



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETECCIÓN DE ÁREAS PARA PROSPECCIÓN MINERA DE CALIZAS
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES EN LAS
ADYACENCIAS DE LAS CANTERAS MUME Y EL MELERO UBICADAS
EN EL MUNICIPIO CRISTOBAL ROJAS ESTADO MIRANDA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Gómez M., Alirio

Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2023



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETECCIÓN DE ÁREAS PARA PROSPECCIÓN MINERA DE CALIZAS
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES EN LAS
ADYACENCIAS DE LAS CANTERAS MUME Y EL MELERO UBICADAS
EN EL MUNICIPIO CRISTOBAL ROJAS ESTADO MIRANDA**

Tutor académico: Prof. Mauricio Hernández

Tutor industrial: Ing. Juan Matos

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Gómez M., Alirio
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2023

Caracas, 23 de octubre de 2023

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado por el consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Alirio Gómez Marchan titulado:

**“DETECCIÓN DE ÁREAS PARA PROSPECCIÓN MINERA DE CALIZAS
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES EN LAS
ADYACENCIAS DE LAS CANTERAS MUME Y EL MELERO UBICADAS
EN EL MUNICIPIO CRISTOBAL ROJAS ESTADO MIRANDA”**

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. María Labrador

Jurado

Prof. Mariela Ynfante

Jurado

Prof. Mauricio Hernández

Jurado coordinador

DEDICATORIA

Este trabajo especial de grado está dedicado especialmente a mi madre, mi mejor amiga, que siempre estuvo para mí en todo momento, apoyándome y dando lo mejor de ella para que yo lograra mis objetivos de vida.

A mi padre, mi pana, que nunca me dejó solo durante este proceso y siempre hizo lo posible para llegar hasta el final.

A mi abuelo Gómez, por aconsejarme, motivarme y enseñarme lo importante de las ciencias geológicas en el campo de la ingeniería.

A mi tía Roxana, mi segunda madre, que aun estando de lejos siempre estuvo para mí.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por haberme brindado su espacio y personas para formarme como un profesional. Un lugar que, sin lugar a dudas, está lleno de conocimientos, enseñanzas y valores.

Al Prof. Ricardo Alezones por siempre estar a la disposición para cualquier consulta durante toda mi carrera.

A mis tutores, el Prof. Mauricio Hernández y el Ing. Carlos Matos por la orientación y apoyo brindado durante mi proyecto especial de grado.

A mis estimados profesores: Enrique Toribio, André Singer, María Lorente, Mariela Ynfante y Steffany Carmona por la calidad de enseñanza.

A mis amigos y compañeros de clases:

Jorge Ibarra: La primera persona que conocí y el primer amigo que hice en la universidad. Gracias mi pana, por tu apoyo en las primeras etapas de la carrera.

Heidy Hernández: La primera amiga que me dio la geología y mi primera lamepiedra, ¡vale mucho para mí!. Gracias por tantos momentos bonitos y que siempre nos recuerda la anécdota de los primos.

Lino Teixeira: Mi amigo de campo y mi amigo de discusiones geológicas. Gracias por llenarme de excelentes conocimientos y siempre estar allí para cualquier ayuda que he necesitado.

Gustavo Ott: Un excelente amigo y compañero de estudio, una persona que sin lugar a dudas estuvo presente en muchos momentos, tanto buenos como malos.

Nathalya Linares: A pesar de que la conocí en las últimas etapas de la carrera, fue suficiente para darme cuenta que es una gran persona y una gran

amiga. Te has convertido como una mamá para mí, que siempre me da buenos consejos para ser alguien mejor.

A mi abuela Emelina, mi tío Eduardo, mi tío Pellin y mi tía Aurelia por ser parte del proceso para convertirme en ingeniero.

Gómez M., Alirio

**DETECCIÓN DE ÁREAS PARA PROSPECCIÓN MINERA DE CALIZAS
MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES EN LAS
ADYACENCIAS DE LAS CANTERAS MUME Y EL MELERO UBICADAS
EN EL MUNICIPIO CRISTOBAL ROJAS ESTADO MIRANDA**

Tutor Académico: Prof. Mauricio Hernández. Tutor Industrial: Ing. Juan Matos. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2023, 175p.

RESUMEN

El presente Trabajo Especial de Grado consistió en identificar y delimitar en superficie posibles yacimientos carbonáticos en las adyacencias de las canteras Mume y El Melero, haciendo uso de técnicas para el procesamiento de las imágenes multiespectrales (SAM, álgebra de bandas, combinación de bandas, clasificación supervisada y no supervisada) de ASTER y Landsat 8, apoyado en la interpretación de mapas temáticos asociado a unidades topográficas, modelo de iluminación y sombras, modelo de elevación digital, hipsometría, drenajes, orientación de laderas y pendientes, que fueron elaborados con un programa de sistema de información geográfica (SIG), tomando como base las hojas topográficas a escala 1:25.000 6846 IV NO, NE, SE y SO.

Espectralmente, los resultados no fueron los esperados para los alrededores de la cantera Mume, aunque, para las adyacencias de la cantera El Melero se obtuvieron mejores respuestas, en especial con el mapeo de ángulo espectral (SAM) y álgebra de bandas, generando un mayor interés.

Asimismo, con el análisis geomorfológico se pudo definir de una manera más detallada estas regiones ubicadas al sur de la fila Sabaneta (en el cual se encuentra la cantera El Melero), específicamente, en las partes altas de las estribaciones de dicha topografía. Muchos de los puntos de interés generados por los análisis pudieron ser verificados en campo, interpretándose que el yacimiento carbonático de la cantera El Melero se dispone de forma alargada con una orientación N75E.

Finalmente, con la información obtenida y los análisis realizados se logró elaborar un mapa geológico a escala 1:25.000 con las zonas definidas como posibles yacimientos carbonáticos.

Palabras claves: Sensores remotos, Sistema de Información Geográfica (SIG), ASTER, Landsat, cantera, Mume-Miranda (estado), Melero-Miranda (estado), yacimiento carbonático, caliza, mármol.

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	24
1.1 Planteamiento del problema	24
1.2 Objetivos del proyecto	25
1.2.1 General.....	25
1.2.2 Específicos	25
1.3 Justificación	26
1.4 Alcance.....	26
1.5 Ubicación del área de estudio	27
CAPÍTULO II MARCO REFERENCIAL	28
2.1 Marco teórico.....	28
2.1.1 Percepción remota o Teledetección	28
2.1.2 Campo eléctrico	30
2.1.3 Campo magnético	30
2.1.4 Energía electromagnética.....	31
2.1.5 El espectro electromagnético	31
2.1.6 Firma Espectral	33
2.1.7 Sensores remotos	34
2.1.8 Resolución de los sensores remotos.....	35
2.1.8.1 Resolución espacial	35
2.1.8.2 Resolución espectral.....	36
2.1.8.3 Resolución radiométrica.....	37

2.1.8.4 Resolución temporal	37
2.1.9 Sistema de información geográfica (SIG)	38
2.2 Antecedentes.....	39
2.2.1 Antecedentes geológicos	39
2.2.2 Antecedentes de sensores remotos	41
2.3 Geología regional	45
2.3.1 Generalidades	45
2.3.2 Unidades geológicas	47
2.3.2.1 Faja Caracas.....	48
2.3.2.1.a Esquisto de Chuspita	48
2.3.2.1.b Esquisto Las Mercedes.....	49
2.3.2.2 Faja Caucagua – El Tinaco	50
2.3.2.2.a Filita de Tucutunemo	50
2.3.2.2.b Complejo Conoropa	51
2.3.2.2.c Esquisto de Tinapú	51
2.3.2.2.d Metaconglomerado de Charallave	52
2.3.2.2.e Gneis de La Aguadita	52
2.3.2.3 Unidades sedimentarias.....	53
2.3.2.3.a Formación Tuy.....	53
2.3.3 Geología Estructural.....	53
2.3.3.1 Falla de La Victoria	54
2.3.3.2 Falla Tácata – Charallave	55
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO.....	56
3.1 Etapa 1: Recopilación de la información cartográfica y geológica.....	57

3.1.1 Recopilación bibliográfica.....	57
3.1.2 Recopilación de mapas geológicos y topográficos.....	57
3.1.3 Recopilación de las imágenes satelitales y Modelo de Elevación Digital	58
3.2 Etapa 2: Preparación e incorporación de los datos en el SIG y <i>software</i> de procesamiento digital de imágenes satelitales	59
3.2.1 Digitalización del mapa topográfico.....	59
3.2.2 Digitalización del mapa geológico	59
3.2.3 Preprocesamiento de las imágenes satelitales	60
3.2.3.1 Corrección radiométrica	60
3.2.3.2 Corrección atmosférica	61
3.2.3.3 Elaboración de máscaras para vegetación, cuerpos de agua, sombras, nubes y ciudades	65
3.2.3.4 Pan sharpening	70
3.3 Etapa 3: Procesamiento de los datos	71
3.3.1 Construcción de un modelo de elevación digital (DEM) y capas temáticas.....	71
3.3.1.1 Modelo de elevación digital (DEM).....	71
3.3.1.2 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS).....	71
3.3.1.3 Mapas temáticos	71
3.3.1.3.a Mapa de unidades topográficas	72
3.3.1.3.b Mapa hipsométrico.....	72
3.3.2.3.c Mapa de pendientes.....	73
3.3.2.3.d Mapa de orientación de laderas.....	73
3.3.2.3.e Mapa de drenajes	75

3.3.2 Procesamiento de las imágenes satelitales.....	75
3.3.2.1 Combinación y Matemática de bandas	75
3.3.2.2 Clasificación no supervisada.....	77
3.3.2.3 Clasificación supervisada.....	78
3.1.2.3.a Máxima verosimilitud	78
3.1.2.3.b Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM) y estudio de firmas espectrales.....	81
3.4 Etapa 4: Integración e interpretación de los datos.....	83
3.4.1 Interpretación de las unidades espectrales y aplicación de firmas espectrales para detección de caliza	83
3.4.2 Interpretación del relieve para la discriminación de posibles áreas de caliza	83
3.5 Etapa 5: Verificación en campo	83
3.6 Etapa 6: Resultados	84
CAPÍTULO IV RESULTADOS	85
4.1 Resultados obtenidos mediante sistema de información geográfica (Arcgis)	85
4.1.1 Unidades topográficas.....	85
4.1.1.1 Unidad de relieve alto	85
4.1.1.1.a Filas asimétricas de tope irregular	86
4.1.1.1.b Depresiones de fondo estrecho	86
4.1.1.2 Unidad de relieve bajo.....	86
4.1.1.2.a Depresiones de fondo amplio	87
4.1.1.2.b Colinas alargadas	87
4.1.2 Mapa de drenajes.....	88

4.1.3 Modelo de elevación Digital (DEM) 3D	90
4.1.4 Modelo de iluminación y sombras (MDIS)	91
4.1.5 Mapa de pendientes	93
4.1.6 Mapa de orientación de laderas	94
4.1.7 Mapa hipsométrico	95
4.2 Resultados obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes satelitales.....	97
4.2.1 Realización de combinación y matemáticas de bandas	97
4.2.1.1 Combinación de bandas	97
4.2.1.1.1 Combinación de las bandas de ASTER	97
4.2.1.1.2 Combinación de las bandas de Landsat 8	99
4.2.1.2 Matemáticas de bandas	101
4.2.1.2.1 Resultado asociado al índice de la calcita	102
4.2.1.2.2 Resultados asociado al índice de carbonatos.....	103
4.2.1.2.3 Resultado asociado al índice de carbonatos, clorita y epidota.....	105
4.2.1.2.4 Resultados asociado al índice de dolomitas	106
4.2.2 Ejecución de clasificación no supervisada	109
4.2.3 Ejecución de clasificación supervisada	111
4.2.3.1 Evaluación por medio de Máxima Verosimilitud.....	111
4.2.3.2 Evaluación por medio de firmas espectrales con Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM).....	114
CAPÍTULO V INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	116
5.1 Interpretación de los productos generados a través de las imágenes multiespectrales.....	116

5.1.1 Comparación y análisis de los mapas de combinaciones de bandas	116
5.1.2 Comparación y análisis de los mapas asociado a las matemáticas de bandas.....	121
5.1.3 Comparación y análisis de los mapas de clasificación no supervisada (K means) y supervisada (máxima verosimilitud).....	127
5.1.4 Análisis de los mapas de clasificación supervisada (SAM)	134
5.1.5 Integración general del procesamiento de la data satelital.....	139
5.2 Interpretación de los productos generados mediante sistema de información geográfica	142
5.2.1 Integración y análisis de los mapas de unidades topográficas, drenajes, DEM, MDIS, pendientes, orientación de laderas e hipsométrico	142
5.3 Integración de los análisis de las imágenes multiespectrales y del relieve	153
5.4 Comprobación en campo y resultado final.....	156
5.5 Consideraciones para el resultado final.....	163
CONCLUSIONES	166
RECOMENDACIONES	168
BIBLIOGRAFIA.....	169
ANEXO	175

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio (polígono gris)	27
Figura 2.1 Componentes de un sistema de teledetección	29
Figura 2.2 Campo eléctrico	30
Figura 2.3 Energía electromagnética	31
Figura 2.4 Espectro electromagnético.....	32
Figura 2.5 Firmas espectrales de diferentes tipos de rocas, minerales y vegetación	33
Figura 2.6 Sensor pasivo de un satélite	34
Figura 2.7 Sensor activo de un satélite	35
Figura 2.8 Resolución espacial – Comparación entre los diferentes tamaños de pixel	36
Figura 2.9 Resolución espectral – Comparación entre las diferentes bandas espectrales de varios sensores.....	36
Figura 2.10 Resolución radiométrica – Comparación entre dos sensores con diferentes resoluciones radiométricas.....	37
Figura 2.11 Ejemplo de un dato tipo ráster y tipo vector	39
Figura 2.12 Mapa geológico de la Cordillera de la costa	47
Figura 2.13 Sistema de fallas activas en la región norcentral de Venezuela, donde se muestran las fallas de El Pichao “VE-08e” y de Táchata “VE-11 que limitan el área de estudio	54
Figura 3.1 Metodología de la investigación.....	56
Figura 3.2 Procedimiento de la corrección radiométrica a través del <i>software</i> ENVI.	61

Figura 3.3 Resultado de la corrección atmosférica	62
Figura 3.4 Procedimiento de la corrección atmosférica a la imagen Landsat a través del <i>software</i> ENVI 5.3.....	63
Figura 3.5 Procedimiento de la corrección atmosférica a la imagen ASTER (VNIR+SWIR) a través del <i>software</i> ENVI 5.3.	64
Figura 3.6 Procedimiento para la corrección atmosférica en la imagen ASTER (TIR) a través del <i>software</i> ENVI 5.3.	65
Figura 3.7 Generación del Índice de Vegetación (NDVI).	66
Figura 3.8 Demarcación de la región con alto porcentaje de vegetación.....	67
Figura 3.9 Demarcación de zonas que representan cuerpos de agua y sombras.	68
Figura 3.10 Apartado para la creación manual de un ROI mediante un polígono.	69
Figura 3.11 Proceso de creación de mascara.....	70
Figura 3.12 Ejemplo de la generación de una capa de orientación de pendiente a partir de un DEM.....	74
Figura 3.13 Procedimiento para aplicación de la combinación y matemática de bandas.	76
Figura 3.14 Ejemplo de la combinación y algebra de bandas (Tomado de Hernández, 2011).	77
Figura 3.15 Procedimiento para la ejecución de la clasificación no supervisada.....	78
Figura 3.16 Procedimiento para la ejecución de la clasificación supervisada.	80
Figura 3.17 Procedimiento para la generación del Cartografiado del Angulo Espectral (SAM).....	82

Figura 4.1 Mapa topográfico con división de unidades mayores.....	88
Figura 4.2 Mapa de drenajes.	89
Figura 4.3 Modelo de Elevación Digital (DEM) en 3D con ubicación de las canteras El Melero (punto amarillo) y Mume (punto rojo).	91
Figura 4.4 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) con una configuración de 315° 45°.....	92
Figura 4.5 Mapa de pendientes.....	93
Figura 4.6 Mapa de orientación de laderas.....	95
Figura 4.7 Mapa hipsométrico.....	96
Figura 4.8 Combinación de las bandas 8-3-1 del sensor ASTER.	98
Figura 4.9 Combinación de las bandas 8-3-1 del sensor ASTER con la aplicación de un realce espectral.....	99
Figura 4.10 Combinación de las bandas 7-5-3 del sensor OLI del satélite Landsat 8.	100
Figura 4.11 Combinación de las bandas 7-5-3 del sensor OLI del satélite Landsat 8 con la aplicación de un realce espectral.....	101
Figura 4.12 Áreas (rojo) con posibles mineralizaciones de calcita en las bandas del SWIR del sensor ASTER.....	102
Figura 4.13 Áreas (amarillo) con posibles afloramientos de rocas con carbonato de calcio en las bandas del SWIR del sensor ASTER.	104
Figura 4.14 Áreas (verde) con posibles afloramientos de rocas con carbonato de calcio en las bandas del TIR del sensor ASTER.....	105
Figura 4.15 Áreas (naranja) con posibles afloramientos de rocas con minerales asociado a carbonatos, clorita y epidota en las bandas del SWIR del sensor ASTER.	106

Figura 4.16 Áreas (azul) con posibles afloramientos dolomita en las bandas del SWIR del sensor ASTER.	107
Figura 4.17 Áreas (morado) con posibles afloramientos dolomita en las bandas del SWIR del sensor ASTER.....	108
Figura 4.18 Mapa de clasificación no supervisada de ASTER.....	109
Figura 4.19 Mapa de clasificación no supervisada del sensor OLI del satélite Landsat 8.	110
Figura 4.20 Mapa de clasificación no supervisada de ASTER.....	112
Figura 4.21 Mapa de clasificación supervisada del sensor OLI del satélite Landsat 8.	113
Figura 4.22 Mapa integral del Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM)..	114
Figura 4.23 Firmas espectrales del área de estudio asociadas a carbonatos.	115
Figura 5.1 Zonas de canteras y aledañas. Señalización de zonas similares a la cantera El Melero (imagen superior izquierda).....	118
Figura 5.2 Zonas de canteras y aledañas a las mismas con realce de colores.	118
Figura 5.3 Afloramientos de cuerpos litológicos (marrón oscuro – rojizo - amarillento) no asociado a carbonatos.	119
Figura 5.4 Áreas con una la vegetación sana.	120
Figura 5.5 Mapa parcial de áreas con calizas según el análisis de las combinaciones de bandas y un máximo de probabilidad de 10%.	121
Figura 5.6 Comparación de las respuestas espectrales al norte de la región.	123
Figura 5.7 Comparación de las respuestas espectrales al suroeste de la región.....	124

Figura 5.8 Comparación de las respuestas espectrales al sureste de la región.	125
Figura 5.9 Mapa parcial de áreas con calizas según el análisis de la matemática de bandas y un máximo de probabilidad de 25%.	126
Figura 5.10 Áreas de mayor interés (en círculos) según el análisis de las combinaciones de bandas. La imagen de la izquierda se encuentra la forma parte de la formación Tuy, en la imagen central las adyacencias de la cantera El Melero y la imagen de la derecha los alrededores de la cantera Mume.	127
Figura 5.11 Mapa geológico simplificado del área de estudio.....	128
Figura 5.12 Comparación de la clasificación supervisada realizada en ASTER y Landsat.	129
Figura 5.13 Clases de la clasificación no supervisada asociada al área de cantera en ASTER y Landsat.....	130
Figura 5.14 Clase de la clasificación supervisada asociada al área de cantera en ASTER y Landsat.	131
Figura 5.15 Clases de la clasificación no supervisada asociada al área de entorno de cantera en ASTER y Landsat.	132
Figura 5.16 Clase de la clasificación supervisada asociada al área de entorno de cantera en ASTER y Landsat.....	132
Figura 5.17 Mapa parcial de áreas con calizas según el análisis de clasificación supervisada (Máxima verosimilitud) y no supervisada (k means) con un máximo de probabilidad de 15%.	134
Figura 5.18 Grupo asociado a calizas o mármoles.	136
Figura 5.19 Grupo asociado a rocas carbonáticas con minerales de muscovita y cuarzo.	136
Figura 5.20 Grupo asociada a calizas o mármoles impuros.	137
Figura 5.21 Grupo asociado a dolomía.	138

Figura 5.22 Grupo asociado a dolomías impuras.....	138
Figura 5.23 Mapa parcial de áreas con posibles yacimientos de caliza según el análisis de imágenes satelitales con un máximo de probabilidad de 60%.	139
Figura 5.24 Grupos de áreas (A y B) con una probabilidad alta de encontrar yacimientos carbonaticos alrededor de la cantera El Melero.....	140
Figura 5.25 Grupos de áreas (rectángulos) con una probabilidad alta de encontrar yacimientos carbonaticos alrededor de la cantera Mume.	141
Figura 5.26 zonas con una probabilidad alta de encontrar yacimientos carbonáticos lejanos a las canteras El Melero y Mume.	141
Figura 5.27 Mayores exponentes de la unidad de relieve alto	143
Figura 5.28 Estribaciones de la ladera sur de la fila Magdalena y la fila Sabaneta	144
Figura 5.29 Mapa hipsométrico con iluminación y sombras. Señalización (flecha) de altos topográficos que superan los 800 msnm.....	145
Figura 5.30 Mapa de drenajes con iluminación y sombras. Unidades litológicas en alto relieve en polígonos rosa y verde.	147
Figura 5.31 Mapa de drenajes con iluminación y sombras. Señalización (polígonos amarillos) de zonas de interés.	148
Figura 5.32 Mapa de drenajes con iluminación y sombras. Unidades litológicas en polígonos morado y naranja.....	149
Figura 5.33 Mapa hipsométrico con iluminación y sombras. Señalización (óvalos) de altos topográficos.	150
Figura 5.34 Mapa parcial encontrar yacimientos de caliza según el análisis de relieve con un máximo de probabilidad de 40%.	152
Figura 5.35 Alineamientos de los yacimientos carbonáticos.	153

Figura 5.36 Mapa de probabilidades de encontrar yacimientos de caliza según la integración del análisis de imágenes satelitales con el de relieve.....	155
Figura 5.37 Área de probabilidades alrededor de la cantera El Melero.	156
Figura 5.38 Orientación del posible yacimiento de caliza que une las zonas con las probabilidades altas (línea segmentada roja).	156
Figura 5.39 Mapa de probabilidades con puntos de observación y recorridos realizados en campo.....	157
Figura 5.40 Plegamiento anticlinal y sinclinal en la cantera El Melero.	158
Figura 5.41 Clasto (E2) y macroclasto (E1) de mármol.	159
Figura 5.42 Estalactitas encontradas en el punto de observación E1.....	160
Figura 5.43 clasto en E3 y macroclastos en E4 (imagen de la derecha). ..	160
Figura 5.44 Afloramiento de mármol en el punto de observación E5.....	161
Figura 5.45 Plegamiento anticlinal orientado N75E.	162
Figura 5.46 Clastos y macroclastos aluvionales de metaconglomerado... ..	162
Figura 5.47 Mapa de probabilidades de encontrar un yacimiento carbonático con la demarcación de las ABRAE alrededor de la cantera El Melero.	164
Figura 5.48 Mapa de probabilidades de encontrar un yacimiento carbonático con la demarcación de las áreas de urbanismos y el ferrocarril Charallave – Caracas.	165

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Características de la región espectral.....	32
Tabla 2.2. Trabajos previos relacionados a estudios geológicos.....	40
Tabla 2.3. Trabajos previos relacionados a sensores remotos	42
Tabla 3.1. Clasificación en intervalos hipsométricos.	72
Tabla 3.2. Clasificación de pendiente según Gamboa (1986).	73
Tabla 5.1. Coordenadas de los puntos de observación.....	157

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Todo proyecto minero conlleva una etapa de prospección, el cual busca identificar y delimitar elementos terrestres, especialmente rocas y minerales de interés para evaluar áreas que pudieran ser económicamente rentables, fundamentándose en características únicas de la litología.

Esta investigación se basa en buscar posibles áreas en las que se pueda hallar yacimientos de caliza, tomando como referencia las canteras Mume y El Melero y, la bibliografía relacionada a la caracterización de rocas carbonáticas mediante el uso de las imágenes satelitales ASTER y Landsat 8.

En la minería, la palabra “caliza” se refiere a rocas con alto contenido de carbonato de calcio (dolomía, caliza o mármol), que son factibles para su explotación y uso industrial. Para este trabajo, se usó el término “yacimiento de caliza”, “yacimiento carbonático” o “caliza” para hablar de manera general de las rocas carbonáticas. Sin embargo, para un entorno netamente geológico, se utilizó la palabra correspondiente a la litología en específico, como es el caso de la geología regional, las firmas espectrales y la descripción litológica de la salida de campo que contempla esta investigación.

1.1 Planteamiento del problema

Las canteras Mume y El Melero se encuentran ubicadas al suroeste y noreste de la ciudad de Charallave respectivamente. Debido a su potencial de carbonato de calcio (CaCO_3) han sido por varios años explotadas para la obtención de la caliza, materia prima para la elaboración de cemento.

Estas canteras están llegando al fin de su vida útil para la explotación de dicho recurso, por lo que existe la necesidad de explorar nuevas áreas con potencial minero (económicamente rentable). Es por ello que, se busca

implementar nuevas herramientas que contribuyan a optimizar costos y tiempo en las etapas de prospección de nuevos yacimientos.

Asimismo, en los últimos años los sensores remotos han tenido un gran avance en la obtención de imágenes satelitales de alta resolución para conocer el tipo de litología, mineralogía y estructuras (Ninomiya, Y., 2002; Villanueva, R., 2007 & Maggi *et al.*, 2009) y así con esta información establecer puntos de interés geológicos, saber el tipo de yacimiento presente y de la misma manera poder realizar una exploración en campo mucho más rápida, rentable y precisa.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 General

Identificar posibles yacimientos de caliza mediante la aplicación de técnicas de procesamiento e interpretación de imágenes satelitales multiespectrales en las adyacencias de las canteras Mume y El Melero ubicadas en el municipio Cristóbal Rojas estado Miranda.

1.2.2 Específicos

- Generar la cartografía topográfica digital a escala 1:25.000.
- Definir áreas de interés del relieve mediante la elaboración de un mapa de unidades topográficas, modelo de iluminación y sombras, mapa de drenajes, hipsometría, orientación de ladera y de pendiente.
- Determinar unidades espectrales a través de la combinación de bandas, álgebra de bandas, cartografiado de ángulo espectral (SAM), clasificación supervisada y no supervisada en las imágenes satelitales Landsat 8 OLI y ASTER.
- Verificar en campo las zonas de posible presencia de caliza obtenidas en la integración e interpretación de las imágenes satelitales y el relieve.

- Realizar un mapa a escala 1:25.000 que integre la extensión y delimitación en superficie de yacimientos de caliza, así como también rasgos topográficos, hidrográficos, y unidades geológicas.

1.3 Justificación

El Desarrollo de esta investigación está orientado a satisfacer la necesidad de la empresa C.A. La Fábrica Nacional de Cementos S.A.C.A. de hallar modelos de prospección más eficientes, con el fin de mejorar la toma de decisiones al momento de la aplicación de estudios de exploración de yacimientos de calizas adyacentes a las canteras Mume y El Melero.

Así pues, la aplicación de algoritmos matemáticos en las imágenes satelitales mediante programas de procesamientos, en conjunto con la interpretación del relieve, ayudará delimitar zonas concretas que cumplan con las características espectrales y morfológicas para la identificación de estos yacimientos carbonáticos.

Por estas razones, este estudio será el marco de referencia para futuros trabajos llevados a cabo por la empresa.

1.4 Alcance

Esta investigación se fundamenta en la interpretación de imágenes satelitales que proporcionará datos geológicos relacionado a las calizas de los yacimientos de Mume y El Melero, actualizando la cartografía geológica local y aportando nuevos conocimientos en el uso de sensores remotos para hallar carbonatos. El resultado de estos análisis e interpretaciones se encontrarán representados en un mapa geológico a escala 1:25.000.

1.5 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se encuentra al oeste del estado Miranda (ver Figura 1.1) abarcando una extensión de 216 km² y comprendida entre las siguientes coordenadas proyectadas con datum REGVEN Huso 19:

-1143012 N 728135 E

-1143110 N 742742 E

-1128356 N 742844 E

-1128260 N 728230 E

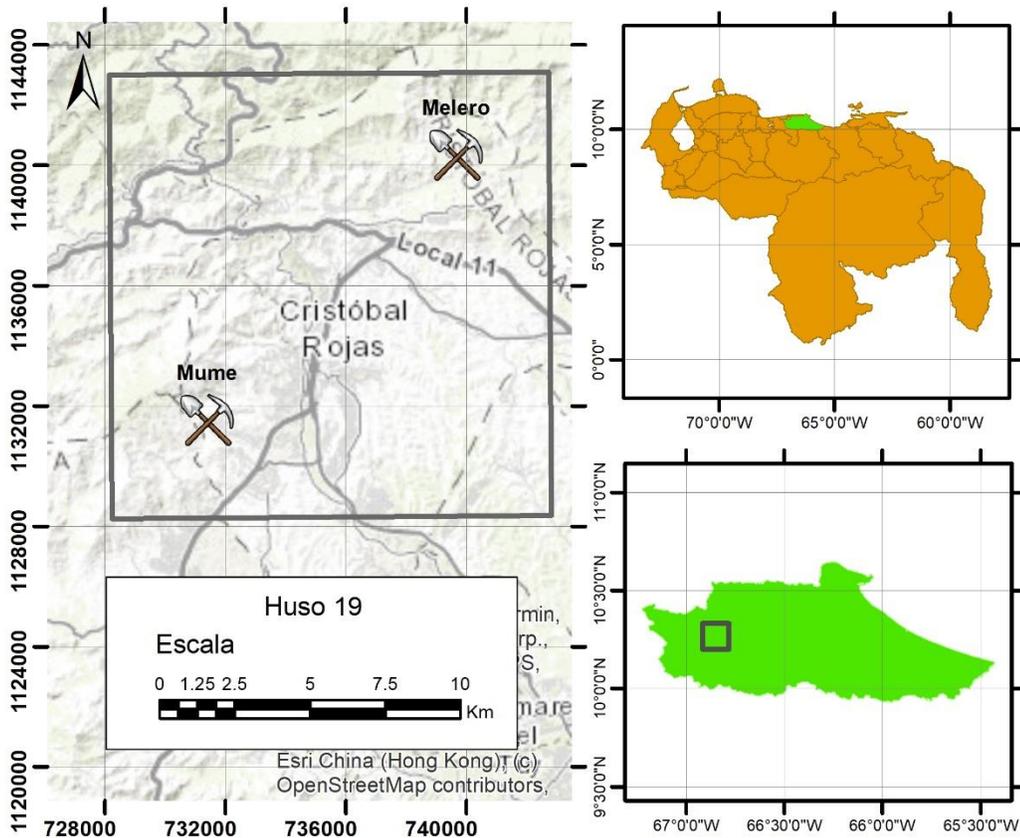


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio (polígono gris)

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco teórico

2.1.1 Percepción remota o Teledetección

Es un modo de obtener información de un objeto de interés sin que los instrumentos de estudio estén en contacto directo con el mismo (Álzate, 2001).

Según Álzate (2001), el proceso de teledetección consta de una serie de componentes que interactúan (ver Figura 2.1) y se definen como:

- Fuente de energía o iluminación: Es el que da origen y provee la energía electromagnética al objeto de interés.
- Radiación y la atmosfera: Cuando la energía es emitida por la fuente al acercarse a la Tierra entrará en contacto e interactuará con la atmosfera hasta llegar al objeto de estudio. Esta interacción ocurrirá nuevamente cuando la energía se devuelva desde el objeto al sensor.
- Interacción con el objeto: La energía interactúa con las diferentes capas de la Tierra (atmósfera, hidrósfera, Litósfera y Biósfera) según las propiedades y la energía incidente. Este fenómeno puede darse en forma de reflexión, refracción absorción o transmisión.
- Detección de la energía por el sensor: Una vez que la energía interactúa con la superficie terrestre, la radiación electromagnética reflejada es captada, codificada y grabada por el sensor remoto.
- Transmisión, recepción y procesamiento: La energía almacenada por el sensor es luego transmitida en forma

electrónica hacia una estación de recepción y procesamiento, en la cual los datos serán convertidos a imágenes digitales.

- Interpretación y análisis: La imagen preprocesada es interpretada de forma visual y/o digital, con el fin de extraer información de la superficie iluminada (o que pudo emitir la radiación).
- Aplicación: constituye el paso final del sistema del proceso de teledetección, en el cual consiste en darle una aplicación según el área de estudio de interés para darle solución a un problema.

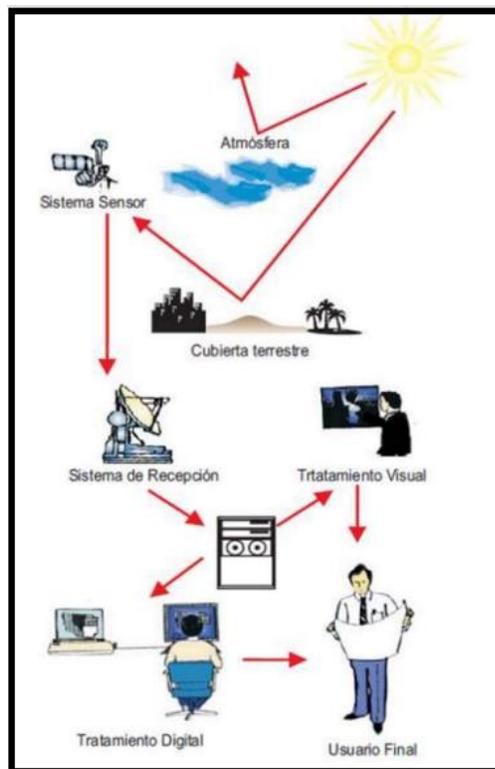


Figura 2.1 Componentes de un sistema de teledetección (Tomado y modificado de Chuvieco, 1995).

2.1.2 Campo eléctrico

Es una propiedad del espacio (ver Figura 2.2), en el 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 (una magnitud vectorial). La manera de medirla es 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).

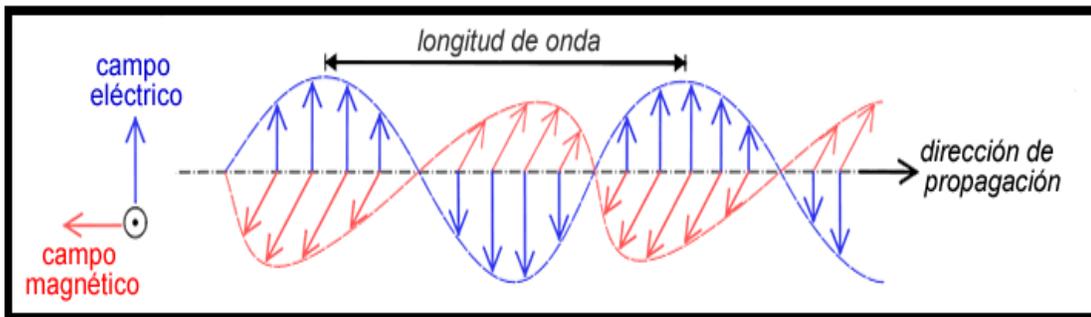


Figura 2.2 Campo eléctrico (Tomado de Radiasa, s.f.).

2.1.3 Campo magnético

Es una propiedad del espacio (ver Figura 2.2) 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 \vec{v} y B son magnitudes vectoriales y el producto cruz es un producto vectorial que tiene como un vector perpendicular tanto a \vec{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.

2.1.4 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 (ver Figura 2.3).

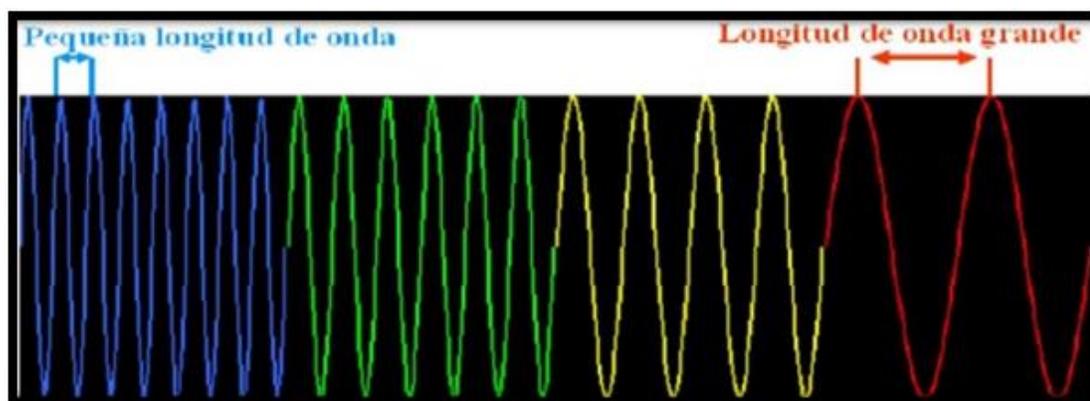


Figura 2.3 Energía electromagnética (Disponible en: www.geociencias.unam.mx).

2.1.5 El espectro electromagnético

Según la NASA (2011), lo define como el sistema que clasifica en función de la longitud de onda toda la energía (desde ondas cortas de algunos micrómetros hasta ondas largas de hasta varios kilómetros) que se mueve armónicamente a la velocidad de la luz (ver Figura 2.4 y Tabla 2.1).

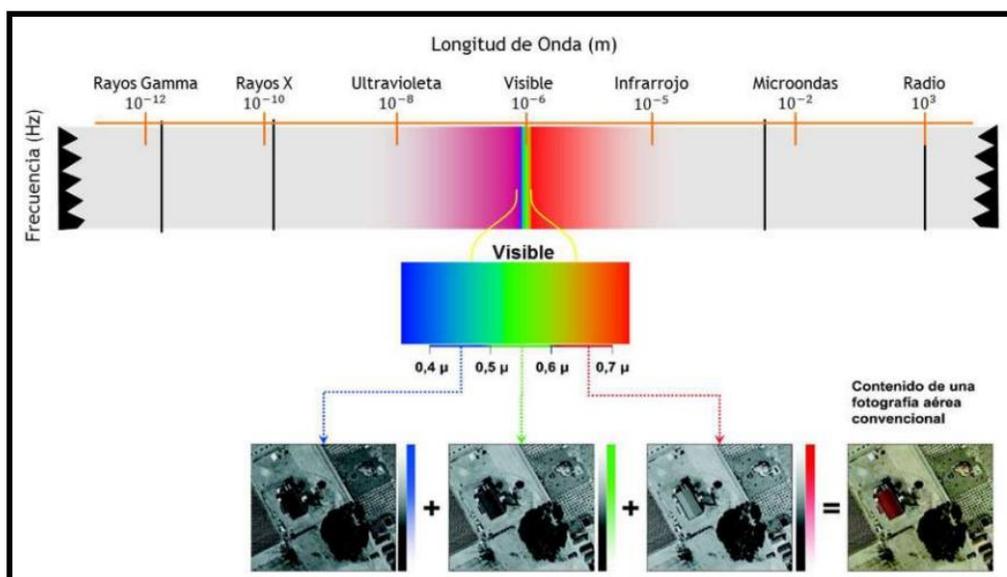


Figura 2.4 Espectro electromagnético (Tomado de Bravo, 2017).

Tabla 2.1. Características de la región espectral (Tomado de Bravo, 2017).

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda (λ)	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	0,03 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 μ m	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu$ m es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 μ m	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 μ m	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 μ m	Estimación del contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 μ m	Detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre.
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

2.1.6 Firma Espectral

La firma espectral o curva de reflectancia espectral es el dato de interés obtenido por la percepción remota. El mismo registra el porcentaje de la energía incidente, normalmente luz solar, que se refleja por el material como una función de longitud de onda de la energía. Asimismo, el eje horizontal de la gráfica representa la longitud de onda de la energía incidente, estos valores van desde el espectro visible hasta el infrarrojo (IR). Por otra parte, el eje vertical muestra el porcentaje de energía incidente que se refleja en las diferentes longitudes de ondas. Las excursiones descendentes o depresiones en la curva son llamadas absorción característica porque representan la absorción de la energía incidente, mientras que las excursiones altas son denominados picos de reflectancia. Las firmas espectrales son importantes porque ayudan a identificar diferentes materiales como rocas (ver Figura 2.5) (Sabins, 2007).

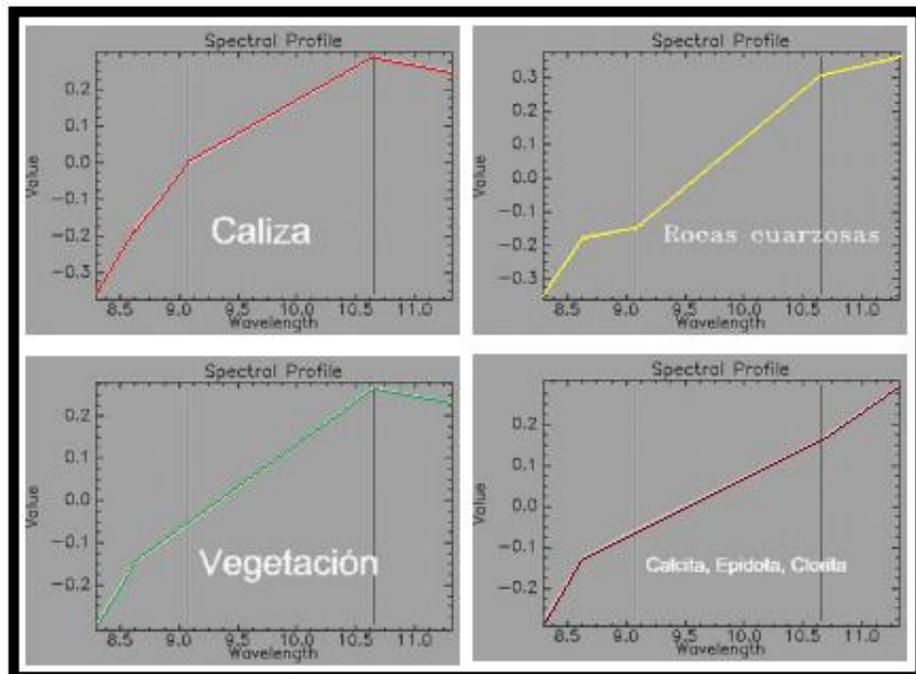


Figura 2.5 Firmas espectrales de diferentes tipos de rocas, minerales y vegetación (Tomado y modificado de Villanueva, 2007).

2.1.7 Sensores remotos

Según Álzate (2001) son aparatos que son transportados en una plataforma (satélite, avión, etc.) y que poseen la tecnología para adquirir imágenes a distancia. Este sensor capta la información de las diferentes regiones del espectro electromagnético denominados canal o banda. Asimismo, la radiación recibida por el sensor puede ser:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado) (1)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico) (2)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar) (3)

Álzate (2001) a su vez define que la teledetección pasiva la constituye las dos primeras técnicas anteriormente mencionada (1 y 2), mientras que la activa la conforma la última (3).

- Sensores pasivos: Son aquellos que reciben la energía reflejada o emitida por la Tierra cuando es iluminada por el Sol (ver Figura 2.6). Algunos ejemplos son: ASTER, Landsat, MODIS y Sentinel.



Figura 2.6 Sensor pasivo de un satélite (Tomado de Bravo, 2017).

- Sensores activos: Estos proveen su propia fuente de energía para “iluminar” la superficie terrestre, es decir, emiten radiación hacia el área de estudio y luego detectan la porción de esa radiación reflejada (ver Figura 2.7). Ejemplo de ellos son: Lidar, Radar y Sonar.

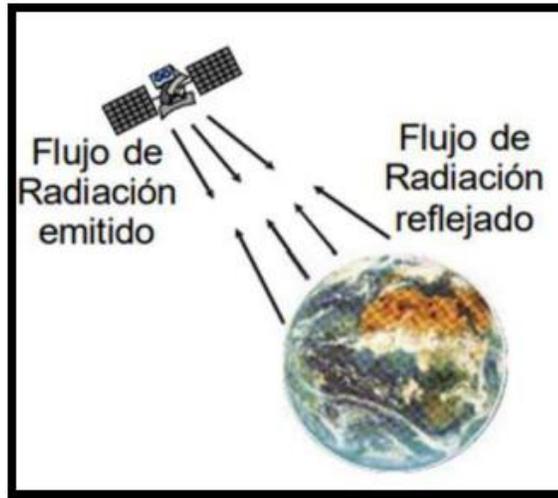


Figura 2.7 Sensor activo de un satélite (Tomado de Bravo, 2017).

2.1.8 Resolución de los sensores remotos

2.1.8.1 Resolución espacial

Es la distancia que corresponde a la unidad mínima de información incluida en la imagen (pixel). Por lo que, a menor tamaño de pixel, mayor será la resolución espacial, lo que significa que el sensor conseguirá mejor detalle de los objetos (ver Figura 2.8) (Bravo, 2017).

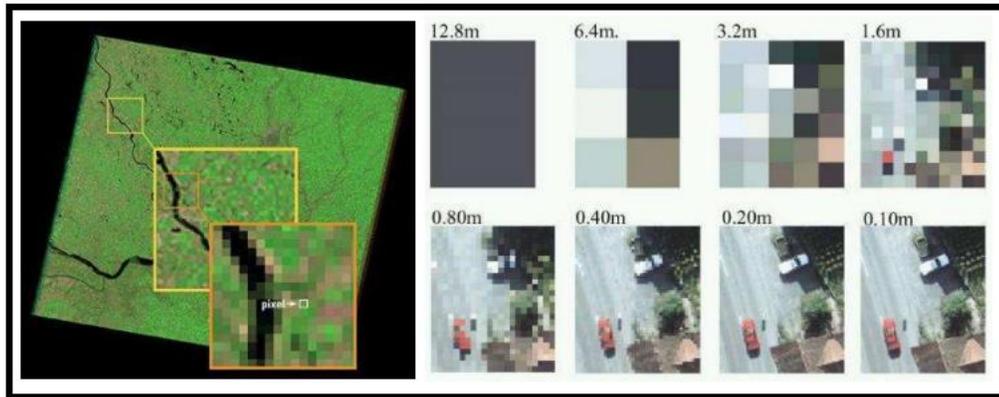


Figura 2.8 Resolución espacial – Comparación entre los diferentes tamaños de pixel (Tomado de Bravo, 2017).

2.1.8.2 Resolución espectral

Es el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor (ver Figura 2.9). Por lo que, a mayor resolución, el sensor tendrá más información del comportamiento de un objeto en diferentes bandas espectrales (Bravo, 2017).

