

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**INTEGRACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA CENTRO-  
OCCIDENTAL DEL ESTADO TÁCHIRA, ENTRE LAS  
COORDENADAS LONGITUD (72°30'-72°00')  
Y LATITUD (7°40'-8°00')**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br.  
Marchamalo L., José J.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geólogo

Caracas, 2009

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **INTEGRACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA CENTRO- OCCIDENTAL DEL ESTADO TÁCHIRA, ENTRE LAS COORDENADAS LONGITUD (72°30'-72°00') Y LATITUD (7°40'-8°00')**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Enrique Toribio

CO-TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ricardo Alezones

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br.  
Marchamalo L., José J.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geólogo

Caracas, 2009

Caracas, 06 de noviembre de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller José J. Marchamalo L., titulado:

**“INTEGRACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL  
DEL ESTADO TÁCHIRA, ENTRE LAS COORDENADAS LONGITUD  
(72°30' – 72°) Y LATITUD (7°40' -8°)”**

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 los autores, lo declaran **APROBADO**.

Prof. Mauricio Hernández

Jurado

Prof. Lenin González

Jurado

Prof. Enrique Toribio

Tutor Académico

Prof. Ricardo Alezones

Co-Tutor Académico

*A Jonathan Castaldi Mikuski*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Central de Venezuela, en especial a la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, por la formación que he recibido durante estos años, tanto académica como personalmente.

A mis tutores, el profesor Enrique Toribio por brindarme la oportunidad de hacer este trabajo, darme todo su apoyo y orientación, y el profesor Ricardo Alezones, por su amistad, apoyo, ayuda y consejos en todo momento de manera incondicional durante toda la carrera y en especial durante la elaboración de este trabajo

A mi familia, en especial a mis padres, José y Yajaira, y a mis hermanas, Yajaira y Yaribay, por ser el apoyo incondicional con el cual siempre cuento y que siempre necesito a mi lado, y por darme todo su cariño

A mi amigo, Virgilio Gutiérrez, por su apreciada, desinteresada y fiel colaboración en este trabajo.

A mis compañeros, Juan Carlos Chacón y en especial a Imelda Pernía por su ayuda, colaboración y apoyo.

A los profesores, André Singer, Mauricio Hernández y Enzo Caraballo por sus importantes aportes y consejos.

A mis amigos, Daniel Cela, Luis Alberto Troitiño, José Tomás Sucre, María Carolina Sucre, Sergio Fava y Miguel Ernesto Matute por estar siempre a mi lado.

**Marchamalo L., José J.**

**INTEGRACIÓN GEOLÓGICA DE LA ZONA CENTRO-  
OCCIDENTAL DEL ESTADO TÁCHIRA, ENTRE LAS  
COORDENADAS LONGITUD (72°30'-72°00')  
Y LATITUD (7°40'-8°00')**

**Tutor Académico: Prof. Enrique Toribio. Co-Tutor Académico: Prof. Ricardo Alezones. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2009, 115 p.**

**Palabras Claves:** SENSORES REMOTOS, LANDSAT, TÁCHIRA, MAPA GEOLÓGICO

**Resumen.** El objetivo de este trabajo fue generar un mapa geológico de superficie actualizado a escala 1:50.000, del área correspondiente a la hoja cartográfica de San Cristóbal, N° 5739 ubicada en el estado Táchira.

La región del Táchira es la conexión entre los Andes venezolanos, la Cordillera Oriental de Colombia y el Macizo de Santander, por lo tanto, es una depresión en comparación a La Cordillera Andina y presenta una gran red de estructuras comúnmente falladas que contienen las características de la bifurcación andina que lo rodea. Además, es una región de difícil acceso, de interés geodinámico y en el área de hidrocarburos. En este sentido, se realizó una integración geológica usando mapas y bibliografía previa, interpretación de fotos aéreas, una revisión geológica de campo y nuevas tecnologías como el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales.

Los datos obtenidos fueron procesados, interpretados e integrados por medio de un Sistema de Información Geográfica y programas como ENVI 4.5 ©2008, ERDAS IMAGINE 9.3, ESRI® ArcGis 9.3, con lo cual se logró actualizar el mapa geológico de superficie con dos cortes geológicos y de esta forma se realizó un análisis topográfico, estratigráfico, estructural y morfoestructural del área de estudio.

De los análisis se desprende que la región está integrada por dos unidades topográficas mayores, de montaña y de valle, estratigráficamente afloran rocas desde el Precámbrico al Reciente. Las estructuras presentan una orientación preferencial NS al sur y oeste, y NE-SO y NNE-SSO en el resto del mapa por lo que se propone que se encuentra sujeta a esfuerzos compresivos en direcciones NNO-SSE y EO. El análisis morfoestructural permitió determinar que la expresión topográfica de la región está controlada por el dominio de las estructuras sobre los agentes exógenos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	vii
FIGURAS .....	xii
TABLAS .....	xvii
LISTA DE ANEXOS .....	xviii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    GENERALIDADES .....	1
1.2    OBJETIVO GENERAL .....	2
1.3    OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.5    JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	3
1.6    UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	3
1.7    TRABAJOS PREVIOS.....	4
CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO .....	8
2.1    RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	9
2.2    PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES .....	11
2.2.1    Calibración de Bandas.....	12
2.2.2    Apilamiento de Bandas .....	12
2.2.3    Conversión de Formato BSQ A BIL.....	13
2.2.4    Corrección Atmosférica en FLAASH.....	14
2.2.5    Elaboración de La Máscara de Nubes.....	15
2.2.6    Transformación Mínima de Ruido .....	17

2.2.7	Corrección de Pureza de Pixel .....	18
2.3	REALCE DE INFORMACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES ..	18
2.3.1	Combinaciones de Bandas .....	19
2.3.2	Clasificación No Supervisada .....	19
2.3.3	Clasificación Supervisada .....	19
2.4	INTERPRETACIÓN VISUAL DE LAS IMÁGENES SATELITALES ...	22
2.5	INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS .....	22
2.6	INTERPRETACIÓN DE MAPAS .....	23
2.7	GEOLOGÍA DE CAMPO.....	24
2.8	INTEGRACIÓN DE DATOS POR MEDIO DE UN SIG .....	25
2.9	ELABORACIÓN DE CORTES GEOLÓGICOS.....	26
2.10	ELABORACIÓN DEL MAPA FINAL .....	27
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....		28
3.1	PERCEPCIÓN REMOTA .....	28
3.2	PRINCIPIOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA .....	28
3.3	ELEMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA.....	29
3.4	LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	31
3.4.1	Características de las Ondas Electromagnéticas .....	31
3.4.2	El Espectro Electromagnético .....	31
3.4.3	Radiaciones Electromagnéticas Usadas en la Percepción Remota .....	33
3.4.4	Interacción de la Radiación con los Objetos y la Superficie Terrestre .	34
3.4.5	Interacción de la Atmosfera con la Radiación Electromagnética .....	36
3.5	PLATAFORMAS Y SENSORES.....	38

3.6	IMAGEN SATELITAL .....	40
3.7	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	41
3.7.1	Aplicaciones de un SIG.....	43
3.8	FOTOGRAFÍAS AÉREAS: .....	44
3.8.1	La Fotogrametría.....	44
3.8.2	La Fotointerpretación y sus Aplicaciones .....	45
CAPÍTULO IV: MARCO GEOLÓGICO.....		46
4.1	FISIOGRAFÍA .....	46
4.2	ESTRATIGRAFÍA .....	46
4.2.1	Precámbrico.....	47
4.2.2	Paleozoico .....	48
4.2.3	Mesozoico .....	50
4.2.3.1	Jurásico .....	50
4.2.3.2	Cretácico .....	51
4.2.4	Cenozoico.....	56
4.2.4.1	Terciario.....	56
4.3	EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL OCCIDENTE DE VENEZUELA.....	62
4.3.1	Precámbrico-Paleozoico.....	64
4.3.1.1	Terreno Mérida .....	64
4.3.1.2	Terreno Macizo Colorado Y Bloque Caparo.....	66
4.3.2	Mesozoico .....	67
4.3.2.1	Jurásico .....	67
4.3.2.2	Cretácico .....	68

4.3.3	Cenozoico.....	72
4.3.3.1	Terciario.....	72
CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		75
5.1	ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL RELIEVE .....	76
5.1.1	Unidad de Montañas .....	76
5.1.2	Unidad de Valle.....	84
5.2	ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO .....	86
5.2.1	Secuencias Estratigráficas.....	87
5.2.1.1	Secuencia Precámbrica .....	87
5.2.1.2	Secuencia Paleozoica.....	87
5.2.1.3	Secuencia Jurásica .....	88
5.2.1.4	Secuencia Cretácica.....	89
5.2.1.5	Secuencia Terciaria.....	90
5.2.2	Discordancias .....	91
5.2.3	Binomios de Dureza.....	93
5.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	94
5.3.1	Estructuras.....	95
5.3.2	Estilo Estructural.....	100
5.3.3	Fases de Deformación.....	101
5.4	ANÁLISIS MORFOESTRUCTURAL.....	103
5.4.1	Unidad de Montañas .....	103
5.4.2	Unidad de Valle.....	108
5.5	GÉNESIS DE LAS FORMAS .....	108

CAPÍTULO VI: SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		111
6.1	SUMARIO .....	111
6.2	CONCLUSIONES .....	113
6.3	RECOMENDACIONES .....	114
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS .....		115

## FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio correspondiente a Hoja N° 5739: San Cristóbal .....	4
Figura 2.1 Diagrama esquemático del marco metodológico.....	9
Figura 2.2 Mosaico de imágenes de Google Earth generado con el programa Stitchmaps.....	11
Figura 2.3 Ventana de parámetros de calibración.....	12
Figura 2.4 Ventana de apilamiento de bandas .....	13
Figura 2.5 Ventana de parámetros de conversión .....	14
Figura 2.6 Ventana de corrección atmosférica FLAASH.....	15
Figura 2.7 Imagen satelital de la zona de estudio donde las nubes y sus sombras se encuentran encerradas dentro de los polígonos rojos.....	15
Figura 2.8 Ventana donde se abre la “capa” vectorizada en EVF y se exporta a ROI	16
Figura 2.9 Ventanas de visualizaciones previas y de creación de la máscara de nubes .....	17
Figura 2.10 Ventana de MNF .....	18
Figura 2.11 Imagen Landsat 7 correspondiente a la hoja 5739. a) Imagen en color natural (combinación de bandas 321). b) Imagen con clasificación no supervisada. c) Imagen con clasificación supervisada.....	21
Figura 2.12 Interpretación sobre fotografías aéreas 163 a 168 de la misión 010298 a escala 1:50.000, realizada directamente en ArcGis .....	23

Figura 2.13 Levantamiento geológico de campo donde se observa una capa de carbón de casi 2 m de espesor en la zona cercana a Macanillo. ....	25
Figura 2.14 Nótese en color morado las curvas de nivel generadas con el DEM y superpuestas sobre la hoja N° 5739-IV-NE .....	26
Figura 3.1 Elementos de la teledetección pasiva (Tomado y modificado de Vivancos <i>et al.</i> , 2005) .....	30
Figura 3.2 El espectro electromagnético y las radiaciones usadas en teledetección (tomado de Vivancos <i>et al.</i> , 2005) .....	32
Figura 3.3 I, radiación incidente, R, radiación reflejada, T, radiación transmitida, A, radiación absorbida .....	34
Figura 3.4 Curvas de firmas espectrales de distintos materiales de la superficie terrestre (tomado de Alonso. 2003).....	36
Figura 3.5 Regiones del espectro electromagnético que interactúan con la atmosfera. UV, Ultravioleta, VIS, Visible, IRC, Infrarrojo cercano, IRM, Infrarrojo medio, IRT, infrarrojo térmico (tomado y modificado de Lillesand & Kiefer, 2000) .....	37
Figura 3.6 Alturas y plataformas de teledetección (tomado de Vivancos <i>et al.</i> , 2005) .....	40
Figura 3.7 Conjunto de píxeles de una imagen en escala de grises y su representación numérica (tomado de CCRS, 2007) .....	41
Figura 4.1 Pizarras color gris verdoso con algunas intercalaciones de arenisca. Vía Queniquea .....	48
Figura 4.2 Se aprecia el color rojo característico de la litología de la Formación La Quinta.....	51

Figura 4.3 Areniscas de colores claros, características de la Formación Aguardiente. Afloramiento ubicado vía La Florida.....	52
Figura 4.4 Nótese una fotografía de las calizas grises que constituyen el Miembro Guayacán de la Formación Capacho.....	53
Figura 4.5 Caliza oscura de la Formación La Luna, observada en un afloramiento a los márgenes del río Torbes, cerca de San Cristóbal .....	54
Figura 4.6 Ftanita del Táchira en capas delgadas. Afloramiento ubicado en la vía de Cantarranas.....	55
Figura 4.7 Areniscas de la Formación Barco aflorantes en la vía de Macanillo. Se pueden apreciar las capas delgadas de carbón .....	57
Figura 4.8 Se aprecian la intercalación de lutitas y areniscas con capas de carbón de la Formación Carbonera.....	59
Figura 4.9 Columna estratigráfica generalizada.....	62
Figura 4.10 Supersecuencias del occidente de Venezuela definidas por Parnaud <i>et al.</i> , (1995) (tomado y modificado de Hernández & Pérez, 2008) .....	63
Figura 5.1 Actualización geológica correspondiente a la hoja N° 5739.....	75
Figura 5.2 Unidad de Montaña (encerrada dentro del polígono rojo) y Unidad de Depresión (encerrada dentro del polígono amarillo), observadas gracias al contraste de color de las alturas del mapa tin generado en ArcGis. La línea anaranjada representa las sierras La Maravilla al noreste y Cazadero al suroeste. ....	77
Figura 5.3 Fila del Verde resaltada en rojo observada en Google Earth (Figura 5.3 A) y en vista de planta (Figura 5.3 B) .....	79
Figura 5.4 Nótese la orientación EO de Loma de Piedra resaltada en rojo .....	80

Figura 5.5 En (A) se observa una vista de planta del Río Torbes al noroeste de El Topón y la traza del perfil topográfico con orientación N30O resaltada en rojo. En (B) se observa el perfil topográfico a escala vertical 1:10.000 y horizontal 1:100.000 ....	81
Figura 5.6 Nótese dentro del polígono verde la zona del mapa donde se encuentran las Montañas redondeadas pertenecientes al Tipo 4, observada gracias al contraste de color de las alturas del mapa tin generado en ArcGis.....	82
Figura 5.7 (A) Relieve tipo cuesta observado en Google Earth. La ladera oeste resaltada en rojo y el tope en azul. Las flechas indican el sentido de la inclinación. (B) Nótese la traza del perfil topográfico orientado EO resaltada en rojo. (C) Perfil topográfico, escala vertical 1:30.000 y escala horizontal 1:100.000 .....	83
Figura 5.8 En la figura se puede observar al noreste de Ureña el Cerro El Rayo. Se ubica en la esquina noroeste de la hoja topográfica N° 5739 escala 1:100.000.....	84
Figura 5.9 (A) Imagen en la cual se observa la traza del perfil topográfico 1-2 con orientación EO y las características de los drenajes de la unidad. (B) Perfil topográfico 1-2 escala vertical 1:20.000 y horizontal 1:100.000.....	85
Figura 5.10 En la imagen A se observan todas las unidades topográficas. La imagen B corresponde a una imagen de sombra generada en ArcGis.....	86
Figura 5.11 Sección noreste del mapa donde afloran las secuencias Precámbricas (PESi) y Paleozoicas (Pzcm, Pzcs, Pzpp) .....	88
Figura 5.12 Zona centro sur oeste de la hoja al sur de Libertad en la que se observan anticlinales y un sinclinal tipo del área de estudio.....	96
Figura 5.13 Nótese en el centro de la imagen el anticlinal volcado al oeste de la Falla de Boconó .....	97

Figura 5.14 Nótese el movimiento entre el Anticlinal de Borotá con respecto al Levantamiento de Libertad de unos 7 Km aproximadamente hacia la derecha en la Falla de Capacho. ....	98
Figura 5.15 Se observa en el perfil geológico una estructura en “flor positiva” (tomado y modificado de Meier <i>et al.</i> , 1987).....	100
Figura 5.16 (A) Se Observa la litología Terciaria asociada al relieve de cuesta y la traza del perfil 1-2 con orientación N10E resaltada en rojo. (B) Perfil topográfico 1-2 a escala vertical 1:30.000 y horizontal 1:50.000 donde se aprecia la suave inclinación del relieve de cuesta .....	104
Figura 5.17 (A) Se Observa la litología Paleozoica asociada al val y la traza del perfil 1-2 con orientación N76E resaltada en rojo. (B) Perfil topográfico 1-2 a escala vertical 1:10.000 y horizontal 1:50.000 donde se observa la topografía correspondiente al val .....	106
Figura 5.18 (A) Se observa el Sinclinal de Uribante y la traza del perfil 1-2 perpendicular al eje del pliegue resaltada en rojo. (B) Perfil topográfico en el que se observa la elevación topográfica que corresponde al sinclinal colgado, escala vertical 1:30.000 y horizontal 1:100.000 .....	107
Figura 5.19 Modelo esquemático del noroeste de Sur América (tomado de Audemard & Audemard, 2002) .....	110

## TABLAS

Tabla 3.1 Valores de reflectividad de distintas superficies (tomado y modificado de Vivancos <i>et al.</i> , 2005) .....	35
Tabla 3.2 Bandas espectrales del sensor ETM+ (tomado y modificado de <a href="http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php">http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php</a> ) .....	39
Tabla 5.1 Binomios de dureza relativa determinados en la región de San Cristóbal..	93

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1      Columna estratigráfica generalizada, San Cristóbal, estado Táchira

Anexo 2      Mapa Geológico de San Cristóbal, escala 1:50.000

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 GENERALIDADES

Los Andes venezolanos son el accidente orográfico más prominente del país, tienen unos 36.120 kilómetros cuadrados de extensión, y constituyen una prolongación de Los Andes colombianos orientales, que al llegar al Nudo de Pamplona se bifurcan en dos cadenas: la Cordillera de Los Andes y la Sierra de Perijá (Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999).

La región del Táchira es la conexión entre los Andes venezolanos, la Cordillera Oriental de Colombia y el Macizo de Santander, por lo tanto, es una pronunciada depresión en comparación a La Cordillera Andina y presenta una gran red de estructuras comúnmente falladas que contienen las características de la bifurcación andina que lo rodea (Meier, Schwander, & Laubscher, 1987)

Estas características son producto de la combinación de esfuerzos compresivos provenientes de la interacción de la Placa de Nazca con el oeste de Sur América y de la interacción de la Placa Caribe con el norte de Venezuela (Audemard & Audemard, 2002).

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Generar un mapa geológico de superficie y cortes geológicos a escala 1:50.000, del área correspondiente a la hoja cartográfica 5739 ubicada en el estado Táchira, a través de la integración geológica de los datos obtenidos de las imágenes satelitales (Landsat 7 ETM+), geología de superficie, mapas previos, fotografías aéreas, las bibliografías y trabajos consultados.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Procesar e interpretar la imagen satelital Landsat 7 ETM+ adquirida el 13 de diciembre de 2000 para obtener una imagen sin distorsiones y realizar eficientemente estudios geológicos a larga distancia
- Interpretar las fotografías aéreas de las misiones 010298 a escala 1:50.000 (fotografías 155 a 167) y 010202 a escala 1:25.000 (fotografías 013 a 021) para realizar un estudio geológico a larga distancia de mejor calidad que el de las imágenes satelitales y complementar la información
- Recopilar y validar datos en campo.
- Integrar datos digitales del área de estudio por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG.).

## **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La zona centro-occidental del estado Táchira es un área con suma complejidad estructural, de difícil acceso, relativamente poco estudiada, y de gran interés para la exploración de hidrocarburos y geodinámicamente es de importancia para conocer la evolución de esta importante región fronteriza. Debido a esto se ha planteado la

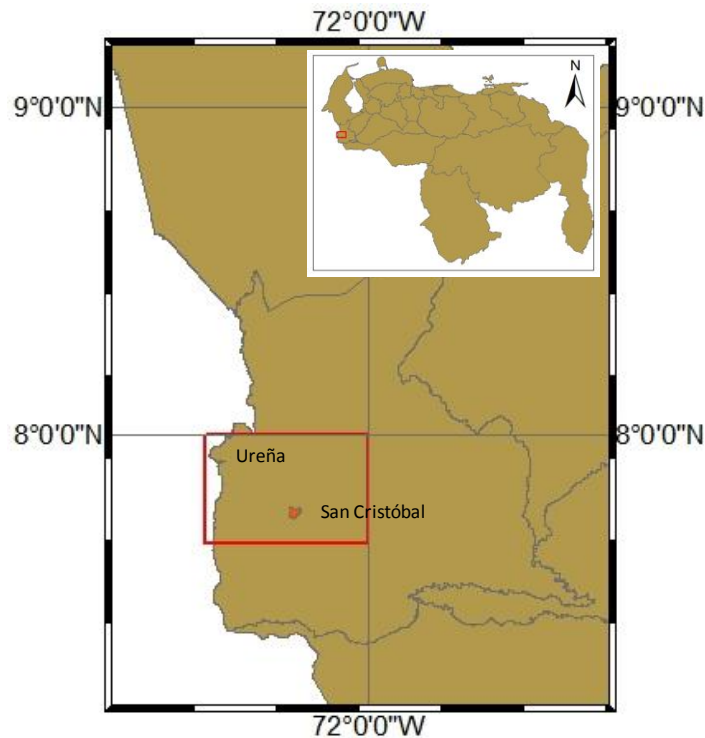
necesidad de realizar un estudio integrado, empleando las últimas tecnologías en sensores remotos que en conjunto con otros datos sirva para generar el mapa actualizado a escala 1:50.000.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La integración geológica de los datos, con los análisis de las fotografías aéreas, imágenes satelitales, mapas previos y la geología de campo, provee de un mapa geológico actualizado para una zona difícil acceso, de la cual no hay muchos mapas previos y que posee gran complejidad estructural. Así mismo, el estudio puede ser de interés para la industria petrolera desde el punto de vista de la exploración de hidrocarburos.

## **1.6 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio se localiza hacia la parte centro-occidental del estado Táchira y comprende las siguientes coordenadas: longitud ( $72^{\circ}30' - 72^{\circ}$ ) y latitud ( $7^{\circ}40' - 8^{\circ}$ ), tal como se muestra en la figura siguiente (Figura 1.1).



**Figura 1.1** Mapa de ubicación de la zona de estudio correspondiente a Hoja N° 5739: San Cristóbal

## 1.7 TRABAJOS PREVIOS

Schubert C. (1967) en su trabajo se basó en la geología de la región de Barinitas-Santo Domingo, y expone la evolución estratigráfica, la geología estructural, histórica y económica de la zona.

Shagam (1972) dividió la evolución tectónica de los Andes Venezolanos en tres unidades geológicas principales: la unidad 1 esta comprendida por el Complejo Iglesias de edad Precámbrico, la unidad 2 esta compuesta por las secciones del Paleozóico Inferior y Superior, y la unidad 3 compuesta por las secciones post-Paleozoicas. Así mismo, propone que la orogénesis se relaciona con el mecanismo de expansión del fondo oceánico y que las fajas montañosas pre-Terciarias se formaron por ciclos de expansión como los propuestos para las fajas montañosas del Terciario.

Mora (1980) realizó un estudio estratigráfico y estructural de la zona de Rubio, basado en trabajo de campo y análisis de laboratorio con los que determinó la secuencia estratigráfica perteneciente al Cretácico Tardío y Terciario. Estructuralmente concluyó que la zona se encuentra atravesada por fallas inversas y normales, generalmente, de ángulo alto y en dos direcciones principales, noroeste-sureste y suroeste-noreste.

Moreno (1980) realizó un estudio geológico al noreste de la población de Rubio, a través de una etapa de campo y de análisis de laboratorio, y determinó que desde el punto de vista geomorfológico el relieve está controlado por la litología y las estructuras. La principal característica estructural la constituyen dos sistemas de fallas, uno paralelo a la Cordillera Andina de rumbo N40E y otro con dirección N30O aproximadamente, controlados por la Falla de Capacho y la Falla de Bramón respectivamente.

Meier, Schwander, & Laubscher (1987) realizaron un estudio de la tectónica del estado Táchira, obtuvieron un mapa esquemático y basados en datos sísmicos hicieron diversos perfiles con los cuales explicaron el estilo estructural de la zona y concluyeron que Táchira es un conector entre las diferentes bifurcaciones de Los Andes y está compuesto por un sub-mosáico del bloque mosáico Maracaibo.

Bellizia & Pimentel (1995) en su trabajo realizan un estudio de la consolidación de terrenos continentales gondwánicos Precámbrico-Paleozoicos en los Andes de Venezuela y proponen que el Orogénesis Andino está constituido por tres provincias geológicas muy diferentes de los terrenos adyacentes las cuales fueron estructuradas durante la Orogénesis Eoherciniana, previo a su emplazamiento en la Cordillera Andina y establecen comparaciones paleogeográficas con Los Apalaches, el Bloque Maya y África Ecuatorial.

Parnaud, Gou, Pascual, Capello, Truskowski, & Passalacqua (1995) realizaron una síntesis estratigráfica del oeste de Venezuela basados en la sísmica de más de 600 pozos, 4000 km de líneas sísmicas y afloramientos de referencia, en las cuencas del Lago de Maracaibo y Barinas-Apure. Con este trabajo dividieron la evolución estratigráfica de la zona en seis supersecuencias limitadas por discordancias desde la fase extensiva Jurásica hasta el margen activo en el Pleistoceno.

Audemard & Audemard (2002) establecieron las relaciones estructurales de los Andes de Mérida con la interacción geodinámica de Sur América y el Caribe. Proponen que la estructuración de los Andes Mérida está relacionada con una subducción suave tipo A donde el crecimiento y la evolución de la cadena son similares a los de una cuña de acreción sedimentaria (Barbados). Esta subducción continental es la parte SE de un orógeno de flotación mayor que comprende también la Sierra de Perijá y el bloque de Santa Marta.

Noyola, Hinojosa, & Martín (2005) realizaron una caracterización litológica en la franja costera del Golfo de California mediante técnicas de percepción remota como la fotointerpretación, combinaciones de bandas y clasificación supervisada de una imagen *Landsat Thematic Mapper* (TM). En la fotointerpretación, el compuesto de falso color TM 742 en rojo, verde y azul, respectivamente, resultó la mejor combinación de bandas para la discriminación litológica de las principales unidades volcánicas y rocas metamórficas y graníticas del basamento cristalino. Mediante la clasificación supervisada se obtuvieron 26 clases litológicas. El mapa litológico resultante de la clasificación supervisada se evaluó por los métodos de matriz de confusión e índice Kappa ( $\kappa$ ). La evaluación resultó en un 79% de confiabilidad, con un índice  $\kappa$  de 0.733, indicando que este mapa cumple los criterios de evaluación y permite recomendar esta aplicación en estudios geológicos en otras zonas desérticas.

Caires & Jaimes (2008) realizaron una actualización de la cartografía geológica de la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat 7 ETM como una solución alternativa a la problemática que presenta la necesidad de un estudio geológico en una zona de difícil acceso. Y concluyeron que el mapa geológico actualizado del área propuesta al ser comparado con la información previa, a manera de tener una referencia visual de la zona, permitió demostrar que con la utilización de este tipo de estudio es posible llegar a resultados muy similares a los que se han obtenido con estudios de geología clásica.

