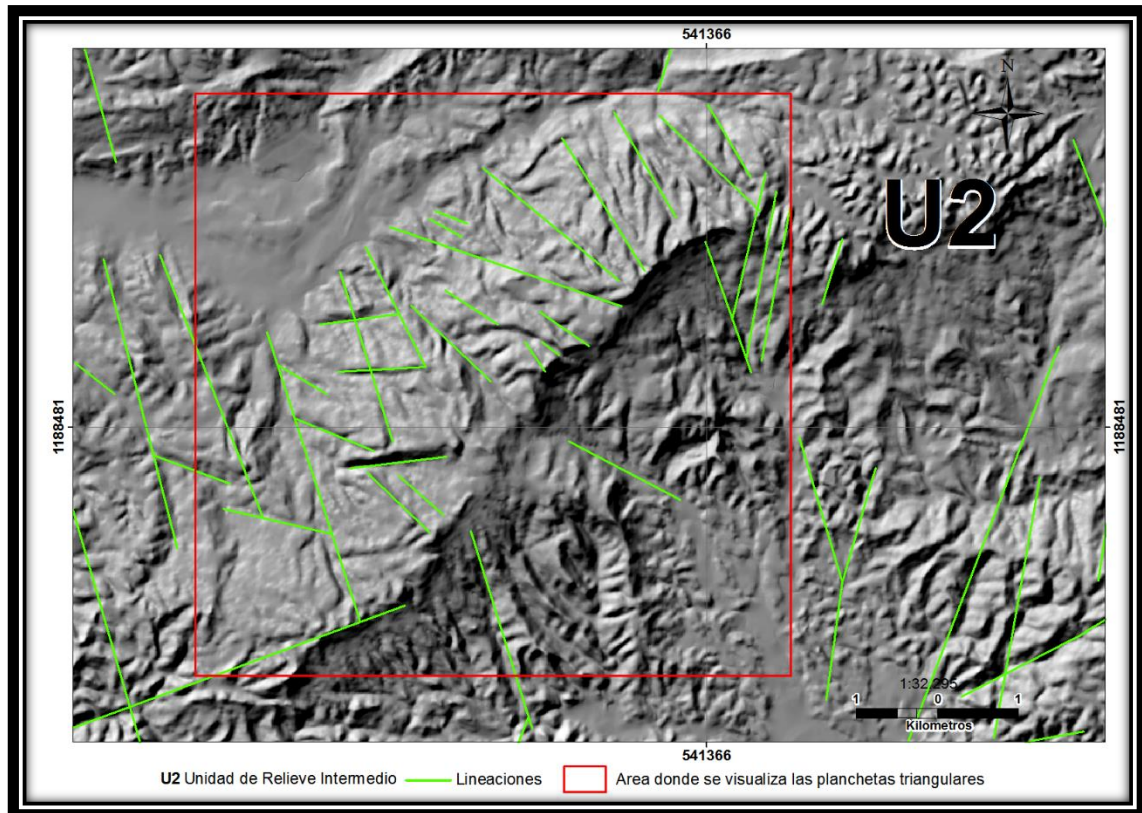


Figura 5.15 Área donde se visualizan las planchetas triangulares, ubicadas al sureste (SE) de la zona de estudio

El MDIS generado también permitió observar la dirección de buzamiento de algunas capas presente en la zona de estudio lo que conlleva a la interpretación de plegamientos. Los plegamientos observados en la U1 presentan orientación preferencial NE-SO y los de la U2 E-O. Con la interpretación de lo anterior más la observación de líneas de crestas desplazadas, el entallamiento de los drenajes se pudieron determinar las fallas presente en la zona de estudio, donde las más destacadas son las que atraviesa la U3. Lo anterior se pudo observar con mayor facilidad con la

ayuda de la herramienta *ArcScene* ya que se pudo realizar una interpretación en 3D lo cual corroboró la presencia de las estructuras ya interpretadas (Figura 5.16).

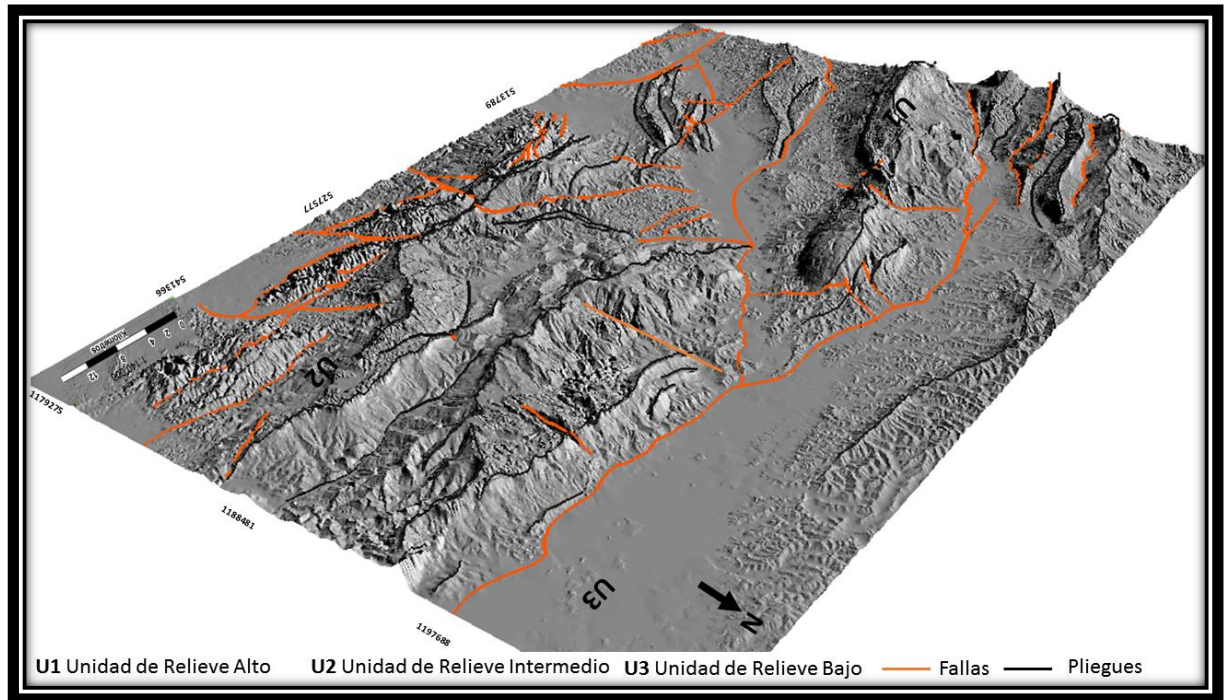


Figura 5.16. Visualización en 3D, donde se observan las fallas y pliegues presentes en la zona de estudio mediante las interpretaciones del MDIS

#### V.1.4 Hipsometría

La representación de las diferentes alturas mediante la degradación armónica de colores permitió visualmente determinar con mayor facilidad las unidades de relieve presente en la zona de estudio (Figura 5.17). La capa hipsométrica muestra como la unidad de relieve alto (U1) e intermedio (U2) corresponde a un mismo tipo de paisaje, el cual de acuerdo a la clasificación de Gamboa (1986) es el de montaña. Este tipo de paisaje presenta alturas que van desde 100 a 1200 m.s.n.m., y en toda su extensión de acuerdo a la degradación de colores muestra una gran diversidad, por tal razón, para efecto de esta investigación este tipo de paisaje de acuerdo a su desnivel de base se clasificó en montañas bajas (100 - 200 m), medias (200 - 350 m) y altas (350 - 850

m). Por su parte, el tipo de paisaje correspondiente a la unidad de relieve bajo (U3) según el mismo autor es de valle, representado con el color verde claro cuyas alturas van de 20 a 100 m.s.n.m. (Figura 5.18).

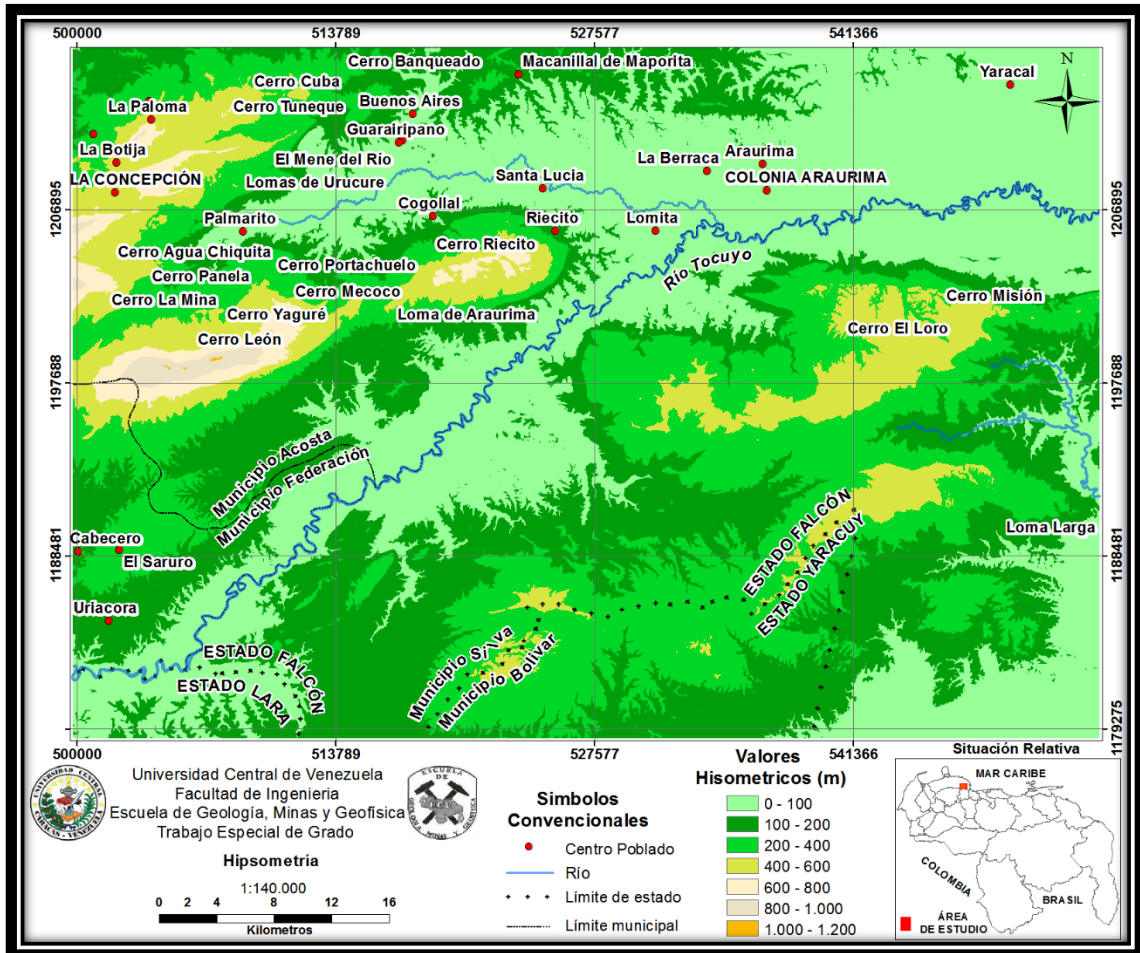


Figura 5.17 Capa de hipsometría correspondiente a la zona de estudio partiendo de la reclasificación del Modelo de Elevación Digital (DEM) mediante los parámetros establecidos por Gamboa (1986)

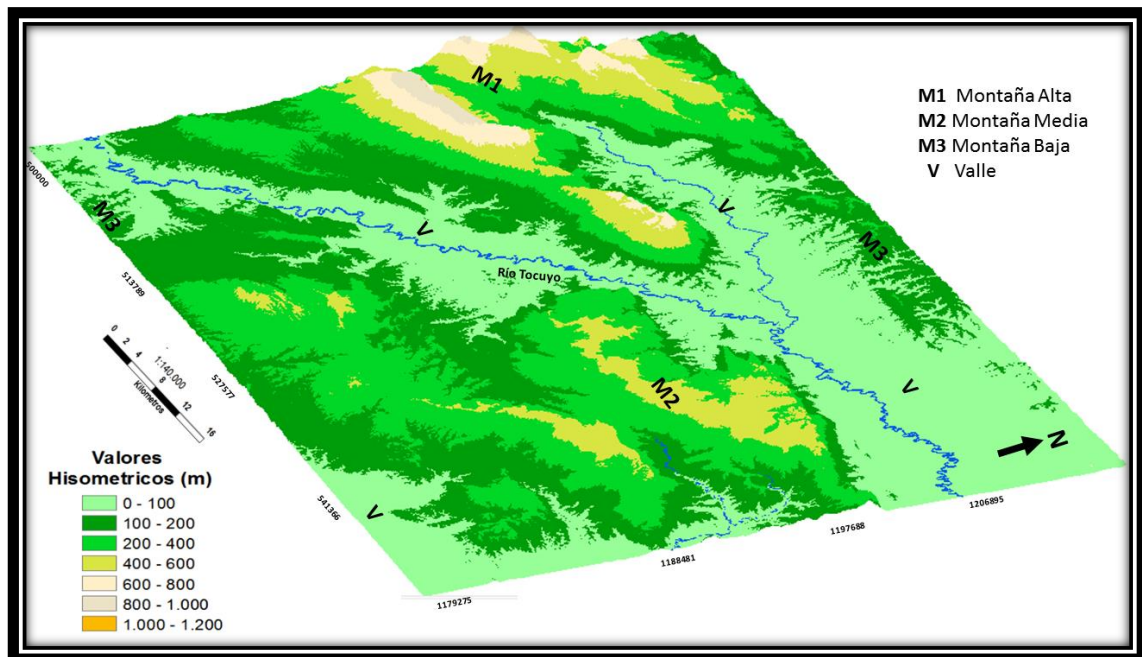


Figura 5.18. Visualización en 3D, donde se observan la clasificación de montaña y valle de acuerdo a los criterios propuesto por Zinck (1986).

### V.1.5 Pendiente

Para la elaboración de la capa pendiente se estableció primeramente un rango de pendiente que según la escala gráfica cronométrica se fueron sectorizando en el mapas con curvas de nivel, según el intervalo establecido, lográndose de esta manera un mapa pendiente de siete sectores: Llano, suave, moderado, moderadamente abrupto, abrupto, muy abrupto y escarpado, dichos rango se definieron de acuerdo a los parámetros establecidos por Gamboa (1986) (Figura 5.19).

Mediante el mapa de pendiente se puede observar que el centro de la zona de estudio en dirección NE-SO corresponde a una pendiente muy suave o llana indicativo de topografía asociada a llanura fluviales o/y de desborde. Por su parte, con la ayuda de la herramienta ArcScene se pudo determinar con facilidad las zonas de pendiente escarpado observándose al NO de la zona de estudio la presencia de cornizas (Figura 5.20), esto es indicativo de litología de alta competencia asociados a calizas.

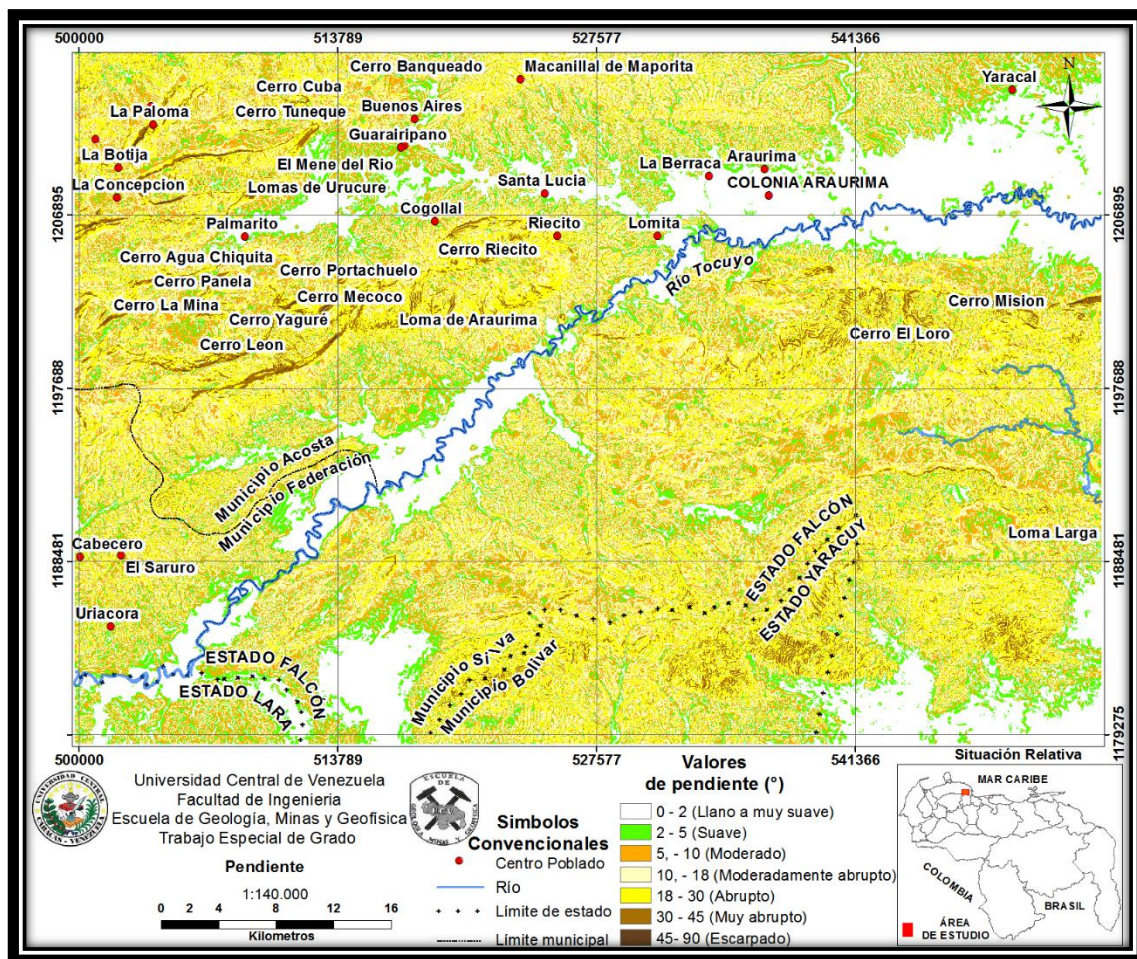


Figura 5.19. Capa pendiente correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM) mediante los parámetros establecidos por Gamboa (1986).

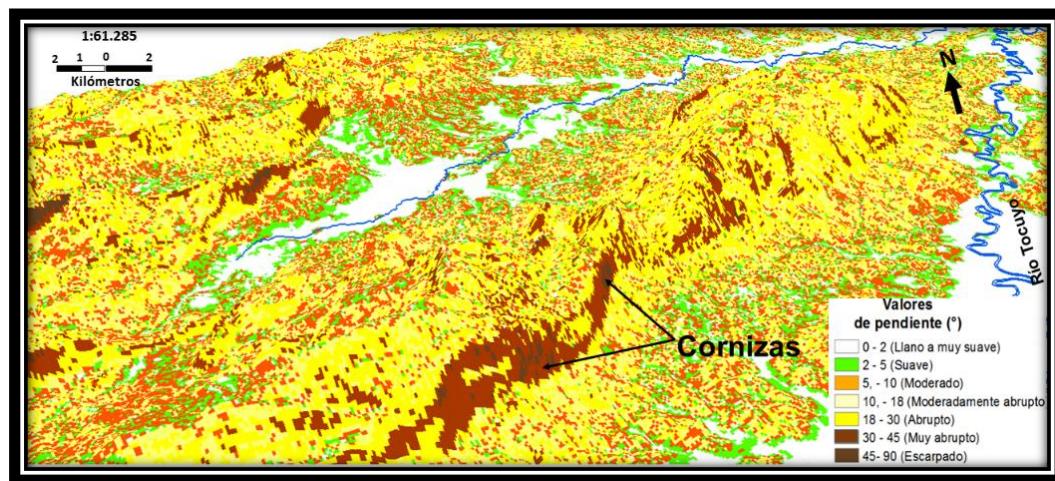


Figura 5.20 Visualización en 3D, donde se observan cornizas asociados a calizas.

### V.1.6 Orientación de laderas

La Orientación de ladera identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas, puede pensarse como la dirección de la pendiente (ESRI, 2018). Este resultado (Figura 5.21a) fue de mucha utilidad en la identificación de rasgos estructurales; visualmente permite inferir con facilidad la presencia de pliegues y fallas en la zona de estudio, ya que el cambio de orientación de ladera es indicativo de un control estructural (Figura 5.21a).

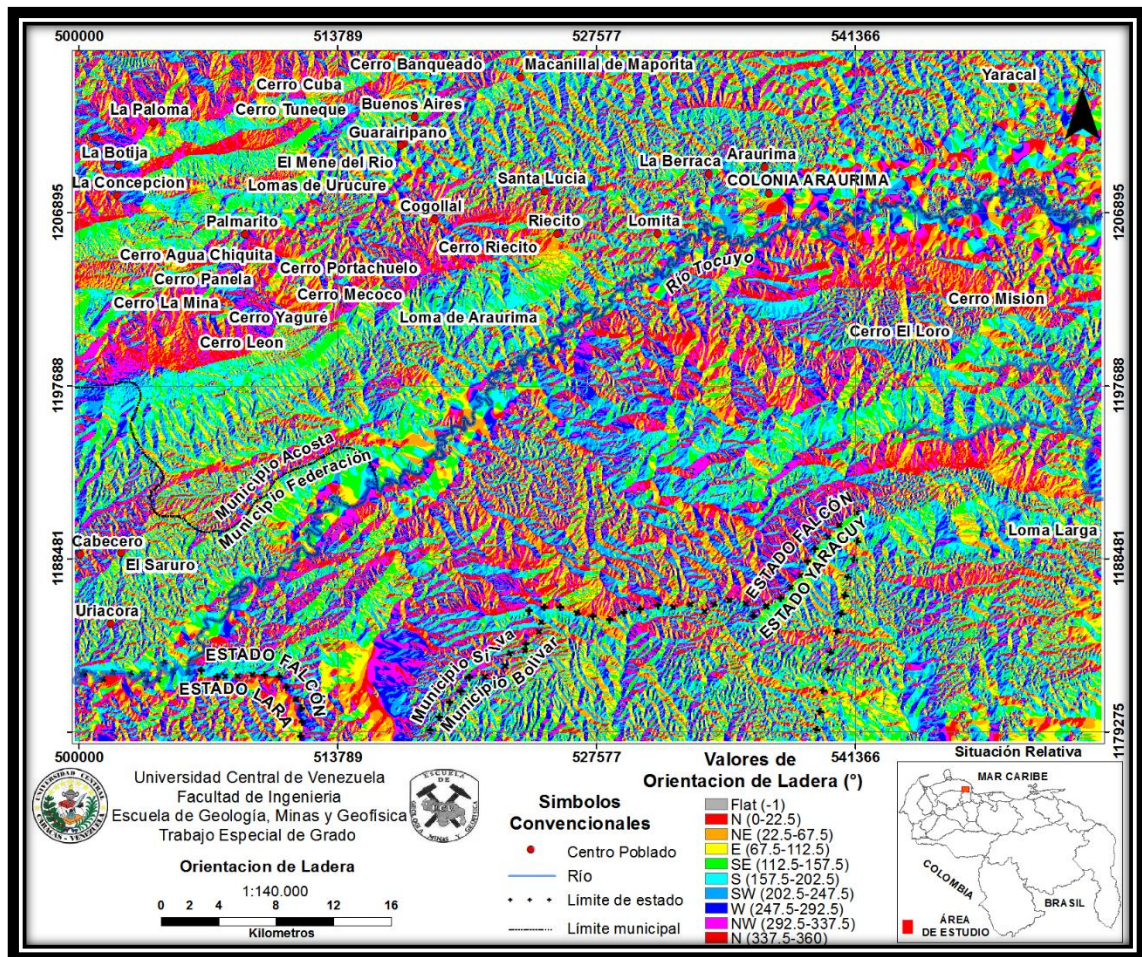


Figura 5.21. Capa de orientación de laderas correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).

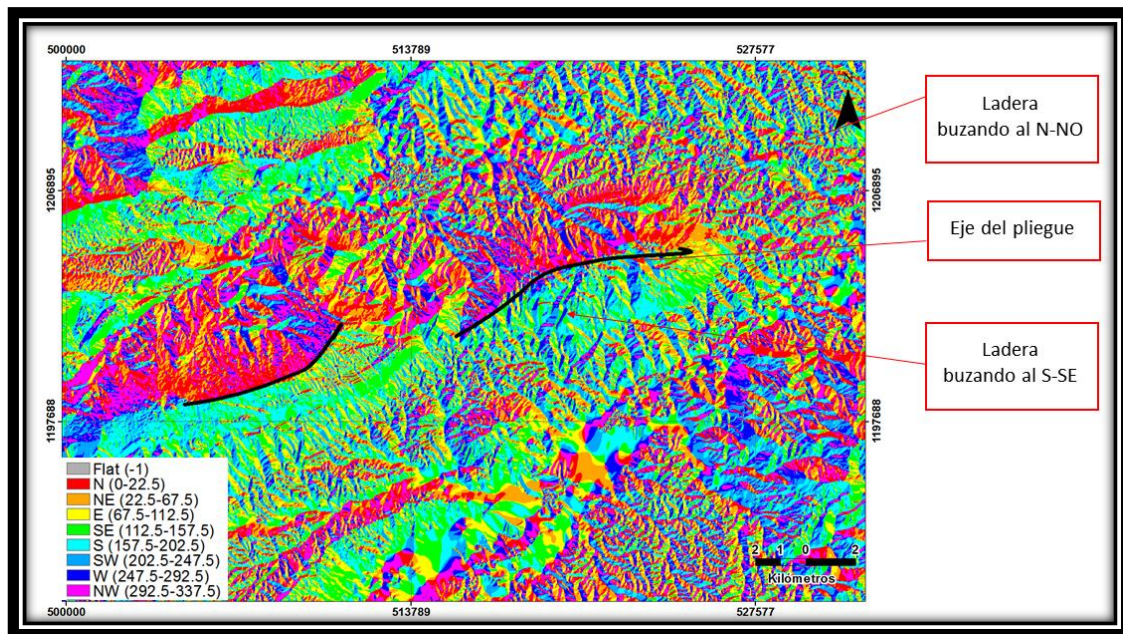


Figura 5.21a. Ejemplo de eje de pliegue mediante la Capa temática Orientación de laderas

### V.1.7 Cuencas, subcuencas y densidad de drenaje

El drenaje es un elemento fundamental para el análisis de los caracteres geomorfológicos dentro del área de estudio ya que permite delimitar los elementos estructurales y litológicos dentro de la evolución de las formas del relieve, por tal motivo se generó en primer lugar las capas: Cuenca, subcuenca y densidad de drenaje en formato ráster, posteriormente se convirtió a formato vectorial, lo que permitió delimitar las cuencas y subcuencas hidrográficas presente en la zona de estudio y determinar su superficie en  $\text{km}^2$  (Figura 5.23 y 5.24).

Con la ayuda de estos productos se lograron definir cuatro cuencas relevantes y 21 subcuencas, destacando la cuenca Río Tocuyo con la mayor superficie ( $1.524 \text{ km}^2$ ), seguida la cuenca del río Aroa, Hueque, y en una muy pequeña porción Tucurere (Figura 5.22). Por otro lado, los nombres de las cuencas y subcuencas se asignaron de acuerdo al río o quebrada principal que la conforma. En el caso de las cuencas solo el río Tocuyo se encuentra presente en la zona de estudio, los demás se encuentran en las

adyacencias y en el caso de las subcuencas, algunas se nombraron como “sin nombre” debido a que los arroyos que la conforman carece de nombre alguno (Tabla 5.2).

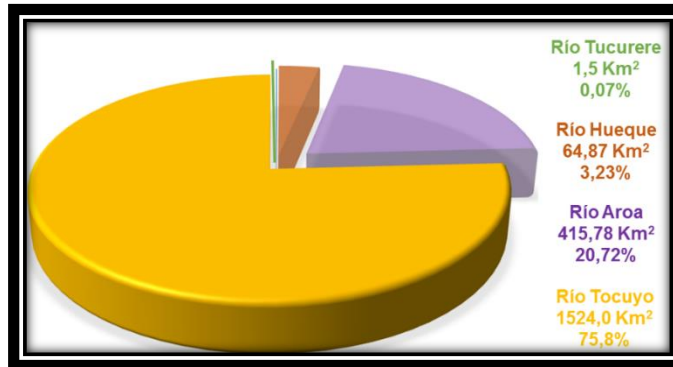


Figura 5.22 Cuencas presentes en la carta 6448 expresada en superficie y porcentajes.

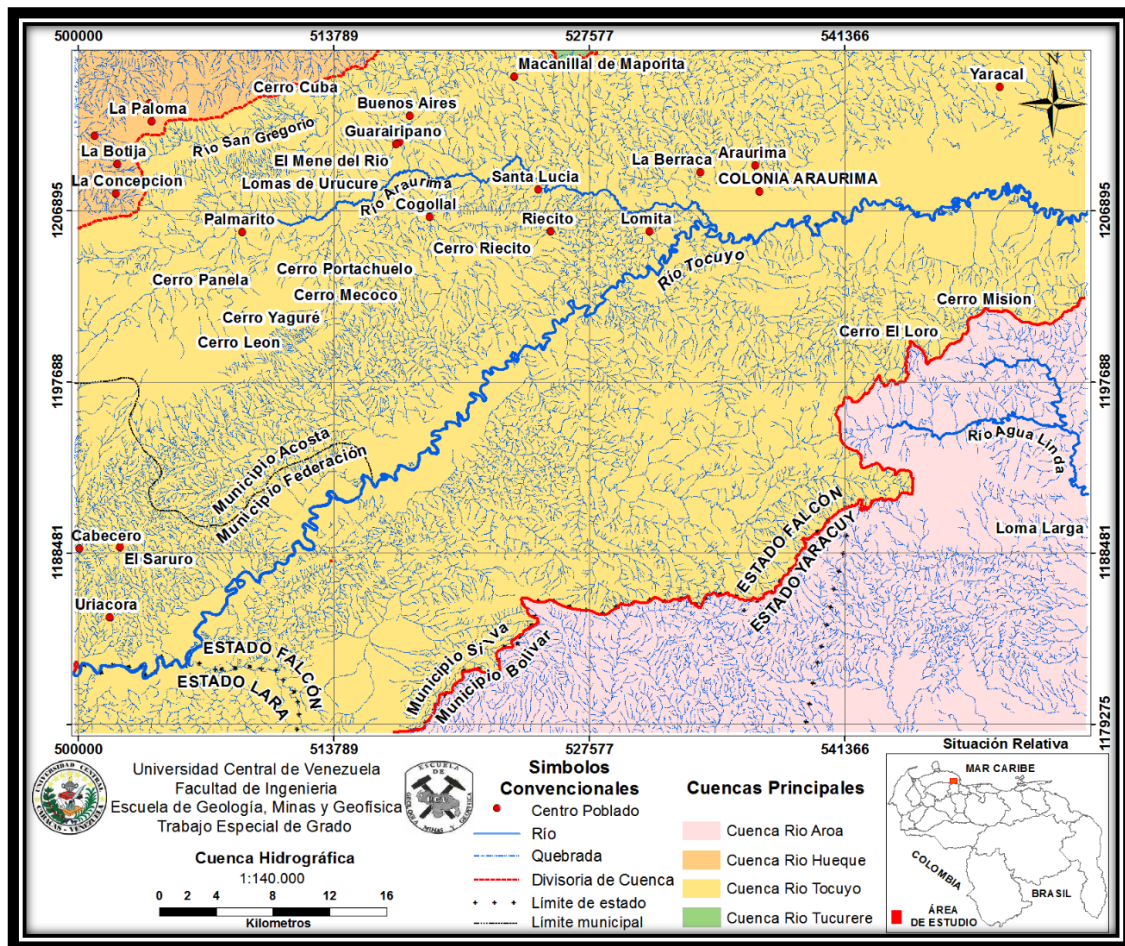


Figura 5.23 Cuencas correspondientes a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).

Tabla 5.2. Cuencas presentes en la carta 6448.

Cuencas	Subcuencas	Sup Km <sup>2</sup>	%
<b>Río Tucurere</b>	Sistema de Qdas. Tucurere	1,5	100
	<b>Subtotal del área total</b>	<b>1,5</b>	<b>0,07</b>
<b>Río Hueque</b>	Sistema de Qdas. Agua Linda	17,54	27,04
	Sistema de Qdas. Montero	10,69	16,48
	Sistema de Qda. Percita	19,52	30,09
	Sistema de Qdas. Santa Cruz	17,12	26,39
	<b>Subtotal del área total</b>	<b>64,87</b>	<b>3,23</b>
<b>Río Aroa</b>	Sistema Río Agua Linda	175,53	42,22
	Qda. Chapano	45,42	10,92
	Qda. San Antonio	89,68	21,57
	Qda. Manuelito	105,15	25,29
	<b>Subtotal del área total</b>	<b>415,78</b>	<b>20,72</b>
<b>Río Tocuyo</b>	Río Araurima	368,59	24,18
	Río Guaidima	184,74	12,12
	Qda. Sin nombre 3	83,76	5,5
	Qda. Cararapa	57,42	3,77
	Qda. Reñego	38,58	2,53
	Qda. Sin nombre 2	37,15	2,44
	Qda. Sin nombre 1	106,74	7,0
	Qda. Charal	221,32	14,52
	Qda. Guaca	148,52	9,74
	Qda. Tigre	69,15	4,54
	Qda Agua Salada	174,52	11,45
	Caño El Cauce	33,71	2,21
	<b>Subtotal del área total</b>	<b>1.524,0</b>	<b>75,8</b>
		<b>Área y % total</b>	<b>2006</b>

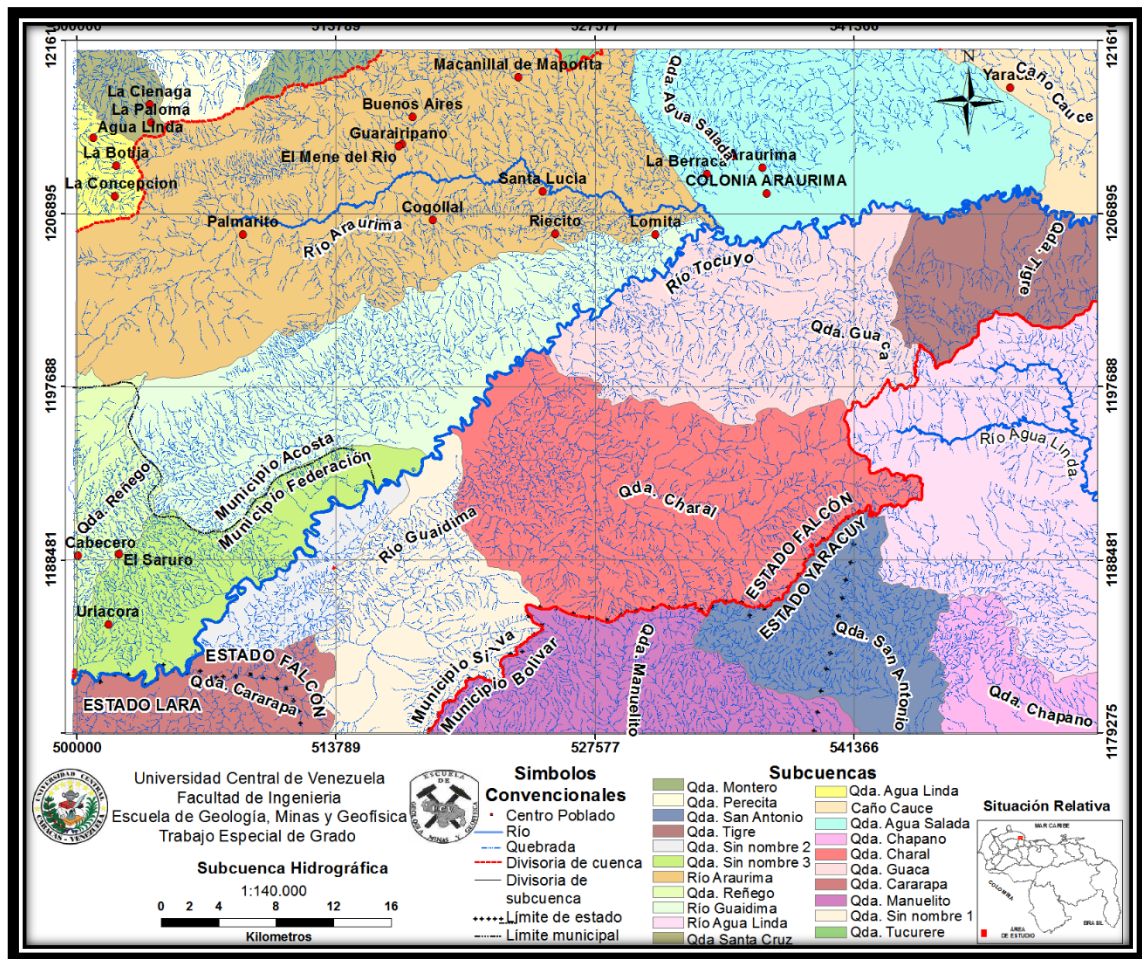


Figura 5.24 Subcuencas correspondientes a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).

Para la identificación de los rasgos litológicos se le dio mayor importancia al estudio de la forma, densidad y uniformidad de los arroyos de pequeño orden, que a los ríos principales, dados que aquellos están íntimamente relacionado con las principales características de las rocas sobre las que corren, mientras estos últimos son un reflejo de una serie de factores que abarcan a toda la zona, independientemente de la litología de cada tramo en particular. El patrón de drenaje más frecuente en la zona de estudio es dendrítico formados por arroyos que se van ramificando en forma arborescente; tal es el caso de la parte alta de la subcuenca Qda. San Antonio, el mismo, presenta textura fina, densidad alta y uniformidad homogénea lo cual es indicativo de

que la presencia de la pendiente en ese sector es uniforme y compuesta de materiales muy homogéneos (Figura 5. 25).

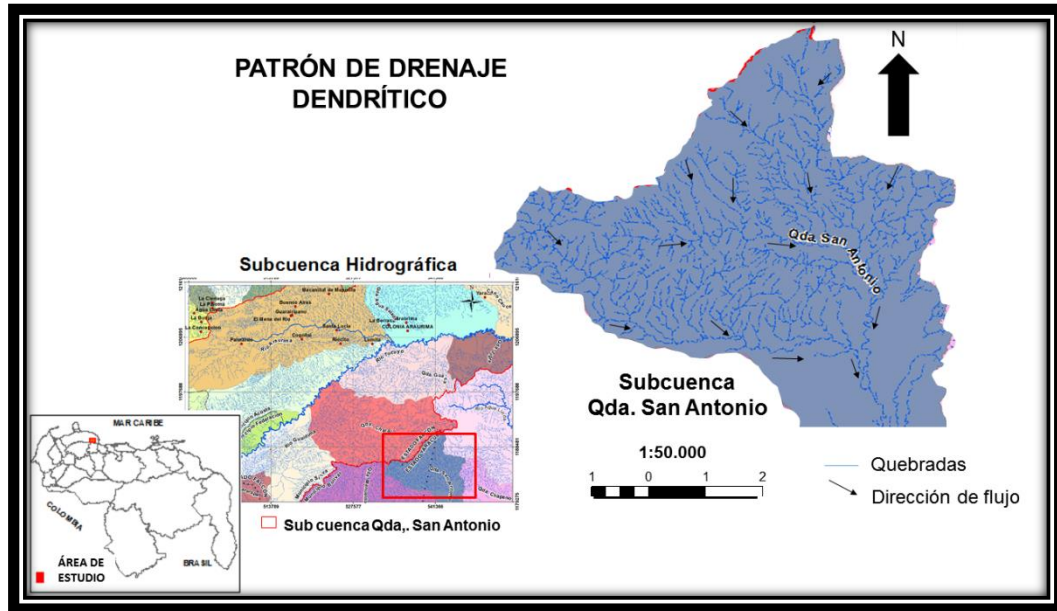


Figura 5.25 Patrón de drenaje dendrítico.

Respecto a la capa de densidad de drenaje; se tomó en cuenta lo establecido por Gamboa (1986), es decir, se determinaron tres rangos de densidad: Baja, media y alta, siendo la densidad alta la predominante en la zona de estudio (Figura 5.26).

Con la delimitación de la densidad de drenaje se pudo establecer contactos litológicos e inferir la litología a la cual corresponde, como es el caso al NO de la zona de estudio. En ese sector, se pudo evidenciar con facilidad tres zonas con diferente densidad de drenaje. La zona A; comprendida por los poblados Uriacora, Cabecero, El Saruro, Cogollal, Riecito y Lomita, presenta uniformidad y densidad alta en dirección NE-SO. Por su parte, la densidad de la zona B es baja y el espaciado entre los arroyos es alta, la misma abarca los poblados Palmarito, Agua Linda, El Mene del Río, Guarairipano, Buenos Aires y Macanillal de Maporita. Finalmente, la zona C presente comportamiento similar a la zona A, salvo que el espaciado entre los arroyos es mayor,

este sector abarca los poblados La Concepción, La Botija, La Cienaga y La Berraca. El comportamiento del drenaje evidenciado en cada una de las zonas permitió inferir la permeabilidad y textura de los materiales característicos del relieve, ya que a mayor dureza y resistencia menor densidad y mientras más finos sean los materiales más tupida es la red (Figura 5.27).

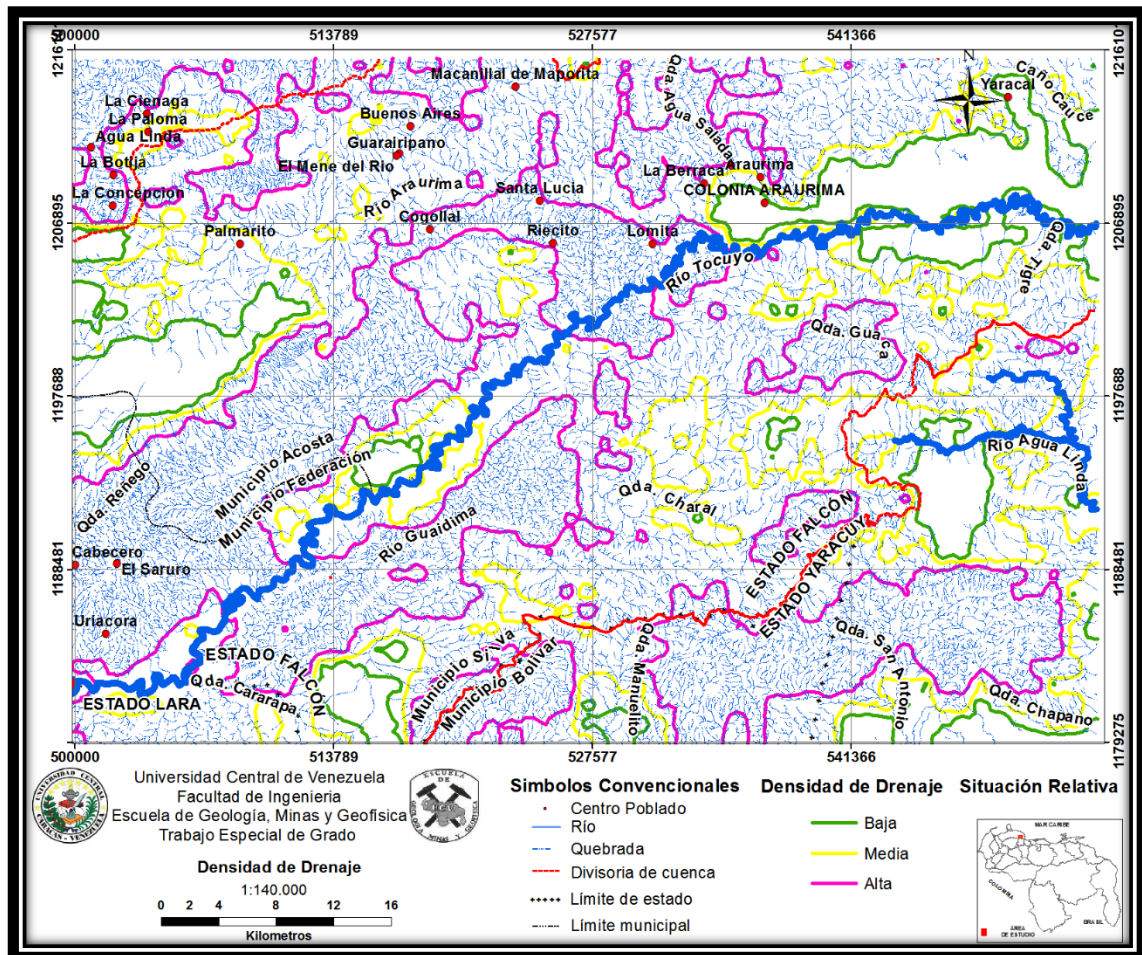


Figura 5.26 Densidad de drenaje correspondiente a la zona de estudio partiendo del Modelo de Elevación Digital (DEM).