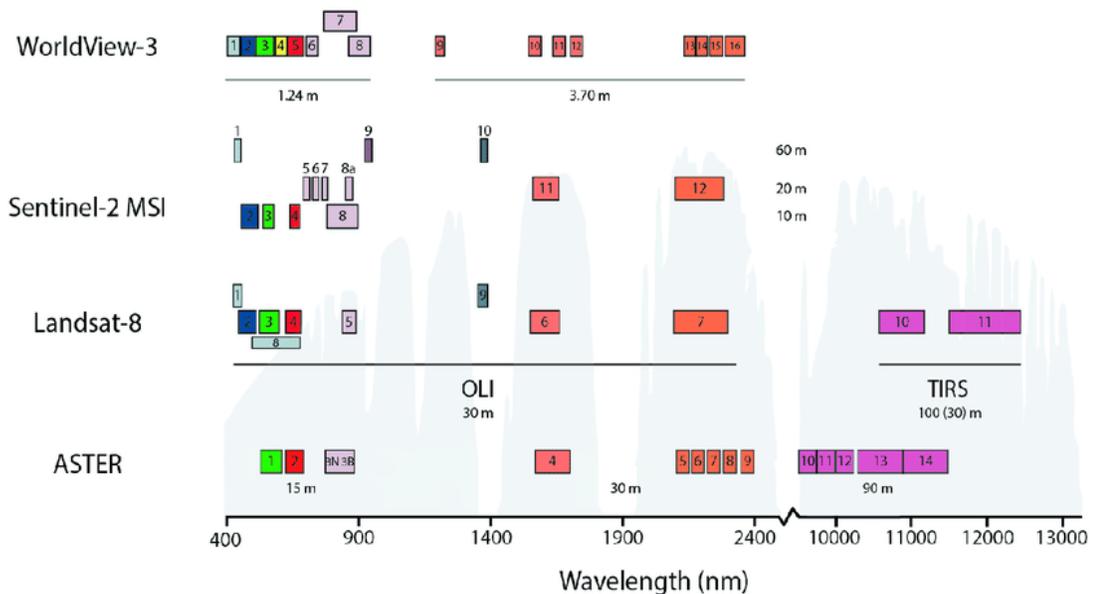


Figura 2.9 Resolución espectral – Comparación entre las diferentes bandas espectrales de varios sensores (Tomado de Cardoso *et al.*, 2020).

2.1.8.3 Resolución radiométrica

Es la gama de valores de brillos disponibles medidos en bits (dígitos binarios). Asimismo, en la imagen estos valores corresponden con el alcance máximo de DN. Así pues, a mayor cantidad de bits, mayor rango dinámico tendrá el sensor (ver Figura 2.10) (Richards & Jia, 2006).



Figura 2.10 Resolución radiométrica – Comparación entre dos sensores con diferentes resoluciones radiométricas (Arenas, 2016).

2.1.8.4 Resolución temporal

Es el tiempo que tarda el sensor en visitar la misma zona de la Tierra (NASA, 2011). Asimismo, estos ciclos definen 3 resoluciones:

- Alta resolución temporal: < 1 día – 3 días
- Media resolución temporal: 4 – 16 días
- Baja resolución temporal: >16 días

2.1.9 Sistema de información geográfica (SIG)

Ynfante (2022) lo define como una estructura para recopilar, gestionar y analizar datos. Arraigado a la ciencia de la geografía analiza la ubicación espacial y organiza capas de información de visualizaciones mediante mapas y escenas 3D. Así pues, con esta capacidad única, SIG revela información de interés como patrones, relaciones y situaciones del área de estudio, lo que ayuda al usuario tomar decisiones más inteligentes. En cuanto a los elementos que lo componen se encuentran:

- El *hardware*: Es la computadora en la cual operará el SIG.
- El *software*: proporciona funciones y herramientas necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica como las apps ArcGIS y QGIS.
- Los datos: Son los que se obtienen por fuente propia o a través de un proveedor comercial de datos y están referidos a datos geográficos y tabulares.
- Personal: Conformado por las personas que maneja el sistema y desarrolla planes que aplican a los problemas del mundo real.
- Los métodos: Está formado por el diseño, reglas y organización en la metodología de trabajo.

Ynfante (2022) describe 3 tipos de datos con el cual trabaja un SIG:

- Datos espaciales tipo vector: Constituidas por puntos, polígonos o líneas.
- Datos espaciales tipo ráster: Conformadas por imágenes satelitales, fotográficas aéreas e información escaneada. Además, consta de una matriz de celdas (píxeles) organizadas en filas y columnas en la que

cada celda contiene un valor que representa información (ver Figura 2.11).

- Datos tabulares: Es la información que describe cada elemento de una capa temática. Puede utilizarse en la práctica cualquier base de datos para alimentar la información espacial.

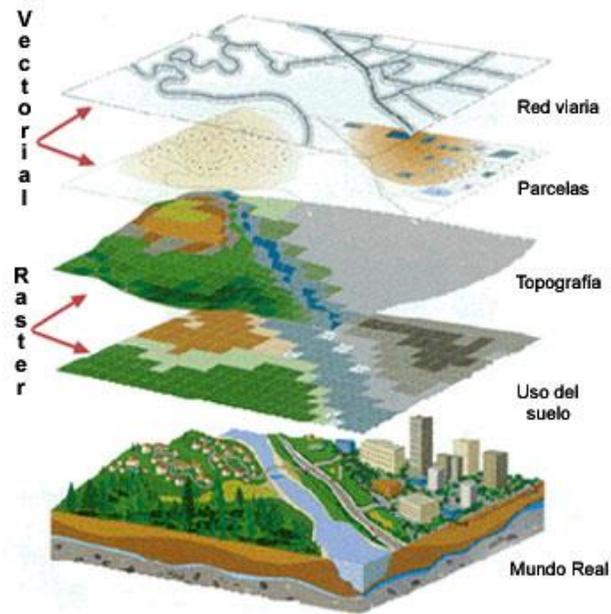


Figura 2.11 Ejemplo de un dato tipo ráster y tipo vector (tomado de Hernández, 2022).

2.2 Antecedentes

Se presentan una serie de trabajos recopilados que poseen alguna relación con la investigación, a modo de considerar aportes en materia de geología y técnicas de teledetección aplicadas a la identificación de yacimientos y caracterización geológica.

2.2.1 Antecedentes geológicos

En la Tabla 2.2 se reflejan antecedentes que muestran información geológica de interés, tanto a escala local como regional del área de estudio.

Tabla 2.2. Trabajos previos relacionados a estudios geológicos

Autor, año y título	Descripción de la investigación
<p>Aguerrevere & Zuloaga (1937-1938) <i>"Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa"</i></p>	<p>Realizaron el primer estudio geológico de carácter regional y contemporáneo de la Cordillera de la Costa, establecieron la primera correlación estratigráfica y dieron nombres a las unidades aflorantes. Además, definieron la primera nomenclatura estratigráfica que sirvió como base para estudios posteriores, un ejemplo de ello es la primera referencia a lo que se conoce actualmente como Esquisto de Las Mercedes.</p>
<p>Smith, R. (1952) <i>"Geología de la región de Los Teques - Cua"</i></p>	<p>Elaboró un estudio geológico en el estado Miranda, específicamente entre la ciudad de Los Teques y Cua. En el mismo se destaca las características de las formaciones de calizas presentes en el área.</p>
<p>Urbani, F. & Rodríguez (2003) <i>"Atlas geológico de la Cordillera de la Costa Venezuela"</i></p>	<p>Integraron la información geológica de 148 hojas geológicas a escala 1:25.000 de la Cordillera de la Costa, actualizando los textos de las unidades de rocas ígneo-metamórficas del Léxico Estratigráfico de Venezuela, siguiendo un lineamiento interinstitucional para que la actualización siguiera las normas para unidades litodémicas. Asimismo, se cambiaron unidades con denominaciones como grupo, formación o miembro y se estableció una nueva estructura de nomenclatura, agrupando los nombres de las unidades según las napas estudiadas.</p>

<p>Barreto, J. (2010) <i>"Caracterización geológica de la cantera Mume ubicada en el municipio Cristóbal Rojas de Los Valles del Tuy estado Miranda"</i></p>	<p>Llevó a cabo una caracterización geológica de la cantera Mume, en el cual discriminó unidades informales mediante el análisis de datos de estudios previos y realizando ensayos de laboratorio sobre muestras recolectadas en campo. Asimismo, determinó la concentración de carbonato de calcio, hierro, aluminio, magnesio y óxidos de silicio.</p>
<p>Corniel, Y. (2010) <i>"Estudio geológico de la cantera El Melero ubicada en el distrito Cristóbal Rojas municipio Charallave estado Miranda"</i></p>	<p>Realizó un estudio geológico mediante la recopilación bibliográfica, salidas de campo y ensayos de laboratorio en muestras recolectadas, logrando caracterizar el macizo carbonático, definir unidades informales y elaborar un mapa geológico.</p>

2.2.2 Antecedentes de sensores remotos

En la Tabla 2.3 se muestran antecedentes de estudios geológicos en Venezuela y el mundo aplicando sensores remotos.

Tabla 2.3. Trabajos previos relacionados a sensores remotos

Autor, año y título	Descripción de la investigación
<p>Ninomiya, Y. (2002) <i>"Mapping quartz, carbonate minerals, and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data"</i></p>	<p>Llevó a cabo un estudio en la banda del infrarrojo termal del sensor ASTER, logrando entender las diferentes emisividades entre los minerales de cuarzo, carbonatos y rocas con un determinado contenido de SiO₂, para así cartografiarlos.</p>
<p>Villanueva, R. (2007) <i>"Discriminación de carbonatos y sílice usando las bandas del infrarojo térmico"</i></p>	<p>Obtuvo como resultado el cartografiado de minerales de alteración propilítica como epidota, clorita y calcita; además, rocas cuarzosas, calizas y vegetación. Además, concluyó que las bandas del Infrarrojo Térmico del sensor ASTER del satélite TERRA permiten discriminar carbonatos y sílice.</p>
<p>Maggi et al. (2009) <i>"Comparación de la aplicación de imágenes ASTER y Landsat 5 TM para el mapeo de carbonatos en la quebrada de humahuaca, provincia de Jujuy"</i></p>	<p>Determinó que las imágenes Landsat ayudaron a separar geoformas, sin embargo, no lograron separar las zonas de dolomía y caliza. Mientras que, con las imágenes ASTER si permitió un mejor mapeo y delimitación de carbonatos a través de cocientes de bandas en el SWIR y TIR. Por otra parte, permitió diferenciar la dolomía de la caliza a través de combinación de bandas 5-67-8.</p>

<p>Martínez, L. & Belisario, E. (2009) <i>"Interpretación geológica de superficie mediante el uso de sensores remotos y su aplicación en la detección de posibles anomalías de uranio en la zona noreste del estado Amazonas"</i></p>	<p>Concluyó que las imágenes Landsat 7 ETM+ permitieron determinar la existencia de distintas litologías, así como las variaciones del relieve y posibles estructuras en la región. Además, le fue posible evidenciar la correspondencia entre la geología superficial obtenida de los estudios previos y la información interpretada de las imágenes multiespectrales.</p>
<p>Hernandez, M. (2011) <i>"Actualización de la geología de superficie en la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales"</i></p>	<p>Demostró que los sensores remotos son de gran utilidad para la interpretación geológica, logrando una buena correspondencia de las unidades litoestratigráficas con las litologías interpretadas en las imágenes satelitales.</p>
<p>Rajendran, S. & Nasir, S. (2013) <i>"ASTER spectral sensitivity of carbonate rocks - Study in Sultanate of Oman"</i></p>	<p>Su resultado arrojó que existen diferentes niveles de absorción entre las calizas, margas, listwanitas y carbonatitas en el SWIR Y TIR.</p>

<p>Yarmohammdi et al. (2015) <i>"Lithological and Structural Mapping Related to Sediment Hosted Zn-Pb Deposits in the Tiran Basin, NW of Esfahan, Iran: Using ASTER and ETM Images Processing"</i></p>	<p>El propósito de esta investigación se basa en el procesamiento de imágenes satelitales ASTER para el mapeo litológico y estructural, logrando mapear rocas carbonáticas del Cretácico inferior y rocas triásicas ricas en cuarzo en el TIR. Por otra parte, se detectó otras unidades rocosas asociadas a calizas arcillosas, esquisto, limolita, calizas y dolomía en el VNIR-SWIR.</p>
<p>Romero, E. (2019) <i>"Actualización geológica -cartográfica de la hoja 6448 ubicada al sur-este de falcón oriental, mediante el uso de sensores remotos"</i></p>	<p>Logró a través de una integración de un mapa topográfico digitalizado, Modelo de Elevación Digital (DEM), Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) y la imagen MNF delinear unidades geomorfológicas, litoestratigráficas y estructuras geológicas.</p>
<p>Jeevan et al. (2019) <i>"Aster Mapping of Limestone Deposits and Associated Lithounits of Parts of Chikkanayakanahalli, Southern Part of Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton, India"</i></p>	<p>Este estudio muestra el potencial del sensor ASTER y su aplicación de los métodos de procesamiento de imágenes para mapear depósitos de caliza de interés económico, reflejando que dicho sensor es capaz de discriminar las calizas de otras rocas como basaltos, gneises, granitos, migmatitas, entre otros.</p>

<p>Molina, F. (2021) <i>"Actualización de la cartografía geológica de la hoja Puerto Cumarebo 6350 a escala 1:100.000, estado Falcón"</i></p>	<p>Logró a través de combinaciones de bandas del satélite Landsat 8 identificar los rasgos estructurales, discriminar vegetación y definir la presencia de minerales calcáreos, ayudando a distinguir las distintas unidades geológicas presentes en la región noreste del estado Falcón.</p>
---	---

2.3 Geología regional

2.3.1 Generalidades

La zona de estudio está ubicada geográficamente dentro de la región de la Cordillera de la Costa, ubicada al norte de Venezuela. La misma es una provincia geológica de rocas meta-ígneas y meta-sedimentarias que corresponde a rocas de origen precámbrico, paleozoico y mesozoico, que fueron metamorfozadas y ubicada en posición alóctona en contacto tectónico con unidades del mismo período, sedimentadas a borde del continente (Talukdar & Loureiro, 1982).

Menéndez (1966) subdividió la Cordillera de la Costa en cuatro Fajas Tectónicas (Cordillera de la Costa, Caucagua-El Tinaco, Paracotos y Villa de Cura) caracterizadas por estar orientadas E-O. Más adelante, Urbani y Ostos (1989) subdividen la faja Cordillera de la Costa en tres fajas (Costera, Avila y Caracas). Luego esta división fue utilizada por Urbani en 2018 para definir los terrenos geológicos en cada una de las fajas:

1. Faja tectónica de la Cordillera de la Costa

1.1. Faja Costera

- 1.1.1. Terreno Tacagua
 - 1.1.2. Terreno Carayaca
 - 1.2. Faja Ávila
 - 1.2.1. Terreno Ávila
 - 1.2.2. Terreno Nirgua
 - 1.3. Faja Caracas
 - 1.3.1. Terreno Los Cristales
 - 1.3.2. Terreno Las Mercedes
 - 1.3.3. Terreno Las Brisas
- 2. Faja Caucagua - El Tinaco
 - 2.1. Terreno Tinaco
 - 2.2. Terreno Cachinche
 - 2.3. Terreno Tucutunemo
 - 2.4. Terreno Tácata
 - 2.5. Tacagua
- 3. Faja Loma de Hierro (incluye a Paracotos)
 - 3.1. Terreno Paracotos
 - 3.2. Terreno Loma de Hierro
- 4. Faja Villa de Cura
 - 4.1. Terreno Villa de Cura
 - 4.2. Terreno San Sebastián

2.3.2 Unidades geológicas

La mayor parte de la región de estudio se ubica en los terrenos Las Mercedes y Tacatá donde se encuentran aflorantes el Esquisto de Chuspita, el Esquisto Las Mercedes, Filita de Tucutunemo, Complejo de Conoropa, Esquisto de Tinapú, Metaconglomerado de Charallave y Gneis de La Aguadita. Por otra parte, también se encuentra una unidad sedimentaria, identificada como la Formación Tuy (ver Figura 2.12).

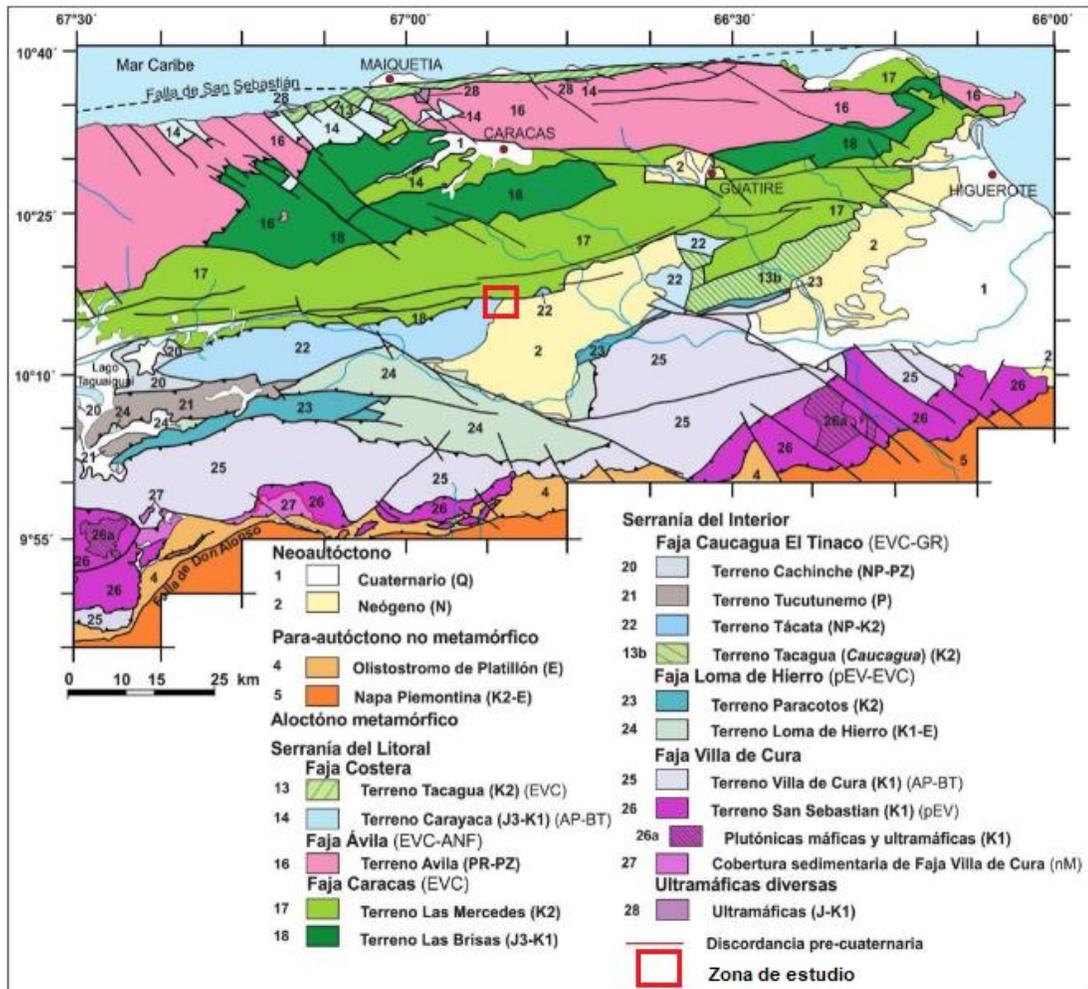


Figura 2.12 Mapa geológico de la Cordillera de la costa (Tomado y modificado de Urbani, 2018).

2.3.2.1 Faja Caracas

Orta (2003) aclara que esta Asociación está constituida por un conjunto de rocas metasedimentarias y consisten de esquistos (o filitas) cuarzo – moscovítico - feldespático ± clorítico, así como metarenisca, metaconglomerado, esquistos cuarzo - carbonático - muscovítico - grafitoso y mármol; bien expuesta en la ciudad de Caracas y sus alrededores.

2.3.2.1.a Esquisto de Chuspita

Orta (2003) resume la descripción de esta unidad geológica de manera clara según varios autores que trabajaron sobre la misma, esclareciendo que estas rocas metasedimentarias fueron definidas y cartografiadas por Seiders (1965). Beck (1985) posteriormente cartografía su “unidad Albiense” que corresponde a Chuspita en una franja continua desde el oeste de Soapire, pasando por Paracotos y hasta La Victoria, incluyendo a la unidad cartografiada por Smith (1952), como Formación Paracotos. Seiders (1965) reconoce la unidad en la región de Caucagua (Miranda Central) y define a la metarenisca como el tipo litológico predominante, además registra filita y mármol.

A continuación, se resumen las descripciones de Seiders (1965):

- Metarenisca: son de color gris claro a oscuro. El color oscuro está relacionado probablemente con el contenido de grafito
- Micas: generalmente presente como muscovita, color amarillo-verde levemente pleocroica, con aspecto hojoso grueso, intercalada con clorita.
- Grafito: presente en forma de películas delgadas en los bordes de los granos y como partículas pequeñas en la matriz, a veces intercaladas con sericita. Por otra parte, entre los minerales accesorios se destacan la pirita, la turmalina y el circón.

- Mármol: hay dos tipos de mármol, uno negro a gris oscuro, pero poco abundantes. El segundo tipo es argiláceo y deleznable. En ambos son frecuentes las vetas delgadas regulares y contorsionadas de calcita.
- Metaconglomerado: constituido por fragmentos líticos, angulares a redondeados, además de guijarros y peñas de hasta 25 cm de diámetro de filita, mármol y metarenisca pura calcárea de cuarzo. Todos estos fragmentos caracterizados por un color gris oscuro y abundante pirita.

Beck (1985) describe a la unidad compuesta de esquisto, filita, cuarcita y conglomerado cuarzoso. Resume una litología indicando colores generalmente rojizos gris-malva, con diferentes niveles grafitosos y piríticos. El esquisto pasa localmente a filita que constituye la roca dominante. Los niveles resultan de protolito variable: limolita cuarcífera, grauvaca, cuarcita y grauvaca de grano fino bien escogido y arenisca conglomerática grosera y conglomerado.

Por otra parte, Beck (1985) le da una edad Albiense (Cretácico Temprano) a esta unidad geológica.

2.3.2.1.b Esquisto Las Mercedes

Se constituye litológicamente por una parte superior de esquistos calcáreos con zonas arenosas y grafitosas, micáceos con vetas de calcita e inferior de calizas oscuras en capas delgadas intensamente plegadas Aguerrevere & Zuloaga (1937).

El contacto entre el Esquisto Las Mercedes y Esquisto de Chuspita es una falla y no se puede demostrar directamente una secuencia concordante.

Dengo (1952) define la litología como esquistos calcáreos – cuarzo – muscovítico – clorítico y grafito. Mientras que Seiders (1965) como metaconglomerado, metarenisca pura, grauvas y filitas negras calcáreas.

La edad que le asigna es Mesozoico, específicamente, Jurásico – Cretácico por Urbani *et al.* (2000)

2.3.2.2 Faja Caucagua – El Tinaco

Orta (2003) lo resume como un conjunto de unidades conformada por 7 unidades. Se dispone casi en sentido NE – SO y se encuentra en contacto discordante por debajo de las sedimentarias de la Cuenca del Tuy y en contacto tectónico al sur con rocas de la Asociación Metavolcanosedimentaria de Villa de Cura, Filita de Paracotos y al norte con el Esquisto de Chuspita.

2.3.2.2.a Filita de Tucutunemo

Según Grande (1995), consiste en filitas y filitas esquistosas con mineralogía variada, con un predominio de las filitas grises a gris oscuro, cuarzo-sericíticas; también se caracteriza por tener metaconglomerados polimícticos con cantos volcánicos y de cuarzo, lentes de caliza recristalizada de grano fino, grises a negruzcas y metagrawacas. Se encuentran zonas prominentes pero discontinuas de mármoles gris oscuros a negros, asociados a un metaconglomerado carbonático.

Según González de Juana *et al.* (1980), los mármoles presentes van de color gris oscuro a negro, microcristalinos, con impurezas, con cristales de cuarzo y albita que conforman casi el 30% de la roca, además, los fragmentos de fósiles son escasos y estos presentan una fuerte foliación. Los metaconglomerados varían de gris oscuro a blanco, presentan un mal escogimiento, con guijarros de cuarzo de veta, ftanita y plagioclasas. Por otra parte, los elementos volcánicos aumentan hacia la base de la unidad, sobre todo hacia el oeste de la localidad tipo, en el cual se definió como Miembro Los Naranjos.

La formación también presenta filitas carbonáceas arenosas que varían a meta areniscas y limolitas cuarzo feldespáticas con cantidades menores de

arenisca de grano grueso y conglomerado cuarzo-calcáreos. También, se identificó caliza cristalina negra, de grano fino, asociada a un conglomerado calcáreo (Shagam, 1960)

Según Grande (1995), la edad más aceptada de la formación es la obtenida por radiometría K/Ar en total de las metalavas del Miembro Los Naranjos determinada por Beck (1986) en 73.5 +/- 1.9 Ma. Aunque también, Benjamini *et al.* (1986) y Grande (1995) estipulan que la mencionada edad corresponde al último evento termal que afectó a estas rocas y que la Formación Tucutunemo, con su Miembro Los Naranjos, puede que sean de edad Paleozoico tardío (Pérmico).

2.3.2.2.b Complejo Conoropa

Seiders (1965) señala la presencia de rocas metamórficas de bajo grado que se asocian a metavolcánicas como metalavas macizas y almohadilladas, brechas de flujo y metatobas afaníticas color verde grisáceo con intercalaciones de ftanita. También, rocas metasedimentarias asociadas a filitas y mármoles grafitosos de color gris oscuro a negro. Asimismo, se presentan metaconglomerados de manera local.

De la misma manera, Seiders (1965) describe los contactos como discordantes en la parte inferior con los Gneises de La Aguadita; y la edad, la interpreta como Cretácico Temprano. Sin embargo, Beck (1985) la define como Triásico – Jurásico, o incluso pre-Mesozoico.

2.3.2.2.c Esquisto de Tinapú

Menéndez (1965) describe que la litología predominante es el esquisto cuarzo-albitico-muscovíticos que se intercala con esquistos albitico-cuarzo-cloríticos que son color verde oscuro y poseen espesores de 10 a 50 cm. Así pues, el esquisto moscovítico es de color gris verdoso y forman capas de hasta 4 m de espesor. Comúnmente este esquisto muscovítico pasa gradualmente

a metaconglomerado esquistoso, el cual contienen guijarros cuneiformes, granito y cuarzo.

Se le asigna una edad incierta de Pre-Mesozoico (Menéndez, 1965).

2.3.2.2.d Metaconglomerado de Charallave

Beck (1985) describe la litología como una serie de esquistos muy alterados, intercalados con niveles delgados de filita cuarcífera con micas blancas, niveles de cuarcita y capas o lentes de metaconglomerado. Mientras que Aguerrevere y Zuloaga (1937) como metaconglomerado de guijarros de cuarzo ahumado.

La unidad se encuentra de manera discordante por debajo de Filita Tucutunemo (Beck, 1985).

La edad ha sido establecida como Triásico – Jurásico o pre-Mesozoico por Beck (1985).

2.3.2.2.e Gneis de La Aguadita

Esta unidad según Seiders (1962) se compone de gneis hornblendítico, anfibolitas y mármol. Así pues, el gneis está conformado por una alternancia de capas máficas y félsicas que varían desde pocos centímetros hasta 1 m. El color es de verde claro a ligeramente oscuro y la distribución de rocas de grano grueso a grano fino es irregular. Por otra parte, las rocas hornblendicas resaltan por su color verde pálido, aunque se han descrito como verde-azul intenso en la localidad tipo; estas rocas contienen inclusiones de cuarzo, epidoto o esfena.

Menéndez (1965) describe los contactos como concordante y transicional en su tope con el Esquisto de Tinapú. Localmente infrayace las rocas asociadas al Complejo de Conoropa.

2.3.2.3 Unidades sedimentarias

Se ubican al este de la cantera Mume y al sur de la Cantera El Melero.

2.3.2.3.a Formación Tuy

Picard & Pimentel (1968) describen la litología como intercalaciones constante y monótona de capas gruesas, de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados, intercaladas con arcillas, lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. Por otra parte, Orta (2003) la describe en dos grupos, el primer grupo asociado a grava, conglomerado y arenisca que se presentan en estratos mal consolidados, además, con una matriz limo-arcillosa y a veces con cemento; y el otro grupo asociado a arcilla, marga y caliza que se disponen en capas gruesas, y de la misma manera que las gravas, son de colores crema a rosado y a veces con tonos verdosos, rojo-violeta y abigarrada.

Esta unidad se encuentra en contacto discordante, en forma angular y paralela sobre las rocas metamórficas de la región y por encima de la Formación Siquire (Picard & Pimentel, 1968).

Audemard (1984) sugiere una edad aproximada Pleistoceno para esta formación, mientras que Beck (1985) Plioceno – Pleistoceno y Picard & Pimentel (1968) Mioceno tardío – Plioceno.

2.3.3 Geología Estructural

Según Barreto (2010) la Cordillera de la Costa se conforma por fajas tectónicas que limitan una de la otra a través de fallas de orientación pseudoparalela E-W, un ejemplo es la falla de La Victoria. Asimismo, el contexto geológico estructural en la región es complicado, logrando cartografiarse una cantidad significativa de fallas como se observa en la Figura

2.15.

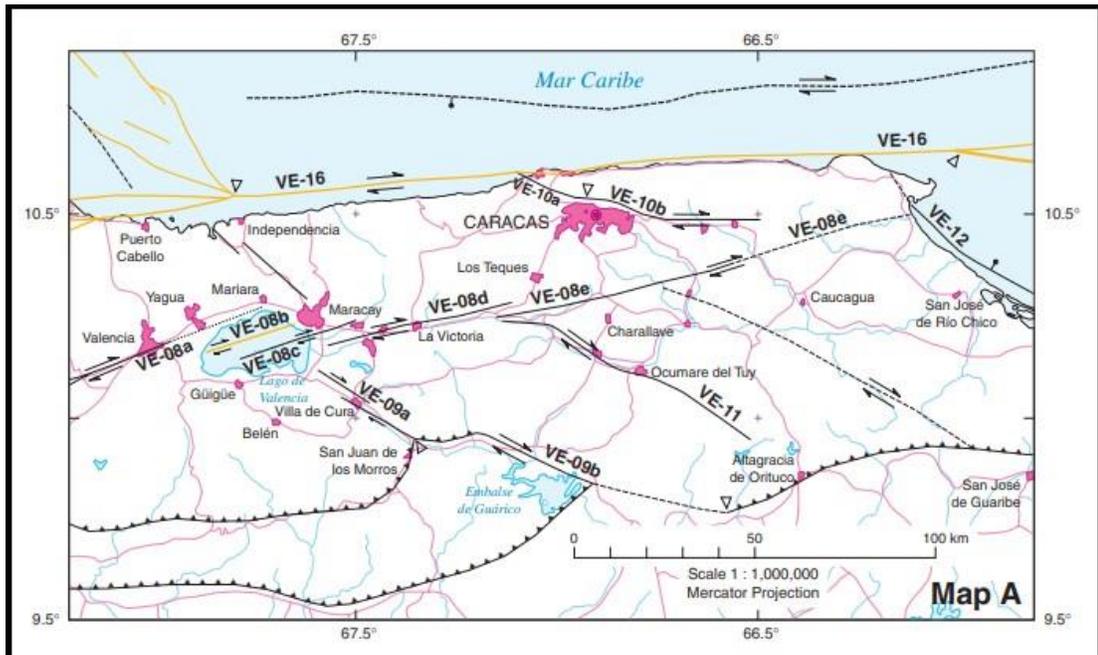


Figura 2.13 Sistema de fallas activas en la región norcentral de Venezuela, donde se muestran las fallas de El Pichao “VE-08e” y de Táchata “VE-11 que limitan el área de estudio (Tomado y modificado de Audemard *et al.* 2000)

La mayor parte de la zona de estudio se encuentra en la cuenca del Tuy. Según Picard y Pimentel (1968) es un graben que se ubica en la faja tectónica de Caucaagua – El Tinaco, limitada al norte por la falla de La Victoria, que la pone en contacto con la Faja de la Cordillera de la Costa; al sur por las fallas de Agua Fría y Santa Rosa que la ponen en contacto con las Fajas de Villa de Cura y de Paracotos. Por otra parte, el límite occidental está marcado por la Falla de Charallave, y el límite oriental por un sistema desordenado de fallas transversales.

2.3.3.1 Falla de La Victoria

Según Audemard *et al.* (1995), se define como un sistema de fallas que logra alcanzar una extensión de 350 km aproximadamente, desde Tinaquillo (estado Cojedes) hasta Cabo Codera (estado Miranda) donde converge con la

falla de San Sebastián. El mismo sigue un rumbo NE - SO con un movimiento de carácter dextral y una velocidad que logra alcanzar los 1,1 mm/a en el Lago de Valencia y va disminuyendo hacia los extremos con velocidades de hasta 0,4 mm/a. Por otra parte, este sistema de fallas se caracteriza por cinco fallas principales que se disponen “en échelon” y el desarrollo de cuencas tectónicas (cuencas de tracción, en otras palabras, cuencas *pull-apart*). Estas fallas son la Falla de Guacamaya, La Cabrera, El Horno, La Victoria y Pichao, siendo esta última la que se encuentra en el área de estudio.

De la misma manera Audemard *et al.* (1995) describe la Falla de Pichao como una falla de desplazamiento lateral dextral que posee una velocidad alrededor de los 0,4 mm/a. Por añadir, la cuenca del Tuy Medio se formó por la divergencia generada entre las fallas de Tacata y La Victoria (Pichao).

2.3.3.2 Falla Tácata – Charallave

Esta falla pertenece al sistema de fallas de La Victoria y de la misma manera, pertenece a la familia de fallas con dirección preferencial NO - SE que se encuentran a lo largo de la región de la Cordillera de la Costa. Tiene una extensión de 90 km desde la región de corrimiento piemontino al sur de la faja de Villa de Cura, hasta su intersección con la falla La Victoria. Su expresión topográfica es evidenciable debido a las facetas triangulares bien desarrolladas, ensilladuras de falla apreciables, alineación de relieve y drenajes desplazados (Barreto, 2010).

Según López y Reyes (2010) la falla Tácata presenta un movimiento dextral y una velocidad de 0,4mm/a.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología implementada para el cumplimiento de los objetivos estuvo dividida en seis fases, constituidas por la recopilación de la información geológica, cartográfica e imágenes satelitales; preparación e implementación de las herramientas para el procesamiento de las mismas, integración e interpretación de los datos, verificación de los datos con una salida a campo y presentación de los resultados. Asimismo, en el siguiente flujograma de trabajo (ver Figura 3.1) se muestra de forma esquemática cada una de las fases.

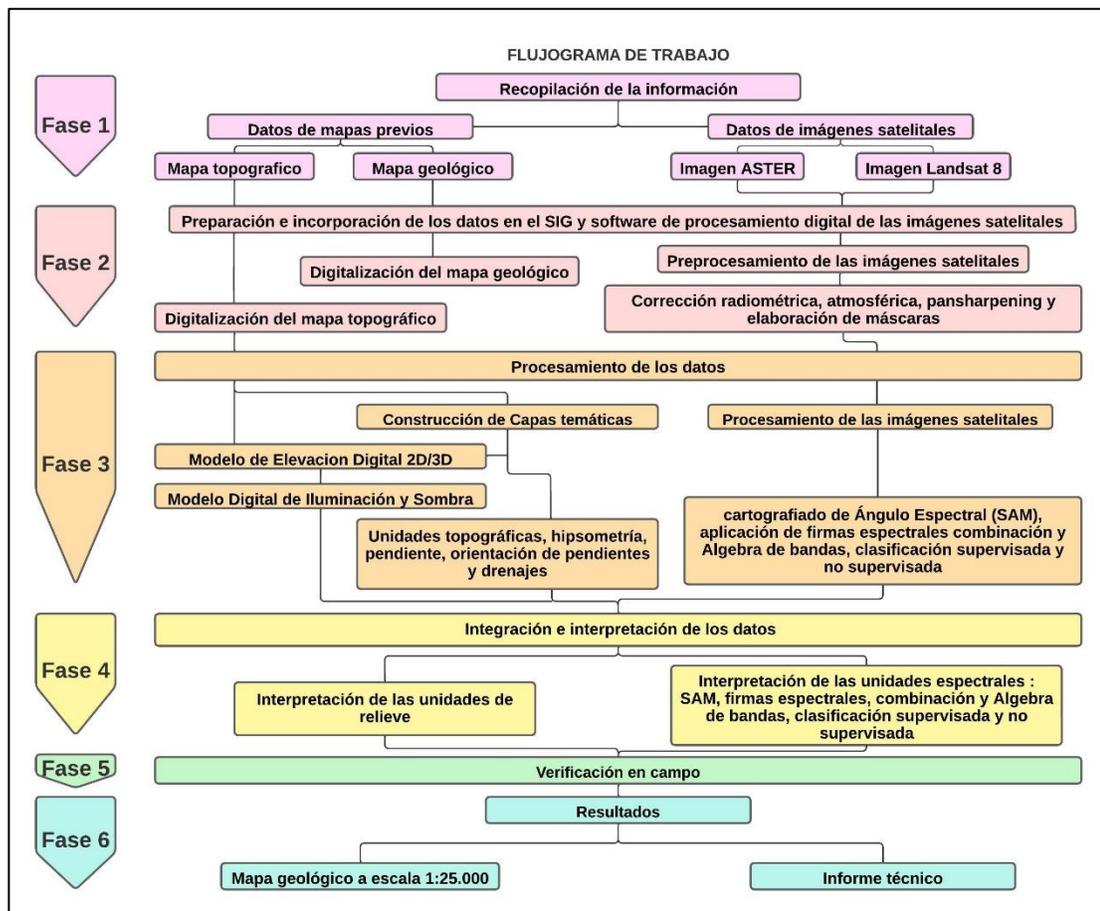


Figura 3.1 Metodología de la investigación.

3.1 Etapa 1: Recopilación de la información cartográfica y geológica

Esta etapa consistió en la revisión y recopilación bibliográfica de tesis, artículos, boletines científicos y cualquier otra información pertinente obtenida de fuentes electrónicas, sin olvidar la cartografía topográfica, geológica e imágenes satelitales multiespectrales que involucraran la región de estudio. Asimismo, la etapa de recopilación se subdivide a su vez en:

3.1.1 Recopilación bibliográfica

La recopilación bibliográfica de tesis, boletines, artículos y cualquier otra información relacionada al tema de estudio, se obtuvo de bibliotecas, institutos, revistas y artículos online tanto de Venezuela como de otros países. Entre ellos está: Biblioteca Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica (ubicada en la Universidad Central de Venezuela), Ministerio del Poder Popular de Desarrollo Minero Ecológico, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Instituto Geográfico Portugués, Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, Unidad Sensores Remotos Y SIG del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Revista de la sociedad India de Sensores Remotos, Revista Internacional de Investigación y desarrollo de Geoinformática, la Revista Avances en la Investigación Espacial y la Librería Digital SPIE.

3.1.2 Recopilación de mapas geológicos y topográficos

La recopilación de mapas geológicos-topográficos, se adquirió mediante el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), Ministerio del Poder Popular de Desarrollo Minero Ecológico, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Así pues, los mapas utilizados para la investigación fueron los siguientes:

- Mapas topográficos del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar a escala 1:25.000. Estos mapas fueron los que se muestran a continuación:
 - Hoja 6846 IV NE: Alvarenga (1979)
 - Hoja 6846 IV SO: Quebrada de Cúa (1979)
 - Hoja 6846 IV NO: Paracotos (1979)
 - Hoja 6846 IV SE: Charallave Sur (1975-1976)

- Mapas geológicos de FUNVISIS y la Escuela de Geología Minas y Geofísica de la UCV a escala 1:25:000 de año 2003 – 2004, pertenecientes al “Atlas geológico de la Cordillera de la Costa” coordinado por Franco Urbani y José Antonio Rodríguez. Estos mapas fueron:
 - Hoja 6846 IV NE: Mapa geológico de la región de Caiza
 - Hoja 6846 IV SO: Mapa geológico de la región de Quebrada de Cúa
 - Hoja 6846 IV NO: Mapa Geológico de la región de Paracotos
 - Hoja 6846 IV SE: Mapa Geológico de la región Charallave

3.1.3 Recopilación de las imágenes satelitales y Modelo de Elevación Digital

Las imágenes recopiladas correspondientes Landsat 8 y ASTER del satélite TERRA se seleccionaron del servidor de datos Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), siendo las siguientes:

- **Imagen Landsat 8:**

LC08_L1TP_004053_20200411_20200822_02_T1, fecha de toma 20/04/2020, elevación del sol 64.44°, azimut del sol 91.17°, datum WGS84, nubosidad terrestre 8.22%.

- **Imágenes ASTER:**

AST_L1T_00303202003150434_20150429180448_5932, fecha de toma 20/03/2003, ángulo de elevación del sol 65.07°, azimut del sol 113.51°, datum WGS84, nubosidad: 0.5%.

3.2 Etapa 2: Preparación e incorporación de los datos en el SIG y software de procesamiento digital de imágenes satelitales

Esta etapa se subdividió en dos, la primera relacionada con digitalizar el mapa geológico y topográfico a través del proceso de vectorización utilizando el *software* ArcGIS 10.5 y la segunda, abarcó el preprocesamiento de las imágenes satelitales mediante el *software* ENVI 5.3.

3.2.1 Digitalización del mapa topográfico

Primeramente, se georreferenció los mapas topográficos para luego vectorizar todas las curvas de nivel (líneas), así como también elementos importantes como nombres de poblados (puntos), altos topográficos (puntos) y vialidades (líneas) que se encontraron dentro del área de estudio. Estos estuvieron guardados en formato *Feature Class*, que a su vez se encontraron contenidos en un *Feature Dataset*.

3.2.2 Digitalización del mapa geológico

Para esta subetapa se procedió de la misma manera que la del mapa topográfico, es decir, se georreferenció las hojas geológicas, se delimitó el área de estudio y se vectorizó todos los elementos geológicos. Asimismo, el tipo de *Feature Class* fueron polígonos para unidades geológicas, líneas para

fallas y pliegues, y puntos para capas (foliación o estratificación) con rumbo y buzamiento.

3.2.3 Preprocesamiento de las imágenes satelitales

Antes de haber hecho uso de las imágenes multiespectrales, primero fue necesario aplicarle distintas correcciones con el fin de eliminar o minimizar las distorsiones o degradaciones ocasionadas durante el proceso de adquisición de dichas imágenes. También, la implementación de máscaras fue esencial para discriminar áreas de poco interés para el procesamiento.

3.2.3.1 Corrección radiométrica

Según Chuvieco (2006), la corrección radiométrica es un método que modifica los niveles digitales originales, con el fin de acercarlos a los que estarían presentes en la imagen en el caso de una recepción ideal. Estas correcciones están asociadas a la remoción o disminución de las distorsiones en el grado de energía electromagnética detectado por el sensor.

Para la aplicación de esta técnica en la imagen multiespectral Landsat se procedió a usar el algoritmo *Radiometric Calibration*, luego se le aplicó las configuraciones FLAASH (cambiando el formato BSQ a formato BIL (bandas intercaladas por líneas)) y finalmente se ejecutó como se observa en la Figura 3.2. Sin embargo, para la imagen ASTER se dejó por defecto el formato BSQ y el factor de escala en 1. Al final, se obtuvo una imagen con el cambio de valores de Números Digitales a valores de radiancia.

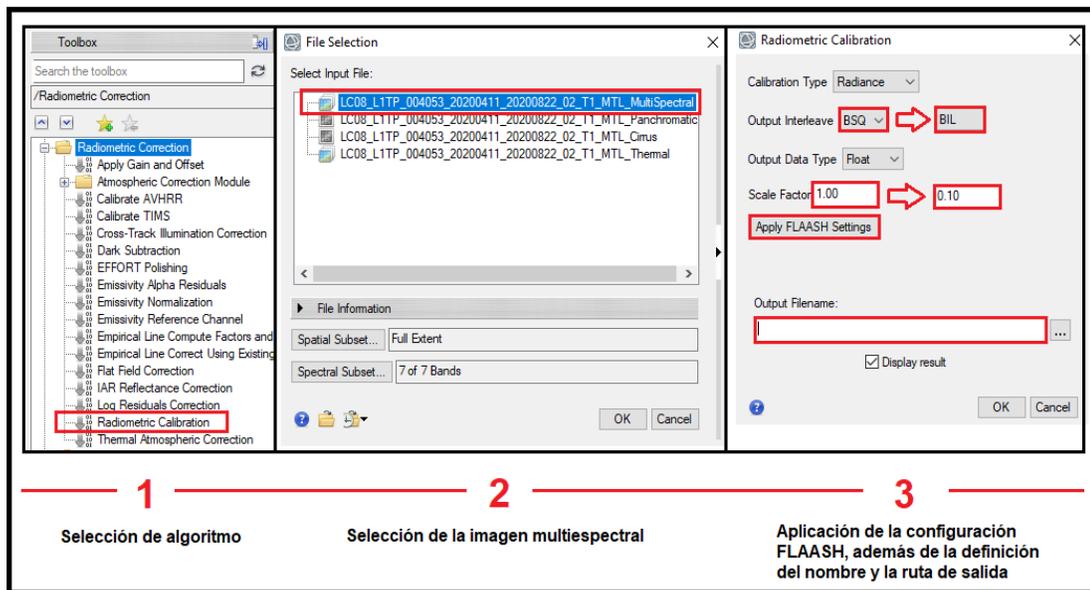


Figura 3.2 Procedimiento de la corrección radiométrica a través del *software* ENVI.

3.2.3.2 Corrección atmosférica

La segunda corrección se basó en corregir los defectos atmosféricos que son ocasionados por la presencia de aerosoles y vapor de agua que crean una dispersión de manera local y selectiva de la radiación transmitida entre la superficie y el sensor. Hay que destacar que la radiancia que logra llegar al sensor no corresponde a la emitida por los elementos de la superficie de la Tierra, debido a que posee un valor añadido producto del efecto dispersor de la atmosfera (Chuvienco, 2006). Un ejemplo claro está representado en la Figura 3.3.