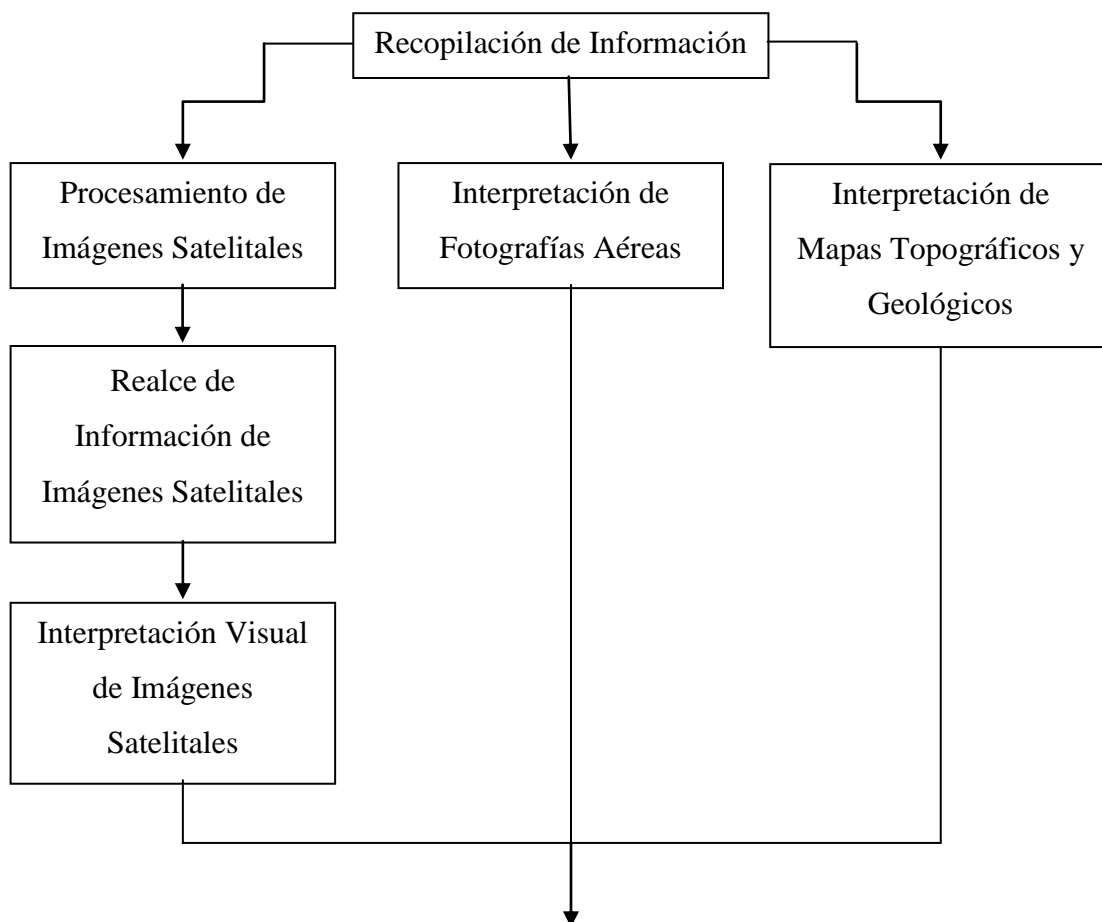
Gherzi & Guillón (2008) llevaron a cabo una actualización geológica a través de las imágenes satelitales (Landsat 7 ETM+) de la zona centro-occidental de la Sierra de Perijá y concluyeron que la zona presenta dos dominios litológicos distintivos, una de relieve abrupto, donde prevalecen rocas de origen metamórfico y otra zona llana donde se destacan rocas de rocas de origen sedimentario. Así mismo, identificaron las principales estructuras con dirección noreste - sureste preferencialmente, siendo la estructura de mayor expresión la Falla de Perijá con orientación N25°E

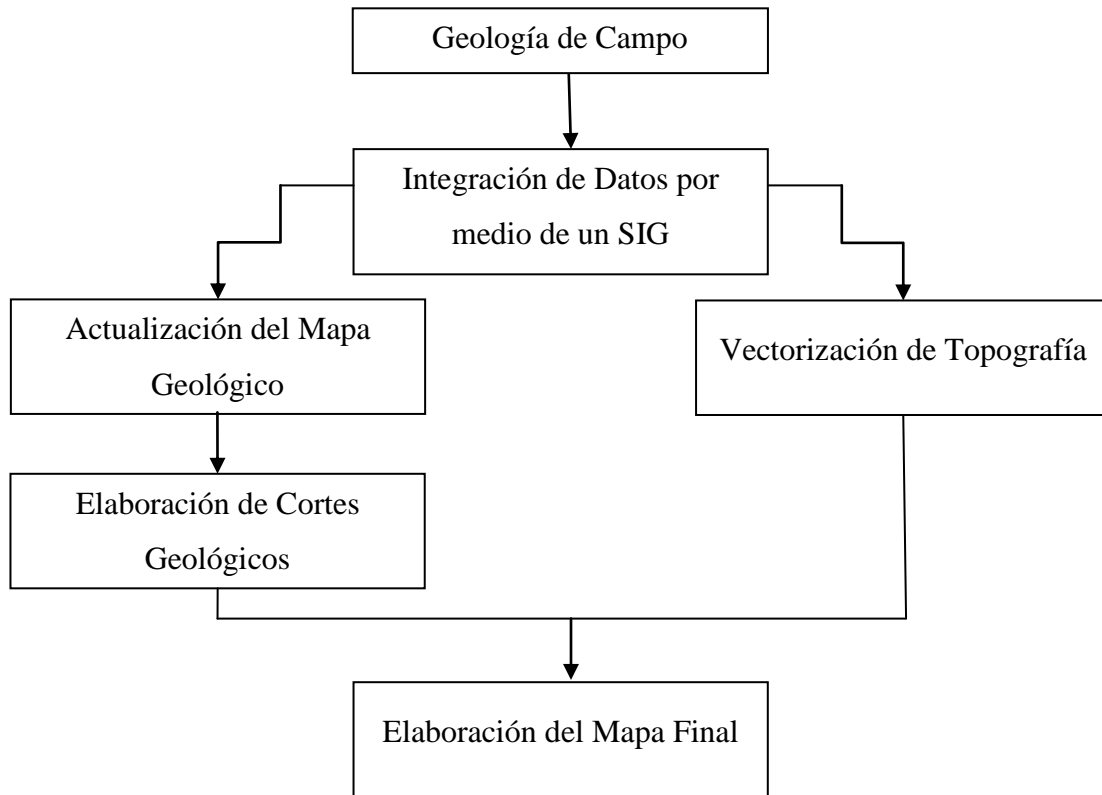
Méndez & De Ponte (2008) elaboraron un mapa geológico de la zona sur de la Sierra de Perijá a través de la utilización de imágenes de Landsat 7 ETM+. Con este trabajo se determinaron las unidades sedimentarias, y además, las dos unidades estructurales en las que se divide la zona, una de montaña con las formas orientadas N25E y una depresión rodeada de relieves abruptos.

## CAPÍTULO II

### MARCO METODOLÓGICO

Los métodos a utilizar en la elaboración de este trabajo son sumamente diversos, debido a la integración de técnicas como la interpretación de fotografías aéreas y un levantamiento geológico de campo con la interpretación y procesamiento de imágenes satelitales, actualización de un SIG y recopilación de trabajos previos (ver Figura N° 2.1). Los programas utilizados son los siguientes: ENVI 4.5 ©2008, ESRI® ArcGis 9.3, Stitchmaps 2.4, ERDAS IMAGINE 9.3, Corel Draw X4 y Canvas 11.





**Figura 2.1** Diagrama esquemático del marco metodológico

## 2.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Etapa en la cual, como su nombre lo indica, se recopiló la información bibliográfica, mapas, fotos aéreas, imágenes satelitales, entre otros, necesarios para realizar la integración geológica y ampliar el conocimiento de la zona de estudio. A continuación se enumera y explica en material recopilado:

- Mapa topográfico de San Cristóbal 1:100.000 N° de referencia 5739 y sus 16 hojas topográficas correspondientes a escala 1:25.000.

- Mapas geológicos de superficie de la Creole Petroleum Corporation escala 1:50.000 (G-2-D y H-2-B)
- Mapa geológico de: San Cristóbal, escala 1:100.000, del Ministerio de Energía y Minas, edición 1, 1986.
- Imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ adquiridas el 13 de diciembre de 2000 y el 02 de enero de 2008, descargadas gratuitamente desde la página web oficial de la U.S. Geological Survey (U.S.G.S.)
- Imagen Landsat 5 TM adquirida el día 02 de septiembre de 1992, descargada gratuitamente desde la página web oficial de la U.S.G.S.
- Imagen de radar correspondiente a la hoja NB 18-4 a escala 1:250.000
- 13 fotografías aéreas de la número 155 a la 167 de la misión 010298 a escala 1:50.000 y 8 fotografías aéreas de la número 013 a 021 de la misión 010202 a escala 1:25.000
- Imágenes de Google Earth, extraídas con el programa Stitchmaps 2.40 a una altura de ojo de 4.000 m, con una resolución de 7 x 4 m por pixel y georeferenciadas en formato WorldFile compatible con ArcGis 9.3. El mosaico realizado se puede observar en la Figura N° 2.2.
- Elaboración de una columna estratigráfica generalizada en base a la información recopilada del González de Juana, Iturralde de Arozena, & Picard (1980) y del Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica(1999)



**Figura 2.2** Mosaico de imágenes de Google Earth generado con el programa Stitchmaps. Imágenes descargadas en Mayo de 2009

## 2.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Consiste en el procesamiento inicial de las imágenes crudas para corregir distorsiones radiométricas, geométricas y eliminar el ruido. Las distorsiones radiométricas alteran el brillo de los píxeles y se debe principalmente a interferencias atmosféricas y a efectos de la instrumentación, por otra parte, las geométricas responden a diversas causas como la rotación de la Tierra, altitud, velocidad de la plataforma, curvatura terrestre, entre otras. Todos los pasos del procesamiento de imágenes puede ser consultado más detalladamente en Ghersi & Guillón (2008), Caires & Jaimes (2008), Pérez, Soriano & Valenzuela (2008) entre otros. A continuación se explican los métodos usados en el procesamiento de la imagen satelital Landsat 7 ETM+ con fecha 13 de diciembre de 2000:

### 2.2.1 Calibración de Bandas

Con el programa ENVI 4.5 ©2008 se aplica la calibración Landsat TM (se usa igualmente para el sensor ETM+) para convertir los números digitales en radiancia o reflectancia exoatmosférica usando los datos de escala mínima y máxima, fecha de adquisición y la elevación del Sol contenidos en el archivo de metadatos de la imagen satelital. Específicamente se usa la calibración de reflectancia y se hace este proceso individualmente para las bandas 1 a 5 y la banda 7 que serán las 6 bandas a usar a lo largo del procesamiento. En la Figura N° 2.3 se aprecia la ventana del programa ENVI en la que se colocan los parámetros de calibración.

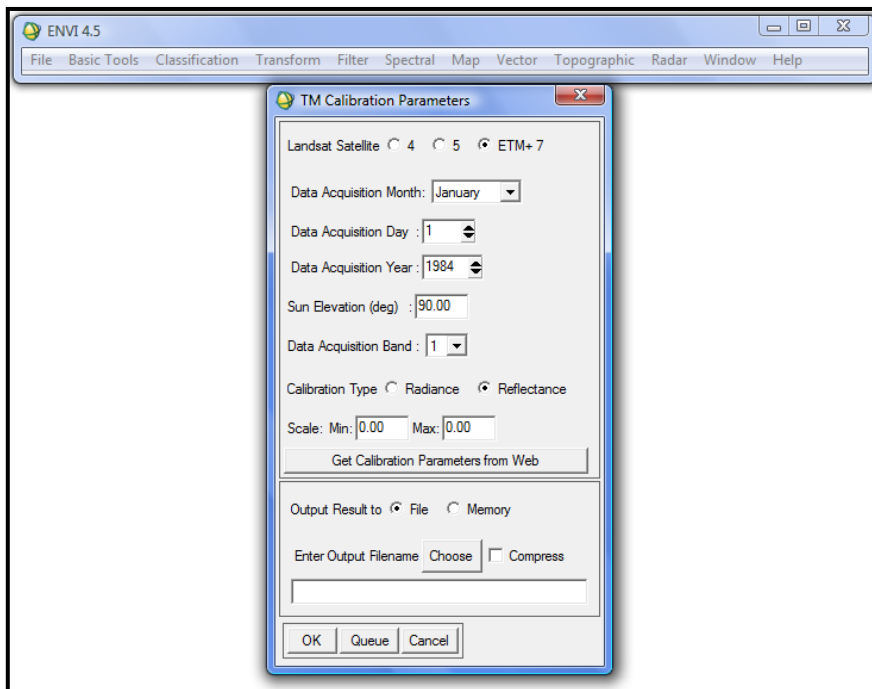


Figura 2.3 Ventana de parámetros de calibración

### 2.2.2 Apilamiento de Bandas

Una vez calibradas las bandas se procede a apilarlas en un archivo donde serán reproyectadas con un mismo tamaño de pixel e igual proyección y que tendrá una

extensión geográfica igual que la extensión de los archivos iniciales o que abarque solo donde los archivos se superponen. En la Figura N° 2.4 se observa la ventana donde se escogen las bandas a agrupar y otros parámetros necesarios para el apilamiento.

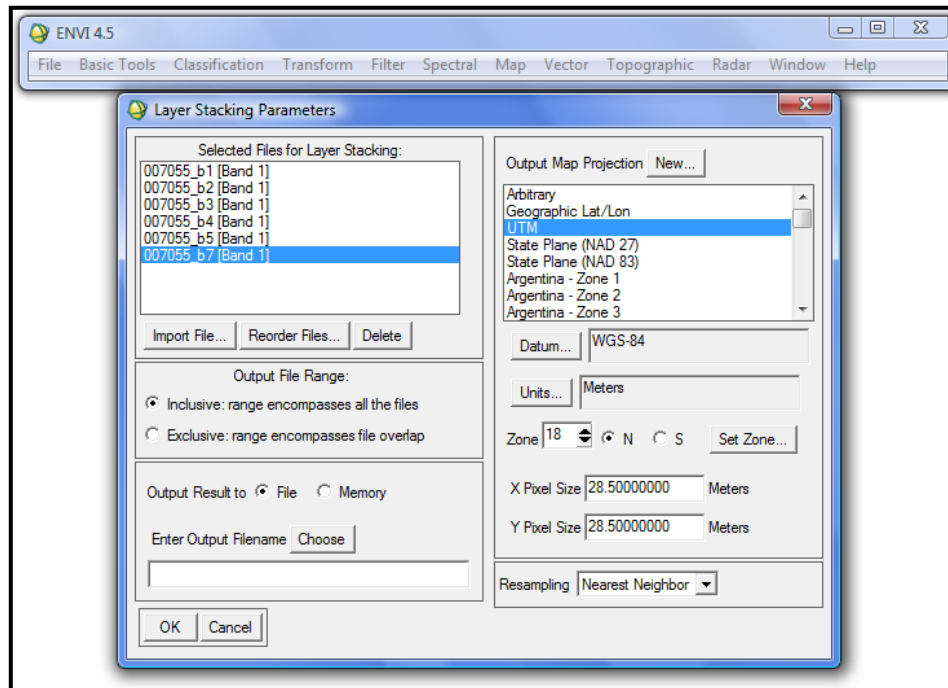
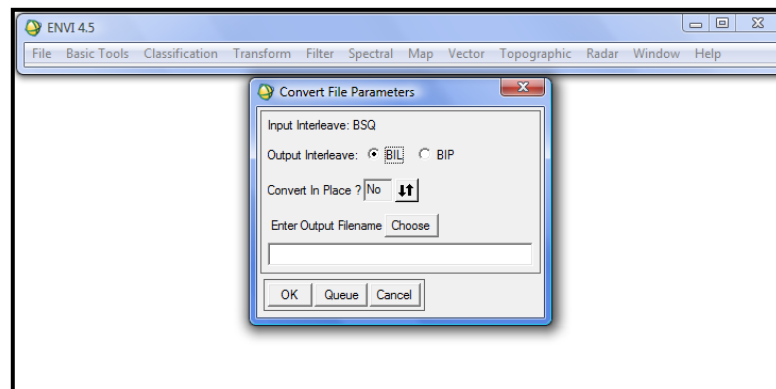


Figura 2.4 Ventana de apilamiento de bandas

### 2.2.3 Conversión de Formato BSQ A BIL

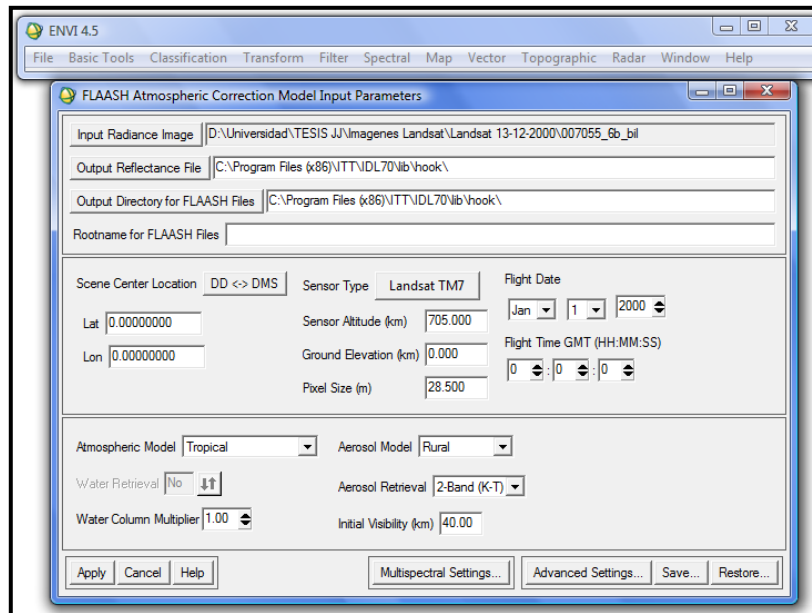
El formato secuencial de bandas (BSQ, por sus siglas en ingles) es el formato de salida de la imagen multibanda, pero no es compatible con el tipo de archivo requerido por la corrección atmosférica *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), debido a esto es necesario realizar la conversión a formato de bandas entrelazadas por líneas (BIL, por sus siglas en ingles) a través del programa ENVI como se observa en la Figura N° 2.5.



**Figura 2.5** Ventana de parámetros de conversión

#### 2.2.4 Corrección Atmosférica en FLAASH

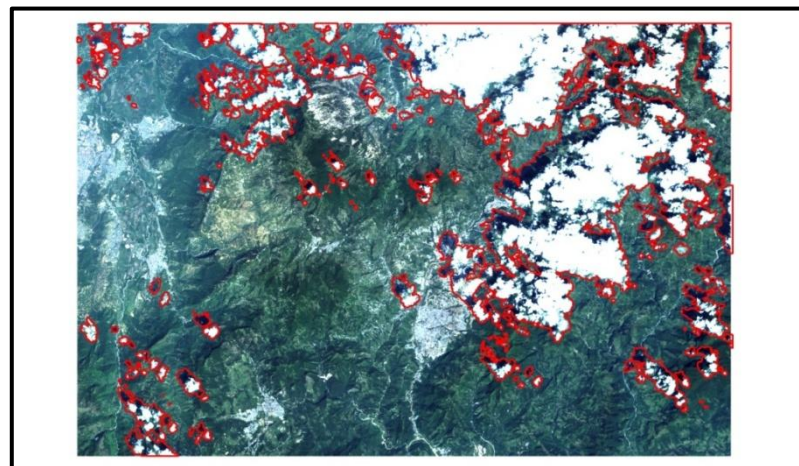
La teledetección requiere que la radiación solar pase a través de atmosfera antes de ser captada por los instrumentos. Debido a esto, las imágenes tienen información tanto de la superficie terrestre como de la atmosfera y para poder hacer un análisis cuantitativo de la reflectancia de la superficie es necesario remover los efectos de la misma, como el vapor de agua, la distribución de los aerosoles, entre otros. El modulo FLAASH de ENVI (ver Figura N° 2.6) está basado en los principios de corrección atmosférica compensando los efectos de la misma y es una herramienta de modelado para la recuperación de la reflectancia espectral (ENVI, 2008)



**Figura 2.6** Ventana de corrección atmosférica FLAASH

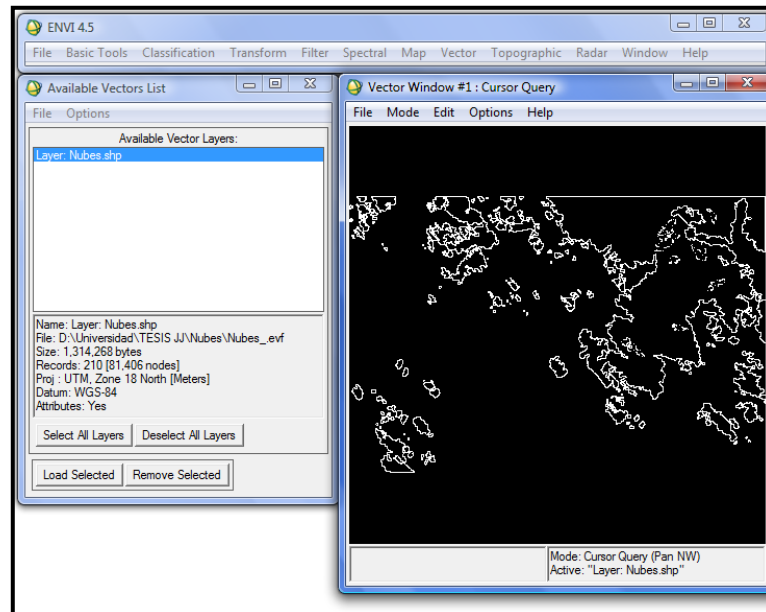
### 2.2.5 Elaboración de La Máscara de Nubes

Para continuar con los pasos restantes es necesario eliminar de la imagen los píxeles de las nubes y sus sombras, y así obtener una imagen pura. Para esto, es necesario crear un *shapefile* o “capa” en ArcGis que las cubra en su totalidad, esta capa se puede ver sobre la imagen satelital en la Figura N° 2.7.



**Figura 2.7** Imagen satelital de la zona de estudio donde las nubes y sus sombras se encuentran encerradas dentro de los polígonos rojos

Posteriormente, se importa en ENVI la “capa” creada en ArcGis como se aprecia en la Figura N° 2.8y se exporta del formato de vectores de ENVI (EVF, por sus siglas en ingles) a una región de interés (ROI, por sus siglas en ingles).



**Figura 2.8** Ventana donde se abre la “capa” vectorizada en EVF y se exporta a ROI

Para finalizar, se crea la máscara de nubes sobre la imagen con la corrección atmosférica FLAASH (ver Figura N° 2.9).

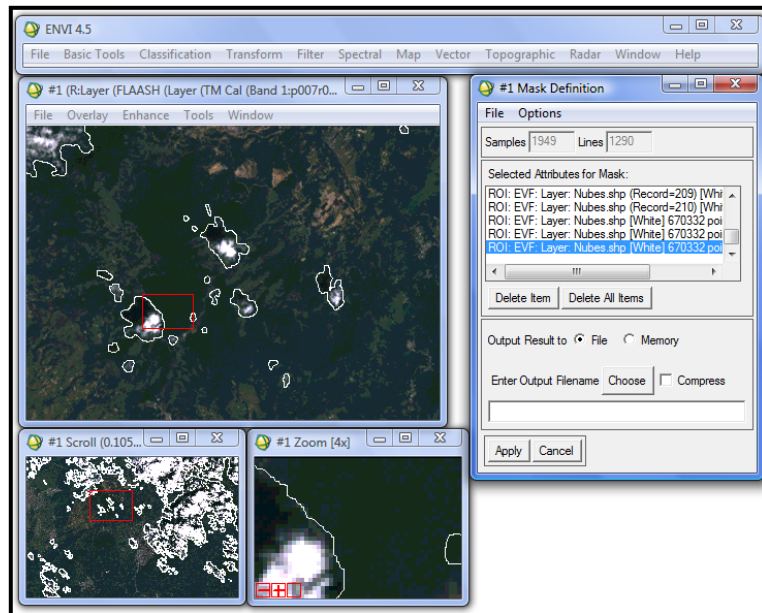
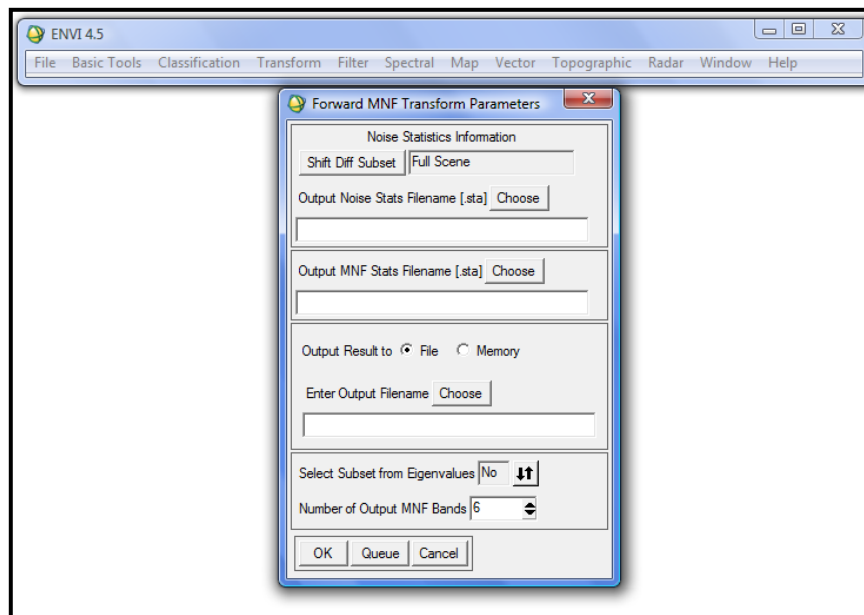


Figura 2.9 Ventanas de visualizaciones previas y de creación de la máscara de nubes

### 2.2.6 Transformación Mínima de Ruido

La transformación mínima de ruido (MNF, por sus siglas en inglés) es usada para determinar la dimensionalidad espectral de la imagen, para disminuir el ruido de los datos y reducir los requerimientos computacionales para su posterior procesamiento (ENVI, 2008)



**Figura 2.10** Ventana de MNF

### 2.2.7 Corrección de Pureza de Pixel

El cálculo del índice de Pureza del Píxel permite identificar en la imagen los píxeles más puros espectralmente. Para esto se seleccionan los píxeles extremos que satisfacen el número de iteraciones o el factor de tolerancia propuesto por el usuario, lo que aumenta el nivel de pureza de la imagen

## 2.3 REALCE DE INFORMACIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

En esta etapa se efectuaron diversos procesos para realzar la información observada en las imágenes satelitales con el fin de facilitar su interpretación. A continuación se detallan cada uno de ellos:

### **2.3.1 Combinaciones de Bandas**

En las imágenes multiespectrales, como en el caso las del sensor ETM+, es posible realizar diversas combinaciones asignando a los diferentes canales espectrales los colores primarios rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en ingles), esto da como resultado imágenes de color natural o de color falso, las cuales son sumamente útiles para la interpretación. Se pueden realizar un total de 120 combinaciones, de las cuales, la 321 es la de color verdadero (Figura N° 2.11 a) y la 742 es la más informativa para el análisis litológico según Noyola *et al*, (2005). Fernández, I & Herrero, E (2001), recomiendan usar las combinaciones 752, 753, 754 y 135 para la interpretación geológica.