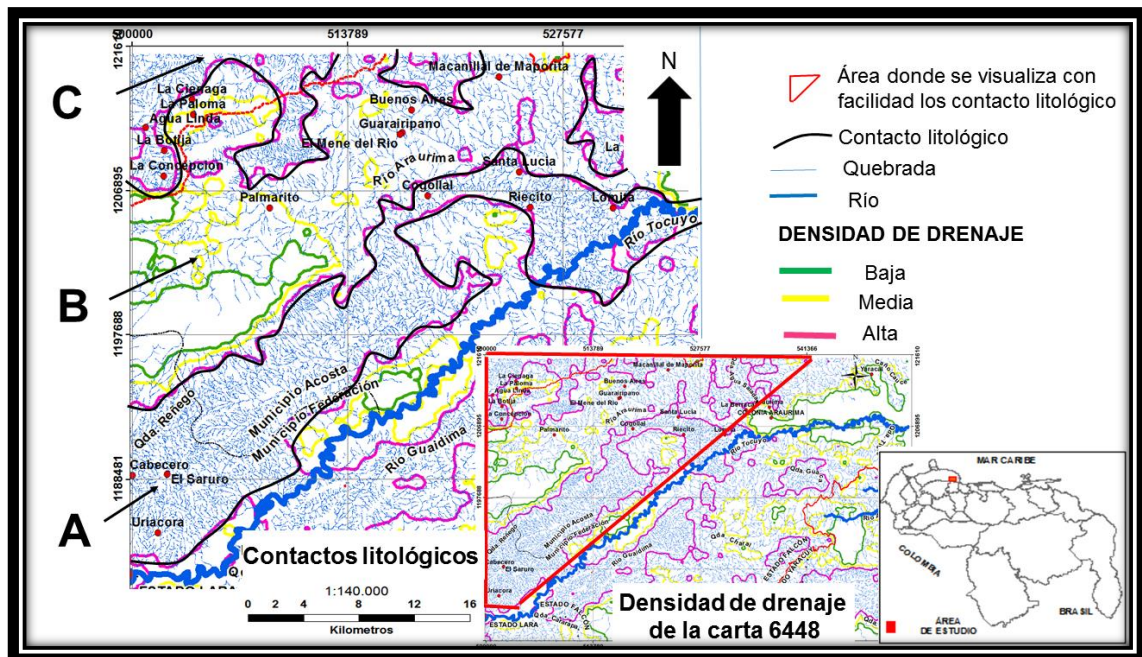


Figura 5.27 Delimitación de Contactos litológicos al NO de la zona de estudio evidenciados mediante la capa de densidad de drenaje.

El drenaje, además de evidenciar rasgos litológicos, también es un elemento esencial para el señalamiento de los elementos estructurales presente en la zona de estudio. Además del patrón dendrítico también se evidenciaron, en menor superficie, patrones: Paralelo, subparalelo y rectangular, ejemplo del patrón subparalelo se evidencia en la parte alta de la subcuenca Qda. Charal, cuyos arroyos están distribuidos de forma paralela, siguiendo la dirección de la pendiente y desemboca casi con el mismo ángulo al sitio de confluencia cuyo colector se encuentra en dirección ortogonal manifestando un fuerte control estructural, el cual conduce a un espaciamiento de ríos paralelos o sub paralelos indicando la presencia de posibles fallas o fracturas. (Figura 5.28). Por otro lado, las divisorias de agua de las cuencas y subcuencas permitieron la identificación de pliegues anticlinales, destacando que al NO de la zona de estudio la dirección preferencial de los ejes de pliegues es NE-SO, mientras que al E-SE la dirección preferencial es E-O. Finalmente, la evidencia de patrones de drenaje paralelo, subparalelo y rectangular también ayudaron en la identificación de pliegues.

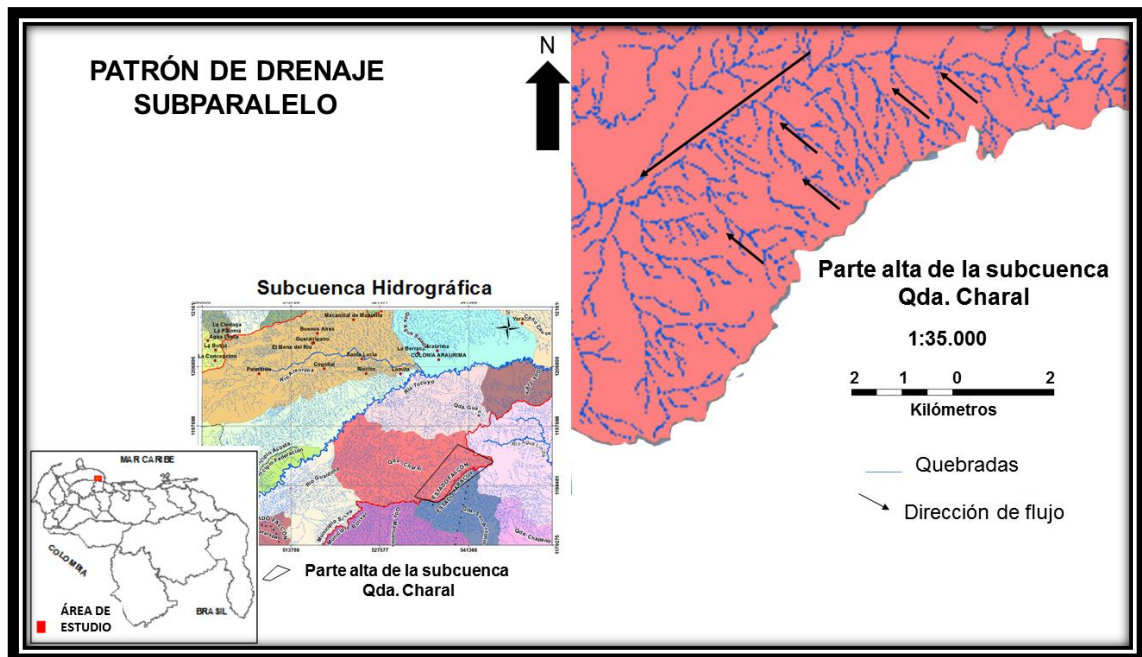


Figura 5.28 Patrón de drenaje subparalelo.

## V.2 PREPROCESAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Los resultados obtenidos que conciernen a esta etapa de la investigación consistieron en el pre y procesamiento de la imagen satelital LANDSAT-8 (LC08\_L1TP\_005053\_2016290\_LGN), los mismos se realizaron utilizando el *software* ENVI 5.3. Los subproductos y productos obtenidos proporcionaron una ayuda visual que permitió establecer rasgos topográficos, lineamientos de contactos litológicos y estructuras geológicas; lo cuales fueron comparados con los resultados reportados por otros autores en publicaciones, informes y tesis realizadas en la zona de estudio y zonas aledañas (Lozano & Mussari, 2007; Guzmán & Morillo, 2009; Nevado, 2012; entre otros).

Entre los resultados que corresponden al preprocesamiento de la imagen satelital LANDSAT-8 se tiene la corrección atmosférica y la elaboración de la máscara para nubes, los mismos se describen a continuación

### V.2.1 Corrección atmosférica o Imagen FLAASH

Es el primer subproducto generado durante la ejecución de la fase de pre procesamiento de la imagen. La aplicación de esta corrección permite generar una imagen más limpia, debido a que suprime los efectos de absorción y dispersión de los gases atmosféricos (Figura 5.29). Las imágenes con correcciones atmosféricas representan la base de todo subproceso, es decir a partir de esta imagen (Figura 5.30) se generaron otros resultados con distintos procedimientos (combinación de banda, clasificación supervisada y no supervisada, entre otros).

La imagen FLAASH obtenida (Figura 5.30) de acuerdo a la combinación R-G-B le concierne a las bandas 4-3-2 debido a que simula el color verdadero realzado. La misma muestran las diferencia y afectación de los gases atmosféricos en la calidad de los pixeles, permitiendo la corrección atmosférica el detallado de las características superficiales y espectrales.

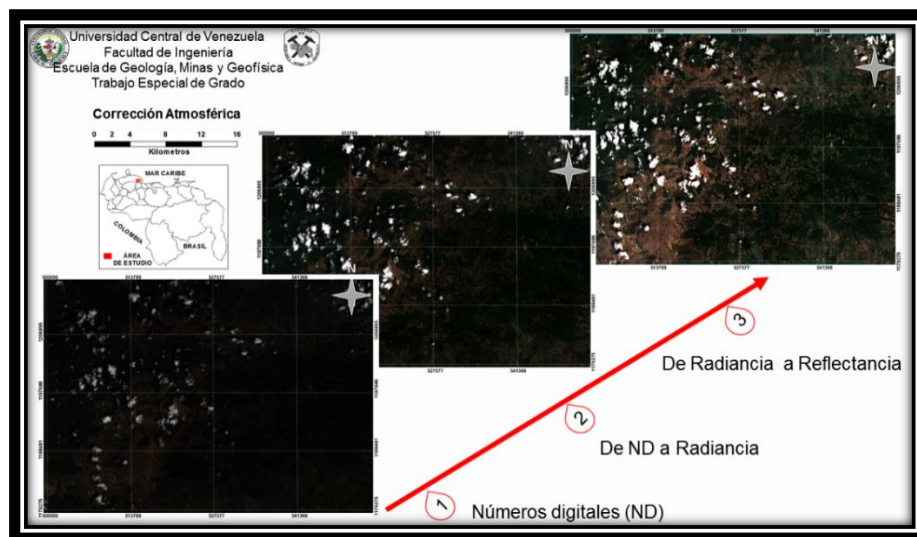


Figura 5.29. Comparación de la imagen LANDSAT-8 sin procesar y procesada (R-G-B: 4-3-2).

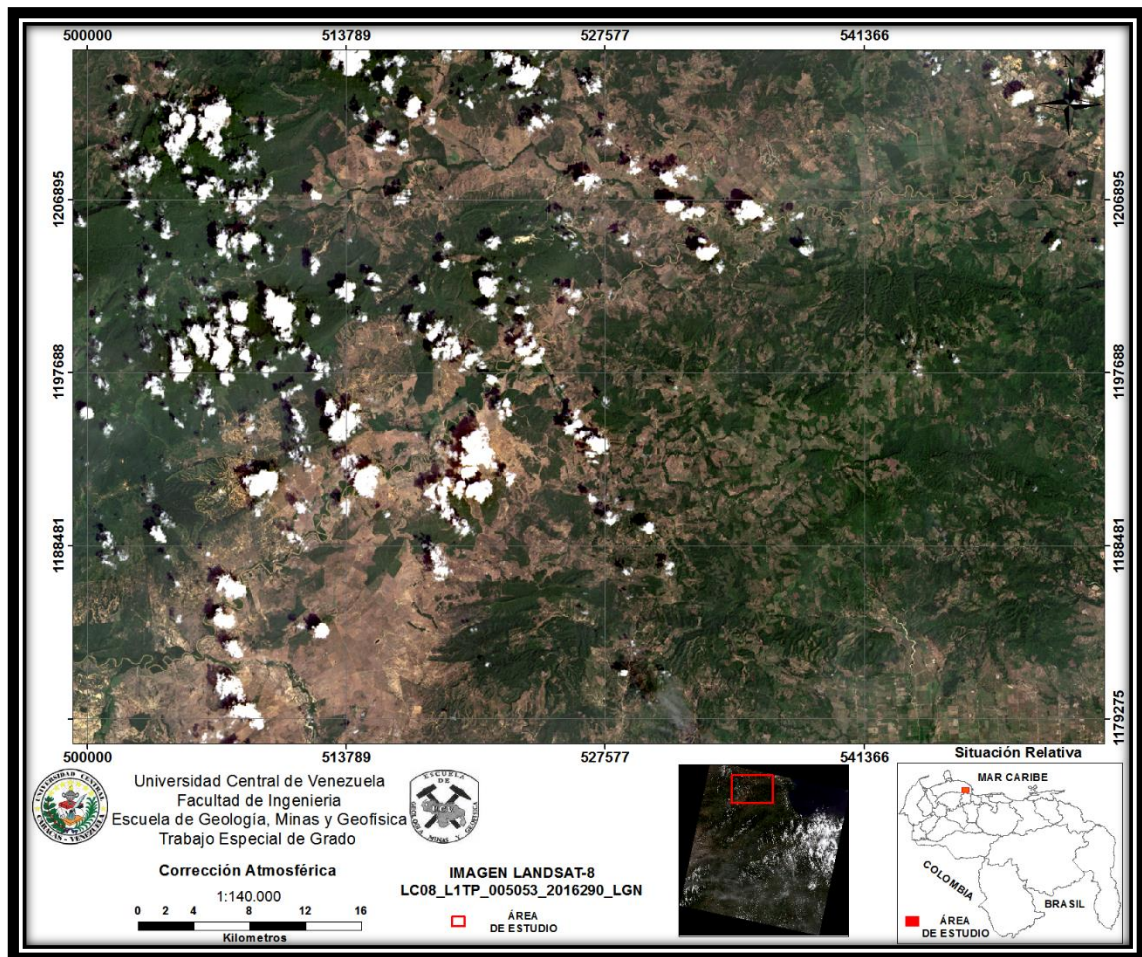


Figura 5.30. Imagen con corrección atmosférica o imagen Flaash correspondiente al área de estudio.

Para la eficacia de los productos posteriores a la corrección atmosférica se procedió a comparar la firma espectral de la imagen FLAASH de una zona cubierta por vegetación con la firma espectral obtenida de un espectro-radiómetro y así tener la certeza de que la imagen generada está corregida correctamente (Figura 5.31).

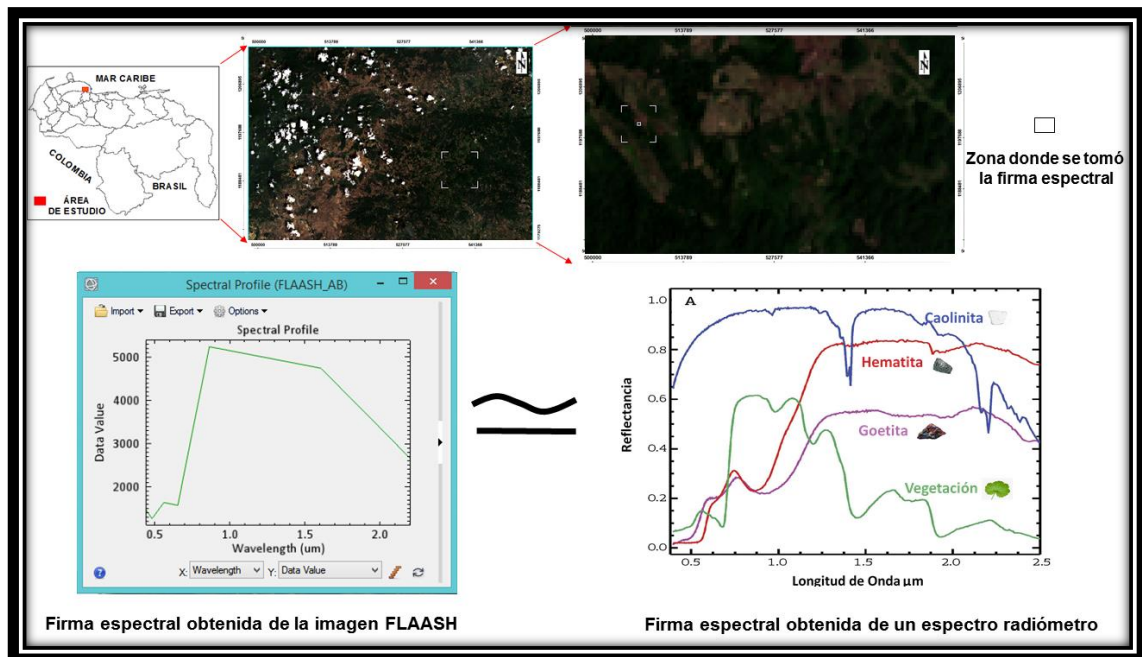


Figura 5.31. Comparación de firma espectral correspondiente a la vegetación.

## V.2.2 Elaboración de la máscara para nubes

La imagen satelital utilizada en esta investigación presenta nubosidad que oculta la información espectral del suelo o de las rocas, así mismo, las sombras de dichas nubes tienden a distorsionar la información espectral de interés geocientífico. Por tal razón, la imagen generada a través de la elaboración de la máscara para nubes (Figura 5.32) permitió cortar los pixeles perteneciente a las nubes y sombras (representado por el color negro en la Figura 5.32) para el procesamiento geostadístico de dicha imagen y así obtener productos y subproductos mucho más eficiente.

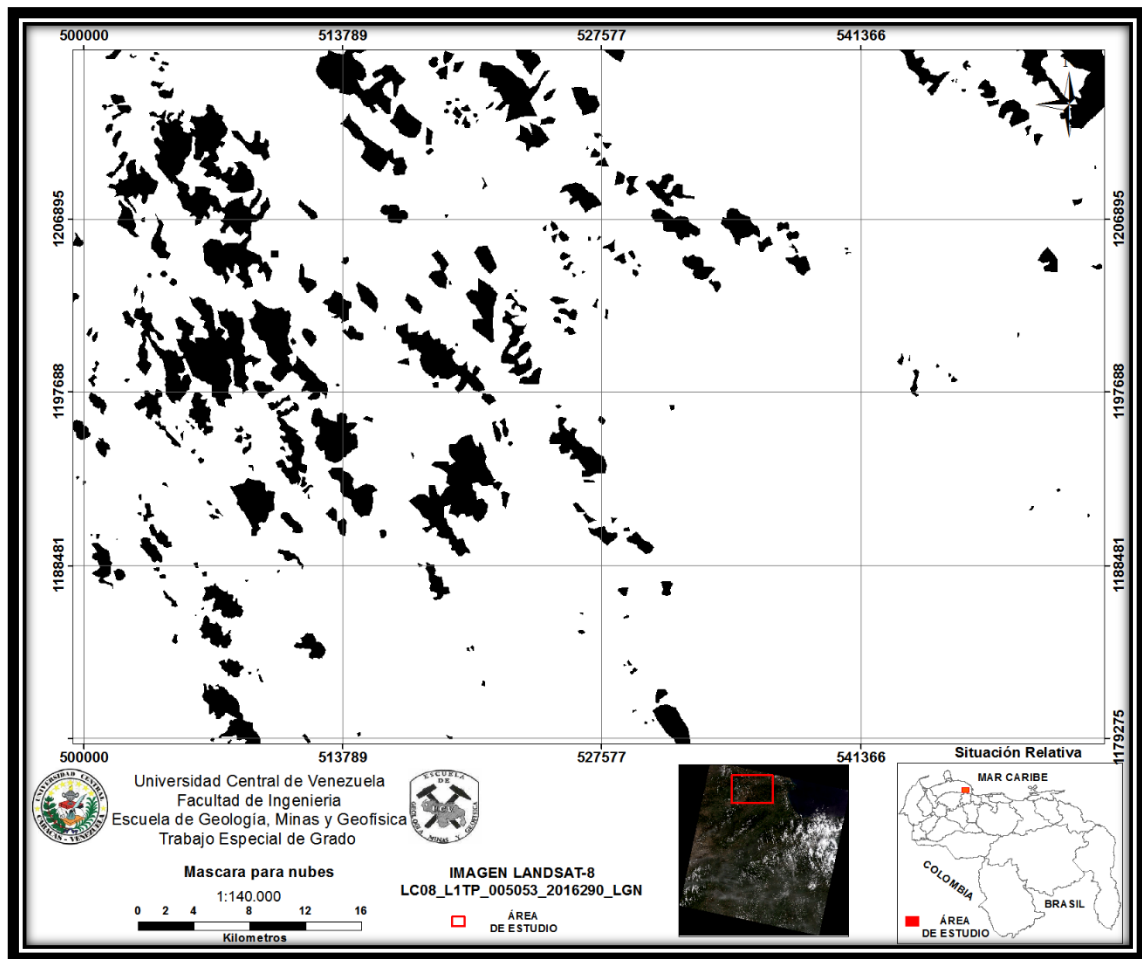


Figura 5.32. Elaboración de la máscara para nubes correspondiente al área de estudio.

La 11 bandas que contiene la imagen satelital utilizada en esta investigación permite definir, en la mayor parte de los casos, espectros continuos para cada pixel de la imagen, de forma similar a las curvas que podemos obtener con un espectro-radiómetro de laboratorio, con la diferencia de que en este caso solo medimos un punto, mientras la imagen nos proporciona una representación bidimensional de los espectros. En consecuencia, la forma más elemental de analizar dicha imagen es comparando los espectros que de ella se derivan con los que podemos obtener a partir de equipos de laboratorio o de bibliotecas espectrales disponibles al público. Por tal razón y tomando en cuenta los resultados obtenidos durante el preprocesamiento de la imagen se da pie

al procesamiento de la imagen satelital donde se pudo identificar la cubierta de un pixel comparando su espectro con otros de referencia.

Entre los productos obtenidos durante el procesamiento de la imagen se tienen: Tratamiento de la fracción mínima de ruido (MNF), índice de pureza de pixel (PPI), imagen con n-dimensiones, cartografiado de ángulo espectral (SAM), combinación y algebra de banda y clasificación supervisada y no supervisada. Los mismos se describen a continuación:

### **V.2.2.3 Imagen que procesa la fracción mínima de ruido (MNF)**

La aplicación de esta herramienta tiene como finalidad aplicar dos análisis de componentes principales (ACP) consecutivos: el primero basado en una estimación de la matriz de covarianza del ruido, esto permite eliminar redundancia y reescalar el ruido de los datos; el segundo es un ACP convencional de los datos ya depurados. El ruido se estima a partir de los componentes más marginales de los autovalores, centrando el análisis en aquellos que retienen la mayor parte de la información original (Green *et al.*, 1988: citado por Chuvieco, 1995). Este archivo es el primordial en los demás procesos y generación de los siguientes subproductos debido a que presenta una mejoría en la información espectral; esto es de gran utilidad para los procesamientos posteriores de las imágenes.

Al aplicar MNF a la imagen satelital LANDSAT-8 se obtuvo como resultado que las bandas de menor afectación por el ruido corresponden a las banda 1-2-3 mientras que las bandas más afectadas son la 6 y 7, las mismas se combinaron entre sí para apreciar la variación de colores y así poder realizar interpretaciones asociada a la litología presente en la zona de estudio. La imagen MNF que proporciona mayor información geológica corresponde a la combinación R-G-B: 4-3-2 (Figura 5.33). En ella se aprecia claramente las variaciones de colores, lo que está representando los posibles cambios litológicos.

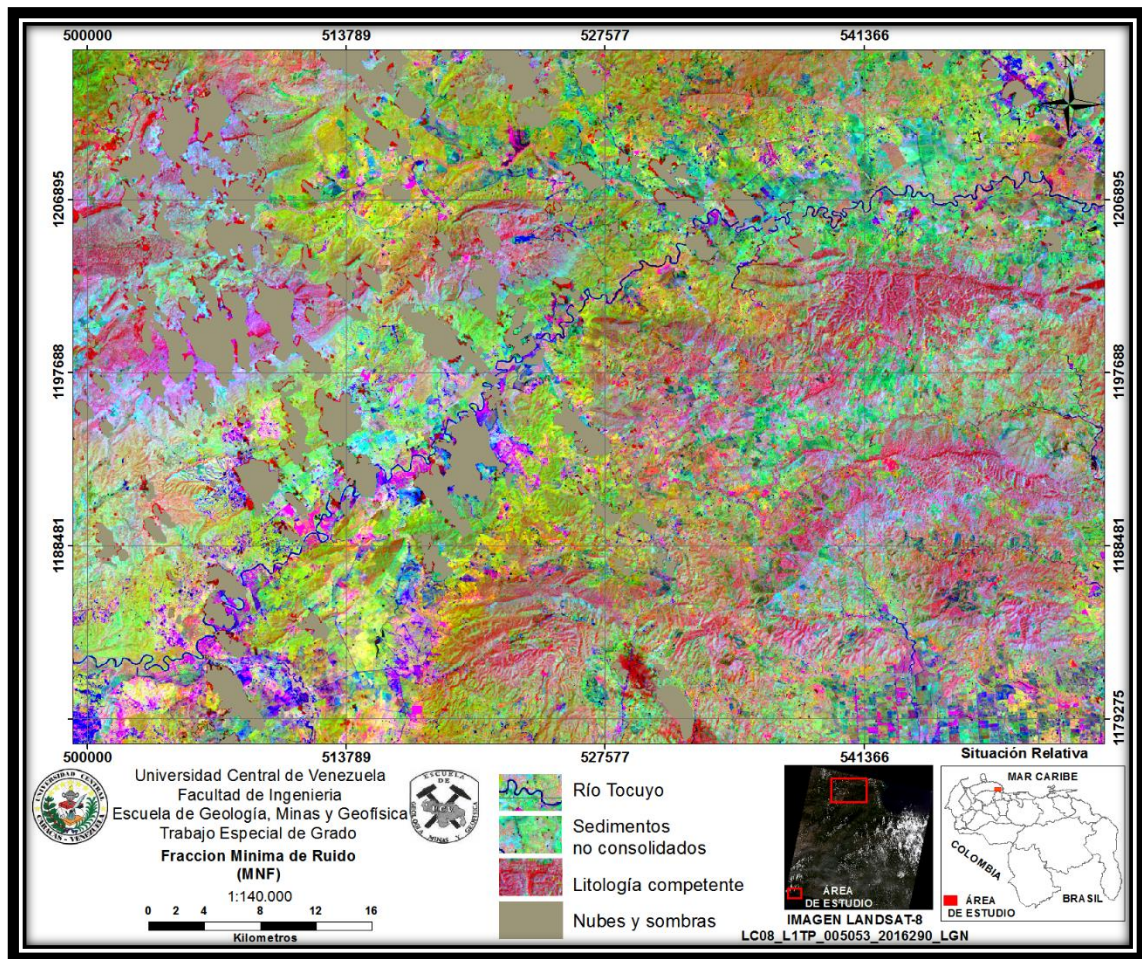


Figura 5.33. Imagen Fracción Mínima de Ruido (MNF) correspondiente a la zona de estudio partiendo de la imagen FLAASH (Combinación R-G-B: 4-3-2).

La imagen R-G-B 4-3-2 resalta en su combinación la separación de los sedimentos no consolidados, asociados a aluviones, de las rocas de mayor competencia. El límite lo define la agrupación de píxeles rojizos en la parte central de la imagen, estos coinciden con el contacto de los sedimentos del Cuaternario con las Formaciones del terciario. Además de lo anterior, la imagen resalta accidentes topográficos logrando identificar algunas líneas de crestas. Finalmente, por medio de las tonalidades de pixel se puede observar de una mejor manera esas características que no son de tipo litológicos sino de la geomorfología del terreno arrojando también información donde se puede caracterizar alguna estructura geológica (Figura 5.34).

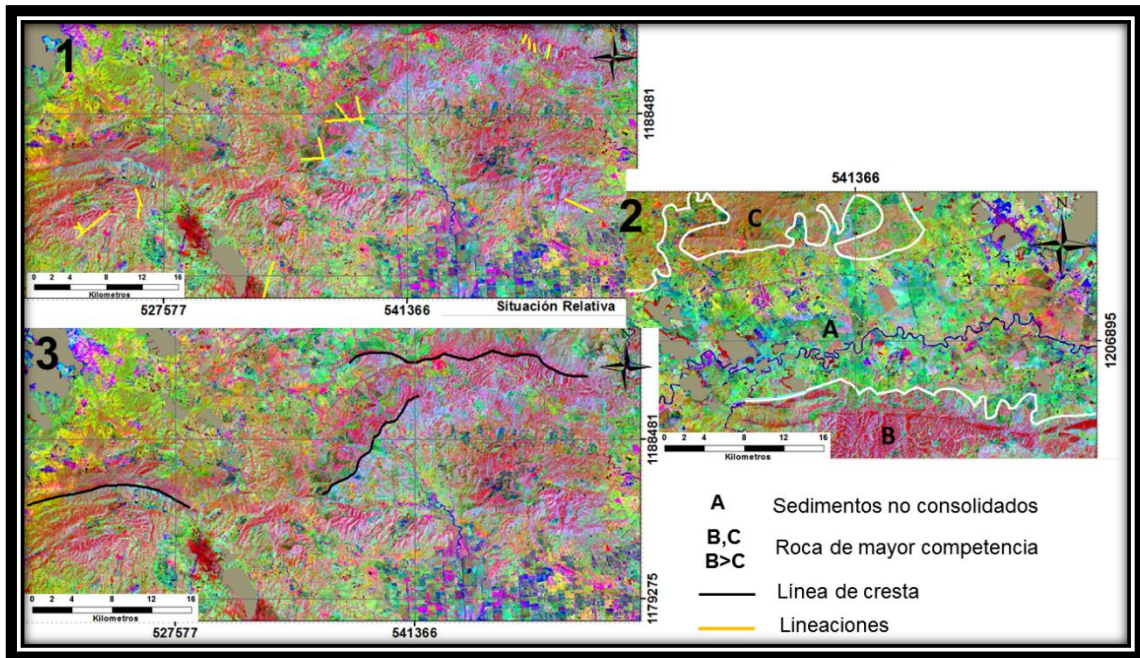


Figura 5.34. Imagen MNF con combinación R-G-B: 4-3-2. En las imágenes se destacan lineaciones (1), cambios litológicos (2) y accidentes topográficos (3).

#### V.2.2.4 Resultados del índice de pureza de píxel (PPI)

El método parte de representar la nube de puntos de una determinada imagen en un espacio n-dimensional, que se va re proyectando aleatoriamente. En cada iteración se anotan los píxeles extremos de esa nube, señalando los más puros como aquellos que alcancen con mayor frecuencia la condición de extremo (Chuvieco, 1995).

La imagen del índice de pureza de píxel generada (Figura 5.35) representa los números digitales de cada píxel que se corresponde con el número de veces que un píxel fue registrado como extremo. El resultado obtenido tras la aplicación del producto PPI a la imagen muestra una distribución de píxeles con presencia de una menor densidad (píxeles más oscuros) hacia la zona correspondiente al material de tipo aluvial y una mayor densidad (píxeles blancos) hacia la zona de litología más competente.

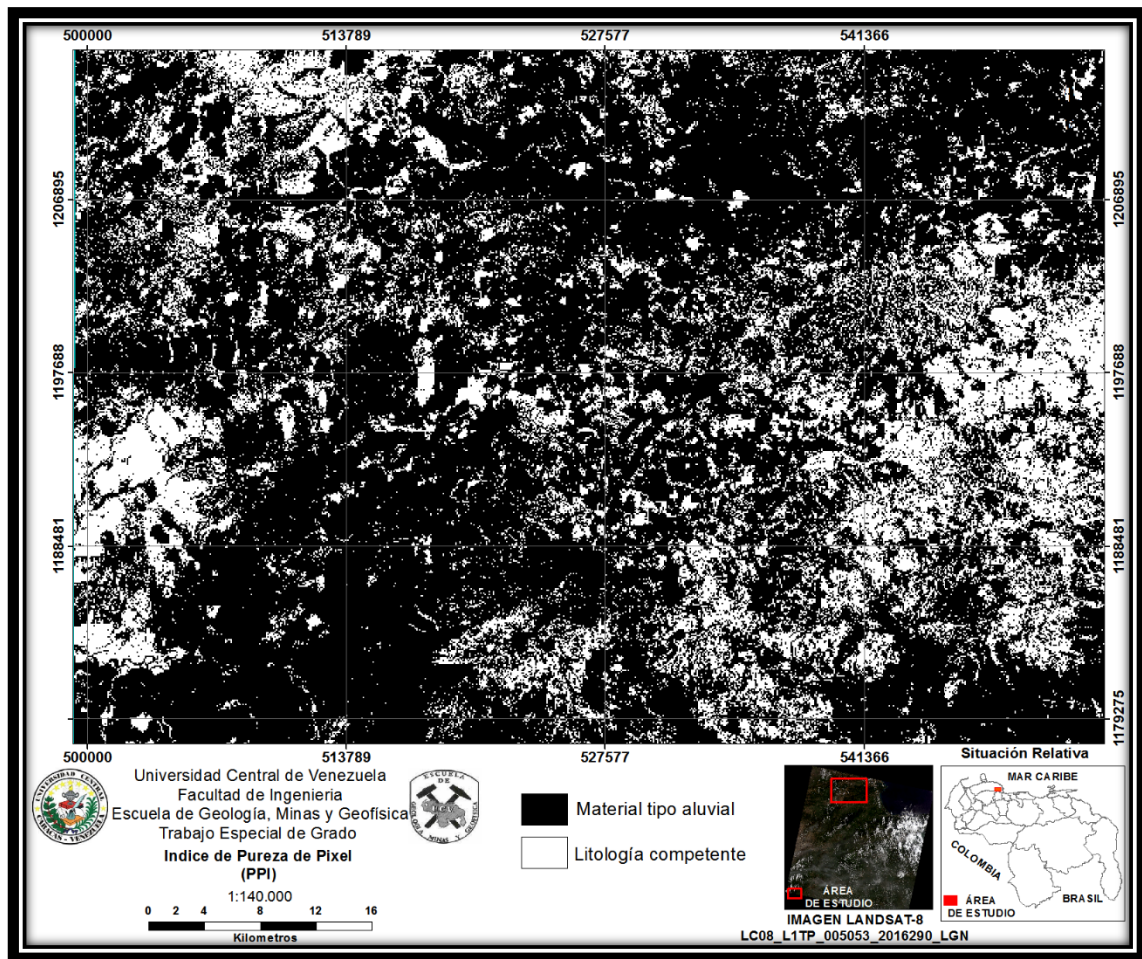


Figura 5.35. Imagen Índice de Pureza de Pixel (PPI) correspondiente a la zona de estudio partiendo de la imagen MNF.

### V.2.2.5 Imagen con N-dimensiones

Esta herramienta permite obtener los píxeles puros a través de la distribución del espectro, así como sus firmas espectrales. El cual consta de un visualizador donde se selecciona los píxeles más alejado de la nube espectral, es decir, cada banda genera un eje con una concentración de píxeles, los píxeles más puros son los más alejados del grupo (Chuvieco, 1995). Este subproducto sirvió para agrupar en clases los píxeles puros que conforman la imagen, para posteriormente aplicar el procedimiento del cartografiado del ángulo espectral a las clases identificadas en este proceso. Para esta

investigación se determinaron automáticamente ocho clases (Figura 5.36) que posteriormente se utilizaron en el Cartografiado del Ángulo Espectral (SAM).

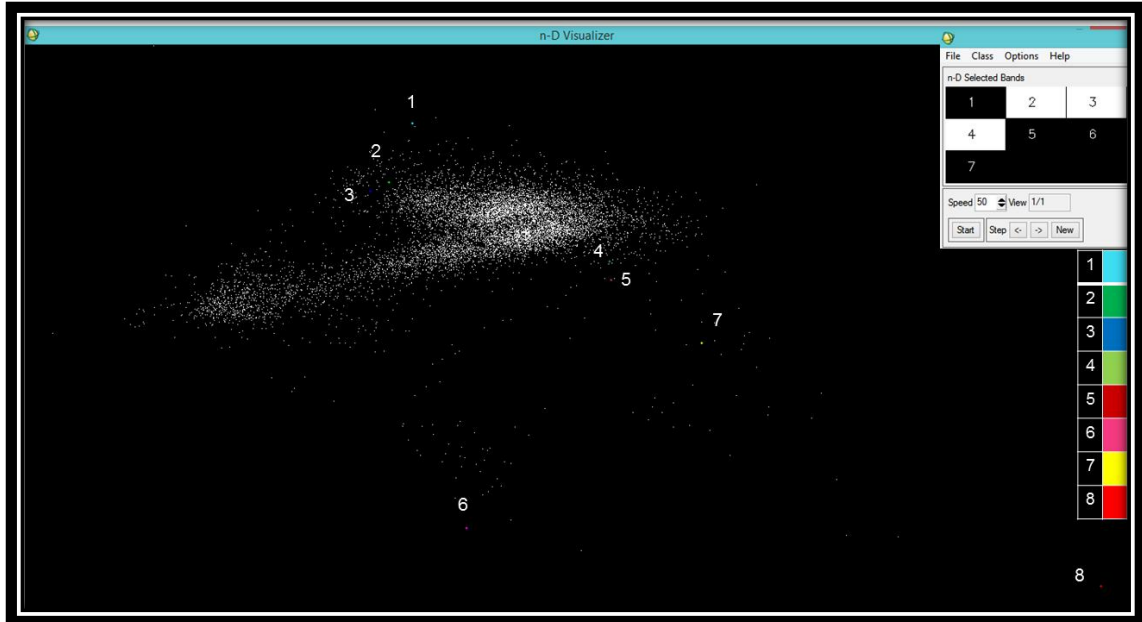


Figura 5.36. Nube de puntos correspondiente a los píxeles de la imagen. Los píxeles de colores diferentes al blanco corresponden a los píxeles extremos.

### Cartografiado del ángulo espectral (SAM)

La imagen SAM es el paso final de los procedimientos anteriores. El clasificador angular (*Spectral Angle Mapper*, SAM) calcula la similitud entre dos espectros a partir de su desviación angular, asumiendo que forma dos vectores en un espacio m-dimensional (siendo m el número de bandas disponibles). Es decir, es un método que compara espectros desconocidos con otros de referencia, ya sean tomados de la misma imagen o tomados de la biblioteca espectral (Chuvieco , 1995).

El resultado generado del *Spectral Angle Mapper* se utilizó para determinar el contenido mineralógico de la zona de estudio por medio de las firmas espectrales de minerales de los cuales se tenía conocimiento que se encontraban en la zona, desafortunadamente el mismo no arrojó ninguna respuesta positiva para la realización

de la caracterización mineralógica de la zona debido a la gran cobertura de vegetación. Sin embargo la imagen SAM se aprovechó visualmente donde se aprecia las variaciones de colores, lo que está representando los posibles cambios litológicos (Figura 5.37).

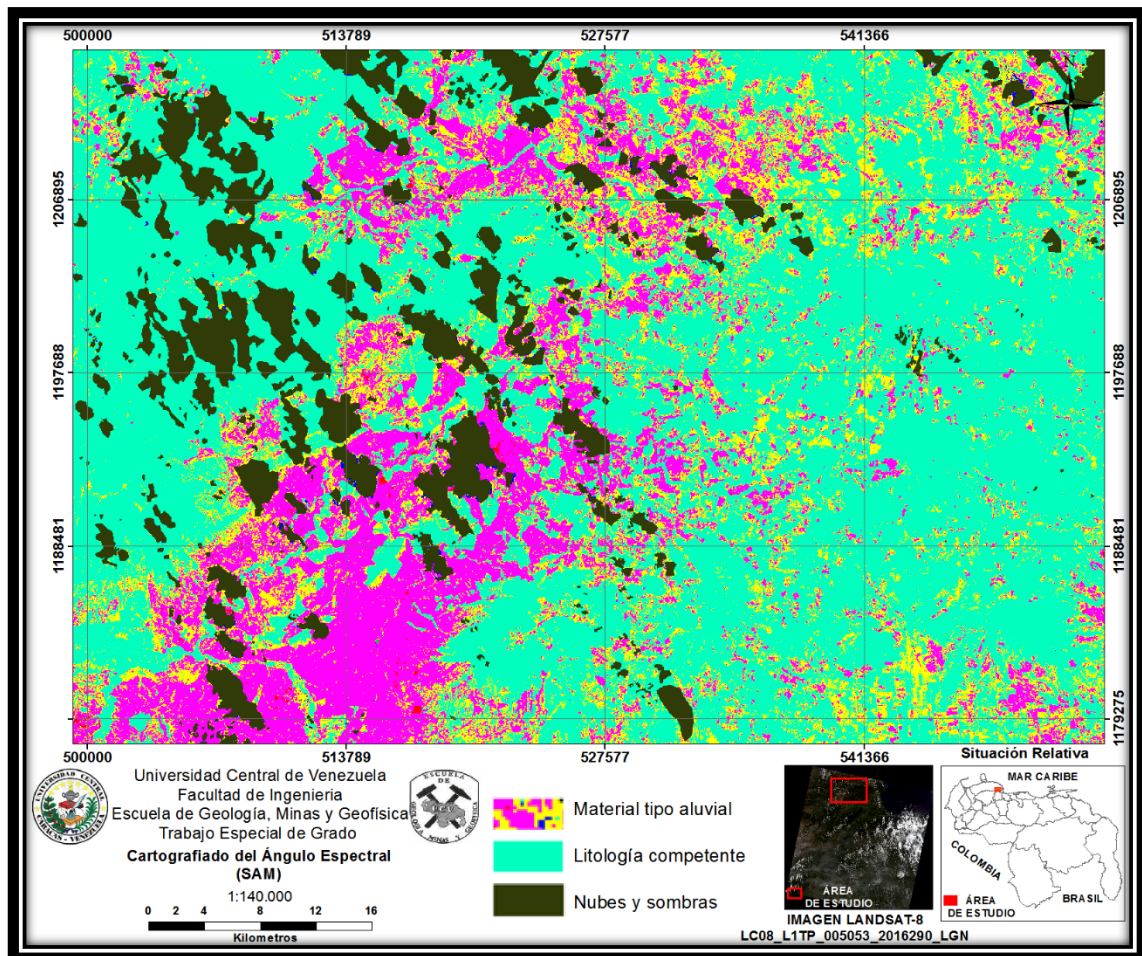


Figura 5.37. Imagen Cartografiado del Angulo Espectral (SAM) correspondiente a la zona de estudio, generada con clases de bandas asociadas a la litología.

## V.2.6 Combinación y Álgebra de bandas

Las imágenes con corrección atmosférica además de ser utilizadas desde el punto de vista visual también son utilizadas para combinaciones R-G-B específicas en las que se desean resaltar características de la superficie. Para efecto de esta

investigación se seleccionaron para trabajar aquellas combinaciones y cocientes de bandas con contenido temático más útil tales como zonas de aluviones, cuerpos de agua, contraste de litología, entre otros, ya que de acuerdo a sus características proporcionaban mayor información visual a los elementos geológicos.

Con las diferentes combinaciones se pueden inferir y corroborar por medio de las tonalidades de píxeles las formaciones geológicas referidas por otros autores (Creole, 1968; Guzmán & Morillo, 2009; y FUNVISIS, 2013), debido a que cada combinación da realces de colores diferentes asociados a los componentes físicos que no son percibidos con otras herramientas de sensoramiento remoto (imagen de radar, fotografías aéreas y MDIS), y esta información logra sugerir donde pueden haber un cambio de litología, donde puedan ser aplicadas las evaluaciones de las firmas espectrales y corroborar si existen diferentes características de la superficie.

Las combinaciones de bandas utilizadas son propias del autor cuyos criterios están basados en la longitud de ondas que le concierne a cada banda, la información a la cual está asociada (vegetación y humedad) y en los aspectos físicos naturales presente en la zona de estudio (relieve, drenaje, clima, vegetación y suelo). En consecuencia las permutaciones de mayor utilidad corresponden a las banda 4, 5, 6 y 7, dando como resultados imágenes con las siguientes combinaciones R-G-B: 5-6-4, 5-4-3, 6-4-5, 7-6-3. (Figura 5.38); y 5/4-6/7-4/3, 4/2-6/5-6/7, 6/4-5/7-3/5 y 4/6-6/7-7/5. (Figura 5.39). Por su parte, la interpretación visual de las diferentes imágenes generadas por la combinación de banda se realizaron en base a la recopilación bibliográfica realizada durante la investigación (Tabla 5.3 y Figuras 5.40 y 5.41). Finalmente, es importante acotar que debido a la gran área de la zona de estudio (2006 km<sup>2</sup>) y a la resolución de la imagen satelital (15 m pixel) las observaciones visuales solo se logran apreciar en el texto con un zoom mayor a 250%.