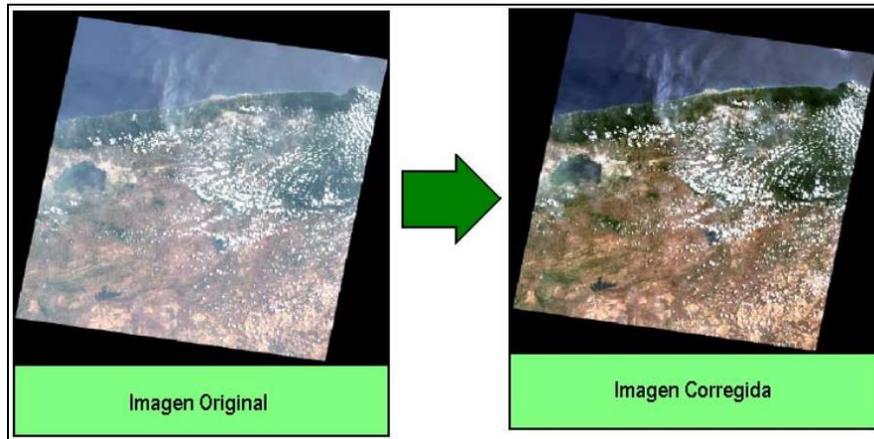


Figura 3.3 Resultado de la corrección atmosférica (Tomado de Martínez & Belisario, 2009).

La corrección atmosférica se realiza en tres casos diferentes: (a) cuando se pretenda realizar combinaciones entre bandas, ya que el efecto de dispersión no depende de la longitud de onda; (b) cuando se intente establecer modelos que pongan en relación los niveles digitales con determinados parámetros físicos: temperatura, clorofila, humedad del suelo, etc, y (c) cuando se realicen estudios multitemporales, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no se compara con otra de fecha diferente (Chuvieco, 2006).

Para la aplicación de la corrección atmosférica en la imagen Landsat, se aplicó el algoritmo denominado *FLAASH Atmospheric Correction* del software ENVI, usando la imagen que viene del metadato en formato BIL, es decir, a la que se le aplicó la corrección radiométrica. Además, se añadió datos 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 como se muestra en la Figura 3.4.

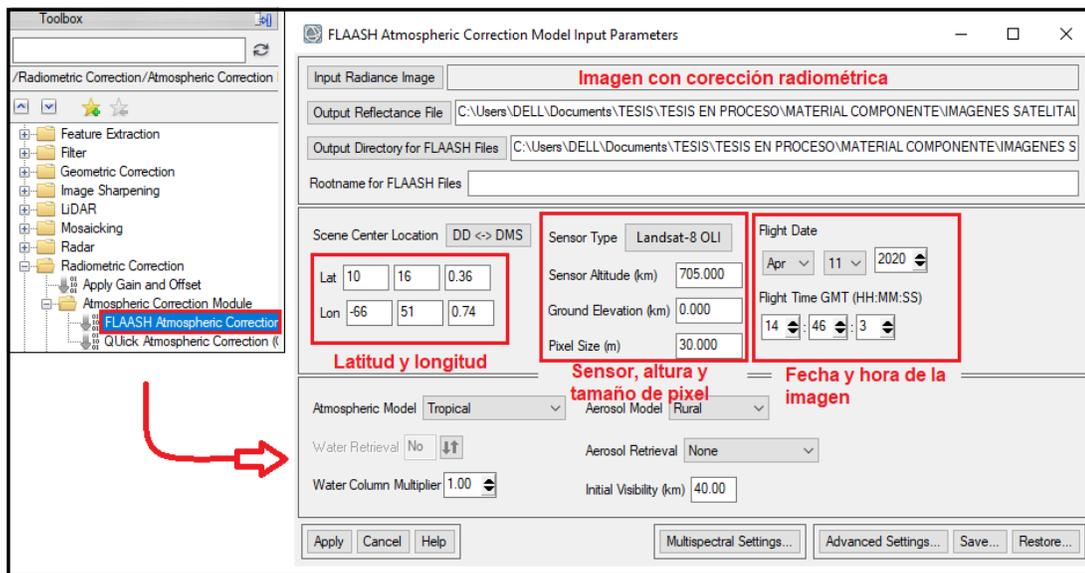


Figura 3.4 Procedimiento de la corrección atmosférica a la imagen Landsat a través del *software* ENVI 5.3.

En cuanto a la imagen ASTER, se usó el algoritmo IAR *Reflectance Correction* sobre la imagen previamente corregida radiométricamente, transformando los valores de radiancia a reflectancia. En la Figura 3.5 se muestra este procedimiento. No obstante, este paso se aplicó para aquella que conforman las ondas del VNIR (Visible e Infrarrojo Cercano) y SWIR (Infrarrojo de Onda Corta), ya que para las del TIR (Infrarrojo Termal) se utilizó el *Thermal Atmospheric Correction* (ver Figura 3.6).

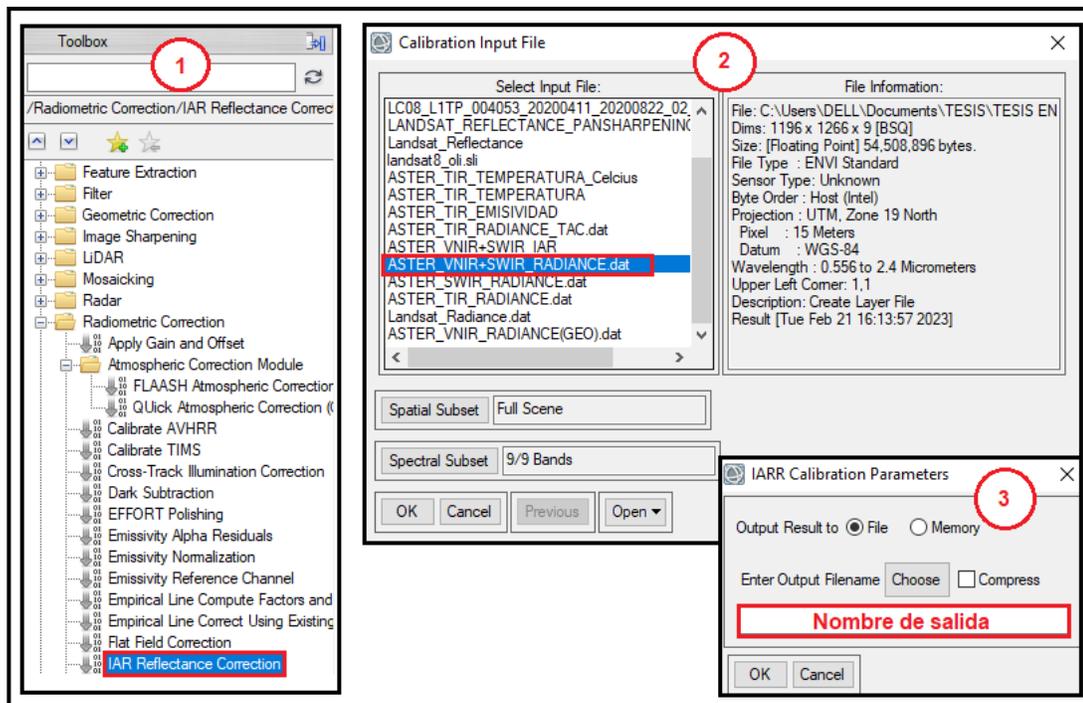


Figura 3.5 Procedimiento de la corrección atmosférica a la imagen ASTER (VNIR+SWIR) a través del software ENVI 5.3.

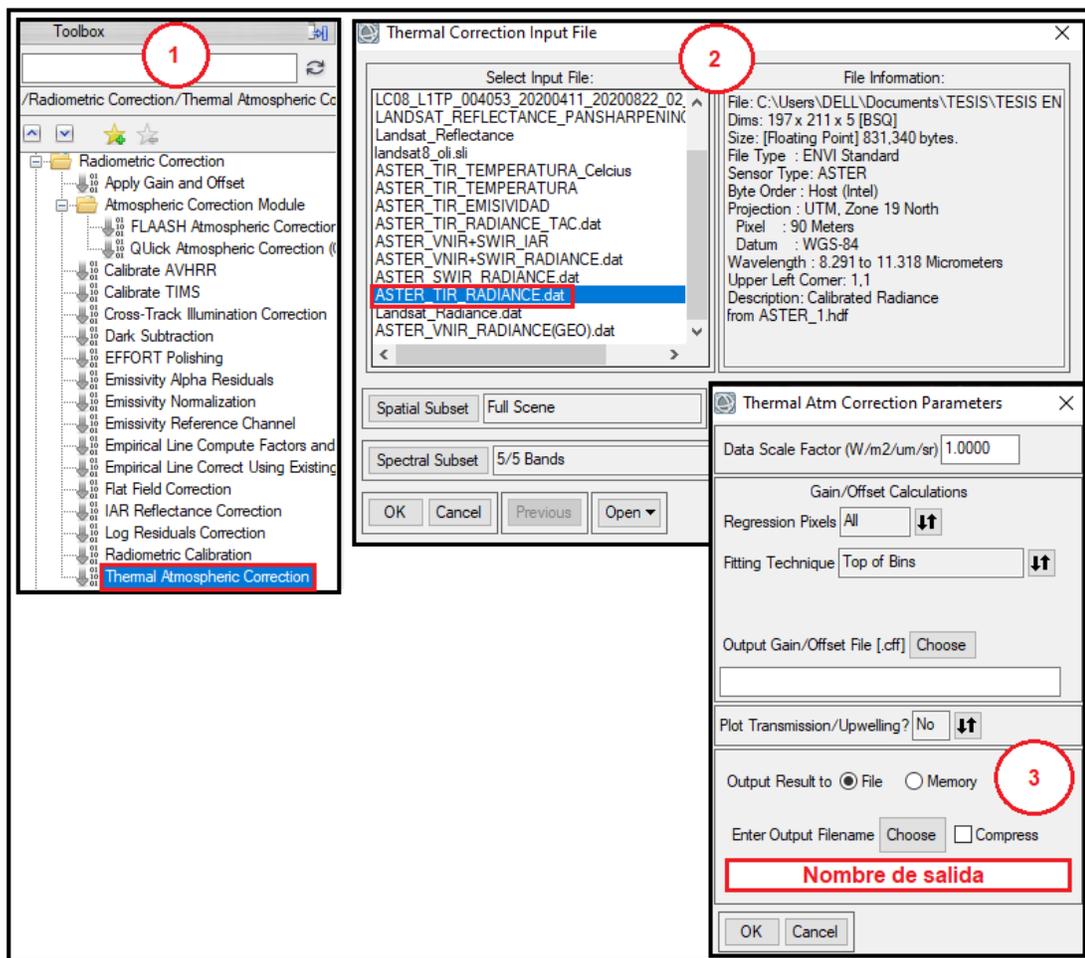


Figura 3.6 Procedimiento para la corrección atmosférica en la imagen ASTER (TIR) a través del *software* ENVI 5.3.

3.2.3.3 Elaboración de máscaras para vegetación, cuerpos de agua, sombras, nubes y ciudades

Algunas veces, en las imágenes multiespectrales se presentan cuerpos de agua, poblados, nubes, sombras y zonas con mucha vegetación que ocultan la información espectral de interés para el estudio. Es por esta razón, se eliminó estas regiones para algunos procesamientos geoestadísticos de las imágenes multiespectrales.

Para el proceso de eliminación de las zonas de poco interés, en primer lugar, se generó el Índice de Vegetación a través del algoritmo *NDVI*, tomando

como base la imagen al cual se le aplicó la corrección atmosférica, utilizando la banda 2 (Rojo) y 3 (Infrarrojo Cercano) en la imagen ASTER (ver Figura 3.7), mientras que para la Landsat 8 la banda 4 (Rojo) y 5 (Infrarrojo Cercano).

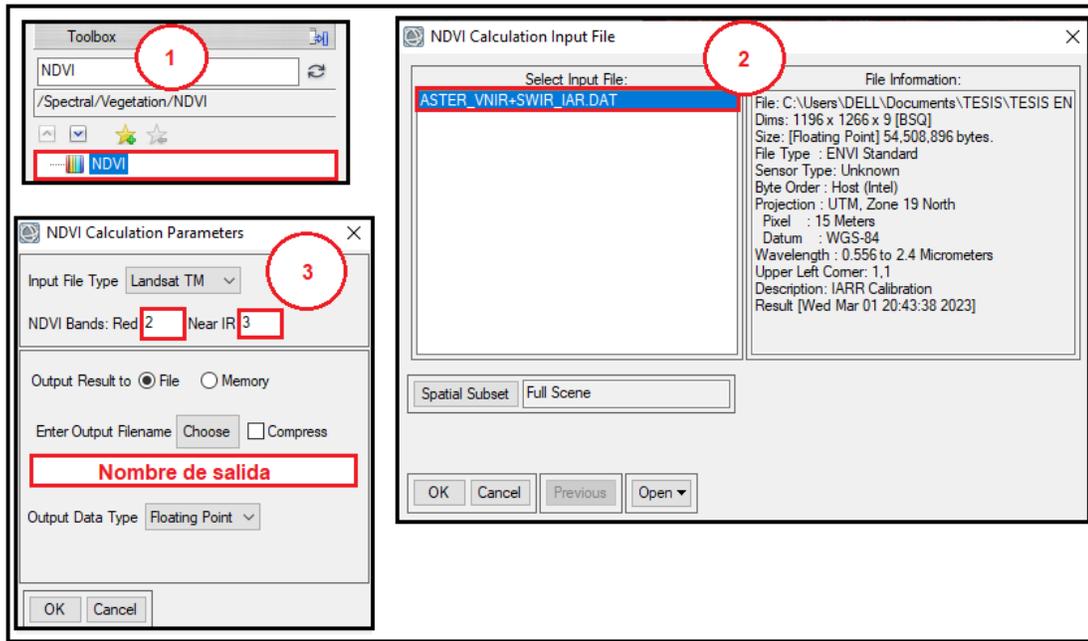


Figura 3.7 Generación del Índice de Vegetación (NDVI).

Seguidamente, se creó una región de interés (ROI) haciendo uso del *NDVI* y demarcando un rango de valores por encima de cero hasta el más alto como se muestra en la Figura 3.8.

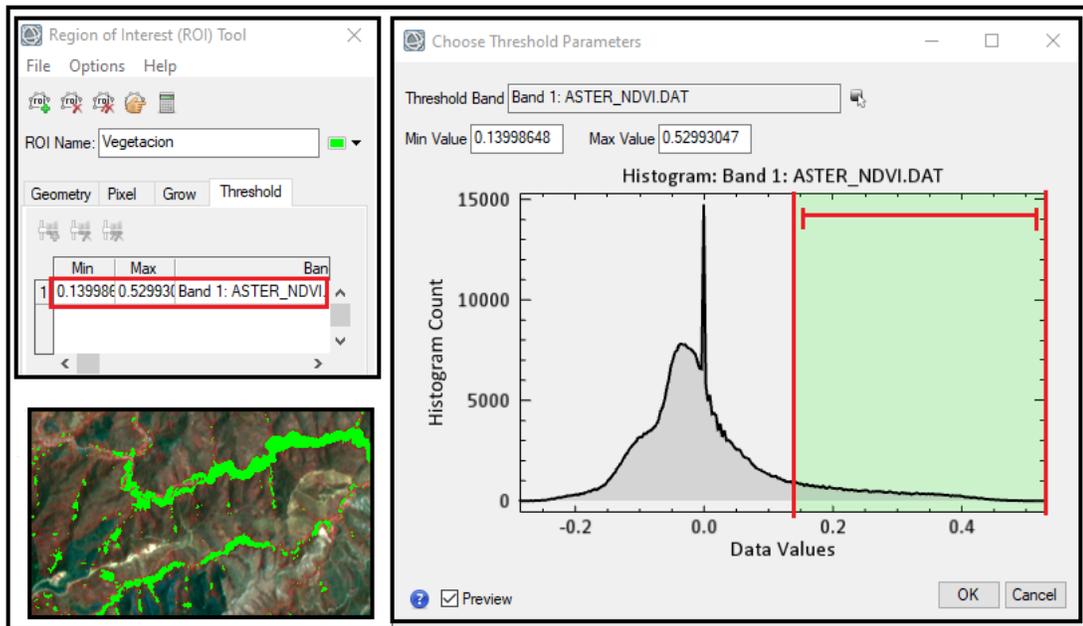


Figura 3.8 Demarcación de la región con alto porcentaje de vegetación.

En segundo lugar, se marcaron los cuerpos de agua y las sombras, tomando como apoyo la banda 3 de ASTER y la banda 5 de Landsat 8, debido a que estos presentan valores bajos de reflectancia en dichas bandas del Infrarrojo Cercano (ver Figura 3.9).

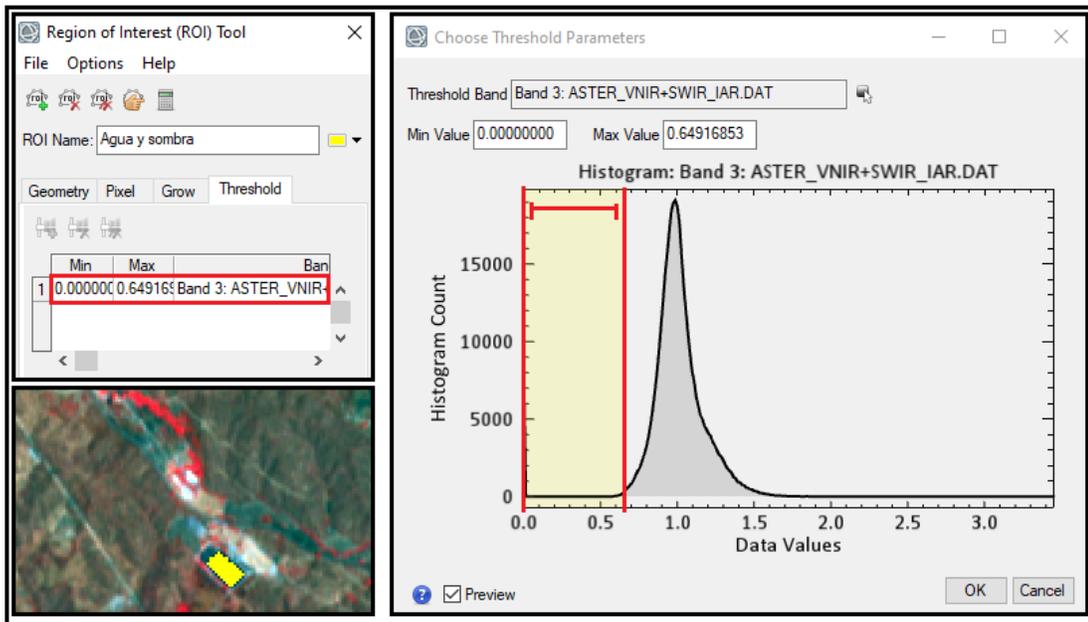


Figura 3.9 Demarcación de zonas que representan cuerpos de agua y sombras.

En tercer lugar, para caseríos o ciudades no se usó ninguna banda espectral, por lo que, para la creación del ROI (ver Figura 3.10) se delimitó de manera manual por medio de un polígono que cubrió las áreas que se consideraron densamente pobladas o se tenga la certeza de la presencia de una edificación. Asimismo, esta metodología se aplicó para nubes.

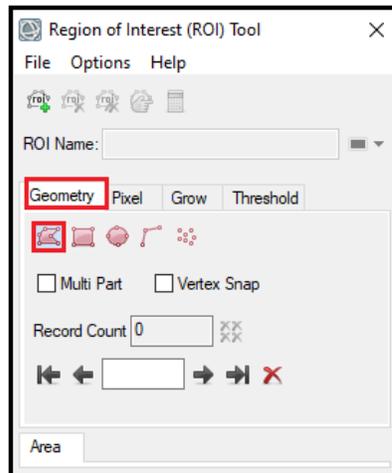


Figura 3.10 Apartado para la creación manual de un ROI mediante un polígono.

En cuarto lugar, para la creación de las “máscaras”, se empleó el algoritmo *Build Mask*, tomando una imagen que definió el tamaño de la máscara, para luego establecer los parámetros de las áreas de interés que conformaron la máscara, arrojando como resultado un archivo donde el negro son los terrenos que se quiere eliminar y el blanco lo que se queda para procesamiento (ver Figura 3.11).

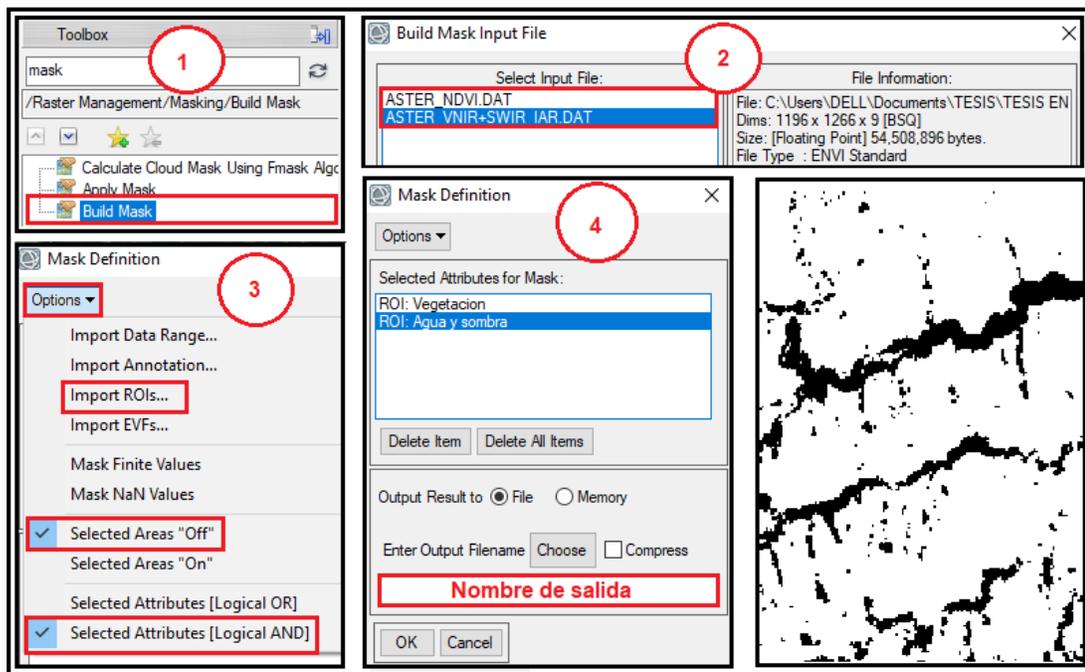


Figura 3.11 Proceso de creación de máscara.

En quinto lugar, para aplicar la máscara en las imágenes que se procesaron, se usó *Apply Mask*, obteniendo finalmente la imagen ASTER y Landsat 8 con las regiones de valor para el estudio.

3.2.3.4 Pan sharpening

El propósito de este método es obtener una imagen multiespectral de mayor resolución espacial, utilizando como base la banda pancromática del sensor remoto a utilizar.

Para efecto de este estudio, se aplicó únicamente a la imagen Landast 8, excluyendo las bandas de TIR. El algoritmo aplicado fue *Gram-Schmidt Pan Sharpenig*.

3.3 Etapa 3: Procesamiento de los datos

Para esta etapa se crearon los resultados para la interpretación, conformado por las capas temáticas y el procesamiento de las imágenes satelitales a través de diversas metodologías.

3.3.1 Construcción de un modelo de elevación digital (DEM) y capas temáticas

Se llevó a cabo en el *software* ArcGis 10.5, iniciando con la creación del DEM y las diversas capas temáticas en base al Modelo de Elevación Digital.

3.3.1.1 Modelo de elevación digital (DEM)

Para la elaboración de este producto, se tomó la capa de curvas de nivel del mapa topográfico digitalizado como dato de entrada para aplicarle el algoritmo *Spatial Analyst Tools – Interpolation – Topo to Raster* y un tamaño de pixel de 5 metros para finalmente obtener como resultado el DEM.

3.3.1.2 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS)

Con el DEM se generó un Modelo Digital de Iluminación y Sombras (MIDS) a través del algoritmo *Spatial Analyst Tools – Surface – Hillshade*. El MDIS se obtuvo tomando un azimut y un ángulo de elevación del sol determinado.

3.3.1.3 Mapas temáticos

Similar a la construcción del mapa topográfico se utilizó el DEM como base para la construcción de los 5 mapas temáticos que se describen a continuación:

3.3.1.3.a Mapa de unidades topográficas

En la creación de este mapa se tomó las curvas de nivel digitalizadas y, mediante parámetros morfológicos del relieve se realizó la división de unidades mayores.

3.3.1.3.b Mapa hipsométrico

La hipsometría es la representación de la altura mediante un tramado coloreado. La misma es de gran ayuda en la interpretación del relieve, ya que mediante degradación de colores permite detallar las variaciones del mismo y caracterizarlo de una manera más fácil (Gamboa, 1986).

Para la creación de este producto se reclasificó el DEM mediante el algoritmo *Properties... - Symbology - Classified - Classify... - Method: Manual - Classes: 7 - Break Values: 200 - 1258* (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Clasificación en intervalos hipsométricos.

Hipsometría		
Intervalo de altura (m)	Color	Valores R-G-B
100 - 200	Azul turquesa 	175 - 240 - 233
200 - 400	Verde oliva claro 	210 - 232 - 137
400 - 600	Verde oliva oscuro 	100 - 148 - 52
600 - 800	Marrón 	189 - 70 - 2
800 - 1000	Marrón oscuro 	110 - 37 - 9
1000 - 1200	Gris 	163 - 147 - 137
1200 - 1400	Blanco	255 - 252 - 255

3.3.2.3.c Mapa de pendientes

La pendiente es conocida como el ángulo de inclinación que tiene el terreno respecto a un plano horizontal y que puede estar expresado en porcentaje (%) o en grados (°). Varios autores (Gamboa, 1986 (citado por Servicio Geológico Colombiano SGC, 2012)) han generado varios sistemas de clasificación de pendientes. Sin embargo, para esta investigación se utilizó la clasificación de Gamboa (1986), en la que cada rango de pendiente viene representado según un color que posee su código RGB (ver Figura 3.13), asimismo, la unidad de pendiente estará expresada en grados.

El algoritmo que se aplicó se encuentra a continuación *Spatial Analyst Tools – Surface – Slope*, estableciendo 7 clases mediante los pasos *Properties... - Symbolology - Classified - Classify... - Method: Manual – Classes: 7 – Break Values: 0 – 67.7*; cada clase se definió según los rangos de valores (pendientes) establecidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación de pendiente según Gamboa (1986).

Pendiente			
Inclinación	Descripción	Color	Valores R-G-B
0° - 2°	Llano a muy suave	Verde oscuro 	56 - 168 - 0
2° - 5°	Suave	Verde intermedio 	111 - 196 - 0
5° - 10°	Moderado	Verde claro 	176 - 224 - 0
10° - 18°	Moderadamente abrupto	Amarillo 	255 - 255 - 0
18° - 30°	Abrupto	Naranja 	255 - 170 - 0
30° - 45°	Muy abrupto	Rojo naranja 	255 - 85 - 0
>45°	Escarpado	Rojo 	255 - 0 - 0

3.3.2.3.d Mapa de orientación de laderas

Para la orientación de la pendiente, se procedió según lo establecido por Romero (2019), en el cual cada celda del ráster de salida se definió por un

valor asociado al el sentido hacia donde descendía el terreno (medido en el sentido de las agujas del reloj, teniendo como norte el grado 0), así pues, estos valores estuvieron representados según un color como se logra apreciar en la Figura 3.12.

Los pasos que se llevaron a cabo para la generación de esta capa consistieron en el uso del siguiente algoritmo: *Spatial Analyst Tools – Surface – Aspect*

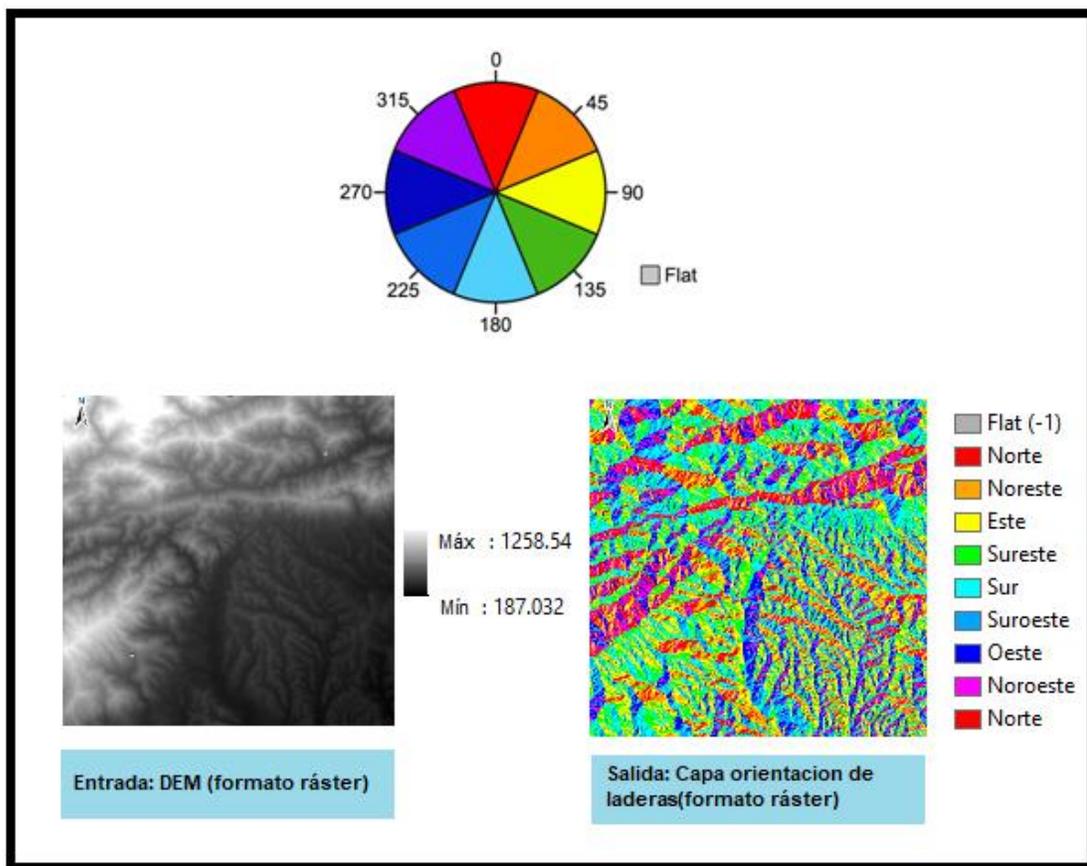


Figura 3.12 Ejemplo de la generación de una capa de orientación de pendiente a partir de un DEM.

3.3.2.3.e Mapa de drenajes

Para la generación de este mapa temático, no se usó de DEM, sino que se utilizó los drenajes previamente digitalizados del mapa topográfico, así como también los interpretados según las curvas de nivel.

3.3.2 Procesamiento de las imágenes satelitales

A partir de la imagen resultante tras el proceso de corrección, se procedió a realizarle las siguientes metodologías:

3.3.2.1 Combinación y Matemática de bandas

La combinación de bandas consistió en colocar en cada uno de los canales RGB determinadas bandas para generar una imagen a color, con el fin de poder interpretar las características geológicas del terreno, así como la vegetación. Posteriormente, a la imagen generada se le aplicó un realce mediante el algoritmo *Transform – Decorrelation Stretch* para delimitar con mayor certeza estas unidades litológicas.

Por otra parte, se procedió a aplicar operaciones matemáticas de suma, resta, multiplicación y división entre las bandas, a través del algoritmo *Band Algebra - Band Math*. Luego se definió un ROI, tomando como *threshold* el resultado obtenido para resaltar las áreas con un determinado mineral o roca que contenga carbonatos. Asimismo, el procedimiento llevado a cabo se muestra en la Figura 3.13.

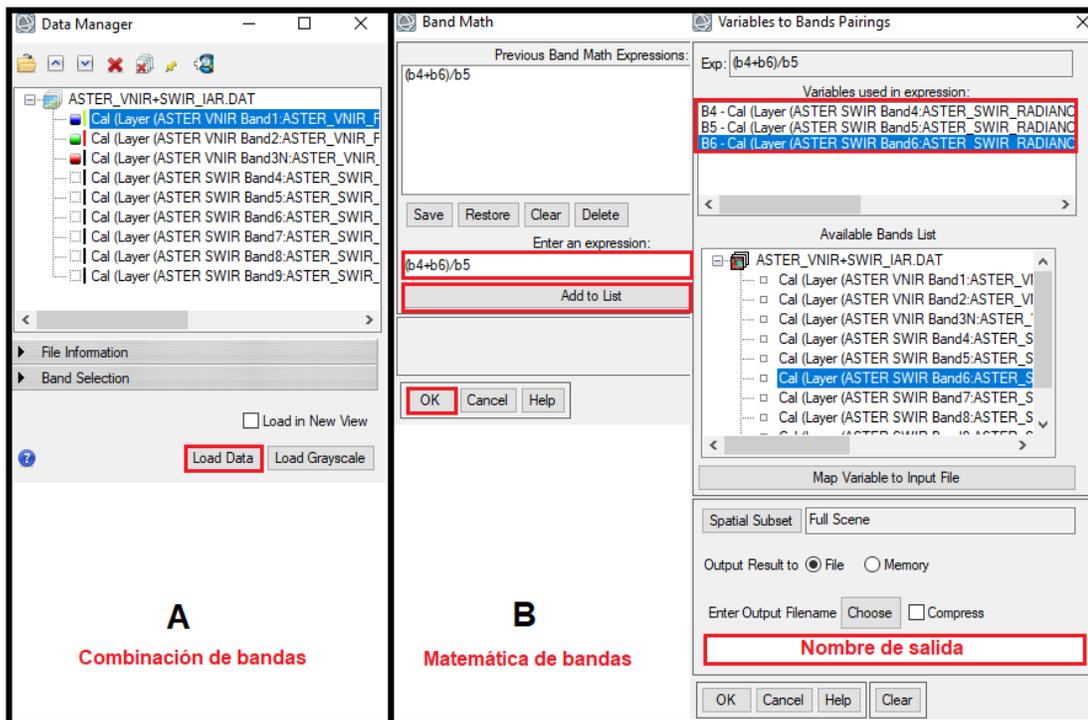


Figura 3.13 Procedimiento para aplicación de la combinación y matemática de bandas.

En la Figura 3.14 se muestra como ejemplo el álgebra y la combinación de bandas R: 5/7, G:3/1, B: $(3+4) / (3-4)$, en el cual, el cociente 5/7 permite resaltar carbonatos, arcillas y vegetación, mientras que el 3/1 óxidos de hierro y $(3+4)/(3-4)$ los diferentes tipos de vegetación.

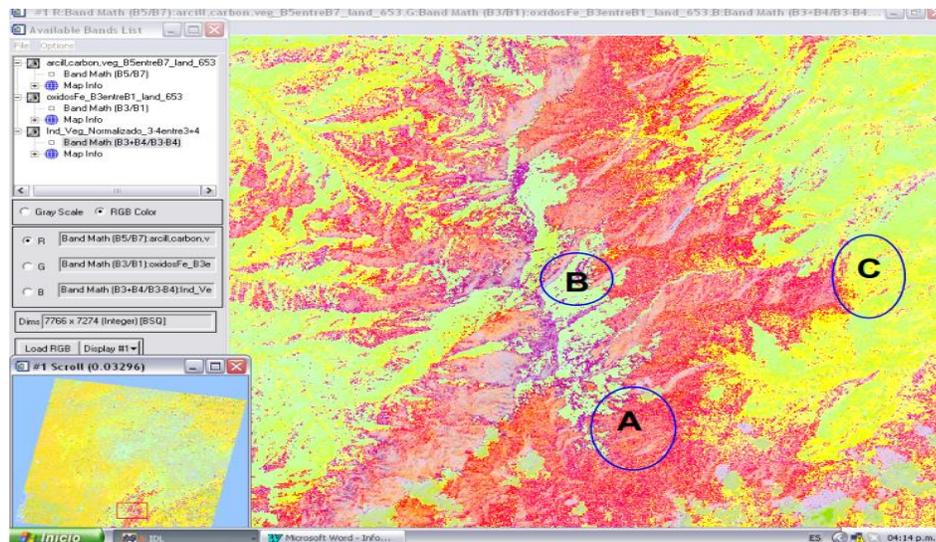


Figura 3.14 Ejemplo de la combinación y algebra de bandas (Tomado de Hernández, 2011).

3.3.2.2 Clasificación no supervisada

Para esta metodología se aplicó el algoritmo *Classification – Unsupervised Classification – K Means Classification* (ver Figura 3.15), con el fin de agrupar valores homogéneos en un número determinado de clases espectrales de manera automática. Para esto, el programa ejecutó métodos estadísticos y geométricos para discriminar espectralmente y visualmente la imagen según el número de clases e iteraciones previamente establecidas, de tal manera que se lograra una clasificación lo más certera posible.

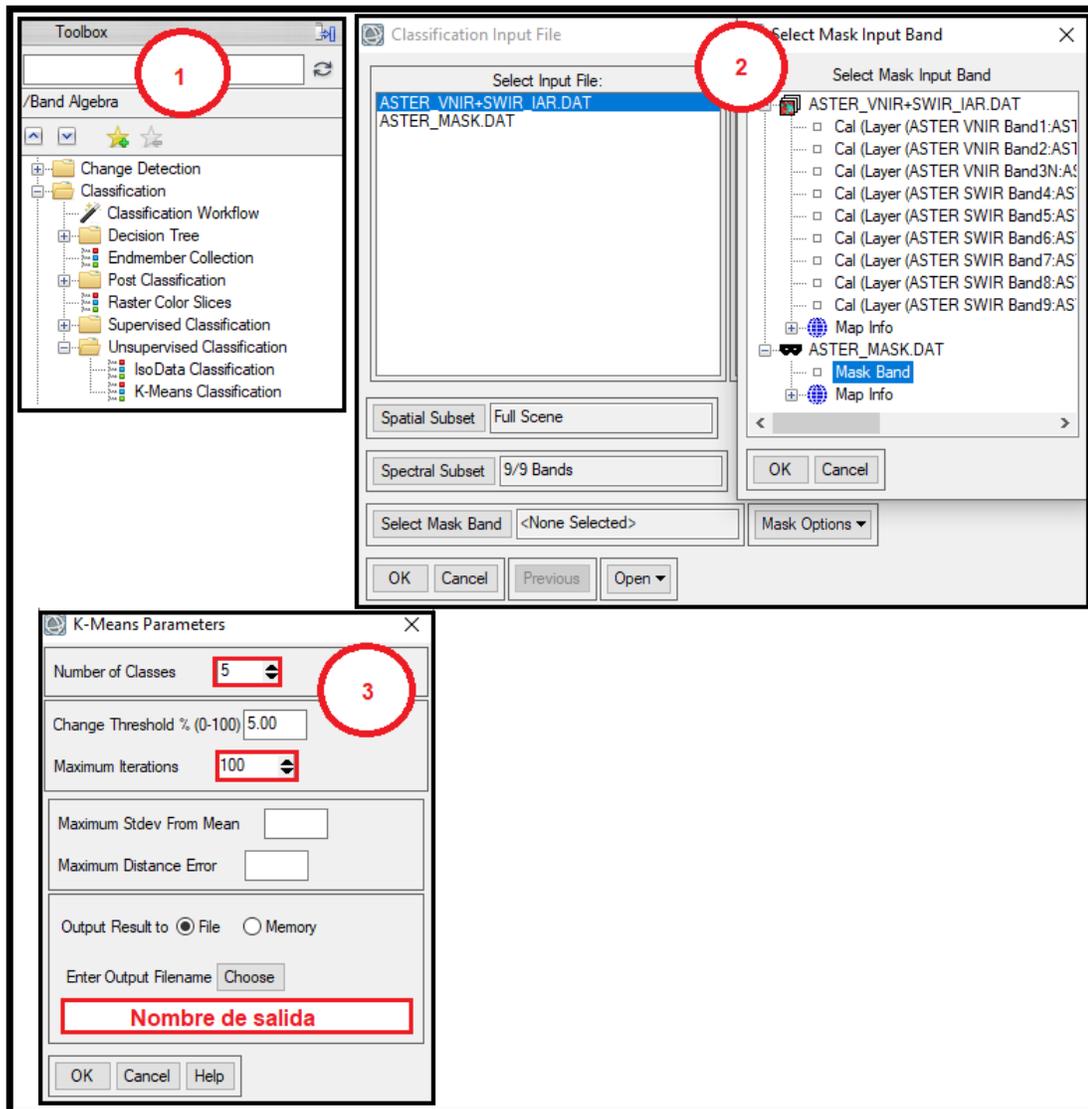


Figura 3.15 Procedimiento para la ejecución de la clasificación no supervisada.

3.3.2.3 Clasificación supervisada

3.1.2.3.a Máxima verosimilitud

Luego de la clasificación no supervisada se realizó la supervisada por el algoritmo *Classification – Supervised Classification – Maximum Likelihood Classification* (ver Figura 3.16). Como dato base se ingresó la imagen satelital,

la máscara, los parámetros de entrada que estuvieron conformados por ROIs o muestras semillas y, la probabilidad mínima para el mapeo de cada una de las clases. El propósito del mismo fue, buscar píxeles de interés con un comportamiento espectral similar al área establecida. La definición de las clases se realizó mediante la observación directa del usuario, apoyado en las regiones con afloramientos de carbonatos conocidos (como las canteras de Mume y El Melero), el mapa geológico y antecedentes.

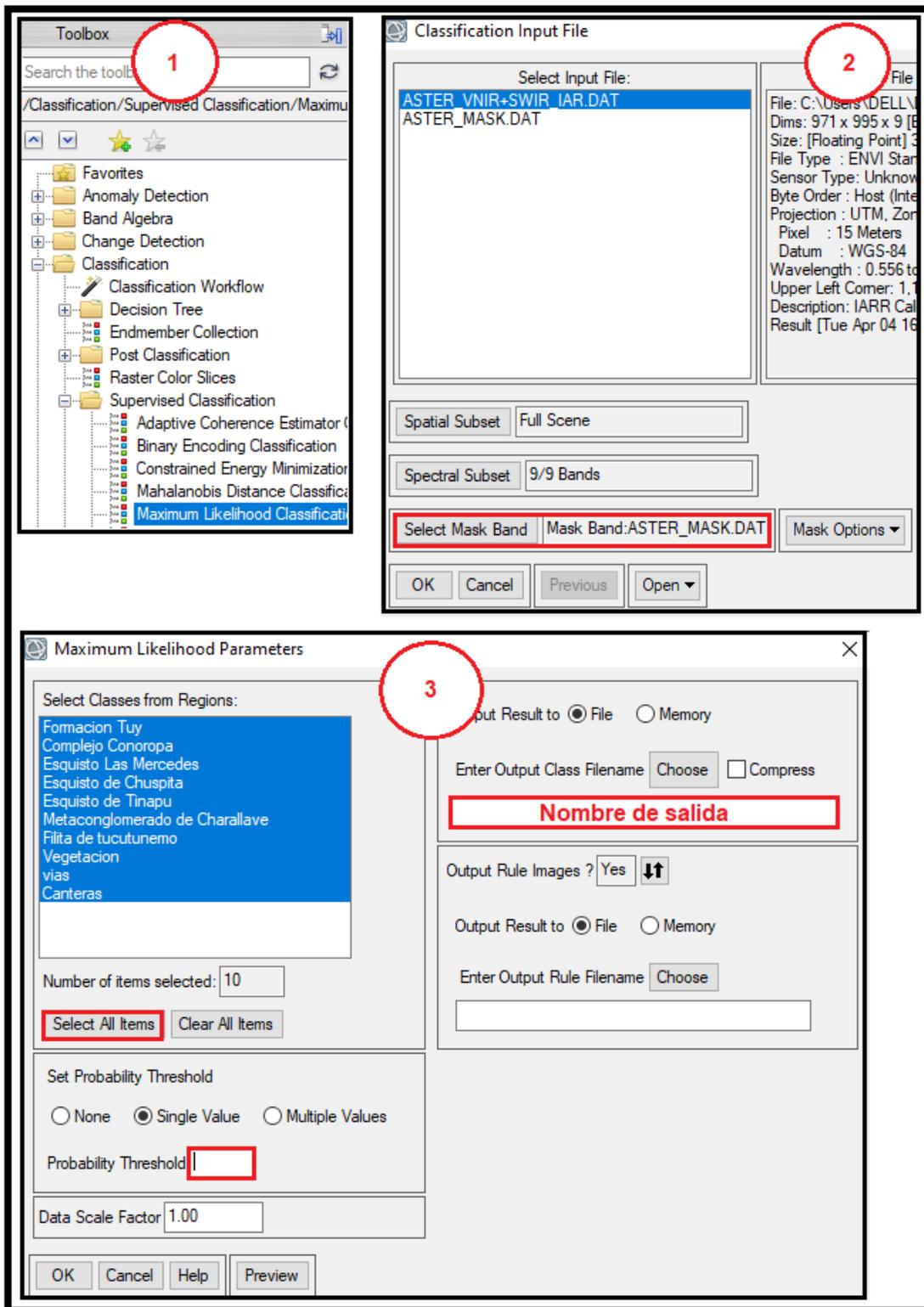


Figura 3.16 Procedimiento para la ejecución de la clasificación supervisada.

3.1.2.3.b Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM) y estudio de firmas espectrales

El uso de esta herramienta se fundamenta en calcular la similaridad entre dos espectros mediante el cálculo del ángulo espectral entre ellos (Hernández, 2019).

Para la aplicación del SAM se procedió primeramente a crear una colección de firmas espectrales de la librería de ENVI. Luego, a estas firmas se les empleó una transformación, de tal manera que pudiera aplicarse a la imagen multiespectral de ASTER a través del método *Spectral – Spectral Resampling*. Posteriormente, se procedió a usar el algoritmo *Spectral Angle Mapper (SAM)*. En la Figura 3.17 se muestra los pasos para la aplicación SAM.

Una vez aplicado el SAM, se superpuso los diferentes resultados para crear un producto final con regiones de interés. Estas fueron de importancia para la creación de otra colección de firmas espectrales, pero tomando como dato la propia imagen multiespectral de ASTER.

3.4 Etapa 4: Integración e interpretación de los datos

En esta fase se integró los resultados obtenidos, con el fin de lograr agrupar regiones con posibles contenidos de caliza por medio de la unión de los siguientes análisis:

3.4.1 Interpretación de las unidades espectrales y aplicación de firmas espectrales para detección de caliza

Mediante el *software* ENVI y Arcgis, se determinaron unidades espectrales a través de la integración de los análisis de resultados provenientes de los tratamientos aplicados en el procesamiento de las imágenes satelitales, apoyado en las firmas espectrales.

3.4.2 Interpretación del relieve para la discriminación de posibles áreas de caliza

El análisis del relieve se llevó a cabo mediante la integración de los análisis de los mapas temáticos asociados a unidades topográficas, hipsometría, pendiente, orientación de laderas y drenaje; también, el análisis del Modelo de Digital de iluminación y Sombra (MDIS) y modelo 3D (DEM). El propósito, fue recopilar aquellas zonas que presentaran rasgos morfológicos que reforzaran la información interpretada con las imágenes satelitales.