### **2.3.2 Clasificación No Supervisada**

Según, ERDAS (2001), es el proceso de agrupar los pixeles en cierta cantidad de clases individuales de acuerdo a un criterio estadístico de los datos. Para la clasificación no supervisada, el programa identificará por medio de patrones estadísticos cada pixel y lo asignará de acuerdo a su criterio a una clase específica.

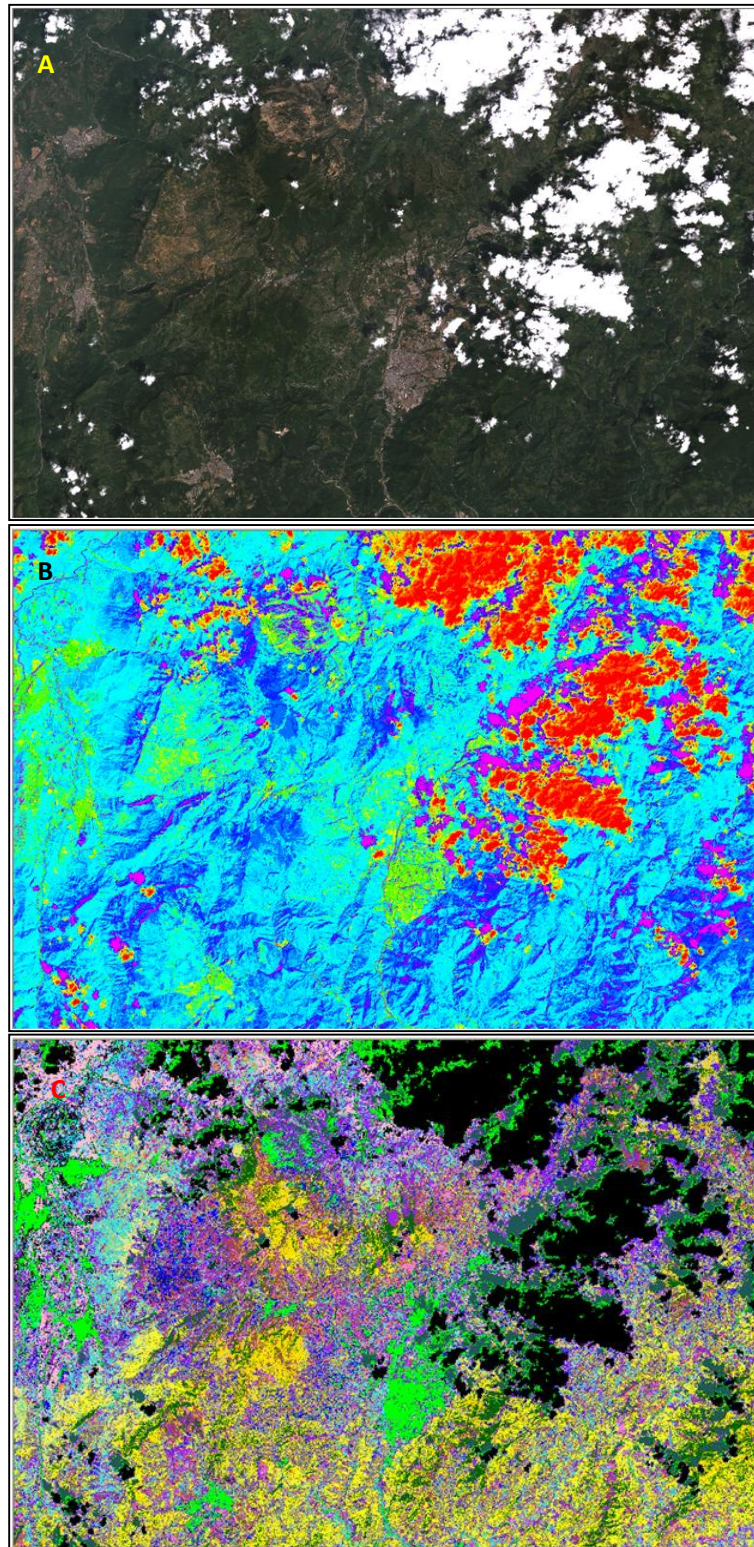
Este proceso ayuda a resaltar algunas características de la imagen que no pueden apreciarse con las diferentes combinaciones de bandas (Figura N° 2.11 b)

### **2.3.3 Clasificación Supervisada**

Este proceso es básicamente igual al anterior, con la diferencia de que el programa no establece el criterio base para seleccionar estadísticamente los pixeles, el usuario debe seleccionar los pixeles que representen los patrones ya sea que lo haya identificado

por medio de otras fuentes o reconocidos en la imagen. Una vez establecido el criterio base, el programa selecciona los píxeles estadísticamente y los asigna a cada una de las respectivas clases (Figura N° 2.11 c).

En la Figura N° 2.11 se observa una comparación entre la imagen satelital en color verdadera con las clasificaciones supervisada y no supervisada.



**Figura 2.11** Imagen Landsat 7 correspondiente a la hoja 5739. a) Imagen en color natural (combinación de bandas 321). b) Imagen con clasificación no supervisada. c) Imagen con clasificación supervisada

## **2.4 INTERPRETACIÓN VISUAL DE LAS IMÁGENES SATELITALES**

Una vez que las imágenes han sido procesadas y su información realzada con cada uno de los procesos anteriores, se procede a interpretar visualmente lo que se observa directamente en ellas, esto presenta diversas limitaciones, como lo son la capacidad del monitor y la pericia del observador.

Se comparan las características de la imagen con los mapas geológicos previos y de esta forma se establece de la manera más precisa posible los contactos litológicos y las características de las estructuras, con la ayudada de los cambios de vegetación, los drenajes y la expresión topográfica de la zona.

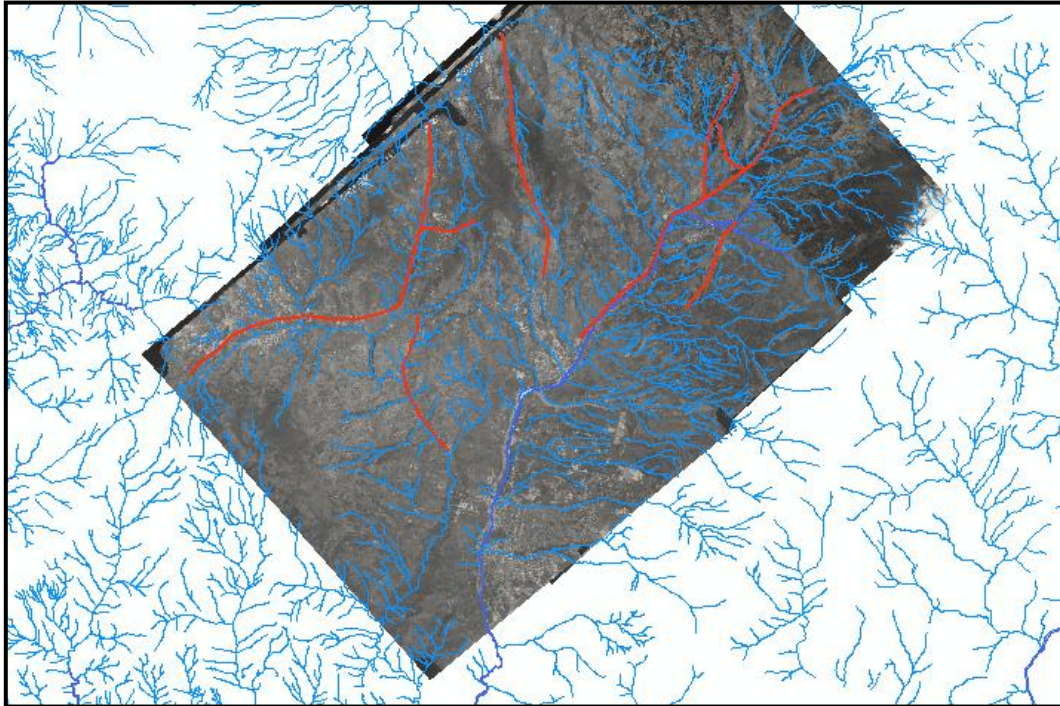
La interpretación de las diferentes combinaciones de bandas y de las clasificaciones también permite discriminar tipos de vegetación, tipos de suelos y su contenido mineral, morfología de zonas urbanas, zonas de cultivo, y otras características útiles para la geología, la oceanografía, los estudios costeros, de contaminación, la hidrogeología, entre otros.

## **2.5 INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS**

La fotointerpretación se usa como complemento a la aplicación de los sensores remotos, ya que gracias a su estereoscopia, calidad y escala es posible observar detalles que pudieron ser pasados por alto en la interpretación visual de las imágenes satelitales.

El método clásico de trabajo es el de dibujar los diferentes objetos observados en la fotografía sobre un acetato transparente al mismo que tiempo que se observa el par de fotos con el estereoscopio. Para este trabajo se dibujara una “capa” sobre la foto

escaneada con el programa ArcGis al mismo tiempo que se observan las fotos (Figura N° 2.12). Este procedimiento permite corregir fácilmente además de su integración directa al SIG.



**Figura 2.12** Interpretación sobre fotografías aéreas 163 a 168 de la misión 010298 a escala 1:50.000, realizada directamente en ArcGis

## 2.6 INTERPRETACIÓN DE MAPAS

Incluye la interpretación de los mapas geológicos recopilados de la zona y de las hojas topográficas correspondientes a la referencia N° 5739, a escala 1:100.000 y 1:25.000.

La interpretación realizada sobre las hojas topográficas se basó en el estudio de los drenajes, vías y de los accidentes topográficos, tanto para la planificación de la geología de campo como para los análisis finales del mapa. Por su parte, la

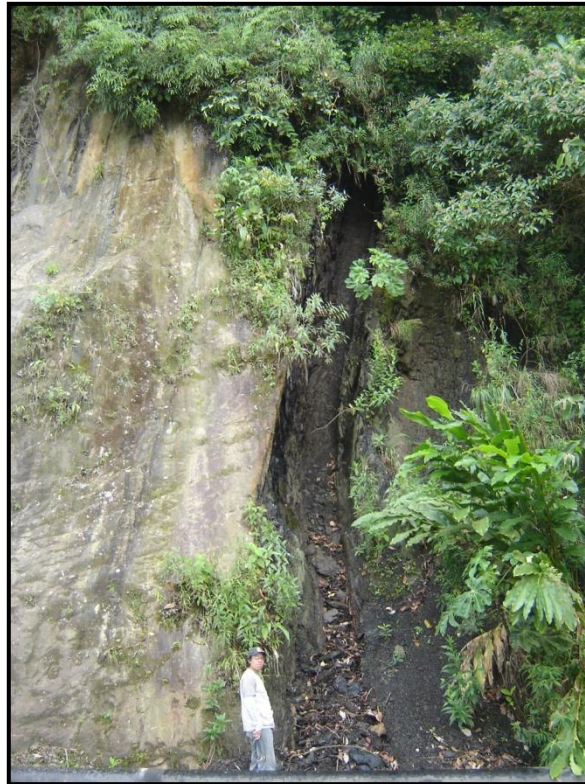
interpretación sobre los mapas geológicos se enfocó en el estudio estratigráfico y estructural de la zona.

Estos datos se integraron posteriormente para su interpretación conjunta por medio de un SIG.

## **2.7 GEOLOGÍA DE CAMPO**

El trabajo geológico de campo se basó en una revisión general de la litología, las estructuras y un reconocimiento geomorfológico del área correspondiente a la hoja cartográfica de San Cristóbal, número 5739. Para esto se establecieron previamente zonas de interés, basadas en la ausencia de datos en los mapas geológicos, zonas de difícil interpretación o de poca visibilidad en las imágenes satelitales, la accesibilidad, vialidad y la falta de concordancia entre la geología y su expresión topográfica.

Ya en la zona de estudio, el procedimiento a seguir es el siguiente: ubicar el afloramiento y marcar dicha posición a través del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés), identificar la o las formaciones aflorantes mediante una breve descripción así como las estructuras observadas en el mismo y hacer la verificación con el mapa geológico. En la Figura N° 2.13 se encuentra una foto de la revisión geológica de campo realizada en el sector de Macanillo, vía La Florida.



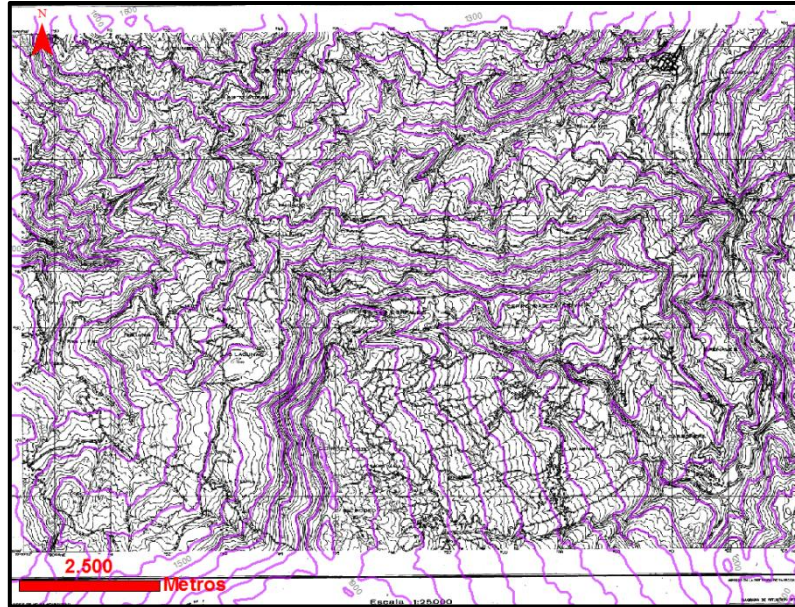
**Figura 2.13** Levantamiento geológico de campo donde se observa una capa de carbón de casi 2 m de espesor en la zona cercana a Macanillo.

## **2.8 INTEGRACIÓN DE DATOS POR MEDIO DE UN SIG**

Como su nombre lo indica, este proceso permite integrar datos obtenidos en los procedimientos anteriores por medio de la digitalización y posterior vectorización de los mismos con el programa ArcGis, el cual permite la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica de una manera sencilla y referenciada en el sistema de coordenadas geográficas mundial llamado Sistema Geodésico Mundial 1984 (WSG84, por sus siglas en ingles).

La vectorización de los drenajes, localidades y las vías recorridas durante la revisión geológica de campo se realizó a partir de las 16 hojas 5739 a escala 1:25.000.

Por otra parte, las curvas de nivel se obtuvieron por medio del Modelo de Elevación Digital (DEM; por sus siglas en inglés) el cual es un soporte informático de una superficie topográfica, cuya información puede ser analizada y transformada; es así, como con ayuda del programa ArcGis y el DEM se obtuvieron en breves y sencillos pasos curvas de nivel con separación de 100 m.



**Figura 2.14** Nótese en color morado las curvas de nivel generadas con el DEM y superpuestas sobre la hoja N° 5739-IV-NE

## 2.9 ELABORACIÓN DE CORTES GEOLÓGICOS

El procedimiento para realizar los cortes geológicos fue el siguiente:

- Se escogió el lugar del mapa por donde se iban a trazar los cortes, basado en las estructuras que se quisieran observar, buscando la mayor perpendicularidad con los ejes de las mismas y con los rumbos de los datos

- El perfil topográfico se realizó de manera automatizada con el programa ArcGis y el DEM de la zona, lo que permite obtener una tabla de datos para su graficación.
- Una vez exportada la tabla de los datos de distancia y altura al programa Microsoft Excel, se imprimieron los 2 cortes a escala 1:50.000 vertical y horizontal y se procedió a realizar la interpretación geológica.
- Posteriormente, una vez culminados los cortes, se escanearon y editaron con el programa Corel Draw X4.

## **2.10 ELABORACIÓN DEL MAPA FINAL**

Una vez concluida la actualización del mapa geológico, con la interpretación de la imagen satelital, de las fotografías aéreas y la adición de los datos de la revisión geológica de campo, aunado a la vectorización de la topografía y de los cortes geológicos se procedió a generar como producto final un mapa geológico a escala 1:50.000 de la región de San Cristóbal, correspondiente a la hoja cartográfica N° 5739 a escala 1:100.000, el cual se puede observar en el Anexo 2.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 PERCEPCIÓN REMOTA**

Según Short (2009), la percepción remota o teledetección hace referencia a un instrumento basado en las técnicas empleadas para la adquisición y medición de datos en el espacio organizado sobre alguna propiedad ya sea espectral, espacial o física de una matriz de objetivos (píxeles) que corresponden a objetos, características y materiales dentro de la escena aplicando dispositivos de grabación que no se encuentran en contacto físico con la misma.

#### **3.2 PRINCIPIOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA**

La adquisición de información a distancia implica la existencia de un flujo de información entre el objeto observado y el receptor. El portador de esta información es la radiación electromagnética, esta puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética; la cantidad y tipo de esta radiación emitida depende de su temperatura.

El principal emisor de radiación es el Sol, esta es reflejada por la Tierra y los objetos situados en ella, es la más comúnmente utilizada en teledetección. Otra opción es que el sistema receptor incorpore un emisor de radiación (Radar), cuyo reflejo en la superficie del planeta objeto de estudio es captado por el propio receptor.

El objetivo fundamental de la teledetección es el de analizar las características de la radiación que emite la superficie terrestre, y que es captada posteriormente por un sensor situado en un satélite. El análisis de estos datos, permite determinar qué elementos y factores ambientales las han producido (Vivancos, Llastarri, Grau, & Vivancos, 2005)

### **3.3 ELEMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA**

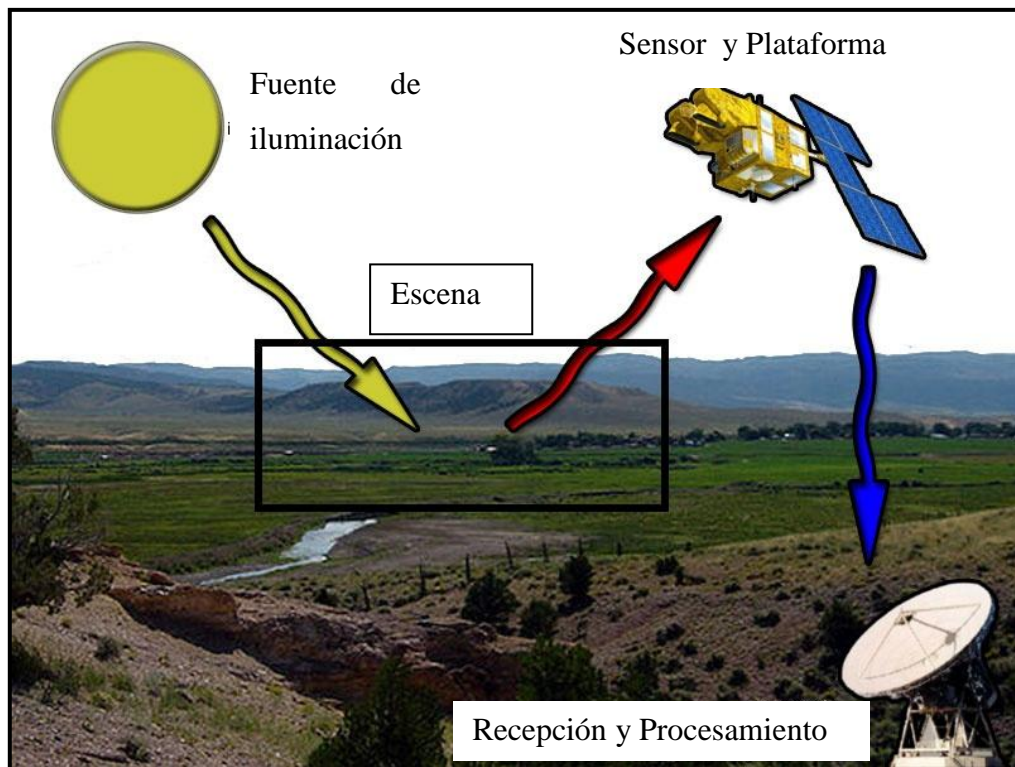
La teledetección es el resultado de la interacción entre cuatro elementos fundamentales (tomado y modificado de Vivancos *et al*, 2005):

- La fuente de energía  
Es la que "ilumina" el objetivo emitiendo una onda electromagnética (flujo de fotones). También es posible medir el calor que se desprende de la superficie del objetivo que emite una onda infrarroja térmica y en cuyo caso el propio objetivo es la fuente de energía.
  
- El objetivo  
Es la porción de la superficie terrestre observada por el satélite. Su dimensión varia, en función de la resolución del captador, de unos pocos km<sup>2</sup> a algunos miles de km<sup>2</sup>.
  
- El sensor  
Se encarga de medir la radiación electromagnética reflejada por el objetivo. El sensor puede encontrarse en un satélite o en un avión, sobrevolando el objetivo a una altura de pocos centenares de metros hasta distancias de 36000 kilómetros en el caso de los satélites meteorológicos.

- Estación de recepción y procesamiento

La energía grabada por el sensor debe ser transmitida, normalmente en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son convertidos a imágenes digitales (Canada Centre for Remote Sensing, 2007).

En la Figura N° 3.1 se observa una imagen que integra todos los elementos de la percepción remota.



**Figura 3.1** Elementos de la teledetección pasiva (Tomado y modificado de Vivancos *et al.*, 2005)

### **3.4 LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA**

La radiación es una de las tres formas de transmisión de energía en la naturaleza (conducción, convección y radiación) siendo la única que se transmite sin contacto material entre el emisor y el receptor. Específicamente, la radiación electromagnética se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz (300.000 Km/s) transportando cantidades discretas de energía (tomado de Alonso, 2003).

#### **3.4.1 Características de las Ondas Electromagnéticas**

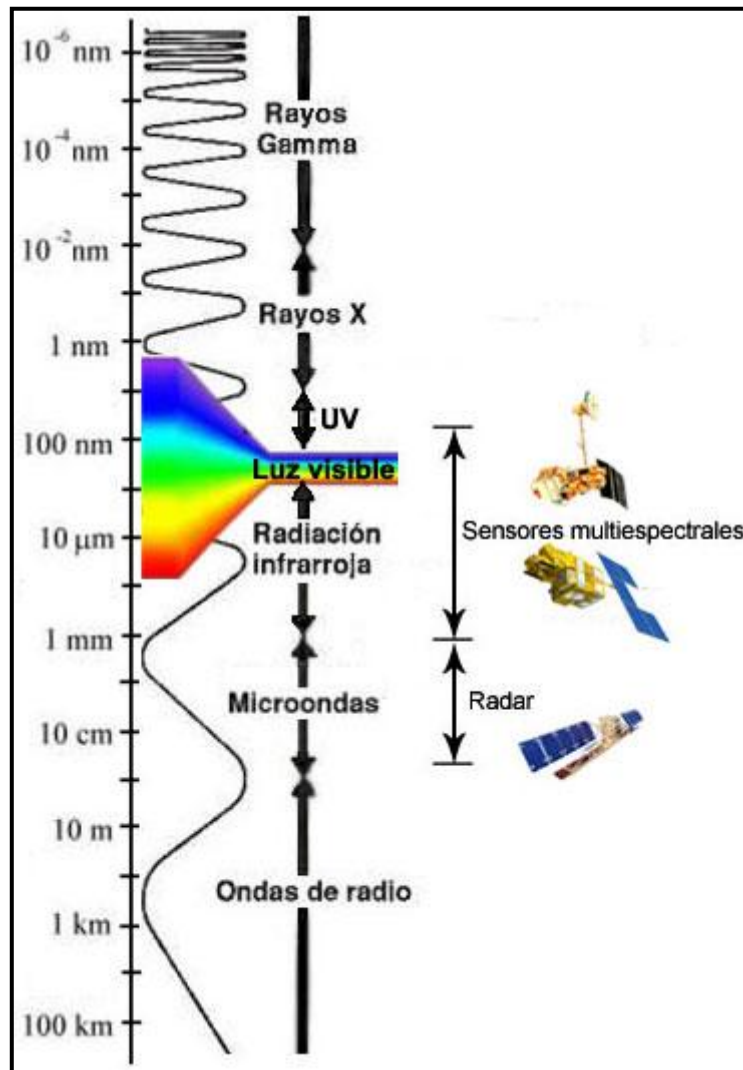
- Las ondas electromagnéticas son todas semejantes y sólo se diferencian en su longitud de onda y frecuencia. La luz es una onda electromagnética.
- Las radiaciones electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz.
- Las ondas electromagnéticas transportan energía radiante.
- Cuando la radiación electromagnética incide sobre la superficie de un cuerpo, una parte es reflejada y el resto transmitida.
- La intensidad de las ondas electromagnéticas disminuye con el cuadrado de la distancia.

#### **3.4.2 El Espectro Electromagnético**

Estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes, desde los rayos X y gamma con longitudes de onda menores de 100 Angstroms hasta las ondas de televisión y radio con longitudes mayores de un metro. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético (ver Figura N° 3.2).

Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones en función de la longitud de onda. Las regiones más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son:

- Luz visible
- Infrarrojo reflejado
- Infrarrojo térmico
- Radar



**Figura 3.2** El espectro electromagnético y las radiaciones usadas en teledetección (tomado de Vivancos *et al.*, 2005)

### 3.4.3 Radiaciones Electromagnéticas Usadas en la Percepción Remota

Según, Vivancos *et al.*, (2005), en la teledetección aeroespacial, se mide la cantidad de radiación electromagnética reenviada por una porción de superficie terrestre. Los instrumentos de los satélites de teledetección son sensibles a un rango amplio de frecuencias que el espectro visible. El rango de longitudes de onda que pueden captar, va desde el ultravioleta, hasta las zonas infrarrojas, térmicas y las microondas.

Las radiaciones más utilizadas en teledetección son:

- **Las Microondas**  
Las microondas, se usan en los sensores radar. Se generan mediante unos dispositivos electrónicos llamados magnetrones, parecidos a los que hay en los hornos microondas domésticos.
  
- **La Radiación Infrarroja**  
Los cuerpos calientes emiten radiación infrarroja, propiedad que tiene muchas aplicaciones en teledetección, medicina y astronomía. La zona infrarroja del espectro, se subdivide en tres regiones: infrarrojo cercano, medio y lejano o térmico.
  
- **El Espectro Visible**  
La luz es la parte visible del espectro electromagnético. La sensibilidad espectral del ojo humano es muy estrecha y se subdivide en seis intervalos que definen los colores básicos: rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta.
  
- **La Radiación Ultravioleta**  
La radiación ultravioleta es la componente principal de la radiación solar. Entre los componentes de los rayos de luz blanca visible del Sol que llegan a la Tierra, se reciben también rayos UV-A (ultravioleta-A) y UV-B

(ultravioleta-B). La mayor parte de los rayos de Sol que recibe la Tierra, así como los que proporcionan las lámparas que emiten esos rayos, son del tipo UV-A.