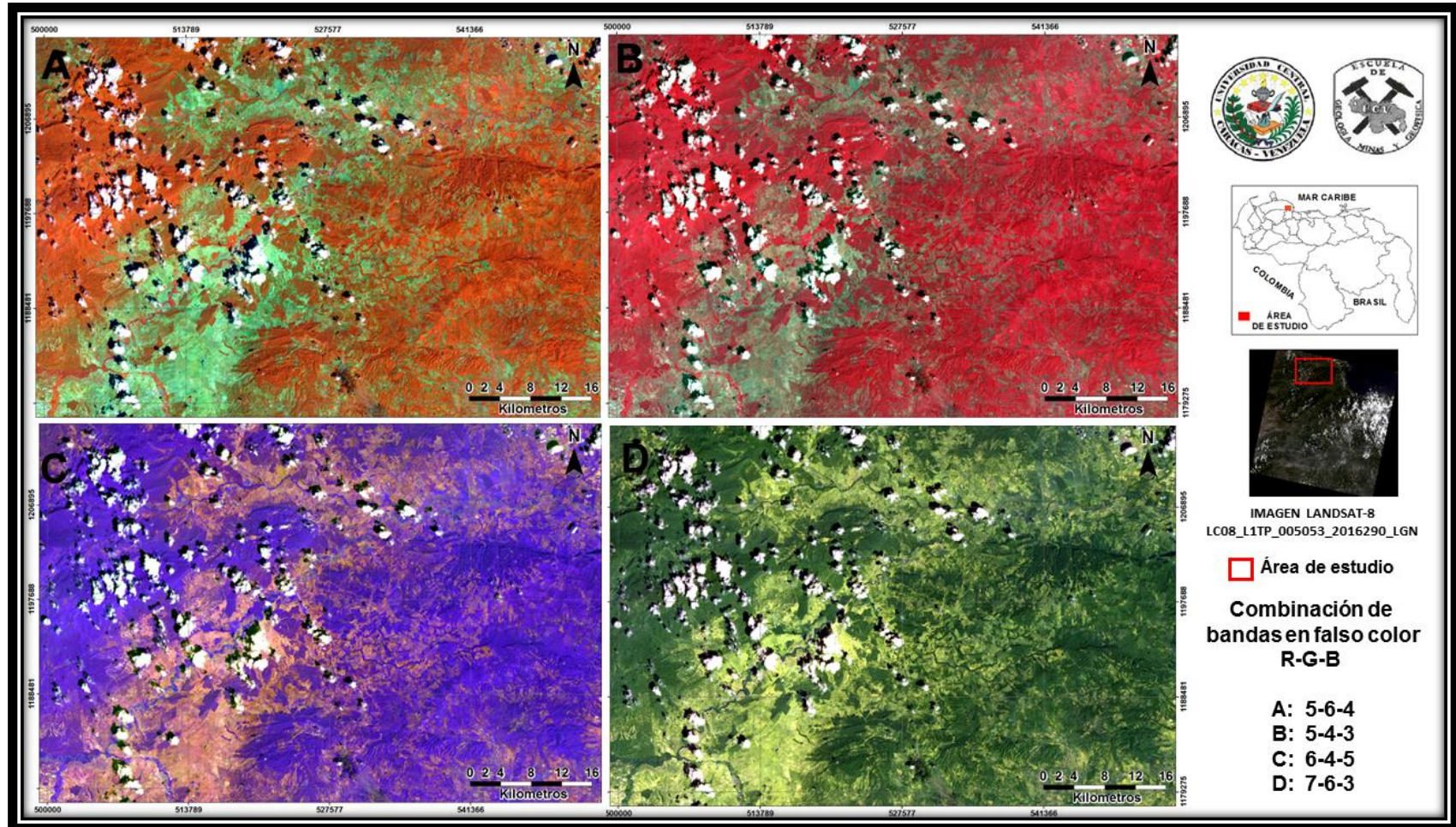


Figura 5.38. Comparación visual entre las diferentes combinaciones de bandas en falso color, R-G-B: 5-6-4, 5-4-3, 6-4-5, 7-6-3.

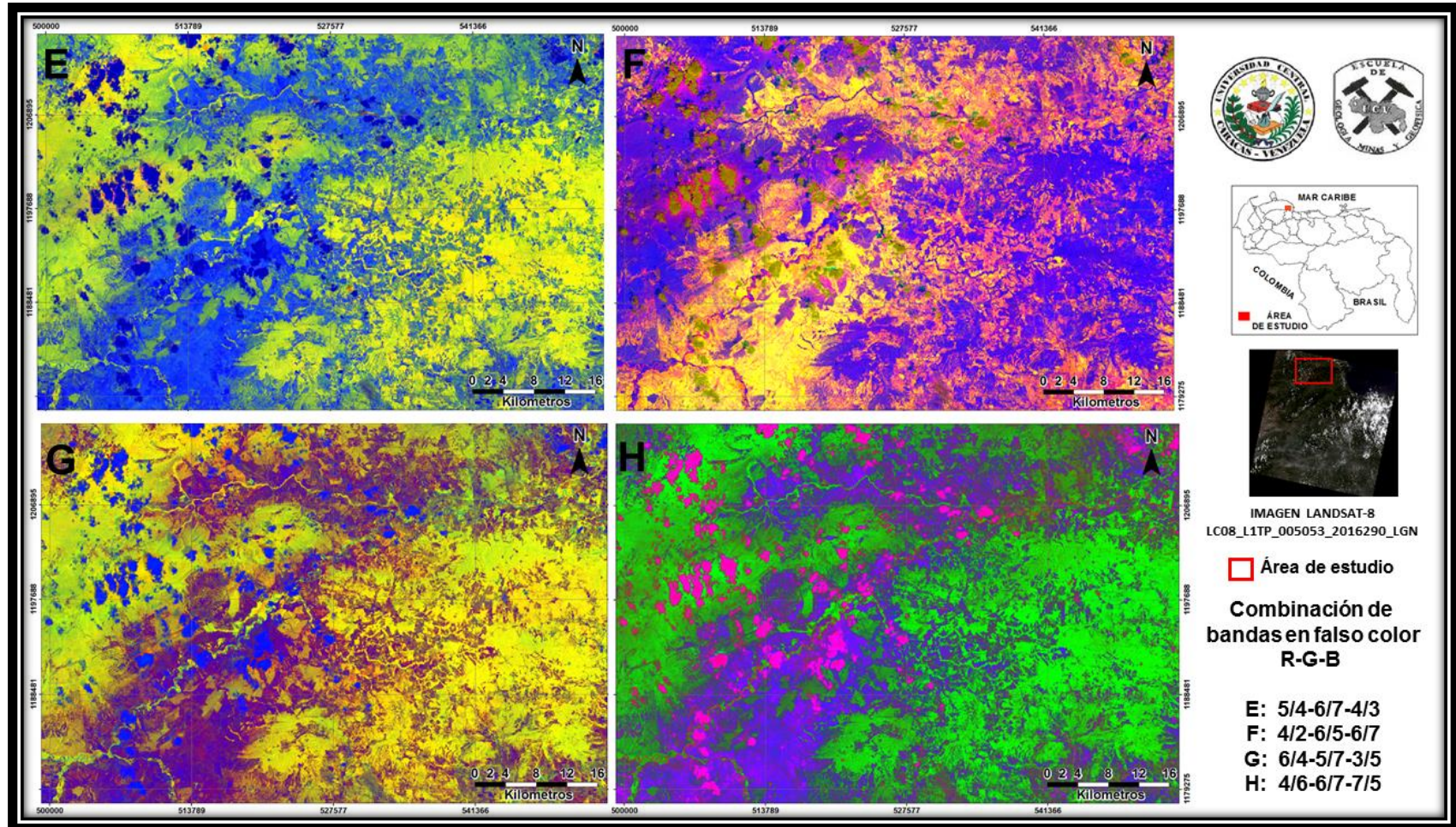


Figura 5.39. Comparación visual entre las diferentes combinaciones de bandas en falso color, R-G-B: 5/4-6/7-4/3, 4/2-6/5-6/7, 6/4-5/7-3/5 y 4/6-6/7-7/5.

Tabla 5.3. Descripción de las combinaciones de bandas utilizadas en la investigación.

Imagen	R-G-B	Aporte a la Investigación
A	5-6-4	Esta combinación fue de mucha utilidad para la identificación y ubicación de drenajes, accidentes topográficos y lineaciones dentro del área de estudio debido a que se logran apreciar los cauces (río Tocuyo y Araurima), el relieve topográfico y anomalías en él (diferencia entre relieve alto y bajo). Adicionalmente, con esta combinación fue posible establecer contactos entre litologías, pues en ella se aprecian cambios de color que indican tales variaciones (el color agua marín asociado a sedimentos no consolidados y el color rojizo asociado a litología competente).
B	5-4-3	En la imagen generada con esta combinación se aprecia el drenaje (río Araurima) y el vigor de vegetación en tonos rojizos, donde los tonos más oscuros indican mayor vigor. Las zonas con contenido de humedad se muestran en tonos verdes y está asociado a sedimentos no consolidados.
C	2-4-6	En esta imagen se resaltan diferencias en litología y textura en tonos violeta. Por otro lado, las zonas con contenido de humedad se muestran en tonos ocre y el drenaje principal (río Tocuyo) en color verde. La textura y rugosidad visualizada con esta combinación permite observar algunas lineaciones presente en la zona de estudio.
D	7-6-3	Con esta combinación se aprecia la delimitación de la topografía entre la zona alta (verde oscuro) de las zonas bajas (verde claro). Además resalta los cambios de vegetación presente en la zona de relieve alto; los mismo son observados de acuerdo a la intensidad del color verde, a mayor intensidad mayor vegetación, resultando de mucha utilidad para identificar las variaciones de litologías que componen la zona de estudio.
E	5/4 6/7 4/3	Las imágenes obtenidas con estas combinaciones arrojaron resultados semejante a las combinaciones descrita anteriormente. Sin embargo se puede agregar que la delimitación de cuerpos litológicos entre el Cuaternario (sedimentos no consolidados) y el Terciario (litología competente) se aprecia de forma más detallada y coincide con lo cartografiado por la Creole (1968).
F	4/2 6/5 6/7	
G	6/4 5/7 3/5	
H	4/6 6/7 7/5	

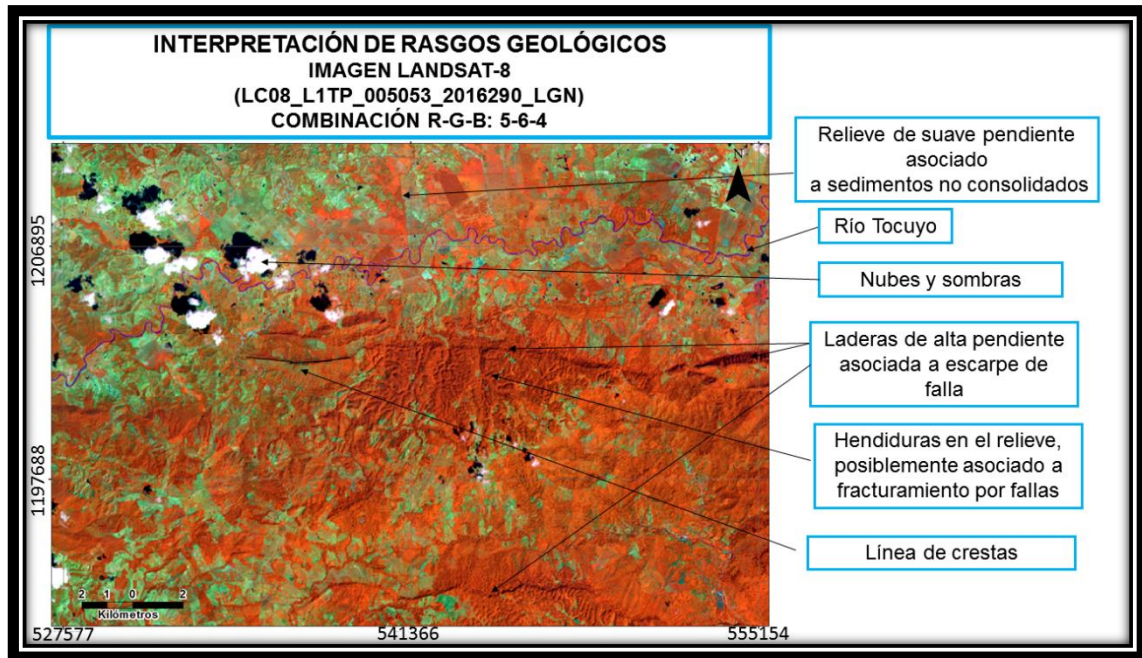


Figura 5.40. Ejemplo de rasgos geológicos, ubicado al centro-este de la zona de estudio mediante la interpretación de la imagen LANDSAT-8 R-G-B: 5-6-4.

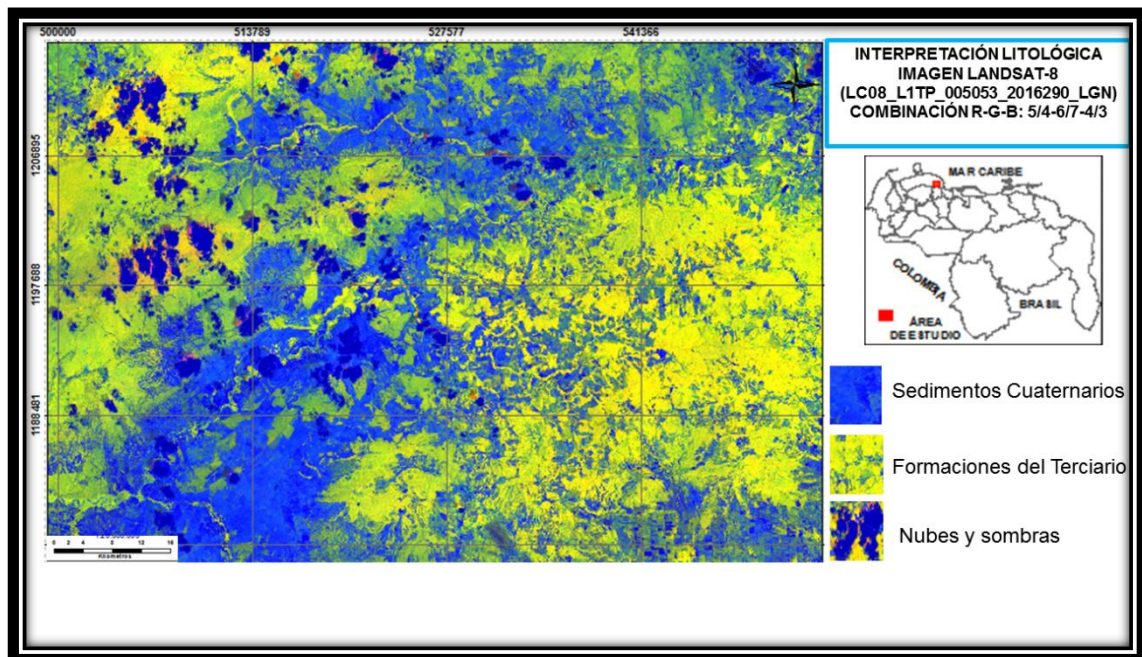


Figura 5.41. Interpretación litológica a través de la imagen LANDSAT-8 R-G-B: 5-6-4 5/4-6/7-4/3.

### V.2.7 Clasificación No supervisada

Es un método que permite organizar los píxeles con ciertas características similares en diferentes clases, con la finalidad de discriminar espectralmente y visualmente la imagen en elementos temáticos. En esta clasificación el algoritmo de procesamiento reconoce automáticamente clases espectrales sin conocimiento previo del área. La clasificación No supervisada muestra como resultado una agrupación de píxeles de características similares en un tono de color específico (Chuvieco, 1995). Para efecto de esta investigación, la agrupación de píxeles fue realizada para un número de 10 clases diferentes asignadas. Visualmente se aprecia una distribución espacial y geométrica de tonos de color agrupados por dureza de la litología presente, agrupando datos con contenido temático similar (Figura 5.42).

Al introducir el número de clases (10) para realizar la clasificación de la imagen LANDSAT-8 correspondiente a la zona de estudio, se obtuvo una variada distinción de litologías que van desde blandas hasta duras, pasando por clasificaciones intermedias como lo son litologías semi-blandas o semi-duras. La distinción de la misma se interpretó en función del tipo de relieve al cual está asociado, debido a que el relieve de topografía alta se asocia con rocas que presentan litologías de mayor resistencia a la erosión y meteorización, a diferencia del relieve de topografía baja el cual se asocia a rocas que presentan litología de menor o poca resistencia a los efectos de la erosión y meteorización. Por su parte al relieve intermedio se asociaron litologías que se encuentran comprendidas en la escala de dureza entre duro y blando.

Con base a lo anterior y a la superposición del mapa de la Creole (1968) se pudo discriminar de la imagen resultante lo siguiente:

Para el caso de la clase con píxeles de color negro los resultados están directamente asociados con las nubes y el color rojo a sus sombras. Por su parte la unión de píxeles anaranjados (20%), purpuras (45%) y agua marina (35%) están

relacionados a sedimentos no consolidados, mientras que los pixeles de color verde (30%), azul (30%), amarillo (20%), agua marina (10%) y púrpura (10%) a litología competente. Por otro lado, la clase con pixeles de tono anaranjado los resultados parece discriminar litología de granulometría muy fina asociados a limonitas y arcilitas en contraste de mayor resistencia como arenisca (clases de pixeles de color azul). Finalmente, la clase agua marítima está asociada con las áreas de actividad humana como corrales, sembradíos y algunas áreas pobladas (Figura 5.38).

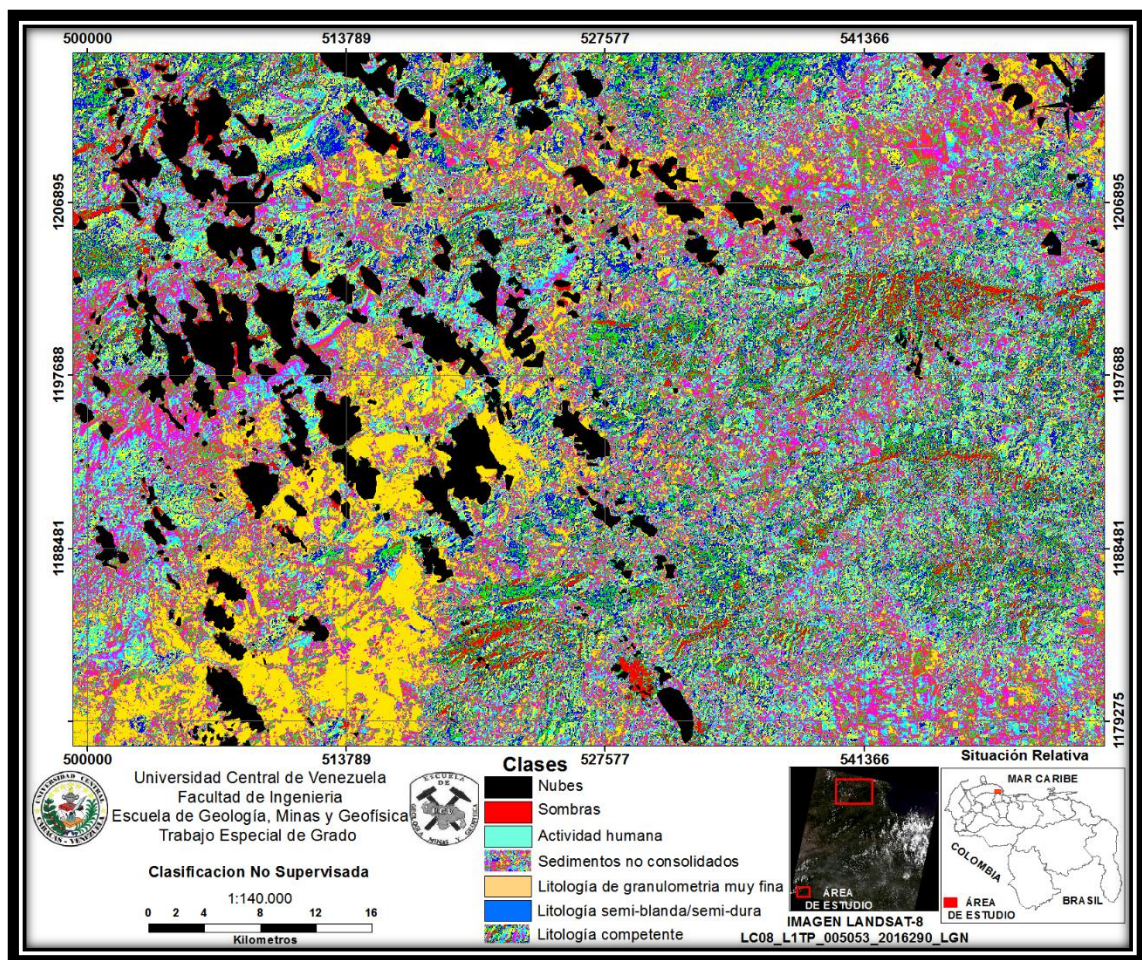


Figura 5.42. Imagen Clasificación No-supervisada correspondiente a la zona de estudio, generada en función de 10 clases.

## V.2.8 Clasificación supervisada

Es el proceso de ordenar los píxeles de una imagen en un número de clases conocidas por el usuario. Durante este procedimiento cada píxel de la imagen es asignado a una categoría de acuerdo a una serie de criterios. La clasificación supervisada a diferencia de la No- supervisada consiste en agrupar clases a partir de patrones conocidos, mientras que la segunda el algoritmo de procesamiento reconoce automáticamente clases espectrales sin conocimiento previo del área (Chuvieco, 1995).

Con la ayuda del mapa geológico de la Creole (1968), se estableció una relación entre la litología presente en el mapa con la observada en la imagen LANDSAT-8, lo cual generó como resultado siete clases que describen los diferentes tipos de litología pertenecientes a las Formaciones que conforman el área de estudio: Drenaje, Sembradíos, Vegetación, Sedimentos no consolidados, Litología 1, Litología 2 y Litología 3 (Figura 5.43 y Tabla 5.4). Cabe destacar que previo a la generación de este producto se le aplicó la máscara de nubosidad a la imagen corregida atmosféricamente, con el objetivo de eliminar la incidencia de las nubes en el procesamiento de la imagen y así evitar asignarle a las nubes y sus sombras clases exclusivas que aunque no se relacionan con la litología afecta en el momento de demarcar dichas Formaciones.

Los resultados obtenidos respecto a la separabilidad espectral (Tabla 5.5) fueron eficientes para las clases de drenajes, sembradíos y vegetación, es decir estas clases no lograron confundirse con otras clases y su expresión visual muestra diferencia entre ellas. Por su parte, las clases correspondiente a las distintas litologías presente en el área de estudio (sedimentos no consolidados, L1, L2 y L3, asignada por el autor) no lograron diferenciarse por completo una de la otra ya que el programa no contó con suficiente información espectral para separarla, este es debido a que la zona de estudio presenta una cobertura vegetal muy densa lo que hace difícil mediante imagen satelital LANDSAT-8 observar roca desnuda.

Por su parte, la matriz de confusión (Tabla 5.6) arrojó un 87,7816% de píxeles bien clasificados y un coeficiente de capa de 0.6540, lo que es indicativo de que algunas clases asignadas se confunden entre ellas (Litología 1,2 y 3) y es por esto que la interpretación visual desde el punto de vista litológico no fue de gran ayuda para las delimitaciones de las Formaciones presente en el área de estudio. Sin embargo, con el resultado obtenido mediante la clasificación supervisada se pudo delimitar las formaciones del Cuaternario y Terciario y a su vez la clase correspondiente a sembradíos permitió discriminar la delimitación del Cuaternario.

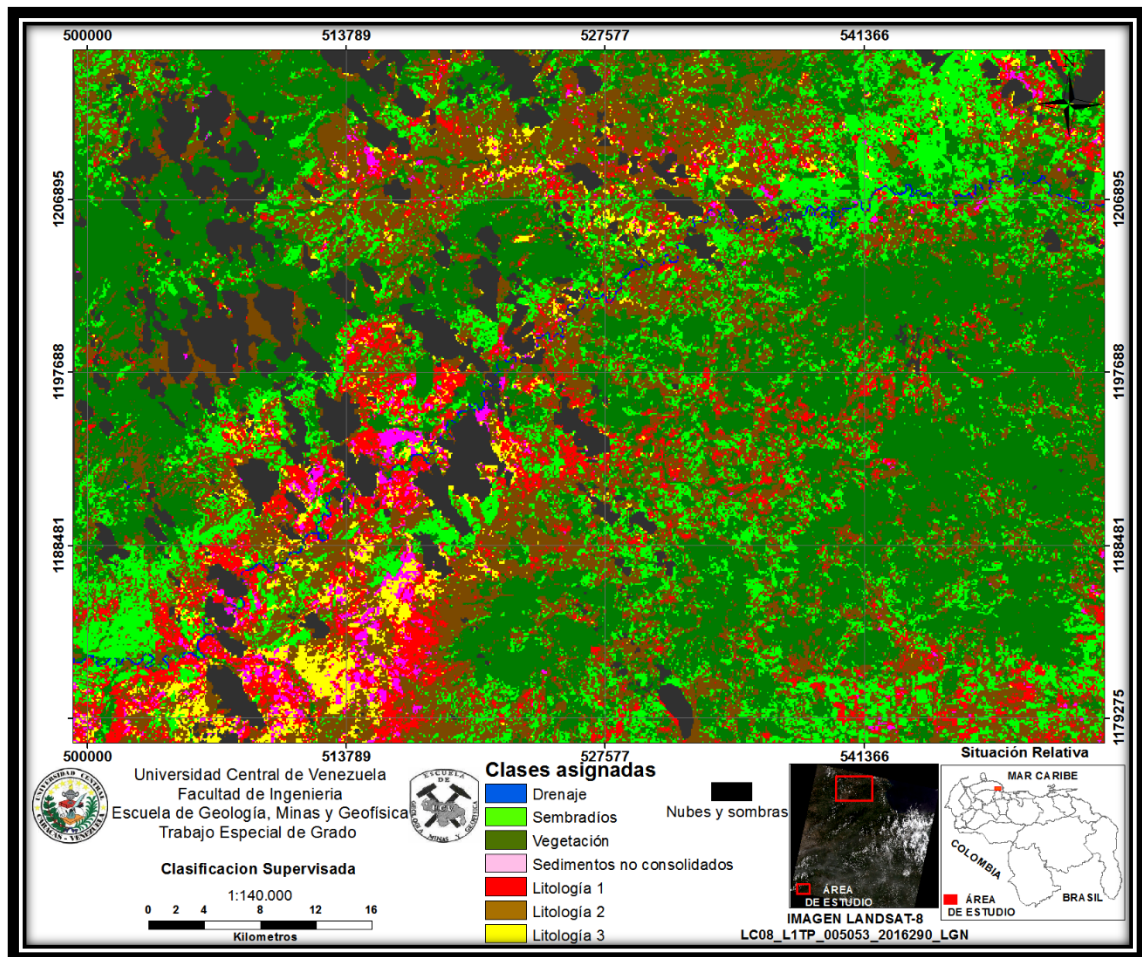


Figura 5.43. Imagen Clasificación Supervisada correspondiente a la zona de estudio, generada en función de 7 clases con características conocidas.

Tabla 5.4. Descripción de las clases asignadas a la clasificación supervisada.








Color	Clase	Descripción
	Drenaje	Tiene la finalidad de delimitar los cauces principales correspondiente a la zona de estudio. Las regiones de interés se tomaron de la imagen FLAASH (R-G-B: 4-3-2).
	Sembradíos	El objetivo es separar los sedimentos recientes de aquellas áreas trabajadas por el hombre, su selección se basa en las imágenes FLAASH y Clasificación No-supervisada.
	Vegetación	El interés de esta clase es interpretar la relación que guarda la vegetación con la litología de alto contenido arcilloso. Esta clase es creada con la selección de píxeles extraídos de las combinaciones R-G-B: 7-6-3 y 4-3-2.
	Sedimentos no consolidado	La selección de esta clase se basó en los píxeles obtenidos de las combinaciones de cociente de bandas, donde se resaltan aluviones y sedimentos recientes con el objetivo de discriminar la litología del Cuaternario y Terciario.
	Litología 1	Con esta clase se pretende crear contraste en litologías correspondiente a los cuerpos ígneos-metamórficos presente en la zona de estudio correspondiente al Cretácico. Los píxeles de esta clase fueron extraídos de la Clasificación No-supervisada en conjunto con las imágenes MNF y FLAASH.
	Litología 2	Esta clase tiene la finalidad de hacer contraste con la formación Capadare (formadas por calizas) por su casi homogeneidad textural desde el punto de vista macro. Los píxeles fueron extraídos de la Clasificación No-supervisada, combinaciones de bandas e imagen FLAASH.
	Litología 3	Corresponde a las formaciones Ojo de Agua y Casupal por poseer litología similares (areniscas). Los píxeles fueron extraídos de la Clasificación No-supervisada y FLAASH.

Tabla 5.5. Descripción de la separabilidad espectral.

ROI Separability Report	
Pair Separation (least to most):	
Litologia 2 and Litologia 1	- 1.49612631
Litologia 3 and Sedimentos no consolidados	- 1.61659682
Litologia 1 and Sedimentos no consolidados	- 1.74784154
Litologia 3 and Litologia 1	- 1.77023284
Litologia 3 and Litologia 2	- 1.90528115
Litologia 2 and Sembradios	- 1.91326329
Litologia 2 and Sedimentos no consolidados	- 1.94890052
Litologia 1 and Sembradios	- 1.98014864
Litologia 2 and Vegetacion	- 1.99825479
Vegetacion and Sembradios	- 1.99875702
Litologia 3 and Sembradios	- 1.99918104
Litologia 1 and Vegetacion	- 1.99995268
Sedimentos no consolidados and Sembradios	- 1.99997819
Litologia 2 and Drenaje	- 1.99998307
Sembradios and Drenaje	- 1.99999711
Litologia 1 and Drenaje	- 1.99999985
Litologia 3 and Drenaje	- 1.99999997
Vegetacion and Drenaje	- 2.00000000
Sedimentos no consolidados and Drenaje	- 2.00000000
Litologia 3 and Vegetacion	- 2.00000000
Sedimentos no consolidados and Vegetacion	- 2.00000000

Tabla 5.6. Descripción de la matriz de confusión.

Class Confusión Matrix	
File	
Confusion Matrix: D:\Trabajo Especial de Grado\Digitalizacion\Imagen Satelital\	
Overall Accuracy = (1013/1154) 87.7816%	
Kappa Coefficient = 0.6540	
Ground Truth (Pixels)	
Class	Drenaje_test Sembrarios_te Vegetacion re Sedimentos no Litologia 1_t
Unclassified	0 0 0 0 0
Drenaje	18 0 0 0 0
Sembradios	0 29 0 0 0
Vegetacion re	0 0 922 0 0
Sedimentos no	0 0 0 29 0
Litologia 1	0 28 0 6 2
Litologia 2	0 78 4 1 4
Litologia 3	0 0 0 10 0
Total	18 135 926 46 6
Ground Truth (Pixels)	
Class	Litologia2_te Litologia 3_t   Total
Unclassified	0 0 0
Drenaje	0 0 18
Sembradios	4 0 33
Vegetacion re	0 0 922
Sedimentos no	0 2 31
Litologia 1	0 0 36
Litologia 2	2 0 89
Litologia 3	4 11 25
Total	10 13 1154

### V.2.9 Análisis de firma espectral

Una vez observadas e interpretadas las diferencias entre los píxeles de las imágenes generadas en los distintos procesamientos (MNF, SAM, combinación de banda, algebra de banda, clasificación supervisada y no supervisad.) se utilizó la herramienta de la firma espectral (trabajada mediante el *software* ENVI 5,3) para la verificación de los límites o contactos entre distintas formaciones presente en la zona de estudio. Las zonas de referencias para evaluar las firmas espectrales fueron los cambios notables entre los píxeles de la imagen, de esta manera se estimaban los posibles contactos. Las variadas firmas espectrales fueron muestreadas en toda la imagen (donde se observaba roca desnuda) haciendo énfasis entre los límites de las distintas formaciones presente en la carta 6448. Una vez obtenida las zonas cuyas firmas espectrales reflejaba cambio litológico, se comparó con los mapas previos utilizados en la investigación, donde se obtuvo una correspondencia entre los estudios previos y los resultados obtenidos a través de la interpretación de la imagen satelital LANDSAT-8. Estos resultados fueron de mucha ayuda en la actualización geológica de los 16 mapas a 1:25.000 de la carta 6448.

A continuación se muestran algunos ejemplos donde se visualizan varios polígonos que se escogieron para efectuar la verificación de los diferentes límites entre las rocas mediante la comparación de las firmas espectrales diferenciando el límite litológico de las Formaciones Capadare-Casupal, Guacharaca-Churuguara y Sedimentos Cuaternario (Figuras 5.44 y 5.45).

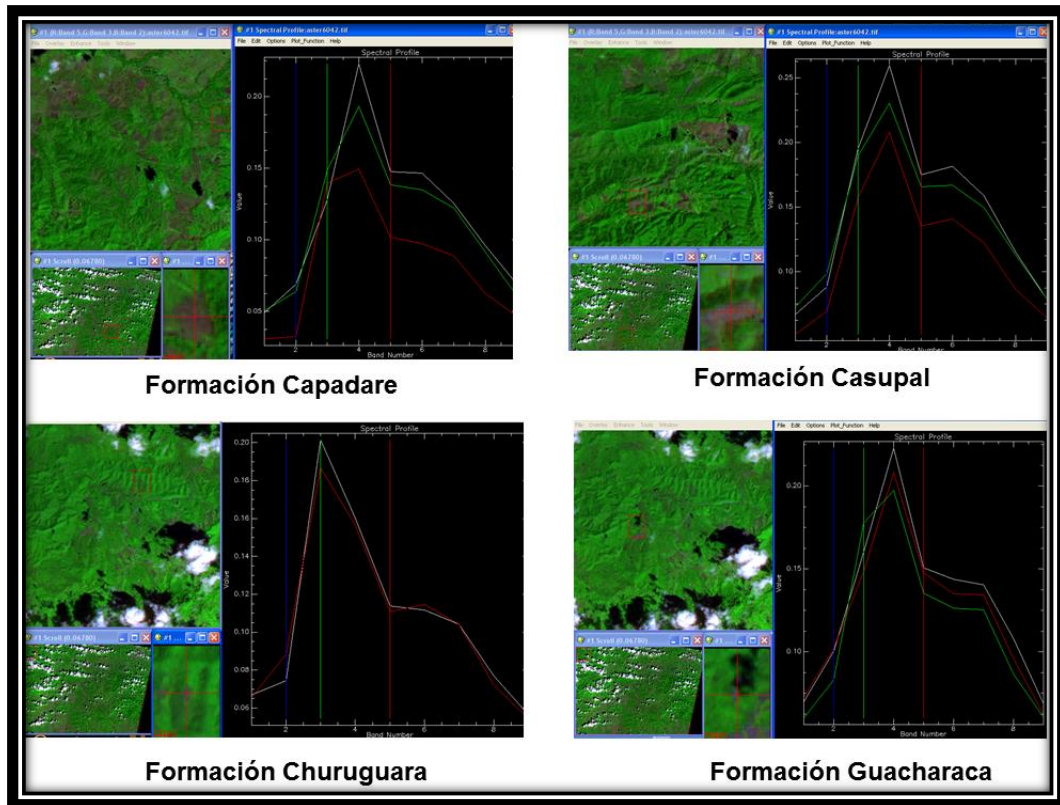


Figura 5.42. Comparación de la firma espectral la Formación Capadare-Casupal y Churuguara-Guacharaca.

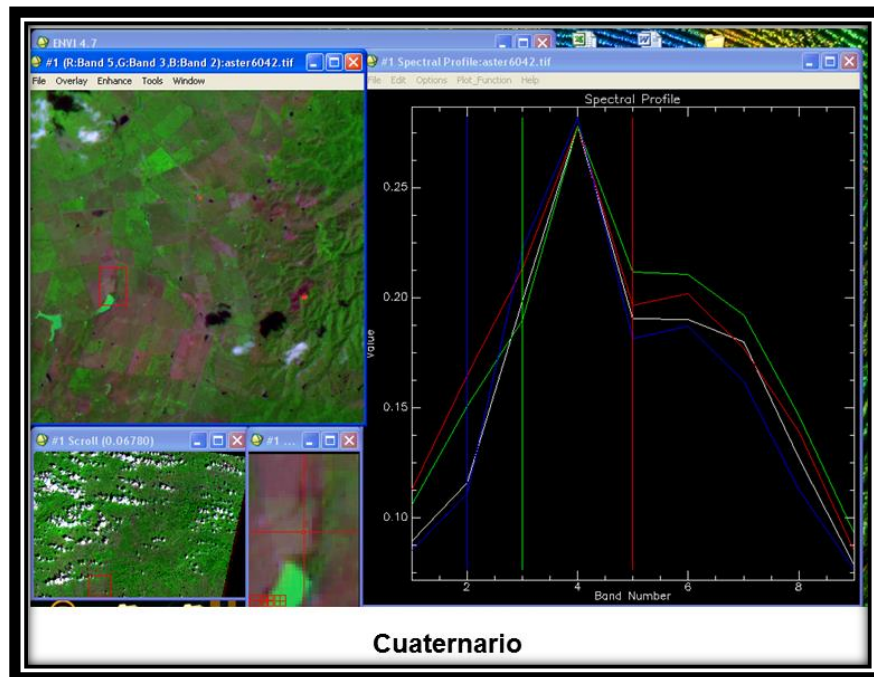


Figura .5.43. Firma espectral correspondiente a los sedimentos del Cuaternario.

## **CAPITULO VI**

### **INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

Este capítulo presenta la integración de cada uno de los resultados obtenidos mediante la preparación e incorporación de data en el SIG obtenida del procesamiento digital de imágenes y de la recopilación documental-cartográfica, lo cual fueron la base para desarrollar los análisis de rasgos topográficos, litológicos y estructurales. A continuación se presentan los aspectos más relevantes de la actualización de la geología de superficie de la carta 6448 mediante el uso de sensores remotos.

#### **VI.1 ANÁLISIS TOPOGRÁFICO DE LA HOJA 6448**

En Venezuela se han aplicado diversas clasificaciones fisiográficas, generalmente, estas clasificaciones han sido desarrolladas localmente y al nivel de detalle necesario para satisfacer los propósitos particulares del estudio. En la década de los 80, se lograron desarrollar sistemas ordenados jerárquicamente de clasificación geomorfológica del paisaje, mayormente con la finalidad de encontrar un marco de referencia para la descripción y cartografía de suelos, entre los que destacan los sistemas desarrollados por Zinck (1981), Steegmayer & Bustos (1980), y Elizalde (1983). Para efecto de esta investigación, el área de estudio se clasificó tomando como referencia la clasificación de Zinck (1981). Este autor en su trabajo “Definición del Ambiente Geomorfológico con Fines de Descripción de Suelos” describe un sistema jerárquico de clasificación del paisaje con cinco niveles categóricos de acuerdo a la escala en que se pueda cartografiar: Provincia Fisiográfica (1: 20.000.000), Región Natural (1: 10.000.000), Tipo de Paisaje (1:100.000-1:25.000), Tipo de Relieve (1:25.000-1: 10.000) y Forma de Terreno (>1: 10.000) (Figura 6.1).

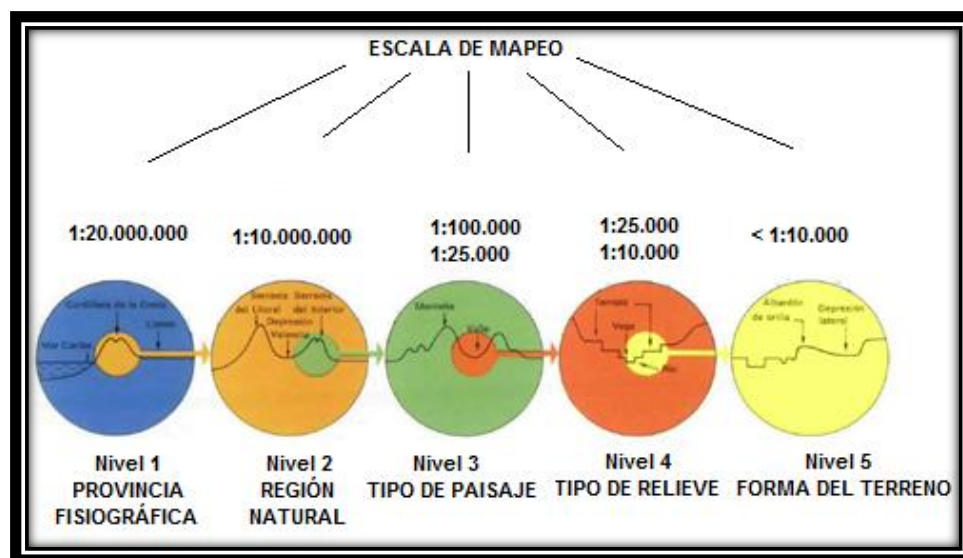


Figura 6.1. Diferentes niveles de percepción de un valle y de sus elementos componentes (Tomado y modificado por Zinck (1981) para simular el sistema jerárquico de clasificación del paisaje correspondiente a la zona de estudio).

En tal sentido, se describirá el relieve de la carta 6448 según la clasificación de Zinck (1981), haciendo énfasis en el análisis de los niveles tres y cuatro para la unidad de relieve bajo, mientras que para la unidad de relieve alto e intermedio se tomó en cuenta los cinco niveles, cabe destacar que para ambas unidades se tomaron los criterios correspondientes a formas fisiográficas de disección (Tabla 6.1). Por otro lado, tomando en cuenta que la escala de trabajo para esta investigación es 1:25.000, la elaboración del mapa correspondiente al relieve concierne al nivel tres descrita por dicho autor (Figura 6.2). Para la realización de lo anterior se tomaron en consideración los resultados obtenidos mediante la preparación e incorporación de data en el SIG: Mapa topográfico digitalizado (correspondiente a las 16 cartas a escala 1:25.000), Modelo de Elevación Digital (DEM), Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS), las distintas capas temáticas generadas a partir del DEM (hipsometría, pendiente, orientación de laderas, cuencas, subcuencas y densidad de drenaje) y algunos cortes topográficos en distintas zonas que permitieron observar las relaciones entre las unidades topográficas y facilitar su comprensión (Figura 6.2).

Tabla 6.1 Niveles de clasificación del paisaje correspondiente a la zona de estudio.

Provincia Fisiográfica	Región Natural		Tipo de Paisaje	Tipo de Relieve	Forma de Terreno	
S I S T E M A  C O R I A N O	S I E R R A S  C O R I A N A S	Sierra de Buena Vista y Baragua	M O N T A Ñ A S	A	Fila disectada	El perfil de terreno es rectilíneo, configuración ancha alargada cuyo trazado de los contornos es sinuoso. Presenta un cambio transicional de pendiente pasando de muy abrupto a moderadamente abrupto y altura máxima 1200 m.s.n.m.
				L	Fila de base triangular	El perfil de terreno es cóncavo, configuración estrecha cuyo trazados de los contornos en general es lineal. Presenta pendiente muy abrupta y altura máxima 870 msnm.
				T	Filas con forma de herradura	Presenta un perfil de terreno tipo escalonado dominado por cornizas, configuración estrecha cuyo trazados de los contornos es dentado. Posee pendiente escarpada hacia el tope moderadamente abrupta hacia la base y altura máxima 900 m.s.n.m.
				A	Fila lobular	El perfil de terreno es cóncavo-convexo, configuración estrecha cuyo trazados de los contornos es sinuoso. Presenta pendiente que va desde la línea de cumbre hasta la base desde muy abrupto hasta moderado y altura máxima 550 m.s.n.m.
			B A J A	Filas de cresta convergente	El perfil de terreno es irregular, configuración ancha alargada cuyo trazados de los contornos es dentado. Presenta pendiente que va desde la línea de cumbre hasta la base desde abrupto hasta moderado y altura máxima 350 m.s.n.m.	
				Fila con forma de espina de pescado	El perfil de terreno es irregular, configuración alargada cuyo trazados de los contornos es dentado. Presenta pendiente que moderada y altura máxima de 150 m.s.n.m.	
			M E D I A	Cerros alargados	El perfil de terreno es irregular, configuración alargada cuyo trazados de los contornos es dentado. Presenta pendiente que moderada y altura máxima de 150 msnm	
				Colinas base triangular	El perfil de terreno es irregular, configuración triangular cuyo trazados de los contornos es dentado. Presenta pendiente que moderada y altura máxima de 150 m.s.n.m.	
	Serranía de Bobare	Filas irregulares	El perfil de terreno es irregular, configuración masivo cuyo trazado de los contornos es irregular. Presenta pendiente muy abrupta en algunos caso presencia de cornizas hacia la cumbre y altura máxima 530 m.s.n.m.			
		Lomeríos	El perfil de terreno es irregular, configuración masiva cuyo trazado de los contornos es lobulado. Presenta pendiente abrupta hacia el tope y moderada hacia la base y altura máxima 480 m.s.n.m.			