3.5 Etapa 5: Verificación en campo

Una vez realizado la interpretación en oficina, se procedió a verificar en campo aquellos puntos de interés geológico propensos a tener caliza. Para ello se utilizó una serie de instrumentos para la medición (rumbo y buzamiento) y pruebas químicas en la litología como:

- Martillo geológico
- Brújula tipo Brunton
- Ácido Clorhídrico (HCL) al 10%

3.6 Etapa 6: Resultados

Finalmente, tras el manejo y análisis de los distintos productos obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales, mapas de división de unidades, hipsometría, pendientes, orientación de laderas, drenajes, y mapas de unidades de relieve, se procedió a la elaboración de un mapa geológico que mostrara la ubicación y delimitación de posibles yacimientos de caliza.

Asimismo, el mapa final se elaboró a través del programa ArcGIS 10.5, específicamente en sus aplicaciones ArcMap y ArcCatalog.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Resultados obtenidos mediante sistema de información geográfica (Arcgis)

La digitalización y vectorización de las regiones en las hojas topográficas (a escala 1:25000) que involucran el área de estudio y su posterior interpretación permitió obtener 7 productos generados a través de Arcgis 10.5.

4.1.1 Unidades topográficas

Como primer producto se tuvo la integración de las zonas de interés pertenecientes a las hojas 6846 IV NE, 6846 IV NO, 6846 IV SE y 6846 IV SO; con sus curvas de nivel tanto mayores como menores, así como los poblados y nombres de los altos topográficos. Además, se tiene la división de unidades mayores obtenido mediante el análisis de la topografía.

En la Figura 4.1 se puede observar la definición de dos unidades topográficas, las cuales fueron establecidas a partir de la heterogeneidad que presenta el relieve. La primera unidad se caracteriza por ser de relieve alto, con filas intercaladas con depresiones de fondo estrecho. Por otro lado, la segunda unidad es de relieve bajo, donde se encuentran depresiones de fondo amplio que suelen intercalarse con colinas. A continuación, se describen de manera detallada estas unidades.

4.1.1.1 Unidad de relieve alto

Abarca aproximadamente el 65% de la zona de estudio, ubicándose al norte y oeste, específicamente, al oeste y noroeste de Charallave, y al norte de Curuma. Esta unidad se caracteriza por una intercalación de filas y depresiones de fondo estrecho con un rumbo general noreste - suroeste. Por

otra parte, posee un desnivel considerable que promedia los 800 m y, establece un contacto abrupto con la unidad de relieve bajo. En cuanto a las tipificaciones se logró establecer 2, tales como:

4.1.1.1.a Filas asimétricas de tope irregular

Estas topofomas poseen una orientación preferencial noreste – suroeste, conservando una geometría rectilínea y una cresta irregular. En cuanto al conjunto de laderas, es asimétrica, siendo menos abruptas las del sur, aunque, existe un alto grado de entallamiento del drenaje sobre dichas laderas.

Algunos de los mayores exponentes son:

- Fila Magdalena: ubicada al oeste de Charallave y sobre la cual se ubica la cantera Mume en su ladera sur.

- Fila Sabaneta: ubicada al norte de Alto Monte y sobre la cual se encuentra la cantera El Melero, en una de las estribaciones de la ladera sur.

4.1.1.1.b Depresiones de fondo estrecho

Estos bajos topográficos poseen una línea de talweg cuyos rumbos tienden a ser noreste – suroeste, con excepción de ciertos tramos como al oeste de Alvarenga que son noroeste – sureste. Estos cambios en la línea de talweg representan los lugares donde se forman gargantas, como es el caso de la fila como La Magdalena, que no es del todo continua.

Estas depresiones son estrechas, comparadas con las observadas en la unidad de relieve bajo, no superando los 2 km.

4.1.1.2 Unidad de relieve bajo

Ocupa el 15% de la región de estudio, ubicándose al sur de Curuma, al sureste de La Chivera y al este de Punta Brava. Se conforma principalmente de depresiones orientadas norte – sur y por conjuntos de colinas alargadas

orientadas noroeste – sureste. El desnivel máximo alcanzado es aproximadamente de 200 m.

Respecto a las tipificaciones se establecieron 2, las cuales se describen a continuación.

4.1.1.2.a Depresiones de fondo amplio

Se encuentran orientadas norte – sur, con excepción de las ubicadas al sur de Curuma y noreste del Cerro Los Corrales, las cuales toman un rumbo este – oeste. Estas depresiones suelen tener una anchura que ronda entre los 2 km hasta casi los 5 km. Además, sus laderas suelen ser asimétricas con una tendencia a tener baja pendiente en las del oeste, como aquellas ubicadas al oeste de Cerro Jobito, sur de Alvarenga y este de Cerro Guatipa. Sin embargo, al norte del Cerro Los Corrales son las laderas norte.

4.1.1.2.b Colinas alargadas

Se caracterizan por unas series de colinas orientadas noroeste – sureste en gran parte de la toponimia, a excepción de las ubicadas al norte y oeste de La Bosúa que están dispuestas de noreste a suroeste. En general, poseen una geometría irregular y se encuentran representadas por los exponentes cerro El Jabillo y cerro Jobito. En cuanto al tope de las mismas, es suave.

Algunas de estas topofomas logran alcanzar la cota máxima en la unidad que ronda 400 msnm al noreste de Charallave.

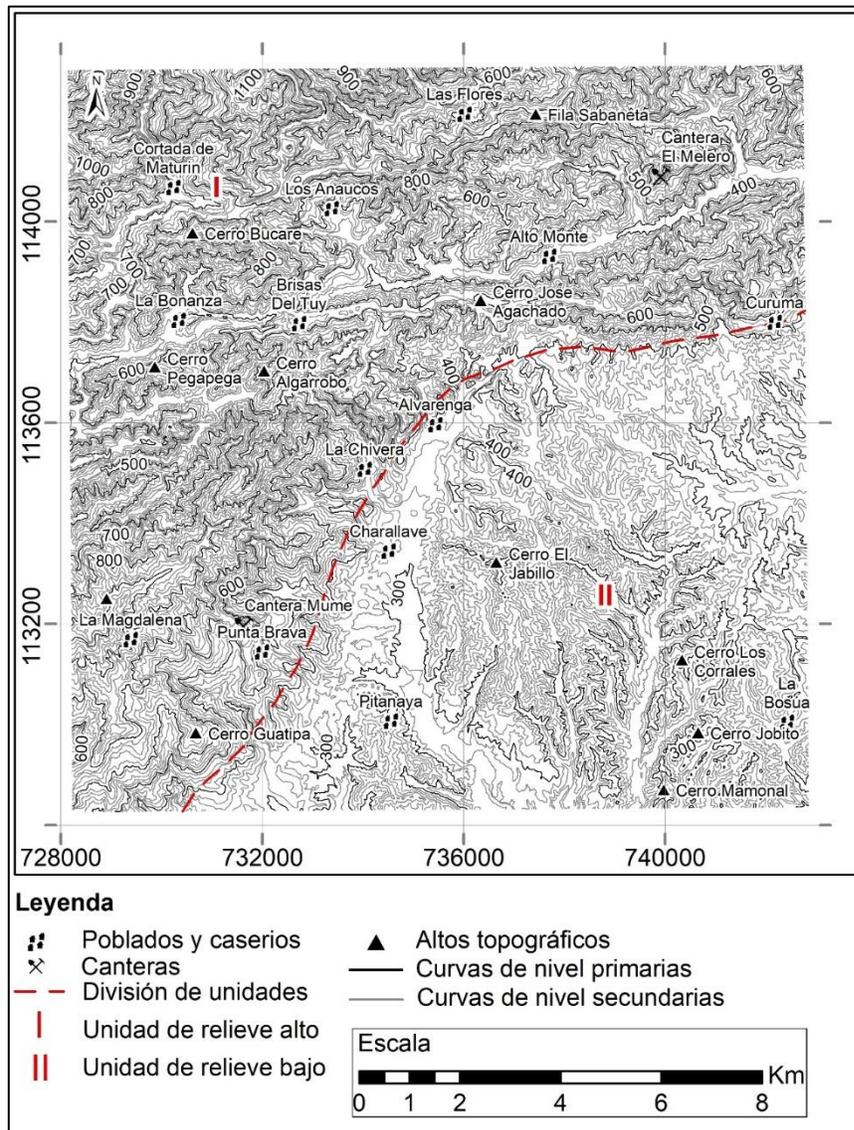


Figura 4.1 Mapa topográfico con división de unidades mayores.

4.1.2 Mapa de drenajes

Para la obtención de este producto (ver Figura 4.2) se implementó la vectorización de los drenajes marcados en las hojas topográficas mencionadas en el apartado anterior, así como también la marcación por medio de la interpretación visual de las curvas de nivel.

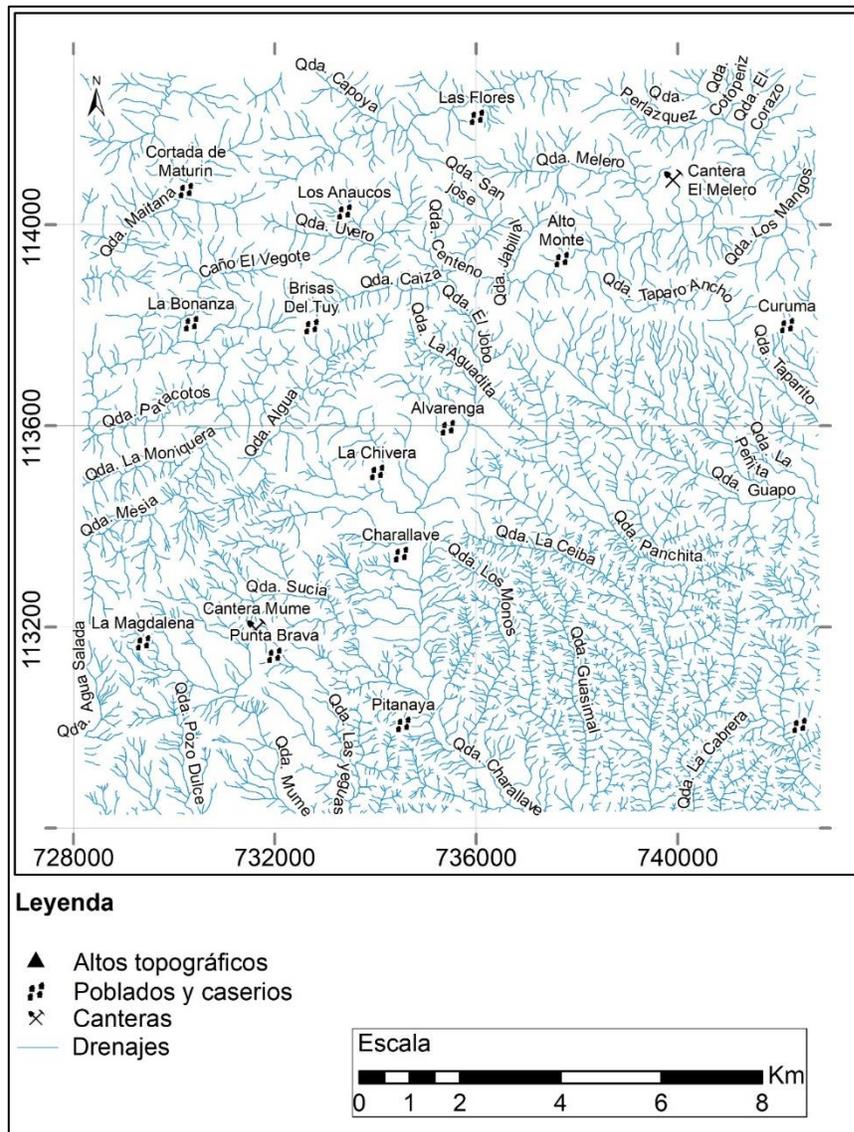


Figura 4.2 Mapa de drenajes.

Como se observa en la Figura 4.2, la mayor parte de los drenajes fluyen hacia el sur a excepción de aquellos como al norte de Cortada Maturín (que poseen un sentido hacia el norte) y la Qda. Caiza (que posee un sentido de sus aguas hacia el este). Así pues, el patrón de drenajes predominante es el dendrítico, siguiéndole el subparalelo que se nota al suroeste de Curuma y sur de Punta Brava. En cuanto a la densidad de drenajes es variada, siendo muy alta al sureste de la región, específicamente en las subcuencas cuyos cauces

principales son las quebradas La Ceiba, Los Monos, Guasimal y La Cabrera; ya para el resto es relativamente media con algunas áreas donde se hace escaso como los alrededores de la cantera El Melero y el poblado de La Chivera.

Por otra parte, el cauce de mayor longitud en el área de estudio es la quebrada Charallave que se ubica al este de la ciudad con el mismo nombre y al este de Pitahaya, siguiendo una orientación predominantemente norte – sur.

4.1.3 Modelo de elevación Digital (DEM) 3D

Las curvas de nivel digitalizadas de las hojas topográficas 6846 IV NO, 6846 IV NE, 6846 IV SE y 6846 IV SO fueron esenciales para la preparación de este producto (ver Figura 4.3) en Arcgis, especialmente, en la extensión de dicho programa denominada *Arcscene*.

La Figura 4.3 refleja un modelado 3D en escala de grises, con valores que tienden a blancos para los altos topográficos hasta los negros que representan las depresiones. Asimismo, cada perspectiva una posee su respectiva señalización del norte geográfico (flecha verde) en la parte superior izquierda.

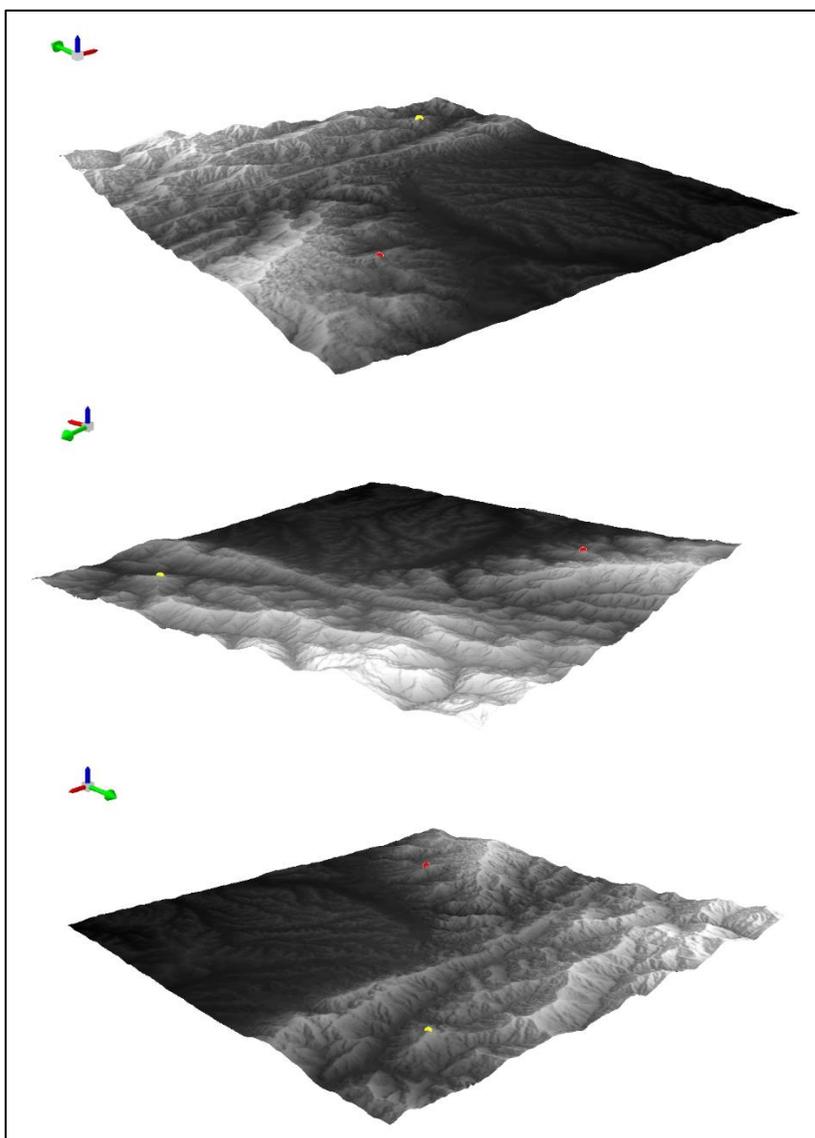


Figura 4.3 Modelo de Elevación Digital (DEM) en 3D con ubicación de las canteras El Melero (punto amarillo) y Mume (punto rojo).

4.1.4 Modelo de iluminación y sombras (MDIS)

Para este producto se utilizó como base el DEM y se le aplicó el algoritmo *surface – hillshade* del programa Arcgis, con el fin de buscar un realce del relieve para su interpretación. Para ello se implementó una simulación de iluminación de la luz del sol sobre la superficie, con valores para el azimut de 315° y un ángulo de inclinación de 45° (ver Figura 4.4).

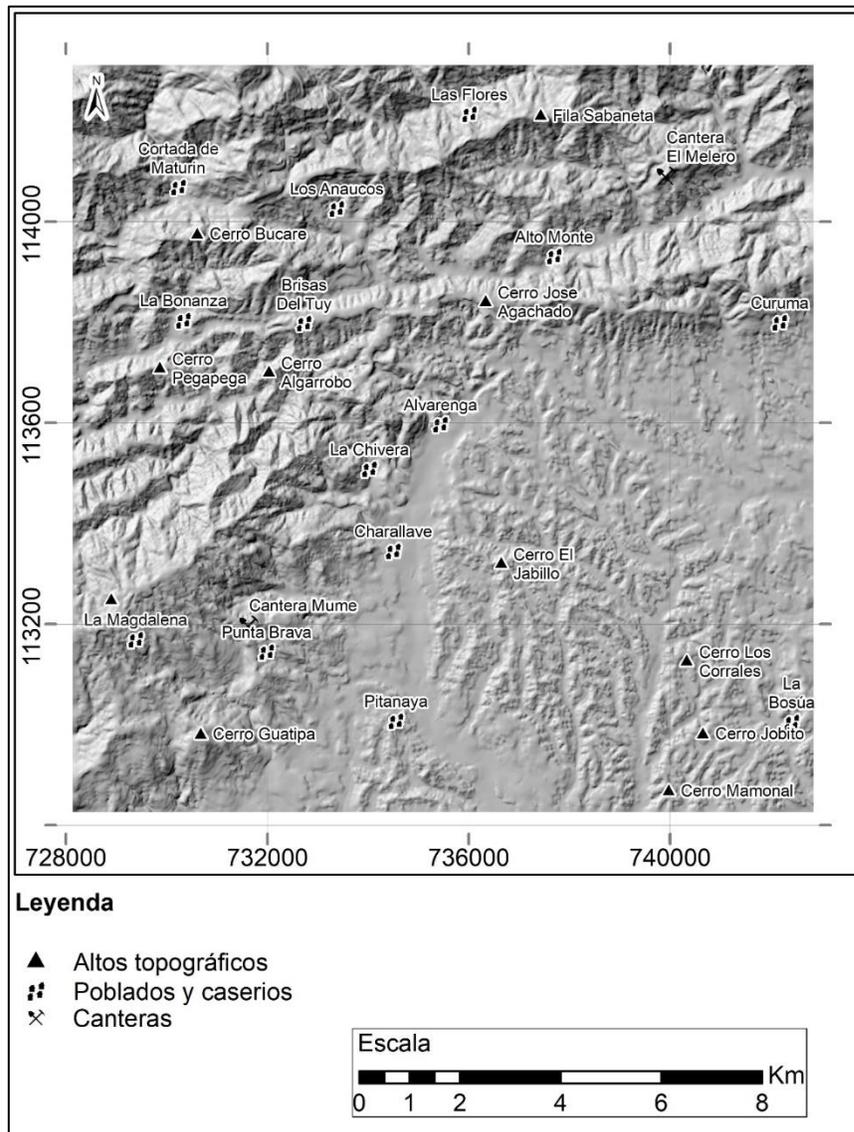


Figura 4.4 Modelo Digital de Iluminación y Sombra (MDIS) con una configuración de 315° 45°.

Como comentarios sobre la Figura 4.4, se establece que la región está ocupada en gran parte de un relieve asociado a filas donde destacan la Fila La Magdalena, Fila Sabaneta, Cerro José Agachado y Cerro Bucare. También, se resalta la gran extensión de las laderas sur de las dos primeras filas previamente mencionadas y sobre el cual yacen las canteras. Por otra parte,

se aprecia la poca variación del relieve que presenta el área de estudio al sur de Curuma y al este de Punta Brava.

4.1.5 Mapa de pendientes

Mediante la aplicación del algoritmo *Surface – Slope* de Arcgis al DEM, se obtuvo el resultado representado por la Figura 4.5.

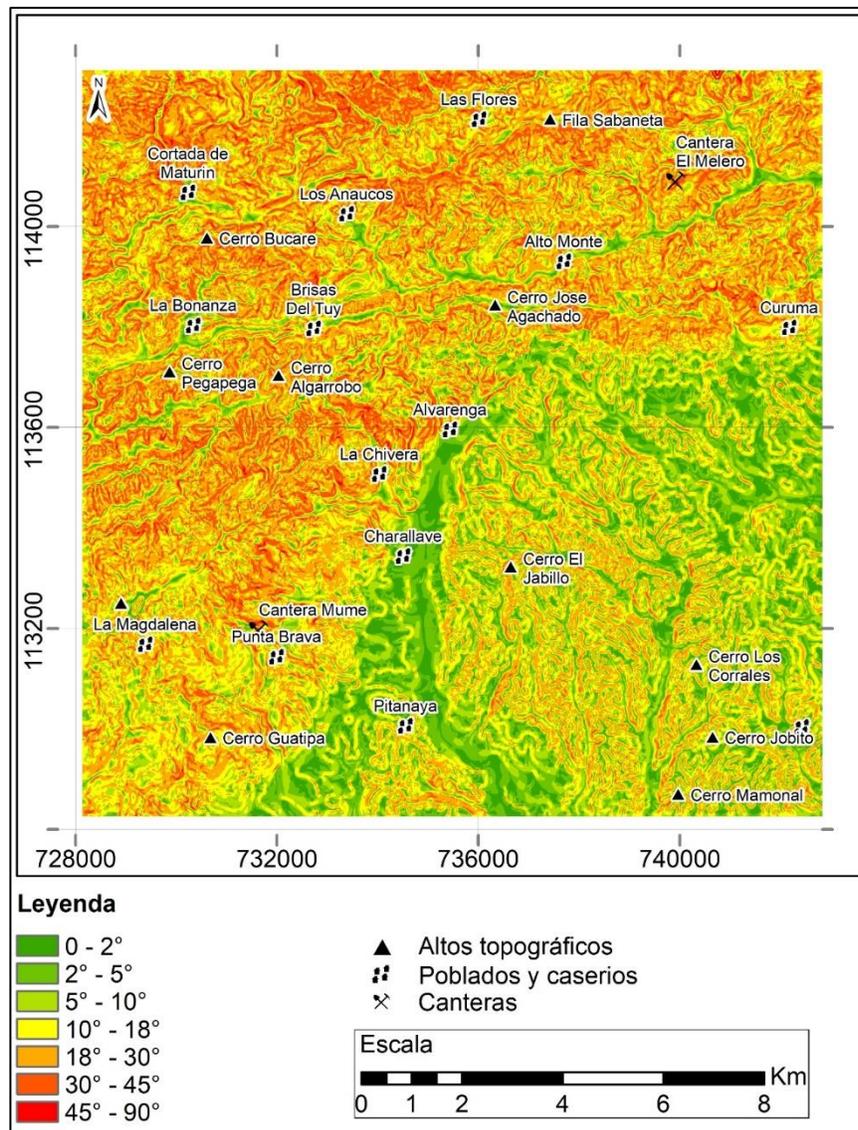


Figura 4.5 Mapa de pendientes.

En la región de estudio se destacan 3 zonas. La primera, de pendientes altas (que van de abrupto a escarpado) ubicadas al norte – noroeste del poblado de Curuma, norte – oeste de Alvarenga y oeste de Pitanaya, asimismo sobre estos terrenos se encuentran las canteras. La segunda, es un área de pendientes moderadamente abruptas a abruptas, en el que se ubican algunas elevaciones topográficas como cerro El Jabillo, cerro Los Corales y cerro Mamonal. Por último, un área llana a suave que se representa como una franja que pasa por los poblados Alvarenga, Charallave y se subdivide en Pitanaya, pasando al sureste y suroeste de dicho poblado; también, existe una pequeña región con estas propiedades al sur de Curuma.

4.1.6 Mapa de orientación de laderas

La aplicación del algoritmo Surface – Aspect de Arcgis permitió obtener un mapa de orientación de laderas como se representa en la Figura 4.6.

En general, tenemos que los altos topográficos de gran extensión y que son los que ocupan la mayor parte del terreno (norte – noroeste del poblado de Curuma, norte – oeste de Alvarenga y oeste de Pitanaya) poseen laderas orientas hacia el noroeste y sureste. Sin embargo, existen zonas en las que se encuentran laderas predominantemente orientadas al este y oeste como al este de la ciudad de Charallave y al este del poblado de Pitanaya.

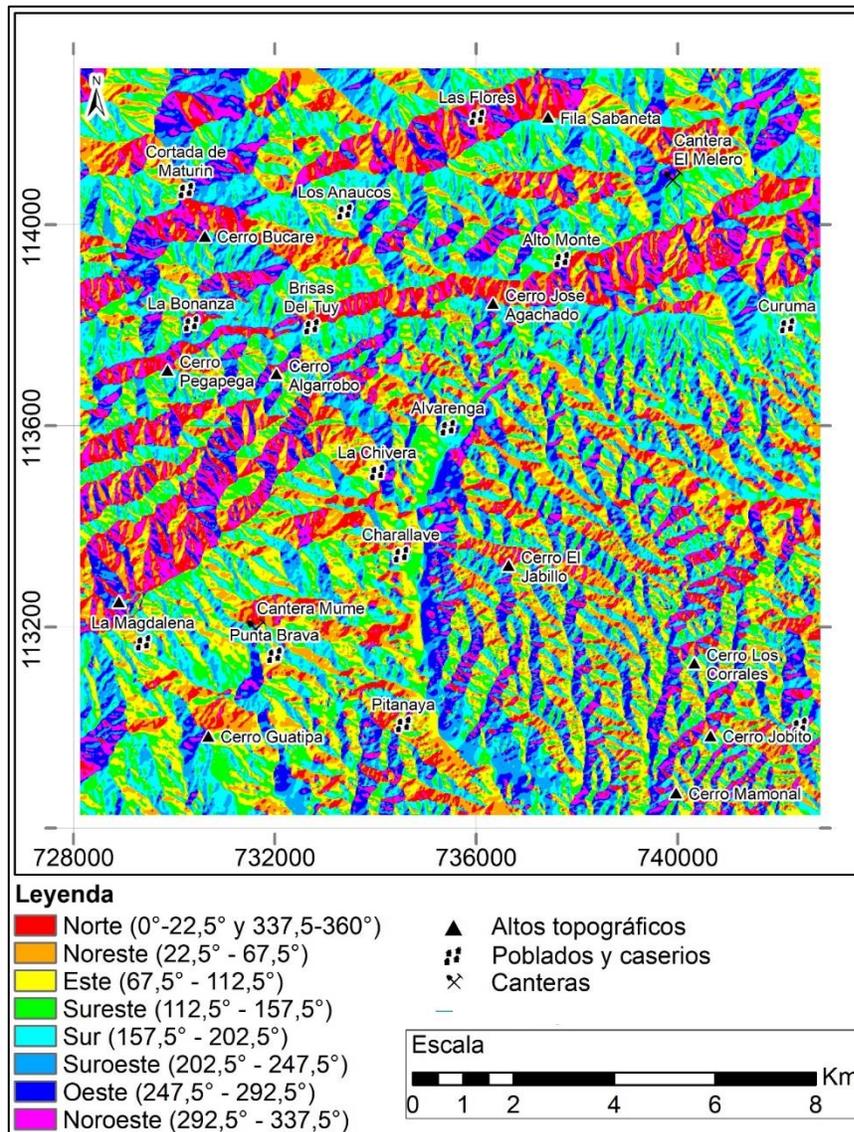


Figura 4.6 Mapa de orientación de laderas.

4.1.7 Mapa hipsométrico

Este producto (ver Figura 4.7) se obtuvo mediante la clasificación del DEM en 7 clases, conformadas por intervalos de 200m, a excepción de la primera que es 100m.

En la figura 4.7 existen dos regiones con diferentes variaciones de alturas. En la primera, las alturas se mantienen en un rango entre 200 y 400

msnm, ubicándose al sur de Curuma y este de Punta Brava, mientras que, en la segunda, estas variaciones son mayores, llegando a oscilar entre los 400 y 1400 msnm, así pues, esta última se ubica al noroeste de Curuma, de noroeste de Alvarenga y oeste de Pitanaya. Además, se puede observar que el relieve se dispone en franjas gradadas orientadas noreste – suroeste topocreciente hacia el noroeste.

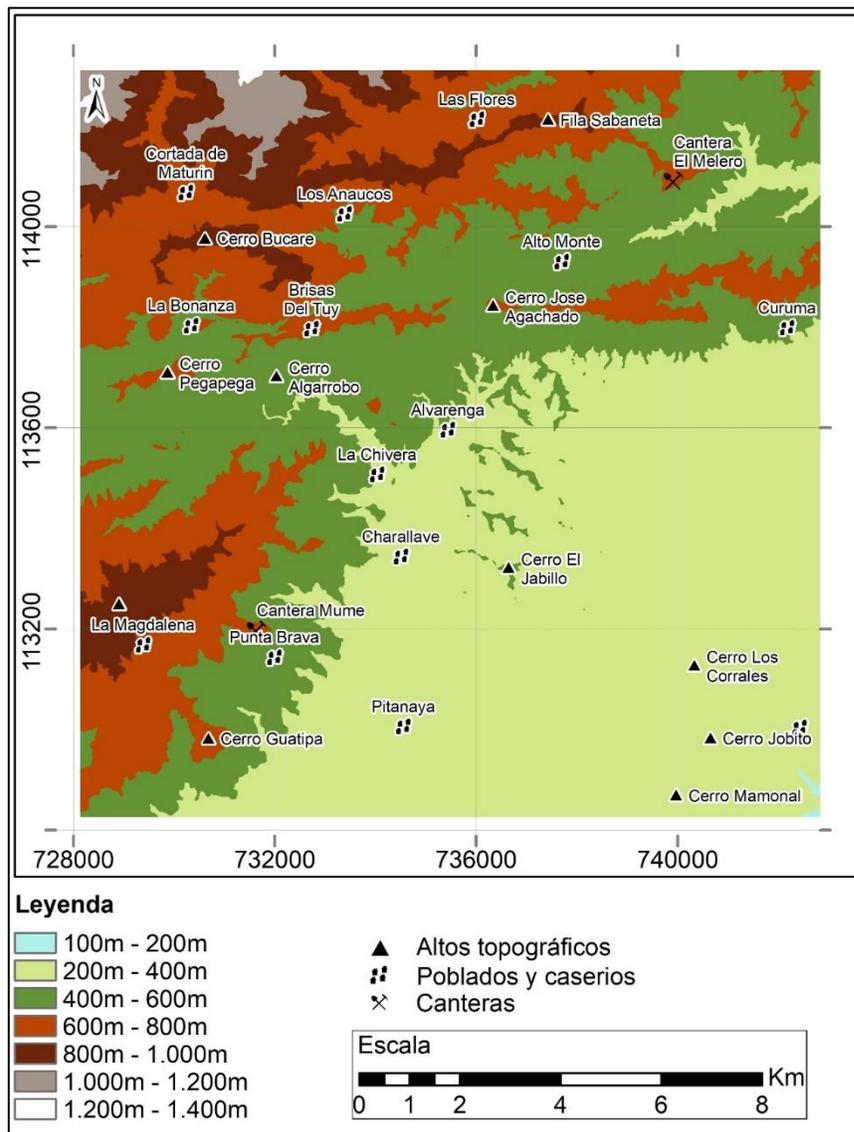


Figura 4.7 Mapa hipsométrico.

4.2 Resultados obtenidos mediante el procesamiento de las imágenes satelitales

4.2.1 Realización de combinación y matemáticas de bandas

4.2.1.1 Combinación de bandas

Los resultados generados en esta etapa corresponden al manejo de las bandas del VNIR y el SWIR de los sensores OLI del satélite Landsat 8 y ASTER del satélite TERRA. Para ello, se estableció una combinación de bandas que fueran correlacionables entre ambos satélites para su posterior interpretación y que, además, resaltaran tres parámetros importantes, el primero asociado a la discriminación de la vegetación, el segundo relacionado a la división de las unidades litológicas, y el tercero, la identificación de áreas asociadas a carbonatos.

Asimismo, se obtuvieron 4 productos, dos asociados al manejo de una sencilla combinación de bandas en los canales RGB y el resto a la aplicación de un realce de los colores.

4.2.1.1.1 Combinación de las bandas de ASTER

Se escogieron las bandas 8,3 y 1 bajo la combinación de dicho orden en los canales RGB, tomando como motivo la afinidad que tiene la octava y la tercera banda con las rocas carbonáticas y la vegetación respectivamente.

En la Figura 4.8 se observa en tonos verdosos la vegetación, que se hace más densa a medida que la saturación del color aumenta. Por otra parte, tenemos en colores marrones, rojizos, amarillentos, naranja, azulados y blancos representando los afloramientos de la roca en superficie, no obstante, también se refleja regiones de ciudad (Charallave, Alvarenga), así como pequeños poblados (Curuma, Las flores y La Magdalena), un aeropuerto y un vertedero de basura (La Bonanza) que, aunque poseen un color, no aportan información acerca del objetivo de este proyecto.

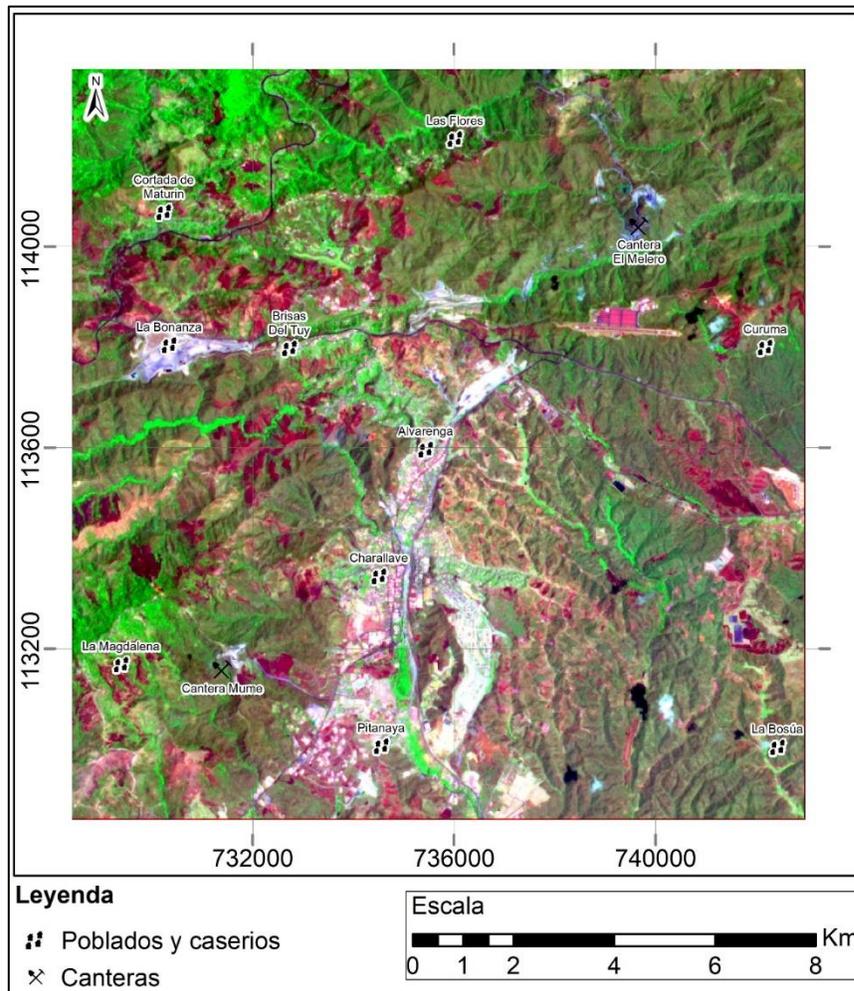


Figura 4.8 Combinación de las bandas 8-3-1 del sensor ASTER.

Por otra parte, en la Figura 4.9 se encuentra la misma imagen de la Figura 4.8, pero con un realce de los colores, intensificándose los tonos mencionados previamente.

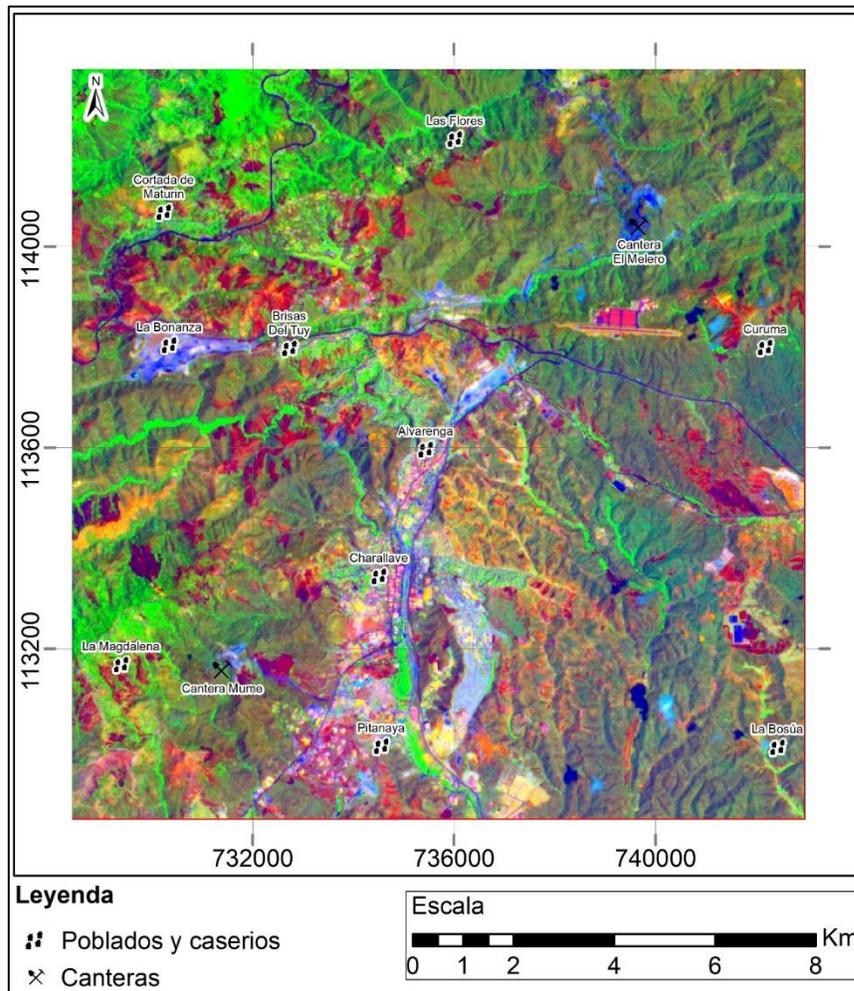


Figura 4.9 Combinación de las bandas 8-3-1 del sensor ASTER con la aplicación de un realce espectral.

4.2.1.1.2 Combinación de las bandas de Landsat 8

La combinación RGB establecida fue la 753 con el mismo propósito mencionado en el apartado anterior, destacar la vegetación y diferenciar cuerpos litológicos. En este caso, aunque el ancho de la banda 7 no discrimina del todo rocas carbonáticas como calizas, sirve para caracterizar litologías en general según su comportamiento espectral. En cuanto a la vegetación, se tiene la banda 5 del infrarrojo cercano.

Los productos generados se observan en la Figura 4.10 y Figura 4.11. Al igual que el producto obtenido de ASTER, los tonos verdes se relacionan con la vegetación y varían dependiendo de la intensidad del color, y el marrón, naranja, rojizo, púrpura y azulado a rocas aflorando en superficie.

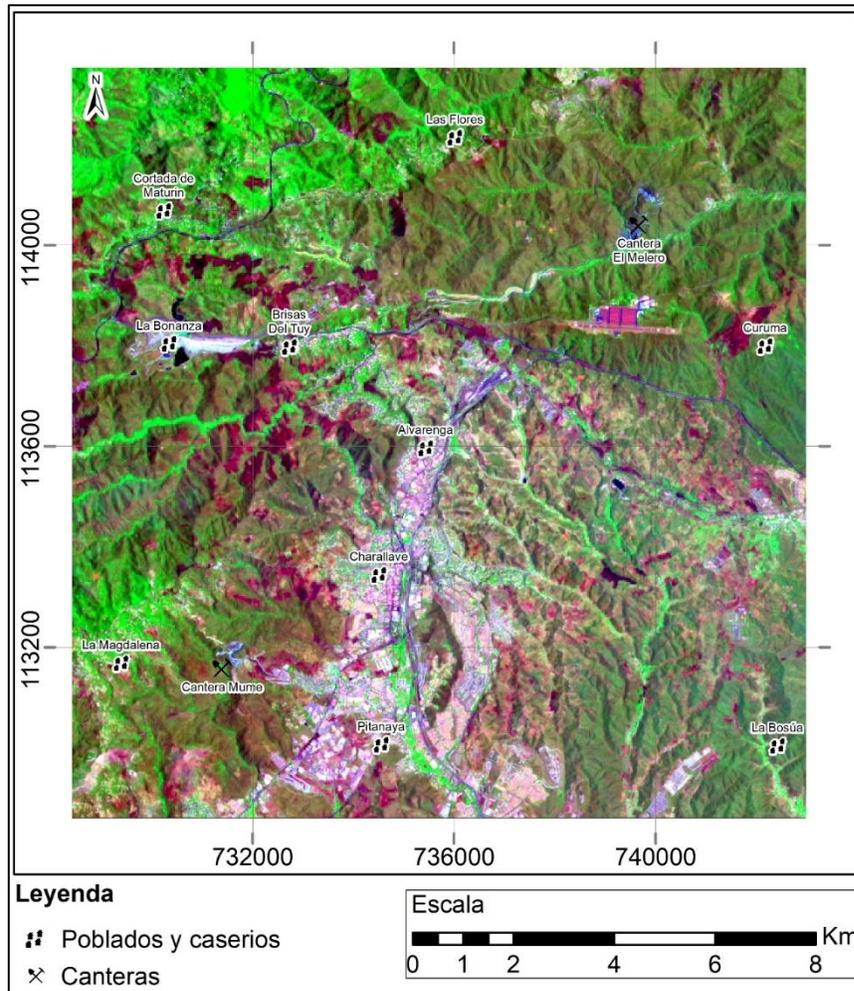


Figura 4.10 Combinación de las bandas 7-5-3 del sensor OLI del satélite Landsat 8.

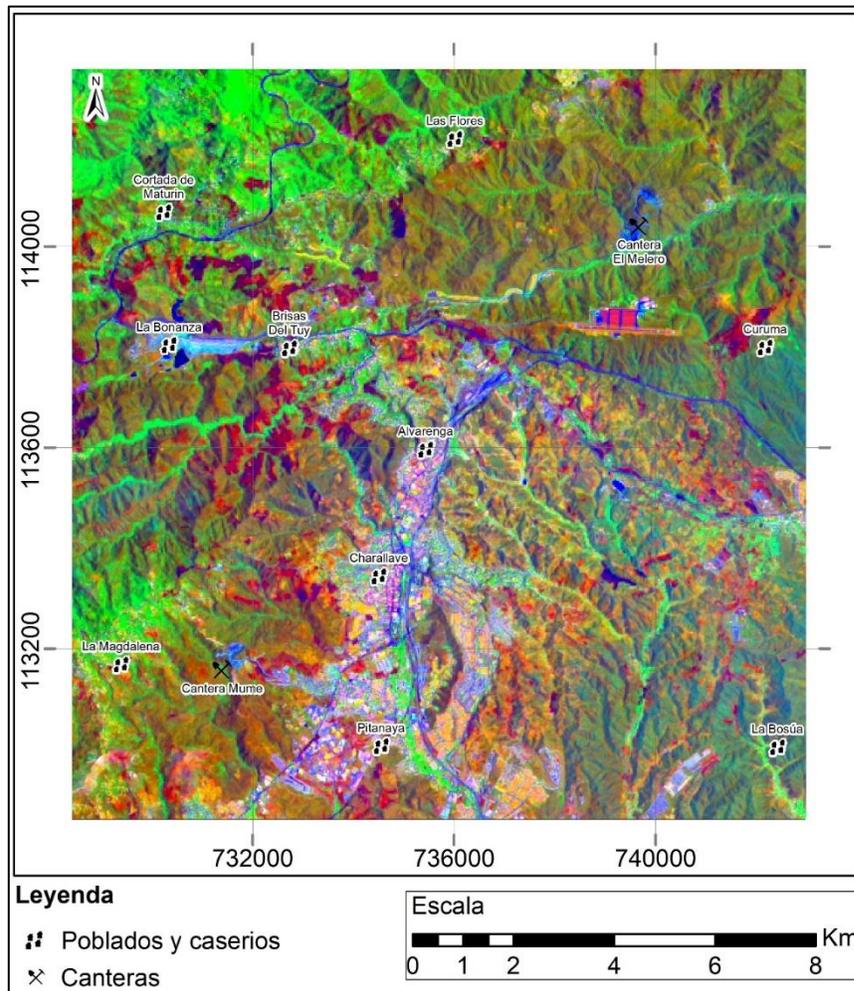


Figura 4.11 Combinación de las bandas 7-5-3 del sensor OLI del satélite Landsat 8 con la aplicación de un realce espectral.

4.2.1.2 Matemáticas de bandas

Mediante la ejecución de la matemática de bandas del VNIR, SWIR y el TIR del sensor ASTER del satélite TERRA se lograron obtener 6 productos. Asimismo, las fórmulas establecidas fueron de acuerdo a los índices espectrales de litologías de interés, es decir, tanto de rocas con contenido de carbonatos en general, como de litologías y minerales en específico como la calcita y la dolomita, esta última se usó de acuerdo a la similitud en el comportamiento espectral con la caliza y el mármol.

4.2.1.2.1 Resultado asociado al índice de la calcita

Para este producto (ver Figura 4.12) se usaron las bandas 6, 8 y 9 que se implementaron según la fórmula $\left(\frac{B6}{B8}\right) * \left(\frac{B9}{B8}\right)$. El resultado generado se usó como *threshold* con valores mínimos de 2,55 hasta los valores más altos encontrados en el histograma. Así pues, La banda 1 de ASTER se usó como base para representar dicho resultado.