#### 3.4.4 Interacción de la Radiación con los Objetos y la Superficie Terrestre

Todos los objetos de la superficie terrestre reciben radiación emitida por otros cuerpos, fundamentalmente del Sol.

Dependiendo de las características del objeto material la radiación, puede seguir tres caminos (Alonso, 2003) como puede observarse en la Figura N° 3.3:

- **Reflejarse**, la radiación es reenviada de vuelta al espacio
- **Absorberse**, la radiación pasa a incrementar la energía del objeto
- **Transmitirse**, la radiación se transmite hacia abajo a otros objetos



**Figura 3.3** Leyenda: I, radiación incidente, R, radiación reflejada, T, radiación transmitida, A, radiación absorbida

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad ( $\rho$ ) y cuanto más reflectante es un material mayor es su valor; la fracción de energía que se absorbe se

denomina absorptividad ( $\alpha$ ); la fracción de energía que se transmite se denomina transmisividad ( $\tau$ ).

La interacción de la radiación con la atmósfera y con los objetos terrestres, es decir los valores de  $\rho$ ,  $\alpha$  y  $\tau$  de un cuerpo concreto, va a depender de la longitud de onda de que se trate y de las características de ese cuerpo.

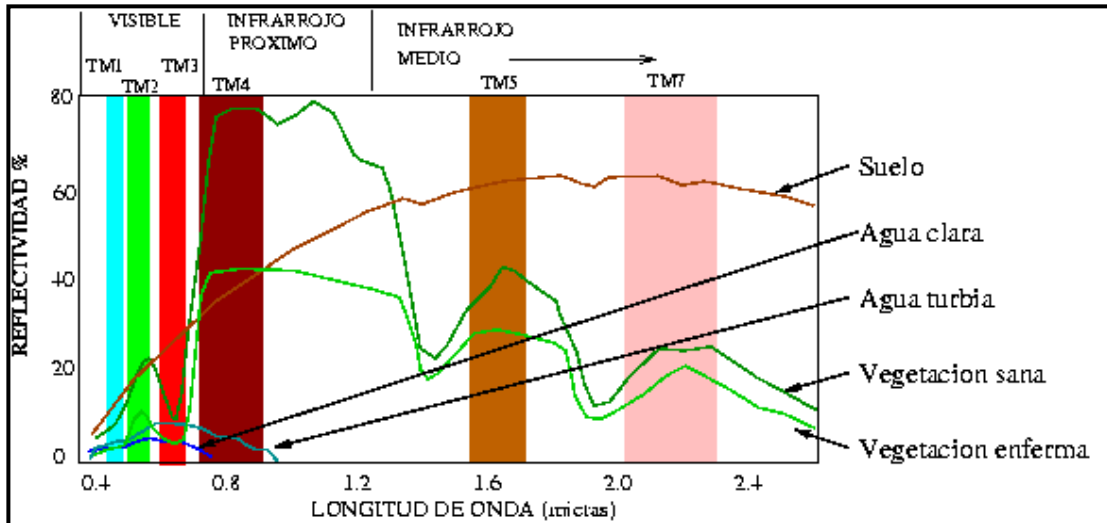
En teledetección se trabaja normalmente con la reflectancia relativa (Tabla N° 3.1), y se mide comparando en condiciones de idénticas de iluminación la radiación reflejada por el objeto con la que refleja un papel blanco, el cual es considerado una superficie reflectante perfecta.

**Tabla 3.1** Valores de reflectividad de distintas superficies (tomado y modificado de Vivancos *et al.*, 2005)

Superficie	Reflectividad (%)
Agua	5-70
Arena	20-45
Bosque	5-0,15
Carretera	5-10
Cemento	20
Cultivos	10-25
Hielo	20-40
Nieve	80
Nube densa	75

Para identificar objetos y procesos en la superficie terrestre, lo que interesa es la reflectividad de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material refleja la radiación incidente de forma diferente lo que permite distinguirlo de los demás si se mide la radiación reflejada. Gracias a estas medidas de reflectividad de los distintos tipos de superficies en el espectro visible e infrarrojo, se

pueden calcular las firmas espectrales (ver Figura N° 3.4) para los distintos tipos de objetos y cubiertas de la superficie terrestre.



**Figura 3.4** Curvas de firmas espectrales de distintos materiales de la superficie terrestre (tomado de Alonso, 2003)

La energía electromagnética recibida por el sensor no solo depende de la reflectividad de los distintos tipos de cubiertas y objetos que se encuentran en la superficie terrestre, hay otros factores como lo son las condiciones atmosféricas, la pendiente y orientación del terreno y la geometría de la observación que afectan dicho flujo de energía.

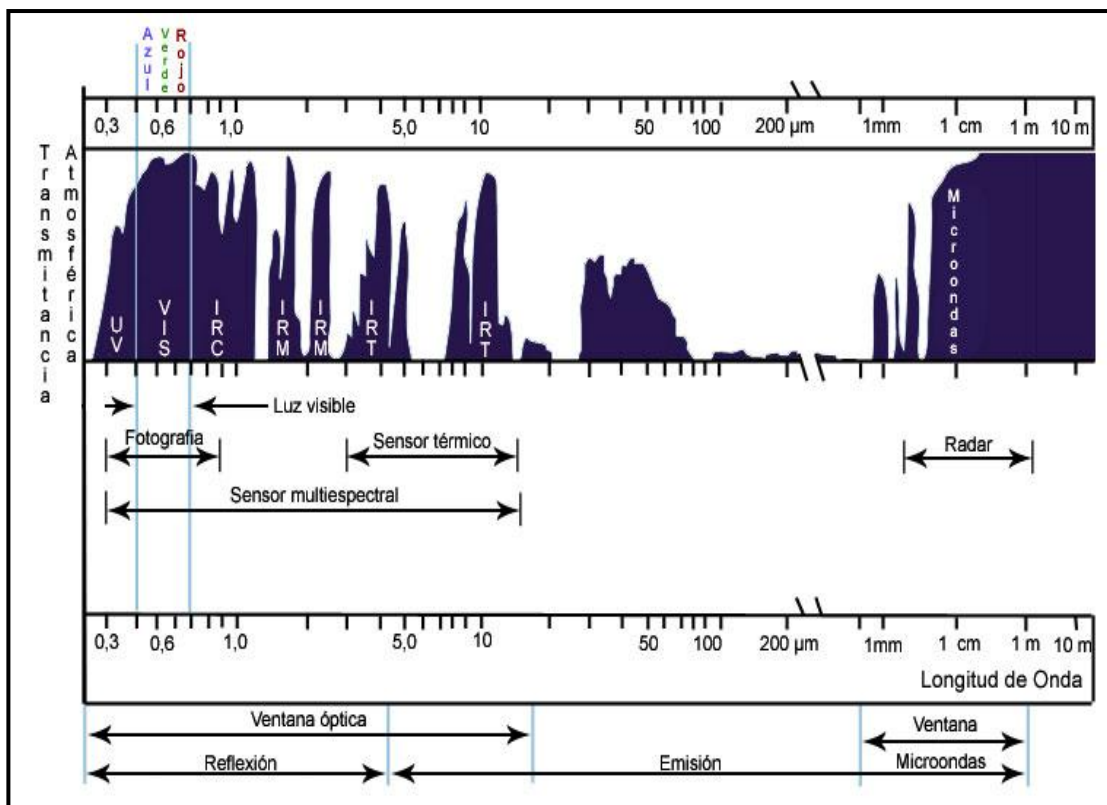
### 3.4.5 Interacción de la Atmosfera con la Radiación Electromagnética

En el espacio exterior no hay pérdida de radiación por interferencia con ningún medio material, sólo atenuación debida a la ley del cuadrado de la distancia pero la radiación registrada por sensores remotos debe realizar una trayectoria a través de los gases y partículas de la atmósfera terrestre y su interacción puede ser apreciada en la Figura

Nº 3.5. Los principales efectos de la atmósfera terrestre sobre la radiación incidente son:

- Absorción:

Cada uno de los gases atmosféricos tiene capacidad para absorber radiación en diferentes longitudes de onda, los principales responsables son el Ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Así mismo, hay regiones en el espectro electromagnético en las que no se produce absorción y son denominadas ventanas atmosféricas (Alonso, 2003).



**Figura 3.5** Regiones del espectro electromagnético que interactúan con la atmósfera. UV, Ultravioleta, VIS, Visible, IRC, Infrarrojo cercano, IRM, Infrarrojo medio, IRT, infrarrojo térmico (tomado y modificado de Lillesand & Kiefer, 2000)

- **Dispersión:**  
Es el mecanismo por el cual la radiación electromagnética es reflejada o refractada por gases o partículas situados en la atmósfera. De este modo disminuye la radiancia directa y aumenta la difusa. Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los gases y aerosoles
- **Emisión:**  
Cuando se trabaja en el infrarrojo térmico, el objetivo fundamental es estimar la temperatura de la superficie terrestre, sin embargo los datos que llegan al satélite incluyen emisión tanto de la superficie como de las diferentes capas de la atmósfera.

### **3.5 PLATAFORMAS Y SENSORES**

Las plataformas son los aviones o satélites equipados con los instrumentos necesarios para captar, almacenar y transmitir las imágenes a distancia. Específicamente se tratara con especial atención la plataforma satelital Landsat 7 y su sensor ETM+ debido a que la principal imagen procesada e interpretada en este trabajo fue obtenida por dicho satélite. En la Figura N° 3.7 se observan las distintas plataformas y la altura respectiva de cada una de ellas.

El satélite Landsat 7 fue lanzado al espacio por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) sobre el cohete Delta II, el día 15 de abril de 1999. Se encuentra a una altura de 705 km, y recorre toda la superficie terrestre cada 16 días y luego de 233 órbitas alrededor de la Tierra. Está equipado con un sensor multiespectral radiométrico llamado *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), el cual provee imágenes con 8 bandas espectrales (Figura N° 3.6) y un tamaño

aproximado de la escena de 170 x 183 km (tomado de *Landsat 7 History*, [http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat7.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php)).

**Tabla 3.2** Bandas espectrales del sensor ETM+ (tomado y modificado de [http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat7.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php))

Banda	Amplitud	Resolución
1 Visible	0.45 – 0.52 $\mu\text{m}$	30 m
2 Visible	0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$	30 m
3 Visible	0.63 – 0.69 $\mu\text{m}$	30 m
4 Infrarrojo cercano	0.77 – 0.90 $\mu\text{m}$	30 m
5 Infrarrojo cercano	1.55 – 1.75 $\mu\text{m}$	30 m
6 Infrarrojo termal	10.40 – 12.50 $\mu\text{m}$	60 m
7 Infrarrojo medio	2.08 – 2.35 $\mu\text{m}$	30 m
8 Pancromática	0.52 - 0.90 $\mu\text{m}$	15 m

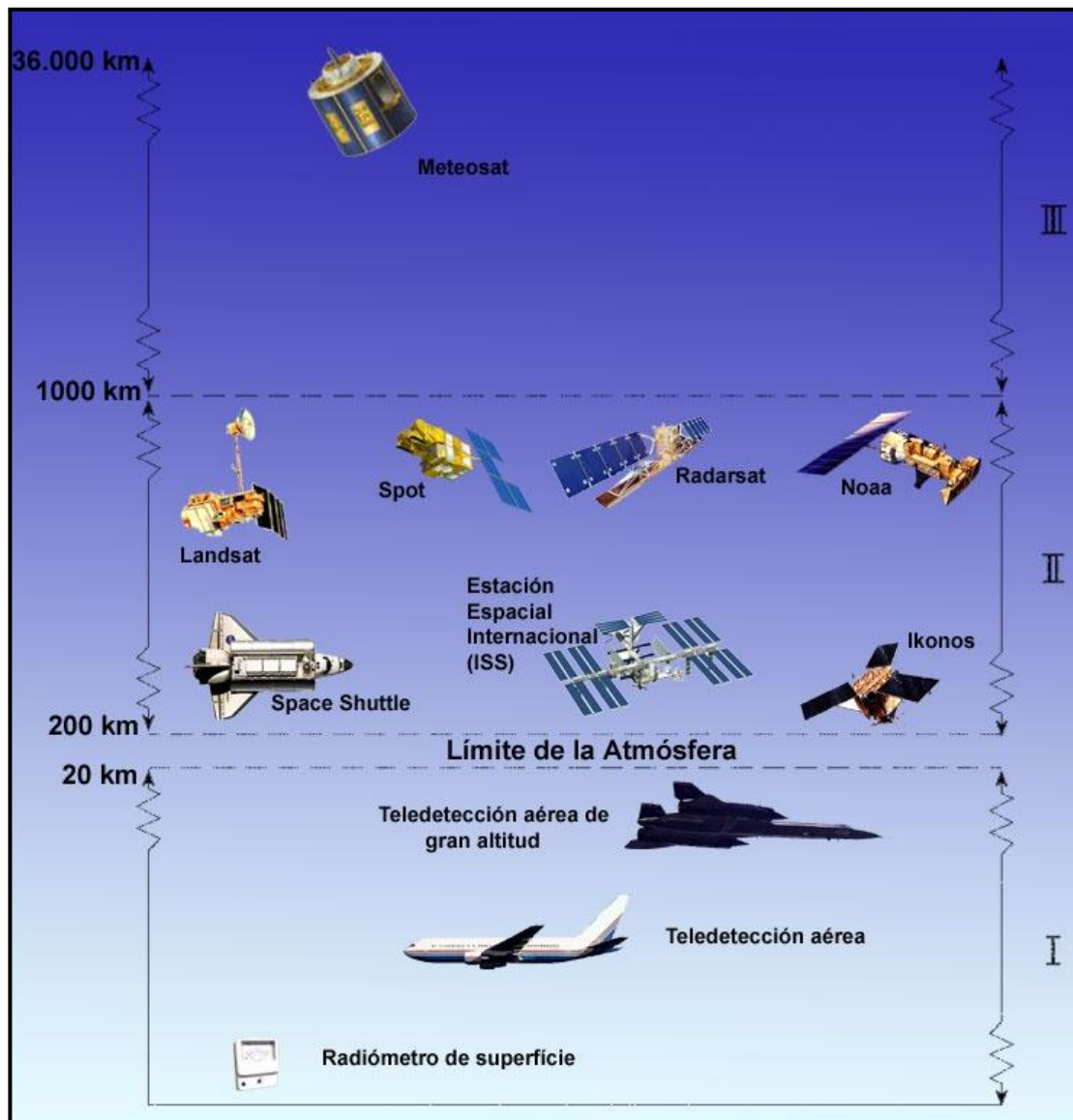
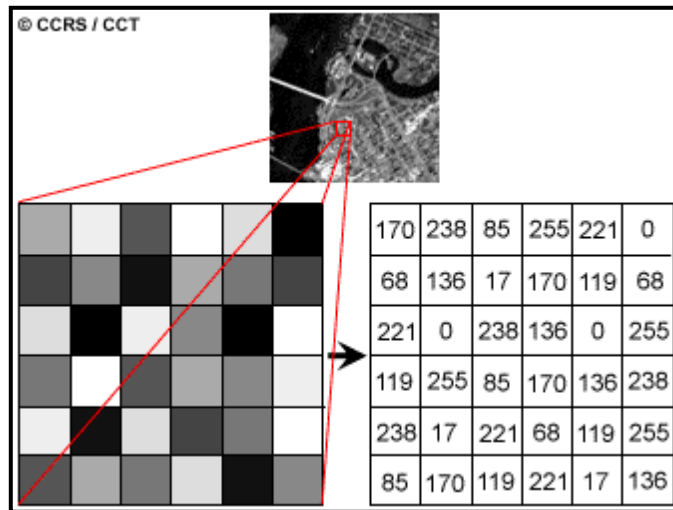


Figura 3.6 Alturas y plataformas de teledetección (tomado de Vivancos *et al*, 2005)

### 3.6 IMAGEN SATELITAL

Es una imagen compuesta por un arreglo matricial de puntos elementales (píxeles) captados por los sensores de percepción remota. Los píxeles representan la unidad elemental mínima de información de una imagen digital y asociado a cada uno de ellos existe un número digital (ND) que mide la radiancia promedio correspondiente

al área de escena abarcada por dicho pixel. El ND puede tener 256 valores que corresponden a una escala de grises que va desde el negro (ND=0) hasta el blanco (ND=255) y de esta forma se genera la imagen digital monocromática como la observada en la Figura N° 3.7.



**Figura 3.7** Conjunto de píxeles de una imagen en escala de grises y su representación numérica (tomado de CCRS, 2007)

Para poder ver las imágenes satelitales en colores es necesario una combinación de tres bandas asignando a cada uno de los canales RGB de la pantalla de ordenador, una banda en particular.

### 3.7 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Lora (2005) lo define como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (*hardware*) programados adecuadamente (*software*) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y

realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal).

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas ya georeferenciadas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando la posibilidad de relacionar la información existente.

Se pueden distinguir dos grupos de datos representados en un SIG:

- Raster:  
En general es cualquier tipo de imagen digital, ya sean dibujos, fotografías aéreas, mapas, previamente escaneados y digitalizados o a imágenes satelitales cuya información ya parte desde el formato digital
- Vectoriales:  
Son datos generados por el usuario a través de la realización de vectores de puntos (pozos, picos de elevaciones o puntos de interés, entre otros), líneas (drenajes, vías, curvas de nivel) y polígonos (áreas, lagos, afloramientos geológicos) para representar cualquier información que sea requerida.

Es posible por medio de la vectorización de una imagen pasar de un dato raster a uno vectorial. Por ejemplo, se puede convertir un mapa topográfico digitalizado en un mapa de elementos vectoriales (puntos, líneas y polígonos).

Dado que los datos digitales son almacenados en ambas formas, vectorial y raster, un SIG también es capaz de convertir datos vectoriales a raster. A este proceso se le denomina rasterización.

### 3.7.1 Aplicaciones de un SIG

Según Alonso (2006), entre las aplicaciones más resaltantes destacan:

- **Científicas**
  - En ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio.
  - Desarrollo de modelos empíricos
  - Modelización cartográfica (aplicación de modelos empíricos para hacer mapas de temperatura a partir de mapas de altitud, orientación, entre otros)
  - Modelos dinámicos
  - Teledetección, las imágenes de satélite son estructuras raster que se manejan de forma óptima en un SIG
  
- **Gestión**
  - Cartografía automática
  - Información pública, catastro
  - Planificación de espacios protegidos
  - Ordenamiento territorial
  - Planificación urbana
  - Estudios de impacto ambiental
  - Evaluación de recursos
  - Seguimiento estructuras tales como represas, carreteras, entre otras
  
- **Empresarial**
  - Mercadeo (envío de publicidad a potenciales clientes que cumplan con ciertas características)
  - Estrategias de distribución (optimización de las rutas de transporte)

- Localización óptima de una sucursal en función de los clientes potenciales situados alrededor

### **3.8 FOTOGRAFÍAS AÉREAS:**

Según Alonso (2001), La fotografía aérea es un caso particular de la teledetección en la que se utilizan como plataformas aviones en lugar de satélites y el sensor es una cámara fotográfica con tecnología óptica. Se caracteriza por la utilización del papel como soporte y de las longitudes de onda del visible o infrarrojo. Sin embargo, en los últimos años el desarrollo de las cámaras digitales ha permitido la aparición de fotografía aérea digital y el uso de diversas bandas del espectro.

#### **3.8.1 La Fotogrametría**

Es la técnica de hacer mediciones en las fotografías. El objetivo es ubicar los objetos en el espacio partiendo de una referencia y determinar sus dimensiones exactas (Albrizzio, 2001). Normalmente los fotogramas son series que cubren un espacio bastante amplio y tienen un solapamiento longitudinal de un 50 o 60%, que permite la visión estereoscópica; y un solapamiento latitudinal de 20-30% para que no quede espacio por cubrir (Alonso, 2001)

En el área común en las fotografías los objetos aparecen ligeramente desplazados respecto al fondo. Este desplazamiento será proporcional a la altura relativa del objeto respecto al fondo. Si se miran ambos fotogramas a la distancia adecuada el cerebro podrá reconstruir una imagen tridimensional la cual es fundamental en la fotointerpretación. Este procedimiento se facilita mediante el uso de lentes estereoscópicos.

### **3.8.2 La Fotointerpretación y sus Aplicaciones**

La fotointerpretación es el proceso por el que se extrae la información contenida en la fotografía aérea (tomado de Albrizzio, 2001), y entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- Evaluación de los recursos naturales como energéticos y mineros.
- Evaluación de características urbanísticas
- Estudios de topografía, hidrología, geología, mineralogía, edafología y meteorología.
- En etapas de planificación, ejecución y construcción de obras
- Estudios de vegetación y usos de suelos.

## CAPÍTULO IV

### MARCO GEOLÓGICO

#### 4.1 FISIOGRAFÍA

La Cordillera de los Andes constituye un levantamiento topográfico-tectónico con una longitud de 425 km y una anchura de 80 km aproximadamente que comienza al suroeste en la depresión de Táchira, específicamente en el Páramo de Tamá cerca de la frontera colombiana y culmina al noreste en la depresión de Barquisimeto y ejerce como divisoria de aguas entre la cuenca hidrográfica del Apure-Orinoco y la del Lago de Maracaibo-Mar Caribe. Su culminación se encuentra en la Sierra Nevada de Mérida, donde se encuentran sus picos más elevados, representado por el Pico Bolívar con 5007 m y otros 6 picos que superan los 4650 m y las rocas más antiguas representadas por el Complejo Iglesias del Precámbrico Superior (González de Juana *et al.*, 1980)

En el Páramo El Batallón se inicia una hendidura axial asociada a un sistema de fallas que subdivide La Cordillera de los Andes en dos cordilleras al noroeste (Sierra de La Culata y Cordillera de Trujillo) y al sureste (Sierra Nevada de Mérida, Sierra de Santo Domingo, Páramo Río Negro, entre otros) de la hendidura y que se vuelven a unir nuevamente en el nudo de Mucuchíes (González de Juana *et al.*, 1980)

#### 4.2 ESTRATIGRAFÍA

En la zona de estudio existen dos tipos principales de rocas aflorantes, rocas ígneo-metamórficas y rocas sedimentarias. Estas unidades litoestratigráficas aflorantes son

descritas a continuación en base al Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999).

#### **4.2.1 Precámbrico**

##### **COMPLEJO IGLESIAS**

Este complejo es de edad Precámbrico Tardío, y su litología característica de acuerdo a Bellizzia y Pimentel (1995) se compone esencialmente de esquistos y gneises cuarzo-feldespático-micáceo-granatíferos, ortogneises graníticos y anfibolitas; localmente se encuentran cuerpos lenticulares de cuarcitas, migmatitas y mármoles y en el tope de la sección, esquistos pelíticos bien laminados con estaurolita, andalucita y cianita. La unidad ha sido dividida en Formación Sierra Nevada y Asociación Bella Vista.

Estas rocas se encuentran expuestas en el cerro Las Iglesias, Macizos de Los Conejos, al noroeste de la ciudad de Mérida y en la sierra Nevada de Mérida. También afloran en la región de Santo Domingo, y en el Macizo del Colorado, en los estados Mérida y Barinas y su espesor no ha sido determinado.

## 4.2.2 Paleozoico

### FORMACIÓN MUCUCHACHÍ

Es de edad Paleozoico Tardío, específicamente del Pensilvaniense y aflora en los andes venezolanos, desde las cercanías de San Cristóbal, estado Táchira, en extensas zonas de los estados Mérida y Trujillo. Las compañías Shell y Creole (1964) estimaron un espesor promedio de 5.000 m.

Litológicamente la unidad es una secuencia de pizarras laminadas y pizarras limosas, de color negro a gris verdoso, carbonosas y en parte filíticas, con buen clivaje; es común la presencia de pirita, la cual frecuentemente reemplaza a los fósiles (tomado del Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica 1999). En la figura 4.1 se observa un afloramiento de esta formación en la zona cercana a Queniquea.



**Figura 4.1** Pizarras color gris verdoso con algunas intercalaciones de metaarenisca. Vía Queniquea

## **FORMACIÓN SABANETA**

Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999) esta unidad es del Carbonífero Tardío-Pérmico Temprano y aflora esporádicamente e los andes venezolanos. Principalmente está constituida por una secuencia de areniscas gruesas a guijarrosas, de color gris a marrón, que pasan hacia arriba a una intercalación de limolitas y areniscas de color rojo a rojo violeta.

Tiene un espesor máximo de 3.360 m en la sección del río Acarigua (Compañía Shell y Creole, 1964; Arnold, 1966)

## **FORMACIÓN PALMARITO**

Es de edad Paleozoico Tardío (Carbonífero Tardío y el Pérmico Temprano) y se extiende a lo largo de los estados Táchira, Mérida, Barinas, Trujillo y también en pequeñas áreas de la Sierra de Perijá. Es una secuencia de lutitas, principalmente marinas, limos, arenas y margas, que gradan hacia arriba a calizas marinas (Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999). Arnold (1966), la dividió en un miembro inferior clástico y un miembro superior de calizas y señaló un espesor máximo de 550 m.

### **4.2.3 Mesozoico**

#### **4.2.3.1 Jurásico**

#### **FORMACIÓN LA QUINTA**

La Formación La Quinta aflora en la parte suroeste de los andes de Mérida (estados Táchira, Mérida y Barinas) y en áreas aisladas del estado Trujillo y en el flanco este de la Sierra de Perijá. Es de edad Jurásico y tiene un espesor de 1610 m en la sección tipo en el estado Táchira. La litología de ésta formación consta de tres intervalos: uno inferior, compuesto por una capa de toba vítrea de color violáceo, de aproximadamente 150 m de espesor; uno medio, consistente de una secuencia interestratificada de toba, arenisca gruesa y conglomerática, limolita y algunas capas delgadas de caliza, de color verde, blanquecino, gris o violáceo (espesor aproximado: 840 m); y un intervalo superior, formado por limolita y arenisca, intercaladas con algún material tobáceo, de color rojo ladrillo y marrón chocolate (ver Figura N° 4.2), de aproximadamente 620 m de espesor (tomado del Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999).



**Figura 4.2** Se aprecia el color rojo característico de la litología de la Formación La Quinta

#### 4.2.3.2 Cretácico

### **FORMACIÓN RÍO NEGRO**

Es de edad Cretácico Temprano y se extiende a lo largo del occidente de Venezuela, en los estados Zulia, Táchira, Trujillo, Mérida. Su espesor, en la región de San Cristóbal es de 1.450 m. La litología característica consiste en areniscas blancas, generalmente de grano grueso, conglomerados heterogéneos; arcillas y lutitas variables, típicamente en tonos brillantes de amarillo, rojo y morado (tomado del Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999).