Tabla N° 6.1. Continuación Niveles de clasificación del paisaje correspondiente a la zona de estudio.

Provincia Fisiográfica	Región Natural	Tipo de Paisaje		Tipo de Relieve	Forma de Terreno
Sistema Coriano	Litoral Falconiano	VALLES	TOCUYO	Llanura fluvial	No se puede describir porque la escala de trabajo es muy grande para la descripción de este nivel
				Llanura de desborde	
				Terrazas	
			ARORA	Llanura de desborde	
				Terrazas	
				HUEQUE	
Terrazas					

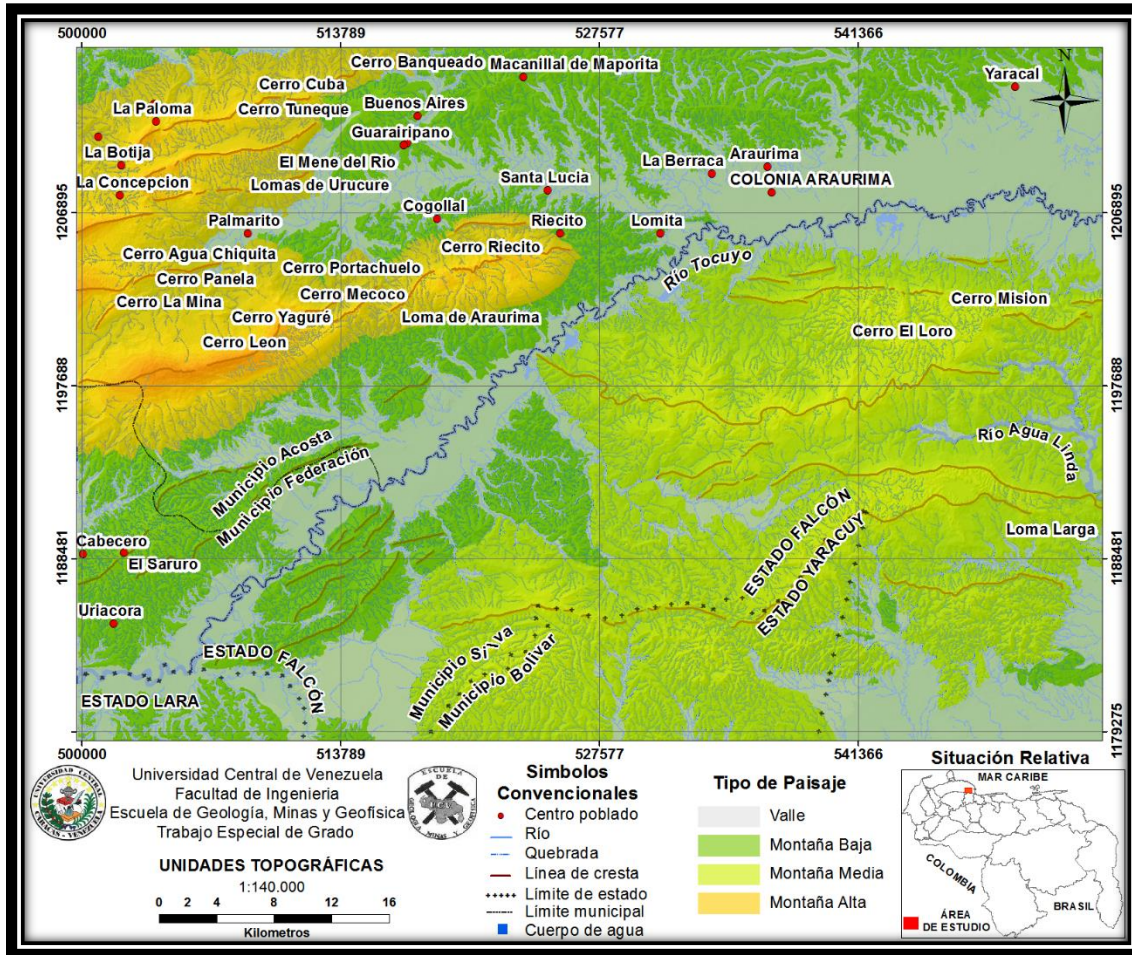


Figura 6.2 Mapa de Unidades Topográficas basada en la clasificación de Zinck (1981) tomando como base la integración e interpretación de los resultados obtenidos mediante la preparación e incorporación de data en el SIG.

Luego de analizar de forma sistemática e integral los resultados obtenidos mediante la preparación e incorporación de data en el SIG se pudo realizar una clasificación del tipo de relieve definidos para el área de estudio en función del contraste de relieve o relieve relativo, longitud, inclinación y forma de las laderas, patrón de drenaje y otros elementos tales como: formas expresadas en superficie, geometría basal, continuidad de las formas (agrupación) y orientación de las formas de relieve (crestas) que facilitan la descripción de las topofomas, sus relaciones litológicas y estructurales.

A continuación, se realiza una descripción detallada de cada una de las unidades definidas para el área de estudio.

### **VI.1.1 Unidad de Montañas**

Monkhouse (citado por Gamboa, 1986), en su diccionario de términos geográficos hace la aclaratoria, que no hay una específica altitud para designar a las montañas. Sin embargo, el investigador puede establecer con cierta amplitud sus propios criterios de acuerdo al área de estudio, en base a lo anterior, para efecto de esta investigación la unidad de montaña presente en la zona de estudio muestra un rango de alturas que van desde 100 a 1200 m.s.n.m., y de acuerdo a su desnivel de base se clasificó en montañas bajas (100- 200 m), medias (200-350 m) y altas (350-850 m). Las mismas se describen a continuación:

#### **VI.1.1.1 Unidad de Montaña Alta**

Esta unidad abarca 306 km<sup>2</sup> de los 2006 km<sup>2</sup> totales correspondiendo al 15% del área total. Constituye un conjunto de filas subparalelas entre sí que se extiende en una franja diagonal al noroeste del área de estudio con una dirección aproximada N75°E. Se caracteriza por poseer las cotas más altas en toda la zona alcanzando los 1200 m.s.n.m., y corresponde a las localidades: La Ciénega, La Paloma, Agua Linda, La Botija, La Concepción y a los cerros: León, Yaguré, Mecoco, Guarairipano, Riecito y Novillo.

Las montañas correspondientes a esta unidad presentan línea de cresta irregular sinuosa discontinua, separadas por pequeños valles encajados de los ríos Claro, Araurima y San Gregorio, paralelos a las líneas de cresta. Las laderas; se caracterizan por ser asimétricas con numerosas estribaciones y pendientes que van de tope a base desde muy abrupto a moderadamente abrupto en un rango de 10° a 45° en algunos casos superiores a los 45° generando cornisas. La red de drenaje que surca la unidad tiene un patrón dendrítico y subparalelo de carácter intermitente y se restringe a las laderas de la unidad con una orientación general de las quebradas principales en sentido NO-SE, los tributarios de las laderas que se encuentran al norte de la unidad pertenecen a la cuenca del río Hueque, mientras que el resto de los tributarios drenan a la cuenca del río Tocuyo (Figuras 6.3 y 6.4).

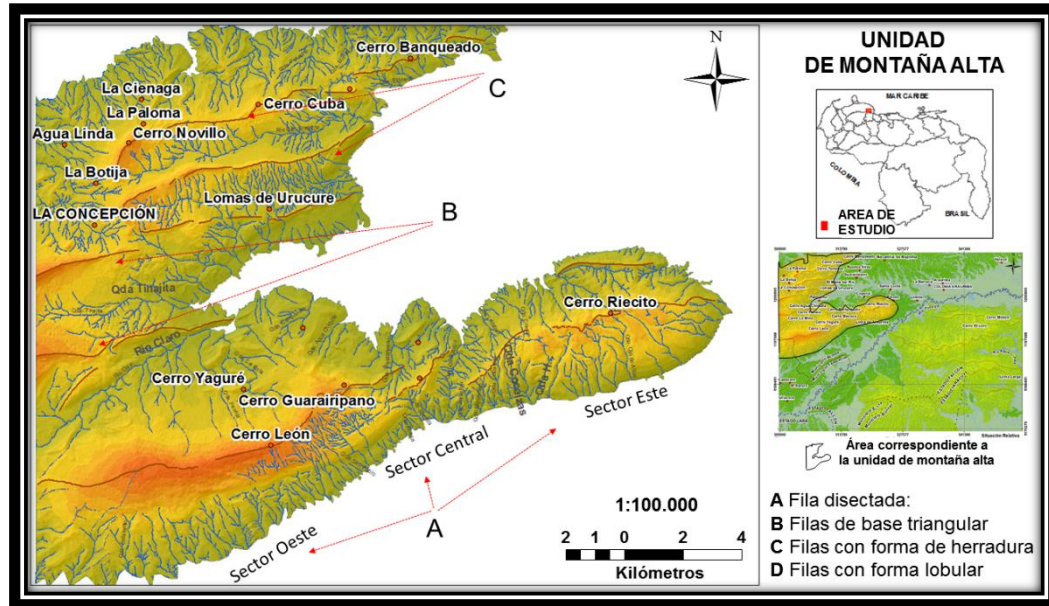


Figura 6.3. Unidad de montaña alta

A continuación se describe un sistema de filas longitudinales presente en esta unidad

#### VI.1.1.1.1 Fila disectada:

Se ubica al sur de la unidad descendiendo en cota hacia el noreste y se encuentra fuertemente segmentada en comparación con las filas adyacentes. Cabe destacar que el comportamiento de la fila es diferente en toda su extensión: Al este, en el cerro Riecito la cresta es irregular con laderas asimétricas de pendiente uniforme muy abrupto. Por su parte, hacia el centro, presenta tope agudo cuyas líneas de crestas son semi arqueadas, en esta zona las laderas son asimétricas de pendiente irregular definiendo una topografía de collado. Finalmente, al oeste, el comportamiento de la fila es similar a la zona central, exceptuando el collado y destacando que la ladera que buza al norte tiene comportamiento cóncavo-convexo. Con respecto a la red hidrográfica, los tributarios de la ladera norte desembocan en el río Araurima para luego desembocar en el río Tocuyo, mientras que los afluentes de la ladera sur desembocan directamente en el río Tocuyo cuya densidad es moderada.

#### VI.1.1.1.2 Filas de base triangular

Están ubicadas al oeste de la unidad (al borde de la zona de estudio) al sur de la localidad La Concepción, cuyas alturas oscilan entre 300 y 920 m.s.n.m y se encuentran

interdigitadas con un valle encajado dominado por la quebrada Tinaja. Las laderas que buzan al sur presentan pendientes muy abruptas sin presencia de estribaciones, por su parte la ladera que buza al norte presenta una pendiente que va de moderada a moderadamente abrupta presentando estribos sin ninguna dirección preferencial. La densidad drenaje que conforma esta área es baja.

#### VI.1.1.1.3 Filas con forma de herradura

Se encuentran ubicadas al este de la unidad interdigitada con un valle encajado dominado por el río San Gregorio conformada por las localidades La Botija y Lomas de Urucure y los cerros Novillo, Churaguaicito y Cuba.

La elevación montañosa en forma de herradura que se encuentra al sur del río San Gregorio alcanza alturas no mayores a los 800 m.s.n.m., descendiendo en altitud hacia el noreste. Se caracteriza por presentar línea de cresta paralelas en forma de herradura con apertura N-NE y cierre S-SO, cuyo comportamiento de sus laderas son diferentes. La ladera que buza al norte presenta hacia el tope de la montaña pendiente escarpada, generando cornizas y hacia la base pendiente de relieve moderadamente abrupta cuya uniformidad en sus curvas de nivel es bastante lineal, mientras que la ladera que buza hacia el sur presenta pendientes abruptas presentando numerosas estribaciones en dirección perpendicular a la línea de cresta controlado por la red de drenaje cuyo patrón es subparalelo formando una depresión drenada.

La elevación montañosa en forma de herradura que se encuentra al norte del río San Gregorio cuyas alturas alcanzan los 900 m.s.n.m., descendiendo en cota hacia el noreste; presentan un comportamiento similar a la descrita anteriormente, diferenciándose en la curvatura de la línea de cresta, siendo menos pronunciada. Cabe destacar, que en la parte baja de la ladera que buza al norte, en dirección N30E, se encuentran un conjunto de filas con forma lobular producto de las estribaciones de estas laderas, estas topofomas presentan laderas simétricas con pendiente que van desde muy abrupto hasta moderado, separadas por una depresión cuyos afluentes principales drenan al río Hueque.

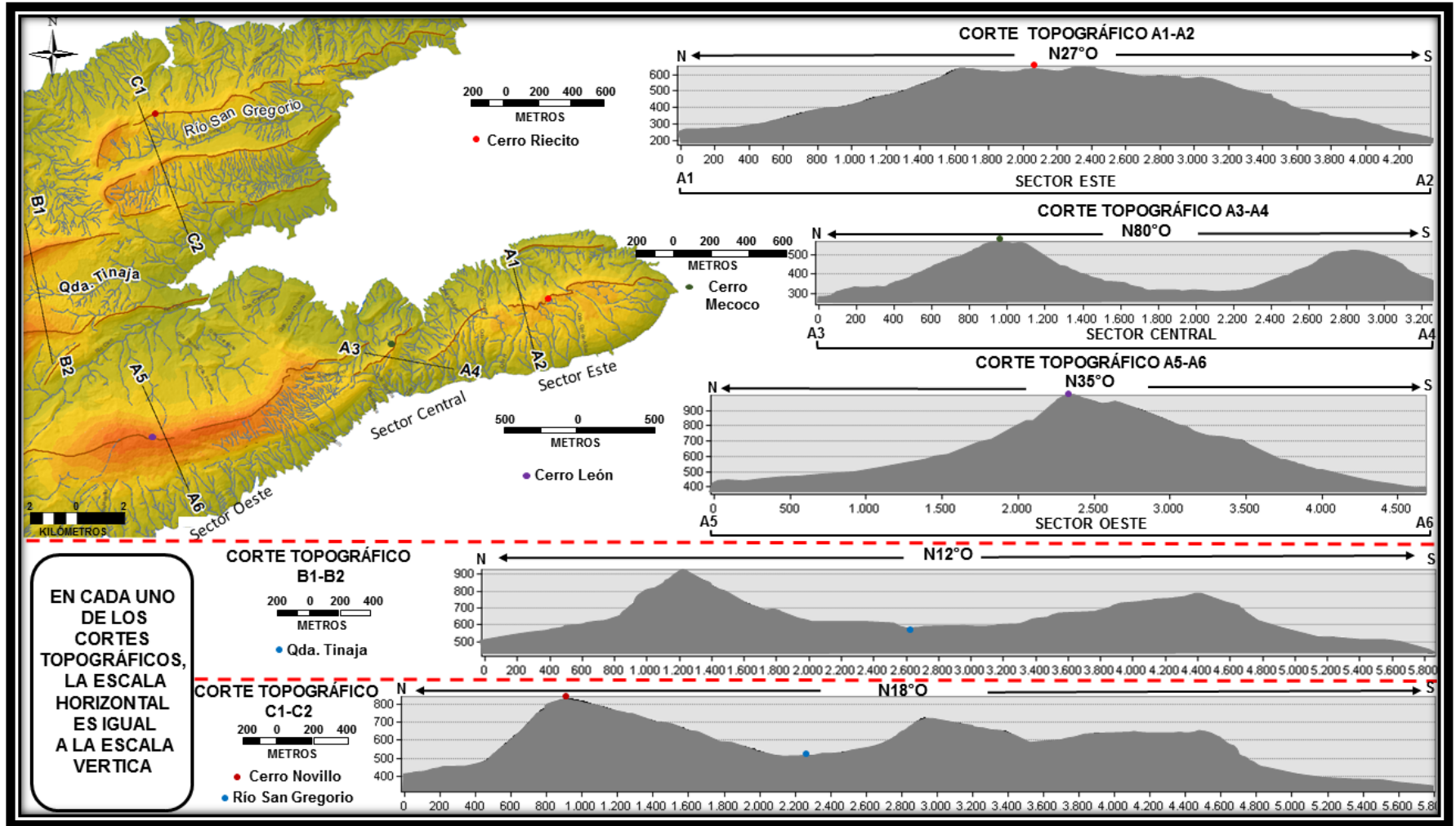


Figura 6.4. Unidad de montaña alta con sus respectivos cortes topográficos.

### VI.1.1.2 Unidad de Montaña Media

Esta unidad se encuentra ubicada al sur de la zona de estudio entre los valles del río Tocuyo y el Valle del río Aroa en las localidades: El Saruro, Macanillal de Maporita y los cerros Misión y El Loro. Abarca 671 km<sup>2</sup> correspondiendo al 33% del área total y se caracteriza por presentar altitudes entre 350 y 550 m.s.n.m. Respecto a la hidrografía, define un patrón de drenaje subparalelo. Los tributarios que se encuentran al noroeste de la unidad desembocando en las quebradas Agua Clara, Fernando, Guaca, Vallecillo, Pozo Azul, San José, Infierno, entre otros, para posteriormente desembocar en el río Tocuyo, mientras que los afluentes que se encuentran al sur de la unidad desembocan en las quebradas: Honda, Zurda, Chapano, río Agua linda, entre otros; para posteriormente depositar en el río Aroa. Dentro de esta unidad se encuentran un sistema de filas longitudinales irregulares y un sistema de lomerío (Figuras 6.5 y 6.6).

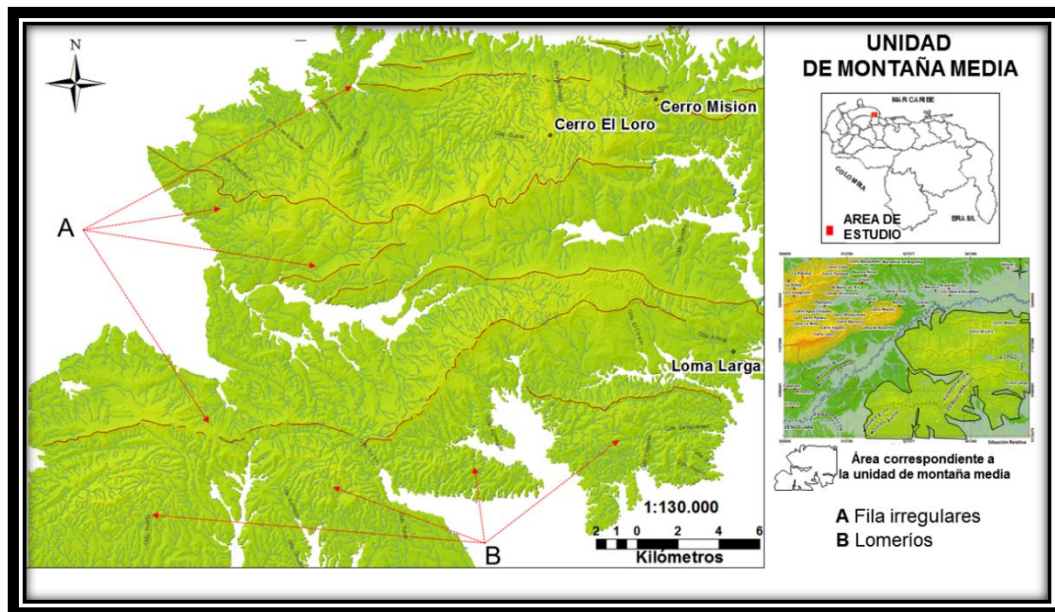


Figura 6.5. Unidad de montaña media

#### VI.1.1.2.1 Filas longitudinales irregulares

Corresponde a un conjunto de filas subparalelas entre sí, ubicadas al norte de la unidad con dirección preferencial O-E cuyas líneas de crestas se encuentran segmentadas

presentando un comportamiento irregular con alturas no mayores a 530 m.s.n.m., las mismas se encuentran interdigitadas por valles encajados entre los que destaca el río Agua Linda. Las crestas de las filas que se encuentran al este de la unidad tienden a ser pseudos planas, mientras que las que se ubica al oeste son redondeadas y en algunos casos hasta aguda. Respecto a las laderas, son asimétricas definiendo un tipo de terreno muy abrupto con numerosas estribaciones en todas las direcciones, las laderas que buzan al sur están controladas por afluentes que se entallan en las laderas, generando una densidad de drenaje alta, por su parte, el drenaje en las laderas que buzan al norte es someramente entallado y la densidad es baja. La red de drenaje presenta un patrón sub paralelo de densidad media siendo mayor en las laderas que buzan hacia el sur.

Al centro de la unidad se encuentra una fila con línea de cresta escalonada con comportamiento similar a las anteriores, muestra tres segmentos con dirección variable, al oeste presenta sentido E-O en su tramo central NE-SO y hacia el este con dirección E-O; asimismo, se visualiza en las laderas que buzan hacia el norte planchetas triangulares.

#### VI.1.1.2.2 Sistema de Lomeríos

Al sur de la unidad, la montaña presenta un comportamiento disectado por el entalle de una red de drenaje altamente densa dominada por las quebradas principales que desembocan en el río Aroa. Aunque el Sistema Ambiental Venezolano SAV (1983) clasifica este sector como Colinas bajo clima tropical seco, se puede observar mediante el Mapa topográfico digitalizado y Modelo de Iluminación y Sombra (MDIS) que en la carta 6448 la circunferencia de la base del relieve presenta una dirección predominante y una configuración alargada definiendo como tipo de relieve un sistema de lomerío. Este conjunto de lomerío se caracteriza por presentar formas ovaladas, alargadas y triangulares de alturas entre 400 y 550 m.s.n.m. Presenta tope redondeado, numerosas estribaciones lobulares en distintas direcciones amoldada a la forma del tipo de relieve. Hacia el tope de las lomas la pendiente del terreno es muy abrupto pasando transicionalmente hacia la base a un tipo de terreno moderado.

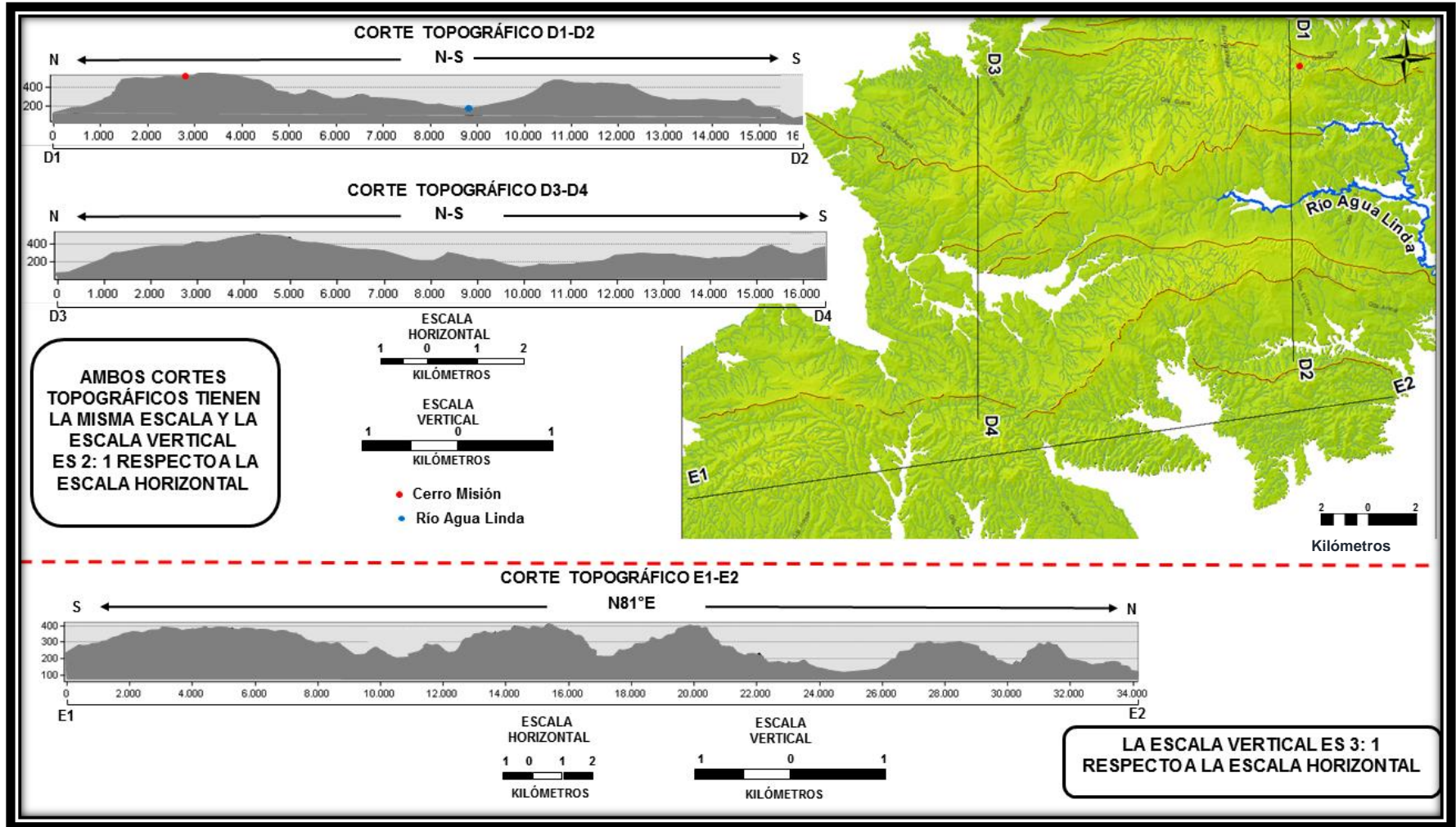


Figura 6.6. Unidad de montaña media con sus respectivos cortes topográficos.

### VI.1.1.3 Unidad de Montaña Baja

Se encuentra ubicada de forma diseminada en toda la zona de estudio sin ninguna dirección preferencial, en las localidades: Buenos Aires, El Mene del Río, Macanillal de Maporita, Agua Salada y Loma de Araurima. Abarca 455 km<sup>2</sup> totales correspondiendo al 23% del área total. Esta unidad se encuentra disectada con una línea de cumbre abrupta alternadas con valles someramente encajados, la agrupación de las mismas genera unas formas triangulares con alturas que oscilan entre 100 y 350 m.s.n.m. La red hidrográfica dominada en esta unidad es de densidad alta, los tributarios que la conforman corresponden a cuencas diferentes: Los tributarios que se encuentran al noroeste desembocan en el río Hueque, los demás desembocan en el río Tocuyo salvo una porción mínima de tributarios ubicado al noreste de Macanillal de Maporita que desembocan en el río Tucurere. Esta unidad se caracteriza por presentar, filas (cortas) transversales, filas longitudinales y cerros alargados (Figuras 6.7 y 6.8).

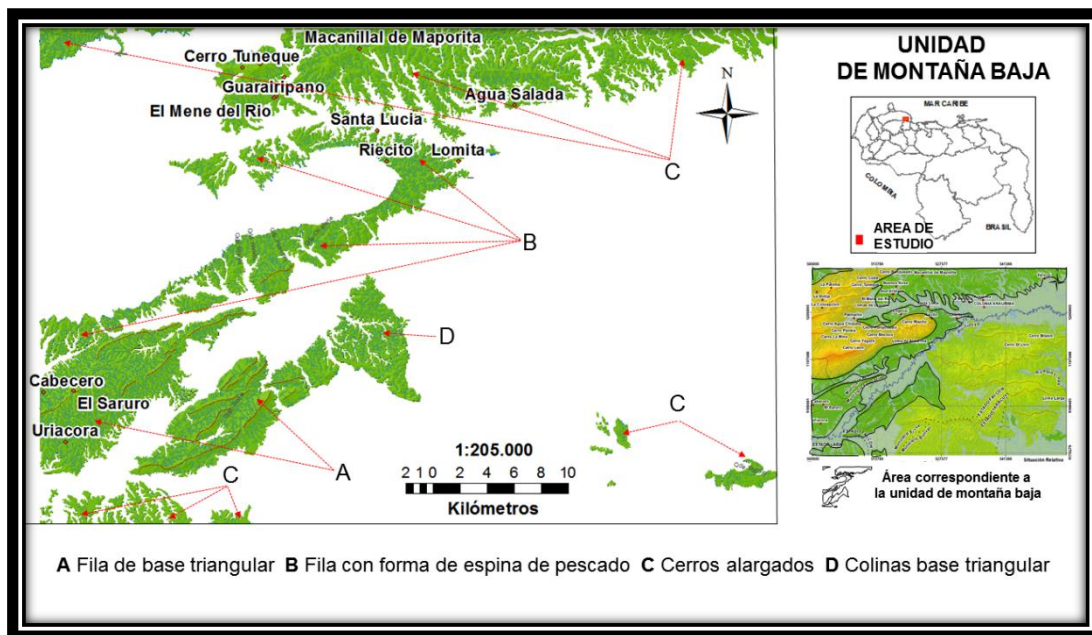


Figura 6.7 Unidad de montaña baja

#### VI.1.1.3.1 Fila de cresta convergente

Al suroeste de la zona de estudio, las montañas se disponen en un conjunto de filas longitudinales separadas por el río Tocuyo cuya línea de cresta es sinuosa con dirección

preferencial N50E. Las mismas presentan crestas redondeadas y laderas simétricas definiendo el tipo de terreno abrupto hacia el tope pasando de manera transicional a un tipo de terreno moderado hacia la base.

Las elevaciones montañosas que se encuentran al sur del río Tocuyo presentan alturas no mayores a los 250 m.s.n.m., y se encuentran interdigitadas con pequeños valles encajados. Por su parte, las elevaciones montañosas ubicadas hacia el norte del mismo río presentan alturas máximas de 350 m.s.n.m., y se encuentran separadas por un valle que comienza encajado desde el este, explayándose hacia el centro y nuevamente encajado al oeste. Estas elevaciones presentan en sus laderas planchetas triangulares dominadas por la red de drenaje de patrón subparalelo, cabe destacar que las planchetas se encuentran mejor desarrolladas en las laderas norte de las filas. Por último, se observa que los afluentes que desembocan en el río Guaidima presentan un patrón dendrítico entallando fuertemente la topografía.

#### VI.1.1.3.2 Filas espina de pescado

El tipo de relieve ubicados al centro de la zona de estudio corresponde a un conjunto de filas transversales producto de las estribaciones de la fila disectada, correspondiente a la unidad de montaña alta. Sus alturas no superan los 150 m.s.n.m., el trazado de los contornos es dentado generando una forma similar a una espina de pescado. Presenta crestas redondeadas, laderas simétricas y pendientes moderadas. Los tributarios que dominan este tipo de relieve desembocan en el río Araurima y río Tocuyo.

#### VI.1.1.3.3 Cerros alargados

Se ubica al norte y sureste de la Hoja 6448 y se caracterizan por presentar numerosas estribaciones en distintas direcciones, cresta redondeada, laderas simétricas y pendiente moderada. Al norte, entre los cerros El Mene, Tuneque y las localidades Buenos Aires y Macanillal de Maporita, las toposformas alcanzan alturas hasta 250 m.s.n.m., y a medida que este tipo de relieve se extiende al este sus alturas van disminuyendo hasta observarse elevaciones no mayores a los 100 msnm, mientras que, al sureste se visualizan altitudes que alcanzan alturas no mayores a los 120 msnm. La red de drenaje de este relieve desemboca directamente en el río Tocuyo.

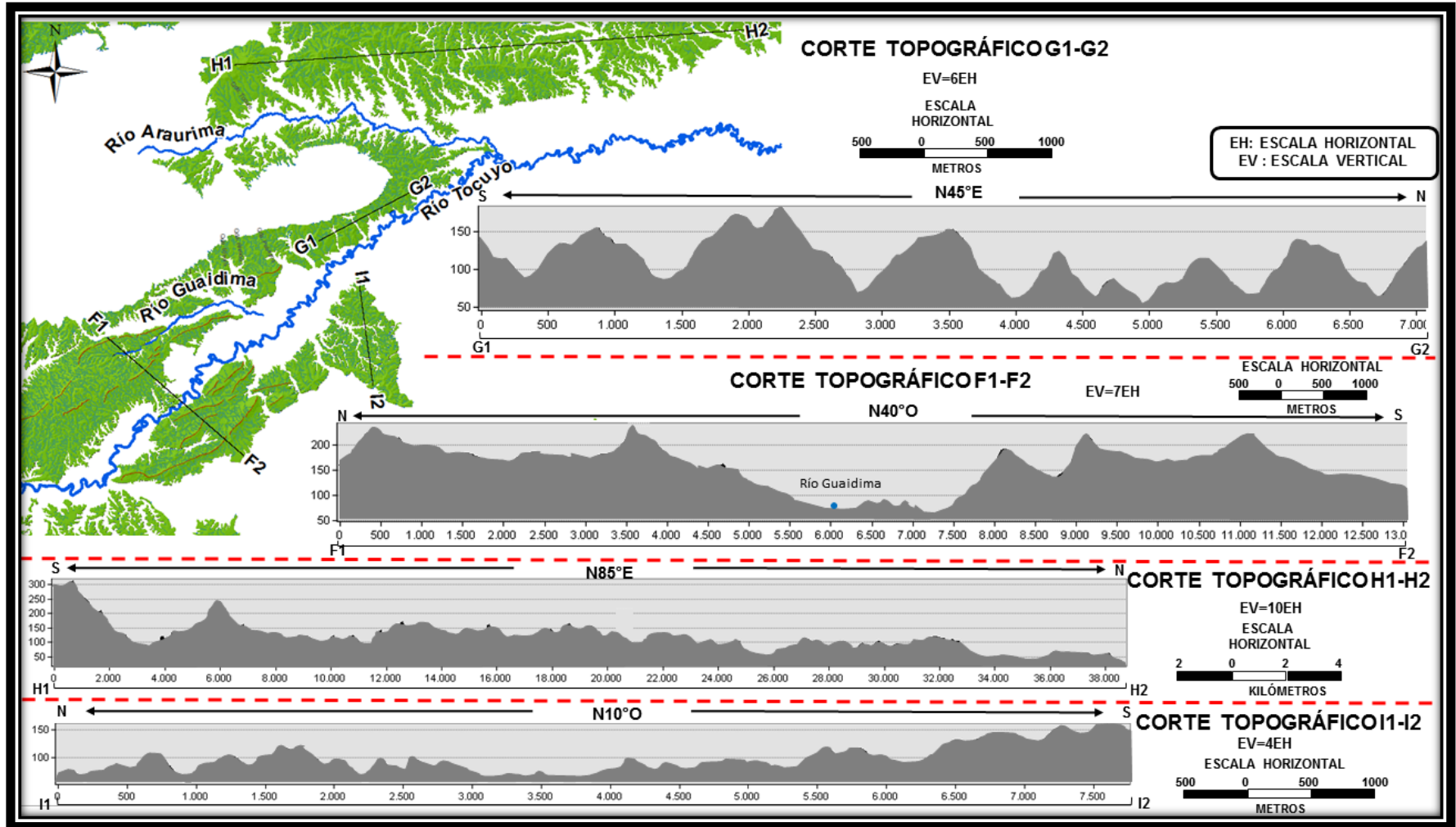


Figura 6.8. Unidad de Montaña baja con sus respectivos cortes topográficos.

## VI.1.2 Unidad de Valle

Para la definición de valle deben considerarse una serie de variables, que a primera vista hacen difícil emitir un concepto claro y preciso, sin embargo, tomando como referencia la definición de Zinck (1980), en la Hoja 6448, este tipo de relieve se encuentra ubicado al centro y sureste del área de estudio y abarca 574 km<sup>2</sup> correspondiendo al 29% del área total. Se caracteriza por presentar valles alargados, estrechos y encajados con alturas que oscilan entre 40 y 150 m.s.n.m., cuyo tipo de terreno es llano en el fondo y suave en los extremos, generando algunas terrazas (Figuras 6.9 y 6.10).

A efectos de esta investigación, la unidad de valle se detallará hasta el nivel 4 según la clasificación de Zinck (1981) debido a que el nivel 5 representa los sedimentos aún no consolidados, lo cual no es objeto de este estudio. Esta unidad se clasificó en base al nombre del colector principal al que pertenecen para así poder describir los elementos que la contienen.

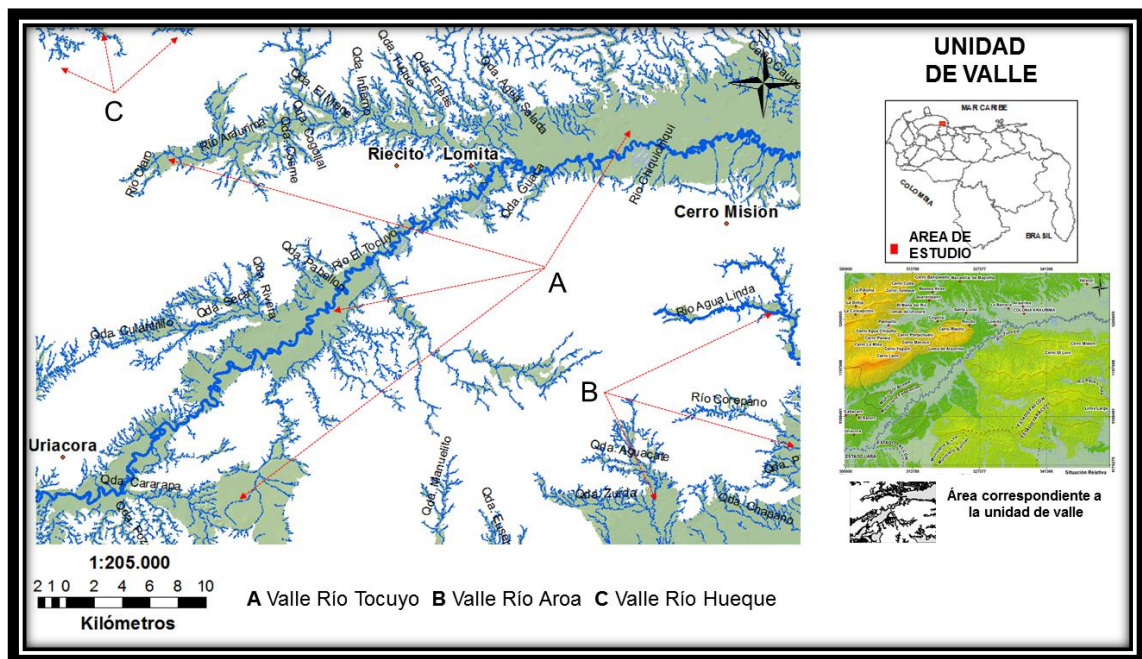


Figura 6.9. Unidad de valle

### VI.1.2.1 Valle Río Tocuyo

Este tipo de paisaje abarca 452 km<sup>2</sup> correspondiendo al 78% del área total de la unidad y está ubicado al suroeste, centro y noroeste de la Hoja 6448, entre la localidad de Riecito y Cerro Misión. Es alargado y relativamente llano (pendiente menor 5°), intercalado entre dos áreas de relieve más alto (montañas altas y montaña moderada) y tiene como eje el curso de agua correspondiente al río Tocuyo.

El tramo del río Tocuyo dentro de la Hoja 6448 corresponde aproximadamente 65 km, cuyo recorrido es de forma serpenteada presentando una geometría meandriforme. Este río empieza a aparecer en la zona de estudio al sur de Uriacora presentando un rumbo general O-E cuya longitud aproximada es 6,1 km, seguidamente experimenta un cambio de dirección notoria con rumbo general N50E de longitud 40 km hasta llegar a la localidad Lomita, finalmente a partir del poblado Lomita vuelve a retomar el rumbo inicial para finalmente desembocar al Mar Caribe.

El margen izquierdo del río Tocuyo está dominado por la subcuenca del río Araurima (368,59 km<sup>2</sup>), este río comienza con una dirección preferencial NE-SO y luego cambia su orientación de forma transicional a NO-SE, cabe destacar que el comportamiento de la densidad del drenaje dentro de la subcuenca no es uniforme. En la parte alta de la subcuenca los tributarios presentan una densidad baja; al centro media y en la parte baja alta, la delimitación de la subcuenca marca el límite de contacto litológico. Por su parte, el margen derecho del río Tocuyo tiene como subcuenca de mayor caudal y superficie a la subcuenca de la quebrada Charal (221,32 km<sup>2</sup>), cuyo comportamiento de la quebrada es arqueada con apertura NE-SO y cierre N-NO, cabe destacar que el comportamiento del drenaje del margen este y oeste de dicha quebrada es diferente. Los tributarios que nacen al este de la quebrada presentan una densidad baja definiendo un patrón dendrítico, mientras que hacia el lado oeste la densidad es moderada mostrando un patrón subparalelo.

El valle, entre el tramo correspondiente al sur de Uriacora y Lomita se extiende en dirección preferencial NE-SE, en este tramo el valle es estrecho en unos sectores y amplios en otros mostrando: llanura aluvial, terrazas aisladas y valles encajados en distintas direcciones. A partir de la localidad Lomita, el valle se explaya hacia el este en dirección preferencial O-E mostrando llanura de desborde y terrazas aisladas. Por su parte, al noroeste de la zona de estudio, pseudo paralelo al tramo entre Uriacora-Lomita, el valle tiene un comportamiento amplio con presencia de bifurcaciones mostrando una llanura aluvial cuyo colector principal es el río Araurima. Las terrazas presentes en esta unidad muestran una densidad de drenaje baja definida por un patrón dendrítico, siendo la de mayor importancia la terraza suspendida ubicadas al sur este de Uriacora cuya dirección de drenaje es NE-SO.

#### VI.1.2.2 Valle Río Aroa

Al sureste de la zona de estudio se encuentran un sector llano, el mismo pertenece al margen izquierdo del río Aroa y corresponde al 17 % del área total de la unidad. Esta sección muestra como tipo de relieve una llanura de desborde presentando pendientes menores a 2° y algunas terrazas. La red hidrográfica es moderadamente densa y los tributarios que drenan al río Aroa presentan una dirección NE-SE definiendo un patrón subparalelo. Además, esta unidad presenta algunos valles encajados que disectan a la unidad de montaña moderada cuyo afluente corresponden al río Agua Linda y a las quebradas Eusebio y Agua Viva.

La cuenca del río Aroa ocupa el 20,72% de la zona de estudio cubriendo una superficie de 415,78 Km<sup>2</sup> la misma se encuentra ubicada al sureste de la Hoja 6448 cuyos afluentes principales que se encuentran en el extremo sur de la cuenca drenan en dirección NS mientras que los que se encuentran en el extremo oeste desembocan en dirección NO-SE. Dentro de esta cuenca se encuentran las subcuencas Río Agua Linda (175,53 km<sup>2</sup>) y Quebradas Manuelito (105,15 km<sup>2</sup>), San Antonio (89,68 km<sup>2</sup>) y Chapano (45,42 km<sup>2</sup>). Cabe destacar el afluente principal de la subcuenca Quebrada

San Antonio se abre en forma de abanico, ramificándose en múltiples arroyos mostrando en la parte alta de la subcuenca una densidad alta definiendo un patrón dendrítico y delimitando un contacto litológico entre materiales finos y sedimentos no consolidados.

### VI.1.2.3 Valle Río Hueque

La cuenca del río Hueque ocupa el 3,23 % de la zona de estudio cubriendo una superficie de 64,87 km<sup>2</sup> la misma se encuentra ubicada al noroeste de la Hoja 6448 y presenta una serie de subcuencas: Quebrada Santa Cruz (17,12 Km<sup>2</sup>), Agua Linda (17,54 Km<sup>2</sup>), Percita (19,52 Km<sup>2</sup>) y Montero (10,69 Km<sup>2</sup>). En línea general, esta mínima porción muestra un patrón dendrítico de densidad transicional pasando en sentido oeste este de moderada a baja. Los tributarios drenan en dirección preferencial NO-SE.