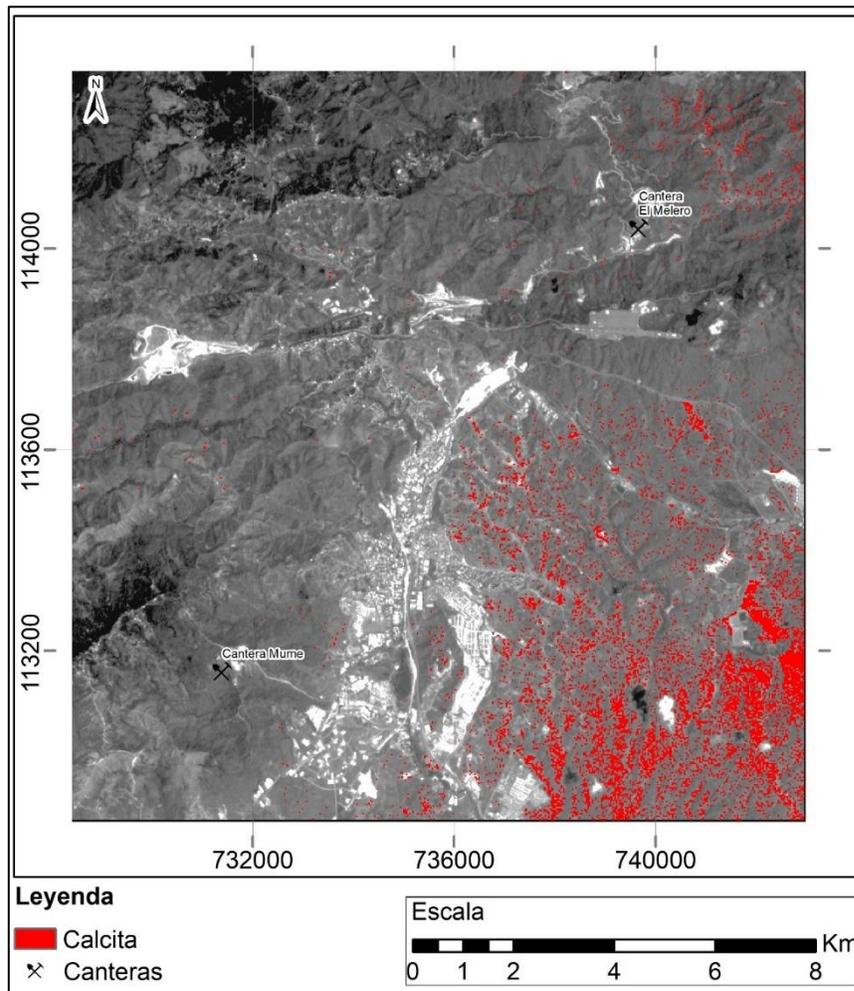


Figura 4.12 Áreas (rojo) con posibles mineralizaciones de calcita en las bandas del SWIR del sensor ASTER.

De acuerdo con la Figura 4.12, las regiones con mineralizaciones de calcita aumentan a medida que nos acercamos al sureste, hasta llegar a los alrededores de La Bosúa donde la densidad de los puntos es considerablemente alta. Por otra parte, se tiene que al noreste de la cantera El Melero se encuentra aflorando calcita.

4.2.1.2.2 Resultados asociado al índice de carbonatos

Para el primero de estos productos (ver Figura 4.13), se utilizó la división de la banda 4 entre la 8, con valores que partían desde el 1,16 en adelante. Mientras que para el segundo producto (ver Figura 4.14), se usó la división de las bandas del infrarrojo termal 13 y 14, con valores que iban desde el 1.01 hasta el máximo encontrado en el histograma. Asimismo, Estos resultados se plasmaron en la banda 1 del sensor ASTER.

De acuerdo con la Figura 4.13, las zonas con posibles afloramientos de rocas con alto contenido de calcio se encuentran principalmente al noreste de la cantera El Melero, noreste del poblado de Las Flores y este de Curuma.

En cuanto a la Figura 4.14, estas zonas se concentran principalmente al sur y sureste de la región, con áreas de afloramientos menores esparcidas en el resto del área de estudio.

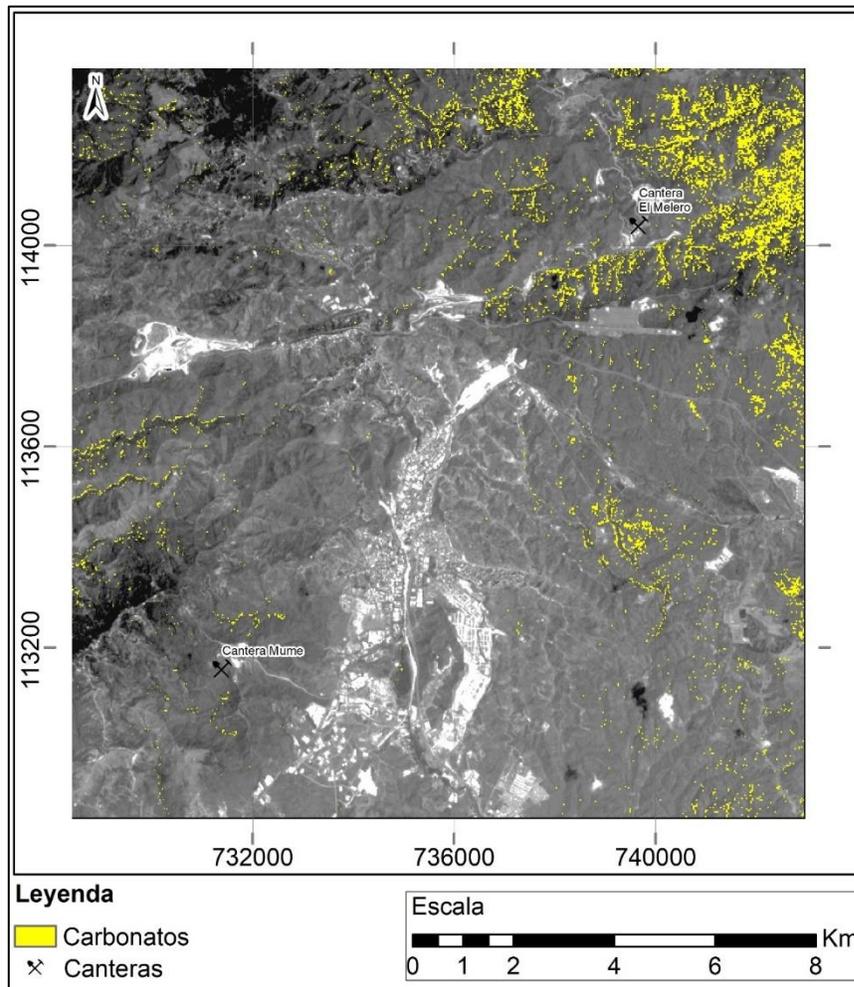


Figura 4.13 Áreas (amarillo) con posibles afloramientos de rocas con carbonato de calcio en las bandas del SWIR del sensor ASTER.

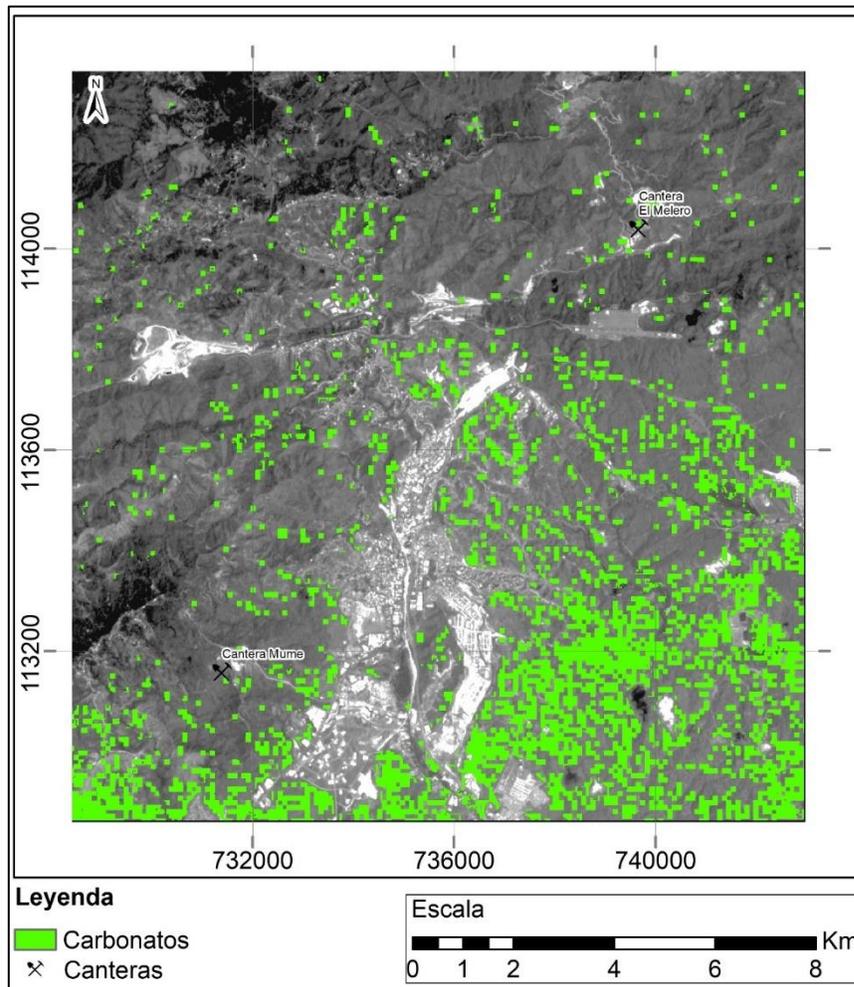


Figura 4.14 Áreas (verde) con posibles afloramientos de rocas con carbonato de calcio en las bandas del TIR del sensor ASTER.

4.2.1.2.3 Resultado asociado al índice de carbonatos, clorita y epidota

Para la generación de este producto (ver Figura 4.15) se utilizaron las bandas 7, 8 y 9 bajo la fórmula $(B7 + B9)/(B8)$, con valores mínimos del histograma de 2.14 y máximos de 10.06, luego, se reflejó el resultado sobre una banda base que corresponde con la 1 de ASTER.

Como comentarios generales, se tiene que las zonas con mejor respuesta al índice se ubican al norte y oeste de la región de estudio en forma

de bandas orientadas de forma noreste – suroeste, específicamente, a los alrededores de la cantera El Melero y el poblado Las Flores, al norte de la cantera Mume, y entre La Magdalena y La Bonanza.

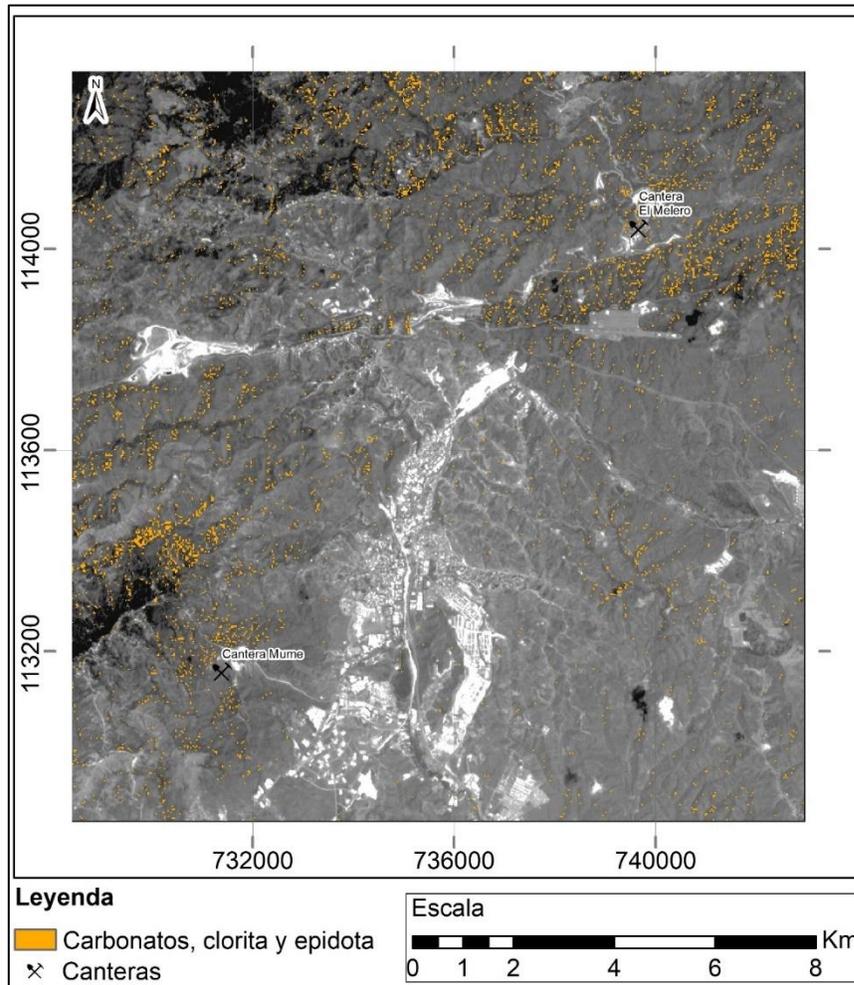


Figura 4.15 Áreas (naranja) con posibles afloramientos de rocas con minerales asociados a carbonatos, clorita y epidota en las bandas del SWIR del sensor ASTER.

4.2.1.2.4 Resultados asociado al índice de dolomitas

Mediante las bandas 6,7 y 8 se generó el producto (ver Figura 4.16) a través de la fórmula $(B6 + B8)/(B7)$, en el cual se tomaron valores mínimos de 2.08 y máximos de 4.92.

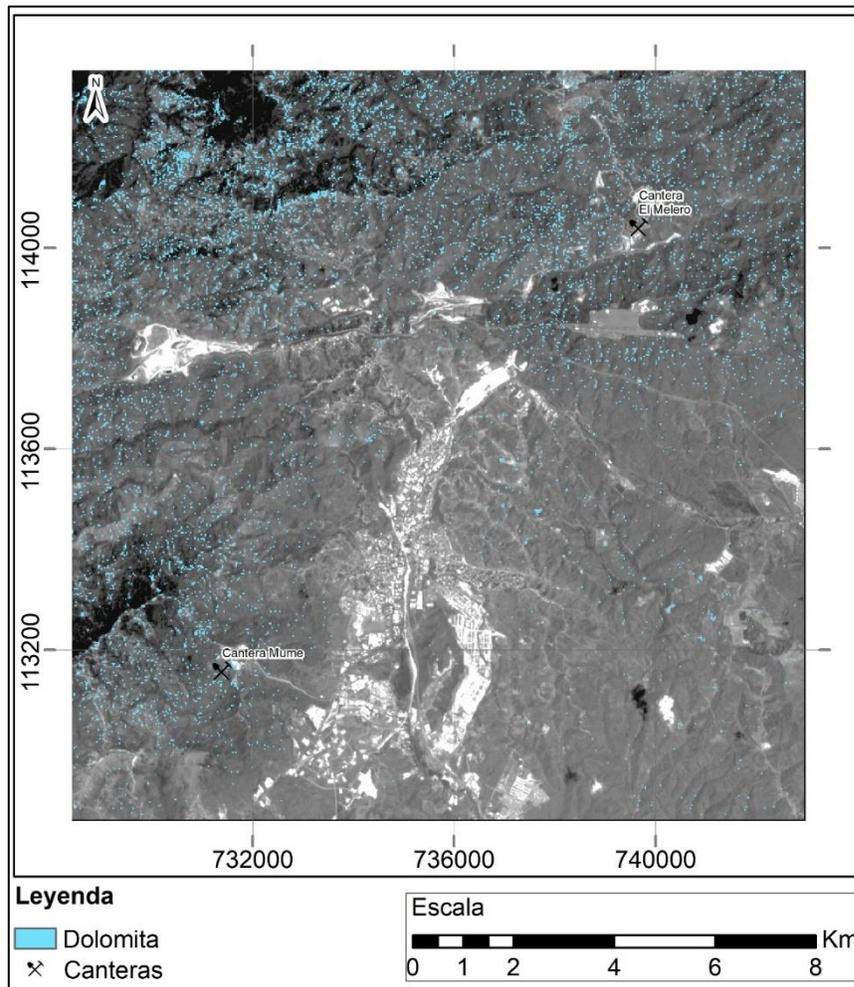


Figura 4.16 Áreas (azul) con posibles afloramientos dolomita en las bandas del SWIR del sensor ASTER.

Según la Figura 4.16, los posibles afloramientos de dolomitas y litologías asociadas se encuentran de manera dispersa, pero se concentran principalmente al noroeste del área de estudio, específicamente al norte de Cortada de Maturín y norte de Los Anaucos. Aunque se observan importantes respuestas al noroeste de la Cantera Mume y en los alrededores de los poblados de Las Flores, Alto Monte y la cantera El Melero.

Por otra parte, para el segundo (ver Figura 4.17) se usaron las bandas 2,6,7 y 8 bajo la fórmula $(B6 + B8)/(B7 * B2)$, que posteriormente se implementó en un ROI con un *threshold* de valores mínimos de 2.56 y máximos de 5.73. Ambos se plasmaron sobre la banda 1 de ASTER.

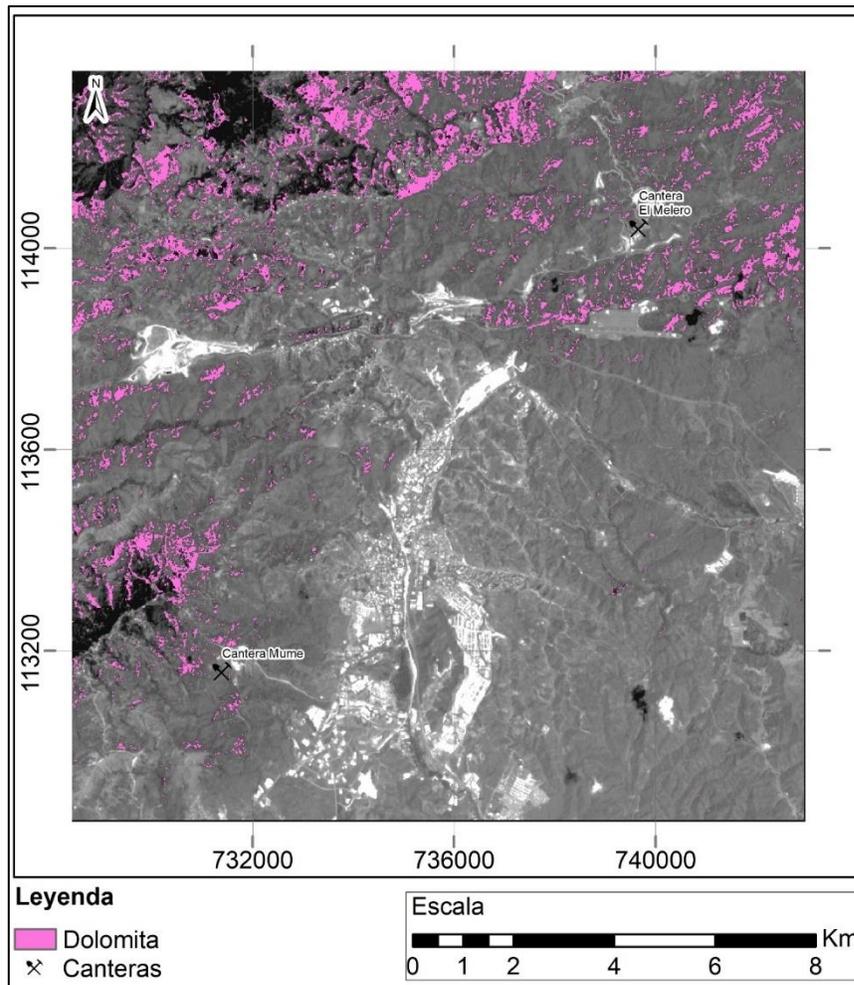


Figura 4.17 Áreas (morado) con posibles afloramientos dolomita en las bandas del SWIR del sensor ASTER.

En cuanto a la Figura 4.17, las respuestas al índice de dolomitas suelen representarse de una manera más localizada y densa al noroeste de la Cantera Mume, norte y sur de Cortada Maturín, en todo el entorno del poblado Las Flores y tanto al noreste como al noroeste y sur de la Cantera El Melero.

4.2.2 Ejecución de clasificación no supervisada

Se elaboraron 2 productos (ver Figura 4.18 y Figura 4.19) para los cuales se establecieron parámetros de entrada un número de 100 iteraciones y la definición de 10 clases, agrupando valores similares según el comportamiento espectral.

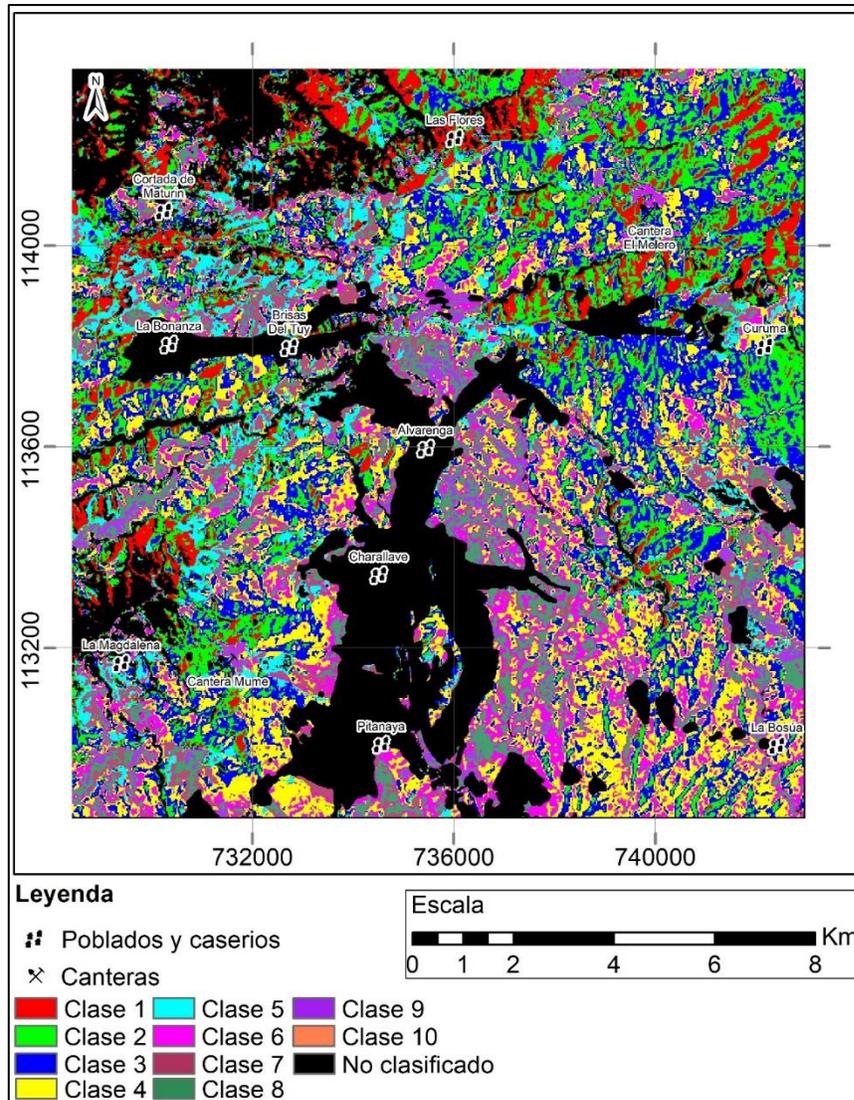


Figura 4.18 Mapa de clasificación no supervisada de ASTER.

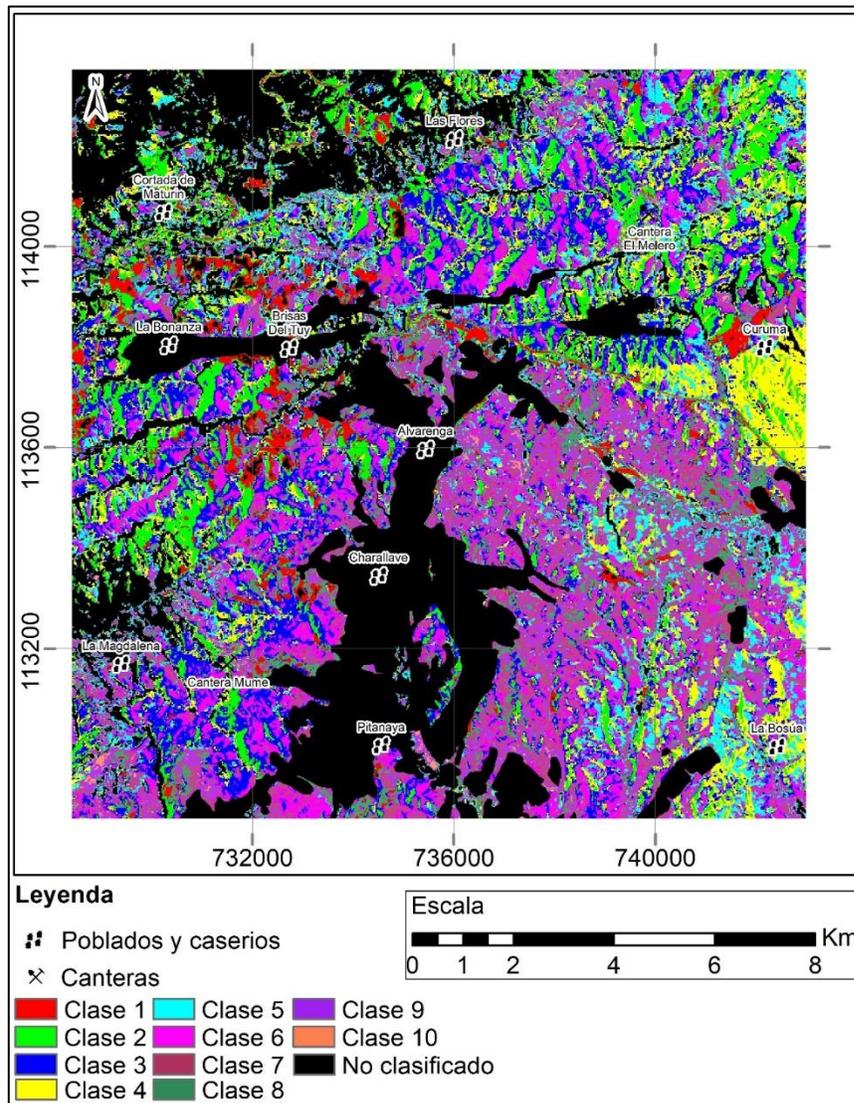


Figura 4.19 Mapa de clasificación no supervisada del sensor OLI del satélite Landsat 8.

De acuerdo con lo observado en la Figura 4.18, la región se subdivide en 4 zonas destacables según la distribución espacial de las clases. La primera está ubicada entre Las Flores y Curuma, y entre Curuma y La Bosúa en el cual dominan las clases 1, 2 y 3. La segunda asociada principalmente a las clases 6, 8, 9 y 10 localizada al este de los poblados de Alvarenga, Charallave y Pitanaya. La tercera vinculada con las clases 5 y 7, encontrada al norte de Brisas del Tuy y La Bonanza. Por último, la cuarta que se halla al oeste de

Charallave y sur de La Bonanza, en el cual es una combinación de todas las clases.

En la Figura 4.19, el área de estudio se caracteriza por tener una región central a los alrededores de Alvarenga, Charallave y Pitanaya, en el cual resaltan las clases 7, 8, 9 y 10. Otra adyacente a La Bosúa y al sur de Curuma donde encontramos la clase 4 y 5. Y la última, ubicada al norte y oeste de la zona de estudio, en el cual tenemos intercalaciones entre las clases 2,3,4,5 y 6 con parches enlazados con la clase 1 visualizados al noroeste de Curuma y al norte y sur de Brisa del Tuy.

4.2.3 Ejecución de clasificación supervisada

Esta evaluación se llevó a cabo en el *software* ENVI, en el cual se procesaron la imagen multiespectral de ASTER y la Landsat 8 con el propósito de discriminar áreas que se comportaran espectralmente similar para así comprobar el dato del procesamiento ejecutado entre ambas imágenes.

Los productos obtenidos fueron 2 en la clasificación supervisada mediante el establecimiento de muestras semillas (polígonos) en la imagen y 2 en la clasificación relacionada a firmas espectrales.

4.2.3.1 Evaluación por medio de Máxima Verosimilitud

Los resultados generados se aprecian en la Figura 4.20 y Figura 4.21. Para ello se definieron 10 clases, siete de ellas relacionadas a las unidades geológicas más importantes, tomando como base el mapa geológico del área de estudio, y las otras 3 asociadas a las zonas de canteras, vialidades y vegetación. Asimismo, otro parámetro considerado en el algoritmo para la ejecución del análisis fue el de considerar un porcentaje de probabilidad de encontrar áreas con una similitud del comportamiento espectral según las muestras semillas (polígonos o ROIs) de al menos 60%.

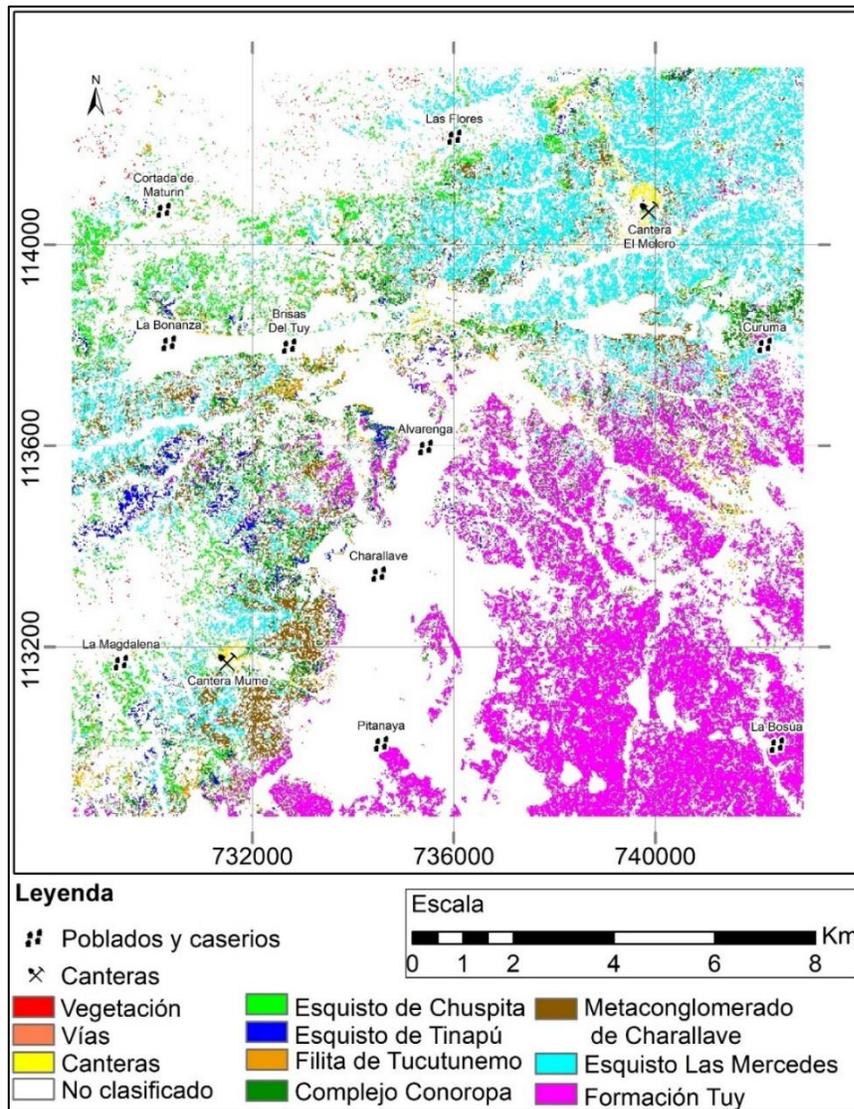


Figura 4.20 Mapa de clasificación no supervisada de ASTER.

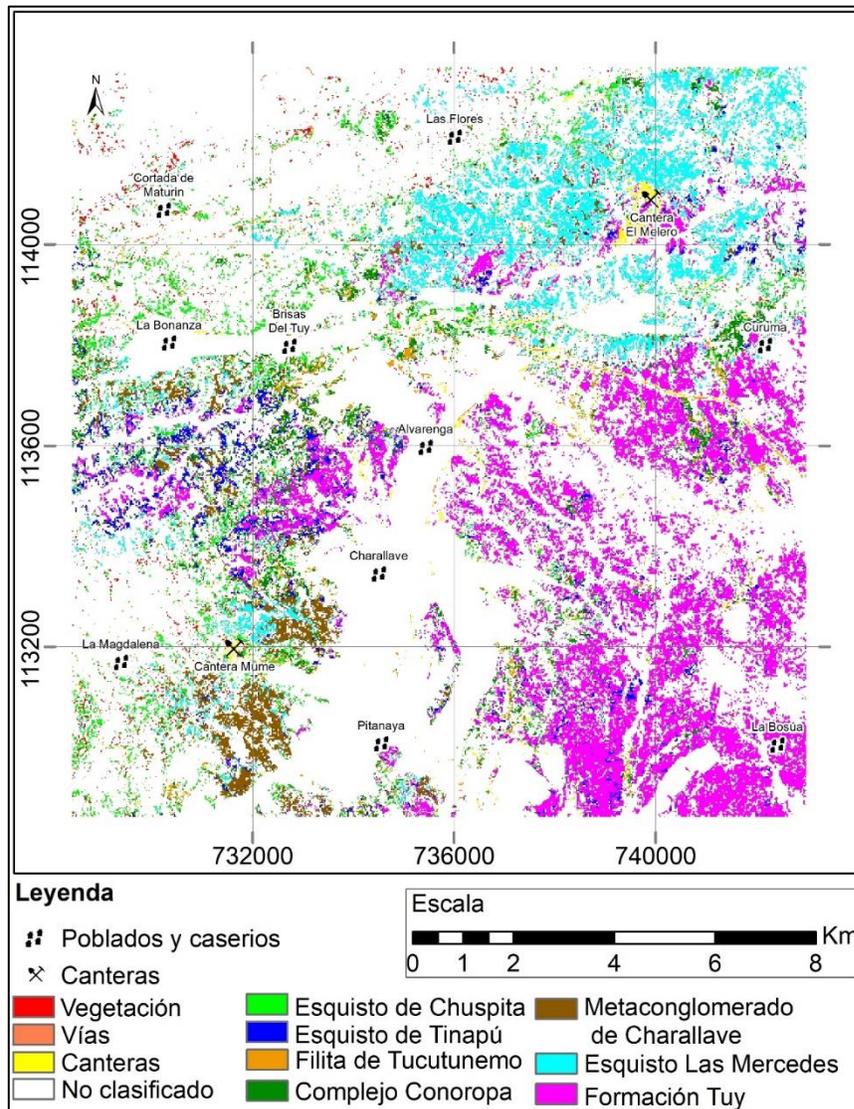


Figura 4.21 Mapa de clasificación supervisada del sensor OLI del satélite Landsat 8.

Según la Figura 4.20 y 4.21, la unidad geológica que abarca mayor área es la formación Tuy ubicándose al sur de Curuma y de noreste a sureste de Pitanaya. Otro rasgo importante observable en ambos productos se asocia a la predominancia del Esquisto Las Mercedes al noreste y el Esquisto de Chuspita al noroeste. Por otra parte, al suroeste, específicamente al sur de Brisas del Tuy y noreste de Pitanaya las unidades que responden mejor al mapa geológico es el Metaconglomerado de Charallave, Filita de Tucutunemo

y Esquisto de Tinapú, aunque, cabe destacar que el nivel de certeza de este último en la clasificación supervisada de Landsat es bajo. Respecto a las vialidades, no se resalta y las áreas de canteras se limitan mucho al área adyacente de donde se estableció el polígono (ROI).

4.2.3.2 Evaluación por medio de firmas espectrales con Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM)

La Figura 4.22 y 4.23 representa los resultados generados.

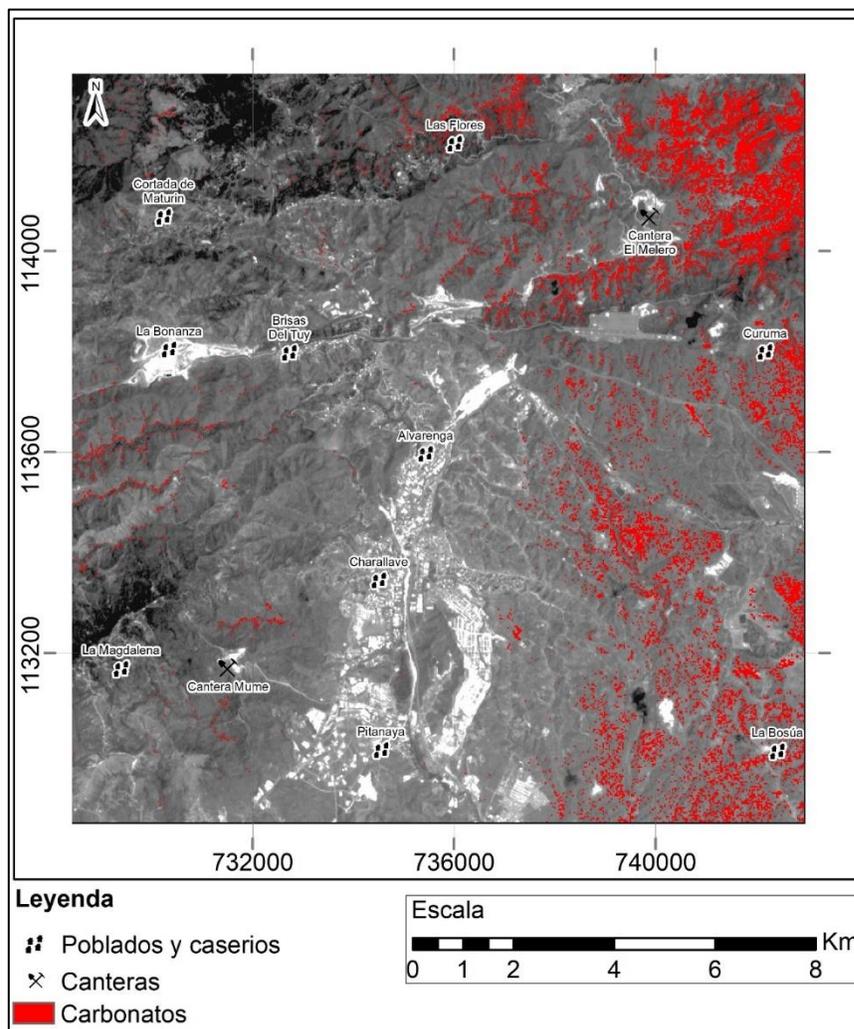


Figura 4.22 Mapa integral del Cartografiado de Ángulo Espectral (SAM).

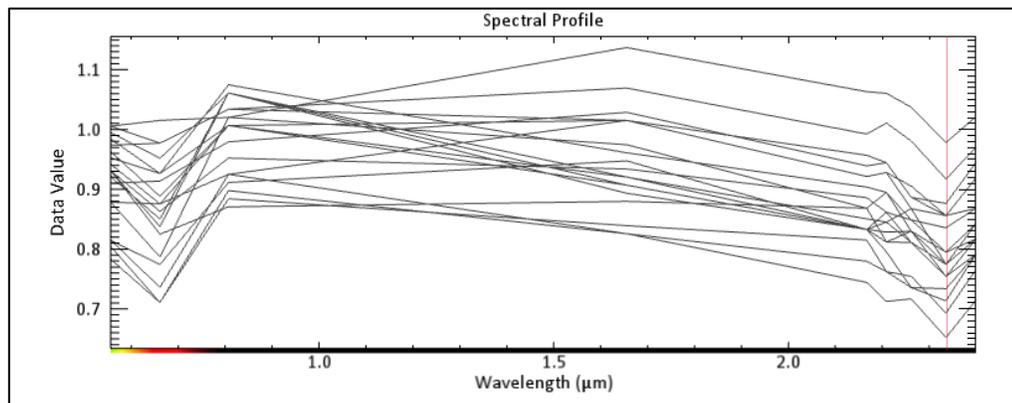


Figura 4.23 Firmas espectrales del área de estudio asociadas a carbonatos.

Para los productos elaborados se preparó una colección con 19 firmas espectrales de la librería de la USGS y de ASTER, contenidas en el *software* ENVI y asociadas a rocas como mármol y caliza y, minerales como dolomita y calcita. Asimismo, El parámetro asociado al ángulo máximo considerado para el SAM, estuvo comprendido en un rango entre 0.07 y 0.3.

Los 19 análisis del cartografiado de ángulo espectral obtuvieron una característica peculiar y fue la similitud en los resultados acerca de las áreas que respondieron al dato ingresado (firma espectral), observándose las mayores respuestas al este de la región de estudio (ver Figura 4.22).

En la Figura 4.23, se muestra una gráfica con 28 firmas espectrales recolectadas en diferentes puntos en la imagen multiespectral de ASTER, específicamente, en las zonas de carbonatos generada en la Figura 4.22. Además, se señala con una línea roja vertical la banda 8, con el cual las rocas carbonáticas se identifican.

CAPÍTULO V

INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de cumplir con el objetivo planteado en el presente trabajo, se describen a continuación los análisis de resultados enfocados a la identificación de zonas que podrían representar un posible yacimiento de caliza. Para ello se trabajó en función de probabilidades, distribuyéndose el 100% en cada análisis generado, tomando como referencia las limitaciones y objetivos logrados en los trabajos asociados (antecedentes) a sensores remotos considerados en esta investigación. Como resultado, se crearon zonas o unidades espectrales con valores altos y medios de probabilidad, descartándose los valores bajos para disminuir el nivel de incertidumbre.

5.1 Interpretación de los productos generados a través de las imágenes multiespectrales

Los análisis de los productos asociados a imágenes multiespectrales de ASTER y Landsat representan el 60% del 100%.

En cada subetapa se generó un mapa de probabilidades según la interpretación realizada de la integración de los resultados de cada procesamiento, que luego fueron incorporados para la elaboración de un mapa final.

La imagen ASTER se consideró más importante que Landsat debido a su mayor resolución espectral, lo que la hace más adecuada para discriminar unidades litológicas y, por ende, reconocer carbonatos.

5.1.1 Comparación y análisis de los mapas de combinaciones de bandas

El análisis de estos subproductos se le atribuyó un valor de 10%, del cual 7% lo conforma ASTER y 3% Landsat.

Al efectuar un análisis visual bajo la combinación de bandas 853 (ASTER) y 731 (Landsat) en los canales RGB y compararlas, se denotaron tres aspectos.

El primero se asocia a las zonas de canteras, en las cuales se definen áreas de colores blanquecinos (que se presentan en la Figura 5.2 en tonos azulados). Esta coloración se observa también en otras zonas de la imagen de ASTER al suroeste de la cantera El Melero (ver Figura 5.1), aspecto que no se aprecia en la imagen Landsat. Una explicación de ello, se encuentra en la diferencia en el año de la toma de las imágenes, en donde estos terrenos de construcciones antrópicas se realizaron movimientos de masa exponiendo la roca fresca que luego sufrió meteorización y se cubrió en parte por la vegetación, recuperando nuevamente las tonalidades observadas en Landsat.

En consideración al color blanco, es contradictorio al comportamiento espectral de los carbonatos, debido a que los mismos absorben las ondas electromagnéticas comprendidas entre 2.31 y 2.35 micrómetros (banda 8 de ASTER). Esto refleja que coexisten rocas con alto contenido de sílice y rocas con alto contenido de CaCO_3 , solo que la resolución espacial del sensor no permite delimitar estos cuerpos geológicos.

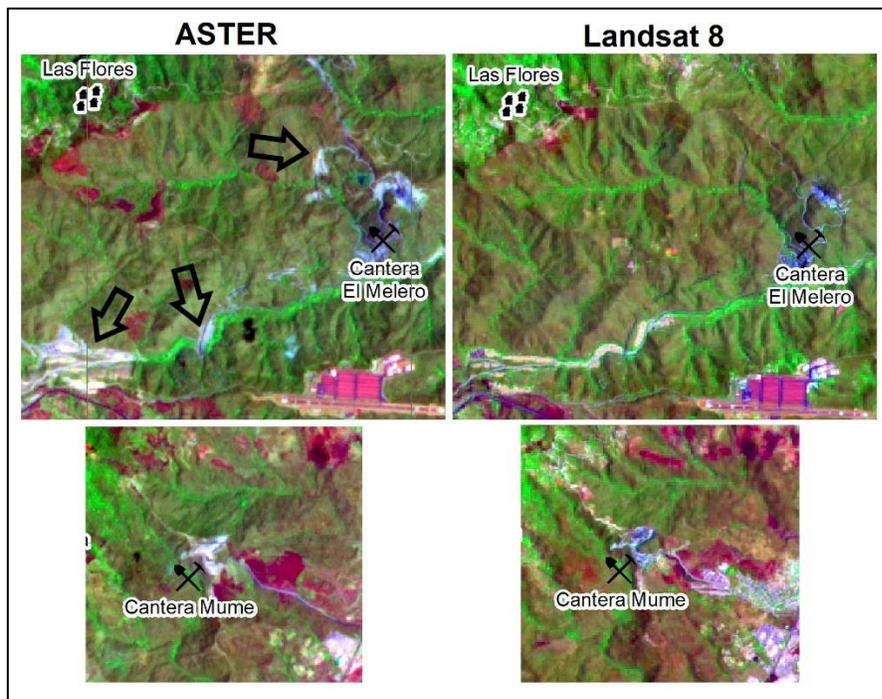


Figura 5.1 Zonas de canteras y aldeañas. Señalización de zonas similares a la cantera El Melero (imagen superior izquierda).

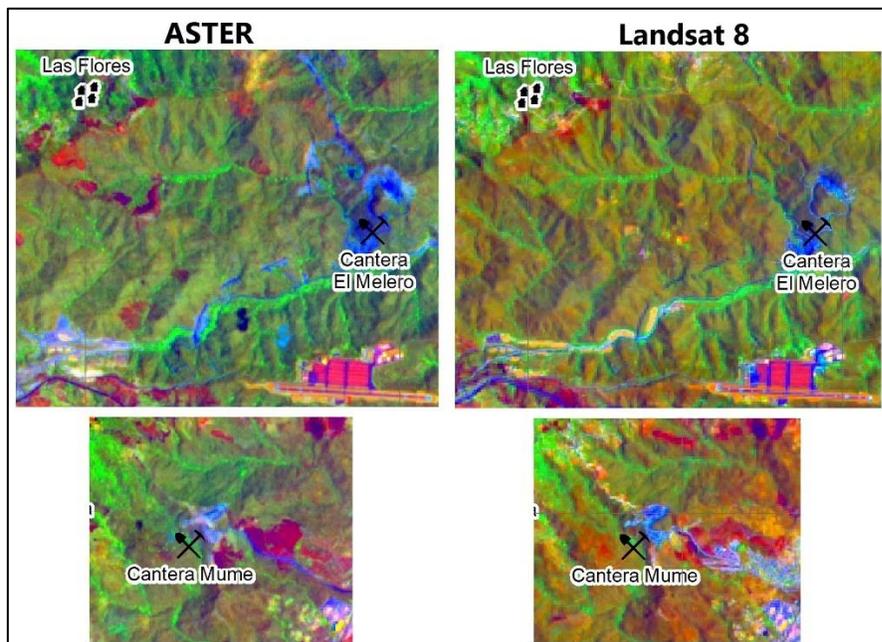


Figura 5.2 Zonas de canteras y aldeañas a las mismas con realce de colores.