### **FORMACIÓN APÓN**

Según González de Juana *et al.*, (1980), se extiende por Venezuela occidental y este de Colombia y está compuesta por caliza gris y azulosa, densa, dura, en capas

gruesas, generalmente fosilífera, con intervalos menores de lutitas que varían de calcáreas a arenosas. Es de edad Cretácico, específicamente entre el Aptiense-Albiense y su espesor varía entre 100 y 200 m en el área de Táchira con acuñamiento rápido hacia el Arco de Mérida. Se encuentra dividida en los siguientes cuatro miembros: Tibú, Machiques, Guáimaras y Piché

### **FORMACIÓN AGUARDIENTE**

La Formación Aguardiente es de edad Cretácica, principalmente Albiense. Trump y Salvador (1964), mencionan unos 500 m de espesor cerca de San Cristóbal y la describieron como areniscas de colores claros, duras, en capas de espesor variable (ver Figura N° 4.3), intercaladas con limolitas y lutitas carbonáceas, y señalaron que al norte y oeste de Táchira la unidad se hace más calcárea y las capas de caliza constituyen un elemento litológico característico. Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, (1999) se extiende en la zona suroccidental del estado Zulia y partes adyacentes de Colombia, y Cordillera de Los Andes entre Táchira y Lara.



**Figura 4.3** Areniscas de colores claros, características de la Formación Aguardiente. Afloramiento ubicado vía La Florida

## FORMACIÓN CAPACHO

De edad Cretácico (Albiense-Turonense), tiene un espesor máximo de 275 m y esta subdividida en tres miembros, (Renz, 1959):

- **MIEMBRO LA GRITA:** (Albiense-Cenomaniense) Posee una litología muy similar a la formación La Luna, la cual consta de calizas biomicríticas negras y densas alternando con calizas arcillosas laminadas y concreciones calcáreas. El espesor varía entre 5 y 10 m en Táchira (González de Juana *et al.*, 1980)
- **MIEMBRO SEBORUCO:** (Cenomaniense-Turonense) Principalmente consiste en lutitas, macizas, duras, quebradizas no calcáreas, parcialmente micáceas y arcillosas, de color gris oscuro a negro, con pocas capas delgadas de caliza micrítica, conchífera, de color gris, especialmente hacia el tope. En la sección tipo tiene un espesor de 120 m (Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999)
- **MIEMBRO GUAYACÁN** (Turonense) Consiste en calizas bioclásticas macizas, muy fosilíferas, de color gris (ver Figura N° 4.4) intercaladas con lutitas no calcáreas gris oscuras a negras, micáceas y menor cantidad de limolita arcillosa gris. Tiene unos 60 m de espesor (González de Juana *et al.*, 1980)



**Figura 4.4** Nótese una fotografía de las calizas grises que constituyen el Miembro Guayacán de la Formación Capacho

## FORMACIÓN LA LUNA

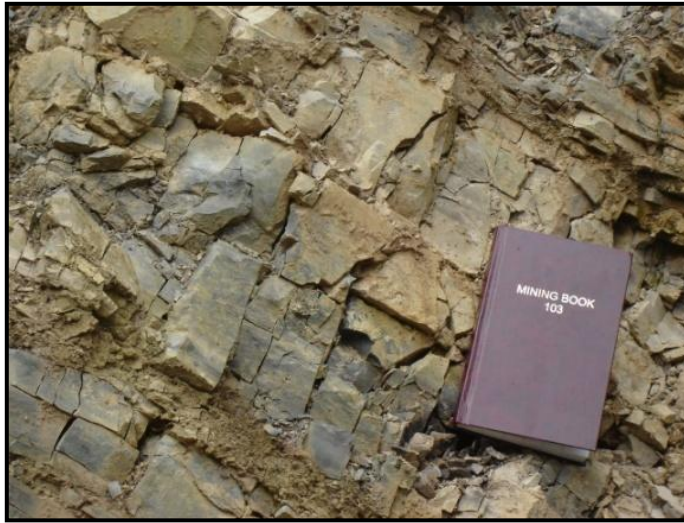
Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999), la Formación La Luna es de edad Cretácica (Cenomaniense-Campaniense) y se extiende a lo largo de toda la cuenca del lago de Maracaibo, estado Zulia, como también en los estados Falcón, Lara, Trujillo, Mérida, Táchira, Barinas y la península de La Goajira, Colombia.

Consiste principalmente en calizas laminadas densas (ver Figura 4.5), de color gris a negro, carbonáceas a bituminosas y de arcillas calcáreas o no de color negro, la ftanita negra (ver Figura N° 4.6) es frecuente en forma de vetas, nódulos y capas delgadas; las concreciones elipsoidales a discoidales, la ftanita negra es frecuente en forma de vetas, nódulos y capas delgadas. Tomado de González de Juana *et al.*, (1980).

El espesor de esta formación a lo largo del frente oriental de la sierra de Perijá tiene espesores que no superan los 183 m.



**Figura 4.5** Caliza oscura de la Formación La Luna, observada en un afloramiento a los márgenes del río Torbes, cerca de San Cristóbal



**Figura 4.6** Ftanita del Táchira en capas delgadas. Afloramiento ubicado en la vía de Cantarranas

## **FORMACIÓN COLON**

Cretácico (Maastrichtiense). Aflora en toda la cuenca de Maracaibo y en la cuenca Barinas-Apure. Tiene un espesor de 900 m en la localidad tipo ubicada en el río Lobaterita, al norte de la ciudad de Colón, estado Táchira según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999).

Litológicamente está compuesta por lutitas microfosilíferas de color gris oscuro a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. Las lutitas son más arenosas hacia la base y hacia la parte superior.

## **FORMACIÓN MITO JUAN**

Cretácico (Maastrichtiense Tardío) el desarrollo máximo de la formación ocurre en la parte sur de la cuenca, en el estado Táchira los espesores varían desde 215 m a 755 m (Sutton, 1946). Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, (1999) se extiende superficialmente tanto como la formación Colón.

La litología está compuesta principalmente de arcillas de colores grises, gris verdosas y negras, localmente arenosas, en las cuales el contenido de limo y arena aumenta en sentido ascendente y en cuya parte superior se encuentran a veces capas delgadas de calizas y areniscas.

#### **4.2.4 Cenozoico**

##### 4.2.4.1 Terciario

### **GRUPO OROCUÉ**

- **FORMACIÓN CATATUMBO**

Los afloramientos ocurren en el sur del Zulia y suroeste del Táchira y son de edad Paleoceno.

Trump & Salvador (1964) mencionan 400 m de espesor en la carretera San Cristóbal-Rubio, Táchira.

La formación está compuesta predominantemente por lutitas y arcillitas gris oscuro, algo carbonáceas y con nódulos y lentecitos de limolita marrón. Intercaladas con las lutitas se encuentran capas de areniscas grises a gris oscuro, de grano muy fino a fino, en capas de 0,5 a 10 m de espesor. En la base de la sección, se encuentra glauconita y algunas capas de caliza gris, cristalina y glauconítica, además de capas delgadas de carbón.

- **FORMACIÓN BARCO**

Según el Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999), en Venezuela, la formación ha sido reconocida en el suroeste del Zulia y en los estados Táchira y Mérida. Edad Paleocena.

Trump & Salvador (1964), estiman un espesor entre 82 y 165 m en el estado Táchira. Está compuesta por areniscas, lutitas y arcillitas intercaladas. Hacia Táchira aumenta la proporción de areniscas y hacia el tope presenta capas delgadas de carbón como puede apreciarse en la Figura N° 4.7. Las lutitas y arcillitas constituyen 30 y 50% de la sección (tomado de González de Juana *et al.*, 1980).



**Figura 4.7** Areniscas de la Formación Barco aflorantes en la vía de Macanillo. Se pueden apreciar las capas delgadas de carbón

- **FORMACIÓN LOS CUERVOS**

La Formación Los Cuervos aflora en la parte suroeste de la cuenca Maracaibo, al sur del piedemonte de la Sierra de Perijá, en la Depresión de Táchira y en el flanco norandino. Es de edad Paleoceno- Eoceno Temprano. Tomado del Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999)

Trump & Salvador (1964), estiman un espesor entre 420 y 500 m en Táchira y se adelgazan hacia el estado Mérida.

Según González de Juana *et al.* (1980), la litología está compuesta principalmente de arcillitas y lutitas con capas de carbón en su parte inferior y localmente algunas capas de arenisca.

### **FORMACIÓN MIRADOR**

Aflora extensamente a lo largo de los flancos de la sierra de Perijá, Zulia suroccidental, en el estado Táchira y partes adyacentes de Colombia y en el subsuelo en los campos de Tarra y su edad es Eoceno Temprano a Medio.

Ramírez & Campos (1972), hablan de un espesor aproximado de 500 metros para la unidad, en la región Grita-San Cristóbal.

Según González de Juana *et al.* (1980), la sección tipo se caracteriza por areniscas blancas de grano fino a medio con capas delgadas de gránulos o guijarros de cuarzo; toda la sección presenta material carbonáceo, observándose algunas intercalaciones de lutitas en su tercio superior y capas delgadas de carbón interestratificadas con las mismas.

### **FORMACIÓN CARBONERA**

Según el Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999) aflora en la zona sur de Zulia, Mérida y Táchira. En base a los moluscos la edad es Eoceno Superior.

Ramírez & Campos (1972), estiman un promedio de 470 m de espesor en el estado Táchira.

La Formación Carbonera se compone principalmente de arcillitas y lutitas grisáceas que meteorizan en tonos abigarrados de rojo y amarillo, irregularmente estratificadas, con areniscas arcillosas de 5 a 10 metros de espesor, capas de lignito y algunas calizas (tomado de González de Juana *et al.*, 1980). En la Figura N° 4.8 se observa

una fotografía de una pequeña sección del afloramiento cercano a la alcabala de Perecal, Quebrada La Dantera.



**Figura 4.8** Se aprecian la intercalación de lutitas y areniscas con capas de carbón de la Formación Carbonera.

## FORMACIÓN LEÓN

Aflora en parte sur y suroeste de la cuenca de Maracaibo y la depresión de Táchira según el Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999). Es de edad Eoceno Tardío-Oligoceno, definida a través de polen por Heybroek (1953).

Fierro & Paredes (1987) definen un espesor de 844 m en el estado Táchira.

Heybroek (1953), describió la formación como una secuencia monótona de lutitas grises a negras, blandas, con numerosos niveles de concreciones de arcillita ferruginosa, oolitas ferruginosas y muchos restos de plantas.

## **GRUPO GUAYABO**

- **FORMACIÓN PALMAR**

Mioceno Temprano a medio. Según el Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999) se presenta a lo largo del frente norandino de Mérida y Táchira, extendiéndose a la parte sur y suroeste de la cuenca de Maracaibo, a través de la depresión del Táchira, hasta la frontera colombiana, frente a la cordillera oriental. Al este, aflora en el flanco sur de los andes merideños, desde los Altos de Brujas-La Ceiba, hasta el depocentro de Capitanejo, y de alguna forma aun no aclarada, en el subsuelo de Barinas-Apure.

Según Ramírez y Campos (1972), posee un espesor de 300 m en la carretera La Fría-Seboruco, estado Táchira.

Areniscas de grano fino intercaladas con arcillas y limolitas.

- **FORMACIÓN ISNOTÚ**

Mioceno Medio a Superior. Aflora en una faja bastante continua a lo largo del flanco noroccidental de Los Andes.

Ramírez y Campos (1972), señalan un espesor de 300 m.

Gran cantidad de arcillas, hasta 65% con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerado. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro, corrientemente abigarradas en rojo, púrpura y amarillo y localmente carbonáceas; las areniscas son de color variable, principalmente blancas a gris claro (Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999)

- **FORMACIÓN BETIJOQUE**

De edad Mioceno Superior-Plioceno. Esta formación aflora a lo largo del flanco occidental de Los Andes, desde Trujillo hasta Táchira y está compuesta por conglomerados, areniscas, limolitas y arcillas. Destaca el tope conglomerático y la abundancia de arcillas, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999)

Esta formación tiene un espesor de 650 m en el estado Táchira (Ramírez & Campos (1972).

Audemard & Audemard (2002), plantean que la Formación Betijoque se depositó durante el Plio-Pleistoceno.

Con esta recopilación bibliográfica, y mediante el uso del programa de digitalización Canvas 11, se elaboró una columna estratigráfica generalizada del área de estudio que se puede ver en la Figura N° 4.1 y más detalladamente en el Anexo 1.

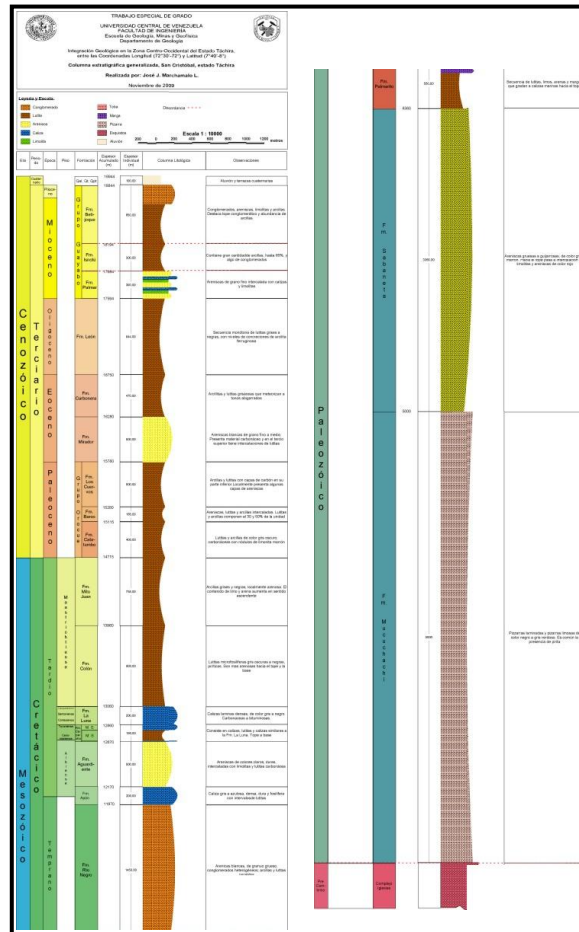
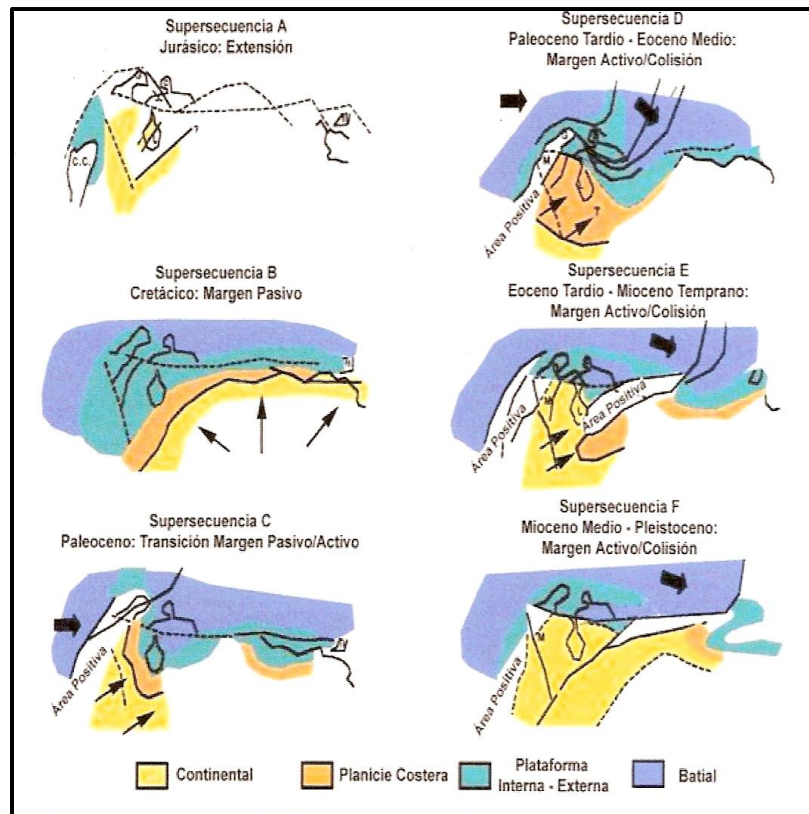


Figura 4.9 Columna estratigráfica generalizada

### 4.3 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL OCCIDENTE DE VENEZUELA

La evolución geológica del occidente de Venezuela puede ser dividida fundamentalmente en dos partes, la primera, según Bellizzia y Pimentel (1995) abarca desde el Precámbrico hasta el Paleozoico, y subdivide al Orógeno Andino en

tres provincias geológicas: El Terreno Mérida, el Terreno Macizo Colorado y el Bloque Caparo, dichas provincias se diferencian por sus orígenes, edades, magmatismo, evolución estructural y características litotectónicas. La segunda división de la evolución geológica está basada en las seis supersecuencias depositacionales propuestas por Parnaud *et al.*(1995), cuya división se basa en las características tectono-estratigráficas de la región y se encuentran limitadas por discordancias; estas supersecuencias son: de extensión Jurásica (supersecuencia A); de margen pasivo Cretácica (supersecuencia B); de transición, edad Cretácico Tardío-Paleoceno (supersecuencia C); supersecuencias de cuencas colisionales, Paleoceno Superior-Eoceno Medio, Eoceno Superior-Mioceno Inferior, Mioceno Medio-Pleistoceno (supersecuencias D, E y F respectivamente).



**Figura 4.10** Supersecuencias del occidente de Venezuela definidas por Parnaud *et al.*, (1995) (tomado y modificado de Hernández & Pérez, 2008)

### 4.3.1 Precámbrico-Paleozoico

Comprende las tres provincias geológicas mencionadas anteriormente, así como el la cobertera sedimentaria depositada posterior al emplazamiento de dichas provincias (Bellizzia y Pimentel, 1995):

#### 4.3.1.1 Terreno Mérida

Según Bellizzia y Pimentel (1995) el basamento ígneo-metamórfico del Terreno Mérida está constituido por el Complejo Iglesias (asociaciones Sierra Nevada y Bella Vista), de edad Precámbrico y está compuesto principalmente de esquistos y gneises cuarzo feldespáticos. A pesar de que localmente el grado metamórfico alcanza la anatexis en esta unidad no se han encontrado rocas granulíticas. El protolito es esencialmente de origen sedimentario y magmático.

Asociadas al Paleozoico Superior se encuentran:

La Formación Mucuchachí, compuesta por una secuencia monótona de pizarras y filitas de color gris oscuro e intercaladas con meta-areniscas, con pobre contenido de fósiles, posiblemente debido a la existencia de condiciones paleoambientales desfavorables y a un evento metamórfico que destruyó los restos orgánicos. Por medio de una isócrona de Rb-Sr se estableció una edad de  $289 \pm 10$  m.a., es decir, Carbonífero-Pérmico.

La Asociación Tostós, constituida por esquistos, filitas, anfibolitas y metaconglomerados, datada por medio de K-Ar Pérmico Temprano, conforma junto con la Formación Mucuchachí una secuencia de flysch alpino, las cuales fueron depositadas en una cuenca angosta y profunda tipo surco.

Las asociaciones Cerro Azul, El Águila, Los Torres y Rio Momboy, igualmente presentan edades del Paleozoico Superior y se encuentran conformadas por filitas, cuarcitas, calizas cristalinas, anfibolitas y esquistos estaurolíticos y calcáreos.

Por medio de estudios estructurales en la zona central de Los Andes, se determina que las asociaciones Mucuchachí, Tostós y Sierra Nevada presentan planos de esquistosidad cogenéticos, caracterizados por la existencia de lineaciones subhorizontales de orientación regional NE-SO en contraste con la lineación muy inclinada observada en la Formación Sabaneta. Dichos planos de esquistosidad fueron originados por un solo evento tectono-metamórfico, que ocurrió previo a su emplazamiento en la Cordillera de Los Andes, durante la Orogénesis Eoherciniana en el Carbonífero Superior y es denominado por Bellizzia y Pimentel (1995) como D1.

Posterior al evento D1 y al emplazamiento del Terreno Mérida en el Orógeno Andino, ocurre durante el Paleozoico Superior la sedimentación del supraterrano autóctono, constituido por las formaciones Sabaneta, Carache y Palmarito, las cuales están deformadas por pliegues cilíndricos verticales con ejes orientados NE-SO, y localmente presentan clivajes pizarrosos y de fractura. Según Bellizzia y Pimentel (1995) esta deformación está asociada a un evento tectónico D2, ocurrido durante la Orogénesis Neoherciniana (Pérmico-Carbonífero), que afecta igualmente al Terreno Mérida con deformaciones similares a las acontecidas en el supraterrano sedimentario y dicho evento no se encuentra relacionado con el evento tectónico D1.

En cuanto a la actividad magmática, en el Terreno Mérida, se determinaron eventos plutónicos importantes durante el Paleozoico Inferior (495 a 425 m.a.), Medio (400 a 350 m.a.) y Superior (290 a 285 m.a.).

Bellizzia y Pimentel (1995) establecen que el Terreno Mérida es un cinturón móvil con fuerte actividad orogénica y magmática que se extiende desde el subsuelo del Lago de Maracaibo hasta la Falla de Icotea. Este terreno es alóctono de

fragmentación continental y se encuentra relacionado al Bloque Maya o Yucatán que estuvo ubicado al noroeste de Gondwana.

#### 4.3.1.2 Terreno Macizo Colorado y Bloque Caparo

El Terreno Macizo Colorado es el basamento Precámbrico metamorfozido, conformado por la Asociación Bella Vista, la cual aflora en el flanco sur andino en un cinturón estrecho, está constituida principalmente por esquistos sericíticos y cloríticos, pizarras, filitas y tiene intrusiones locales de granito, pegmatitas y vetas de cuarzo. Los esquistos y las rocas silíceas masivas presentan una textura granoblástica penetrativa, que indica la destrucción total de la fábrica de la roca. Este basamento fue estructurado y metamorfozido durante la Orogénesis Brasiliana o Panafricana (Bellizzia y Pimentel, 1995).

El Bloque Caparo está constituido por una secuencia no metamorfozida, altamente fosilífera, compuesta por las formaciones Caparo y El Horno. La Formación Caparo está representada por lutitas, limolitas, areniscas, calizas arenosas y tope conglomerático con clastos de rocas metamórficas, posee abundante fauna caradociana, lo que permite datarla como Ordovícico Superior. La Formación El Horno está compuesta por areniscas, conglomerados, lodolitas, y algunas rocas volcánicas piritosas meteorizadas; estos sedimentos son característicos de plataforma continental y su fauna fosilífera es de edad Silúrico. No se reconocen rocas sedimentarias del Devónico ni Missisipiense, pero si algunos afloramientos del Pensilvaniense y del Pérmico.

Igualmente que en El Terreno Mérida, la cobertura sedimentaria está conformada por las formaciones Sabaneta y Palmarito, las cuales se encuentran altamente deformadas por corrimientos imbrincados y plegamientos, pero carentes de metamorfismo, al igual que las formaciones Paleozoicas del Bloque Caparo. Dicha deformación está

asociada al evento tectónico D2, el cual no estuvo acompañado de metamorfismo regional (Bellizzia y Pimentel, 1995).

El Terreno Macizo Colorado es un terreno alóctono de fragmentación continental, relacionado posiblemente con el Bloque alóctono de Adabique en Colombia, mientras que el Bloque Caparo y las secuencias paleozoicas del subsuelo de la cuenca Oriental de Venezuela, la cuenca Barinas-Apure y los Llanos Orientales de Colombia son parte de una plataforma pericratónica con un desarrollo paleogeográfico y faunal en relación con el Paleozoico de Gondwana Europea y noreste de África.

### **4.3.2 Mesozoico**

#### **4.3.2.1 Jurásico**

El Jurásico se caracterizó por ser un periodo de apertura continental. Durante la expansión se producen estructuras distensivas, como graben y fallas normales. La litología depositada es netamente de ambiente continental (Parnaud *et al.*, 1995), con capas rojas características de la Formación La Quinta. También es posible encontrar afloramientos de esta supersecuencia en Perijá y en las cuencas del Lago de Maracaibo y Barinas-Apure.

Durante este periodo de extensión se produjeron diversos surcos, entre los cuales principalmente se encuentran los de Machiques, Uribante y Barquisimeto, ubicados en Perijá, Táchira-Mérida y Lara-Trujillo respectivamente. El Jurásico Tardío marca el inicio de una fase de margen pasivo en el norte de Suramérica.

#### 4.3.2.2 Cretácico

Durante el Cretácico Temprano, el escudo de Guayana se vio sumergido a causa de una transgresión de alcance mundial que duró hasta el Cenomaniense-Campaniense, lo que marcó la evolución estratigráfica de la región. Así mismo, material volcánico encontrado en la Formación La Luna que indica la presencia de un arco volcánico al oeste y la reducción de la subsidencia controlada por fallas sugiere que el ambiente de depositación era de margen pasivo acuñado detrás de un arco volcánico causado por la subducción de la Placa Pacífica.

#### **NEOCOMIENSE-BARREMIENSE**

En esta etapa se rellenan los surcos de Machiques, Uribante y Barquisimeto. La Formación Río Negro es componente basal continental del margen pasivo Cretácico.

#### **APTIENSE**

Según Parnaud *et al.* (1995), los depósitos continentales de Río Negro finalizaron con la transgresión marina Cenomaniense-Campaniense que inundó la plataforma cratónica de Guayana. Esta transgresión fue evidenciada por el retroceso de la secuencia depositacional la primera de las cuales tiene una edad Aptiense y corresponde a la Formación Apón y está caracterizada por una sedimentación de plataforma marina superficial y muestra cambios de facies laterales hacia el este (Andes de Mérida) conformado por arenas litorales de la parte basal de la Formación Peñas Altas. La secuencia se divide en tres partes:

- Parte inferior transgresiva. Miembro Tibú depositado en un ambiente de plataforma interna

- Parte media, máxima superficie de inundación, Miembro Machiques y Guáimaros depositados en un ambiente de plataforma medio con intercalaciones de depósitos superficiales.
- Parte superior, tierras altas y progradación. Miembro Piché depositado en un ambiente de plataforma interna.

### **ALBIENSE-CENOMANIENSE INFERIOR**

La segunda mayor transgresión marina tuvo lugar durante el Albiense, invadiendo desde la Sierra de Perijá hasta el límite sureste del cuenca Barinas-Apure y hacia el escudo de Guayana. Esta secuencia depositacional incluye las formaciones Lisure, Maraca, La Puya, parte inferior de Capacho, Aguardiente y la parte basal de Escandalosa. Se subdivide en tres partes:

- Parte inferior, transgresiva. Formación Lisure depositada en un ambiente de plataforma medio. Arenas de la Formación Aguardiente depositadas en un ambiente de plataforma interna con franjas de facies de línea de costa.
- Parte media, máxima inundación. Miembro S de la Formación Escandalosa, lutitas depositadas en un ambiente de plataforma medio, mar abierto
- Parte superior, progradación, arenas regresivas del Miembro R de la Formación Escandalosa depositadas en un ambiente litoral superficial. Ausente en Maracaibo por erosión.

En Perijá y el Lago de Maracaibo, Canache *et al.* (1994) identifican un hiato en el Cenomaniense Temprano entre la secuencia Albiense-Cenomaniense Inferior y los estratos de la secuencia Cenomaniense Superior-Campaniense Inferior del Cenomaniense Superior, la erosión trunca parcialmente la secuencia del Albiense. Se atribuye este hiato a la colisión del arco volcánico del Pacífico con la placa continental de Suramérica y a la deformación flexural en el frente de la carga

aplicada. La cuenca antepaís está localizada al oeste de la Serranía de Perijá, y su asociado “*forebulge*” ocurre en las áreas de Perijá y el Lago de Maracaibo. El “*forebulge*” se traduce en la aparición de una elevación, restringe la depositación, y erosiona la parte superior de la secuencia K2 durante el Cenomaniense Temprano. Esto se encuentra reflejado en la cuña regresiva de los Andes de Mérida y en la depositación de las areniscas de Escandalosa de nivel de base alto. Seguidamente, una nueva transgresión inunda el área, esta probablemente resulta de un renovado sistema complexional y flexural de subsidencia. La acumulación basal de las facies lutítico calcáreas de la Formación La Luna inician la sedimentación del Cenomaniense Superior.