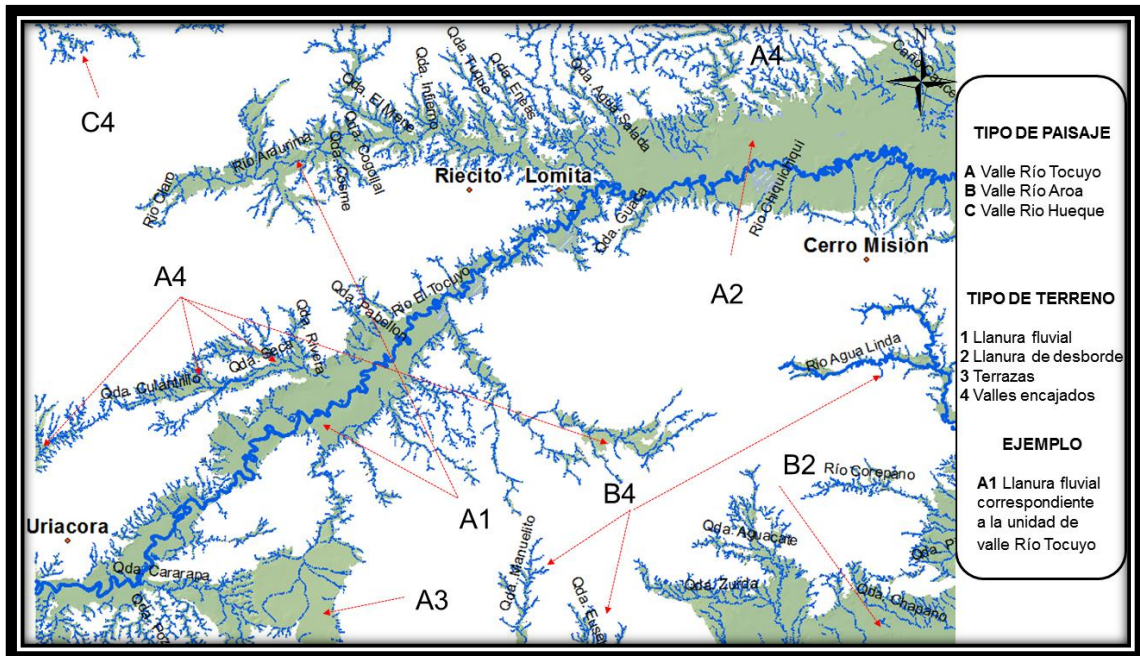


Figura 6.10 Unidad de Valle con sus respectiva subdivisión.

A continuación se muestra en 3D los tipos de relieve presente en la zona de estudio con su respectivo perfil topográfico (Figura 6.11).

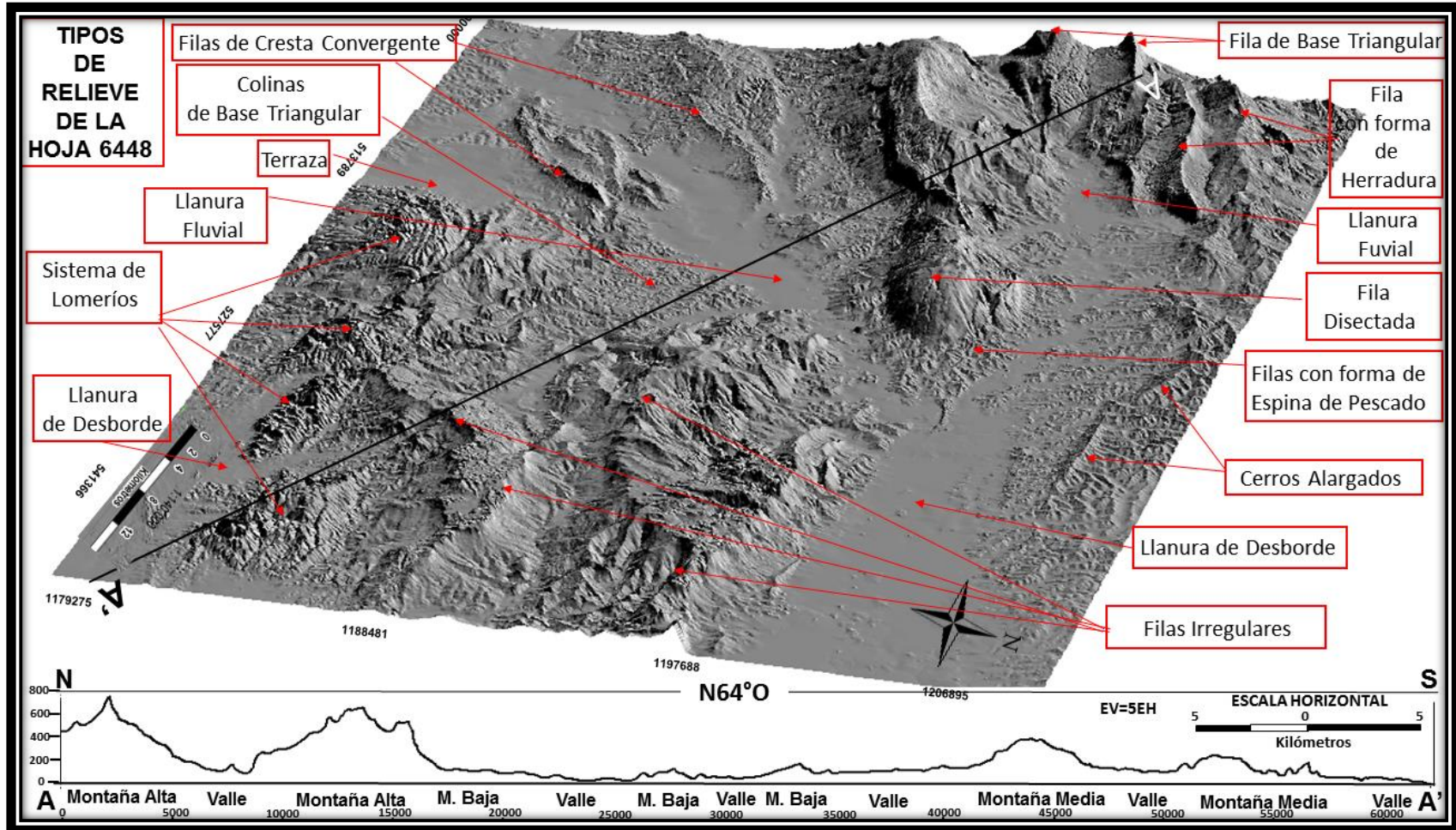


Figura 6.11. Tipos de relieve presente en la Hoja 6448 con su respectivo perfil topográfico

## VI.2 ANÁLISIS LITOLÓGICO DE LA HOJA 6448

La complejidad tectono-estructural que caracteriza el norte de Venezuela desde finales del Mesozoico, ha influido drásticamente en la formación de espacios depositacionales, así como en la sedimentación y posterior relación vertical de las litologías presentes en la zona de estudio. Con base en los aportes sobre la estratigrafía desde el final del Mesozoico en el norte del país por autores como Renz (1948), Wheeler (1960, 1963), Lorente (1978), Audemar (1995), Mendoza (2005) entre otros; y a los estudios realizados al suroeste de Falcón Oriental entre los estados Lara Yaracuy por Urbani *et al* (2007), Lozano & Mussari (2007) entre otros; el área de estudio está compuesta por macizo ígneo-metamórfico, rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados.

Los macizo ígneo-metamórfico afloran al sur de la zona de estudio, entre el límite de los estados Falcón y Yaracuy, abarcando el 4% del área total cuyas edades está comprendida entre Precámbrico y Cretácico. Por su parte las rocas sedimentarias, son las más abundante, abarcan el 68% del área total y se encuentra ubicada al NO y SE de la zona de estudio. Las mismas pertenecen a la secuencia de los bloques paleogeográficos de Mene de Acosta y Agua Linda, salvo las Formaciones: La Luna y Matatere, Las Formaciones que le conciernen al bloque Agua Linda son: Cerro Misión, Guacharaca, San Lorenzo, Pozón y Ojo de Agua; cuyas edades está comprendida entre Eoceno y Mioceno. Por su parte, las Formaciones Casupal, Agua Linda y Capadare le conciernen al bloque Agua linda, de edad Mioceno. Finalmente; los sedimentos no consolidados ocupan el 28% de la zona de estudio y se encuentran distribuidas por toda el área de estudio, principalmente en el valle del río Tocuyo (Figura 6.12).

En este apartado se hará énfasis en la integración de las evidencias que mostraron la delimitación de las unidades litoestratigráficas presente en la zona de estudio por sensoramiento remoto, relacionándolas y validándolas con datos bibliográficos.

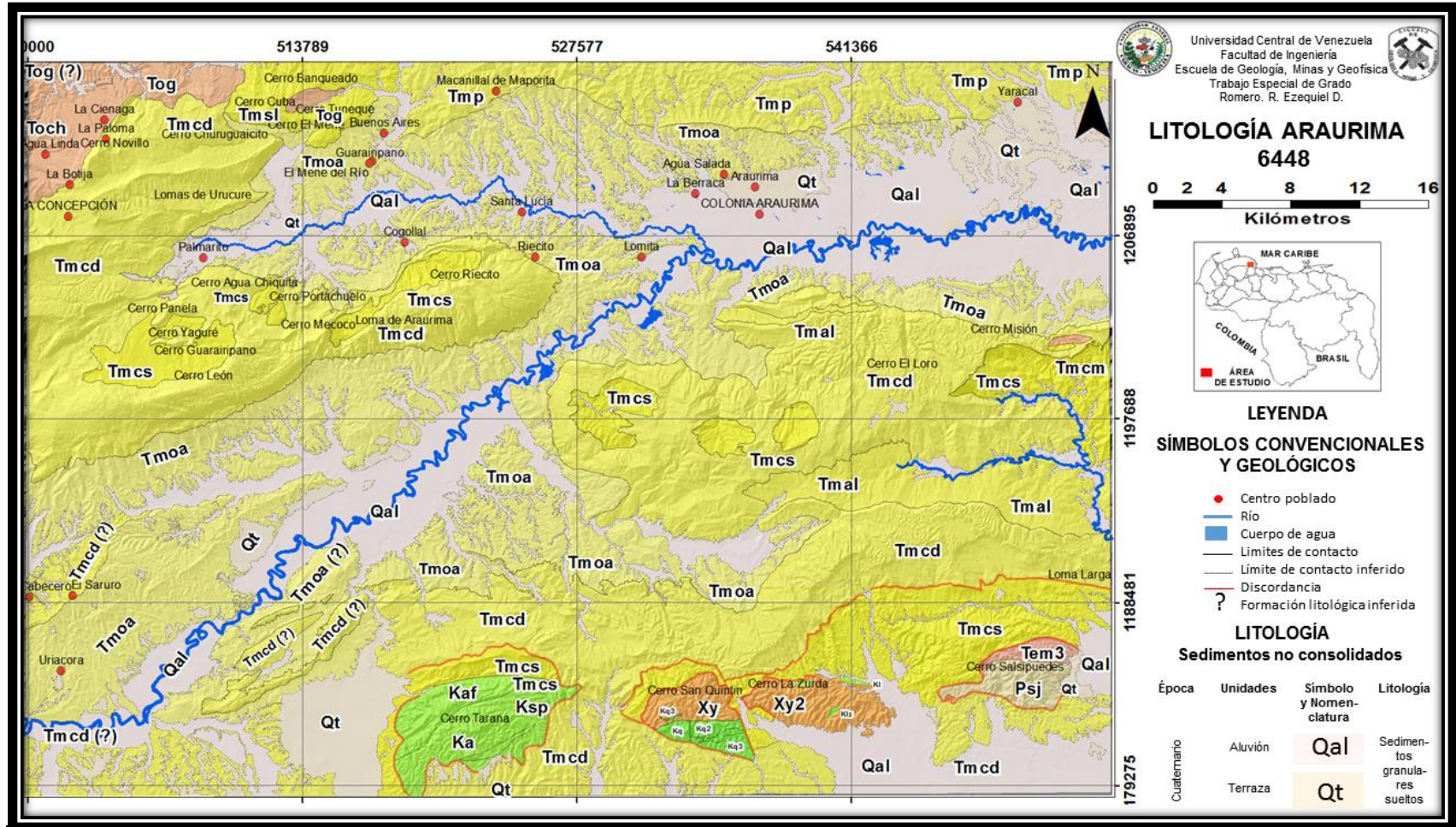


Figura 6.12 Mapa Litológico de la carta 6448. Con base la integración e interpretación de los resultados obtenidos mediante sensores remotos y datos bibliográficos (Los colores están basados en: CMYK Color Code according to the Commission for the Geological Map of the World (CGMW), Paris, France.).

Rocas Sedimentarias				Macizo Ígneo-metamórfico			
Época	Formación	Símbolo y Nomenclatura	Litología	Época	Unidades	Símbolo y Nomenclatura	Litología
Mioceno Medio-Tardío	Ojo de Agua	Tmoa	Arenisca, conglomerado y caliza arenosa y nodular	Cretácico	Esquisto de Aroa (Esquistos y Marmol)	Ka	Esquisto carbonático-grafitoso, filita y mármol laminado grafitoso, esquisto cuarzo-micáceo-grafitoso, metarenisca y metaconglomerado, "Rocas Verdes".
Mioceno Medio	Capadare	Tmcd	Caliza y arenisca limpia	Cretácico	Esquistos de Aroa (Filita)	Kaf	
Mioceno Medio	Agua Linda	Tmal	Intercalación de arcillas, lutitas y calizas con menor proporción de conglomerados	Cretácico	Metagabro de La Zurda	Klz	
Mioceno Temprano-Medio	Casupal	Tmcs	Arenisca, lutita y conglomerado	Cretácico(?)	Serpentinita	Ksp	Serpentinita
Mioceno Medio-Tardío	Pozón	Tmp	Arcillas margosas y arcillas, con un desarrollo glauconítico de poco espesor en la base	Cretácico(?)	Complejo San Quintín I (Metasedimentario)	Kq	Secuencia metasedimentaria de metarenisca, metalimolita, filita, escasos niveles de metaconglomerado y metavolcánicas.
Mioceno Temprano-Medio	San Lorenzo	Tmsl	Hacia la base secuencia de arcillas glauconítica y hacia el tope capas lenticulares de areniscas	Cretácico(?)	Complejo San Quintín I (Metavolcanico)	Kq2	
Oligoceno	Guacharaca	Tog	Arenisca glauconítica dispuesta en capas delgadas (1,5 a 6,5 m)	Cretácico(?)	Dique de Basalto	Kq3	
Oligoceno	Churuguara	Toch	Serie variable de intercalaciones de calizas limosas que gradan a areniscas calcáreas y lutitas limolíticas	Pre-Mesozoico	Complejo San Julián	Psj	Esquisto y gneis cuarzo - plagioclásico - micáceo,mármol, cuarcita y diversos tipos de rocas metaígneas mayoritariamente máficas (como anfibolita, gabro, diorita, tonalita y granodiorita)
Eoceno	Cerro Mision	Tecm	Lutitas calcáreas de color gris oscuro	Neoproterozoico	Complejo Yumar I (Anortosita)	Xy	Anortosita, gabro, hornblenda, granofiro, clinopiroxenita, rocas esquisto/ gneíscas, trondjemita, tonalita gneis hornbléndico epidótico.
Eoceno	Matatere 3	Tem3	Arenisca, conglomerado y lutita, secuencia Flysch	Neoproterozoico	Complejo Yumar I (Charnockita)	Xy2	
Cretácico	La Luna	Kl	Caliza y lutita con concreciones ocasionales y chert				

Figura 6.12. Continuación Mapa Litológico de la carta 6448. En base la integración e interpretación de los resultados obtenidos mediante sensores remotos y datos bibliográficos (Los colores están basados en: CMYK Color Code according to the Commission for the Geological Map of the World (CGMW), Paris, France.)

Las unidades litoestratigráficas presente en la carta 6448 se establecieron en base a la recopilación bibliográfica y a la integración de cada uno de los resultados obtenidos mediante la preparación e incorporación de data en el SIG y *software* de procesamiento digital de imágenes, descritos y desarrollados en el capítulo anterior (capítulo V).

La delimitación de los contactos correspondiente a cada una de las unidades se realizaron en función de su expresión topográfica, interpretadas a través de los mapas topográficos, estereoscopía en fotografías aéreas, Modelo Digital de Elevación (DEM) y capas temáticas; expresión en la imagen satelital LANDSAT-8, apoyadas en los resultados de los distintos procesamientos realizados a la imagen satelital: MNF, SAM, combinación de bandas, algebra de banda, clasificación no supervisada, clasificación supervisada y análisis de la firma espectral; y finalmente, en función de su expresión en el MDIS, tomando como base textura, color y contesto. Cabe destacar que las herramientas que aportaron mayor información para la delimitación de cada una de las unidades correspondieron al mapa topográfico digitalizado, el Modelo digital de Iluminación y Sombra (MDIS) y la imagen generada mediante la Fracción Mínima de Ruido (MNF).

En algunos casos se tomó la decisión de agrupar dos o más Formaciones con litología muy semejante, cartografiadas por los distintos autores (Creole (1968), Guzmán & Morillo (2009) y FUNVISIS (2013)), en una sola unidad; los criterios utilizados estuvieron basados en datos bibliográficos, binomios de dureza y expresión topográfica. La razón de lo expuesto anteriormente es que la litología presente en el área de estudio por sensoramiento remoto es muy difícil distinguir una Formación de otra cuando las mismas poseen litologías similares debido a que la respuesta espectral arrojada no diferencia el ambiente sedimentario a la cual está asociado la roca en estudio ni tampoco el tamaño de grano. Por otro lado el sur de Falcón oriental es una zona cuya cobertura vegetal es muy abundante lo que limita al programa evaluar las

firmas espectrales en las formaciones con litología similar y así poder diferenciar una de la otra.

A continuación se presenta la descripción de las unidades litológicas observadas en la zona de estudio agrupado en macizos ígneos-metamórficos, unidades sedimentarias y sedimentos cuaternarios.

### VI.2.1 Macizos ígneo-metamórficos

Los macizos ígneos - metamórficos se encuentran ubicados hacia el sureste de la zona de estudio en el límite entre los estados Falcón y Yaracuy, en los cerros Tarana, San Quintín, La Zurda y Salsipuedes, y representa un área de 76 km<sup>2</sup>. Según Lozano & Mussari (2007), las rocas ígneo-metamórficas aflorantes en la carta 6448 pertenecen al complejo orográfico de la región norte costera de Venezuela; correspondiente al Complejo Yumare, Complejo San Quintín, Esquisto de Aroa y Serpentinita, que están formado por una superposición de napas (Figura 6.13)

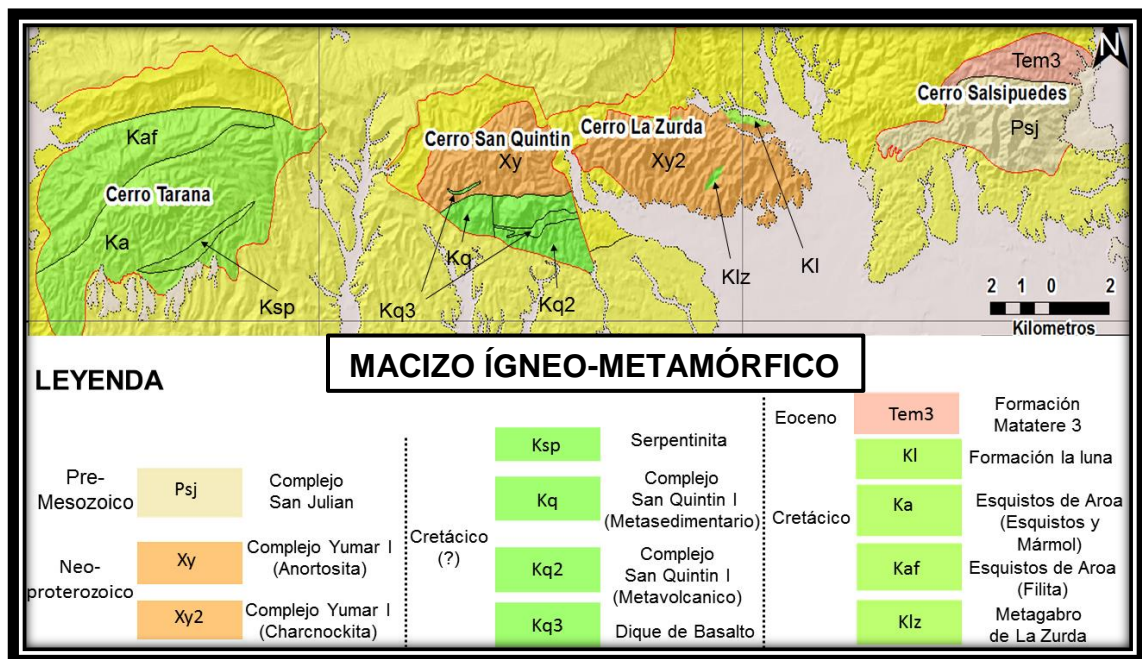


Figura 6.13. Macizo Ígneo-metamórfico (Nomenclatura tomada de FUNVISIS (2013)).

Los cuerpos ígneos-metamórficos en esta investigación se lograron identificar con mayor facilidad mediante la imagen MNF y el MDIS lo cual se complementó con su expresión topográfica (Figura 6.14).

La expresión topográfica a la cual corresponden dichos cuerpos está representada por un conjunto de lomeríos que se caracterizan por presentar formas ovaladas, alargadas y triangulares de alturas entre 400 y 550 m.s.n.m. (Figura 6.14A).

La imagen MNF, mediante la coloración de pixeles ayudó a separar algunos cuerpos de otros coincidiendo en gran medida con lo cartografiado por FUNVISIS (2013). Los pixeles de coloración púrpura (70%), verde manzana (20%) y agua marina (10 %), ubicados en el cerro Tarana, corresponden a los Esquistos de Aroa; mientras que los pixeles de coloración púrpura (60%), agua marina (35%) y azul (5%) corresponden a los Complejo Yumare, San Quintin (ubicados en el cerro San Quintin y La Zurda) y San Julian (ubicado en el cerro Salsipuede) (Figura 6.14B).

Por su parte, en el MDIS se pudo observar una textura rugosa realzando fracturamiento con patrones subparalelos en dirección NE-SO y hendiduras de forma arqueada que podría inferirse como posibles fallas. Estas evidencia permitieron separar algunos cuerpos en unidades menores, tal es el caso del Esquisto de Aroa. En el MDIS se observa como la hendidura arqueada divide a la unidad en dos unidades diferentes. Según Lozano & y Mussari (2007), Urbani *et al* (2007), Nevado (2012) y FUNVISIS (2013) estas unidades corresponden a: Esquistos de Aroa compuesto mayormente de esquistos y mármol (Ka) y esquisto de Aroa compuesto mayormente de filitas (Kaf) (Figura 6.14C).

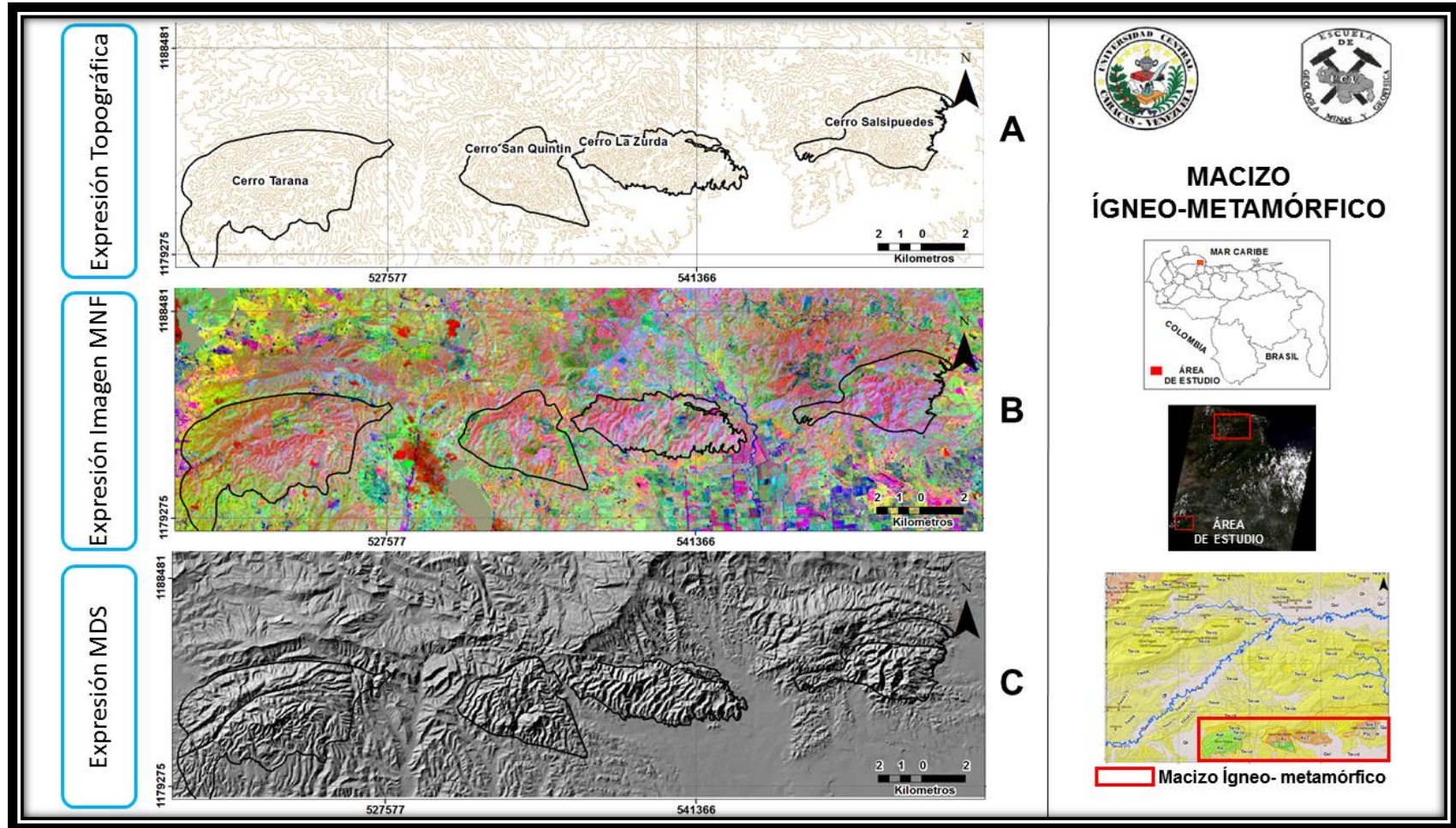


Figura 6.14. Expresión topográfica, MNF y MDIS del macizo ígneo-metamórfico.

Cabe destaca que; la delimitación de los contactos litológicos propuesto para esta investigación mediante la integración de los productos obtenidos por sensores remotos y sus relaciones morfológicas se asemejan a lo cartografiado por FUNVISIS (2013) y difiere un poco a lo cartografiado por Guzman & Morillo (2009) (Figura 6.15). De acuerdo a la literatura, la información cartografiada por FUNVISIS (2013) es verosímil por la gran cantidad de datos de campo que se observa en la cartografía y por la escala de trabajo (1:25.000). Por tal razón se procedió a cartografiar todas las unidades propuestas por dicho autor, aunque por sensores remotos no se lograron identificar todos los cuerpos cartografiados (Formacion la Luna, Diques de Basaltos y Sepentinita y Metagabro de la Zurda), ya que los pixeles presente en los distintos productos generados no proporcionaron información detallada que permitiera la delimitación minuciosa cartografiada por FUNVISIS (2013).

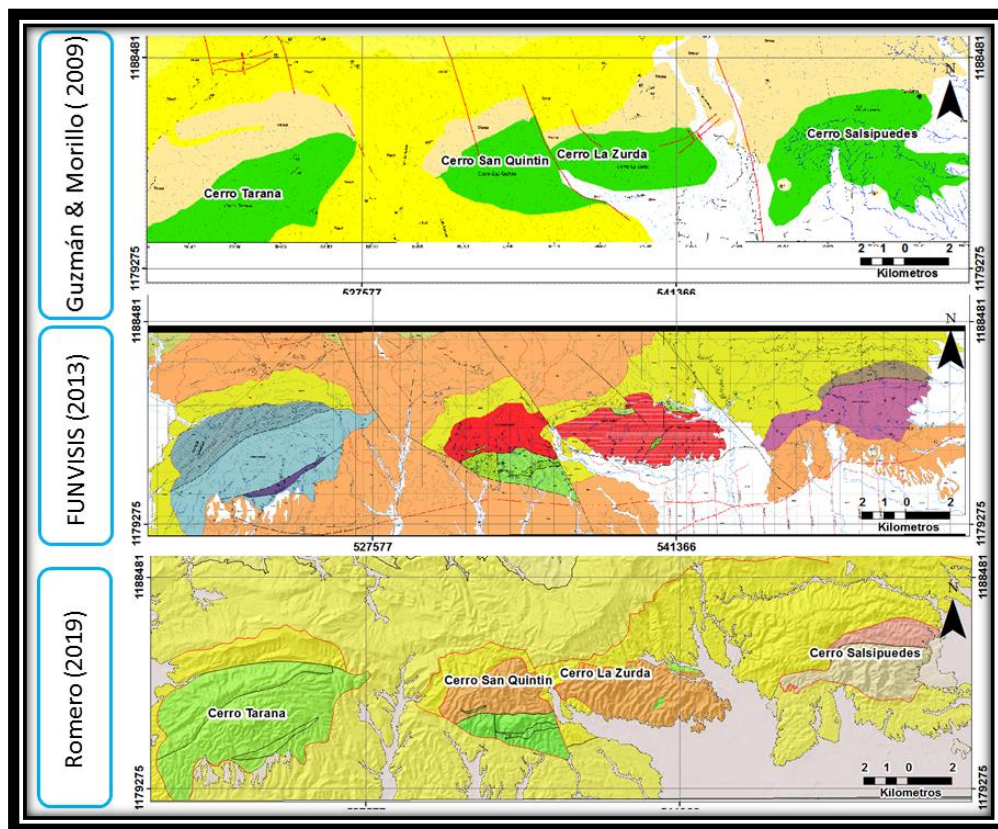


Figura 6.15. Comparación de los Macizo ígneo-metamórfico cartografiado en esta investigación con otros mapas.

## VI.2.2 Unidades Sedimentarias

La interpretación de las unidades sedimentarias se realizó con base a las grandes secuencias estratigráficas (Mene de Acosta y Agua Linda) de manera de exponer las evidencias que diferencian una Formación de otra. Las mismas se describen a continuación:

### VI.2.2.1 Formación Cerro Misión

Se encuentra ubicada al este de la zona de estudio, cerca del cerro Misión y diagonal al cerro El Loro, se caracteriza por ser la unidad de la secuencia Mene de Acosta con la menor expresión en el mapa geológico; con un área aproximada de 1 km<sup>2</sup>, equivalente a menos de 1% del área total.

La Formación Cerro Misión, dada sus dimensiones y el alto contenido de vegetación presente en el afloramiento resultó difícil observar y delimitar el cuerpo aflorante por medio de sensoramiento remoto. Al solapar el mapa de la Creole (1968) sobre la imagen FLAASH, se puede interpretar que dicha Formación está totalmente cubierta de vegetación, arrojando una respuesta espectral cuyos píxeles se pueden confundir con facilidad con la Formación Capadare. Por otro lado, la expresión topográfica y el MDIS no aportaron ningún tipo de información debido a sus dimensiones (Figura 6.16).

A pesar de que por sensores remotos no se logró identificar el cuerpo aflorante; en el mapa resultante esta Formación se encuentra cartografiada ya que según Renz (1948) dicha Formación aflora en el borde sur de la cuenca de Falcón oriental, habiendo sido penetrada por varios pozos en Riecito y en El Mene de Acosta (Figura 6.16).

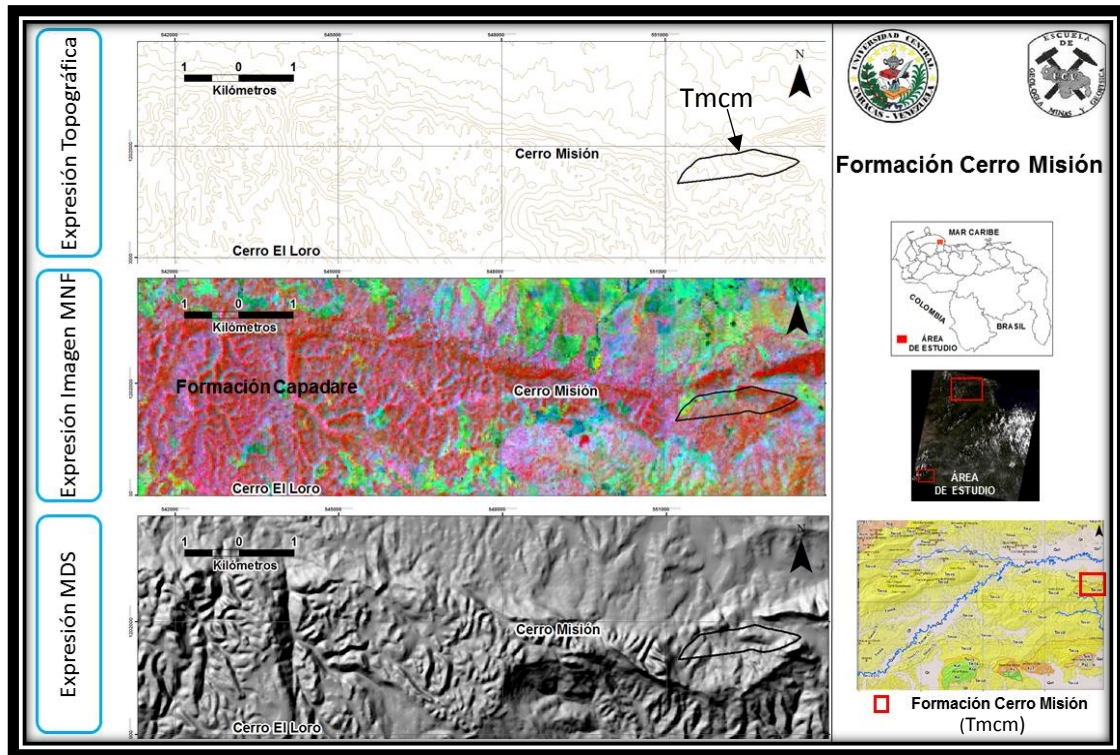


Figura 6.16. Expresión topográfica, MNF y MDIS de la Formación Cerro Misión.

### VI.2.2.2 Grupo Agua Salada

Según la Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología CVET (1970) el Grupo Agua Salada está conformado por las Formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón. La extensión geográfica del mismo se encuentra en mayor porcentaje al norte de la Hoja en estudio, aflorando en dirección NE-SO cuyos afloramientos de base a tope se encuentran distribuidos de izquierda a derecha (Guacharaca, San Lorenzo, Pozón). En la zona de estudio se representa una pequeña porción de los afloramientos de este importante Grupo (124 km<sup>2</sup>, lo cual es equivalente al 6 % de la superficie total) y se encuentra ubicado al norte de los poblados La Concepción, Mene del Río y Araurima (Figura 6.17).

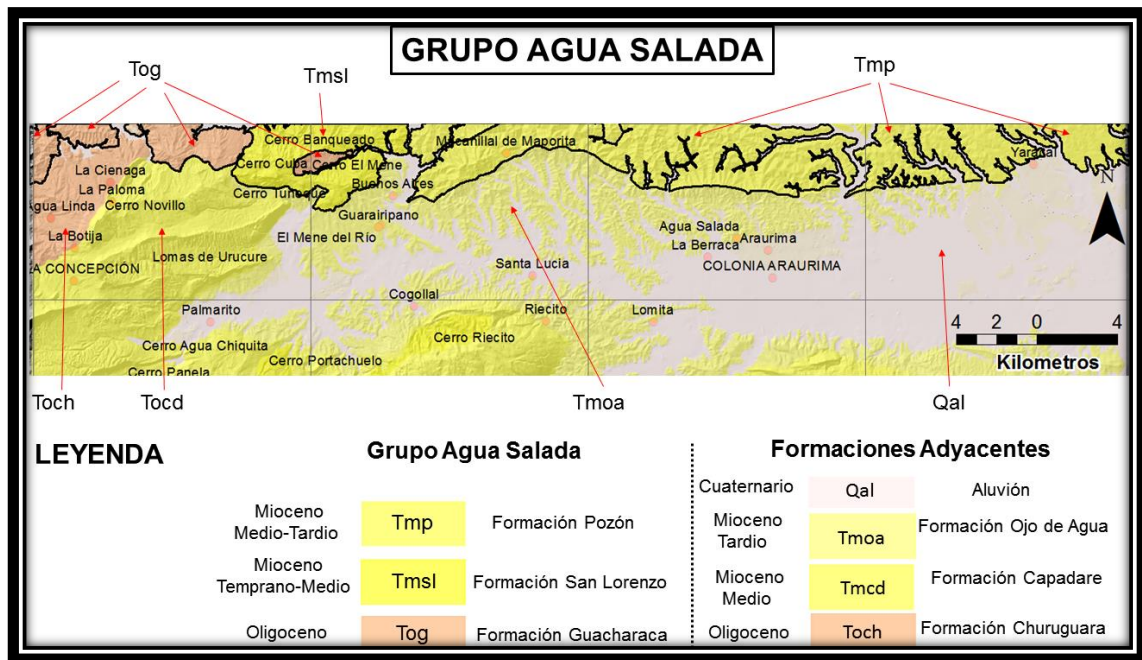


Figura 6.17. Grupo Agua Salada y formaciones adyacentes.

El Grupo agua salada en la Hoja 6448 tiene su expresión topográfica dentro de la unidad de Montaña baja cuyo tipo de relieve corresponde a los cerros alargados con alturas que no superan los 300 m.s.n.m (Figura 6.18A).

La respuesta espectral arrojada en la imagen MNF permitió separar el grupo Agua Salada de otras unidades (Formación Capadare y Ojo de Agua) representado por pixeles de color verde limón lo cuales van perdiendo tonalidad a medida que la expresión topográfica descende en cota, es decir, la agrupación de pixeles se aprecia con mayor facilidad en las zonas más alta de la unidad (Figura 6.18B).

Por su parte el MDIS permitió mediante su textura y color separar el Grupo Agua Salada de las Formaciones Churuguara, Capadare y Ojo de Agua y además de los sedimentos no consolidados (Figura 6.18C).

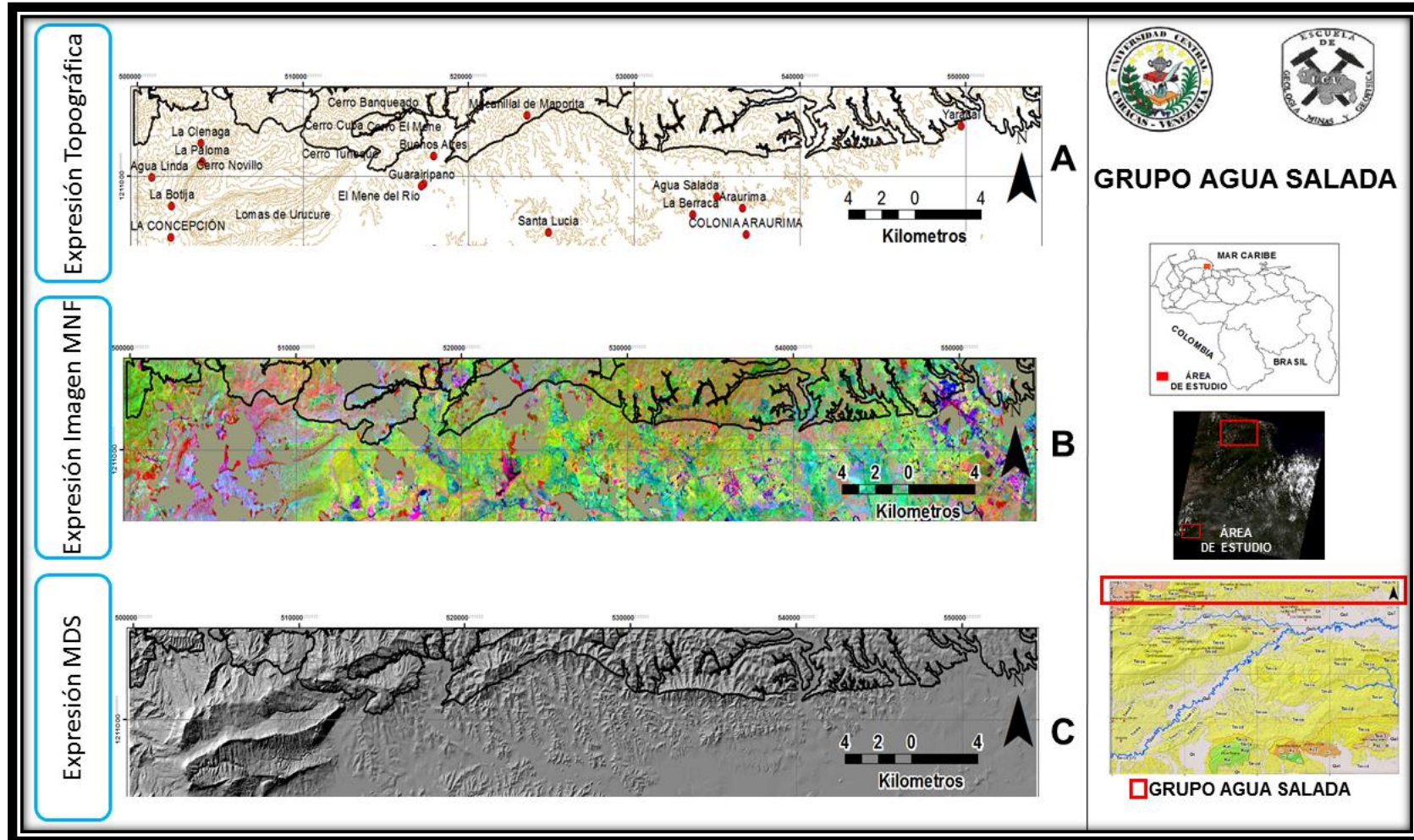


Figura 6.18. Expresión topográfica, MNF y MDIS del Grupo Agua Salada.

Mediante el MDIS, se pudo observar que la Formación Guacharaca presenta incongruencia con lo cartografiado por la Creole (1968) y Guzmán & Morillo (2009). El primer autor agrupa la Formación Guacharaca como una gran unidad e incluye sedimentos no consolidados (Figura 6.19A); mientras que, el segundo autor agrupa la Formación en una sola unidad sin incluir los sedimentos no consolidados (Figura 6.19B). En el MDIS se observa como esa gran unidad (definida por ambos autores) presenta textura diferente infiriendo dentro de la misma la presencia de dos unidades. De acuerdo a la bibliografía esas unidades corresponden a la Formación Guacharaca (textura con alta rugosidad) y Formación Churuguara (Textura lisa con baja rugosidad) (Figura 6.19C y 6,19D).

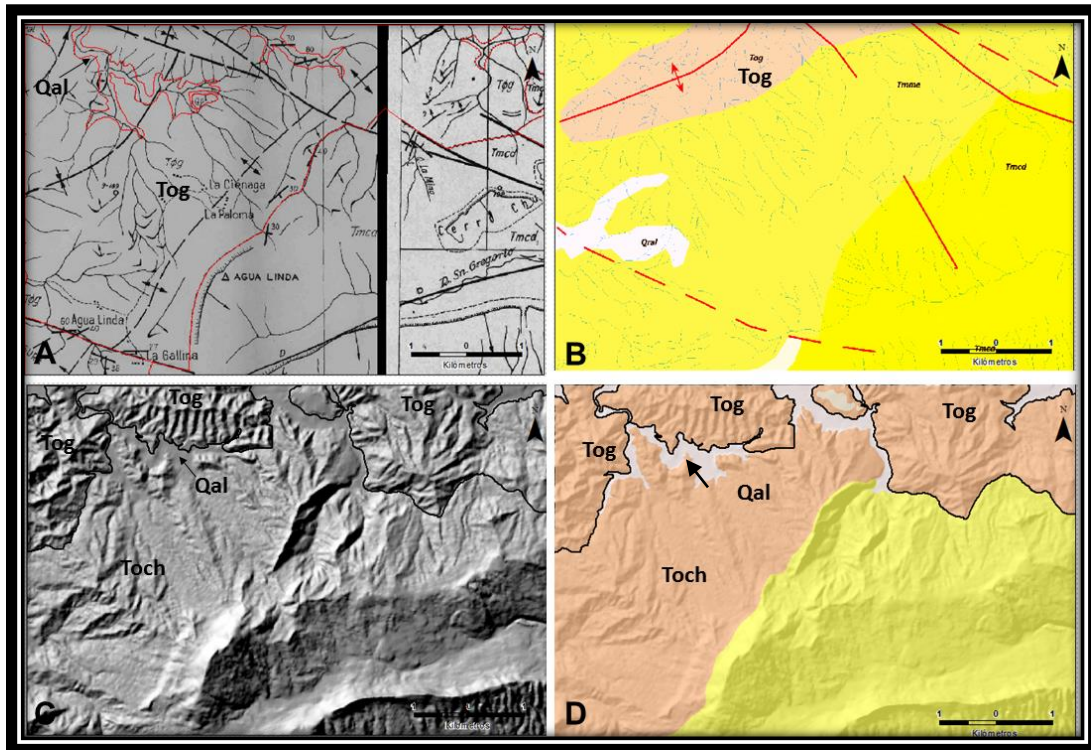


Figura 6.19. Comparación de la Formación Guacharaca cartografiada en esta investigación con otros mapas.