El segundo se relaciona a rocas con bajo contenido de carbonatos, constituidas por rocas metaígneas (Complejo Conoropa al noroeste de Curuma), metamórficas (aflorando al norte y sur de Brisas del Tuy) y sedimentarias (formación Tuy al este de Charallave), debido a que se perciben colores marrones rojizos, marrones morados, amarillos y naranja señalados en la Figura 5.3, indicando que las ondas que representan la banda 8 están siendo reflejadas. Por otra parte, se destacan al Sur de Curuma y los alrededores de La Bosúa (formación Tuy) tonalidades verdes azuladas, que a pesar de que no poseen una similitud con la de los alrededores de las canteras (con una tonalidad marrón verdoso), puede ser respuesta a caliza con una composición química distinta.

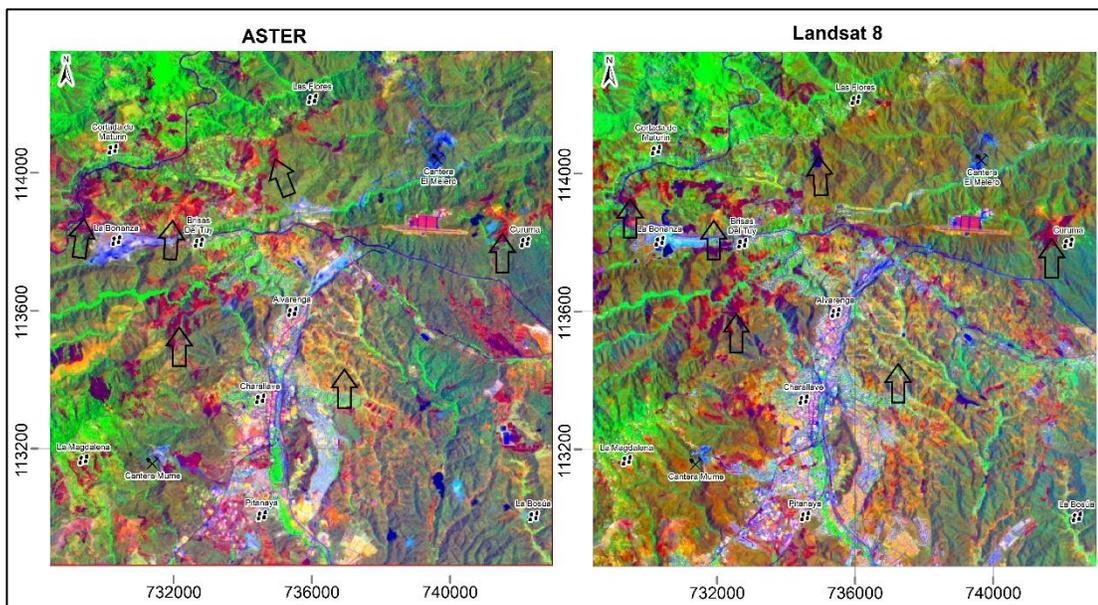


Figura 5.3 Afloramientos de cuerpos litológicos (marrón oscuro – rojizo - amarillento) no asociado a carbonatos.

El tercer aspecto contempla el tipo de vegetación, para el cual se observa vegetación tipo estresada a los alrededores de las canteras y sana al norte de la Magdalena y norte de La Bonanza (ver Figura 5.4), revelando un cambio litológico. Al tener en cuenta esta característica, se estableció una probabilidad baja de encontrar calizas para los terrenos con un buen desarrollo

de la vegetación, aunque, no se descarta que existan afloramientos de rocas con alto contenido en carbonato de calcio, solo que no pudieron ser captados por los sensores debido al área que abarca en superficie, como es el caso del mármol de Los Colorados perteneciente al Esquisto de Las Mercedes. Otras zonas con las mismas características, son las ubicadas en los cauces (ver Figura 5.4), sin embargo, sobre estas pudiera haber algunos afloramientos de interés para el estudio. Para finalizar, las regiones con expectativas altas se localizaron en la parte baja de la ladera sur de la fila la Magdalena, en el cual está ubicada la cantera Mume y, además, la zona comprendida entre Las Flores y Curuma (descartando las áreas marrones rojizas previamente mencionadas), en el cual se encuentra la cantera El Melero y al sur de La Bonanza.

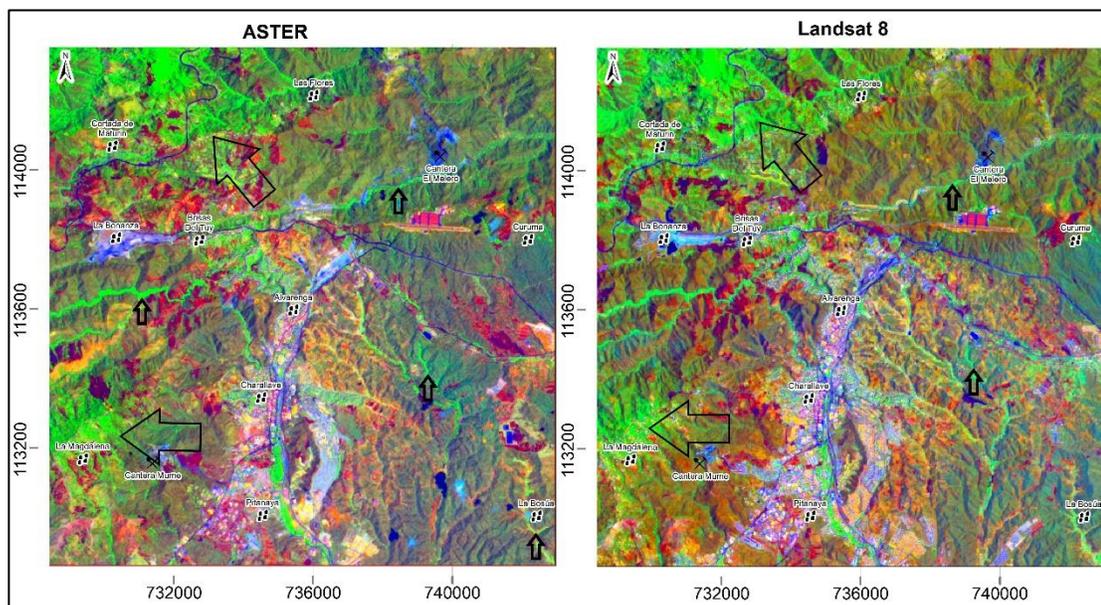


Figura 5.4 Áreas con una la vegetación sana.

Tomando en cuenta los aspectos anteriormente descritos, se integró la información de ASTER y Landsat para definir las áreas que cumplen con las características para que se encuentren posibles yacimientos de calizas según las probabilidades establecidas. Aquellas que poseen el 10% son las zonas donde se interceptó la interpretación de ambas imágenes satelitales (ver

Figura 5.5), destacándose entre ellas, los alrededores de la cantera El Mero, norte de Mume y sur de Curuma.

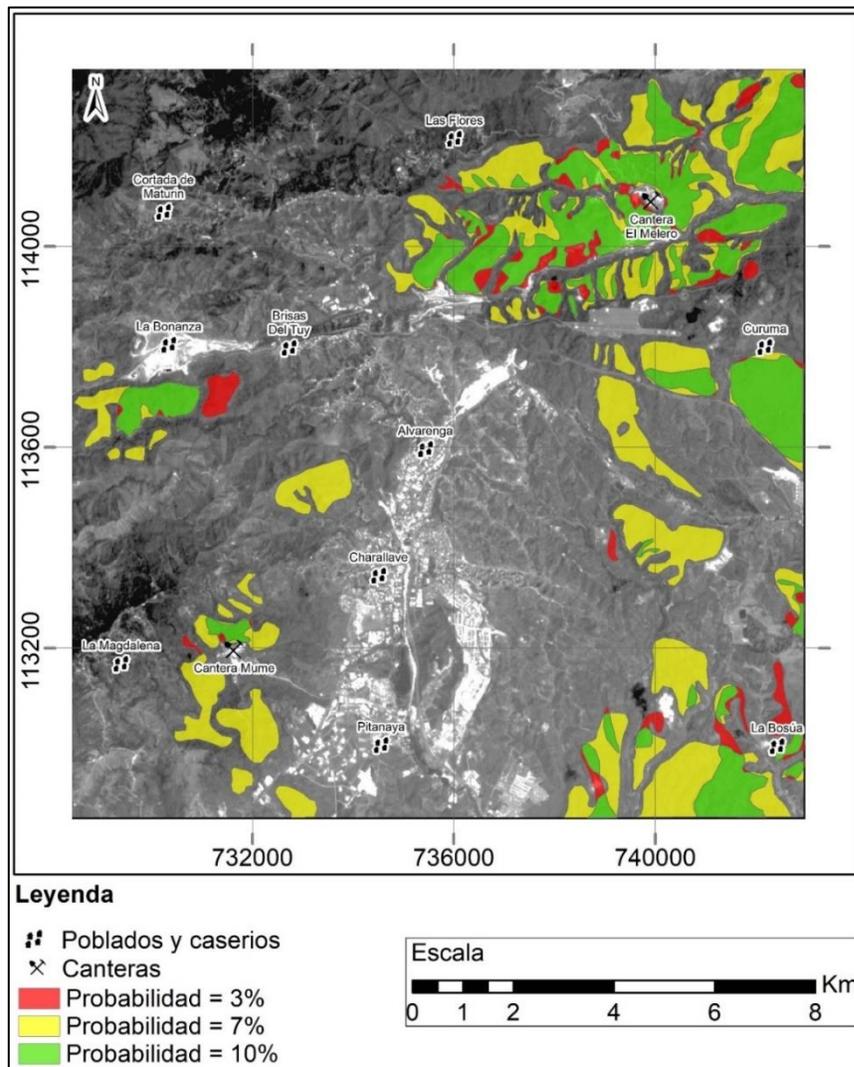


Figura 5.5 Mapa parcial de áreas con calizas según el análisis de las combinaciones de bandas y un máximo de probabilidad de 10%.

5.1.2 Comparación y análisis de los mapas asociado a las matemáticas de bandas

Este análisis constituyó el 25% de la probabilidad total y se distribuyó según el nivel de incertidumbre que los resultados pudieron generar. Para

aquellos resultados en los que se depositó una mayor confianza, se les asignó un 5% como los siguientes índices:

- Carbonatos (SWIR)
- Calcita
- Dolomita (específicamente, la que constituye la banda 2 del VNIR)
- Carbonatos, epidota y clorita

Por otro lado, para los resultados en los que no se tuvo seguridad, se le atribuyó un 2,5%. La razón de esta asignación se debe a que tanto el índice del carbonato asociado al TIR como el de dolomitas (que no contempla la banda del VNIR) definen extensas áreas ricas en carbonatos, como si se tratase de una litología uniforme cuando en realidad no lo es.

Para la interpretación de los resultados, se dividieron tres regiones. La primera ubicada al norte (ver Figura 5.6), donde se observa la similitud espectral de todas las matemáticas establecidas para la identificación de carbonatos al noreste de la cantera El Melero. Sin embargo, esto no aplica para otras áreas, como al noreste del poblado de Las Flores y norte de la Cortada Maturín, donde el índice del carbonato asociado al TIR (verde) y de la calcita (rojo) definen un terreno carente de carbonatos. Lo mismo sucede al sur de dicha cantera, en el cual el índice de la calcita no arrojó concentraciones importantes del mineral.

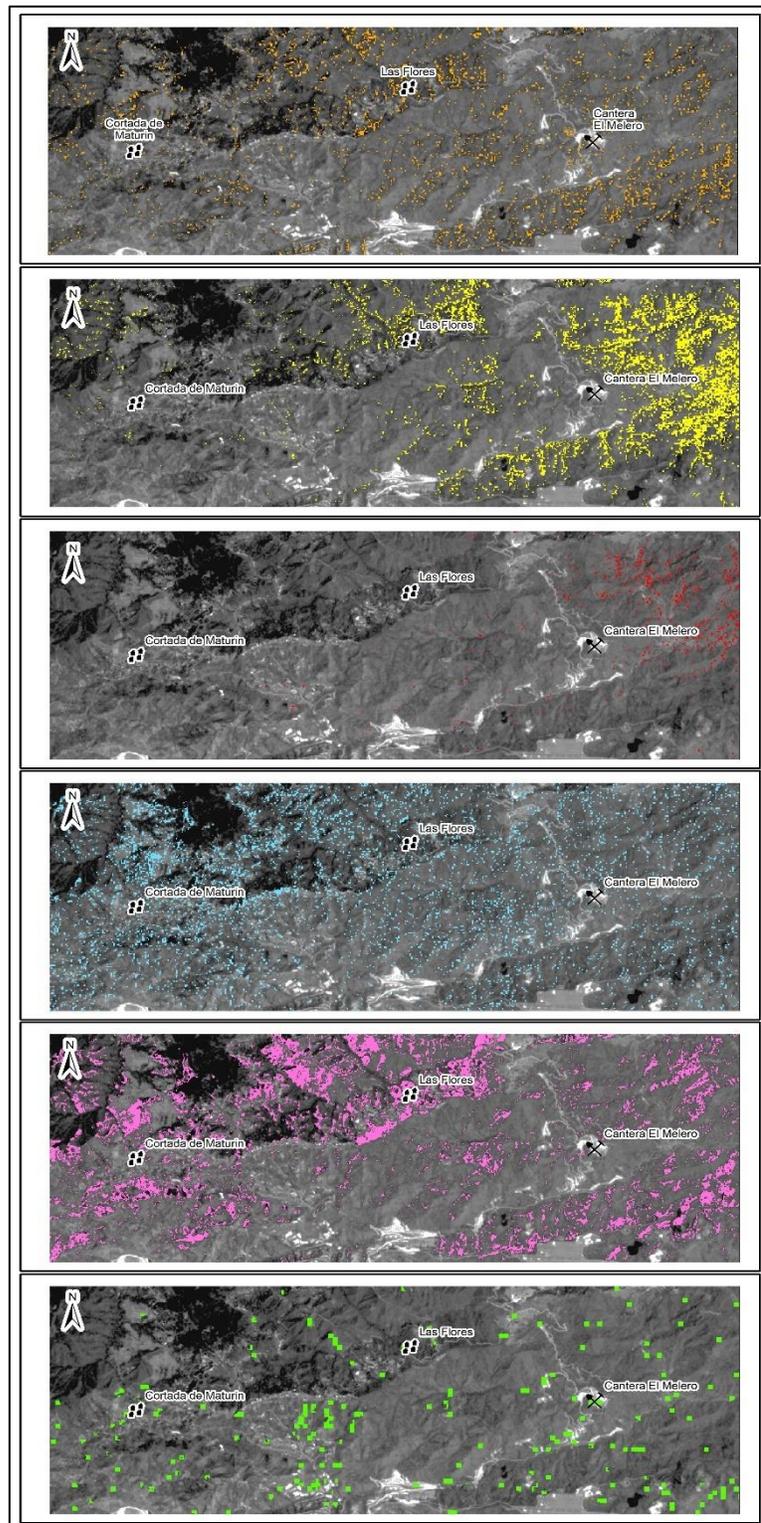


Figura 5.6 Comparación de las respuestas espectrales al norte de la región.

La segunda se ubica al suroeste (ver Figura 5.7). En esta región, se hace notable la carencia de las respuestas del mineral calcita y el índice de carbonatos. A pesar de esto, hay áreas de interés muy cercanas a la cantera Mume, tanto al norte y sur de la misma. Cabe destacar que hay una distribución de la respuestas orientadas noreste - suroeste en los altos topográficos al norte de La Magdalena, específicamente en la ladera norte de dichas elevaciones.

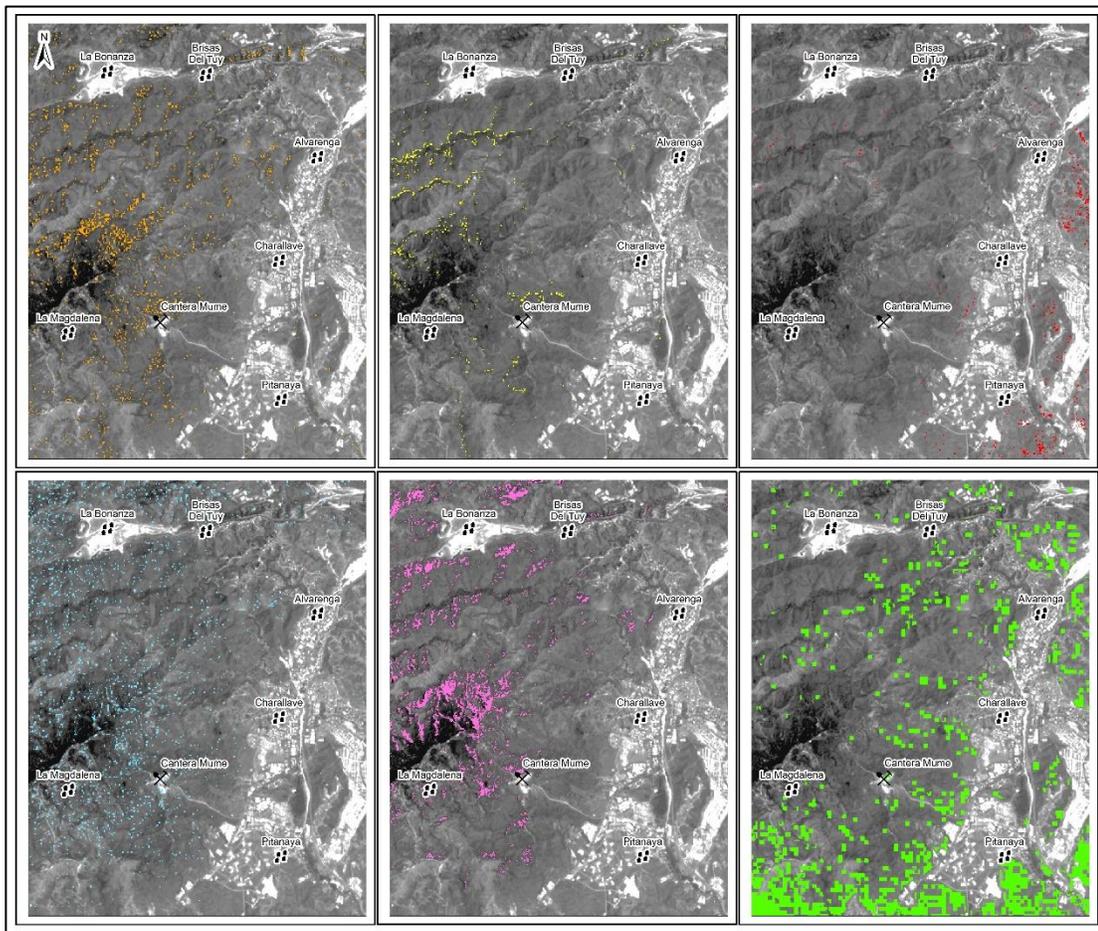


Figura 5.7 Comparación de las respuestas espectrales al suroeste de la región.

Por último, tenemos la tercera región (ver Figura 5.8) ubicada al sureste, en el cual las mejores respuestas se centran en el índice de la calcita (rojo) y carbonatos en el TIR (verde), seguido del índice de carbonato en el SWIR (amarillo). En cuanto a los demás, no se obtuvo respuestas significativas. Al observar con detalle, se identifican posibles afloramientos de calizas al sureste de Curuma y alrededores de La Bosúa.

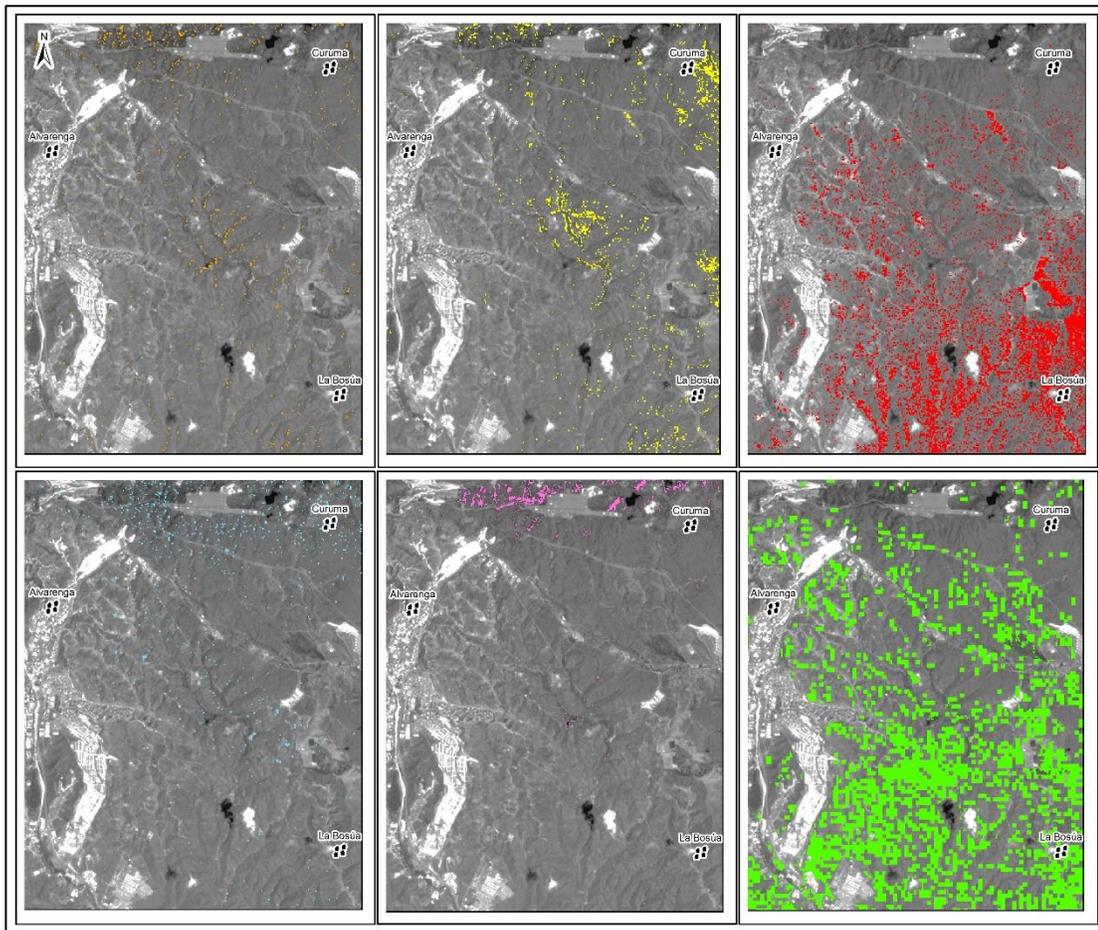


Figura 5.8 Comparación de las respuestas espectrales al sureste de la región.

Al considerar las características anteriormente descritas, se definió polígonos alrededor de las respuestas espectrales de cada uno de los índices con el fin de interceptarlos y obtener un mapa con 5 probabilidades (ver Figura 5.9), teniendo en cuenta que se tomó únicamente las que se encontraban por encima del 15% para aumentar de nivel de certeza en el resultado final.

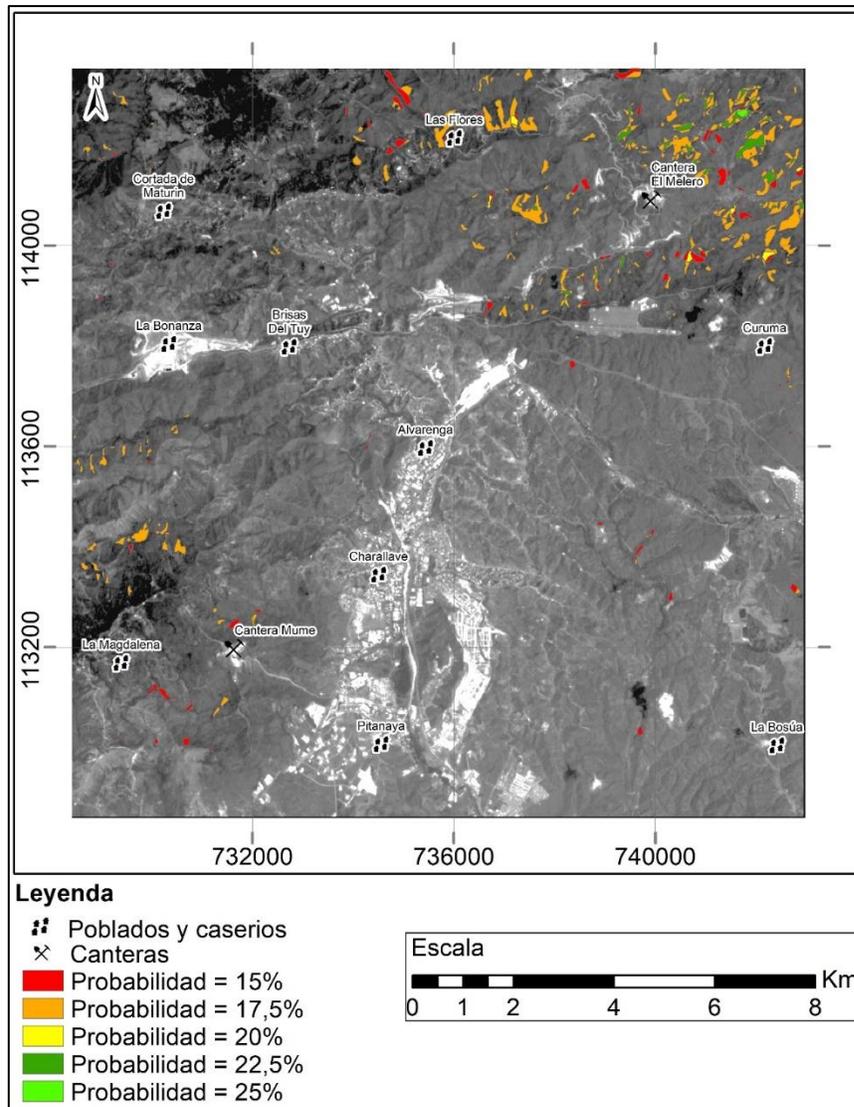


Figura 5.9 Mapa parcial de áreas con calizas según el análisis de la matemática de bandas y un máximo de probabilidad de 25%.

Según la Figura 5.9, la mayor probabilidad de encontrar yacimientos de caliza se encuentra al noreste de la cantera El Melero, resaltando un área con el 25% de la máxima probabilidad considerada en esta subetapa (ver Figura 5.10). Por otro lado, alrededor de la cantera Mume, las mejores probabilidades se reflejaron al norte y al sur (ver Figura 5.10), aunque, el máximo de probabilidad alcanzada es de apenas 17.5%. Finalmente, al sureste de la zona de estudio conformada por la unidad geológica Formación Tuy, las probabilidades tienden a ser muy bajas, a excepción de pequeñas zonas al sur de Curuma y noreste de La Bosúa, como se señala en la Figura 5.10.

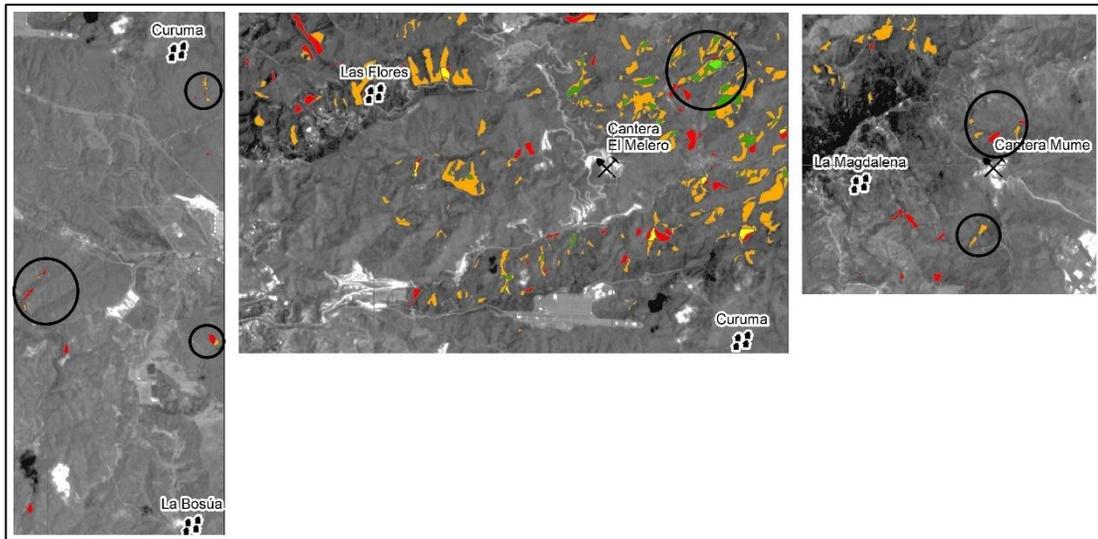


Figura 5.10 Áreas de mayor interés (en círculos) según el análisis de las combinaciones de bandas. La imagen de la izquierda se encuentra la forma parte de la formación Tuy, en la imagen central las adyacencias de la cantera El Melero y la imagen de la derecha los alrededores de la cantera Mume.

5.1.3 Comparación y análisis de los mapas de clasificación no supervisada (K means) y supervisada (máxima verosimilitud)

En esta subetapa de análisis, se asignó un 15% del total, distribuyéndose de la siguiente manera:

- Un 10% se destinó a la clasificación supervisada.

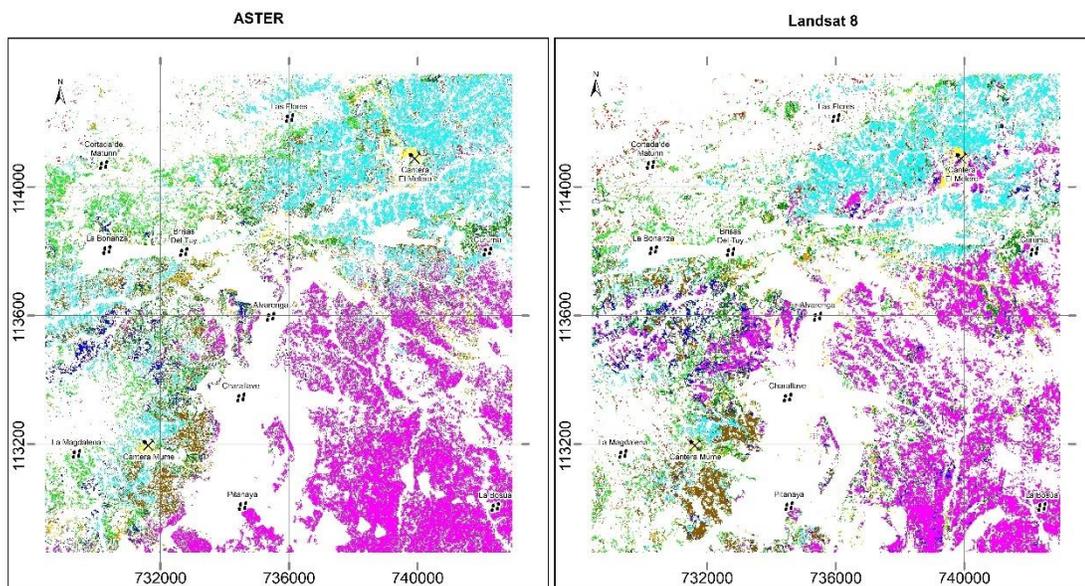


Figura 5.12 Comparación de la clasificación supervisada realizada en ASTER y Landsat.

Aunque, el esquisto de Chuspita y el esquisto de Las Mercedes se cartografían de manera distinta. La explicación se encuentra en el hecho de que el procesamiento de las imágenes satelitales no contempla muchos factores, como la edad de las rocas, limitándose al comportamiento espectral del terreno. Es importante destacar que en ASTER fue más discriminatorio en encontrar valores similares respecto a Landsat.

La observación de la distribución espacial de las clases permitió definir 2 unidades espectrales descritas a continuación:

- Asociada al área de cantera: en la clasificación no supervisada se agrupó las clases 6 y 9 para ASTER y, 7,8,9 y 10 para Landsat (ver Figura 5.13). Ambos sensores mapean de manera similar la unidad, definiéndola con una gran extensión al sureste (señalada con una flecha en la Figura 5.13). Asimismo, esta área de cantera es correlacionable con la formación Tuy y con la clase que lleva por el mismo nombre en la clasificación supervisada (máxima verosimilitud). Esto sugiere la

existencia de posibles yacimientos carbonáticos. Por otro lado, se observan respuestas similares alrededor de las canteras (indicada con círculos en la Figura 5.13), generando un mayor interés debido a su cercanía a una zona económicamente rentable para la explotación.

Sin embargo, al considerar el área de cantera previamente descrita y compararla con la delimitada por la clasificación supervisada, se aprecia una diferencia significativa, siendo más estricta y arrojando como resultado, zonas destacables marcadas en círculos en la Figura 5.14. Esto depositó un menor grado de incertidumbre en cuanto a la aplicación de dicho procesamiento. Aunque, para el mismo, se descartó las respuestas que forman un alineamiento adyacente a la clase de vialidades en la imagen Landsat (indicada dentro de un rectángulo en la Figura 5.14), debido a que ASTER no lo refleja.

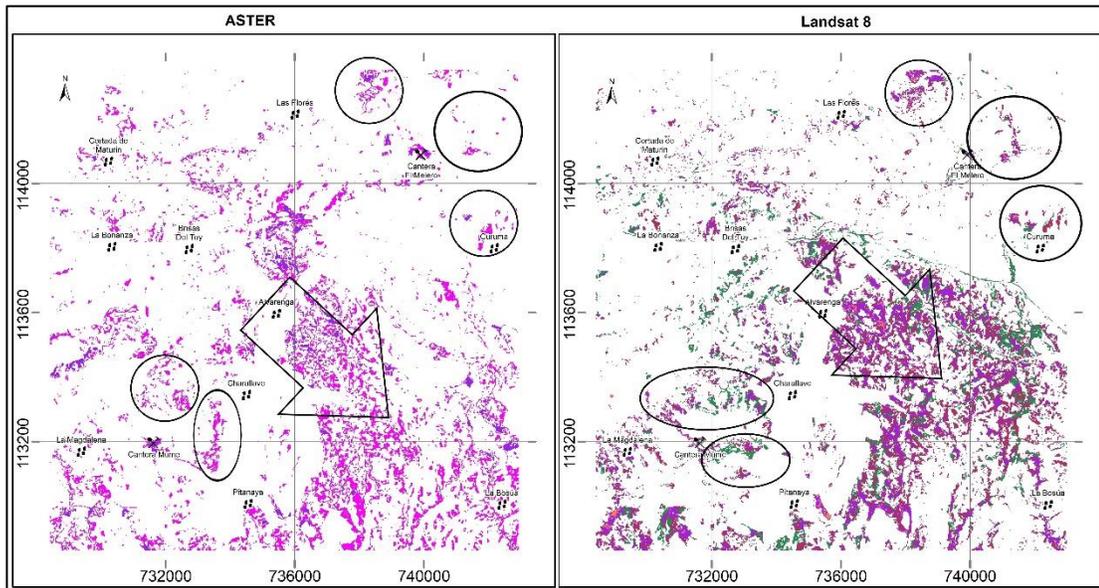


Figura 5.13 Clases de la clasificación no supervisada asociada al área de cantera en ASTER y Landsat.

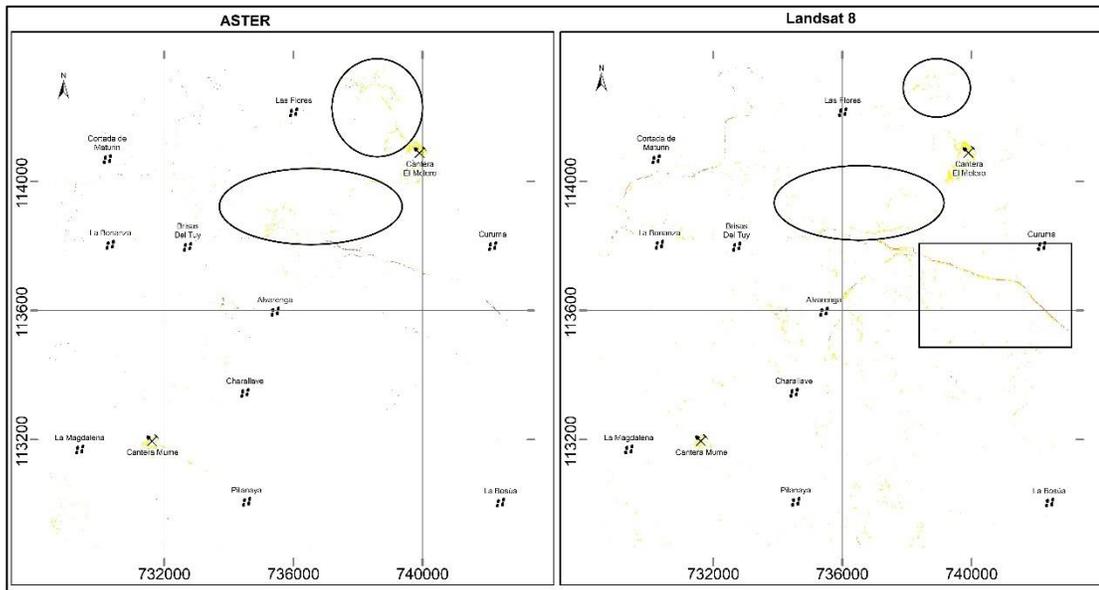


Figura 5.14 Clase de la clasificación supervisada asociada al área de cantera en ASTER y Landsat.

- Relacionada al entorno de canteras: se definió por las clases 1, 2 y 3 para ASTER, y 2, 3, 4 y 6 para Landsat (ver Figura 5.15) en la clasificación no supervisada, presentando una distribución general heterogénea con una mayor predominancia al noreste y suroeste, específicamente en los recuadros indicados en la Figura 5.15, además, en alguna parte se dispone en forma de bandas orientadas noreste – suroeste al sur de La Bonanza, indicada con una flecha en la Figura 5.15). Al comparar este resultado con la relacionada al comportamiento espectral del Esquisto de Las Mercedes en la clasificación supervisada (máxima verosimilitud), se puede notar una mayor discriminación de este último, aunque, se conservan las características más importantes descritas anteriormente (englobada en círculos en la Figura 5.16).

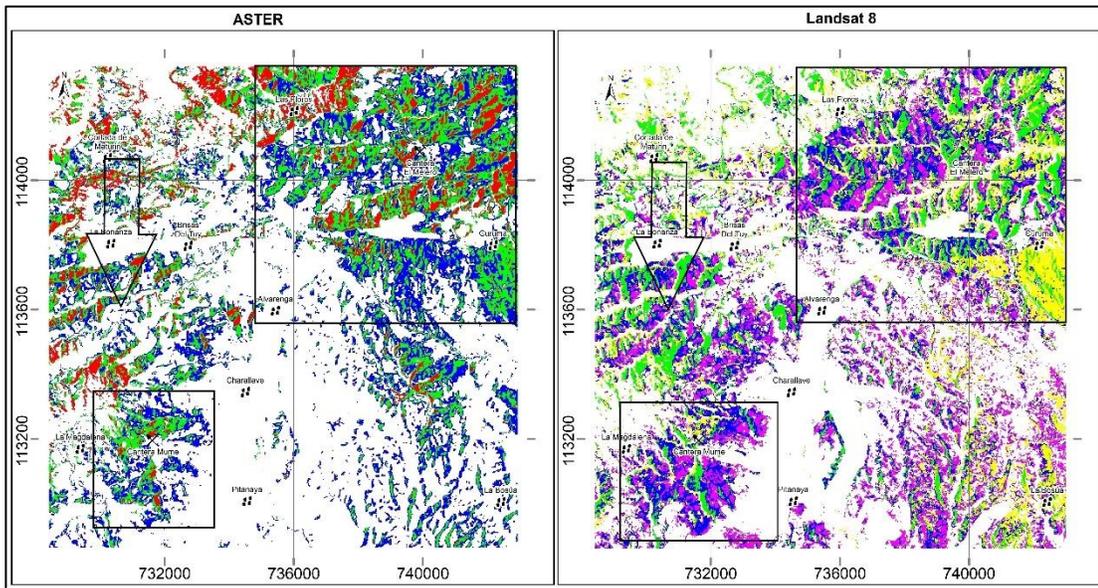


Figura 5.15 Clases de la clasificación no supervisada asociada al área de entorno de cantera en ASTER y Landsat.

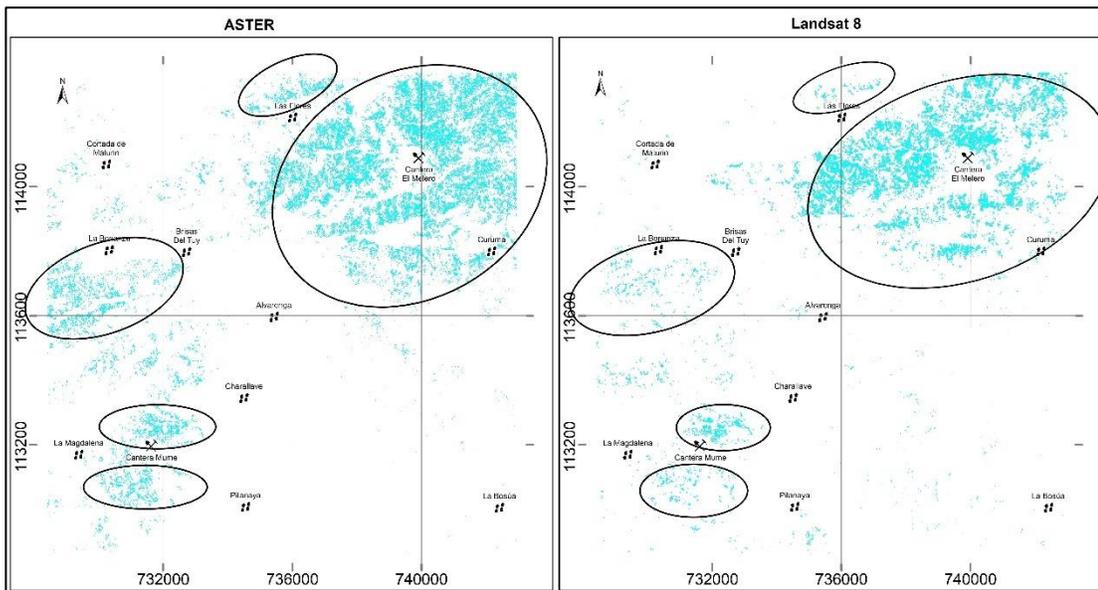


Figura 5.16 Clase de la clasificación supervisada asociada al área de entorno de cantera en ASTER y Landsat.

El análisis integrado (ver Figura 5.17) permitió definir zonas con una alta probabilidad (15%) de encontrar rocas con carbonato de calcio. Estas zonas se encuentran principalmente en las unidades geológicas conocidas como Esquisto de Chuspita (al sur de la Bonanza y sur de la cantera El Melero) y el Esquisto las Mercedes (de noreste a noroeste de la cantera El Melero). No obstante, hay otras áreas importantes al noreste y suroeste de la cantera Mume, aunque existe una disyuntiva, gran parte de estas áreas se localizan sobre el metaconglomerado de Charallave, en el cual no se reportan considerables afloramientos carbonáticos más que la propia cantera. Por lo tanto, se dedujo que existen cuerpos de roca de la unidad geológica adyacente (Filita de Tucutunemo) que afloran sobre estas zonas. También es posible que se trate simplemente de un miembro de la unidad con las mismas características de las rocas económicamente rentable de la cantera.

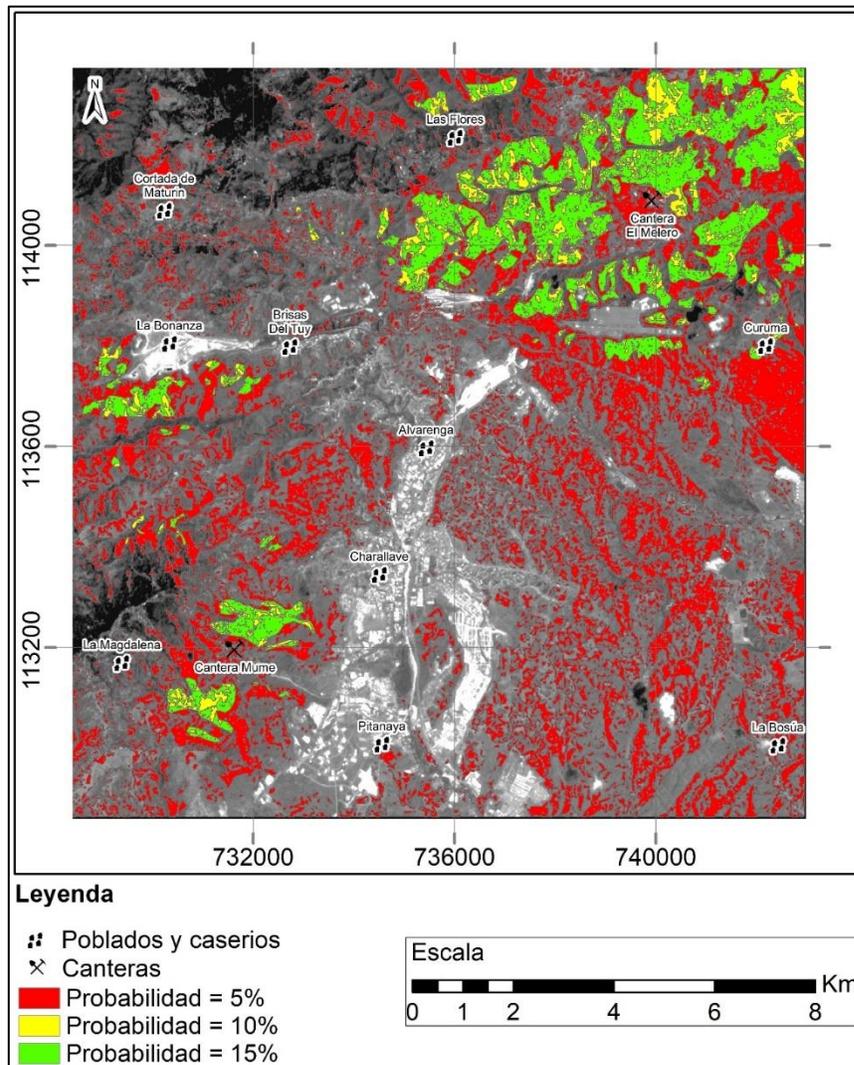


Figura 5.17 Mapa parcial de áreas con calizas según el análisis de clasificación supervisada (Máxima verosimilitud) y no supervisada (k means) con un máximo de probabilidad de 15%.