### **CENOMANIENSE SUPERIOR-CAMPANIENSE INFERIOR**

En esta etapa Parnaud *et al.* (1995), plantean un episodio transgresivo en el que se deposita en la Serranía de Perijá y en el Lago de Maracaibo la Formación La Luna (Miembro Tres Esquinas); en los Andes de Mérida las formaciones Capacho (Miembros Seboruco y Guayacán) y La Luna; y en Barinas-Apure las formaciones Escandalosa (Miembros P y O) y Navay (Miembros La Morita y Quevedo). A continuación se enuncian algunas características de dichas secuencias:

- Ceniza volcánica en la base de Formación La Luna que sugiere la presencia del arco volcánico del Pacífico al oeste del área
- El rápido hundimiento de la plataforma interna a profundidades batiales, posiblemente reflejan la migración al este del “*forebulge*” hacia la cuenca Barinas-Apure.
- Las tres secuencias transgresivas culminan con superficies de máxima inundación.
- Hay dos intervalos de facies bien definidos, al oeste el intervalo de plataforma media-batial que contiene facies calcáreas y lutíticas de la Formación La Luna

y al este sedimentos litorales detríticos de la Formación Escandalosa (miembro P) y Navay (miembro Quevedo)

En el límite Cenomaniense-Turonense ocurre un episodio transgresivo de alcance mundial. Este evento favorece el desarrollo de las condiciones anóxicas del fondo de la cuenca, lo que ocasiona la formación de grandes cantidades de materia orgánica, e intervalos ricos en concreciones, principales características de la Formación La Luna (Erlich *et al.*, 2000).

En la etapa transitoria del Santoniense al Campaniense, ocurre un cambio en las condiciones de sedimentación, caracterizado por el regreso intermitente de aguas oxigenadas de fondo, depositándose capas de chert intercaladas con clásticos finos, representado por el Miembro Ftanita del Táchira desarrollado en el estado Táchira, y unidades fosfático-glaucóníticas del Miembro Tres Esquinas, interpretado por Gosh (1984)

### **CAMPANIENSE SUPERIOR-MAASTRICHTIENSE**

Esta etapa marca el comienzo de la regresión, donde, simultáneamente la colisión del arco volcánico del pacífico genera un “*foredeep*” en el cual se depositan las facies lutíticas de la Formación Colon y el “*forebulge*” asociado migra del Lago de Maracaibo a la cuenca Barinas-Apure, donde se depositaron las facies arenosas de línea de costa de la Formación Burgüita. Esta sedimentación termina con la Formación Mito Juan (Parnaud *et al.* 1995)

Se caracteriza por poseer indeterminadas superficies de inundación, donde, las unidades lutíticas de la Formación Colón son interpretadas como mantos transgresivos y la estratigrafía arenosa de la Formación Mito Juan como sistemas progradantes.

La geometría de clinoforma indica una progradación local hacia el este de la Formación Mito Juan. Los topes erosionados sugieren tectonismo del Cretácico Tardío en el área de Perijá. Esta secuencia es generalmente más arcillosa que la estratigrafía previa y consecuentemente menos competente. Debido a esto, los estilos de falla quebradizos de las secuencias inferiores diferente de las rocas campanienses y maastrichtienses.

Hacia finales del Cretácico, el “*foredeep*” de Perijá se relleno con sedimentos de nivel de base altos de la secuencia de Mito Juan originados al oeste. Toda el área fue afectada por erosión sobre el basamento somero y ocurre una transgresión desde el noreste que propició la depositación de dos secuencias. La secuencia inferior cubre completamente la plataforma y muestra características marinas, mientras que la secuencia superior es esencialmente deltaica.

### **4.3.3 Cenozoico**

#### 4.3.3.1 Terciario

### **PALEOCENO**

Durante el Paleoceno Temprano continua la depositación debido a la persistencia de un nuevo episodio transgresivo ocurrido durante el Maastrichtiense Tardío, y es evidenciado en la Formación Guasare que consiste en depósitos marinos someros en la cuenca del Lago de Maracaibo; la Formación Trujillo, que comprende depósitos marino profundos al noreste del área del lago, mientras que la Formación Catatumbo contiene depósitos deltaicos hacia el sur. La suite deltaica superpuesta contiene tres formaciones: Barco y Los Cuervos al sur y Marcelina al norte.

## **PALEOCENO SUPERIOR-EOCENO INFERIOR**

A finales del Paleoceno ocurre el emplazamiento de las napas de Lara al norte de la cuenca del Lago de Maracaibo y trajo como consecuencia un cambio en los ambientes sedimentarios y en los tensores de esfuerzo de toda la zona noreste del país. Durante esta etapa se deposita al sur de dicha cuenca la Formación Mirador, característica de un ambiente continental; en el centro de dicha cuenca, y producto de una etapa transgresiva se deposita la Formación Misoa evidencia de un ambiente de plataforma, y en la zona superior de la cuenca, y característica de un ambiente marino profundo se depositan las turbiditas de la Formación Trujillo. (Parnaud *et al.* 1995)

## **EOCENO MEDIO**

Durante esta etapa el emplazamiento de las napas de Lara tuvo como resultado una subsidencia flexural en la cuenca Barinas-Apure, pasando de las arenas basales de la Formación Gobernador a los sedimentos arcillosos de aguas profundas de la Formación Pagüey. Igualmente, las cargas tectónicas ocasionadas por las napas produjeron un levantamiento a lo largo de todo el noreste de la plataforma del Lago de Maracaibo evidenciado esto en los depósitos de plataforma continental de la parte superior de la Formación Misoa, seguidos por la acumulación de las arcillas de la Formación Paují.

## **EOCENO SUPERIOR-MIOCENO INFERIOR**

En esta etapa el relieve al este y noreste de la cuenca del Lago de Maracaibo la ha separado por completo de la cuenca de Falcón. También, los levantamientos al sur y oeste de la Sierra de Perijá, así como al este de la Cordillera de Colombia, generaron un sistema de sedimentación fluviodeltaico, ya que en la cuenca Barinas-Apure al este aun continuaba la circulación de aguas marinas.

Del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano se reconoce una secuencia de depositación compuesta por las formaciones Carbonera y La Sierra en un ambiente deltaico, y el miembro Arauca de la Formación Guafita en un ambiente marino. La otra secuencia de depositación corresponde desde el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano, y está caracterizada por llevarse a cabo durante una inundación de alcance mundial y de la que se reconocen la Formación León y el Miembro Guardulio de la Formación Guafita.

### **MIOCENO MEDIO-PLEISTOCENO**

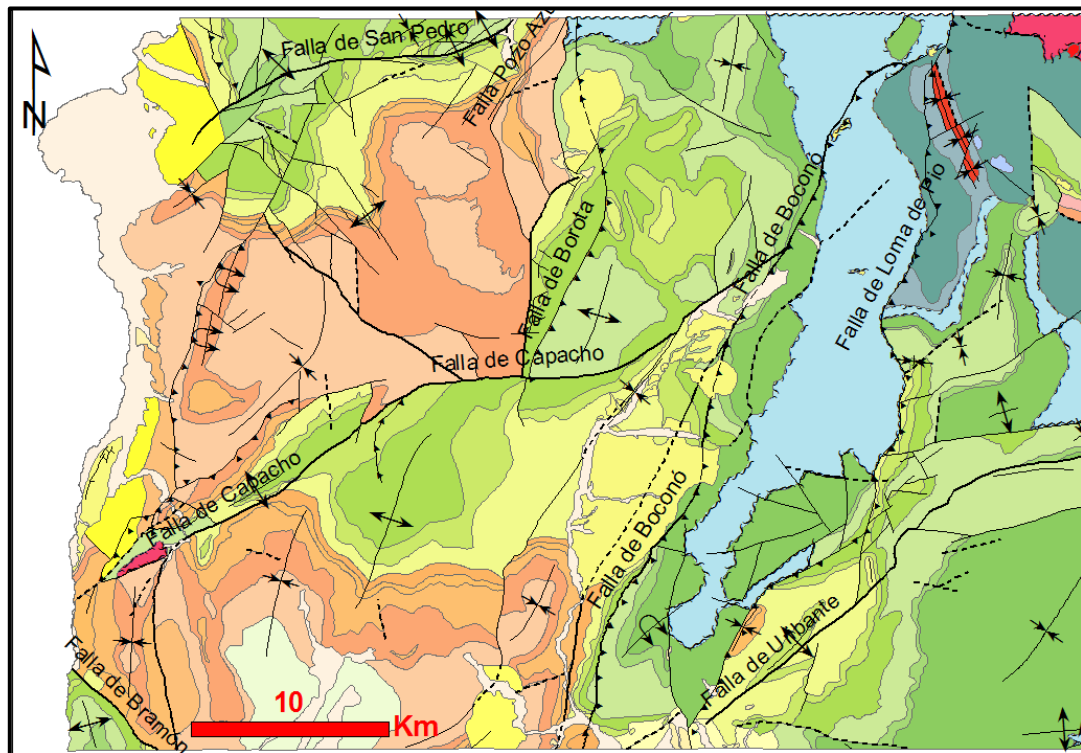
Según, Audemard & Audemard (2002) en el Mioceno medio se inicio un evento tectónico compresivo originado posiblemente por el choque del arco de Panamá contra el oeste de Suramérica lo que origina la formación de una antigua y menos prominente elevación en los Andes de Mérida y que coincide con el levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia. Este levantamiento en los Andes separa las cuencas del Lago de Maracaibo y Barinas-Apure y ocasionó depósitos molásicos en todo el margen oeste de la Cordillera de los Andes como los de la Formación Betijoque y en el margen este las formaciones Parángula y Río Yuka. Así mismo, la sedimentación marina aun persistía en el Lago de Maracaibo, y durante un evento transgresivo se deposita la Formación La Rosa; a continuación un evento progradante propició la sedimentación de la Formación Lagunillas. El centro del Lago estaba caracterizado por ambientes de agua dulce y las formaciones La Puerta y Los Ranchos son evidencia de esto (Parnaud *et al.*, 1995).

Los Andes de Mérida como los conocemos ahora son producto de una transpresión pliocena-cuaternaria debido a la convergencia oblicua entre dos bloques continentales independientes (Audemard & Audemard, 2002).

## CAPÍTULO V

### DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego del procesamiento e interpretación de la imagen satelital, conjuntamente con la interpretación de fotografías aéreas, mapas previos, imagen de radar y datos del trabajo geológico de campo, se procedió a integrar toda la información recopilada a través de un SIG y posteriormente se elaboró una actualización del mapa geológico a escala 1:50.000 de la hoja de San Cristóbal que se puede observar con bajo detalle en la Figura N° 5.1 y con dos cortes geológicos y mayor detalle en el Anexo 2.



**Figura 5.1** Actualización geológica correspondiente a la hoja N° 5739

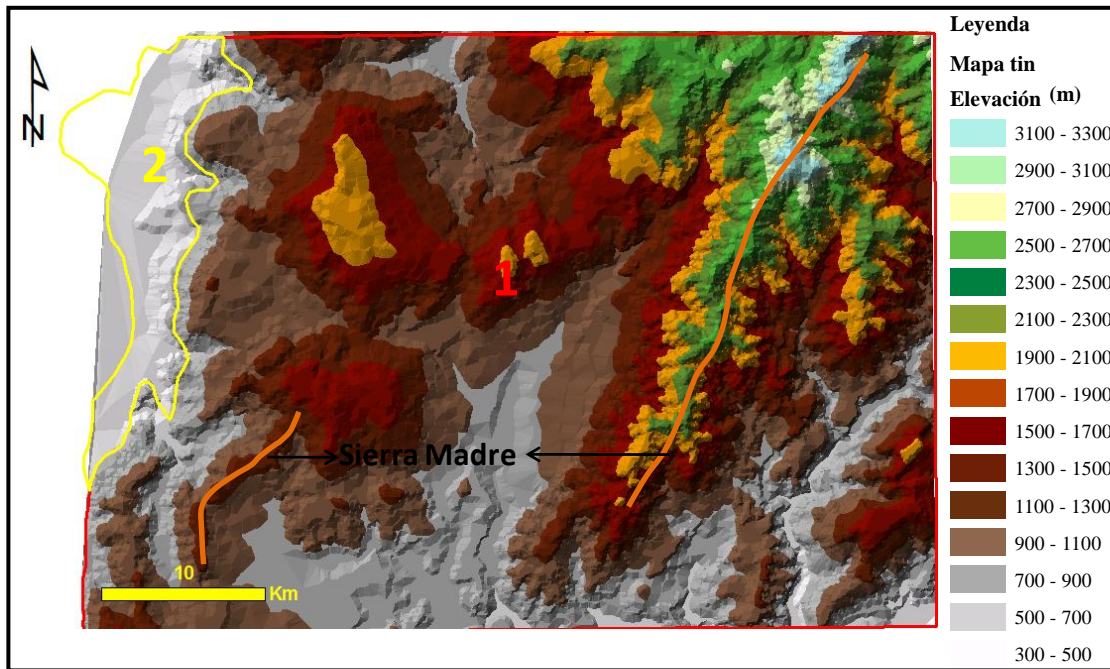
## **5.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL RELIEVE**

Este análisis tiene como objetivo realizar una organización general del relieve y las relaciones entre las diferentes topoformas (ver Figura N° 5.7). Para esto es necesario tipificar la topografía reconociendo los distintos aspectos que toma el terreno y agruparla en unidades mayores describiendo los elementos que las conforman.

Para establecer las unidades mayores se usan criterios como el desnivel topográfico, la pendiente de las laderas, la adaptación del drenaje principal a la topografía, grado de encajamiento de los valles, las características del perfil longitudinal, entre otros, los cuales son necesarios para caracterizar y tipificar las distintas topoformas y así agruparlas.

### **5.1.1 Unidad de Montañas**

Esta unidad ocupa una gran extensión de la hoja, aproximadamente el 93% (ver Figura N° 5.2). Está caracterizada por presentar alturas que sobrepasan los 700 m.s.n.m. y presenta un desnivel topográfico hasta de 2600 m. Se aprecian distintas topoformas tales como, montañas con filas alargadas, lomas, colinas y valles intramontanos los cuales se describen a continuación:



**Figura 5.2** Unidad de Montaña (encerrada dentro del polígono rojo) y Unidad de Depresión (encerrada dentro del polígono amarillo), observadas gracias al contraste de color de las alturas del mapa tin generado en ArcGis. La línea anaranjada representa las sierras La Maravilla al noreste y Cazadero al suroeste.

- Tipo 1: Montañas de filas alargadas

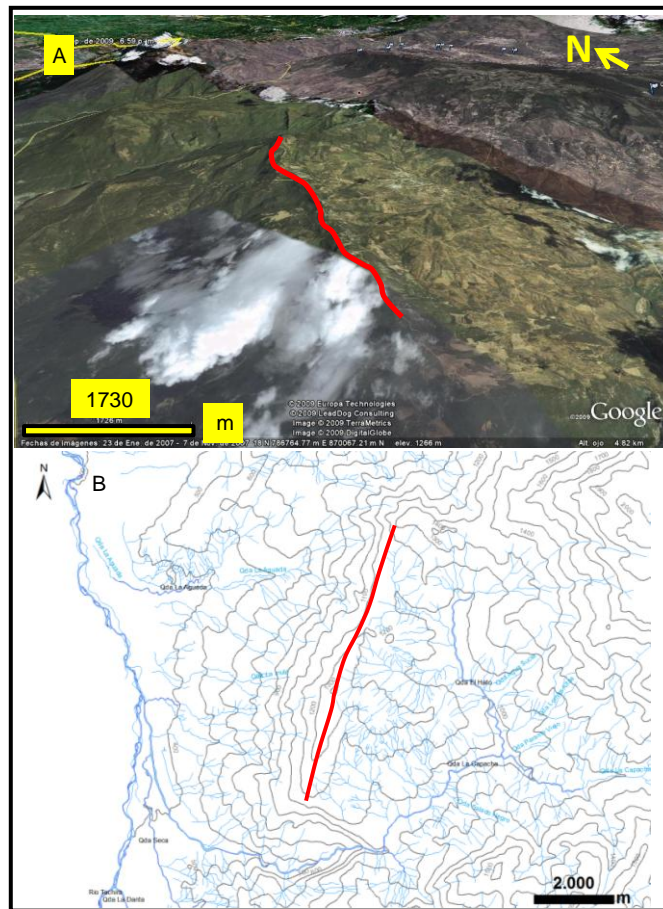
Es la topoforma más abundante observada en el mapa, la cual posee una orientación preferencial N30E con una altura mínima y máxima de sus crestas de 1000 m y 3300 m respectivamente. En este tipo se observa el drenaje dendrítico adaptado en las laderas de las montañas las cuales son cóncavas y asimétricas. En la zona noreste la línea de cresta presenta un declive en dirección suroeste y su perfil longitudinal es ondulado.

Se pueden observar al este de la hoja, ubicadas en los páramos Portachuelo, Colorado y Las Agrias, al noroeste de Queniquea en la Sierra La Maravilla. Ésta sierra posee un par de salientes, la saliente de la ladera este tiene una orientación preferencial NS y está compuesta por los cerros Portachuelo, Santa Teresa y El Hiranzo y se observa en la hoja al sur de Queniquea. Por su

parte, la saliente de la ladera oeste está compuesta por los páramos Almorzadero y Angaravenca, además de los cerros Mochileros, La Mantellina, La Loma y El Ceibal con una orientación aproximada N45E (ver Figura N° 5.2).

Al suroeste de la hoja los cerros Moretón, San Mateo, de Pajarita y la Fila de Capote conforman la Sierra de Cazadero al noroeste de Rubio, con una orientación preferencial NS en su extremo más meridional y hacia el norte cambia a NNE. Presenta una saliente al oeste de la misma conformada por los cerros La Guacara y La Línea con una orientación paralela a la anterior (ver Figura N° 5.2).

Al oeste del Hato de La Virgen, en la zona centro oeste del mapa, se encuentra la Fila del Verde. Posee una altura mínima y máxima de 800 y 1300 m.s.n.m. y su orientación preferencial es de N15E, su cresta posee un perfil longitudinal ondulado como se aprecia resaltado en rojo en la Figura N° 5.3, mientras que sus laderas son cóncavas, asimétricas y el drenaje dendrítico se encuentra adaptado a ellas.



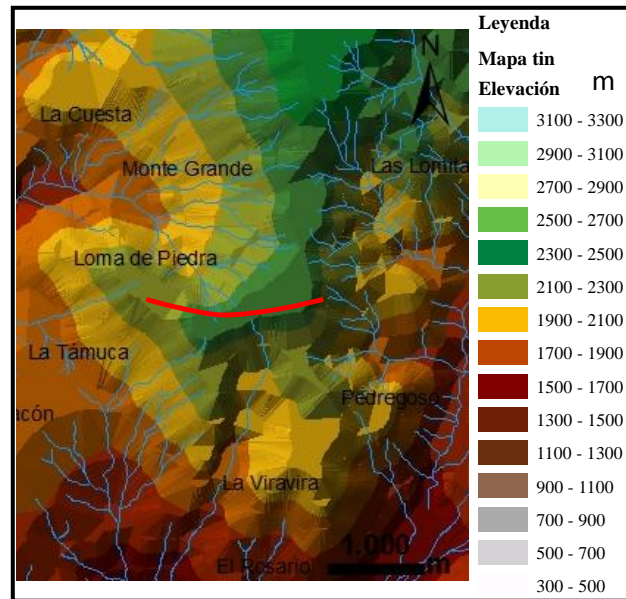
**Figura 5.3** Fila del Verde resaltada en rojo observada en Google Earth (Figura 5.3 A) y en vista de planta (Figura 5.3 B)

- Tipo 2: Lomas

Topoforma escasa dentro de esta unidad, caracterizada por sus crestas asimétricas onduladas, laderas cóncavas con drenaje adaptado y con alturas que van de los 1900 a 2600 m.s.n.m. No presentan orientación preferencial ya que se encuentran subordinadas a la Sierra o Páramo en que se encuentren ubicadas.

Se pueden observar en el mapa en la Sierra la Maravilla la Loma de Buey con una orientación preferencial N15E aproximadamente. También se encuentran

al sur de Queniquea, en la saliente este de la Sierra la Maravilla la Loma de Carrero, con orientación EO y en la saliente oeste Loma de Piedra, al oeste de El Sinaral, igualmente con orientación EO como se puede observar en la Figura N° 5.4.

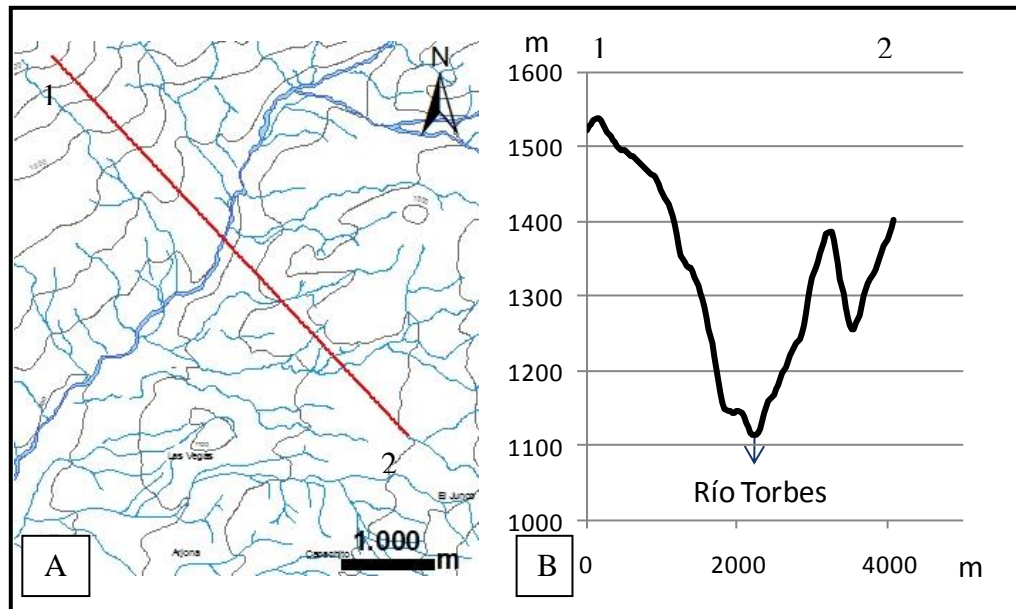


**Figura 5.4** Nótese la orientación EO de Loma de Piedra resaltada en rojo

- Tipo 3: Valles intramontanos

Como su nombre lo indica son valles que se encuentran entre las topofomas de tipo 1 correspondientes a montañas y por los que cursan los ríos Torbes, Uribante, Lobatera, Queniquea y la Quebrada La Dantera.

Las características principales de sus fondos son su forma de “V” como se puede observar en el perfil topográfico de la Figura N°5.5, con drenajes sinuosos, perfil longitudinal ondulado, orientación preferencial N15E y alturas mínima y máxima de 500 y 2000 m respectivamente. Sus laderas son cóncavas y asimétricas y el drenaje característico es dendrítico



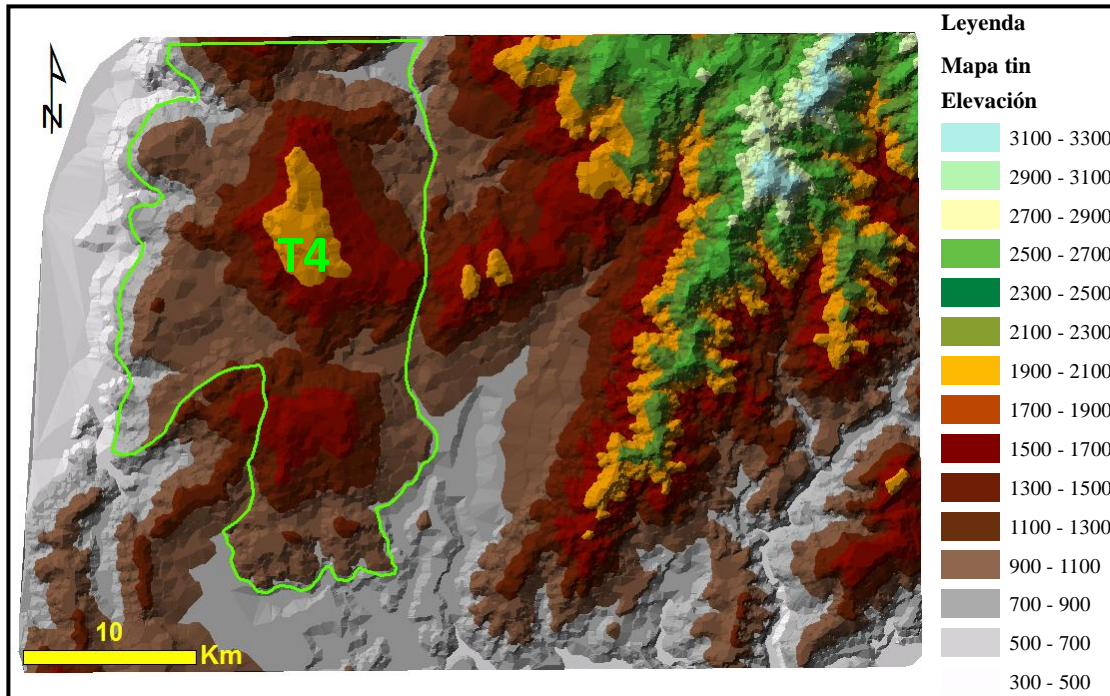
**Figura 5.5** En (A) se observa una vista de planta del Río Torbes al noroeste de El Topón y la traza del perfil topográfico con orientación N300 resaltada en rojo. En (B) se observa el perfil topográfico a escala vertical 1:10.000 y horizontal 1:100.000

También, es posible observar esta topografía en la zona centro sur de la hoja, donde cursa el Río Zúñiga al este del poblado La Aguada y el Río Torbes al sur de San Cristóbal en las poblaciones El Corozo, Sabana Larga y Sabaneta. Entre las características de esta topografía se aprecia su altura mínima y máxima del fondo entre 500 y 900 m.s.n.m., es en forma de “V”, su orientación preferencial es N10E aproximadamente, presenta drenaje sinuoso en su fondo y dendrítico en sus laderas cóncavas y simétricas.

- Tipo 4: Montañas redondeadas

Forma topográfica observada al sur oeste de Independencia, en el Cerro La Estilosa y el Páramo de La Laja. Tiene un desnivel topográfico de 800 m, llegando hasta una altura máxima de 1700 m.s.n.m. Su tope suave en forma de casco posee un perfil longitudinal ondulado y un perfil transversal convexo.