Finalmente; en esta investigación los miembros El Salto y Menecito correspondiente a la Formación San Lorenzo; Policarpio, Huso y Husito correspondiente a la Formación Pozón (cartografiado en los distintos mapas utilizados en esta investigación) se agruparon en una sola unidad litológica asignándole la nomenclatura

Tmsl y Tmp respectivamente. Esto es debido a sus características litológicas similares, la cual fue imposible diferenciar mediante la interpretación de los productos obtenidos por sensores remotos y sus relaciones morfológicas (Figura 6.16).

### VI.2.2.3 Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua

Las Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua se encuentran ubicadas al NO y SE de la zona de estudio separados por el valle del río Tocuyo. Dichas formaciones al norte del río Tocuyo afloran en dirección preferencial NE-SE, mientras que al sur del mismo río las Formaciones se disponen en orientación E-O (Figura 6.20).

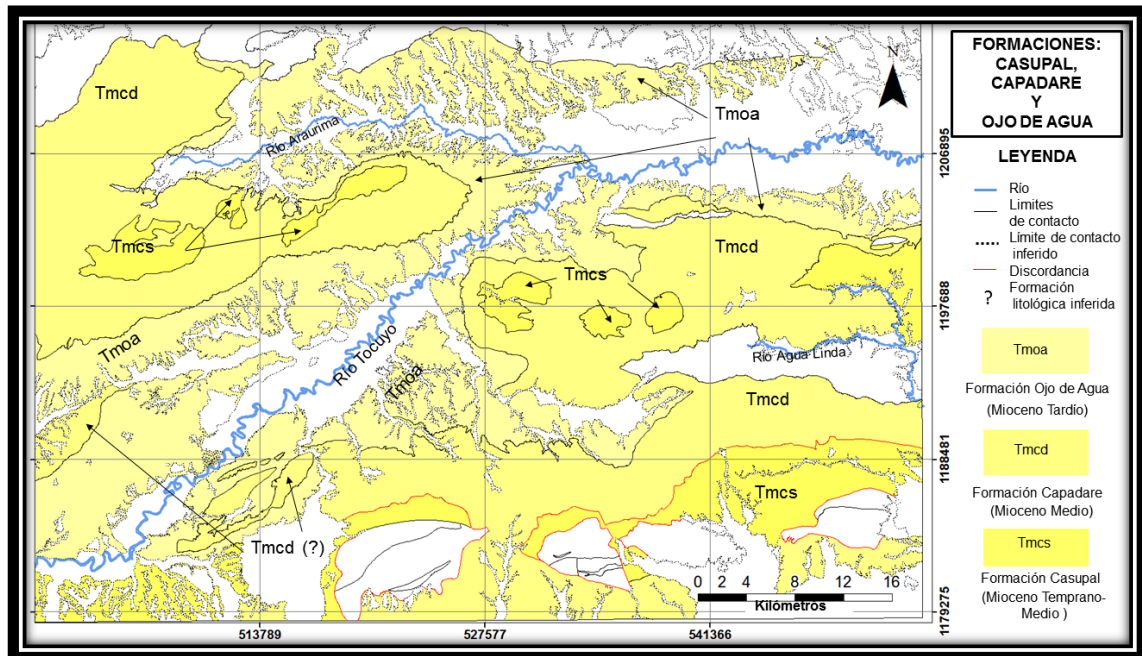


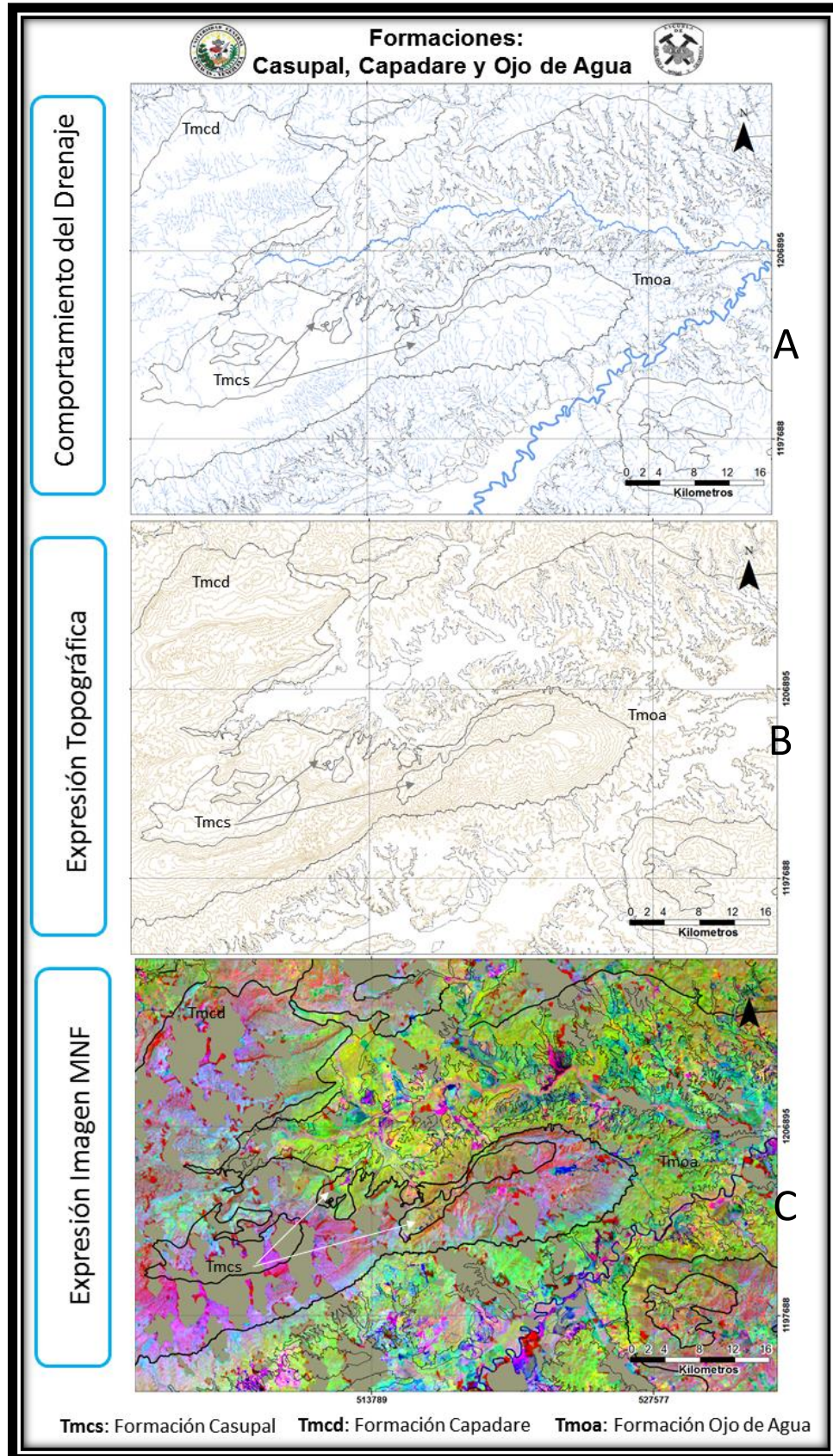
Figura 6.20. Formaciones Casupal, Capadare y Ojo de Agua.

La delimitación de estas Formaciones está relacionadas en gran medida a la expresión topografía a la cual corresponden. Los cuerpos litológicos que afloran en la unidad de Montaña alta casi en su totalidad corresponden a la Formación Capadare alcanzando las máximas alturas en toda la zona de estudio (800-1200 m.s.n.m.). Por su parte, la Formación Ojo de Agua tiene su expresión topográfica en la unidad de montaña baja definida por colinas de base triangular y filas transversales (filas con formas de

espinas de pescado) con alturas que oscilan entre 150 y 200 m.s.n.m. Finalmente, los afloramientos de mayor extensión de la Formación Casupal están ubicados al norte los cerros, Tarana, La Zurda, San Quintín y Salsipuede (al SE de la zona de estudio), teniendo su expresión topográfica dentro de la unidad de Montaña media definiendo como tipo de relieve filas alargadas en con tope amesetado, cuyas alturas oscilan entre 300 y 400 m.s.n.m.(Figura 6.21B)

Además de la expresión topográfica, el tipo de pendiente y la densidad del drenaje asociado también fueron factores importantes para identificar los cuerpos litológicos de cada una de estas Formaciones. La Formación Casupal posee pendiente moderada y densidad de drenaje media. Por su parte, la Formación Capadare posee pendiente muy abrupta en algunos casos de tipo escarpe y densidad de drenaje baja. Finalmente, la Formación Ojo de Agua posee pendiente suave con alta densidad de drenaje en la colinas y densidad media en las filas transversales (Figura 6.21A y Figura 6.21B).

Por su parte, el MDIS y la imagen MNF aportaron información que permitieron complementar lo observado en el mapa topográfico digitalizado. Los accidentes topográficos de la Formación Ojo de Agua se observan con facilidad en el MDIS cuya textura marca el límite del contacto entre las Formaciones Ojo de Agua y Capadare. Por su parte, la imagen MNF mediante la agrupación de píxeles púrpura (60%), azul (25%) y agua marina (15%) permitió delimitar la Formación Capadare de Ojo de Agua (Figura 6.21C y Figura 6.21D).



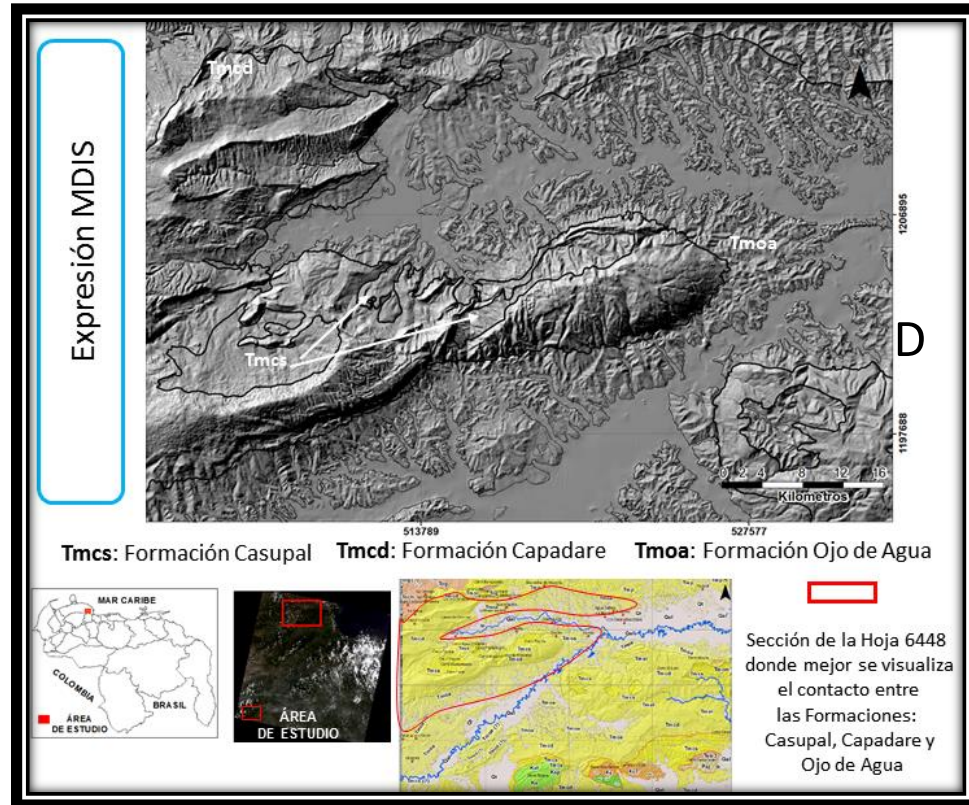


Figura 6.21. Comportamiento del drenaje y expresión topográfica, MNF y MDIS de las Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua.

Formación	Comportamiento del drenaje	Expresión topográfica	Expresión MNF	Expresión MDIS
Ojo de Agua (Tmoa)				
Capadare (Tmcd)				
Casupal (Tmcs)				

Figura 6.22. Formaciones: Casupal, Capadare y Ojo de Agua.

Al suroeste de la zona de estudio, al norte y sur del poblado Uriacora, estas Formaciones presentan incongruencias con lo cartografiado por los distintos mapas utilizados en esta investigación.

A continuación se describen algunas de las incongruencias litológicas observadas en los distintos mapas utilizados en esta investigación

- Al norte de Uriacora, en la unidad de Montaña baja (Fila con cresta convergente) Guzmán & Morillo (2009) cartografían la unidad como Aluvión. De acuerdo a los resultados obtenidos por las distintas técnicas de sensoramiento remoto, en especial el MDIS, y las relaciones morfológicas asociadas; se interpretó que la unidad está formada por sedimentos no consolidados y por roca dura. De acuerdo a la bibliografía se infiere que las planchetas triangulares mostradas en el MDIS corresponden a las calizas de la Formación Capadare. (Figura 6.23).

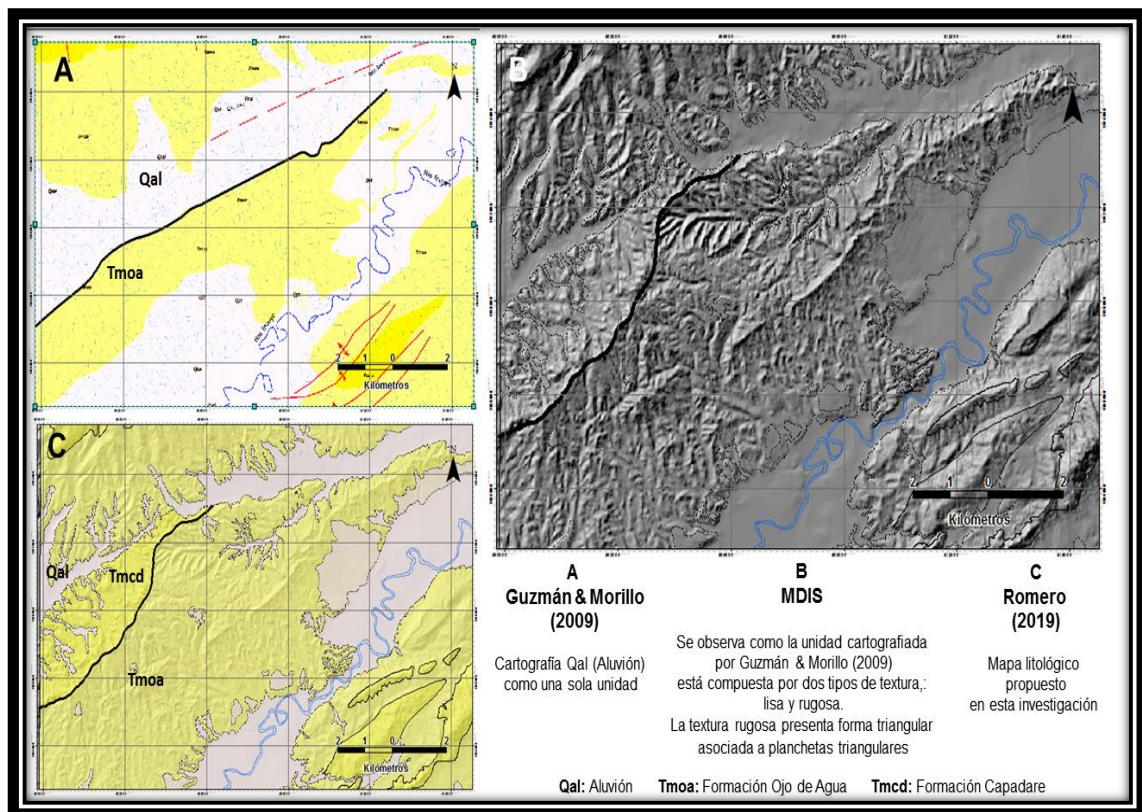


Figura 6.23. Incongruencia entre el mapa de Guzman & Morillo (2009) y el MDIS.

- Al sur de Uriacora, la Creole (1968) y FUNVISIS (2013) cartografiaban la Formación Guaidima y la Formación Cueparo, las mismas están invalidadas por la Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología CVET (1997). Por su parte, estudios recientes (Guzmán & Morillo, 2009) de acuerdo con las características litológicas observadas en campo estas unidades corresponden a la Formaciones Ojo de Agua (Tmoa) y Capadare (Tmcd) respectivamente, sin embargo; los resultados por sensoramiento remoto no arrojaron información contundente que permitiera aclarar esta incongruencia. Por tal razón, en esta investigación las Formaciones cartografiadas por la Creole (1968) y FUNVISIS (2013) se cartografiaron de acuerdo a lo establecido por Guzmán & Morillo (2009). (Figura 6.24).
- En esta misma zona, Guzmán & Morillo (2009) cartografía como Aluvión (Qal) un sector que para el resto de los autores corresponde a la Formación Ojo de Agua (Tmoa). De acuerdo a todos los resultados obtenidos, en esta investigación se difiere de lo cartografiado por Guzmán & Morillo (2009) y se coincide con el resto de los autores. (Figura 6.24).

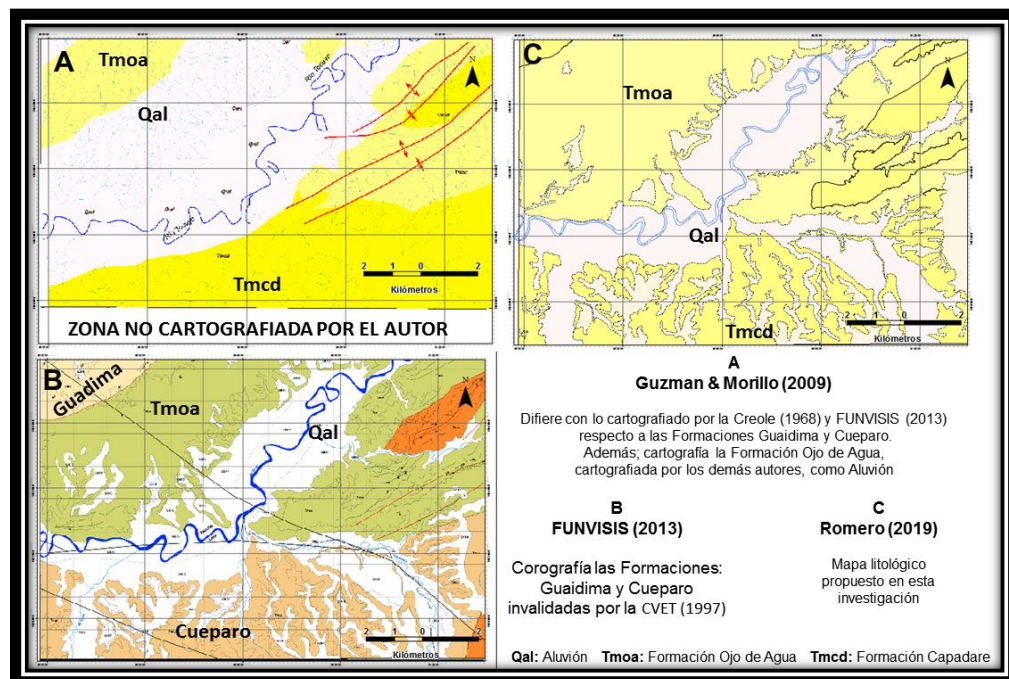


Figura 6.24. Incongruencia entre los distintos mapas utilizados en esta investigación.

### **VI.2.3 Sedimentos no consolidados: Aluvión y Terraza**

Estas unidades representan los sedimentos aún no consolidados presente en la Hoja 6448, se ubican en la unidad de Valle, del tipo Llanura aluvial y de desborde, principalmente en los valles del río Tocuyo y Aroa y representando un 27% del área total de estudio (Figura 6.25).

Todos los resultados obtenidos mediante el procesamiento de imágenes satelital resultaron ser eficientes al momento de separar los sedimentos no consolidados de las rocas duras y esto es debido a que la zonas llanas del área de estudio se encontraban ausente de vegetación, lo que permitió al programa realizar una excelente discriminación. Esto se observó en la imagen SAM, en todas las combinaciones y algebra de bandas, en la clasificación supervisada y en la no supervisada. Por su parte el comportamiento de la firma espectral permitió corroborar lo observado visualmente en cada uno de los productos generados.

La delimitación minuciosa del contacto entre los sedimentos no consolidados y la roca dura se realizó mediante el MDIS. Este modelo permitió ver a detalle todas las zonas donde se encontraban sedimentos asociados a Aluvión y a posibles Terrazas (textura lisa como primera evidencia); y así poder realizar la delimitación del contacto mucho más detallado, el cual coincidió en gran medida por lo cartografiado por los diversos autores exceptuando a Guzmán & Morillo (2009). Dicho autor no detalla esta unidad dentro de las unidades de roca dura.

La clasificación de esta unidad consistió de Aluvión (Qal) y Terraza (Qt) difiriendo de la clasificación realizada por FUNVISIS (20013). Los sedimentos no consolidados cartografiados por FUNVISIS (2013) se encuentran muy detallado; de acuerdo a la clasificación de Zinck (1981) corresponden a un tipo de terreno que solo se pueden cartografiar a escala menores a 1:10.000. Por otro lado, los productos generados en esta investigación no permiten extender esta unidad a escala más detallada, para ello se necesita realizar un estudio de campo.

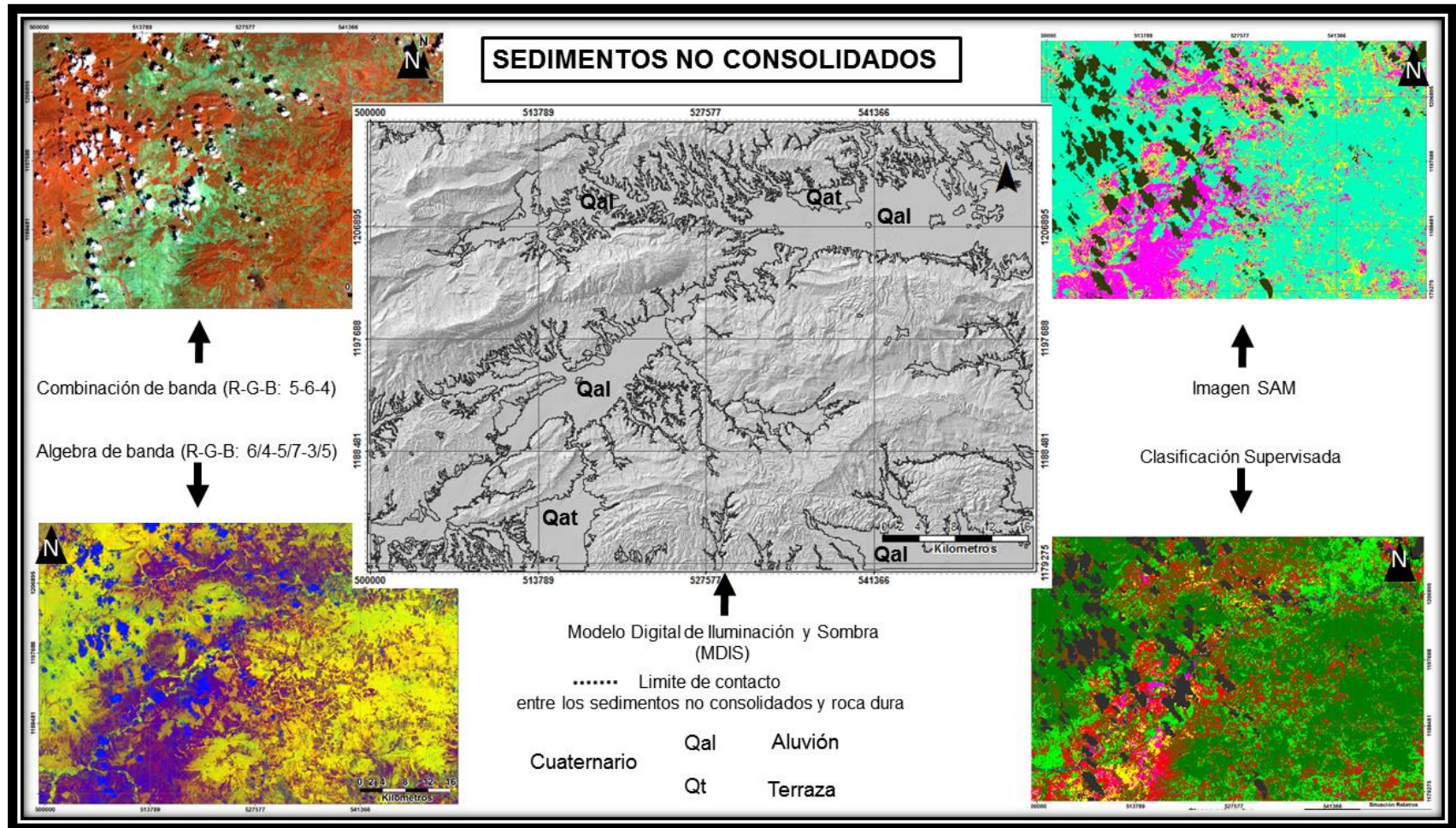


Figura 6.25. Sedimentos no consolidados presente en la zona de estudio.

## VI.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA HOJA 6448

### VI.3.1 Marco Neotectónico del Área de estudio

El estudio neotectónico del Noroccidente venezolano ha permitido identificar numerosos accidentes estructurales de actividades tectónicas recientes. Audemard (1993) agrupa estas fallas en cinco sistemas según su orientación y cinemática 1) Fallas E-O dextrales, (sistema de falla de Oca- Ancón, falla de Adícora), 2) fallas NO-SE dextrales (fallas de Lagarto, Urumaco, Río seco. La Soledad, Santa Rita), 3) fallas NNO-SSE normales (falla de la costa oeste), 4) fallas NNE- SSO sinestrales (falla de Carrizal, El Hatillo) y 5) fallas OSO-ENE inversas subparalela al plegamiento general del anticlinorio de Falcón (fallas Taima Taima, Chuchure, Matapalo, Araurima). Desde este punto de vista del desplazamiento activo, las fallas que pudieran estar interviniendo en la cinemática de las estructuras del área de estudio serían la falla de corrimiento de Araurima, con orientación OSO-ENE la cual atraviesa el sector centro-occidental de la Hoja 6448, hacia la base de la fila disectada que incluye la localidad Araurima y la falla Oca-Ancón transcurrente dextral, con rumbo E-O en el sector de Socremo, por su carácter regional y por su proximidad al sur de la Hoja. (Figura 6.26) Esta configuración de estructuras tectónicas indica que la zona de estudio se encuentra bajo un régimen transpresional (transcurrente-compresivo).

El sistema de falla de Oca- Ancón constituye el accidente tectónico activo más importante de la región noroccidental de Venezuela por su longitud (650 km de largo), velocidad de desplazamiento (2 mm/a) y sismicidad asociada (Audemard 1993). Este sistema de falla se extiende hacia el este desde Santa Marta (Colombia) hasta Boca de Aroa (Venezuela). Su traza activa se ha subdividido neotectónicamente en cinco sectores: 1) Santa Marta-Toas, 2) Toas-Mene Mauroa, 3) Mene Mauroa-Paraiso, 4) Paraiso-Socremo y 5) Socremo- Boca de Aroa (Audemard *et al.*, 1992; Audemard, 1993). Este último sector de Socremo se encuentra ubicado justo al Sur del área de estudio y en él, el sistema de falla recobra la orientación dominante E-O.

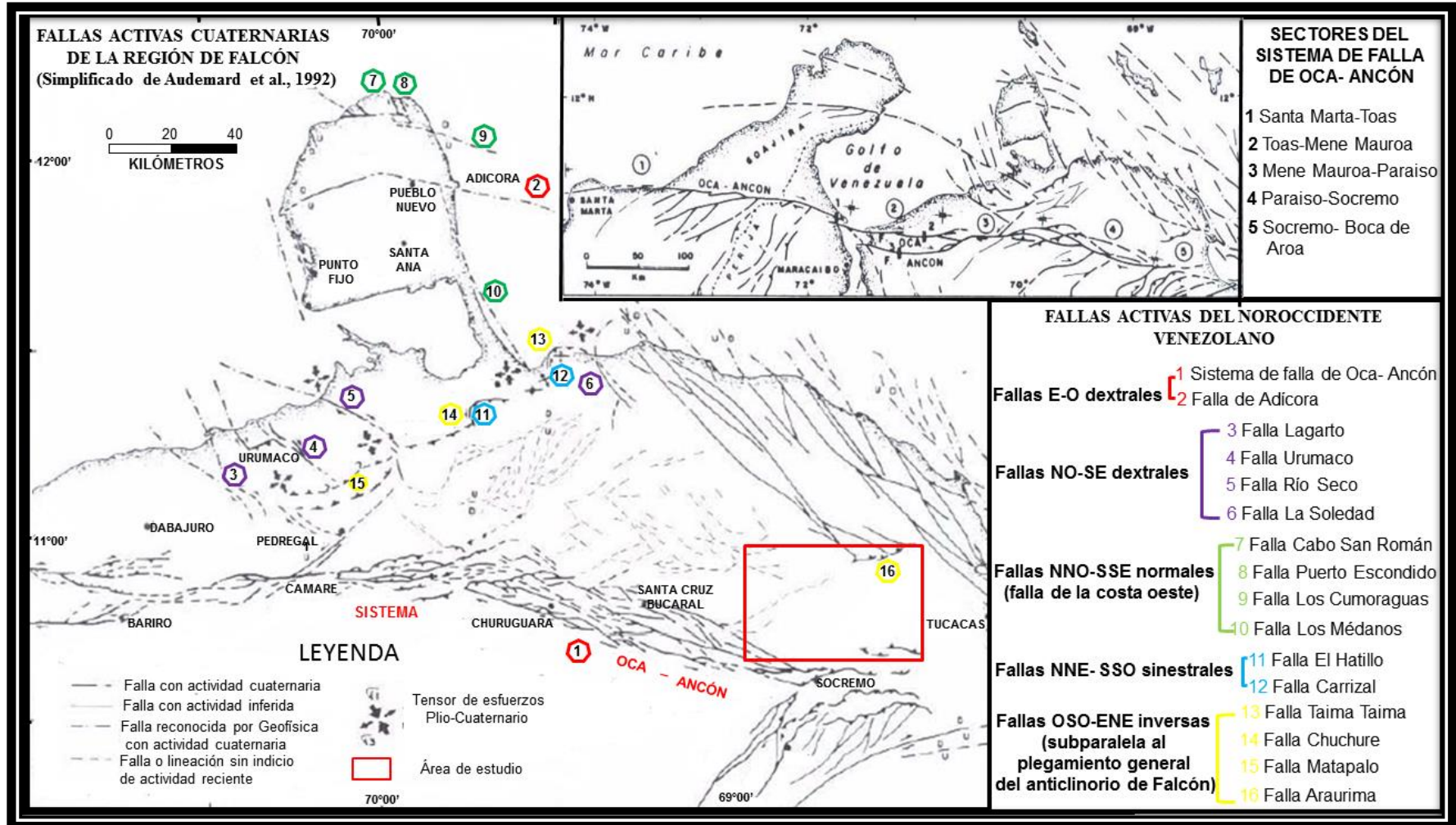


Figura 6.26. Principales fallas cuaternarias del noroccidente de Venezuela, destacando las fallas del Sistema Oca-Ancón (1) y Araurima (16) como posibles fallas controladoras de la cinemática de las estructuras del área de estudio (Tomado y modificado de Audemard *et al.* (2000)).

### **VI.3.2 Criterios y herramientas tomadas en cuenta para la de Interpretación Estructural**

La interpretación estructural del área de estudio se basó principalmente en la observación de evidencias y rasgos característicos del relieve generado por las fallas y pliegues que han podido deformar la secuencia estratigráfica del área. Para ello se realizó inicialmente la interpretación de los primeros productos generados mediante la digitalización, interpretación y procesamiento de la data espacial: Mapa topográfico, Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) y capas temáticas (pendiente y orientación de ladera). Posteriormente se interpretó los datos de percepción remota: Fotografías aérea (correspondiente a la misión 020141 del año 1968 a escala 1:50.000) y la imagen de radar (correspondiente a la hoja N° NC19-7 a escala 1:250.000). Finalmente se elaboró dos cortes geológicos que permitió observar la relación espacial de las estructuras definidas en esta investigación.

Entre los múltiples productos, generados en esta investigación, el que mayor información proporcionó y el más utilizado para la identificación de las estructuras presente en el área de estudio; corresponde al Modelo Digital de Iluminación y Sombras (MIDS), donde se manejó la orientación azimutal de los rayos del sol a diferentes ángulos separados cada 45°, a fin de evaluar, con diferentes ángulos, las sombras generadas por las geoformas asociadas a las expresiones superficiales de las estructuras de deformación del terreno. Por otro lado, este modelo permitió mostrar la mayor cantidad de lineaciones presente en la Hoja 6448; las lineaciones evidenciadas se tomaron como referencia para realizar un diagrama de rosas representando la orientación y frecuencia del rumbo de las estructuras en un semicírculo dividido en cuatro cuadrante de 90°, orientado en su parte medio con el norte (N) y a la derecha e izquierda: este (E) y oeste (O) respectivamente (Figura 6.27).

Mediante el diagrama de rosa se puede analizar que la orientación del tensor de esfuerzo principal es NO-SE. Dicho esfuerzo principal se corresponde con los tensores

de esfuerzos de edad Plio- cuaternaria en el noreste de Venezuela obtenidos a partir de mediciones microtectónicas propuesto por Audemard (1997).

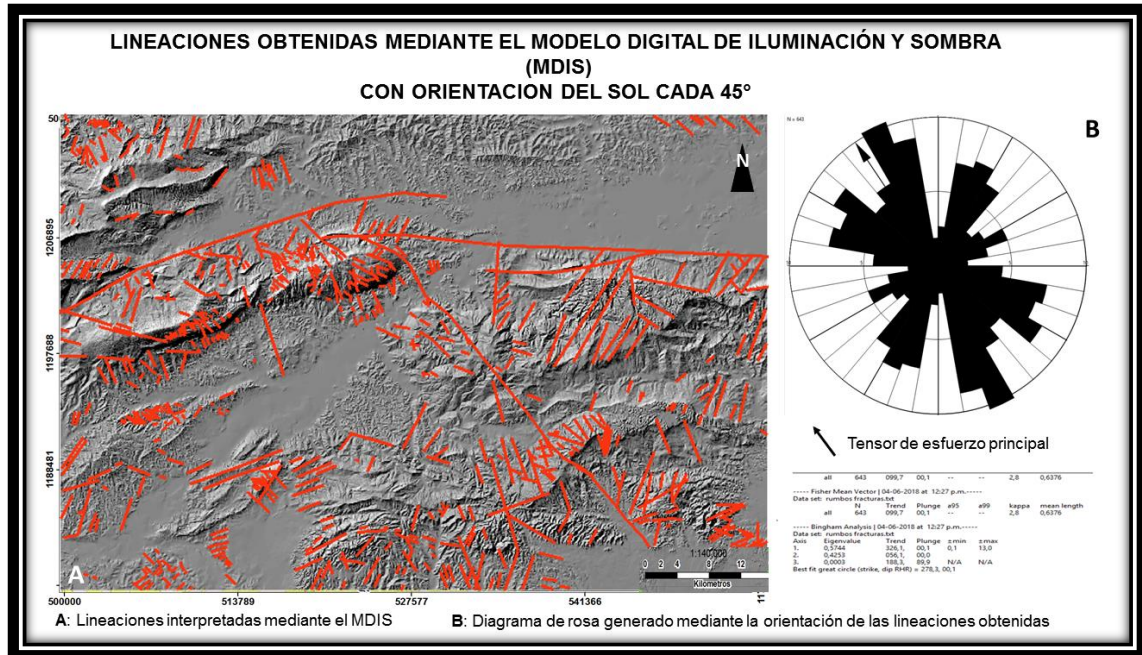


Figura 6.27. Lineaciones obtenidas mediante el Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) con orientación del sol cada 45°

También resultó de gran ayuda la herramienta 3D *ArcScene*, que permitió exagerar la escala vertical y rotar en todos los ángulos la superficie deformada y erosionada del terreno para visualizar y redefinir la ubicación de las trazas de fallas inferidas así como su cinemática y geometría. De igual forma contribuyó a inferir algunos ejes de pliegues y su configuración espacial en antifórmes o sinfórmes.

La integración e interpretación de los distintos productos generados en esta investigación, sumado a una revisión bibliográfica; que permitió comparar los resultados obtenidos con los propuestos por otros autores (Creole, 1968; Guzmán & Morillo, 2009 y FUNVISIS, 2013) dio como resultado la actualización de las estructuras presente en la zona de estudio (Figura 6.28).

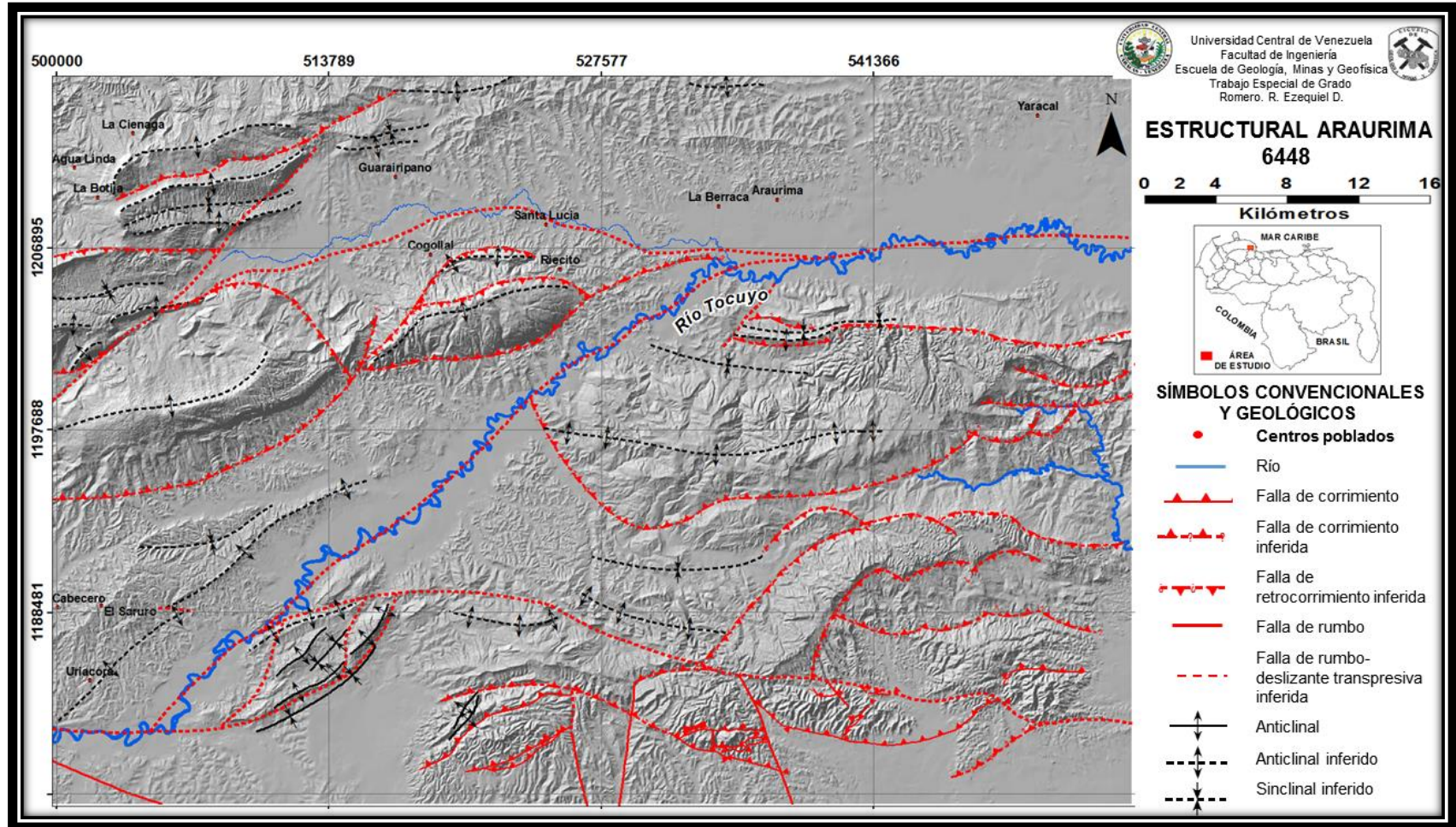


Figura 6.28 Mapa Estructural de la Hoja 6448 con base a la integración e interpretación de los resultados obtenidos mediante sensores remotos y datos bibliográfico.

### **VI.3.3 Identificación y descripción de las estructuras de deformación**

Tomando en cuenta la interrupción y desplazamiento de las líneas de cresta de las filas, el cambio abrupto de la orientación del curso de los ríos, la presencia de planchetas triangulares alineadas en las laderas de las elevaciones topográficas, el contacto contrastante de bloques con expresiones de relieve muy diferentes y choques angulares de las capas, las elevaciones topográficas con laderas de pendientes escarpada (escarpes de falla), entre otros, sumado a datos bibliográficos, se pudo diferenciar las siguientes estructuras presente en la zona de estudio

- Fallas de corrimiento orientadas OSO-ENE
- Fallas de corrimiento orientadas E-O
- Retrocorrimientos subparalelos y con frentes opuestos a los corrimientos
- Fallas rumbo-deslizantes transpresivas
- Estructuras dúplex
- Pliegues

A continuación se describen cada una de las estructuras

#### **VI.3.3.1 Fallas de corrimiento orientadas OSO-ENE**

Es la estructura de dominio tectónico principal en el área de estudio producto del acortamiento cortical. Se encuentran ubicadas en el sector nor-occidental de la Hoja 6448 abarcando los poblados Ciénaga y Santa Lucia. Este sistema de fallas se encuentra expresada por un conjunto de filas subparalelas, se reflejan los estratos corridos y levantados sobre fallas inversas de corrimiento, las cuales a su vez tienen asociadas otras estructuras de deformación como retrocorrimientos y pliegues de propagación. Por la orientación preferencial de sus trazas de falla OSO-ENE se deduce una dirección de esfuerzo principal proveniente del NO, perpendicular con dirección S30-40E, correspondiendo a lo establecido por Audemard (1997) (Figura 6.29).