5.1.4 Análisis de los mapas de clasificación supervisada (SAM)

Esta subetapa constituye solo el 10% del análisis total de las imágenes satelitales, resaltando el alto valor que tienen las firmas espectrales para la cartografía de unidades litológicas.

En la Figura 4.22, se aprecia que los mejores resultados se obtuvieron al este de la región, especialmente en la zona este de El Melero, donde se encontraron grandes respuestas al comportamiento espectral de la caliza, dolomía y mármol. Al sur de Curuma, la densidad de las respuestas espectrales disminuye. Por otro lado, al suroeste, específicamente al norte y sur de la cantera Mume y al sur de La Bonanza, se denotan algunos resultados que siguen la orientación del drenaje, lo que puede indicar la presencia de roca carbonática expuesta o vegetación. Es importante recordar la gran afinidad que tiene la vegetación con el carbonato en cuanto a comportamiento espectral se refiere.

Se identificaron 5 grupos de rocas carbonáticas en función de las firmas espectrales recolectadas de la Figura 5.23. Estos grupos presentan una particularidad asociada a la absorción de la banda 8 de ASTER, pero que se diferencian entre sí de acuerdo a las características descritas a continuación.

El primer grupo se definió como roca caliza o mármol, ya que ambas litologías poseen un mismo comportamiento espectral, visualizada en la Figura 5.18. El segundo grupo (ver Figura 5.19) está conformado por rocas ricas en carbonatos con concentraciones importantes de cuarzo y moscovita, diferenciándose de los demás debido a la absorción en la banda 6. Asimismo, este grupo puede estar relacionado a los esquistos calcáreos característico de la unidad geológica del Esquisto de Las Mercedes. Sin embargo, en la unidad sedimentaria (Formación Tuy), este comportamiento puede estar relacionado a rocas como arenisca, lutita o limolita, así como también a cuerpos cuaternarios constituidos por sedimentos ricos en sílice y micas.

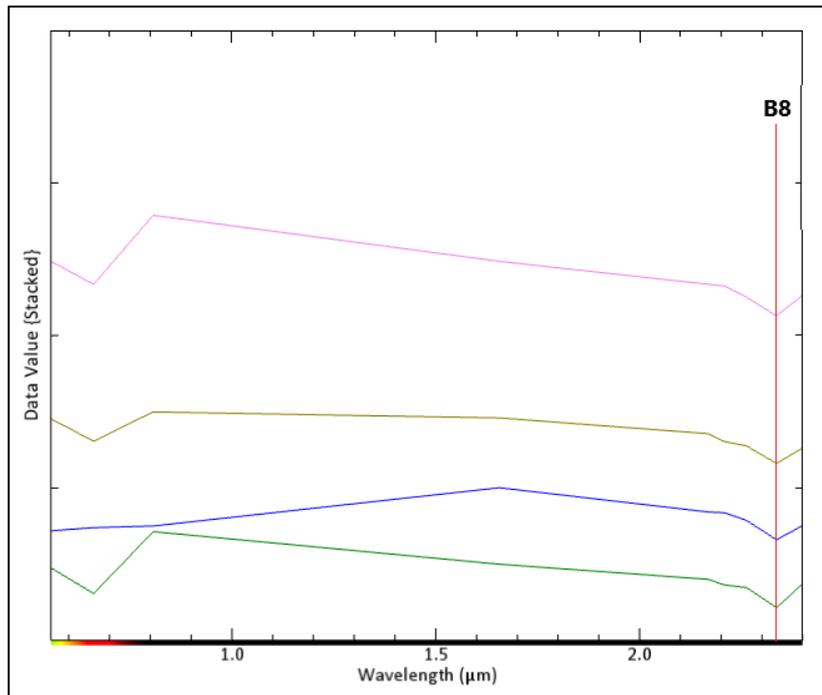


Figura 5.18 Grupo asociado a calizas o mármoles.

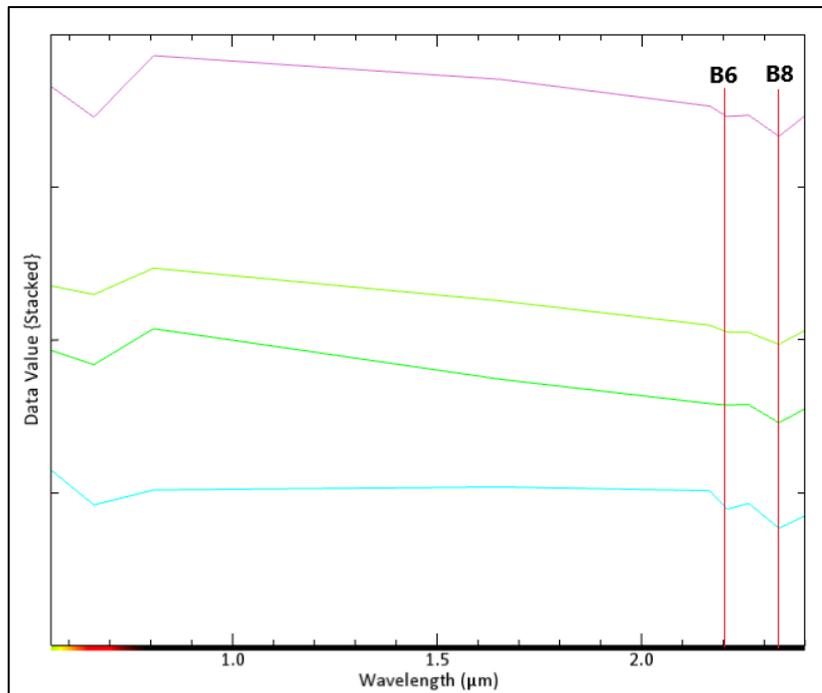


Figura 5.19 Grupo asociado a rocas carbonáticas con minerales de muscovita y cuarzo.

Por otro lado, el tercer grupo (ver Figura 5.20), se denominó como calizas o mármoles impuros ya que no se pudo determinar el mineral que diera explicación a la absorción en la banda 5.

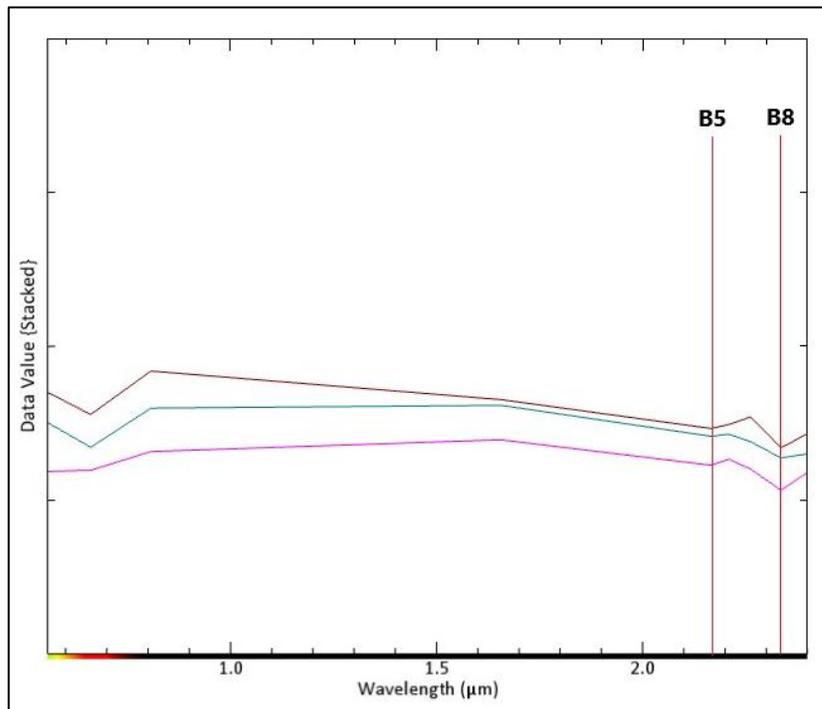


Figura 5.20 Grupo asociada a calizas o mármoles impuros.

El cuarto grupo se definió como dolomías, que poseen la particularidad de tener un pico de absorción entre los 2.31 y 2.33 micrómetros, por lo que, absorben la banda 8 y la banda 7 de ASTER, como se observa en la Figura 5.21. Por otra parte, el quinto grupo de dolomías impuras, presentan el mismo fenómeno observado en el grupo de las calizas impuras, absorbiendo en la banda 5 (Figura 5.22). Para este último, no se logró reconocer la razón de dicha anomalía en la firma espectral.

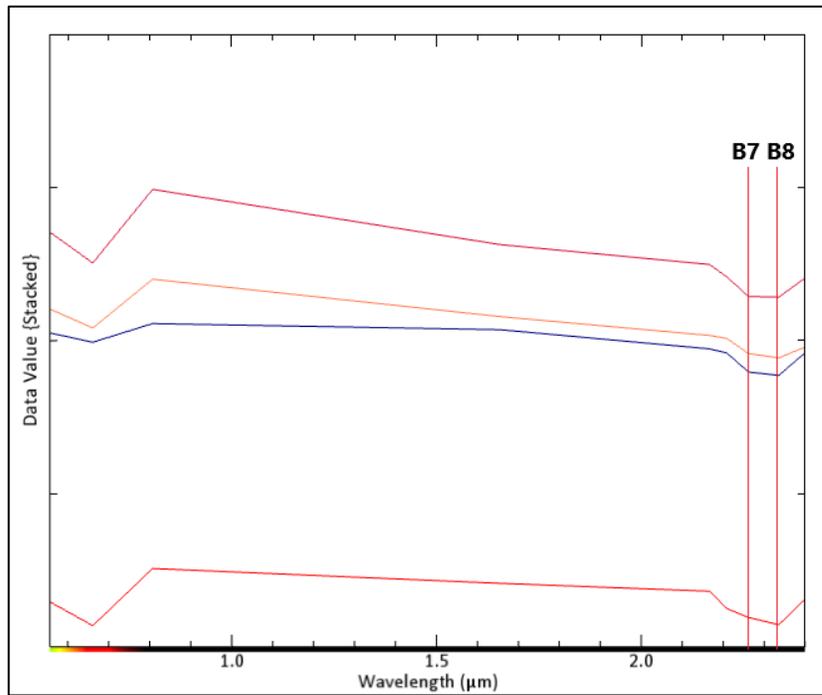


Figura 5.21 Grupo asociado a dolomía.

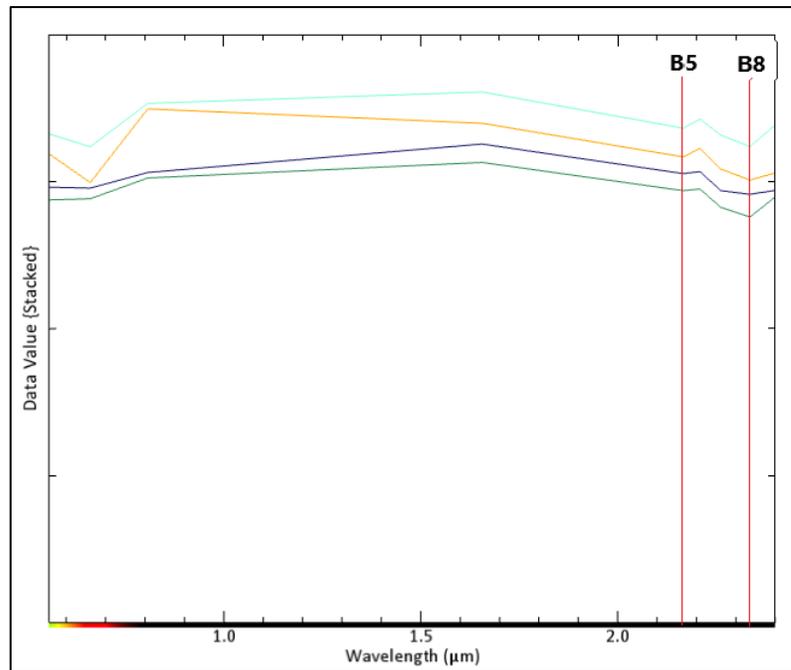


Figura 5.22 Grupo asociado a dolomías impuras.

5.1.5 Integración general del procesamiento de la data satelital

Después de integrar todos los análisis de resultados, se obtuvo un mapa con tres unidades espectrales. Estas unidades se definieron por un rango de probabilidades que se clasifican como bajo, medio y alto (ver Figura 5.23).

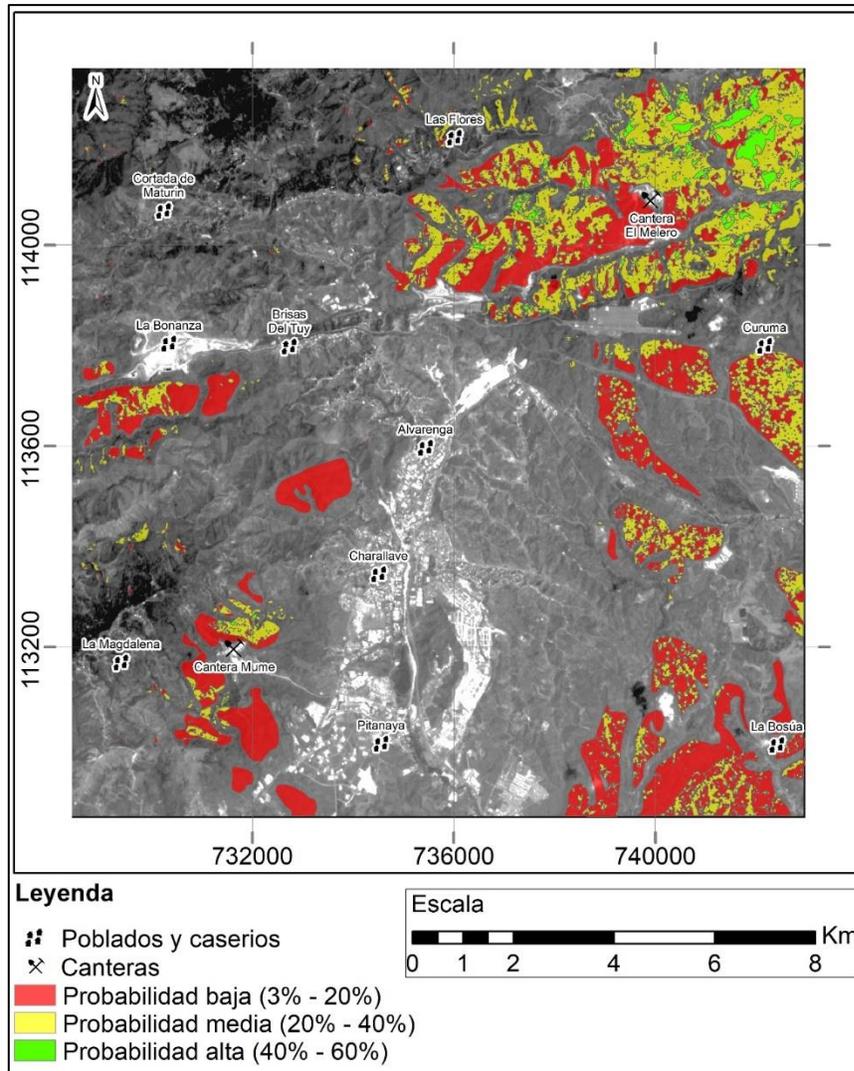


Figura 5.23 Mapa parcial de áreas con posibles yacimientos de caliza según el análisis de imágenes satelitales con un máximo de probabilidad de 60%.

La Figura 5.23 muestra que las mejores respuestas a las diferentes metodologías aplicadas se encuentran al noreste de la cantera de El Melero, definida como el grupo A (ver Figura 5.24). Por otro lado, al sur y oeste de la cantera se denotan buenas probabilidades definidas como el grupo B, pero con áreas de menor tamaño.

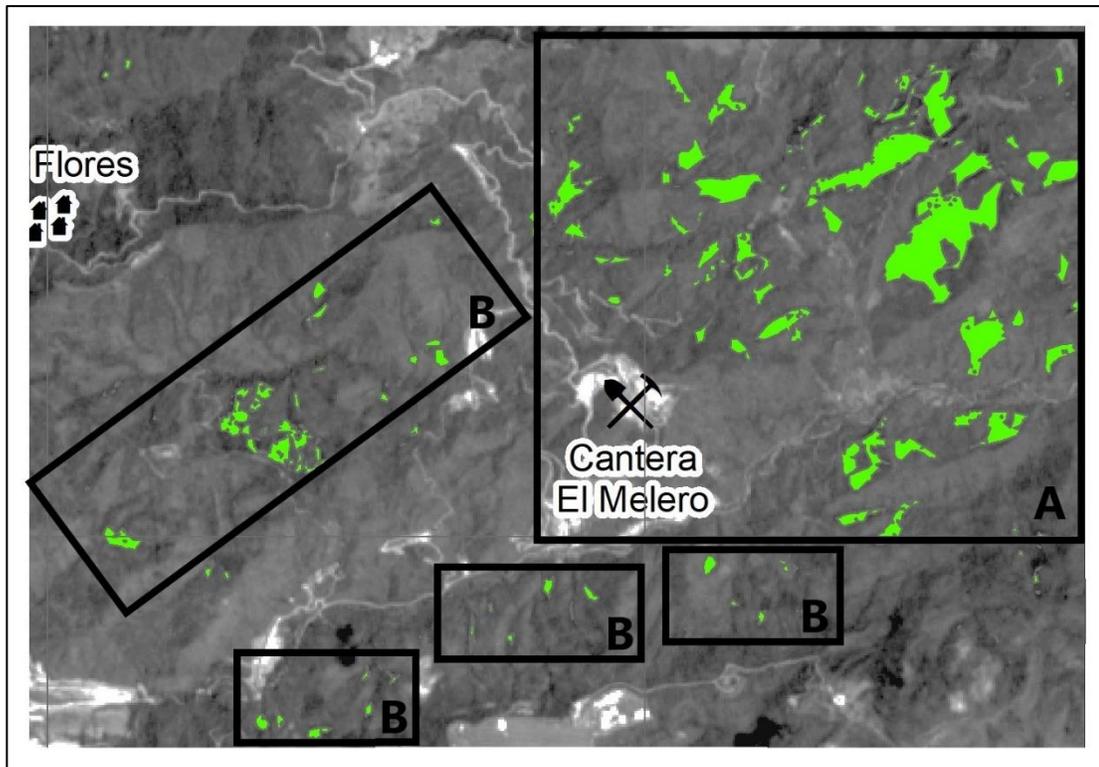


Figura 5.24 Grupos de áreas (A y B) con una probabilidad alta de encontrar yacimientos carbonáticos alrededor de la cantera El Melero.

En cuanto a la cantera Mume, las áreas con una probabilidad alta de encontrar calizas son escasas, lográndose apenas apreciar al norte y sur siguiendo la orientación del drenaje presente en el lugar (Figura 5.25). A pesar de esto, al norte de la cantera se encuentra una gran área con una probabilidad media generando zonas de interés.

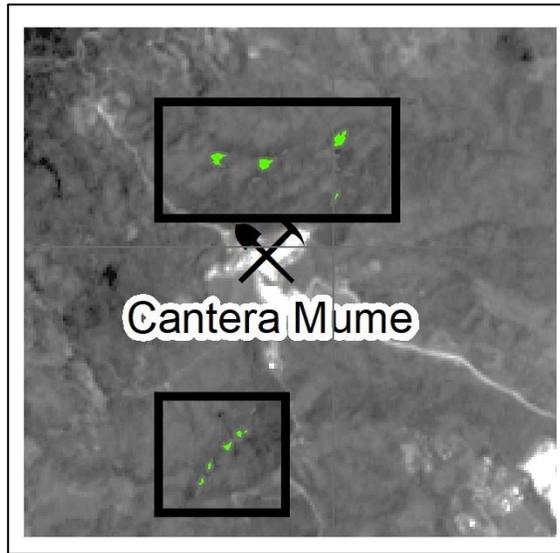


Figura 5.25 Grupos de áreas (rectángulos) con una probabilidad alta de encontrar yacimientos carbonaticos alrededor de la cantera Mume.

Otros lugares, muy alejados de las canteras previamente mencionadas, respondieron muy bien al análisis por medio de imágenes satelitales (Figura 5.26). Aunque, estas no poseen grandes extensiones, por lo que, no se puede determinar con certeza la existencia de grandes yacimientos de caliza.

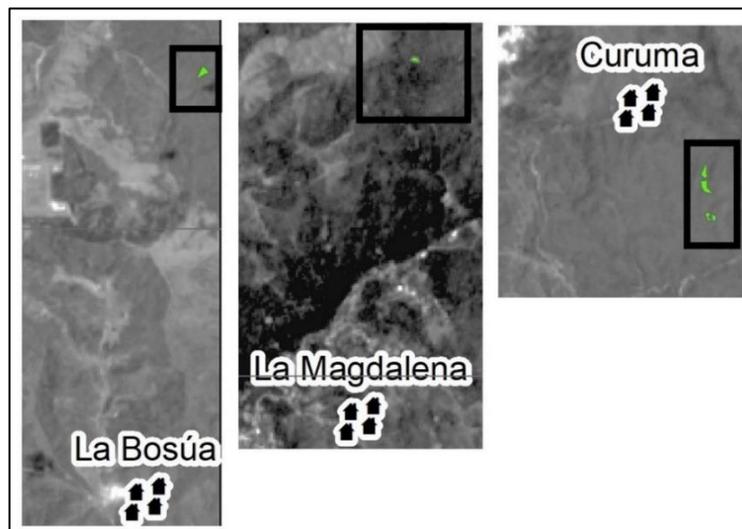


Figura 5.26 zonas con una probabilidad alta de encontrar yacimientos carbonáticos lejanos a las canteras El Melero y Mume.

Finalmente, la integración de los análisis de imágenes satelitales asociado al marco geológico regional, permitió determinar que, el Esquisto de Las Mercedes representa el mayor objeto de interés para encontrar yacimientos de caliza, especialmente al norte de la falla de La Victoria (falla Pichao). Luego de esta unidad se encuentra el esquisto de Chuspita.

El Metaconglomerado de Charallave, donde se ubica la cantera de Mume, arrojó respuestas que no fueron las esperadas, siendo probabilidades de moderada a baja.

Para la unidad sedimentaria denominada Formación Tuy, las probabilidades predominantes son al igual de media a baja, aunque no se descarta totalmente la presencia de yacimientos carbonáticos económicamente rentables.

5.2 Interpretación de los productos generados mediante sistema de información geográfica

Esta etapa representó el 40% del análisis total y se enfocó en evaluar las características del relieve para identificar posibles indicios de yacimientos carbonáticos. Asimismo, cada resultado fue analizado de forma individual y se establecieron relaciones para definir zonas de interés con probabilidades medias y altas, con el objetivo de aumentar el nivel de certeza al momento de realizar trabajos de campo.

5.2.1 Integración y análisis de los mapas de unidades topográficas, drenajes, DEM, MDIS, pendientes, orientación de laderas e hipsométrico

Teniendo en cuenta la división de la región en 2 unidades topográficas (ver Figura 4.1), se consideró que la unidad de relieve alto representó un mayor interés, principalmente las filas Magdalena y Sabaneta (ver Figura 5.27), ya que, al tener en cuenta las propiedades de las rocas carbonáticas de poseer

una gran competencia, llega a formar relieves altos con pendientes que pueden llegar a ser abruptas, el cual hace del oeste y norte de la región de estudio, específicamente, los alrededores del Cerro Guatipa, norte de Punta Brava, norte de Alvarenga y norte de Curuma (Figura 4.5), lugares donde se podrían encontrar yacimientos.

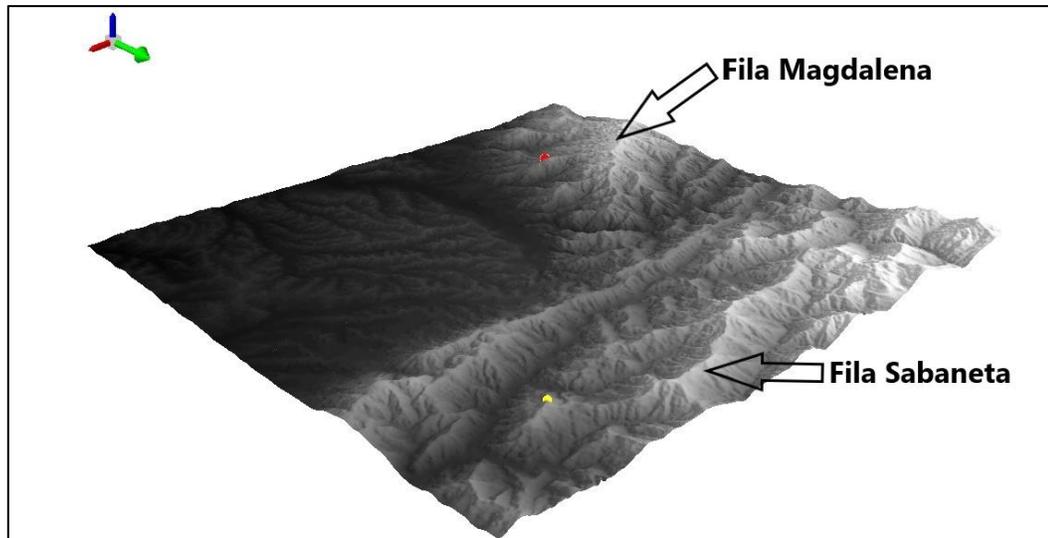


Figura 5.27 Mayores exponentes de la unidad de relieve alto.

Al considerar la ubicación de las canteras, se puede esclarecer según la Figura 5.28 y 4.6, que la morfología de la ladera norte respecto a la ladera sur de las filas es diferente, desarrollándose en esta última, estribaciones más elongadas que pueden llegar alcanzar los 4 kilómetros de longitud. Por lo tanto, gran parte del enfoque de estudio se orienta a dichas formas topográficas ubicadas adyacentes a las canteras (ver Figura 5.28).

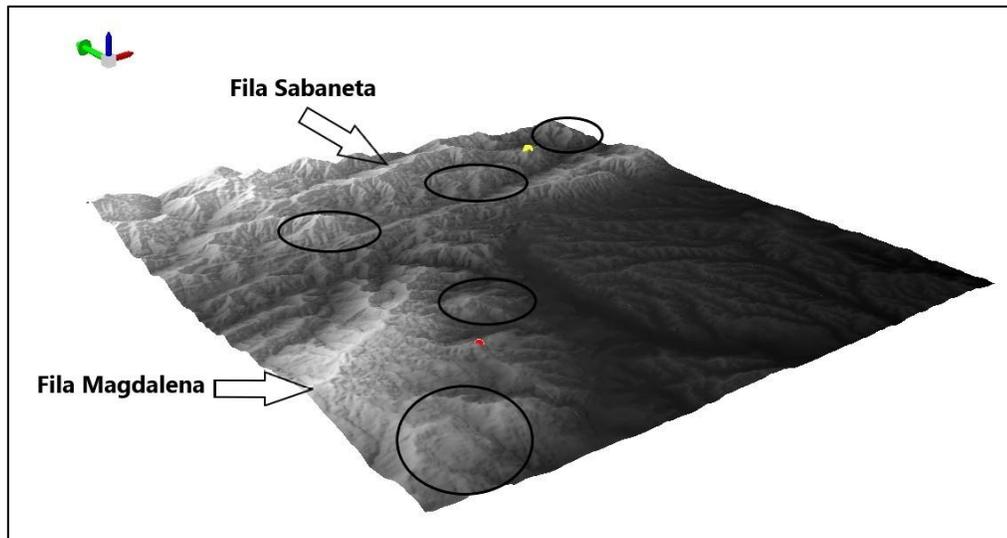


Figura 5.28 Estribaciones de la ladera sur de la fila Magdalena y la fila Sabaneta.

Al incluir el aspecto hipsométrico, ambas canteras se encuentran en un mismo rango comprendido entre los 600 y 800 msnm, coincidiendo con las estribaciones previamente descritas. Esto podría restringir la altura para hallar yacimientos de calizas, aunque, dicho aspecto no limita la posibilidad en otros intervalos adyacentes, es decir, entre los 400 y 600 msnm y, sobre todo por encima de los 800 msnm (ver Figura 5.29), donde se han reportado afloramientos de rocas ricas en carbonato de calcio en las unidades geológicas de la Filita de Tucutunemo y Esquisto de Las Mercedes (Mármol de Los Colorados).

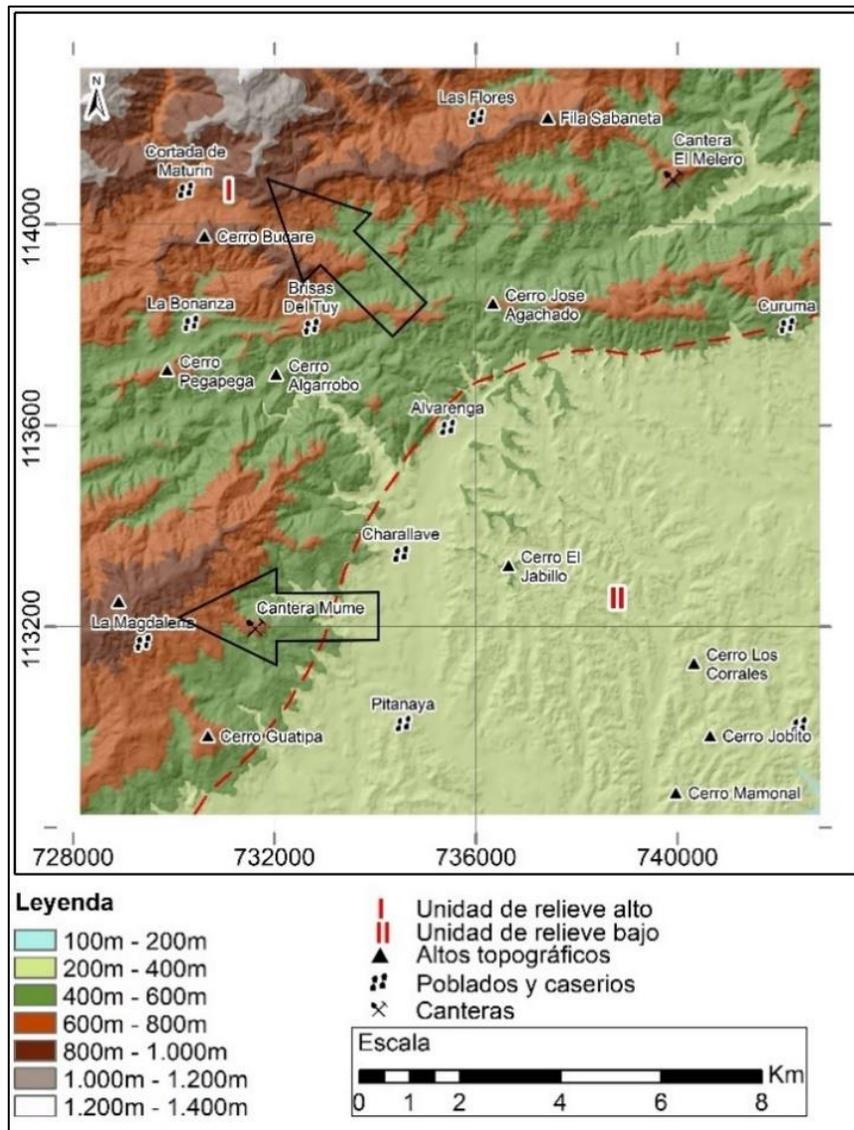


Figura 5.29 Mapa hipsométrico con iluminación y sombras. Señalización (flecha) de altos topográficos que superan los 800 msnm.

En cuanto al drenaje, se logró identificar dos áreas en la unidad de relieve alto, una asociada a esquistos y otra a filitas (ver Figura 5.30). La primera se corresponde con las unidades litodémicas del Esquisto Las Mercedes, el Esquisto de Chuspa y en parte, con el Esquisto de Tinapú, en el cual se desarrolla una típica red dendrítica con una densidad uniforme y un espaciado medio entre los drenajes. Asimismo, se establece un control

estructural asociado a fallas en la que intervienen el sistema de fallas de la falla de La Victoria (Pichao), apreciándose un cambio en la orientación de la línea de talweg de este – oeste a noroeste – sureste como se evidencia en la quebrada El Melero, Uvero y Perlazquez. Sin embargo, estos drenajes y otros que también están regidos en parte por una falla como la quebrada Caiza no siguen un patrón rectilíneo, sino que puede llegar a desadaptarse en algunos tramos respecto a la orientación de la falla geológica presente. Por otra parte, los terrenos asociados a filitas coincidieron con la unidad litodémica de la Filita de Tucutunemo y Metaconglomerado de Charallave, teniendo en cuenta que esta última se llegó a reportar cuerpos de rocas filíticas. Al considerar que la filita proviene del metamorfismo de litologías con una granulometría fina, tienden a comportarse como una lutita o limolita en lo que respecta a la red de drenajes. Es por ello que se observó un patrón dendrítico con una densidad más elevada y una ligera orientación en la red hidrográfica. Aunque, aguas abajo puede llegar a predominar el metaconglomerado, debido a que en esta área tiende a no seguir las características previamente descritas.

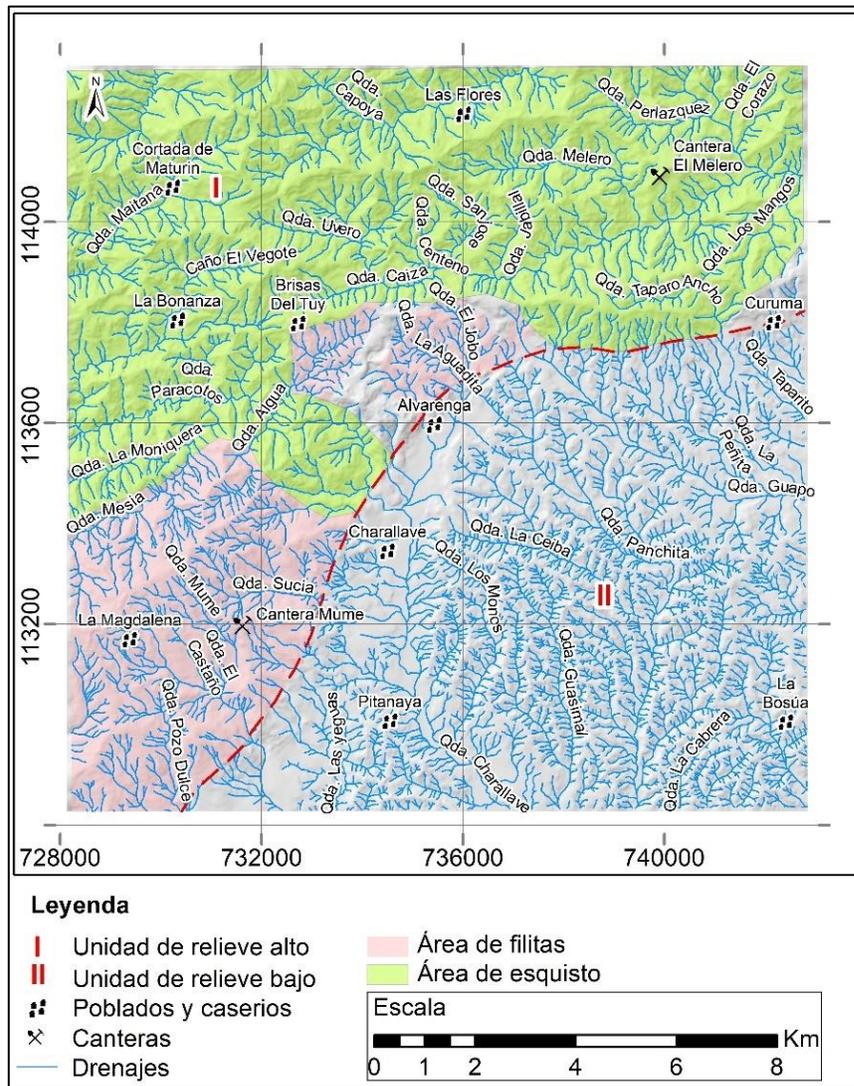


Figura 5.30 Mapa de drenajes con iluminación y sombras. Unidades litológicas en alto relieve en polígonos rosa y verde.

Dentro de las unidades litológicas descritas, se observaron zonas que cumplen con las características de rocas carbonáticas (Figura 5.31), es decir, regiones donde la red de drenajes es escasa. Por esa razón, en la cantera El Melero donde se tiene conocimiento de un yacimiento carbonático, los drenajes son pocos. No obstante, en Mume puede llegar a ser media, lo que indica que en la primera cantera las rocas carbonáticas de interés pueden poseer una mayor extensión, mientras que la segunda se reduce a pequeñas

áreas. Al fijar la atención en zonas más alejadas a las canteras, se logró determinar terrenos con posibles afloramientos que cumplen con esta característica, como al sureste de La Magdalena, suroeste de Alvarenga, sur y norte de La Bonanza, y noroeste de Curuma. Es importante mencionar que estas regiones definidas pueden también tratarse de esquistos y filitas con niveles de rocas calcáreas de mármol o dolomía, es decir, una mezcla de litologías que caracterizan la forma del relieve.

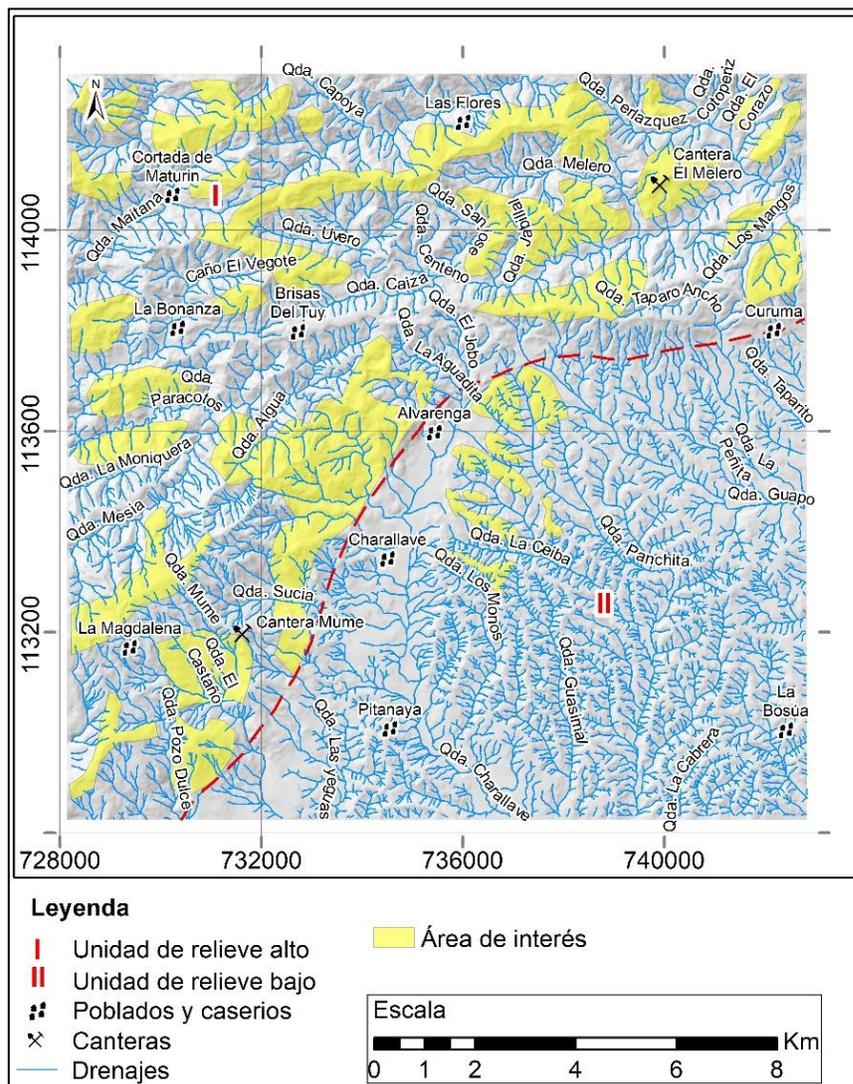


Figura 5.31 Mapa de drenajes con iluminación y sombras. Señalización (polígonos amarillos) de zonas de interés.

En la unidad de relieve bajo, aunque el nivel de incertidumbre es mayor, no se descarta la posibilidad de encontrar yacimientos de caliza, específicamente al norte en la unidad de areniscas y calizas (ver Figura 5.32).

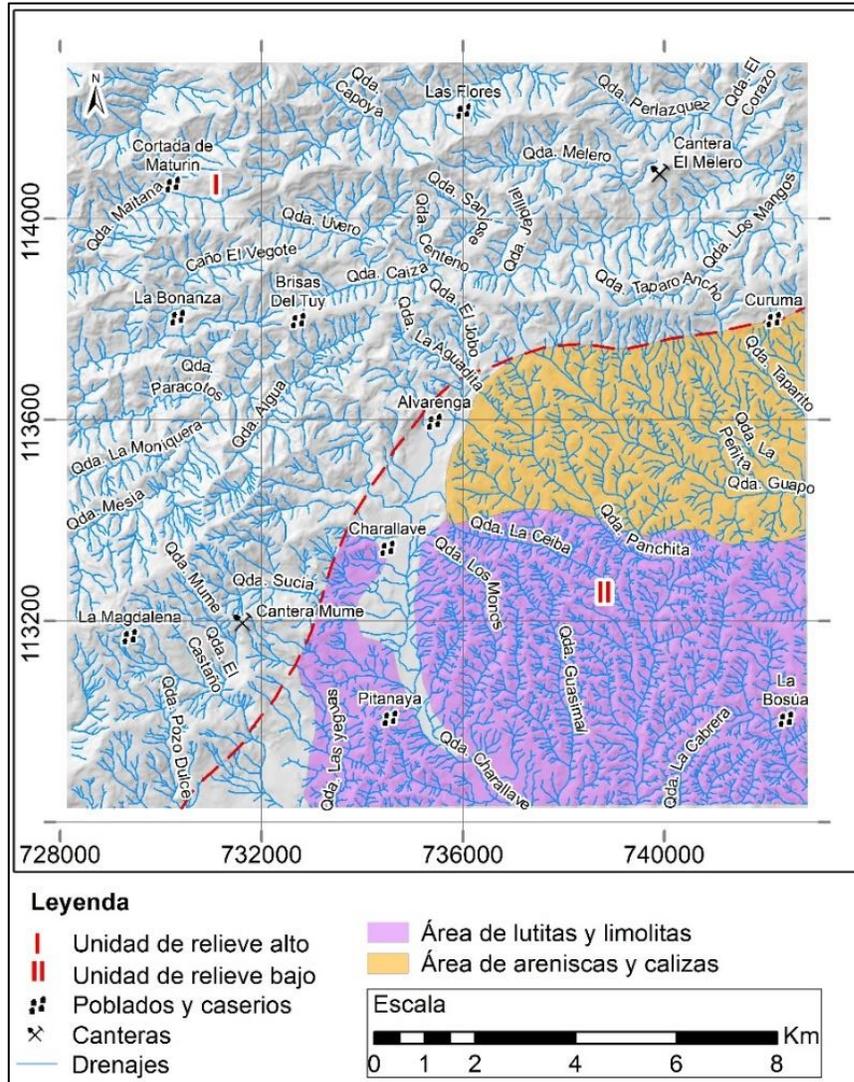


Figura 5.32 Mapa de drenajes con iluminación y sombras. Unidades litológicas en polígonos morado y naranja.

El norte de la unidad de relieve bajo se caracteriza por ser una llanura con mayores desniveles topográficos respecto al sur, hallándose colinas que pueden llegar a tener forma pseudotabular con orientación noroeste – sureste, como el cerro el Jabillo y las ubicadas al norte del mismo (ver Figura 5.33).

Estas elevaciones pueden corresponder a litologías como areniscas con posibles intercalaciones de calizas o a pequeños cuerpos de caliza masiva rodeados de areniscas, desarrollándose sobre la región una red de drenajes pobre y espaciada, con un patrón principalmente dendrítico.

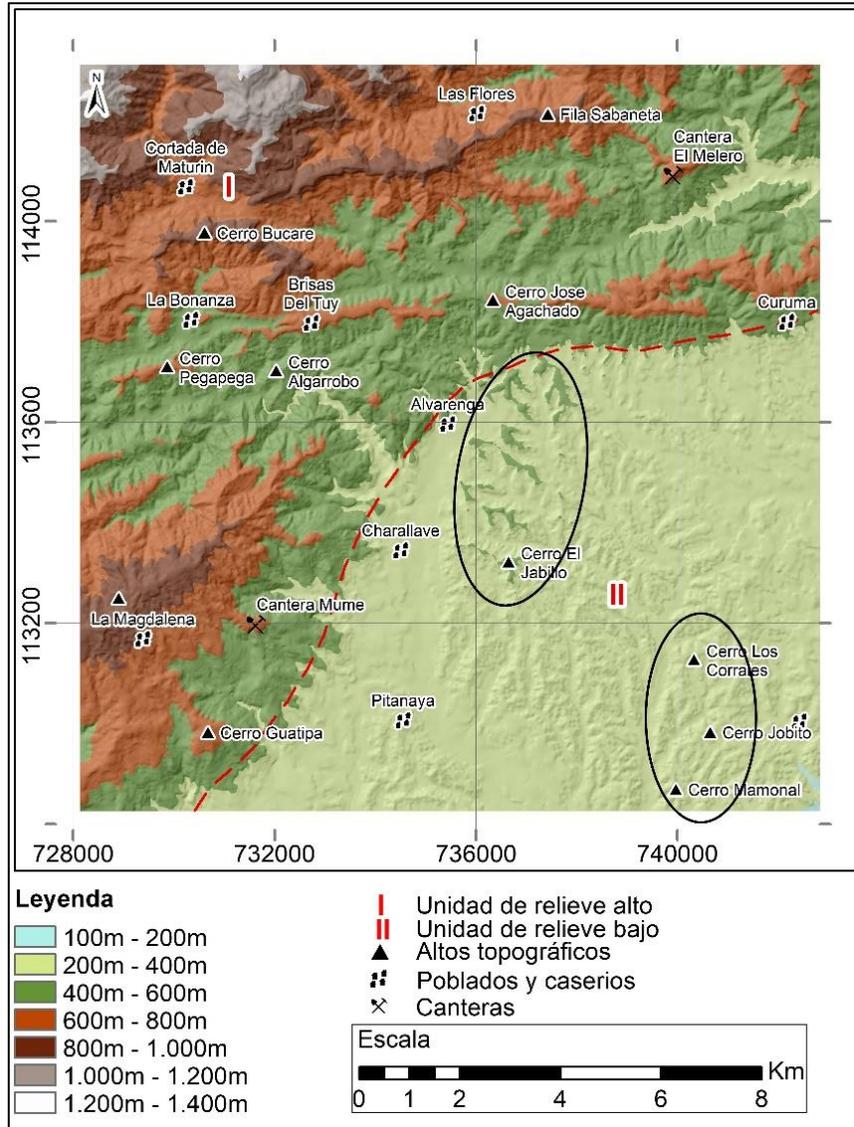


Figura 5.33 Mapa hipsométrico con iluminación y sombras. Señalización (óvalos) de altos topográficos.