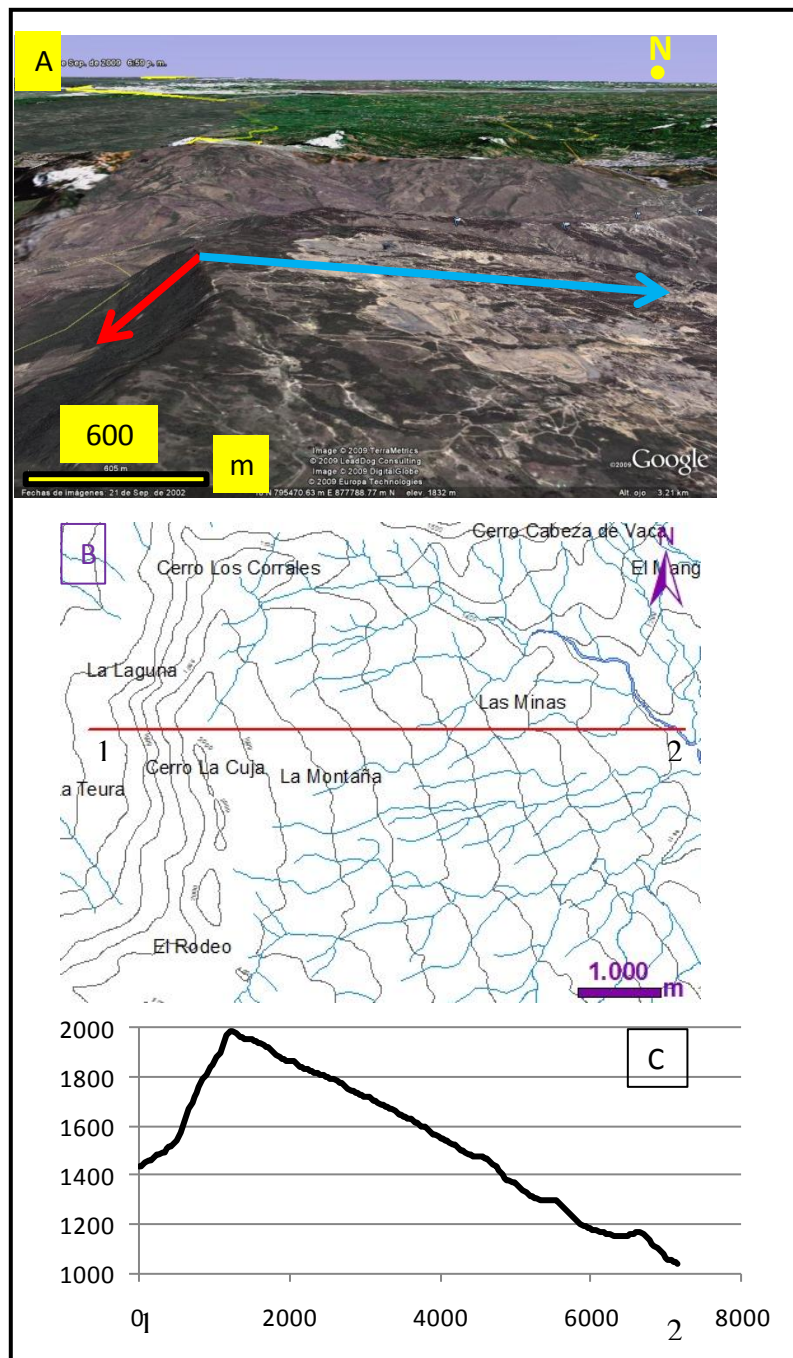
Sus laderas son cóncavas, de baja pendiente y poseen en general un drenaje rectilíneo adaptado (ver Figura N° 5.6).



**Figura 5.6** Nótese dentro del polígono verde la zona del mapa donde se encuentran las Montañas redondeadas pertenecientes al Tipo 4, observada gracias al contraste de color de las alturas del mapa tin generado en ArcGis

- Tipo 5: Cuesta

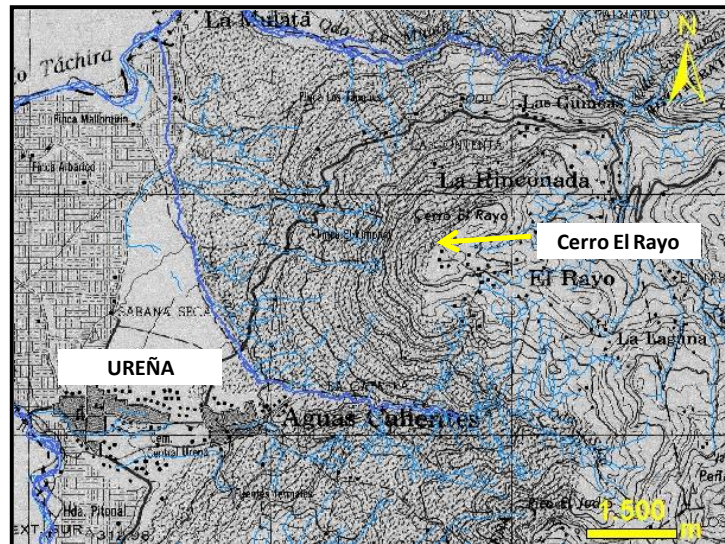
Se ubica en el mapa en la zona de Las Minas. Su altura mínima y máxima es de 1000 y 2000 m.s.n.m. respectivamente. Posee un amplio tope plano (ver Figura N° 5.5 A y C), con inclinación hacia el este de 8° aproximadamente y se aprecia un drenaje rectilíneo como se aprecia en la Figura N° 5.5 B. Por su parte, la ladera oeste posee una inclinación de 35° aproximadamente, se encuentra ausente de drenajes y su perfil transversal es cóncavo. La línea de cresta posee una orientación aproximada NS.



**Figura 5.7** (A) Relieve tipo cuesta observado en Google Earth. La ladera oeste resaltada en rojo y el tope en azul. Las flechas indican el sentido de la inclinación. (B) Nótese la traza del perfil topográfico orientado EO resaltada en rojo. (C) Perfil topográfico, escala vertical 1:30.000 y escala horizontal 1:100.000

- Tipo 6: Colinas

Este tipo de accidente topográfico se puede apreciar en el mapa al sur del poblado La Rinconada en el Cerro el Rayo, y al norte y noreste de Rubio en los cerros La Escalera y La Golondrina. Posee un desnivel topográfico de 200 m y su altura máxima es de 1200 m.s.n.m. Son colinas asimétricas con crestas cuyo perfil transversal es convexo, con orientación preferencial EO aproximadamente y sus laderas son cóncavas con drenaje dendrítico adaptado a ellas y a unas pequeñas estribaciones acolinadas como se puede observar en la siguiente Figura N° 5.8.

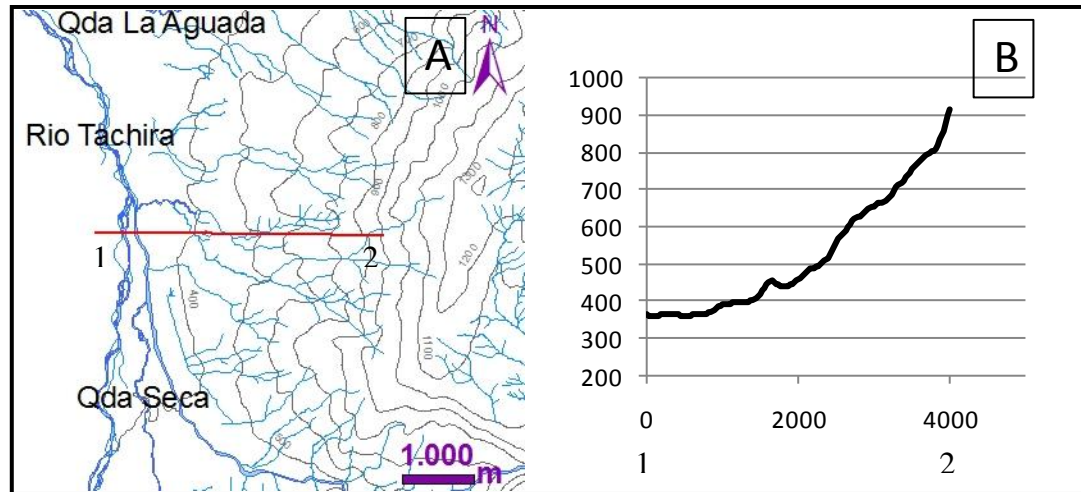


**Figura 5.8** En la figura se puede observar al noreste de Ureña el Cerro El Rayo. Se ubica en la esquina noroeste de la hoja topográfica N° 5739 escala 1:100.000

### 5.1.2 Unidad de Valle

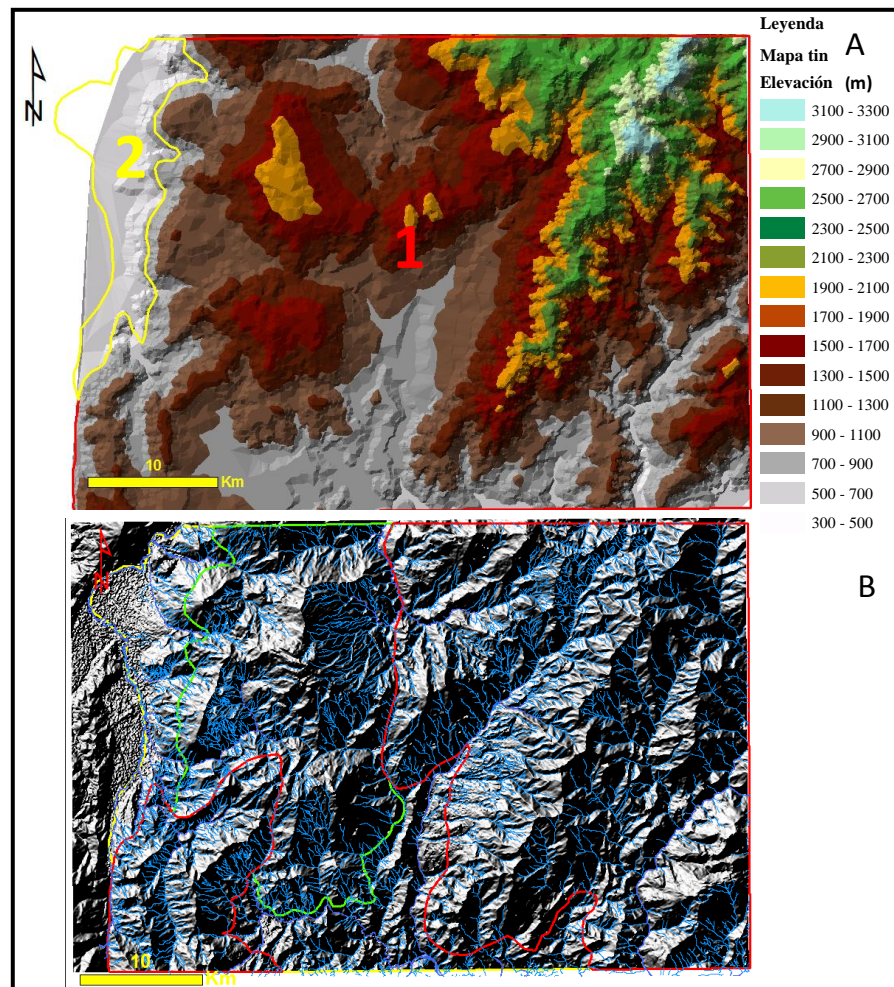
Unidad conformada por un valle de poca inclinación, el cual ocupa el 7% de la hoja aproximadamente y como se aprecia en la figuras N° 5.2 y 5.9 se encuentra ubicado en la zona oeste del mapa.

Es característicamente una planicie, por la cual cursa el Río Táchira y es la división con la República de Colombia. Posee una orientación preferencial N10E, altura promedio de 400 m.s.n.m., perfil transversal plano y longitudinal recto con drenaje sinuoso, su ladera este es cóncava con drenajes dendríticos como puede observarse en la Figura N° 5.9.



**Figura 5.9** (A) Imagen en la cual se observa la traza del perfil topográfico 1-2 con orientación EO y las características de los drenajes de la unidad. (B) Perfil topográfico 1-2 escala vertical 1:20.000 y horizontal 1:100.000

En general, el área de estudio se encuentra en una zona de montaña que supera la 700 m.s.n.m. con formas topográficas sumamente variadas y sin un patrón específico relevante, a excepción de las observadas en la zona este, las cuales son paralelas entre sí con una orientación aproximada N30E como se puede observar en la Figura 5.10 a continuación.



**Figura 5.10** En la imagen A se observan todas las unidades topográficas. La imagen B corresponde a una imagen de sombra generada en ArcGis

## 5.2 ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO

Consiste en la agrupación en series de las distintas litologías según sus características estratigráficas comunes y su edad, así como también, reconocer e interpretar las discontinuidades existentes en la secuencia de depositación de la zona, las cuales pueden ser erosiónales, depositacionales o estratigráficas. Esto se realiza con la ayuda de la columna estratigráfica y el mapa geológico de la zona.

### 5.2.1 Secuencias Estratigráficas

La agrupación en secuencias estratigráficas de la litología se realiza en base a las características estratigráficas similares en cada una de ellas, como lo son los ambientes de depositación, los procesos de retrogradación y progradación o las discontinuidades. En la zona se aprecian cinco secuencias estratigráficas las cuales se basan en las descripciones del Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999), las realizadas por Bellizzia y Pimentel (1995) y Parnaud *et al.* (1995) descritas a continuación:

#### 5.2.1.1 Secuencia Precámbrica

Representada por el Complejo Iglesias, el cual aflora en el extremo noreste del mapa como se puede apreciar en la Figura N° 5.8 y cuyo espesor se desconoce ya que no se puede corroborar su contacto inferior. Según Bellizzia y Pimentel (1995), está compuesto principalmente por rocas ígneo-metamórficas tales como gneises graníticos, esquistos anfíbolíticos y gneises cuarzo feldespático-micáceos.

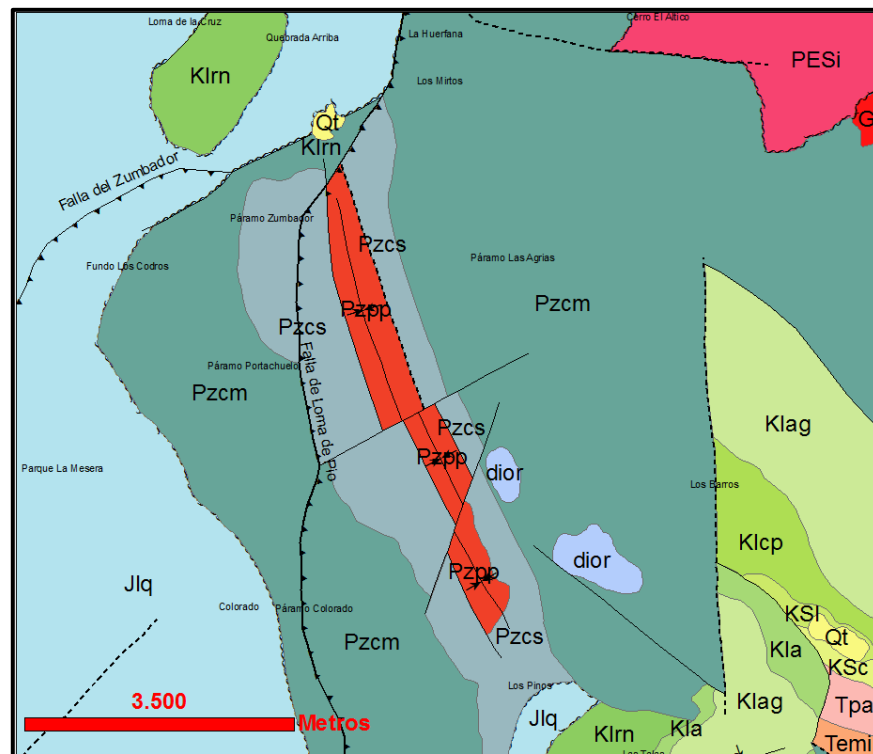
#### 5.2.1.2 Secuencia Paleozoica

Constituida por las formaciones Mucuchachí, Sabaneta y Palmarito de edades del Pensilvaniense al Pérmico Temprano. La Formación Mucuchachí constituye una secuencia de flysch alpino metamorizado y las formaciones Sabaneta y Palmarito son una cobertera sedimentaria típica de un proceso transgresivo y en cuya litología, compuesta de base a tope por areniscas gruesas a gujarrosas, limolitas, lutitas y calizas marinas, se puede apreciar el paso de un ambiente continental a marino. Esta secuencia tiene un espesor aproximado en la zona de 8910 m y aflora en la zona

noreste del mapa como se observa en la Figura N° 5.8 (tomado del Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999).

### 5.2.1.3 Secuencia Jurásica

Únicamente está representada por la Formación La Quinta, con un espesor aproximado de 1610 m en la sección tipo y depositada durante el Jurásico Tardío, durante un proceso extensivo (Parnaud *et al.*, 1995). Está compuesta por principalmente por capas rojas conglomeráticas, areniscas líticas, limolitas con capas calcáreas y tobas. Aflora en una amplia franja de norte a sur al este del mapa



**Figura 5.11** Sección noreste del mapa donde afloran las secuencias Precámbricas (PESi) y Paleozoicas (Pzcm, Pzcs, Pzpp)

#### 5.2.1.4 Secuencia Cretácica

Depositada durante un proceso transgresivo y uno regresivo ésta secuencia tiene un espesor aproximado de 4195 m y aflora en grandes áreas en el centro, sureste y noroeste del mapa. Se encuentra dividida en dos sub-secuencias explicadas a continuación:

- Sub-secuencia Cretácica temprana-media

Representada por las formaciones Río Negro, Apón, Aguardiente, Capacho, Luna, las cuales se depositaron desde el Neocomiense hasta el Maastrichtiense. Característicamente está constituida por areniscas continentales de la Formación Río Negro y posteriormente una transgresión de alcance mundial da paso a las calizas de Apón, luego se depositan las areniscas de Aguardiente en un ambiente de plataforma interna con franjas de línea de costa, y suprayacente se encuentran las calizas de Capacho y Luna. El espesor aproximado es de 2540 m. (Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999)

- Sub-secuencia Cretácica tardía

Según Parnaud *et al.*, (1995), la secuencia fue depositada durante el inicio de una etapa regresiva, ocasionada por la colisión del arco volcánico del Pacífico con la placa de Sur América, la cual genera un “*foredeep*” donde se depositan las lutitas de las formaciones Colón y Mito Juan. Esta secuencia tiene un espesor aproximado de 1650 m

### 5.2.1.5 Secuencia Terciaria

A su vez subdivididas en tres sub-secuencias que abarcan del Paleógeno al Neógeno, tienen conjuntamente un espesor de 4125 m y son descritas a continuación:

- Sub-secuencia Paleocena

Secuencia representada por el Grupo Orocué, conformado por las formaciones Catatumbo, Barco y Los Cuervos. Parnaud *et al.*, (1995), propone que la sedimentación se llevo a cabo durante una etapa transgresiva que persistía desde el Maastrichtiense y se caracteriza por presentar lutitas y arcillitas algo carbonáceas en la Formación Catatumbo y areniscas, lutitas, limolitas y algunas capas de carbón en las formaciones Barco y Los Cuervos características de una suite deltaica (Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999). Tiene un espesor de 1065 m aproximadamente y aflora mayoritariamente en la zona suroeste y noroeste del mapa, aunque hay una pequeña zona en el sector sureste de la hoja en la que se encuentran las formaciones Barco y Los Cuervos en contacto de falla con las formaciones La Quinta y Río Negro.

La Formación Catatumbo se encuentra restringida únicamente a la zona noroeste del mapa.

- Sub-secuencia Eocena-Oligocena

Consta de las formaciones Mirador, Carbonera y León, depositadas durante un ambiente transgresivo. La litología característica varía de areniscas y lutitas con capas de carbón a lutitas abigarradas y lutitas blandas con concreciones y restos de plantas hacia el tope. El espesor aproximado de la secuencia es de

1810 m y aflora principalmente en la zona oeste, centro norte y centro sur del mapa (Parnaud *et al.*, 1995)

- Sub-secuencia Mio-Pliocena

Constituida por el Grupo Guayabo (formaciones Palmar, Isnotú y Betijoque), el cual es característico de ambiente progradante, donde la litología consta de base a tope de arcillas arenosas y carbonosas con restos de plantas intercaladas con areniscas; lutitas con areniscas intercaladas y conglomerados macizos con lutitas macizas y areniscas mal escogidas. El espesor de la secuencia es de 1250 m aproximadamente y aflora en zonas aisladas al oeste y al centro sur del mapa (Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica, 1999).

### 5.2.2 Discordancias

Se encuentran definidas por las relaciones de continuidad verticales de la secuencia de la columna estratigráfica. En la zona de San Cristóbal se determinaron cuatro discordancias, bajo el criterio de la cantidad de tiempo geológico que abarcan, se clasifican de mayor a menor jerarquía de la siguiente manera:

- Discordancia post Precámbrico-infra Pensilvaniense:

Abarca un periodo de no deposición de 250 Ma de duración en el que están ausentes los depósitos de los periodos Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico y del Carbonífero Temprano (Missisipiense). En el mapa se puede observar al norte de Queniquea en el contacto del Complejo Iglesias y la Formación Mucuchachí (Ver Figura 5.11), en el extremo noreste. Según el

Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999) el contacto superior del Complejo Iglesias puede presentarse en contacto de falla, o en discordancia con unidades paleozoicas y mesozoicas

- Discordancia post Pérmico Temprano-infra Jurásico Tardío:

Discordancia caracterizada por la ausencia de sedimentación durante el Pérmico Tardío., el Triásico y el Jurásico Temprano y Medio. Abarca un periodo de 95 Ma (ver Anexo 1) y se puede apreciar en el contacto entre las formaciones Paleozoicas y la Formación La Quinta como indica el Léxico estratigráfico de Venezuela, versión electrónica (1999).En el mapa se encuentra en la zona noreste como se puede observar en la Figura 5.11.

- Discordancia post Jurásico Tardío-infra Barremiense:

Abarca un periodo de 20 Ma en el que están ausentes los pisos cretácicos Berriasiense, Valanginiense y Hauteraviense. Se puede observar al este del mapa (ver Anexo 2) en el contacto entre las formaciones La Quinta y Río Negro (Jlq-KIrn). Según Schubert, Sifontes, Padrón, Vélez, Loaiza, & Loaiza, (1979), el contacto entre estas formaciones es una discordancia paralela o transicional.

- Discordancia intra Mioceno:

Discordancia angular ocurrida en el Mioceno medio cuando sobre la Formación Palmar se depositaron las molasas pertenecientes a la Formación Isnotú (Shagam 1972, Meier *et al*, 1987)

- Discordancia intra Plioceno:

Esta discordancia es del tipo angular y se puede observar en el contacto entre los depósitos molásicos de la Formación Isnotú y la Formación Betijoque.

### 5.2.3 Binomios de Dureza

Los binomios de resistencia a los procesos exógenos se encuentran definidos por el grado de competencia a los fenómenos geológicos, tales como la erosión, de los estratos suprayacentes a estratos menos competentes, es decir, por la superposición de capas duras sobre capas más blandas. En la región de San Cristóbal se pueden observar los siguientes, jerarquizados de mayor a menor por su capacidad para generar morfoestructuras:

**Tabla 5.1** Binomios de dureza relativa determinados en la región de San Cristóbal

Binomio	Capa Dura/Capa Blanda	Descripción	Ubicación	Expresión Topográfica
B1	$(K_{II}+K_{Cp})/K_{Iag}$	(caliza + lutitas)/(arenisca + limolita)	Zona central, sureste y noroeste del mapa	Altos topográficos, montañas redondeadas, alargadas
B2	$K_{Ia}/(J_{lr}+K_{Irn})$	(caliza)/(arenisca + conglomerado)	Zona este del mapa	Altos topográficos, montañas y serranías
B3	$T_{emi}/(K_{cmj} + T_{pc} + T_{pb}+T_{plc})$	(areniscas)/(lutitas)	Suroeste y centro oeste del mapa	Relieve poco elevado, cuestras y crestas

**Tabla 5.1** Continuación

Binomio	Capa Dura/Capa Blanda	Descripción	Ubicación	Expresión Topográfica
B4	Pzpp/(Pzcs+Pzcm)	(lutitas, arenas, margas y calizas)/(areniscas, limolitas y pizarras)	Extremo noreste del mapa	Altos topográficos de la unidad de serranía

En el análisis estratigráfico se aprecia la existencia de cinco discordancias, donde la discordancia post Precámbrico-infra Pensilvaniense es la de mayor relevancia, ya que representa un hiato de 250 Ma aproximadamente en la secuencia estratigráfica. También, cabe resaltar la continuidad en la sedimentación existente desde el Barremiense hasta el Mioceno.

En la agrupación en secuencias de la estratigrafía local se puede observar el predominio de un ambiente de sedimentación marina, con existencia de gran cantidad de litologías como las calizas y lutitas. Este predominio se debió a los procesos transgresivos de larga duración y de escala mundial, que dominaron sobre los progradantes, que sin duda han sido sumamente potentes y han originado el levantamiento andino pero por muy breves periodos de tiempo

### 5.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Tiene como objetivo reconocer, describir e interpretar las estructuras y su relación mutua, definir las fases de deformación que afectan o afectaron las estructuras en el

área de estudio y describir el estilo estructural que presenta la región de San Cristóbal.

Para llevar a cabo el análisis estructural es necesario conjugar los análisis litológicos, estratigráficos y diversas herramientas para el análisis como lo son: la columna estratigráfica (Anexo 1) y el mapa geológico con los cortes geológicos (Anexo 2) ya que estos se encuentran estrechamente relacionados con cada uno de los puntos a tratar.

### **5.3.1 Estructuras**

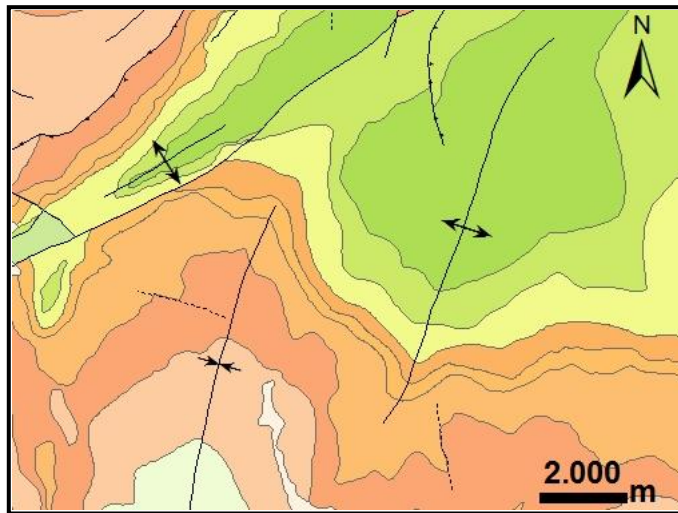
En general, en el mapa se observan las siguientes estructuras, jerarquizadas de simples a complejas:

- Pliegues:

Sinclinales y anticlinales como los que se pueden observar en el mapa (Anexo 2) al sur de Borotá, al norte de San Pedro del Rio, el Sinclinal de Uribante al sureste, al norte de Rubio, entre otros.