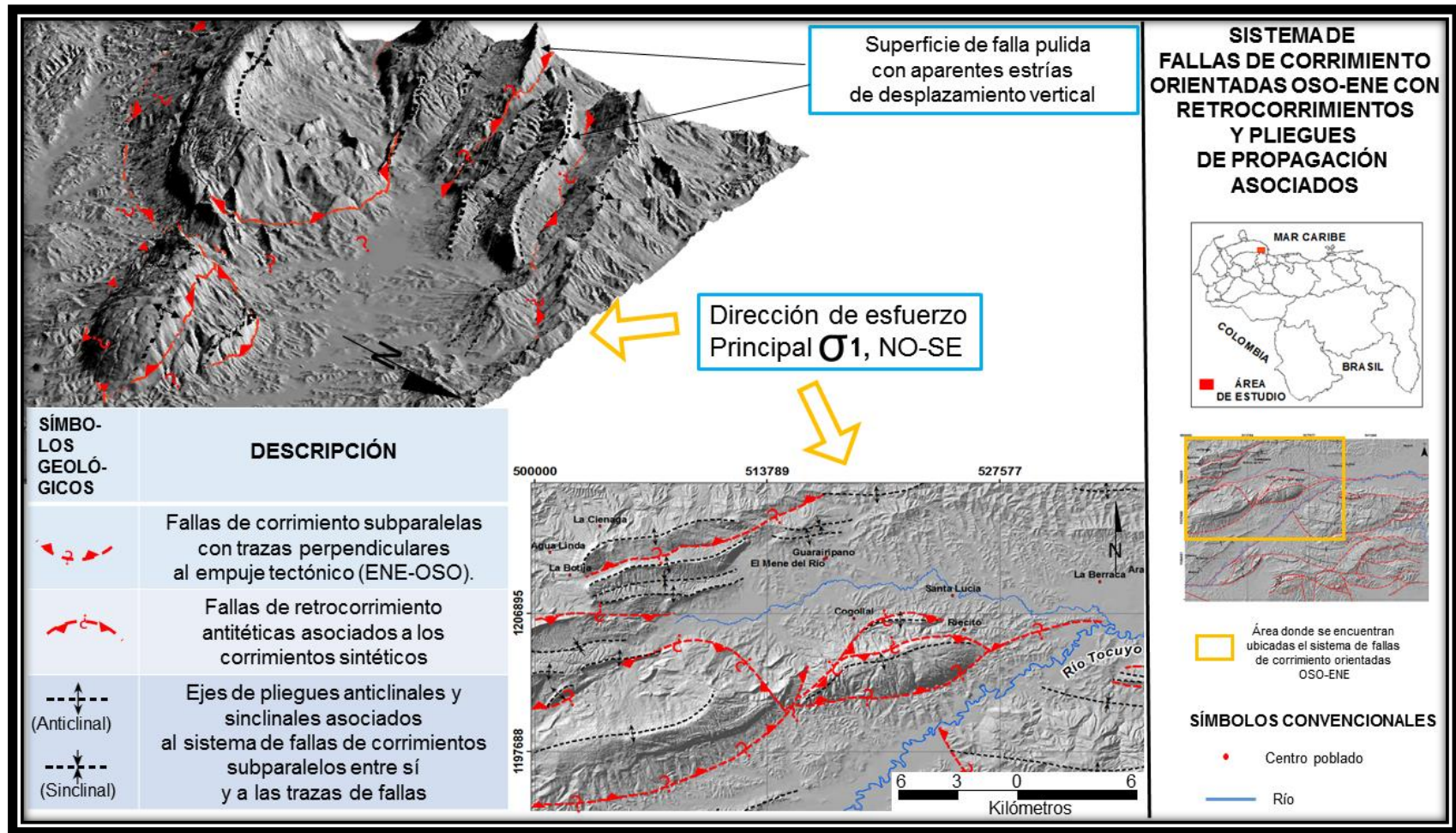


Figura 6.29. Fallas de Corrimiento del sector nor-occidental del área con pliegues y retrocorrimientos asociado.

### VI.3.3.2 Fallas de Corrimiento orientadas E-O

Las fallas de corrimiento interpretadas hacia el cuadrante SE de la Hoja 6448 se presentan con trazas curvas, con la concavidad de sus planos generalmente hacia el norte y una orientación dominante aproximada E-O. Esto sugiere un cambio de la dirección de esfuerzo principal de N60-70O a Sur franco o podría interpretarse como una rotación local en sentido horario de las estructuras compresivas por un sistema de fallas transcurrentes regionales. Esto último cobra sentido si consideramos este sector como un bloque rígido que se encuentra entre la falla transcurrente al N que controla el curso EO del río Tocuyo y otra falla al Sur del sistema transcurrente dextral Oca-Ancón, también orientada EO. De esta forma correspondería a un bloque romboidal rotado sentido horario entre dos fallas transcurrentes dextrales generando una estructura dúplex que en el área de estudio no se presenta completa su geometría, por lo resultaría útil verificar las continuidad de las fallas transcurrentes principales en la hoja adyacente (Hoja 6548) (Figuras 6.30 y 6.33).

### VI.3.3.3 Retrocorrimientos subparalelos y con frentes opuestos a los corrimientos

Con la misma orientación de las trazas de los corrimientos sintéticos, es decir orientados cinemáticamente acorde a la vergencia tectónica, se presentan algunos retrocorrimientos generados por el ajuste tectónico al avance de la compresión. Por lo general, se presentan con superficies de falla curvas con cierta concavidad que se opone a la concavidad de las superficies de falla de los corrimientos principales a los que están asociados. Dicha concavidad responde geoméricamente al empuje tectónico que la genera. Las elevaciones topográficas producto de estos sistemas de fallas de corrimiento sintéticas con sus retrocorrimientos antitéticos asociados, en planta, se muestran como filas alargadas con crestas arqueadas y con base en forma de óvalos. (Figuras 6.29 y 6.30).

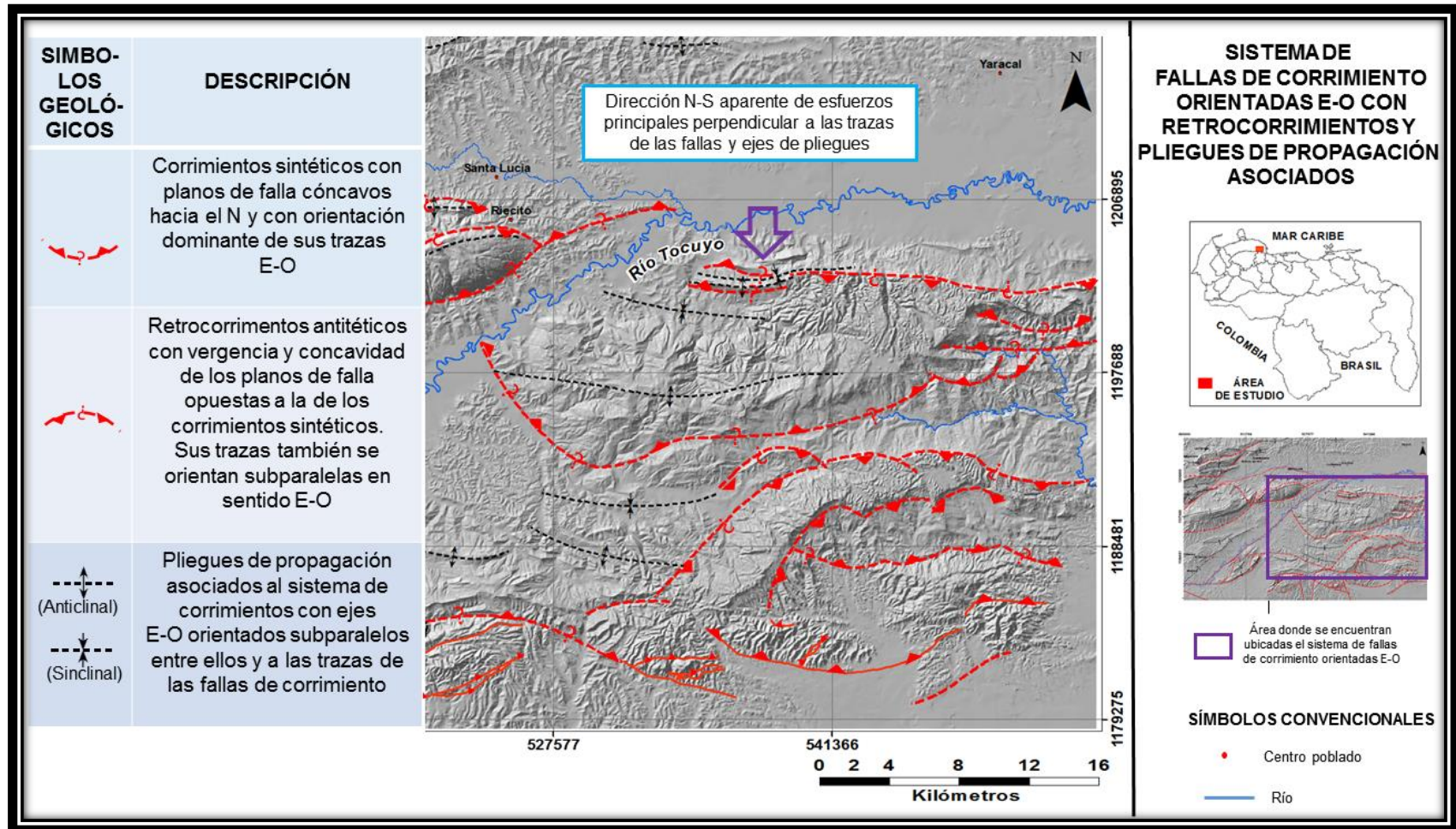


Figura 6.30. Fallas de corrimiento del sector nor-oriental del área con pliegues y retrocorrimientos asociado.

#### VI.3.3.4 Fallas rumbo-deslizantes transpresivas

Se les denomina fallas transpresivas puesto que son fallas transcurrentes con desplazamiento rumbo deslizante al que se le suma una componente vertical de fallamiento inverso por compresión, expresada en el relieve con toposformas elevadas. Como base para establecer la agrupación en familia de fallas y pliegues y sus relaciones sincinemáticas dentro de los sistemas de deformación transcurrentes, se utilizó el modelo experimental de deformación de la corteza de Riedel que se explica a continuación:

Los indicadores cinemáticos son evidencias físicas que permiten determinar el movimiento de una falla. A través de modelos experimentales de ruptura es posible ver que una falla no corresponde a un plano 100% uniforme que corta a una roca, sino que en realidad está compuesta por un conjunto de familias de fracturas con cinemáticas propias que pueden llegar a interconectarse dando lugar a la falla en sí. (Riedel, 1929, citado por Freund, 1974). Según este modelo las fracturas tipo Riedel (representadas por R) se forman durante la generación y evolución de la falla formando ángulos oblicuos respecto a la traza de la falla principal. Aparecen de forma “escalonada” o “en echelon”, es decir que ocurren de forma repetida y paralela; así como poseen la misma cinemática que la falla principal.

Según modelos experimentales y estudios de campo, un sistema Riedel está constituido por cinco familias de fallas. Las fallas Y, o maestras, son cizallas generadas en un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a  $\sigma_1$ . Por su parte, las estructuras R, R' y P son también fallas de desplazamiento lateral, siendo R y P sintéticas mientras que R' es antitética. En consecuencia, tanto R y P presentan el mismo desplazamiento relativo que las fallas maestras y R' es contrario a las mismas. Con respecto a las fallas maestras, comúnmente las R se forman en un ángulo de  $\phi/2$ , las R' lo hacen a  $90 - \phi/2$ , y las P a  $-\phi/2$ , siendo el ángulo de fricción interna del material determinado en modelos experimentales, el cual por lo común es de  $30^\circ$ . (Figura 6.31).

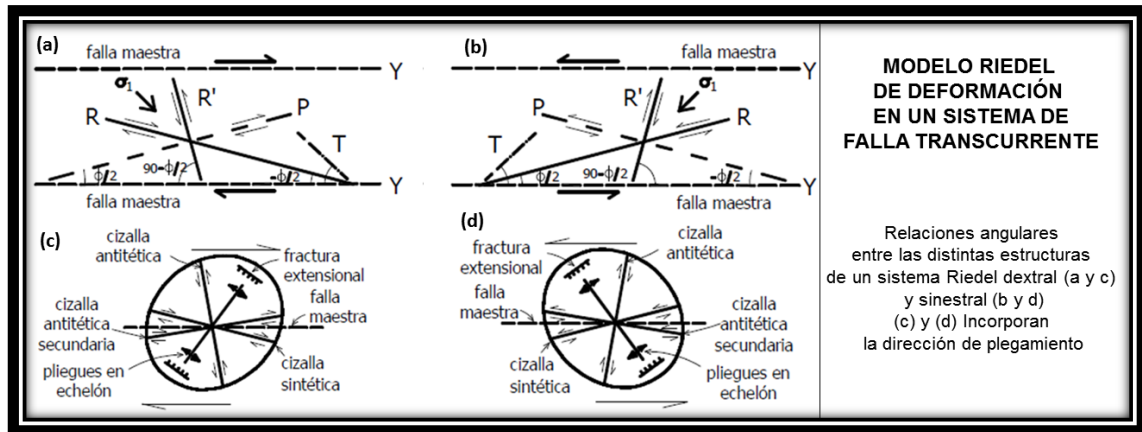


Figura 6.31. Modelo Riedel de deformación en un sistema de falla transcurrente dextral y sinistral (Tomado de Freund, 1974).

En el área de estudio las fallas de rumbo o de cizalla, formadas en un régimen transcurrente compresivo, se muestran en el área con dos rumbos preferenciales: EO y NE. Las fallas EO están asociadas a las fallas maestras del Sistema Oca-Ancón, que rigen el desplazamiento transcurrente dextral regional y las NE-SO son fallas conjugadas sintéticas relacionadas cinemáticamente con el sistema EO transcurrente dextral. En la Hoja 6448 se presentan dos fallas principales atravesando transversalmente el área al N y al S, con rumbo dominante EO. Ambas fallas son las responsables del control tectónico del curso rectilíneo del río Tocuyo en dirección EO; mientras que la falla transcurrente con rumbo NE, que atraviesa oblicuamente el centro de la Hoja, es la responsable de que el curso del río se quiebre 45° al NE y haga un salto para retomar su orientación EO al N. (Figura 6.32).

Hacia el sur de la zona de estudio se reconoce otro sistema de fallas menores transcurrentes, con rumbos N75°O y N85°E, aproximadamente que pudieran estar vinculadas genéticamente con el sistema principal de fallas transcurrente dextral. Nevado (2012) expone que estas fallas están asociadas al sistema de falla Oca- Ancón y las describe como un sistema de fallas conjugadas con orientación proximal N70°O, con extensión aproximada de 8 km y movimiento dextral.

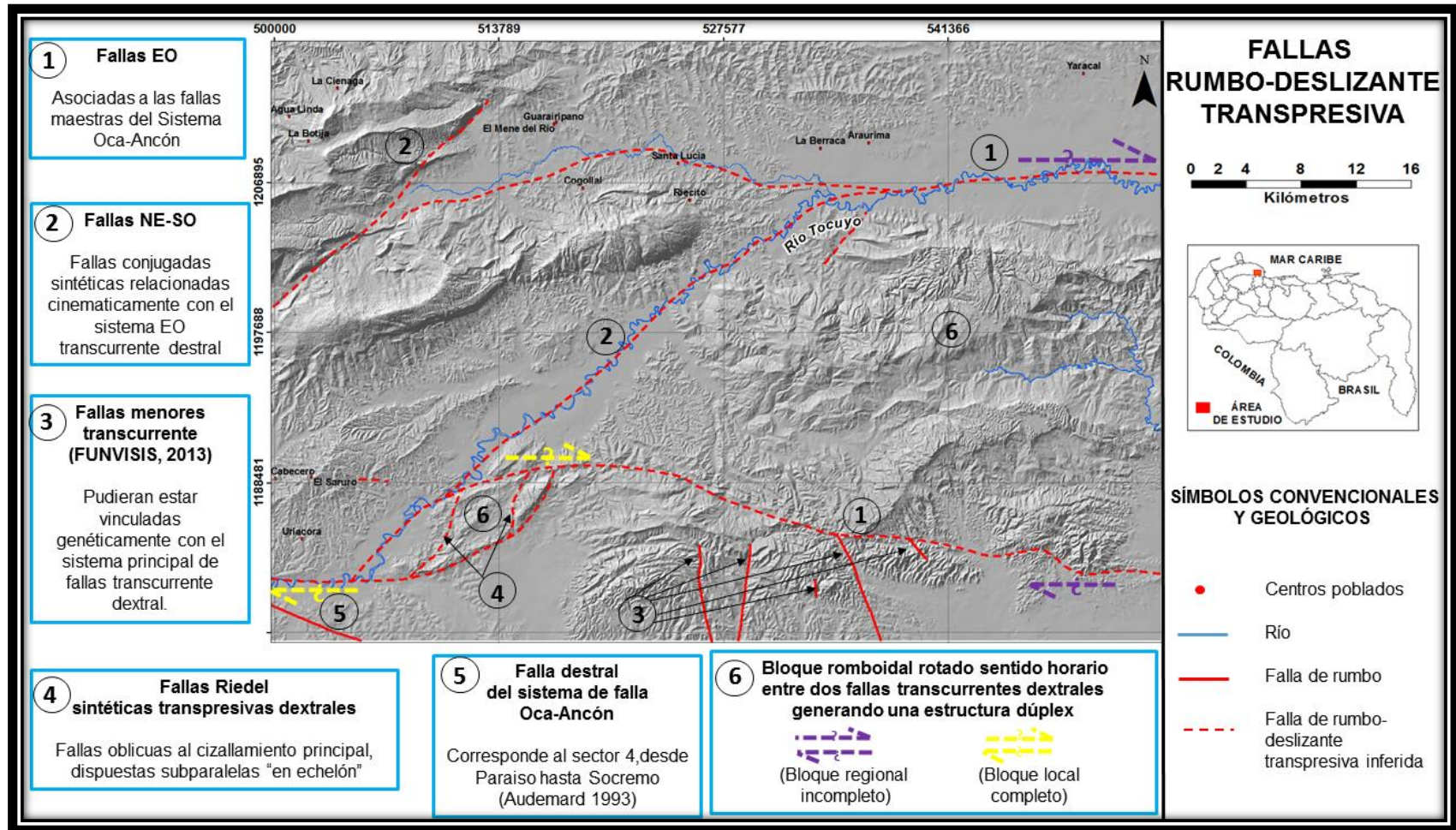


Figura 6.32. Fallas rumbo-deslizantes transpresivas.

### VI.3.3.5 Estructuras Duplex

La presencia de inflexiones y saltos a lo largo de una falla promueve la formación de estructuras denominadas duplex (Fischer & Woodcock, 1986). Las rocas que se encuentran dentro de la zona de influencia de una inflexión o salto se pueden rotar y fallar progresivamente (fallas menores paralelas a la dirección de la inflexión) generando sistemas imbricados, o en echelón”, con relación a la falla principal.

Cuando las fallas que limitan el bloque interno son transcurrentes dextrales, por la cinemática del desplazamiento lateral de las fallas, se le imprime al bloque una rotación en sentido horario; mientras que, si el desplazamiento de las fallas principales o maestras es sinistral, la rotación del bloque interno sería en sentido antihorario.

Las fallas secundarias o tipo riedel R, internas del bloque, pueden progresar a una estructura en flor positiva o flor negativa dependiendo si el sistema de fallas transcurrente le imprime una componente compresiva o extensiva respectivamente. En el caso de una estructura en flor negativa, las fallas secundarias dentro del duplex tendrán un comportamiento mixto, transcurrente-normal, por lo cual podemos decir que la zona interior está en extensión y sometida a hundimiento. Por el contrario, en una estructura tipo flor positiva, las fallas interiores se comportarán como transcurrentes-inversas, por lo cual se puede decir que la zona está en compresión y sometida a levantamiento (6.33).

Las estructuras dúplex se configuran entre dos fallas transcurrentes con un zona interna sometida a compresión y rotación. La cinemática de una falla transformante en puntos donde la falla intercepta un bloque rocoso permite el desarrollo de una inflexión o salto que evoluciona subdividiendo la falla transformante en dos, limitando al cuerpo rocoso atrapado en su zona interna (Harding, 1985). Esta partición de la deformación genera dentro y fuera del bloque un conjunto de familias de fallas y pliegues que según modelos experimentales mantienen relaciones geométricas (Freund, 1974).

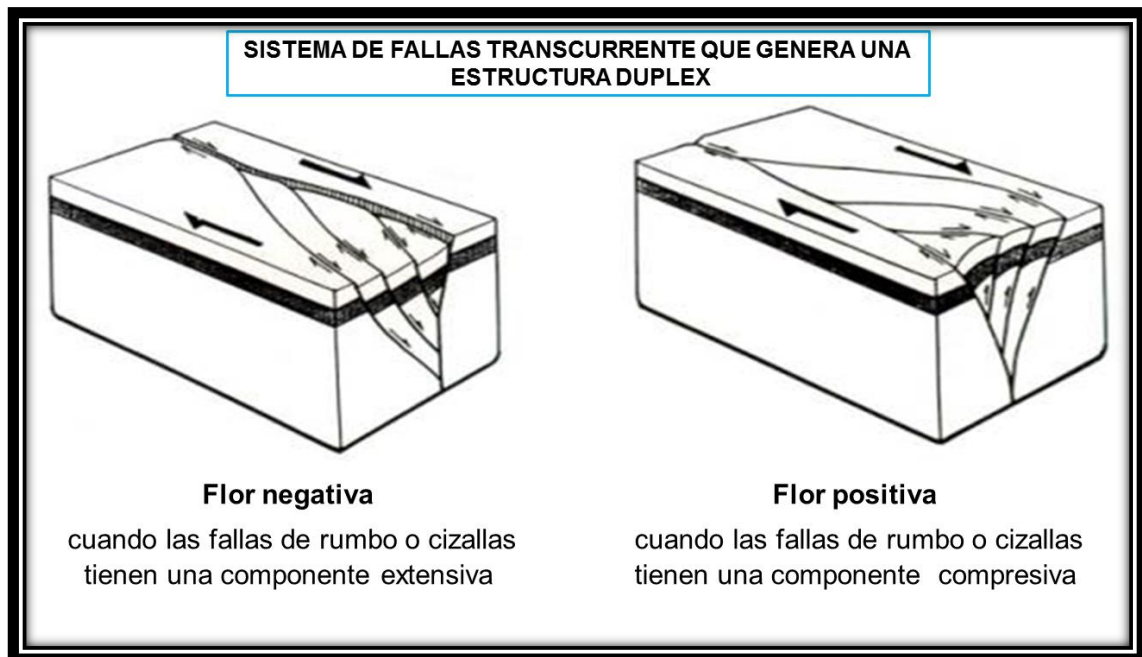


Figura 6.33. Sistema de Fallas transcurrente que genera una estructura dúplex según Fischer & Woodcock, 1986 (Tomado de Vera, 1994, citado por Ayala, 2012).

En el área de estudio se infirieron dos posibles estructuras dúplex a diferentes escalas en donde se relacionó la estructura con la forma romboidal u ovoide del bloque rocoso que quedó rodeado, rotado y deformado entre los dos ramales de una falla transcurrente dextral con componente compresiva.

A una escala menor, se hace referencia a la estructura dúplex con bloque interno en forma de ojo que se aprecia en la esquina sur occidental de la Hoja 6448. La falla transcurrente dextral que viene controlando el curso rectilíneo EO del río Tocuyo se topa con un cuerpo rocoso rígido por lo que parte los esfuerzos de deformación dentro y fuera del bloque generando un conjunto de fallas transcurrentes dextrales subparalelas entre ellas y a los bordes oblicuos del bloque. Estas son fallas transpresivas dispuestas en echelón dentro del bloque denominadas según el modelo fallas riedel R sintéticas. En este duplex el rumbo de las fallas riedel es N25°E oblicuo al desplazamiento lateral EO de la falla maestra o principal. (Figura 6.34).

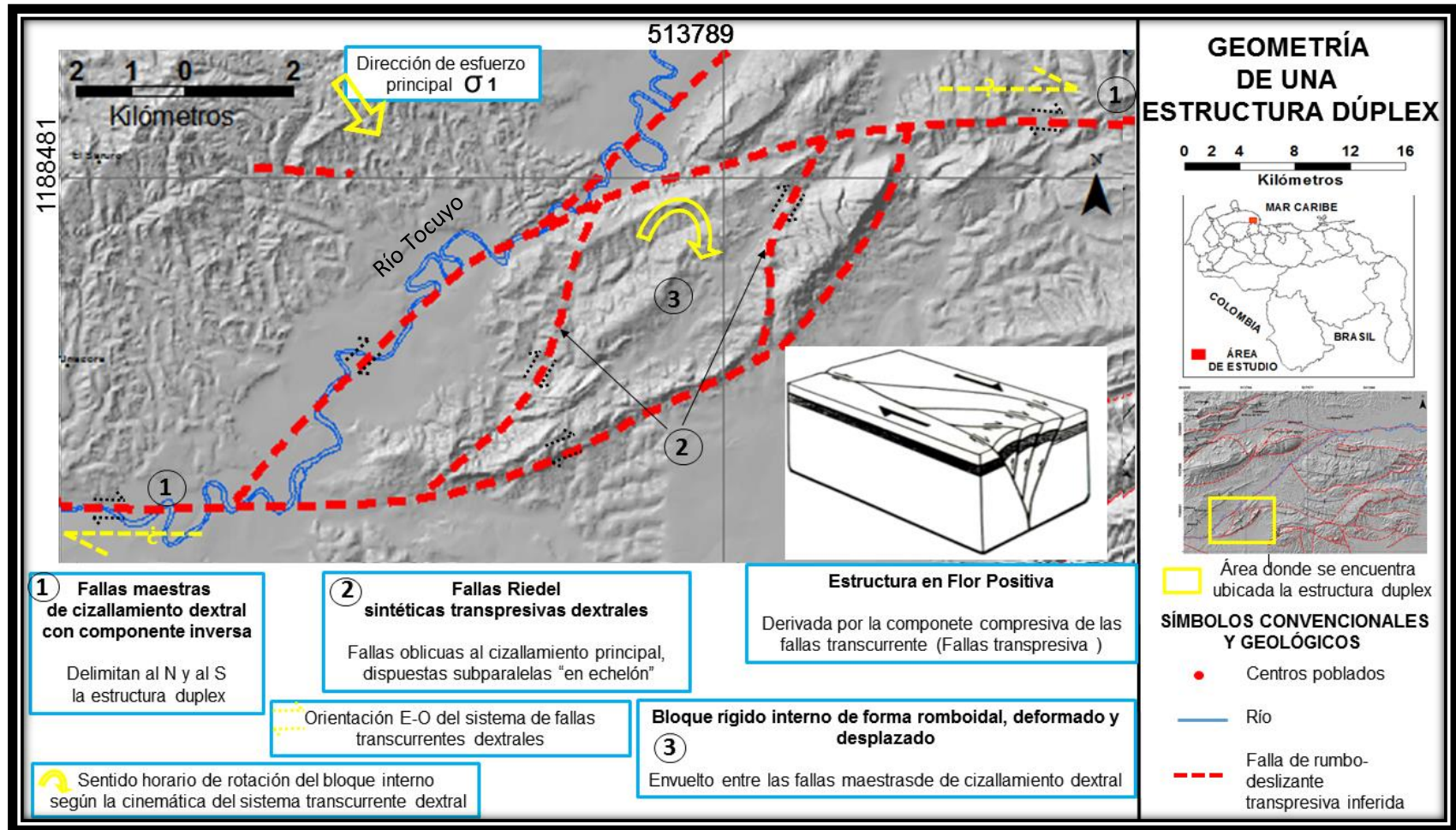


Figura 6.34. Geometría de una estructura dúplex, interpretada al suroeste de la zona de estudio.

La segunda posible estructura dúplex se encuentra ubicada al centro este de la zona de estudio, la misma se encuentra envolviendo y deformando todo un gran bloque rocoso que ocupa gran parte de la mitad sur oriental de la Hoja. Este bloque previamente deformado en una fase compresiva con corrimientos, retrocorrimientos y pliegues asociados es ligeramente rotado en sentido horario por los esfuerzos de deformación de la misma falla transcurrente dextral que hace un gran salto en la zona de la Hoja 6448 y que también es la responsable de controlar el curso del río Tocuyo. Esta falla maestra parte esfuerzos con otro ramal transcurrente dextral, también orientado EO, al sur del bloque romboidal. Se infiere la rotación del bloque explicando el ligero cambio de orientación de rumbo de las estructuras compresivas con respecto al sistema de fallas de corrimiento descrito al NO del área de estudio. Aproximadamente las trazas de las fallas y ejes de pliegues rotan 20° pasando de N70E a EO. (Figura 6.35).

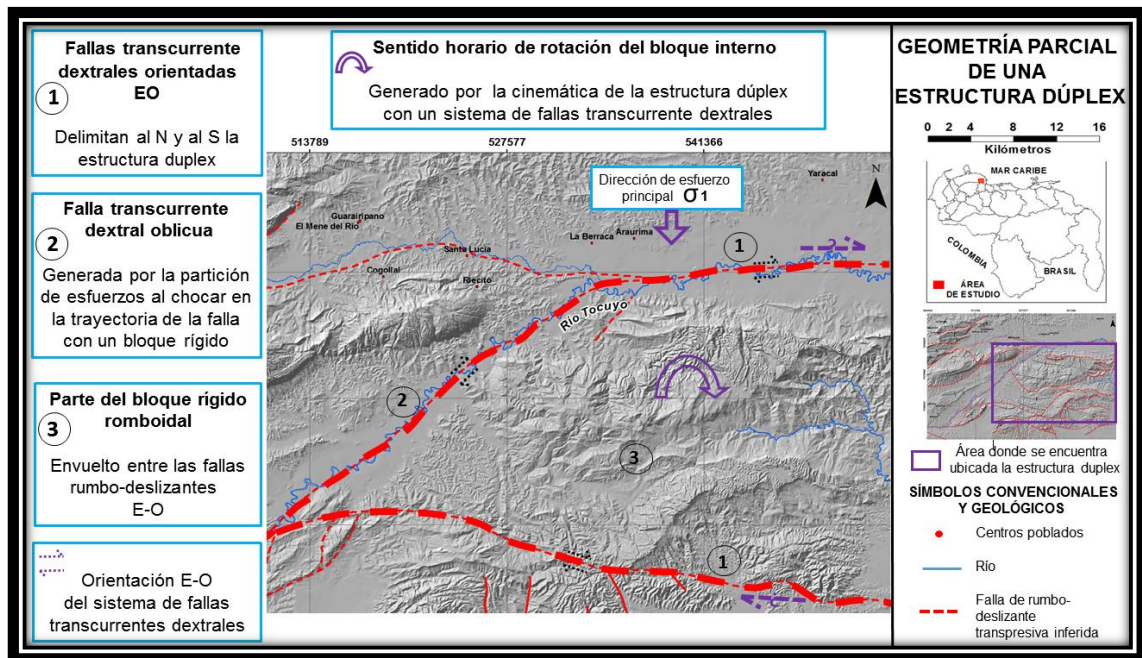


Figura 6.35. Geometría parcial de una estructura dúplex, interpretado al centro este del área de estudio.

### VI.3.3.6 Pliegues

El plegamiento en el área de estudio está relacionado con un evento compresivo con acortamiento tectónico que empujó, desarraigó y deformó un espesor de la corteza. (Figura 6.36).

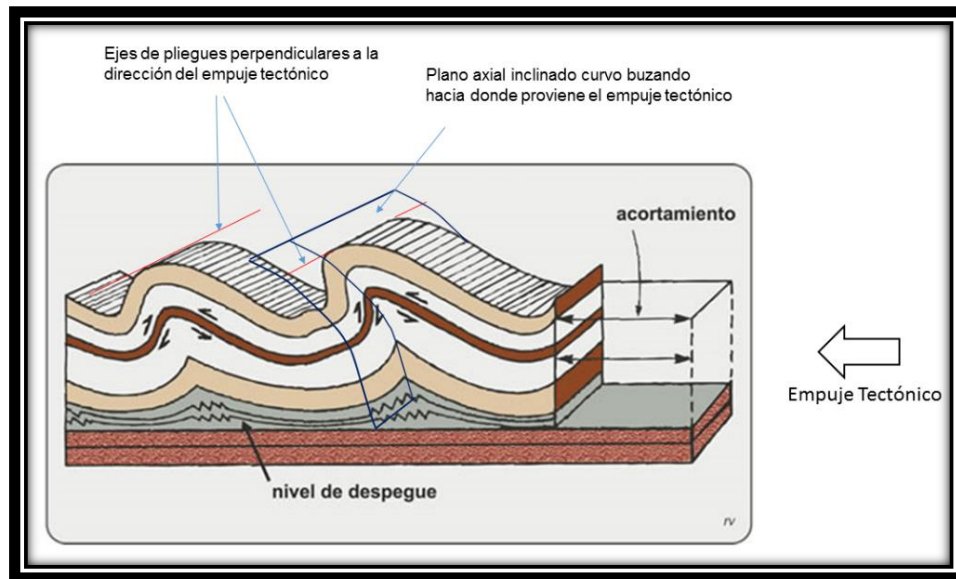


Figura 6.36. Despegue y plegamiento de una secuencia estratigráfica sobre un basamento no deformado. (Disponible [www.insugeo.org.ar/libros/misc\\_21/05.htm](http://www.insugeo.org.ar/libros/misc_21/05.htm)).

Los ejes de los pliegues, identificados en la zona de estudio, tienden a seguir la misma orientación de las trazas de fallas a las que están asociadas cinemáticamente. Hacia el sector noroccidental de la Hoja se disponen subparalelos orientados OSO-ENE, mientras que en el cuadrante suroriental los ejes de pliegues tienden a orientarse E-O. En respuesta a estas orientaciones pareciera que la dirección de esfuerzos principales sufrió una pequeña rotación de S30-40E a Sur franco (Figura 6.37).

Estos ejes de pliegues pueden presentarse rotados o disectados debido a fallas de un posterior evento transcurrente. Esto se evidencia en las filas disectadas al NO del área y en la estructura dúplex del SO del área, donde un sistema de fallas transformantes rota y desplaza las estructuras del bloque rígido interno.

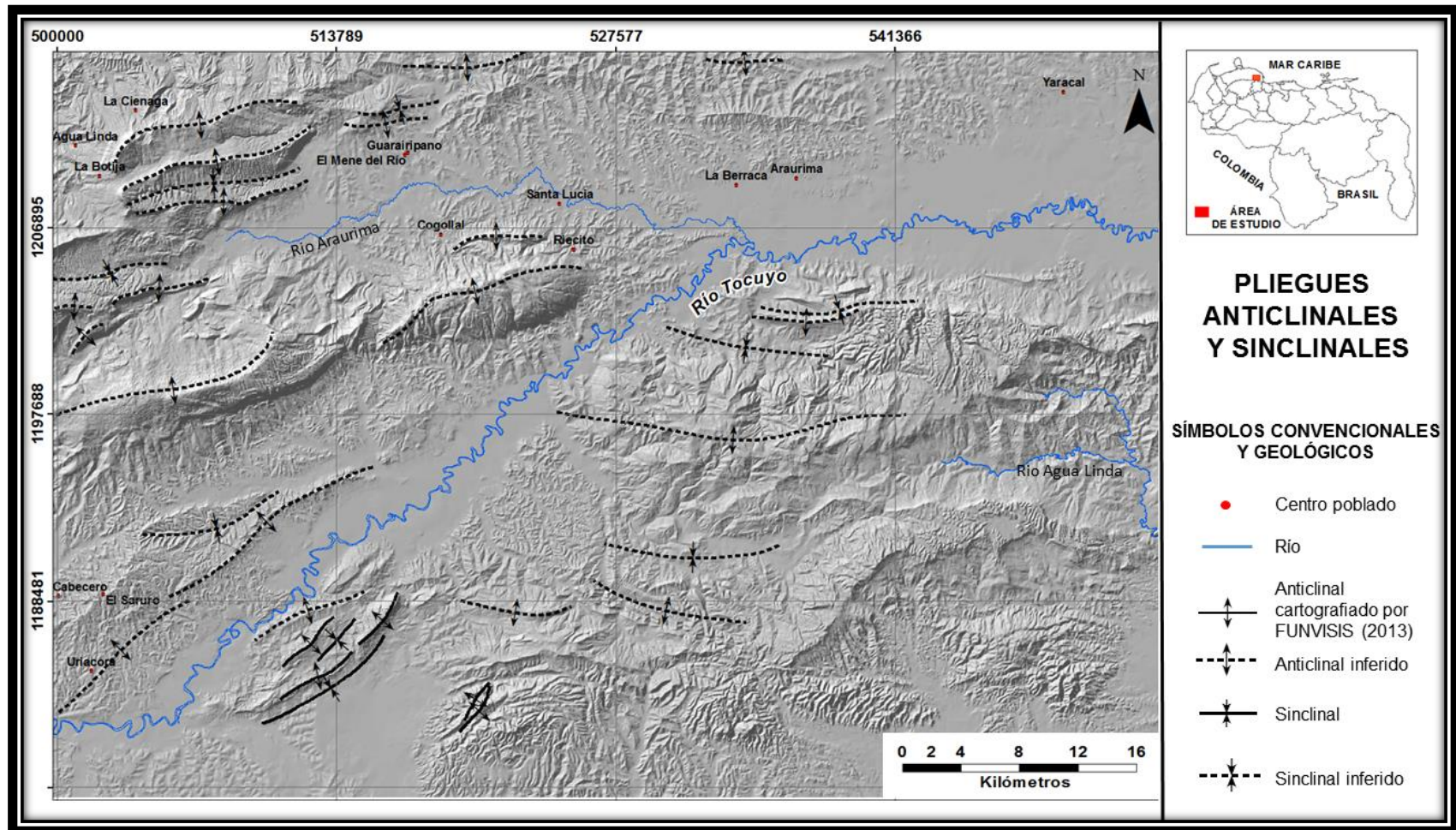


Figura 6.37. Pliegues anticlinales y sinclinales interpretados en la Hoja 6448.

## VI.4 INTERPRETACIÓN DE LOS CORTES GEOLÓGICOS

Luego de realizar la descripción y definición de las principales estructuras existentes en la zona de estudio, se elaboraron 2 cortes estructurales con la finalidad de evaluar el comportamiento de estas estructuras en profundidad. Esto permitió establecer con mayor precisión el estilo estructural, la edad relativa y la relaciones parciales entre cada una de ellas, tomando en cuenta que solo se interpretó a partir de datos de superficie obtenidos por la Creole (1968), Guzmán & Morillo (2009) y FUNVISIS (2013) e interpretación de sensores remotos (fotografías aéreas e imagen LANDSAT-8). Los cortes elaborados fueron denotados como A-A' y B-B' (Figura 6.38).

Las líneas de corte A-A' y B-B' se seleccionaron tratando de cubrir el total de las unidades topográficas expresadas en el área. El A-A', de NO a SE atraviesa las unidades de: fila de base triangular, fila disectada, llanura aluvial, colina base triangular, fila amesetada, lomeríos y llanura de desborde; mientras que el corte B-B' abarca, de NNO a SSE, las unidades de montañas bajas, valle, filas subparalelas con topes amesetados y lomeríos.

La orientación de los mismos se determinó intentando atravesar perpendicularmente las alineaciones de las trazas de fallas y ejes de pliegues, interpretados previamente con el análisis estructural, y siguiendo la dirección inferida del esfuerzo principal. Otro criterio que tuvo peso en la selección de los cortes fue que se debían aproximar a las zonas levantadas geológicamente en campo con mayor densidad de datos de orientación de las capas y cuyos rumbos fueran, en su mayoría, cercanos a la perpendicularidad con respecto a la línea del corte, de manera de poder reflejar la disposición de las capas con sus buzamientos lo más reales posible. Finalmente, los espesores totales de cada unidad estratigráfica utilizados en estas representaciones, son un promedio de los señalados en Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología CVET (1970).

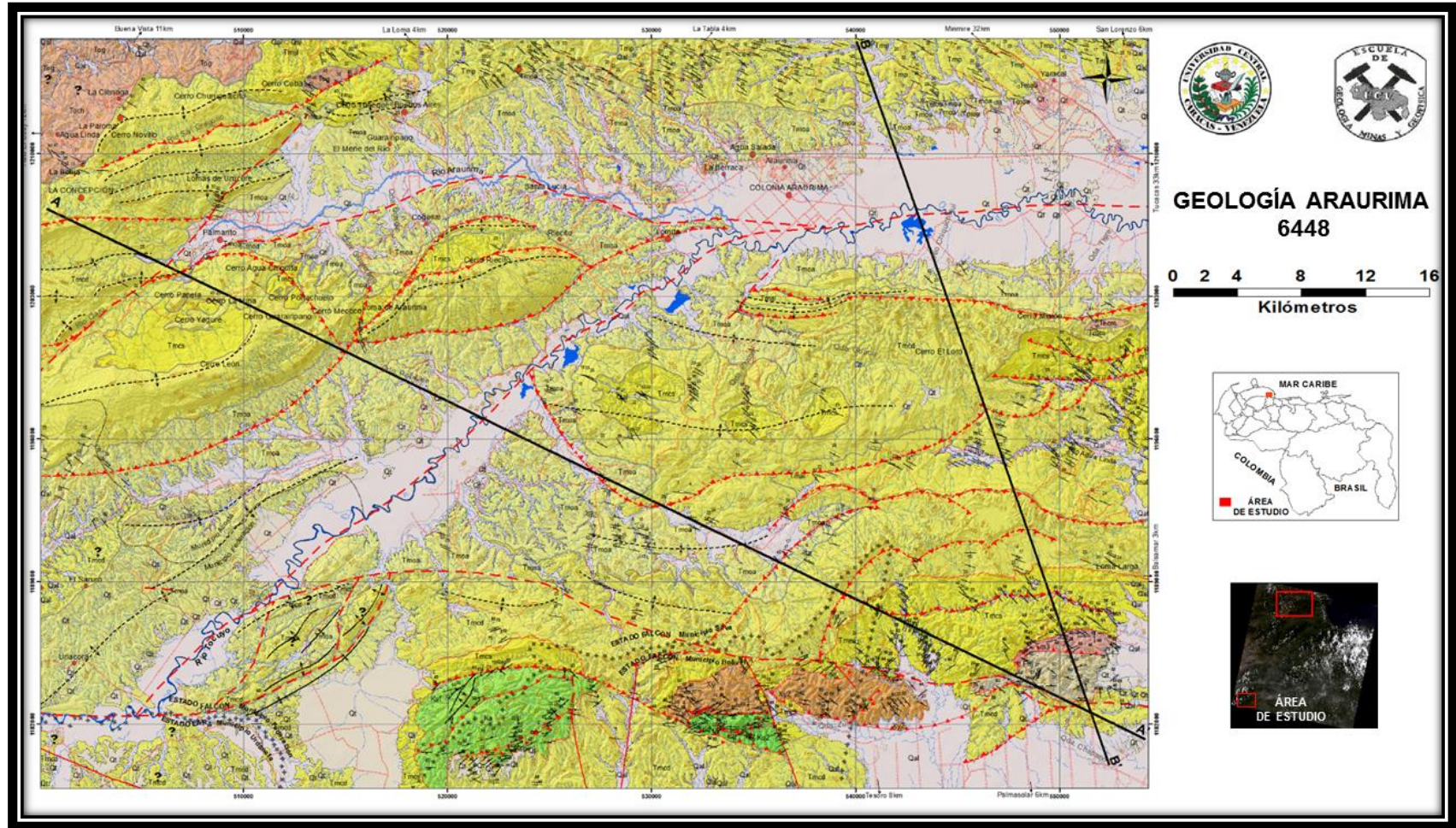


Figura 6.38 Mapa Geológico Actualizado correspondiente a la Hoja 6448 mediante el uso de sensores remoto y datos bibliográficos.

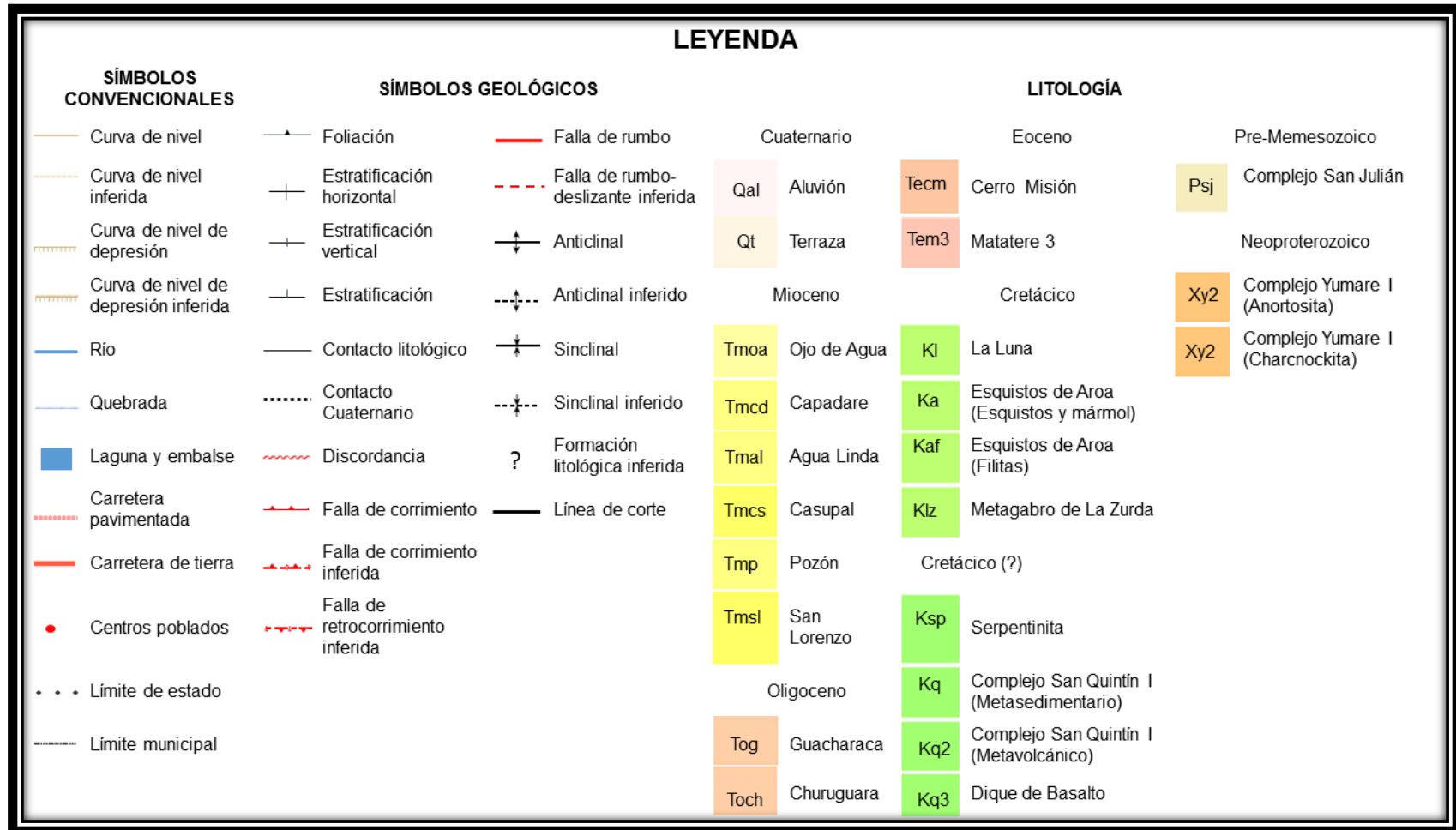


Figura 6.38 Continuación Mapa Geológico Actualizado correspondiente a la Hoja 6448 mediante el uso de sensores remoto y datos bibliográficos.