En la unidad de lutitas y limolitas ubicada al sur (ver Figura 5.32) se caracteriza por una red de drenajes muy tupida que se asocia muy bien a

dichas litologías. Además, se pueden encontrar areniscas responsables de las pequeñas elevaciones que no superan los 100 m sobre el nivel base, como el cerro Mamonal, Jobito y Los Corrales (ver Figura 5.33).

Finalmente, la integración de todos los aspectos del relieve permitió delimitar zonas con probabilidades altas y medias (ver Figura 5.34), destacándose principalmente en la unidad de relieve alto.

En las adyacencias de la cantera El Melero, se interpretó que las mejores áreas se exponen en las estribaciones de la ladera sur de la fila Sabaneta, dispuestas en forma alargada y paralela a la orientación de dicha fila (ver Figura 5.35). Esto sugiere la existencia de un cuerpo litológico competente fragmentado por los diferentes drenajes, como la quebrada Uvero y Melero, que han aprovechado planos de debilidades estructurales como fallas para entallarse y dividir este posible yacimiento carbonático.

Por otra parte, las áreas de alta probabilidad a los alrededores de cantera Mume no son tan extensas como la cantera anterior. Sin embargo, es posible encontrar una tendencia similar, es decir, un paralelismo respecto a la orientación de la fila Magdalena con una distribución segmentada (ver Figura 5.35). Es importante destacar que tanto en ambas filas como en los altos topográficos al norte de la Cortada Maturín existe la posibilidad de encontrar estos cuerpos geológicos de interés, que llegan a caracterizar el relieve alto de pendientes abruptas, asociadas esencialmente a la filita de Tucutunemo y el esquisto de Las Mercedes.

En la unidad de relieve bajo, se pueden interpretar yacimientos de caliza en las colinas ubicadas al este de Alvarenga según la Figura 5.34.

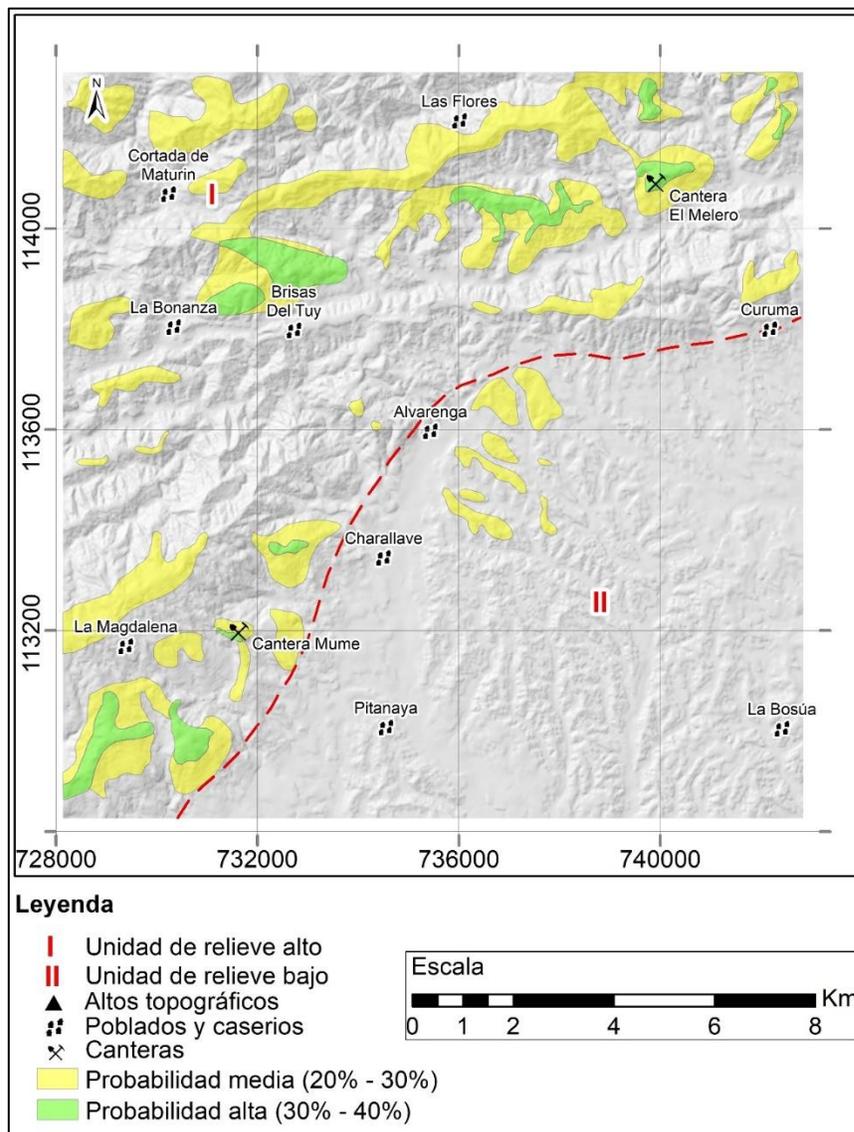


Figura 5.34 Mapa parcial encontrar yacimientos de caliza según el análisis de relieve con un máximo de probabilidad de 40%.

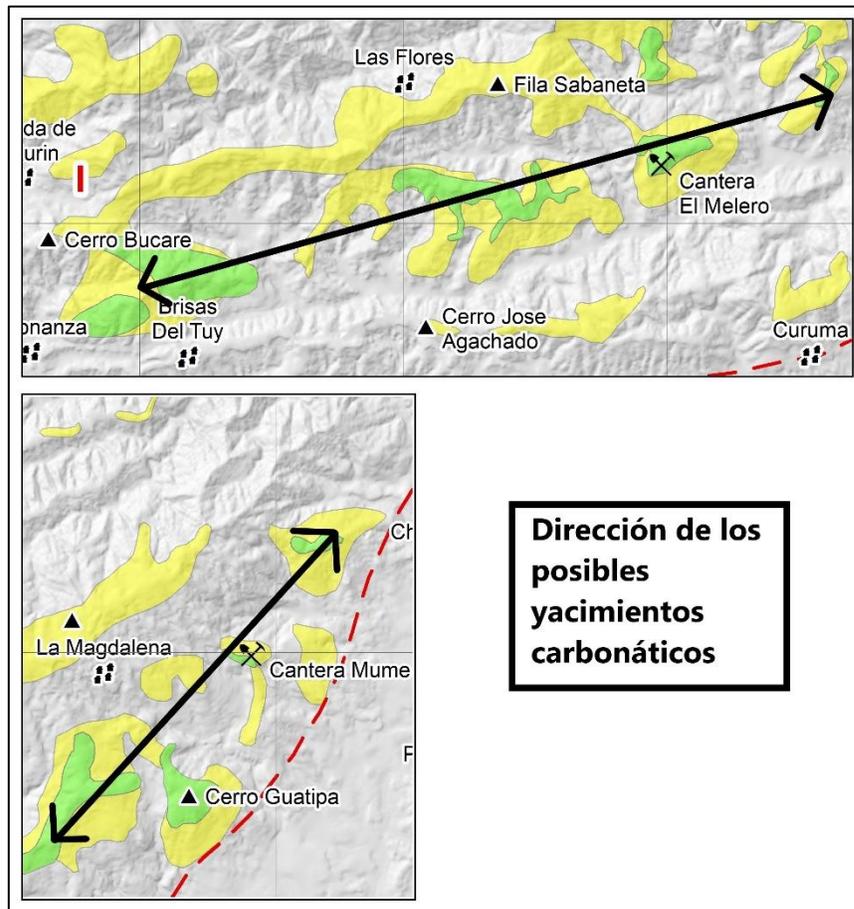


Figura 5.35 Alineamientos de los yacimientos carbonáticos.

5.3 Integración de los análisis de las imágenes multiespectrales y del relieve

La unión de los análisis realizados a las imágenes multiespectrales de ASTER y Landsat con los llevados a cabo a los mapas temáticos, indican que al noreste de la unidad del relieve alto existe una mayor probabilidad de encontrar yacimientos de calizas con las mismas características económicamente rentables, similares a las encontradas en la cantera El Melero. Estos pueden abarcar grandes áreas que se distribuyen a lo largo de la ladera sur de la fila Sabaneta formando una alineación, detallada en Figura 5.38 y comentada en el apartado de análisis del relieve. Por añadir, el área

que abarca las zonas con probabilidades altas es de 17169, 4405, 6782 km² para la zona 1, 2 y 3 respectivamente.

Para las adyacencias de la cantera Mume, no se encontraron altas probabilidades, lo que genera mayor incertidumbre. Sin embargo, esto no descarta la posibilidad de que haya yacimientos de interés, especialmente, al noreste del cerro Guatipa, así como al norte, este y oeste de la cantera, el cual podría tratarse de cuerpos carbonáticos aislados sin una orientación preferencial, pertenecientes a la Filita de Tucutunemo como se llegó a comentar en los análisis de las imágenes satelitales.

Al sur de la Bonanza, se encuentra el cerro Pepapega, un alto topográfico que forma parte de un área con una probabilidad considerable para la prospección de mencionados yacimientos no metálicos. Aunque este cerro no ha generado interés previamente debido a su lejanía de ambas canteras.

La unidad de relieve bajo no obtuvo resultados favorables en cuanto análisis se refiere, por lo que, las probabilidades decaen por debajo de las consideradas como una zona que pueda existir un cuerpo geológico de interés para su explotación.

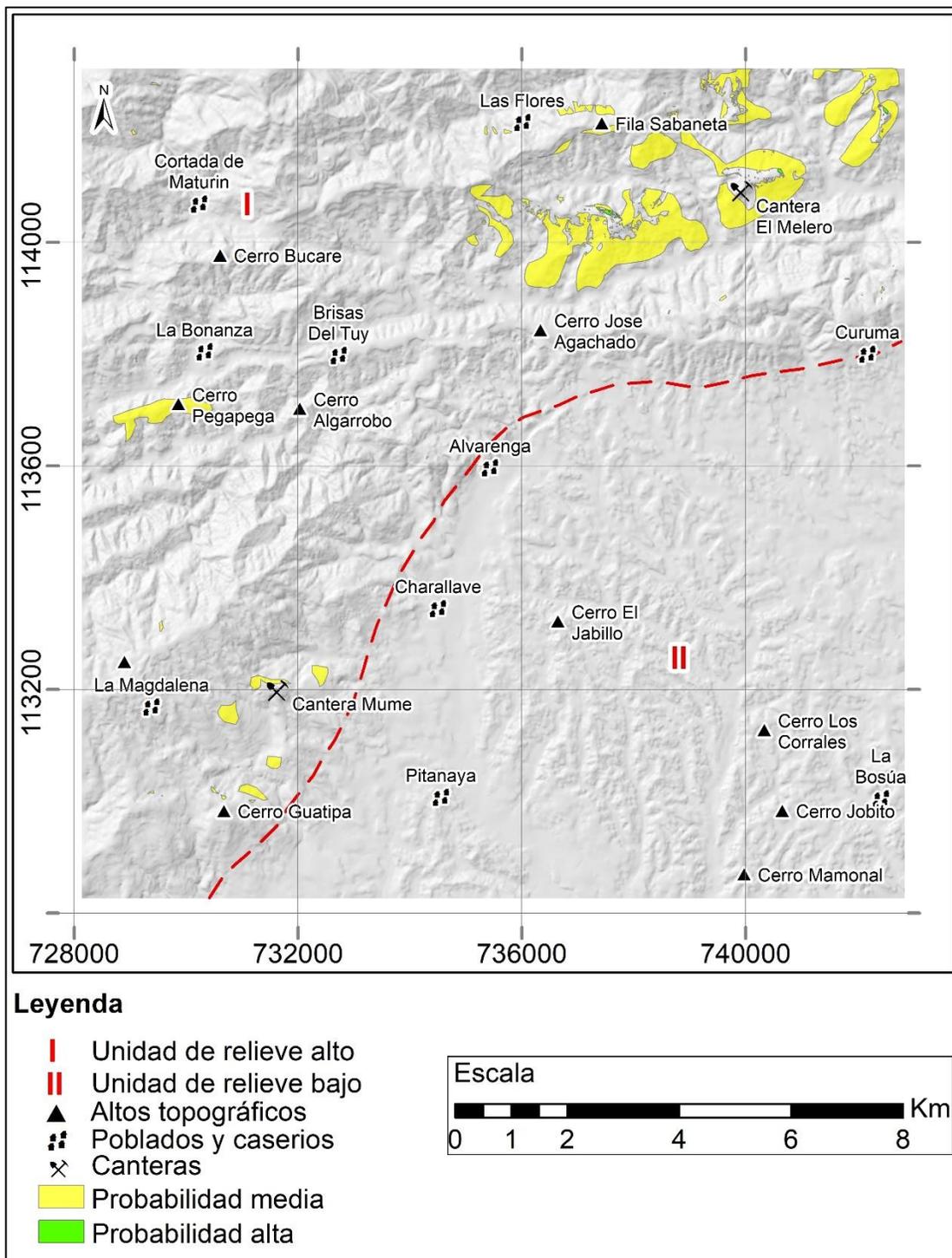


Figura 5.36 Mapa de probabilidades de encontrar yacimientos de caliza según la integración del análisis de imágenes satelitales con el de relieve.

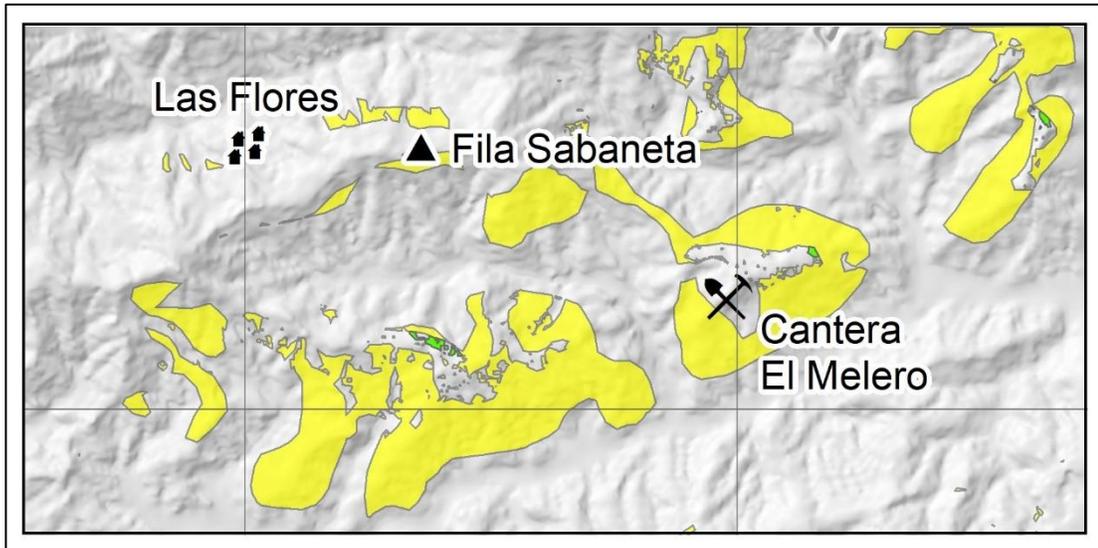


Figura 5.37 Área de probabilidades alrededor de la cantera El Melero.

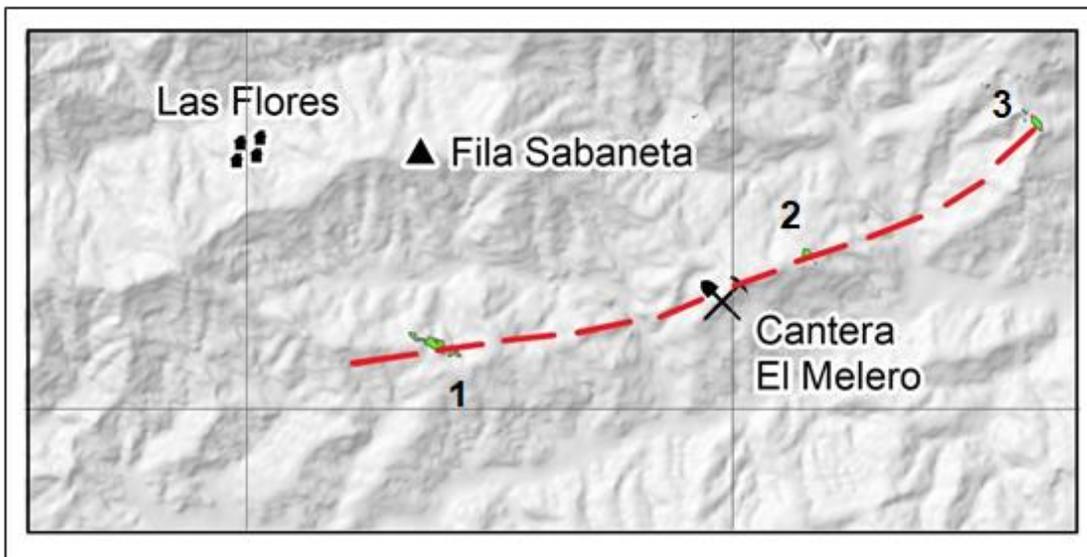


Figura 5.38 Orientación del posible yacimiento de caliza que une las zonas con las probabilidades altas (línea segmentada roja).

5.4 Comprobación en campo y resultado final

La verificación en campo se llevó a cabo en 2 días, en el cual se recorrieron quebradas y tomaron muestras para su descripción visual en las zonas definidas como puntos de observación en la Figura 5.39, así pues, las coordenadas de dichos puntos se encuentran representados en la Tabla 5.1.

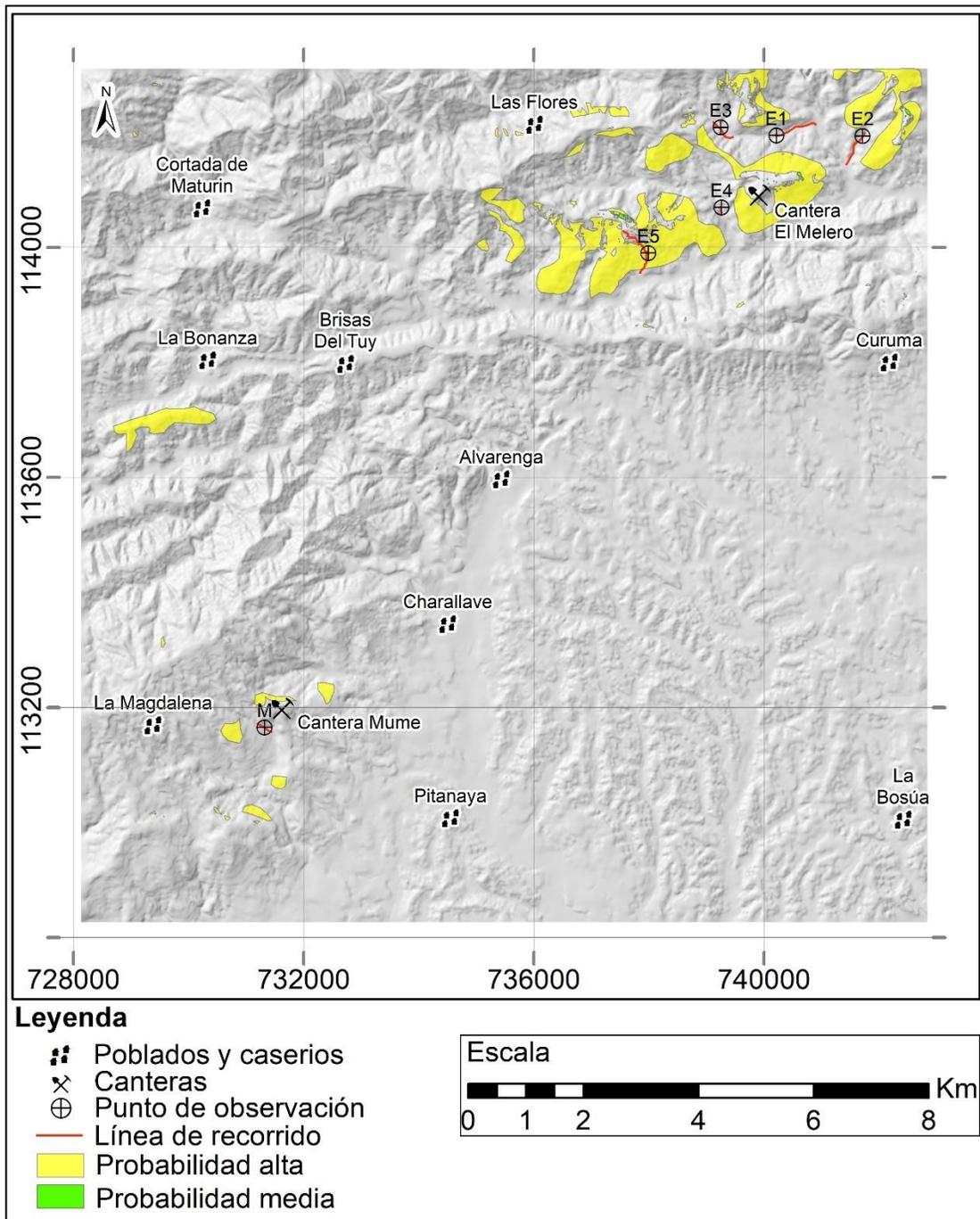


Figura 5.39 Mapa de probabilidades con puntos de observación y recorridos realizados en campo.

Tabla 5.1. Coordenadas de los puntos de observación

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
E1	740220,460	1141949,136
E2	741717,121	1141942,029
E3	739248,861	1142091,578
E4	739264,415	1140696,690
E5	737994,546	1139902,731
M	731322,529	1131651,141

La salida de campo, tuvo como prioridad los alrededores de la cantera El Melero de acuerdo a los resultados obtenidos en la fase de integración de los análisis, visitando primeramente la cantera para la toma de referencia de los cuerpos carbonáticos económicamente rentables, para así correlacionarlos con otros puntos en la región de estudio. Asimismo, la visita a la cantera no solo permitió caracterizar la litología encontrada, sino que, además, se identificaron dos plegamientos, uno sinclinal y otro anticlinal (ver Figura 5.40), con orientación preferencial N75E.



Figura 5.40 Plegamiento anticlinal y sinclinal en la cantera El Melero.

Después de la parada en la cantera, se visitaron los puntos E1 y E2, recorriendo únicamente las partes bajas del terreno debido a la inaccesibilidad y las limitaciones en tiempo. Durante la visita, se encontraron evidencias de clastos de mármoles de pocos centímetros de tamaño hasta macroclastos que llegaban hasta los 2.5 metros (ver Figura 5.41) de tamaño. Esto permitió deducir que existe una fuente cercana ubicada en las partes altas del relieve, específicamente en las regiones donde se obtuvo una probabilidad de media a alta. Otra evidencia, de que existe un yacimiento carbonático a poca distancia, se aprecia en el punto E1, en el cual se observaron estalactitas (ver Figura 5.42) formadas como consecuencia de la meteorización química de las rocas ricas en carbonato de calcio que cargaron las aguas de dicho compuesto químico para terminar por precipitar y formar estas formaciones rocosas.



Figura 5.41 Clasto (E2) y macroclasto (E1) de mármol.



Figura 5.42 Estalactitas encontradas en el punto de observación E1.

Seguido a los puntos E1 y E2, se pasó al punto E3 y E4, encontrándose también clastos y macroclastos aluvionales (ver Figura 5.43) que dan certeza de un cuerpo de mármol proveniente de las partes altas.



Figura 5.43 clasto en E3 y macroclastos en E4 (imagen de la derecha).

El dato de mayor interés para el estudio se obtuvo en el punto E5, donde se encontró un afloramiento de mármol y un pequeño anticlinal (ver Figura 5.44 y Figura 5.45) con una orientación N75E, similar al plegamiento medido en la cantera El Melero. Esto respalda el análisis realizado en la Figura 5.38, lo que sugiere un posible cuerpo carbonático económicamente rentable que tiende a tener una orientación N75E, y que aflora en las estribaciones de la ladera sur de la fila Sabaneta. Además, se observó que este yacimiento se dispone dentro de una unidad de esquistos calcáreos cuyos plegamientos se orientan en la misma dirección.



Figura 5.44 Afloramiento de mármol en el punto de observación E5.



Figura 5.45 Plegamiento anticlinal orientado N75E.

Respecto a la cantera Mume, no se pudieron visitar los puntos de interés debido a problemas con el acceso y las limitaciones en tiempo, por lo que, no se pudo verificar el análisis realizado a las imágenes satelitales y mapas temáticos. Para cubrir este déficit se recorrió parte de la quebrada que lleva por nombre Mume hasta el punto de observación “M” en busca de las mismas evidencias encontradas en las adyacencias de la cantera El Melero. Sin embargo, no se encontraron, solo había afloramientos y clastos aluviales de varios tamaños de metaconglomerado (ver Figura 5.46).

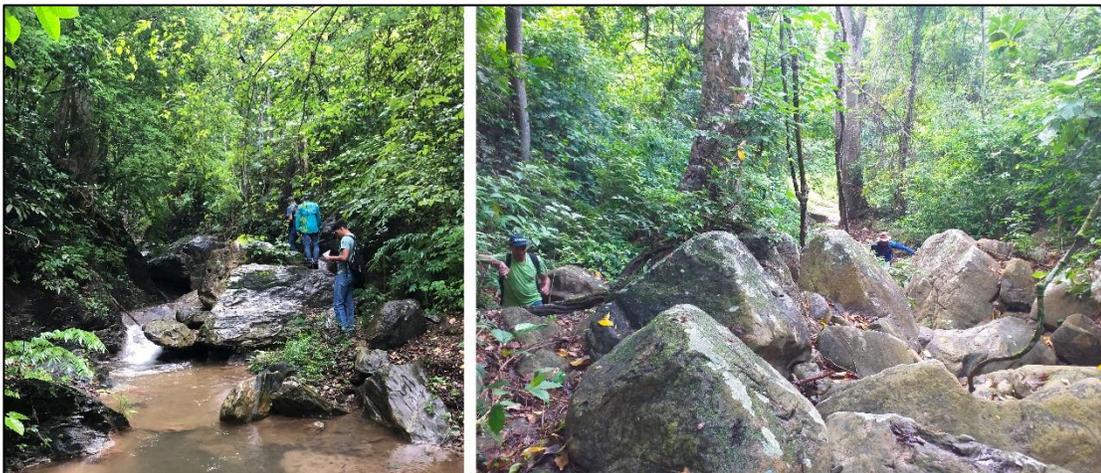


Figura 5.46 Clastos y macroclastos aluviales de metaconglomerado.

Luego de la verificación en campo, no se cambiaron las zonas de interés establecidas en la Figura 5.39, siendo finalmente plasmadas en el mapa geológico de la región de estudio (ver Anexo).

5.5 Consideraciones para el resultado final

Para la ejecución de proyectos mineros se deben tener en cuenta un número determinado de variables que determinan si es factible o bajo que parámetros se debe ejercer planes exploratorios en el lugar de interés, para así llevar a cabo la explotación del yacimiento. En Venezuela, existen las Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE), que según el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo (s.f) son zonas del territorio nacional que se encuentran bajo un régimen especial de manejo de acuerdo a los artículos 15, 16, 17 de la Ley Orgánica para la Ordenación del Territorio Gaceta Oficial No.3.238.

En el área de estudio, específicamente alrededor de la cantera El Melero (que representa el mayor foco de interés para proyectos mineros) se encuentran presentes algunas de las zonas que forman parte de las ABRAE como se muestra en la Figura 5.47. Estas zonas en la región se definen como “STH. Altagracia Figueroa. Eje 1 tramo Figueroa Arichuna” para las Áreas de Protección de Obras Públicas, “ZP. Área Metropolitana De Caracas” para Zonas Protectoras y, “ACPT. Cuenca del Rio Tuy” para las Áreas Críticas con Prioridad de Tratamiento.

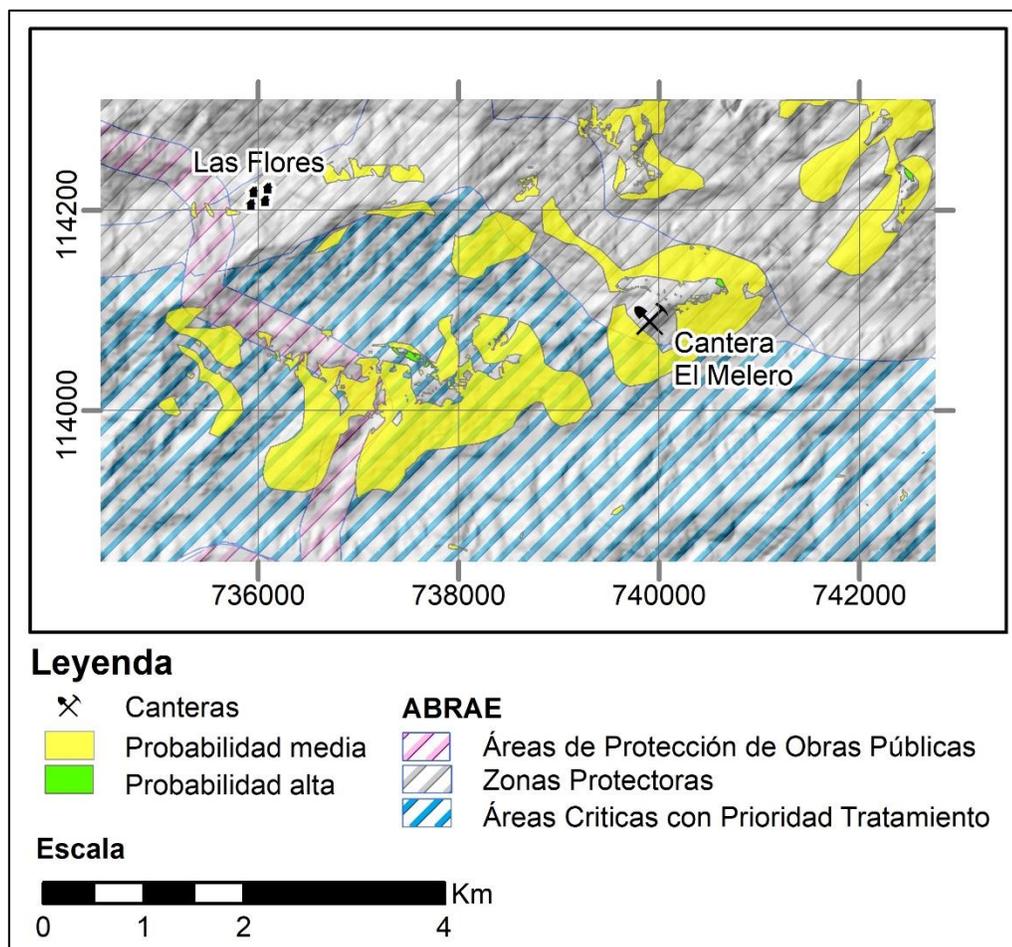


Figura 5.47 Mapa de probabilidades de encontrar un yacimiento carbonático con la demarcación de las ABRAE alrededor de la cantera El Melero.

Por otra parte, se tiene que tener en cuenta que sobre el área de probabilidades medias pasa el ferrocarril que une la ciudad de Charallave con Caracas. Además, adyacente a estas zonas están presentes urbanismos que pertenecen a Valle de Chara (ver Figura 5.48).

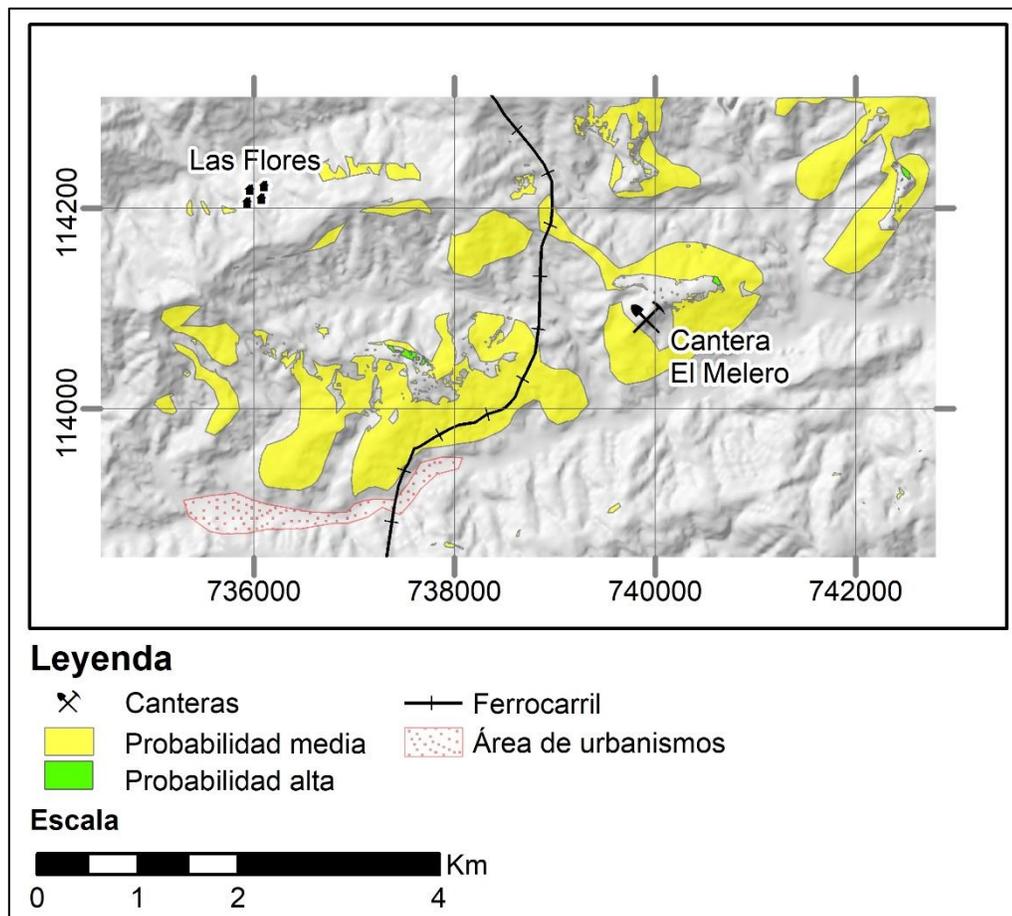


Figura 5.48 Mapa de probabilidades de encontrar un yacimiento carbonático con la demarcación de las áreas de urbanismos y el ferrocarril Charallave – Caracas.

Finalmente, el área que tendría más limitaciones al momento de ejecutar planes mineros es el “1” (ver Figura 5.38), pudiendo traer consigo un mayor gasto y posiblemente haciendo de esta región no factible para explotar.

CONCLUSIONES

- Se pudo generar un mapa geológico a escala 1:25000 con zonas de probabilidades media a alta de encontrar yacimientos de caliza.
- Los objetivos específicos planteados se cumplieron, a excepción al relacionado con la verificación en campo, debido a que no todas las zonas de interés pudieron ser visitadas por problemas con el acceso y las limitaciones en tiempo.
- El uso de la combinación de bandas 831 para ASTER y 753 para Landsat 8, permitió discriminar zonas con rocas carbonáticas en tonos marrones verdosos y entender que las mismas coexisten con rocas con bajo contenido en CaCO_3 en las canteras y zonas aledañas.
- La clasificación supervisada (Máxima Verosimilitud) y no supervisada permitió demostrar la ventaja que tiene el sensor ASTER respecto al OLI de Landsat para el cartografiado geológico e identificación de litologías, ayudando a deducir que la unidad de mayor interés para encontrar yacimientos de caliza se encuentra en el Esquisto de Las Mercedes.
- Con la herramienta de clasificación supervisada SAM en función de las firmas espectrales de la librería ENVI ayudó a concluir que las mejores respuestas espectrales se encontraban a los alrededores de la cantera El Melero, en comparación con las de Mume que fueron escasas.
- El análisis de firmas espectrales en las áreas establecidas por SAM permitió identificar 5 grupos de rocas carbonáticas.
- Los mapas temáticos contribuyeron a realizar un análisis de relieve orientado a la identificación de posibles yacimientos de caliza, logrando identificar importantes focos de estudio en las estribaciones de la ladera sur de la fila Magdalena y la fila Sabaneta.

- La integración de los análisis de imágenes multiespectrales con los análisis de relieve permitió deducir un posible yacimiento de caliza en la ladera sur de la fila Sabaneta orientando en la misma dirección que la línea de cresta de dicha topografía.
- La salida de campo permitió interpretar que el yacimiento de la cantera El Melero se extiende con una orientación N75E, aflorando en la estribación sur de la fila Sabaneta.
- La mejor región para ejecutar proyectos mineros alrededor de la cantera El Melero se encuentra al este de la misma, ya que se encuentra alejado del ferrocarril Charallave – Caracas y de urbanismos importantes.

RECOMENDACIONES

- Gracias a los resultados, se recomienda el uso de imágenes satelitales en la etapa de prospección de proyectos mineros.
- Utilizar imágenes satelitales que posean una mayor resolución espacial sin perder resolución espectral como las de *WorldView-3* para delimitar de una manera más detallada los afloramientos de caliza es superficie.
- Utilizar imágenes satelitales que posean una mayor resolución espectral, como las de HYPERION, para discriminar mejor las litologías asociadas a carbonatos.
- Elaborar una campaña de campo para validar todas las áreas definidas en este trabajo, haciendo uso de espectrometría de reflectancia y recolección de muestras para la aplicación de secciones finas, difracción de rayos X y ensayos químicos que permitan determinar la calidad de la caliza y factibilidad para su explotación.

BIBLIOGRAFIA

- Acosta, V. (1975). *Curso de física moderna*. Harla. México D.F., México.
- Arenas, R. (2016). *Aplicación de la teledetección en la exploración geominera y de recursos naturales* [Tesis de maestría publicada]. Universidad de Oviedo
- Aguerrevere, S. & Zuloaga, G. (1937). *Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela*. Bol. Geol. Y Min., Caracas, 1(2-4), 8-24
- 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 p.
- Audemard, F. (1984). *Evaluación geológica de la Cuenca del Tuy, para fines de investigaciones neotectónicas*. Caracas, UCV- EG. 60 p.
- Audemard, F., Audemard, M., De Santis, F., Singer, A. & Ramos, C. (1995). *Sistema de falla de La Victoria, Venezuela Norcentral: Trazas activas, complejidades estructurales, cinemática y sismicidad asociada*. FUNVISIS. IX Congreso Latinoamericano de Geología. Caracas
- Audemard, F., Audemard, M., Machette, M., Cox, J., Dart, R. & Haller, K. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions*. <https://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-0018/>
- Barreto, J. (2010). *Caracterización geológica de la cantera Mume ubicada en el municipio Cristóbal Rojas de Los Valles del Tuy estado Miranda* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Central de Venezuela
- Beck, C. (1985). *Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas*. Société Géologique du Nord. Publication n° 14. 462 p.

- Benjamini, C., Shagam, R. & Menendez A. (1986). *(Late?) Paleozoic age for the "Cretaceous" Tucutunemo Formation, Northern Venezuela: Stratigraphic and tectonic implications*. *Geology*, (15), 922-926.
- Bravo, N. (2017). *Teledetección espacial Landsat, Sentinel2, ASTER L1T y MODIS* (1ªed.). https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf
- Cardoso, J., Teodoro, A., Lima, A., Perrotta, M. & Roda-Robles, E. (2020). *Detecting Lithium (Li) Mineralizations from Space: Current Research and Future Perspectives*. *Appl. Sci.* 10(5), 11p. <http://dx.doi.org/10.3390/app10051785>
- Corniel, Y. (2010). *Estudio geológico de la cantera El Melero ubicada en el distrito Cristóbal Rojas municipio Charallave estado Miranda* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Central de Venezuela
- Chuvieco, E. (2006). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. 2da Edición. Editorial Ariel Ciencia, Barcelona, España. 583 p.
- Chuvieco E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp, S.A. Madrid 2da Edición. 450 p.
- Dengo, G. (1951). *Geología de la región de Caracas. Bol. Geol., Caracas, 1(1): 39 - 115. Versión en inglés: Geology of the Caracas región, Venezuela*. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 64(1), 7-40.
- Gamboa, L. (1986). *Procesos metodológicos para la interpretación de los mapas topográficos* [Tesis de pregrado no publicada]. Universidad Central de Venezuela.
- Grande, S. (1995). *Caracterización geoquímica de las metalavas del Miembro Los Naranjos, Formación Tucutunemo, Aragua central y su interpretación tectónica* [Tesis de postgrado publicada]. Universidad Central de Venezuela

- Hernández, M. (2011). *Actualización de la geología de superficie en la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales* [Tesis de postgrado publicada]. Universidad Simón Bolívar
- Hernández, M. (2022). Curso de Sensores Remotos Aplicados a la Prospección de Hidrocarburos y Minerales. GEO GROUP A.O
- Hoyos, A. & Ramiro, J. (2019). *Detección de áreas para prospección minera metálica mediante el procesamiento de imágenes satelitales ASTER en plan Porconillo, Cajamarca* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Privada del Norte
- Jeevan, L., Basavarajappa, H. & Manjunatha, M. (2019). *Aster Mapping of Limestone Deposits and Associated Lithounits of Parts of Chikkanayakanahalli, Southern Part of Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton, India*. J Indian Soc Remote Sens 47, 693-703. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0925-5>
- López, B. & Reyes, Z. (2010). *Estudio geológico-geotécnico de una zona ubicada al oeste del poblado Túcata, estado Miranda* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Central de Venezuela
- Maggi, A., Bargiela, M., Navone, S. & Laffeuillade, A. (2009). *Comparación de la aplicación de imágenes ASTER y Landsat 5TM para el mapeo de carbonatos en la quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy*. Instituto Geográfico Portugués
- Martínez, L. & Belisario, E. (2009). *Interpretación geológica de superficie mediante el uso de sensores remotos y su aplicación en la detección de posibles anomalías de uranio en la zona noroeste del estado Amazonas* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Central de Venezuela
- Menéndez, A. (1965). *Geología del área de El Tinaco, centro norte del estado Cojedes, Venezuela*. Bol. Geol., Caracas, 6(12), 417-543.

- Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo (s.f). ¿Qué es un ABRAE?.
<http://sigta.minec.gob.ve/sigta/abrae.php>
- NASA (2011). Landsat 7 Science Data Users Handbook.
https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf
- Ninomiya, Y. (2002). *Mapping quartz, carbonate minerals, and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data*. P SPIE 4710, 191-202. <https://doi.org/10.1117/12.459566>
- Rajendran S. & Nasir, S. (2013). *ASTER spectral sensitivity of carbonate rocks – Study in Sultanate of Oman*. J. Adv. Space Res. 53, 656-673.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.047>
- Radiansa (s.f). ¿Que son los campos electromagnéticos (CEM)?
<https://www.radiansa.com/es/campos-electromagneticos-baja-frecuencia/que-son-los-campos-electromagneticos.htm>
- Richards, J, & Jia, X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction (4ª ed.). Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29711-1>
- Romero, E. (2019). *Actualización geológica – cartográfica de la hoja 66448 ubicada al sur – este de Falcón Oriental, mediante el uso de sensores remotos* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Central de Venezuela
- Orta, M. (2003). *Integración geológica de la región Caracas – Charallave – Santa Teresa del Tuy. Distrito Capital y estado Miranda* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Central de Venezuela
- Picard, X. & Pimentel, N. (1968). *Geología de la cuenca de Santa Lucia-Ocumare del Tuy*. Bol. Geol., Caracas, 9(19), 263-296.
- Sabins, F. (2007). *Remote Sensing: Principles and Interpretation* (3ª ed.). Waveland Press, Inc.

- Shagam, R. (1960). Geología de Aragua central (Venezuela). III Cong. Geol. Venezolano, Caracas, 2: 574-675.
- Seiders, V. (1965). *Geología de Miranda central, Venezuela*. Bol. Geol., Caracas, 6(12), 298-461.
- 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 p.
- Smith, R. (1952). Geología de la región de Los Teques-Cua, Venezuela. Bol. Geol., Caracas 2 (6), 333-406.
- Talukdar, S. & Loureiro, D. (1982). *Geología de una zona ubicada en el segmento norcentral de la Cordillera de la Costa, Venezuela: metamorfismo y deformación. Evolución del margen septentrional de Suramérica en el marco de la tectónica de placas*. Geos, Caracas, (27), 15- 76.
- Urbani, F. & Ostos, M. (1989). El Complejo Avila, Cordillera de La Costa, Venezuela. Geos, UCV, Caracas, (29):205-217.
- Urbani, F., Rodríguez, J. & Vivas, V. (2000). *Geología del estado Vargas: 1.- Nomenclatura actualizada de las unidades ígneo - metamórficas de la parte central de la Cordillera de la Costa*. Resúmenes, Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería, UCV. 621-622.
- Urbani, F. & Rodríguez J. (2003). *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela*. Edic. UCV y FUNVISIS, Caracas, 148 hojas geológicas a escala 1:25:000.
- Urbani, F. (2018). Una revisión de los terrenos geológicos del sistema montañoso del Caribe, norte de Venezuela. Bol. Geo. 23 (13): 118 – 216.

- Valdés, B. (2015). *Identificación de lineamientos y minerales asociados a alteraciones hidrotermales en la bahía de La Paz, Baja California Sur, Mexico, mediante imágenes satelitales Landsat ETM* [Tesis de pregrado publicada]. Universidad Nacional Autónoma de México
- Villanueva, R. (2007). *Discriminación de carbonatos y sílice usando las bandas del infrarrojo térmico*. Instituto de Investigaciones FIGMMG, 10(20), 45-48.
- Yarmohammdi, A., Rastad, E., Akbari, Z. & Rajabi, A. (2015). *Lithological and Structural Mapping Related to Sediment Hosted Zn-Pb Deposits in the Tiran Basin, NW of Esfahan, Iran: Using ASTER and ETM Images Processing*. International Geoinformatics Research and Development Journal. 6(3), 1-14
- Ynfante, M. (2022). *Aplicación de los SIG en geología* [Diapositivas de PowerPoint]. Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

ANEXO

VER ARCHIVO ADJUNTO