A continuación se presentan aquellas secciones estructurales que fueron producto de la integración realizada en el presente trabajo, haciendo énfasis en su descripción y las conclusiones obtenidas a partir de su análisis.

#### **VI.4.1 Interpretación estructural del corte geológico AA´**

La sección A-A´ (Figura 6.39) se extiende desde el poblado La Concepción hasta el Cerro Salsipuedes cortando transversalmente la mayor cantidad de unidades litológicas posibles y abarcando la mayor cantidad de estructuras presente en la zona de estudio. La descripción de dicha sección corresponde a evento de extensión y compresión, los mismos se describen a continuación:

La secuencia sedimentaria muestra una intensa deformación con un sistema de fallamiento inverso y pliegues asociados producto de un acortamiento tectónico en dirección NO-SE. Las rocas sedimentarias depositadas, deformadas y erosionadas corresponden a ambientes marinos batiales a más continentales, lo que permite inferir que fueron depositadas dentro de un régimen tectónico de extensión de la cuenca. Durante este evento de rifting, se depositaron un gran cúmulo de sedimentos marinos de aguas profundas en el bloque deprimido sometido a subsidencia por alta tasa de sedimentación. Lo expuesto anteriormente corresponde a evento de extensión.

Posteriormente el área de la cuenca en estudio fue sometida a un cambio de régimen tectónico de extensión a compresión y las fallas originalmente normales, que limitaban los graben y semigraben, pasaron a desplazamiento inverso formando un conjunto de cabalgamientos con fallas de ángulo bajo. Estas fallas de corrimiento se verticalizan hacia los estratos superiores y se horizontalizan en profundidad descansando asintóticamente hacia una zona de despegue o suela de deslizamiento sobre la que se arrastra, con dirección de esfuerzo principal NO-SE, la masa sedimentaria junto con parte del basamento ígneo-metamórfico bajo una tectónica “de piel gruesa”. Este tipo de tectónica de acortamiento afecta prácticamente a toda la

corteza, con desarraigo y transporte de la lámina superior que incluye parte del basamento y la cubierta sedimentaria.

Asociados a estas fallas inversas de régimen compresivo se desarrollaron pliegues que generaron anticlinales y sinclinales con ejes orientados OSO-ENE, perpendiculares a la dirección de esfuerzos principales. Dichos pliegues por lo general asimétricos presentan sus planos axiales subparalelos a los planos de las fallas inversas y en algunos sectores dichos pliegues se presentan aparentemente “arrodillados” o “acostados” con estratos volcados sobre los planos de falla. (Se sugiere verificar la polaridad de las capas en campo).

Como un proceso tectónico de ajuste dentro del acortamiento tectónico compresivo se formaron retrocorrimientos antitéticos con frentes opuestos a los corrimientos principales sintéticos. Es decir, se formaron estructuras inversas, que elevan los estratos, delimitadas con fallas opuestas en V, las cuales corresponden a frentes de corrimientos opuestos: el principal o sintético que va en el mismo sentido de la vergencia tectónica principal hacia el SE y el antitético, que se forma por el ajuste de la corteza al acortamiento, con vergencia hacia el NO, contraria a la dirección de esfuerzo principal o de empuje tectónico.

El empuje y levantamiento de estas napas tectónicas favoreció a que las zonas levantadas que forman estructuras anticlinales fueran más expuestas y sometidas a la erosión, denudando los estratos superiores del Mioceno Tardío de la secuencia sedimentaria (Formación Ojo de Agua). Sin embargo, estos sedimentos del Mioceno Tardío logran aflorar en las zonas de valles asociadas, en profundidad, a los sinclinales del sistema compresivo. Tal es el caso del valle aluvial del río Tocuyo donde se exponen sedimentos de la Formación Ojo de Agua y del Cuaternario. Dentro de este mismo marco tectónico, se lograron levantar y exponer los estratos más antiguos de la secuencia estratigráfica como es la Formación Casupal de edad Mioceno Temprano y las rocas ígneo-metamórficas del basamento infra yacente.

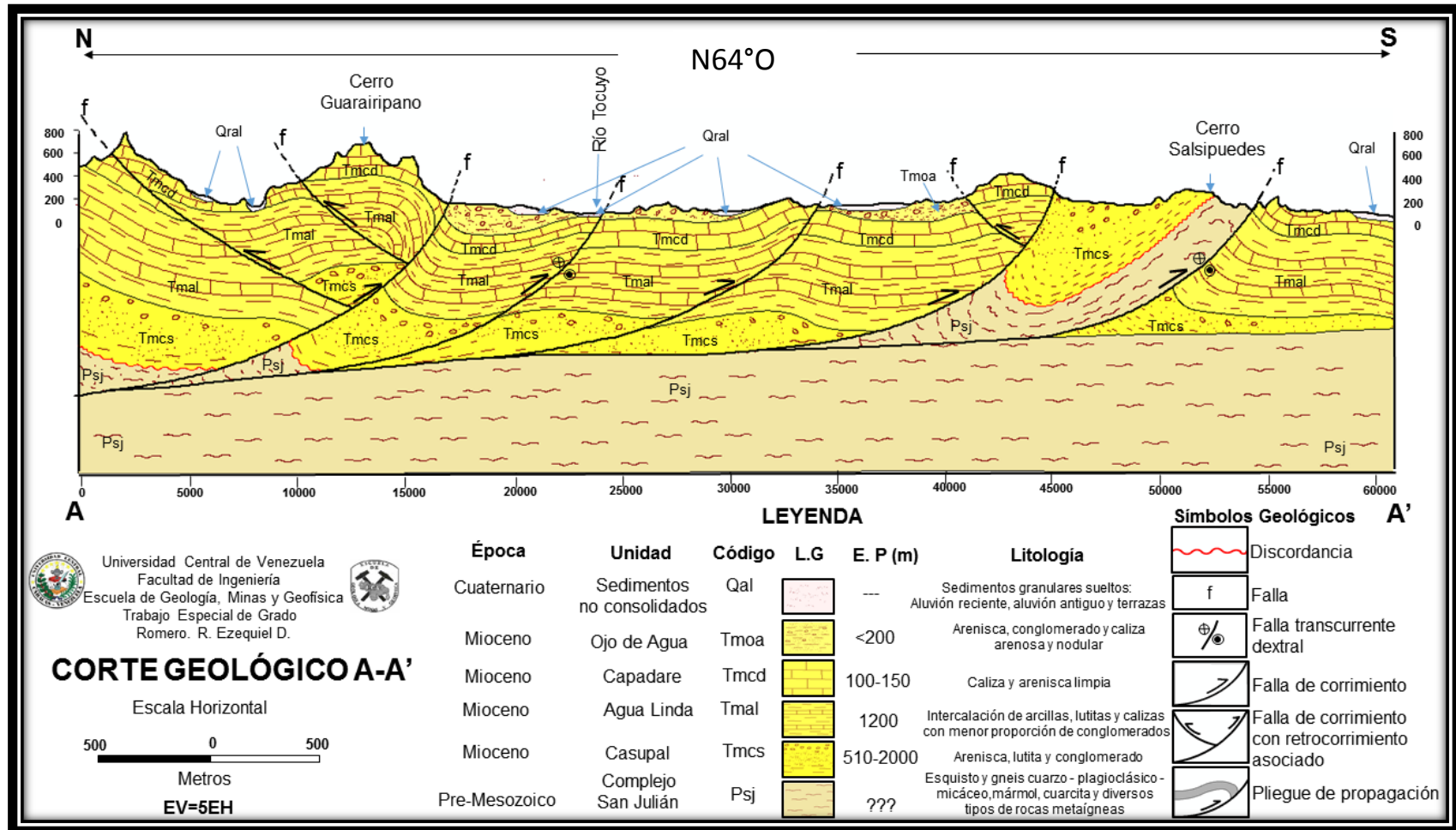


Figura 6.39 Corte geológico A-A' que atraviesa oblicuamente el área de estudio con dirección NO-SE (L.G: Litología Gráfica, E.P: Espesores Promedio)

#### **VI.4.2 Interpretación estructural del corte geológico BB'**

En la sección B-B' (Figura 6.40) estructuralmente, se interpretó un sistema de fallas inversas con vergencia tectónica hacia el SE y con algunos retrocorrimientos asociados. Dentro de este sistema de acortamiento tectónico las unidades sedimentarias fueron plegadas formando anticlinales y sinclinales con planos axiales que van de inclinados a acostados buzando hacia el N. El empuje y levantamiento tectónico, sumado a la erosión, permitió aflorar en superficie las unidades más antiguas, hacia el SE del área de estudio. Dichas unidades son la Formación Casupal del Mioceno Temprano descansando discordantemente sobre el basamento ígneo-metamórfico de edad Premesozoico

Hacia la parte centro-oriental del área, donde el relieve expone las máximas alturas de hasta 500 m.s.n.m, se infiere estructuralmente un sistema de fallas inversas buzando con ángulo bajo hacia el N, sobre las que se "arrodillaron" las unidades miocenas formando pliegues anticlinales con sus planos axiales inclinados, subparalelos al de las fallas. Dentro del ajuste por el acortamiento tectónico se generan fallas inversas secundarias, de buzamiento opuesto a la anterior. Estos retrocorrimientos, sobre los cuales también se pliegan la secuencia sedimentaria, forman estructuras en "V" delimitadas por la falla sintética (principal) y su antitética asociada (secundaria) deformando los estratos con sendos pliegues anticlinales y un sinclinal abierto entre ellos.

En el sector nor-oriental afloran muy localmente los sedimentos de la Formación Pozón,-la cual se correlaciona cronoestratigráficamente con la Formación Capadare con mayor área de afloramiento. Su desarrollo depositacional ocurre más al norte de este sector de la cuenca (Hoja 6449), donde sí se exponen con mayor cobertura regional. Hacia esta zona del NE coinciden las unidades de bajo relieve con la zona de menos deformación tectónica, interpretándose con los escasos datos geológicos un sinclinal con flancos de suave buzamiento.

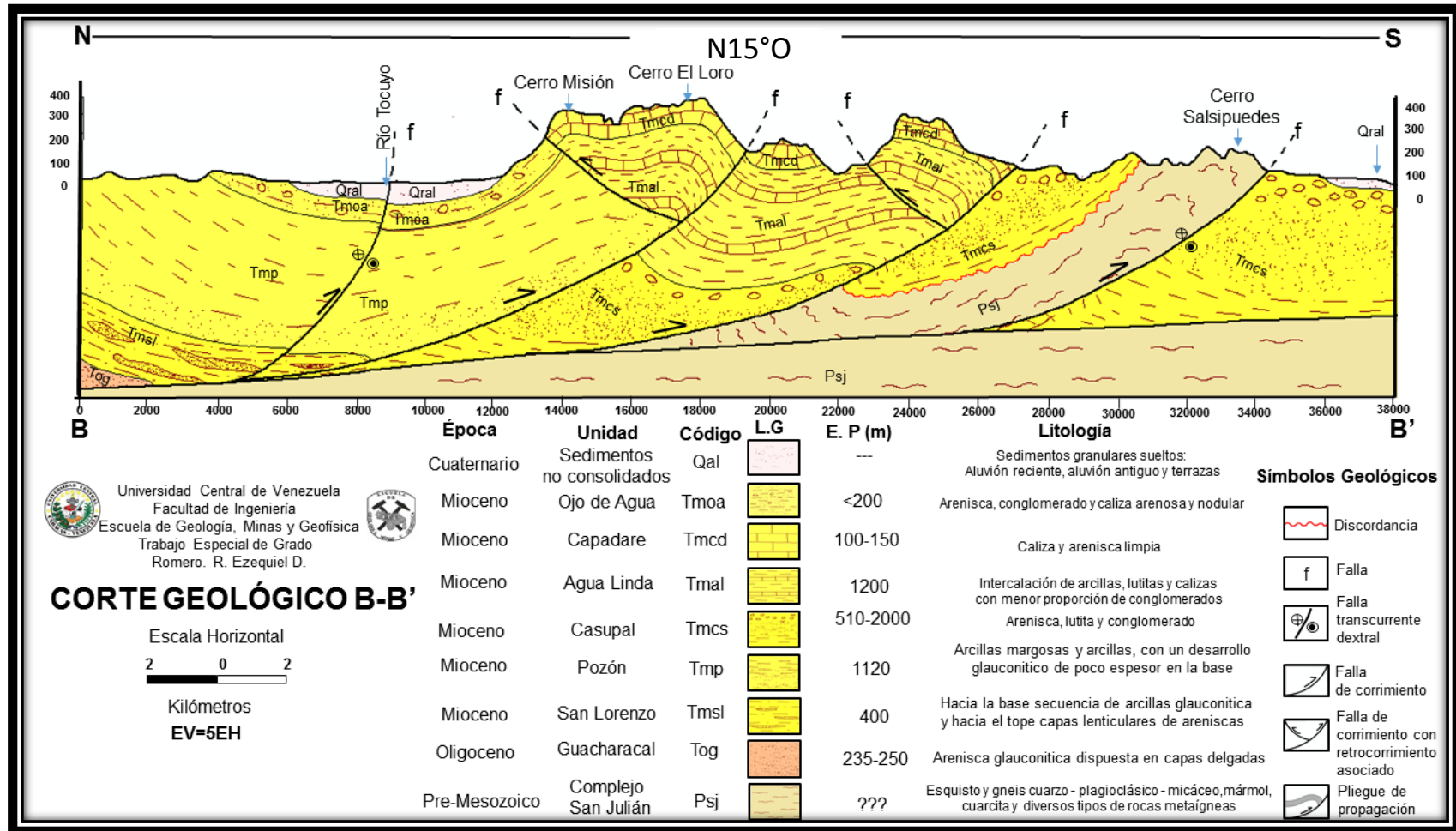


Figura 6.40. Corte geológico B-B' que atraviesa oblicuamente el área de estudio con dirección NNO-SSE (L.G: Litología Gráfica, E.P: Espesores Promedio)

## VI.5 EVOLUCIÓN TECTONO-ESTRATIGRÁFICA

En la región afloran rocas ígneo-metamórficas de Precámbrico hasta el Cretácico, así como sedimentarias del Eoceno al Mioceno y sedimentos no consolidados del Cuaternario. La deformación de la secuencia sedimentaria del Eoceno-Mioceno, que caracteriza a las zonas más elevadas, son reflejo de la interacción de varias fases de deformación tectónica sufridas en la cuenca de Falcón. Los sedimentos no consolidados del Cuaternario que cubren parte del área dificultan la interpretación de relaciones estructurales entre las unidades preneógenas.

Las unidades más antiguas corresponden a una edad Precámbrica (Complejo de Yumare) y se encuentran generalmente sobrecorridas por las rocas de edad Cretácica y del Eoceno (Formaciones La Luna y Matatere, respectivamente). Estas rocas son alóctonas a la cuenca de depositación, traídas a la misma por el mismo proceso que emplazó las Napas de Lara hacia el sur (Mussari & Lozano 2007, Baquero et al. 2009).

El estudio de conglomerados de la Formación Casupal en la quebrada Aguacate en el macizo La Zurda revela que está conformada por clastos de rocas metamórficas de tipo esquisto y sedimentarias tipo caliza, así como de grandes clastos de cuarzo embebidos en una matriz carbonática (Nevado, 2012). Estas litologías revelan que las rocas fuentes de estos sedimentos fueron probablemente el Complejo Yumare, el Esquisto de Aroa y la Formación La Luna, que para el momento que ocurrió la depositación de esta unidad estaban expuestos a la meteorización.

En la zona se pueden presenciar dos discordancias principales. La primera es de edad post-Eoceno, y está definida con la depositación de la Formación Casupal sobre el Complejo Yumare, Complejo San Quintín y el Esquisto de Aroa; la segunda, probablemente de edad Oligoceno-Mioceno Temprano, es desarrollada entre las Formaciones Capadare y todas las unidades infrayacentes a esta que se ubican al centro sur de la zona de estudio.

Los modelos de evolución de la Cuenca de Falcón muestran una etapa de acumulación en ambiente distensivo (rifting) desde el Oligoceno al Mioceno temprano (Gallardo, 1985; Soulas et al., 1987 y Audemard, 1993, citados por Audemard, 1995), período durante el cual se generaron una serie de grabens que funcionaron como depocentros, con mayor tasa de acumulación, permitiendo la depositación de secuencias sedimentarias más espesas en estas zonas limitadas por fallas que inicialmente tuvieron un desplazamiento normal. El adelgazamiento crustal por ensanchamiento de la cuenca permitió la intrusión y ocasionalmente la extrusión bajo la forma de coladas submarinas de rocas de composición basáltica a lo largo del eje de la cuenca de Falcón (Brueren, 1949; Coronel, 1970; Muessig, 1978 y 1984, citados por Audemard, 1995).

En el límite entre el Mioceno temprano y el Mioceno medio se inicia el cierre de la cuenca (Audemard, 1995), generándose un sistema de fallas de corrimiento y algunos retrocorrimientos asociados, que empuja la lámina superior con la cubierta sedimentaria y parte del basamento arrastrados sobre una zona de despegue dentro de una tectónica compresiva de “piel gruesa” (*thick-skinned*). Estas fallas por lo general se comportan geométricamente buzando con ángulo bajo, se verticalizan hacia la superficie y se horizontalizan y convergen asintóticamente en profundidad involucrando parte del basamento.

Con esta inversión tectónica se genera un conjunto de pliegues asimétricos inclinados y fallas inversas cuyos planos buzando al norte, indicando una vergencia tectónica hacia el SE. Asociados a estos cabalgamientos se generan, por el ajuste dentro del acortamiento tectónico, algunos retrocorrimientos que, junto con sus fallas inversas sintéticas, delimitan unas fajas de deformación con rocas elevadas y plegadas que se exponen en unidades de relieve positivo alcanzando alturas cercanas a los 700 m.s.n.m. Esta fase compresiva se extendió hasta el Plioceno. (Audemard, 1995).

Se puede considerar una tercera fase de deformación tectónica del tipo transpresivo, de edad Plio-Pleistoceno. Ésta es la responsable de la actividad cuaternaria y actual de las fallas de la región (Audemard, 1995). Su expresión estructural sobre la cuenca está dominado por un sistema de fallas de rumbo de carácter dextral con una componente compresiva, orientadas mayormente con rumbo NO-SE, las cuales llegan a afectar y desplazar las estructuras de inversión tectónica tales como las fallas de la zona de Araurima y las ubicadas al norte de los macizos igneo-metamórficos, más específicamente del Cerro Salsipuedes, así como también los ejes de algunos pliegues anticlinales, tales como los ubicados al NO de la hoja 6448.

Asociados a estas fallas transpresivas se generan sincinemáticamente otras familias de fallas transcurrentes del tipo Riedel sintéticas oblicuas al fallamiento principal EO y Riedel antitéticas R' con desplazamiento opuesto sinistral y con orientación NNE que cumplen las relaciones geométricas del modelo de deformación experimental de Riedel para un sistema de fallas transcurrente dextral. Las cizallas conjugadas sintéticas R se identifican en el área orientadas NE-SO siendo la principal la que controla el quiebre del río Tocuyo en esa dirección.

Dentro de este sistema de fallas transpresivas EO se generaron estructuras duplex en las que fallas transcurrentes de orientación EO se toparon con un bloque rígido en su trayecto, por lo que para poder evolucionar se subdividió en dos ramales con partición de esfuerzos de deformación. Estos ramales de la falla maestra limitan el N y el S de los bloques internos y su desplazamiento rumbo deslizante hace que el bloque rote en sentido horario y se fracture con un conjunto de fallas subparalelas dispuestas en echelón oblicuas a las fallas principales. Este tipo de estructuras puede ser la responsable de que ciertos bloques rocosos, marcados con estructuras de deformación de la fase compresiva previa, presenten un patrón de orientación de las trazas, de fallas de corrimiento y pliegues asociados, ligeramente rotado de NNE-SSO a EO.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- De la recopilación de la cartografía topográfica y geológica correspondiente a la Hoja topográfica 6448 y mediante el uso de sensores remotos en este estudio, se pudo realizar como producto la actualización de 16 mapas geológicos a escala 1:25.000 donde queda evidenciada la correspondencia entre la geología superficial obtenida de los estudios previos y la información obtenida de las imágenes multiespectrales.
- Los productos que mayor información aportaron en esta investigación fueron el mapa topográfico digitalizado y el Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS). Por su parte, los distintos resultados obtenidos mediante el procesamiento de la imagen satelital Landsat-8 (MNF, SAM, combinación y álgebra de banda y clasificaciones: supervisada y no supervisada) no aportaron en el presente estudio mayor información, ya que la zona de estudio se encuentra con alto contenido de vegetación y esto limitó la obtención de información a partir del tratamiento de imágenes. Sin embargo, la imagen MNF resultó ser la que mayor información espectral aportó, la agrupación de píxeles semejante permitió separar algunos cuerpos litológicos siendo los de la Formaciones Casupal, Ojo de Agua y Capadare los más resaltantes.
- El estudio topográfico permitió diferenciar dos unidades de relieve claramente diferenciables como lo son: Unidades de Montañas y la Unidad de Valles, presentándose el contacto entre ambas unidades de manera transicional. Este estudio permitió evidenciar que las unidades de montaña se comporta de forma diferente al NO y SE de la zona de estudio separadas por el río Tocuyo. Al NO se encuentran las topografía con las máximas elevaciones correspondientes a filas subparalelas orientadas NO-SE, presentando laderas abruptas en algunos casos escarpadas y topes agudos y redondeados; mientras que al SE, las

topoforma se encuentran orientadas E-O, con laderas moderadamente abruptas y tope amesetados.

- Desde el punto de vista de la hidrografía, en la Unidad de Montaña el drenaje es variado, predominando el dendrítico y subparalelo, controlado por posibles fallas; mientras que en la Unidad de Valle el drenaje es sinuoso o meandriforme, controlado en algunos sectores por las condiciones estructurales, siendo el curso más importante el río Tocuyo.
  
- La identificación e interpretación de los rasgos estructurales se realizó en gran medida con la ayuda del Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS), debido a que la resolución de esta herramienta es de 10 m de pixel, permitiendo inferir que las estructuras o familia de estructuras presente en el área de estudio están relacionadas a tres fases tectónicas de deformación: Extensión, Compresión y Transpresión; interpretándose lo siguiente:
  - **Fase Extensiva:** Fallas normales que luego van a invertirse tectónicamente a inversas con el cambio a régimen compresivo, generación de grabens con altas tasas de subsidencia que permitieron la acumulación de grandes espesores sedimentarios.
  
  - **Fase Compresiva:** Corresponde a familias de fallas de corrimientos con trazas orientadas en dos direcciones preferenciales, OSO-ENE y E-O. Ambas familia tienen asociado algunos retrocorrimientos antitéticos con trazas subparalelas curvas opuestas a los frentes de corrimientos sintéticos, además de algunos pliegues asimétricos de propagación con ejes longitudinales subparalelos a las trazas de las fallas. Perpendicularmente a estas trazas y ejes se infiere para la primera familia de fallas una dirección de empuje tectónico NO-SE, mientras

que para la segunda familia de corrimiento sugieren una dirección de esfuerzo parcial hacia el S.

- **Etapa Transpresiva (Transcurrente + Compresiva):** Se caracteriza por un conjunto de fallas de rumbo o de cizalla, formadas en un régimen transcurrente- compresivo y se muestran en el área con dos rumbos preferenciales: EO y NO. Las fallas EO están asociadas a las fallas maestras del Sistema Oca-Ancón, que rigen el desplazamiento transcurrente dextral regional. En la Hoja se presentan atravesando transversalmente el área al N y al S, con rumbo dominante EO. Ambas fallas EO son las responsables del control tectónico del curso rectilíneo del río Tocuyo en dirección EO; mientras que la falla transcurrente principal, con rumbo NO, es la responsable de que el curso del río se quiebre 45° al NE y haga un salto para retomar su orientación EO al N.

El cambio de dirección del empuje tectónico podría deberse a que esta familia de estructuras compresivas fueron rotadas en un posterior evento tectónico como efecto de un sistema de fallas transcurrente dextral, que envolvió, rotó y deformó este sector como un bloque rígido interno (Estructura Duplex).

## RECOMENDACIONES

- No se debe sustituir la geología de campo por la geología interpretada mediante sensores remoto. Por ende se sugiere en futuras investigaciones corroborar en campo lo expuesto en esta investigación, haciendo énfasis en las siguientes zonas:
  - Extremo NO: En este sector la litología propuesta por Guzmán & Morillo (2009) y Creole (1968) no se corresponden con lo evidenciado en los distintos productos obtenidos por sensoramiento remoto. Las

evidencias encontradas infieren la presencia de dos Formaciones diferente (Churuguara y Guacharaca) y no solo una (Guacharaca) como lo cartografían ambos autores.

- Sur-oeste, al norte de Uriacora: Guzmán & Morillo (2009) cartografía este sector como Aluvión. De acuerdo a los resultados obtenidos por las distintas técnicas de sensoramientos remotos, en especial el MDIS, y las relaciones morfológicas asociadas; se interpretó que la unidad está formada por sedimentos no consolidados y por roca dura. De acuerdo a la bibliografía se infiere que las planchetas triangulares mostradas en el MDIS corresponden a las calizas de la Formación Capadare.
  
- Extremo NO y centro este: En el MDIS generado para el área de estudio se aprecian posibles superficies pulidas de falla, lo cual sería conveniente constatar en campo y revisar si se observan las estrías de desplazamiento vertical inverso. Por lo general sobre estas superficies de fallas de corrimiento se pliegan las capas llegando a “arrodillarse” con estratos que pueden encontrarse volcados. Esto sería conveniente validarlo en campo, verificando la polaridad de las capas próximas a los frentes de corrimiento, a fin de evaluar el acortamiento tectónico.
  - Las estructuras Duplex inferidas requieren de su confirmación en campo. La de mayor escala no se ve en la Hoja la continuidad lateral del bloque interno ni de las fallas transcurrentes que lo confinan hacia el este por lo que habría que analizar la Hoja 6547 próxima hacia el O. Es importante confirmar en campo el desplazamiento dextral de cizallamiento de manera de poder asociar la rotación en sentido horario de las estructuras,

previamente generadas en régimen compresivo, dentro de la cinemática de una estructura Duplex.

- Las imágenes satelitales empleadas en esta investigación no ayudaron a distinguir la litología correspondiente a los Miembros: Menecito y El Salto (Formación San Lorenzo); Policarpio, Husito y Huso (Formación Pozón) por lo que sería de mucha utilidad realizar y analizar levantamientos sísmicos, en el área o próximos a la estudiada, de manera de tener mayor control de la estratigrafía y las deformaciones tectónicas del subsuelo.
  
- El investigador que emprende un tipo de investigación similar tiene que manejar *software* que requerirán de un tiempo adicional para la investigación. Los programas utilizados como: ENVI, ArcGis, requieren de computadores de alto desempeño, por lo que se recomienda utilizar el equipo más potente posible para evitar inconvenientes que impidan el cumplimiento de los cronogramas de trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, V. (1975) *Curso de física moderna*. Harla. México D.F., México.
- Álzate, M. (2001) *Imágenes espaciales de la superficie terrestre. Procesamiento digital, análisis y extracción de la información geomática*. Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geofísica. Universidad Nacional de Colombia. 328 pp.
- Arismendi, J. (2008). *Presentación geográfica de las formas del relieve*. Geo Venezuela 2: 745-48.
- Audemard, F., & De Mena, J. (1985). Nueva interpretación estructural de Falcón oriental, en base a la integración de geología de superficie, información, de subsuelo, imágenes de radar, levantamientos gravimétricos y sísmicos. VI Congreso Geológico Venezolano, Soc. Venezolana de Geólogos 4: 2317-2329.
- Audemard, F., Singer, A., Beltrán, C., Rodríguez, J.A., Lugo, M., Chacín, C., Adrianza, A., Mendoza, J., & Ramos, C. (1992). *Actividad tectónica cuaternaria y características sismogénicas de los sistemas de fallas de Oca-Ancón (tramo oriental), de la Península de Paraguaná y región de Coro y de la costa nororiental de Falcón*. FUNVISIS, inédito para INTEVEP, S.A., 245 pp. + Mapa de fallas activas Cuaternarias de la región de Falcón. Escala 1:500.000. Departamento de Ciencias de la Tierra, FUNVISIS.
- Audemard, F. (1993). *Néotectonique, Sismotectonique et Aléa Sismique du Nordouest du Vénézuéla (Système de failles d'Oca-Ancón)*. PhD. thesis, Université Montpellier II, France, 369 p.
- Audemard, F., Beltran, C., Rodriguez, J.A., & Singer, A. (1994). Definición de la traza activa del sistema de fallas de Oca-Ancón, noroccidente de Venezuela. VII Congreso Venezolano de Geofísicos, Soc. Venezolana de Ingenieros Geofísicos. 1: 42- 50.
- Audemard, F. (1995). La cuenca de Falcón, Venezuela Noroccidental, síntesis estratigráfica génesis e inversión tectónica. IX Congreso Latinoamericano de Geología: 132-150.

- Audemard, F. (1997). *Tectónica activa de la región septentrional de la cuenca invertida de Falcón, Venezuela occidental*. VIII Congreso Geológico Venezolano, Soc. Venezolana de Geólogos 1: 93-100.
- Ayala, R. (2012). *Nociones básicas de Geología*. Universidad de los Andes, Escuela de Geografía. 208 p.
- Bachmann, R., (2001). *The Caribbean plate and the question of its formation*. Institute of Geology. University of Mining and Technology Freiberg.
- Bellizzia, A. & Rodríguez, D. (1976). *Geología del estado Yaracuy*. IV Congreso Geológico Venezolano, Soc. Venezolana de Geólogos 5,6: 3317-3417.
- Blow, W. H., (1959). *Age correlation and biostratigraphy of the Upper Tocuyo (San Lorenzo) and Pozón formations, eastern Falcón, Venezuela*. Bull. Amer. Paleont., 39178: 67-252.
- Boesi, T. & Goddard, D. (1991). *A new geologic model related to the distribution of hydrocarbon source rocks in the Falcón basin, northwestern Venezuela*. In K.T. Biddle, ed., Active margin basins: AAPG 52:303-319
- Briceño, H. (1983) *Cartografía geológica en ambiente de selva utilizando técnicas de sensores remotos: Rio Caroní, Venezuela*. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química. 302 pp.
- Briceño, H. (1999) *El Macizo del Chimantá, Escudo de Guayana, Venezuela: Geología, geomorfología, aspectos geoquímicos del Macizo del Chimantá*. VII Congreso Geológico Venezolano. Boletín de Geología, Publicación Especial 5, 4: 2405.
- Camacho, A., & Mijares, M. (1989). *Estudio geológico de la zona de Sanare Buena Vista, sector Agua Linda, distrito Silva, estado Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 177 pp.
- Campbell, J. (1981). *The used of Landsat MSS data for geological mapping*, en J.G. Campbell, Ed Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications, London Remote Sensing Society: 143 - 162

- Carrero, F., & Infante, J. (2004). Clasificación mineralógica del Cerro Bolívar y el cuadrilátero San Isidro a través de análisis multiespectral, utilizando imágenes de satélite Landsat 7 ETM+. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 203 pp.
- Chuvieco E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp, S.A. Madrid 2da Edición. 450 pp.
- Comisión Venezolana de Estratigrafía y Terminología CVET (1970). *Léxico Estratigráfico de Venezuela*, Caracas. Boletín. Geológico 4: 756.
- Consortio Nacional Aeromapas-Seravenca (1964-1965). *Cartas 6448 (I-NE, I-NO, I-SE, I-SO, II-NE, II-NO, II-SE, II-SO, III-NE, III-NO, III-SE, III-SO, IV-NE, IV-NO, IV-SE, IV-SO)*. Mapas topográficos. Escala 1:25.000.
- Creole Petroleum Corporation (1968). *Cartas: C-5-B, C-5-D, C-6-A y C-6-C*. Mapas de Geología de Superficie. Escala 1: 50.000.
- De Ponte, L., & Méndez, W. (2008). *Actualización geológica de la zona sur de la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM (hojas topográficas 5544-5644)* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 167 pp.
- Díaz; T. (2008) *Estado Falcón*. Geo Venezuela 6: 75-78.
- Díaz De Gamero, M.L. (1982). *Estratigrafía y Micropaleontología de la parte norte de la Subcuenca de Agua Salada, Falcón Oriental*. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 226 pp.
- Díaz De Gamero, M.L. (1985). *Estratigrafía Paleontología y Sedimentación*. VI Congreso Geológico Venezolano 1: 454-502.
- Dirección de Cartografía Nacional (1968). *Hoja 6448 "Araurima"*. Mapa topográfico. Escala 1:100.000.
- Elizalde, G. (1983). *Ensayo de clasificación sistemática de categoría de paisaje*. Primera Aproximación, UCV, Facultad de Agronomía, Maracay.

- Esparis, E., & Hernández, O. (2005). *Integración y Actualización Geológica del área comprendida entre las poblaciones de Churuguara y Piedra Grande, estados Falcón y Lara*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 179 pp.
- ESRI (2018). *¿Qué es ArcGIS?:* <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm> Consulta 27 enero de 2018.
- Figueroa, L., & Pérez M. (2009). *Análisis geológico-estructural de Falcón Occidental. Sistema de Fallas Oca-Ancón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 325 pp.
- Fisher, W. L & Woodcock, J. (1986). *Depositional systems in Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relation to occurrence of oil and gas*. AAPG. Bull 53(1):30-54.
- Freund, R. (1974). *The Hope Fault. A strike slip fault in New Zealand*. New Zealand Geology Survey. Bol 86:49-55.
- Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS (2013). *Cartas 6448: III-SO, III-SE, II-SO, II-SE*. Mapas geológicos. Escala 1:25.000. Proyecto Investigaciones geológicas en el norte de Venezuela y GEODINOS.
- Galindo, M. (2014). *Integración de la cartografía geológica mediante imágenes satelitales hiperespectrales con datos de campo al surestede Urumaco, estado Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 113 pp.
- Gamboa, L. (1986) *Procesos metodológicos para la interpretación de los mapas topográficos*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Humanidades y Educación. Trabajo de Grado. 197 pp.
- Gherzi, J. & Guillón, D. (2008). *Actualización geológica a través de las imágenes satelitales (LANDSAT 7 ETM) de la zona centro-occidental de la Sierra de Perijá entre las siguientes coordenadas: longitud (72°30-73°00) y latitud (10°20)*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 134 pp.

- González De Juana C., Iturralde J. & Piccard, X. (1980) *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. 1: 407p, 2: 624 p.
- Gracciano, Vilorio & Rosales (2007). *Geografía de los suelos de Venezuela*. Geo Venezuela 2:453-56
- Guzmán, Y., & Morillo, Z. (2009). *Actualización de la cartografía geológica de la zona oriental de Falcón, al sur del Alto de Esperanza-Guacharaca*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología Minas y Geofísica. 143 pp. + anexos.
- Hackley, C., Urbani, F., Karlsen, A.W., & Garrity, C.P. (2006). *Mapa geológico de Venezuela*. Escala 1:750.000. U. S. Geological Survey, UCV y FUNVISIS.
- Harding, T.P. (1985) *Seismic Characteristics and Identification of Negative Flower Structures, Positive Flower Structures and Positive Structural Inversion*. The American Association of Petroleum. Bol (69)4:582-600.
- Huber, O. (2007). *Geografía de los suelos de Venezuela*. Geo Venezuela 2: 234-43.
- Hunter, V. (1972) *A middle Eocene Flysch From East Falcón, Venezuela*. VI Conf. Geol. Del Caribe, Porlamar, estado Nueva Esparta:126-130.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat-8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Bogotá-Colombia. <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>. Consulta 01 febrero 2018.
- Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar IGVS (2008). *Curso Introductorio a la Geomática*. Proyecciones Cartográficas. Caracas: 5-12.
- Instituto Nacional de Geología y Minería de Venezuela INGEOMIN (1968) *Fotografía aéreas*. Misión 020141. Escala 1:50.000.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMEH (2006) *Datos de la red de estaciones del estado Falcón*, Caracas.
- Lamus, A., La Cruz N. & Scherer, W. (1989). *Estudio geológico y ubicación de depósitos de fosfatos al norte de Tucacas, Distrito Silva, Estado Falcón*. En: Jornadas 50 Aniversario Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.

- López, I. (2005) *Integración y actualización geológico-cartográfica de una zona ubicada al noreste del estado Falcón entre los distritos Zamora, Acosta, Miranda y Colina*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 171 pp.
- Lorente M. (1978). *La Caliza de Capadare y sus relaciones con la cuenca de Agua Salada, Edo. Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 173 pp.
- Lozano F. y Mussari A. (2007). *Geología de los Macizos Ígneo-Metamórficos del Norte de Yumare, Estados Yaracuy y Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 171 pp.
- 23-54.
- Macellari, C. (1995) *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pullapart basin, Venezuela and Colombia*. In Tankard, A.J., Suárez, R. and Welsink H.J. (editors) *Petroleum basins of South America*, AAPG 62: 757-780.
- Manduca, R. (2004). *Sobre la teoría y el método en geografía regional*. Fondo editorial de Humanidades y Educación. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Méndez, J. (1967) *Definición de la Formación Agua Linda, Sección de referencia de la Formación Casupal y descripción litológica de algunas secciones de esta formación en la parte sur-oriental de la sub-cuenca de Falcón*. Soc. Ven. Geol. Min. y Petr., Bol. Inform., 10,4: 111-119.
- Méndez, L. (2002). *Curso de geomática, Nivel Intermedio*. Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar.
- Mitre, L. (1981). *Las imágenes LANDSAT-una herramienta útil en la interpretación geológico-estructural; un ejemplo en el noreste de México*. Revista mexicana de ciencias geológicas 5,1: 37-46.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2231637>. Consulta 30 enero de 2018.

- Molnar, P. & Sykes, L.R (1969) *Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from Focal Mechanisms and Seismicity*. Geol. Soc. American. Bull, 80: 1639-1684.
- Muessig, K. (1984). *Structure and Cenozoic Tectonics of the Falcon basin, Venezuela and adyacent areas* Bonini, W.E., Hangraves, R.B., Shagam, R. (editors) *The CaribbeanSouth American plate boundary and regional tectonics*, Geol Soc America 162:217-230.
- Nevado, F. (2012). *Integración geológica de la región Moroturo-Palmasola, estados Yaracuy y Lara*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 144 pp.
- Olaya, V. (2009). *Sistema de Información Geográfica*. Universidad de Salamanca. Tomo 1: 723-43.
- Olmos (2010). *Manual de georeferenciación y sistemas de proyección*. Colombia. 43-45 p.
- Penin, J., y Villarroel, V. (2005). *Integración y Actualización Geológica del área de Jacura y Capadare, estado Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 162 pp.
- Petróleos de Venezuela (1977). *Hoja N° NC19-7*. Mosaico Semicontrolado de levantamiento de radar. Escala 1:250.000.
- Pindell, J. & Barrett, S., (1990). *Geological evolution of the Caribbean region: A plate tectonics perspective* - In: Dengo, G. y Case, J. (eds.) *The Caribbean Region (The geology of North American)*, Geol Soc of America, Boulder, CO, H: 339-374.
- Pindell, J., & Kennan, L. (2001). *Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean*. En R. H. Fillon, N. C. Rosen y P. Weimer (Edits), *Petroleum Systems of Deep*.
- Pindel, J., Kennan, L., Maresch, W., Stanck, K., Draper, G., & Higgs, R. (2005). *Plate Kinematics and Crustal Dynamics of Circum of Circum Caribbean Arc Continent Interactions: Tectonic controls on basin development in proto Caribbean margins*. Geol Soc America. 394: 7-52.

- Porras, L. (2000) *Evolución tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcón y Bonaire*. Simposio Bolivariano, Soc Venezolana de Geólogos 7: 279-292.
- Ramadam, T. (2002). *Exploration for uranium and thorium mineralizations at Wadi Um Laseifa Area Central Eastern Desert Egypt. Using Remote Sensing Technique*. National Authority for Remote Sensing and Space Sciences, Egipto.
- Renz, H. (1948). *Stratigraphy and fauna of the Agua Salada, Group, state of Falcón, Venezuela*. Geol. Soc. Am. 32: 37-48.
- Renz, O. (1959). *Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental*. Geol. Soc. Am. 5,10: 3-48.
- Sabins, F., (2007). *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. Geocarto International 2,3: 494.
- Senn, A., (1935). *Die Stratigraphische Verbreitung der Tertiären Orbitoiden, mit spezieller Berücksichtigung ihres Vorkommens in Nord-Venezuela und Nord-Marocco*. Eclog. Geol. Helv. 28,1: 51-113 y 369-373.
- Servicio Geológico Colombiano SGC (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenazas por movimientos en masa, escala 1:100.000*. Bogotá-Colombia. 56 pp.
- Sistemas Ambientales Venezolanos SAV (1983). *Región Natural 16 Macizo Coriano Subhúmedo*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas.
- Sistemas Ambientales Venezolanos SAV (1983). *Región Natural 17 Valles Marítimos Occidentales*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas.
- Speed, R., Russo, R., Webber, J., & Rowley, K.C. (1991). *Evolution of Southern Caribbean Plate Boundary, Vicinity of Trinidad and Tobago: Discussion*. American Association of Petroleum Geologist Bull 75 (11): 1789-1794.
- Steegmayer, P. & Busto, R. (1980). *Proposición metodológica para estudios de suelos en cuencas altas*. M.A.R.N..R. Zona 5. Tachira.

- Suter, H. (1947). *El Mene de Acosta field, Falcón, Venezuela*. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 31,12: 2193-2206.
- Toribio, E. (2012). *Modelado estructural y retrodeformación, en la cuenca oriental de Falcon-Costa Afuera*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar, Maestría en Ciencias de la Tierra. 159 pp.
- Urbani F., Martínez, A., González, A., Mendi D., & Camposano, L.A. (2007). *Consideraciones geológicas y geoquímicas de la zona de Yumare, estados Falcón y Yaracuy, Venezuela*. Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. (Caracas).
- Villanueva, A. (2011). *Interpretación geológica mediante el uso de sensores remotos de una zona ubicada al sur de la ciudad de Puerto Ayacucho, Estado Amazonas*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 138 pp.
- Wheeler, C. (1960). *Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno Inferior de Falcón Occidental y Nororiental*. Congreso Geológico Venezolano. Boletín Geológico. Publicaciones Especiales. 3,1: 407-465.
- Wheeler, C. (1963) *Oligocene and Lower Miocene stratigraphy of western and northeastern Falcón Basin, Venezuela*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 47,1: 35-68.
- Zinck, J. A. (1980). *Valles de Venezuela*. Caracas: Lagoven. Petróleos de Venezuela SA.
- Zinck, A. (1981). *Definición del ambiente geomorfológico con fines de descripción de suelos*. CIDIAT, Mérida. SC-46.