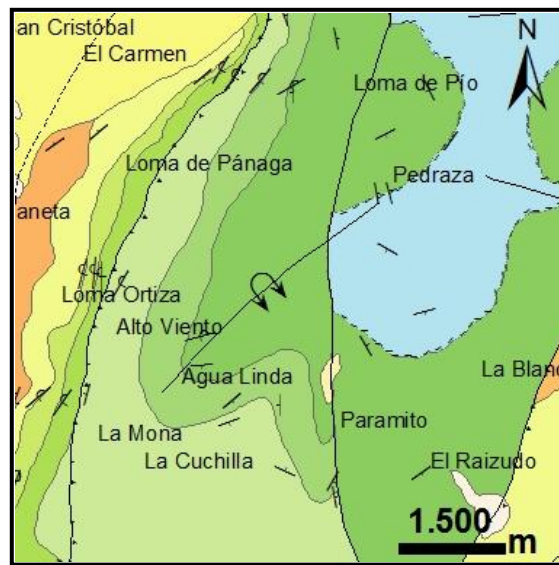
Estos pliegues se encuentran divididos en dos grupos debido a las diferencias en la orientación preferencial de sus ejes y a la litología que los compone. Los anticlinales que se encuentran en la zona central, norte y este del mapa, poseen una orientación aproximada N40E y se encuentran en rocas de edad Cretácico. En cambio, los sinclinales que se encuentran cercanos a la frontera con Colombia y al sur, tienen una orientación N20E y su litología es perteneciente al Terciario. En la Figura N° 5.12 se puede observar una sección de la zona centro sur oeste del mapa (Anexo 1) donde se aprecian anticlinales

compuestos por litología Cretácica y sinclinales compuestos por rocas Terciarias.



**Figura 5.12** Zona centro sur oeste de la hoja al sur de Libertad en la que se observan anticlinales y un sinclinal tipo del área de estudio

En la zona también se observan dos anticlinales volcados, asociados a las zonas de corrimiento. El primero, se encuentra en la Fila del Verde, está compuesto de rocas terciarias y su orientación es N20E. El segundo, se puede observar en la zona centro sur del mapa, en la Loma La Ortiza, al oeste de la Falla de Boconó con una orientación aproximada N40E y se encuentra compuesto por rocas cretácicas (ver Figura N° 5.13).



**Figura 5.13** Nótese en el centro de la imagen el anticlinal volcado al oeste de la Falla de Boconó

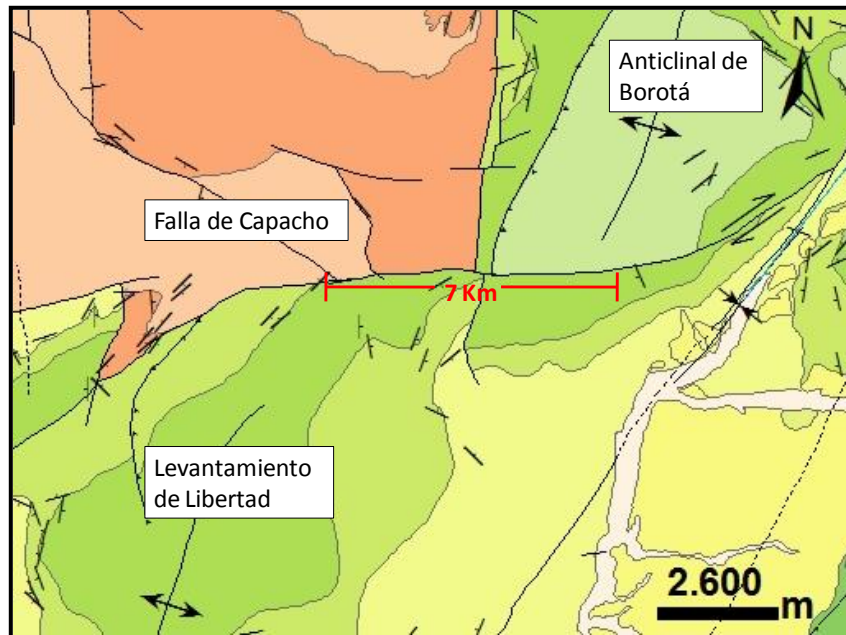
Al este de Macanillo, en la zona este del mapa, se encuentra un pequeño sinclinal volcado asociado a la Falla de Uribante y compuesto por rocas del Cretácico.

- Fallas:

En general, las fallas observadas en la hoja son de tipo transcurrente inverso. Entre las principales fallas dextrales se encuentran la Falla de San Pedro y la Falla de Capacho. Estas fallas hacia el este tienen un ángulo de buzamiento bastante alto y una orientación preferencial aproximada de N40E y en su tramo central tienden a tener una dirección E-O. Gracias a la gran extensión de la Falla de Capacho (unos 40 km aproximadamente) se puede apreciar como hacia el sur oeste cambia su rumbo drásticamente hasta presentar una orientación N-S.

Según Meier *et al.* (1987), el levantamiento de Libertad y el anticlinal de Borotá al sur y norte de la Falla de Capacho respectivamente fueron formados como una misma estructura en etapas tempranas de deformación, y

posteriormente fueron cortados y desplazados por la falla, por lo que se asume un movimiento dextral de unos 10 km aproximadamente. En la Figura N° 5.14 se puede apreciar a detalle el tramo central de la Falla de Capacho ubicado en el centro del mapa y el movimiento al que se hace referencia



**Figura 5.14** Nótese el movimiento entre el Anticlinal de Borotá con respecto al Levantamiento de Libertad de unos 7 Km aproximadamente hacia la derecha en la Falla de Capacho.

Entre las principales fallas inversas sinestrales se pueden observar la Falla Pozo Azul, Falla de Uribante y las fallas que se observan al oeste de la Falla el de Boconó. Característicamente, estas fallas poseen una orientación preferencial NE y tienen un ángulo de buzamiento alto.

En la zona también se observan importantes corrimientos, asociados a las siguientes fallas:

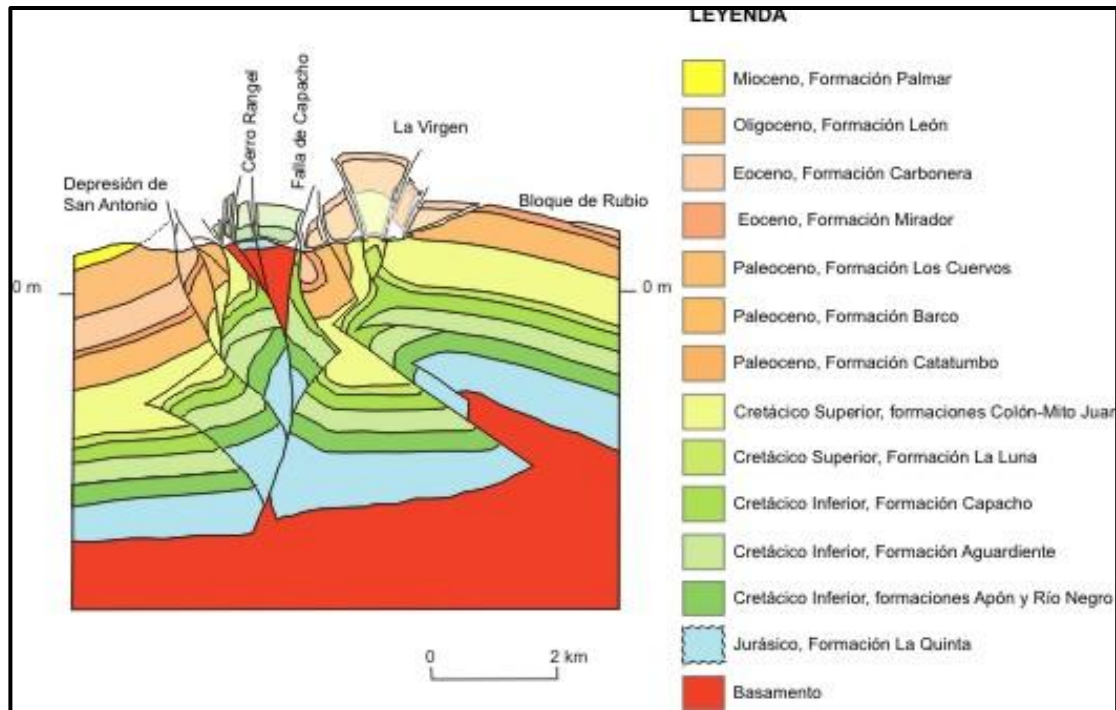
- Falla de Boconó: Posee una vergencia NO, y su movimiento es dextral inverso. Tiene una extensión de 42 km con una orientación

preferencial N35E. En la zona de Loma La Ortiza al sur del mapa. se observa un anticlinal volcado asociado a dicha falla en el cual las capas del Cretácico Inferior se encuentran sobrecorriendo a rocas del Cretácico Superior

- Falla de Borotá: La vergencia del corrimiento es NO, su extensión es de 20 km y su orientación preferencial es N35E. El tipo de falla es dextral inversa
  
- Falla de Loma de Pio: Extenso corrimiento de unos 43 km de longitud aproximadamente, tiene una orientación N30E. Su vergencia es NO y posee un movimiento sinistral con una importante componente inversa, esto se observa en la zona sureste del mapa en La Blanca donde se encuentran en contacto rocas terciarias pertenecientes a las formaciones Barco y Los Cuervos con rocas jurásicas y cretácicas inferiores de las formaciones La Quinta y Río Negro respectivamente.
  
- Corrimiento de Fila del Verde: El cual se encuentra asociado a una falla y a un anticlinal volcado en donde las capas del Eoceno menos competentes (Formación Carbonera) sobrecorren sobre ellas mismas

Existen otros corrimientos menores observados en la zona noroeste (Cerro Zamurito y Cerro Rangel-La Mulera que poseen una orientación N20E y N45E respectivamente.

Los esfuerzos transpresivos y la conjugación de estas estructuras generan lo que se conoce como “estructura en flor”. Específicamente en el mapa se puede observar en la zona oeste del mapa, en el Cerro Rangel una estructura en flor positiva que se observa en la Figura N° 5.14 (Meier *et al.*, 1987).



**Figura 5.15** Se observa en el perfil geológico una estructura en “flor positiva” (tomado y modificado de Meier *et al.*, 1987)

### 5.3.2 Estilo Estructural

A través del análisis del mapa y de los cortes geológicos se puede observar un estilo de cobertera, donde la deformación que ocasionan los pliegues y las fallas se encuentra en el dominio de la corteza frágil. El basamento actualmente se encuentra sobre de los 4000 m debajo de la superficie y posiblemente nunca haya estado mucho más profundo (Meier *et al.*, 1987).

### 5.3.3 Fases de Deformación

En la zona de San Cristóbal se identifican seis fases de deformación que afectaron las rocas de la región, estas son las siguientes de la más antigua a la más reciente:

- Fase infra Carbonífero Superior

Abarca la deformación ocurrida durante el Precámbrico y el Carbonífero, que afectó a las rocas del Complejo Iglesias y de la Formación Mucuchachí. Bellizzia y Pimentel (1995), hacen referencia a un evento tectono-metamórfico ocurrido hace  $\pm 290$  Ma antes del emplazamiento de estas rocas en la Cordillera de Los Andes al comienzo de la orogénesis Herciniana.

- Fase infra Jurásico Tardío

Este evento tectónico tuvo lugar durante la orogénesis Herciniana, el cual según Bellizzia y Pimentel (1995), estuvo ausente de metamorfismo y las rocas Precámbricas y Paleozoicas se encuentran deformadas por pliegues cilíndricos orientados NE-SO o volcados hacia el NO como el que puede observarse zona noreste del mapa en la Figura N° 5.11.

- Fase infra Barremiense

Se llevo a cabo durante un periodo distensivo, en la etapa de rift Jurásica, en la que se formaron grabens y fallas normales de alto buzamiento. En esta etapa se depositaron las capas rojas de la Formación La Quinta características de un valle de rift.

- Fase infra Eoceno

Esta etapa se encuentra dentro de un margen tectónico pasivo, en el cual se depositaron las espesas capas de lutitas y calizas como las observadas en las formaciones cretácicas.

- Fase infra Mioceno Medio

Este evento tectónico está relacionado a las etapas tempranas de la colisión del Arco de Panamá contra el oeste de Sur América. Este tectonismo compresivo es responsable de la iniciación del levantamiento del Macizo de Santander, la Sierra de Perijá y de los Andes de Mérida (Parnaud *et al.* 1995). Se encuentra evidenciado en los depósitos molásicos de la Formación Isnotú que se pueden observar en el centro sur del mapa en el sector La Voladora, margen oeste del Río Caparo (Audemard & Audemard, 2002)

- Fase post Plioceno

Fase de deformación actual, de la cual resultan los Andes de Mérida del presente. Este evento es consecuencia de una transpresión ocurrida debido a la compleja interacción entre la placas tectónicas Caribe, Sur América y Nazca (Audemard & Audemard, 2002).

Se encuentra evidenciada con la depositación de las molasas de la Formación Betijoque, que se pueden observar en la localidad El Palmar de La Cope en el centro sur de la hoja.

La zona de estudio, desde el punto de vista estructural es sumamente compleja, con gran cantidad de estructuras formadas en diversas fases de deformación y cuya orientación predominante es NE al norte del mapa y NS hacia el sur y oeste del

mismo. Según, Audemard & Audemard (2002) esto está relacionado con el tren de esfuerzos presentes que progresivamente hacia el suroeste se gira en sentido antihorario causado por la interacción de las placas tectónicas de la siguiente manera: Tren de esfuerzos EO a causa de la subducción de las placas de Nazca y Sur América a lo largo de la oeste de Colombia y NNO-SSE a lo largo del límite sur de la Placa Caribe.

## **5.4 ANÁLISIS MORFOESTRUCTURAL**

Este análisis se encuentra basado en realizar definiciones morfoestructurales de las unidades mayores de relieve, en las relaciones de la topografía con las estructuras, por lo cual, es necesario el estudio tanto de la tectónica como de la expresión topográfica y el grado de correspondencia entre ellas.

### **5.4.1 Unidad de Montañas**

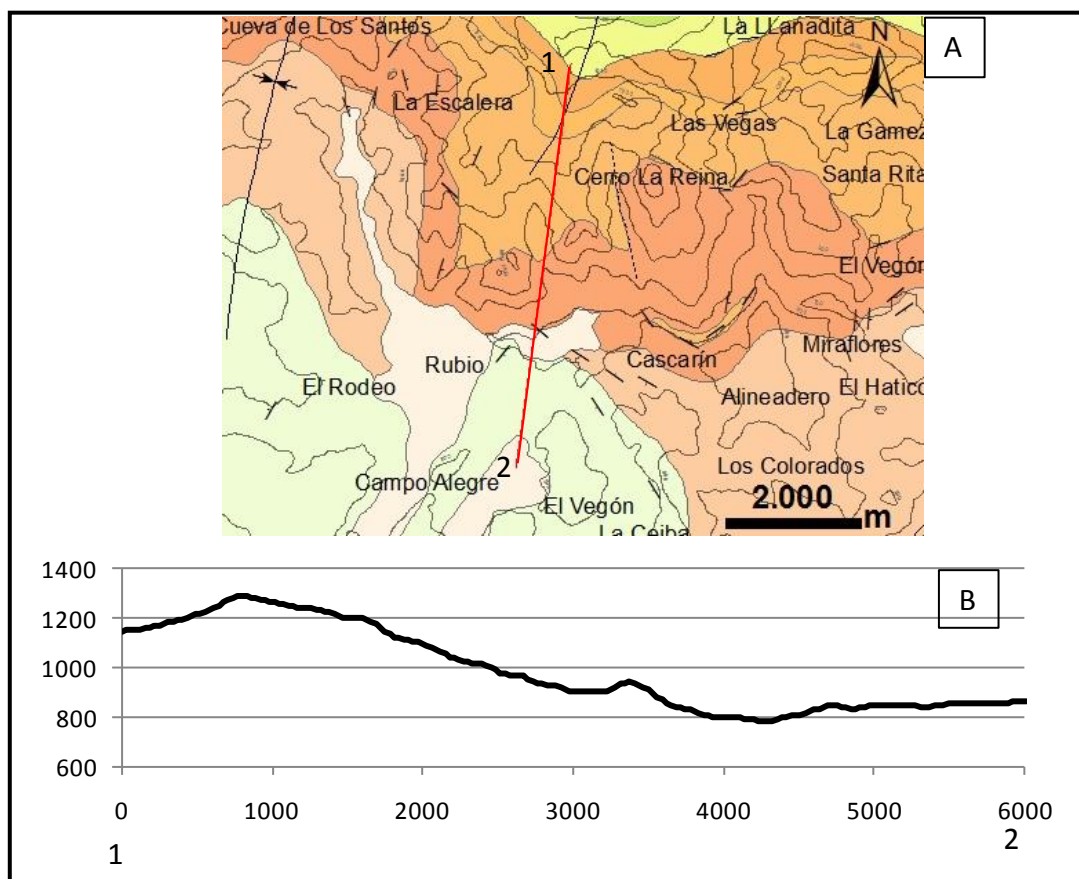
En esta unidad se observan gran cantidad de morfoestructuras entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Cresta

Se observa en la zona centro oeste de la hoja, en la zona de Las Minas (ver Figura N° 5.7), el binomio de dureza asociado es B3 (ver Tabla N° 5.1) y la estructura asociada es un monoclinas el cual es correspondiente con la topografía. Su edad diagnóstica es Post Plioceno.

- Relieve de Cuesta

Morfoestructura similar a la anterior pero con menos altitud y menos inclinación en su tope. Se pueden observar en la zona sur de la hoja, en Rubio como se puede apreciar en la Figura N° 5.16. La estructura asociada es un monoclinal y el binomio de dureza asociado es B3 (Tabla N° 5.1). Su edad diagnóstica es Post Plioceno.



**Figura 5.16** (A) Se Observa la litología Terciaria asociada al relieve de cuesta y la traza del perfil 1-2 con orientación N10E resaltada en rojo. (B) Perfil topográfico 1-2 a escala vertical 1:30.000 y horizontal 1:50.000 donde se aprecia la suave inclinación del relieve de cuesta

- Comba de flanco en Mont derivado

Esta morfoestructura se encuentra asociada a los binomios de dureza B1 en la hoja en la zona al sur de Libertad, y a B3 en el Cerro Botadero en la zona centro oeste del mapa, el cual. Las estructuras asociadas a ellos son los anticlinales asimétricos y el mont derivado presenta correspondencia con la topografía (la estructura es positiva y la expresión topográfica también) pero la comba de flanco no. La edad diagnostica es Post Plioceno.

- Comba en mont derivado

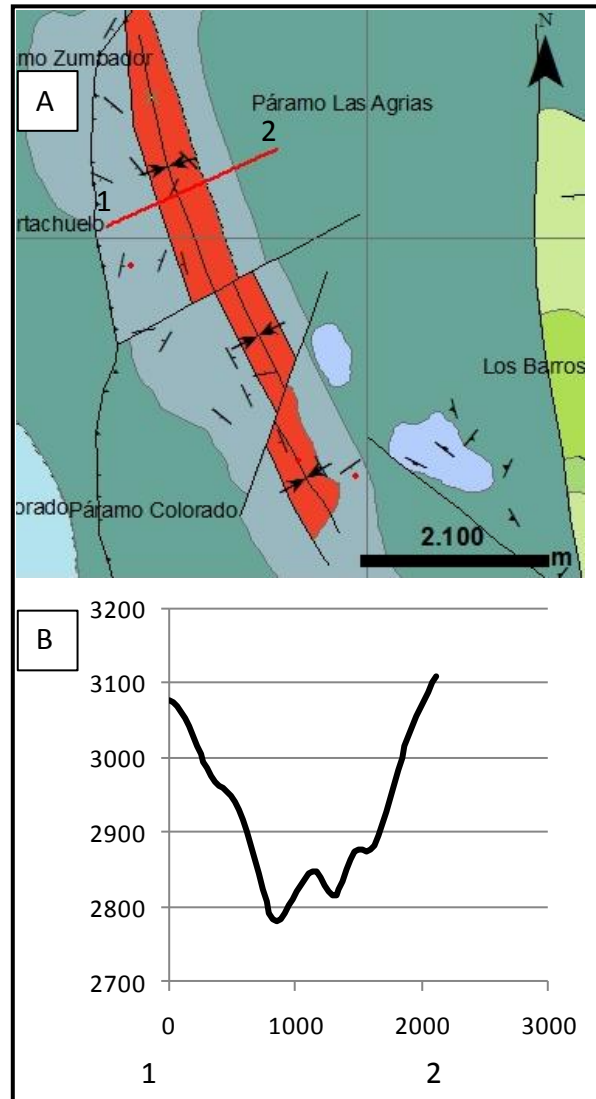
Se observa en el Anticlinal de Borotá, en la zona central del mapa como se aprecia en el corte geológico C-D del Anexo 1. El binomio de dureza corresponde a B1, se encuentra asociado a un anticlinal asimétrico y el mont presenta correspondencia con la topografía y la comba de flanco no. Su edad diagnostica es Post Plioceno.

- Val

Se encuentran en el mapa en las zonas al norte de El Rodeo, al suroeste de San Cristóbal, al sur del Hato La Virgen y al oeste de la Cabera. Están asociados al binomio de dureza B3 y estructuralmente están compuestos por sinclinales asimétricos correspondientes con la expresión topográfica (la estructura es negativa y la expresión topográfica igual). Tienen una edad diagnóstica Post Plioceno.

Al noroeste de la población de Queniquea en el Páramo Portachuelo, se encuentra un val asociado al binomio de dureza B4 compuesto por rocas Paleozoicas (ver Figura N° 5.17). El sinclinal asociado es correspondiente con

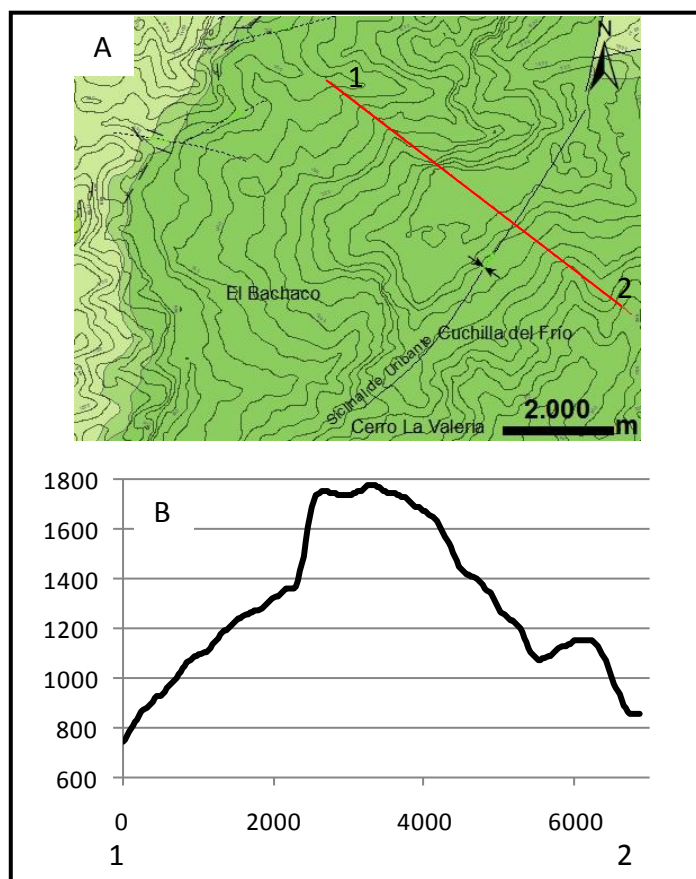
la expresión topográfica y su edad diagnóstica es Post Carbonífero (Bellizia & Pimentel, 1995).



**Figura 5.17** (A) Se Observa la litología Paleozoica asociada al val y la traza del perfil 1-2 con orientación N76E resaltada en rojo. (B) Perfil topográfico 1-2 a escala vertical 1:10.000 y horizontal 1:50.000 donde se observa la topografía correspondiente al val

- Sinclinal colgado

Morfoestructura observada en la zona de Angaravenca y en el Sinclinal de Uribante. Se asocia al binomio de dureza B2 y es no correspondiente con la topografía (el sinclinal es negativo y la expresión topográfica es positiva como puede observarse en el perfil de la Figura N° 5.17 B). Su edad diagnóstica es Post Plioceno.



**Figura 5.18** (A) Se observa el Sinclinal de Uribante y la traza del perfil 1-2 perpendicular al eje del pliegue resaltada en rojo. (B) Perfil topográfico en el que se observa la elevación topográfica que corresponde al sinclinal colgado, escala vertical 1:30.000 y horizontal 1:100.000

### **5.4.2 Unidad de Valle**

En esta unidad no se aprecian morfoestructuras debido a que la zona se encuentra cubierta por depósitos de aluvión.

## **5.5 GÉNESIS DE LAS FORMAS**

La evolución genética de la zona de estudio se puede describir de la siguiente manera:

La etapa tectónica inicial generó un metamorfismo regional de los sedimentos previamente depositados durante el Precámbrico y el Carbonífero. Es importante destacar que este evento tectono-metamórfico se llevo a cabo sobre las rocas del Complejo Iglesias y de la Formación Mucuchachí previo a su emplazamiento en los Andes. Bellizzia y Pimentel (1995) plantean que este Bloque se encontraba ligado al Bloque Maya o Yucatán.

Posteriormente, una vez emplazado el Bloque mencionado, en los Andes, una nueva etapa tectónica ausente de metamorfismo genera extensos pliegues en las rocas presentes hasta el Periodo Pérmico.

Durante el Jurásico, un proceso extensivo generó grabens, fallas normales de buzamiento alto y surcos. Los grabens se rellenaron con las capas rojas de la Formación La Quinta y a continuación, los surcos fueron rellenados por sedimentos continentales (Formación Río Negro).

Seguidamente, un marco tectónico pasivo y una transgresión de alcance mundial, generaron las condiciones ideales para la depositación de grandes capas de calizas y lutitas del Cretácico Inferior al Paleoceno Temprano. Una vez en el Paleoceno

tempano el margen pasivo pasa a ser transicional a un margen activo y esto se aprecia en los cambios de ambientes marinos a continentales en la columna estratigráfica (Parnaud *et al.*, 1995).

A continuación, previo al Mioceno Medio, la zona se encuentra bajo esfuerzos compresivos producto del choque del Arco de Panamá con el oeste de Sur América. Estos esfuerzos tienen una dirección EO y por tanto generan estructuras con orientación preferencial NS como las observadas en el margen oeste del mapa de San Cristóbal. También, los depósitos molásicos de la Formación Isnotú, que se encuentran en discordancia angular con los estratos infrayacentes, son otra evidencia de dicho pulso tectónico.

Finalmente, durante el Plioceno, comienza un segundo evento tectónico producto de la transpresión ocurrida por el movimiento de la placa de Nazca que subduce a la de Sur América en la costa del Pacífico de Colombia (compresión en sentido EO) y por el movimiento de la Placa del Caribe sobre el norte de Venezuela (compresión en sentido NNO-SSE) y se pueden apreciar en la Figura N° 5.8. Estos dos eventos transpresivos continuos, generaron la inversión de los grabens y de las fallas normales, por lo que ahora lo que son fallas inversas de alto buzamiento han levantados las rocas del basamento a la superficie (Audemard & Audemard, 2002). En esta etapa es donde se han generado la mayoría de las estructuras que podemos observar en la zona.

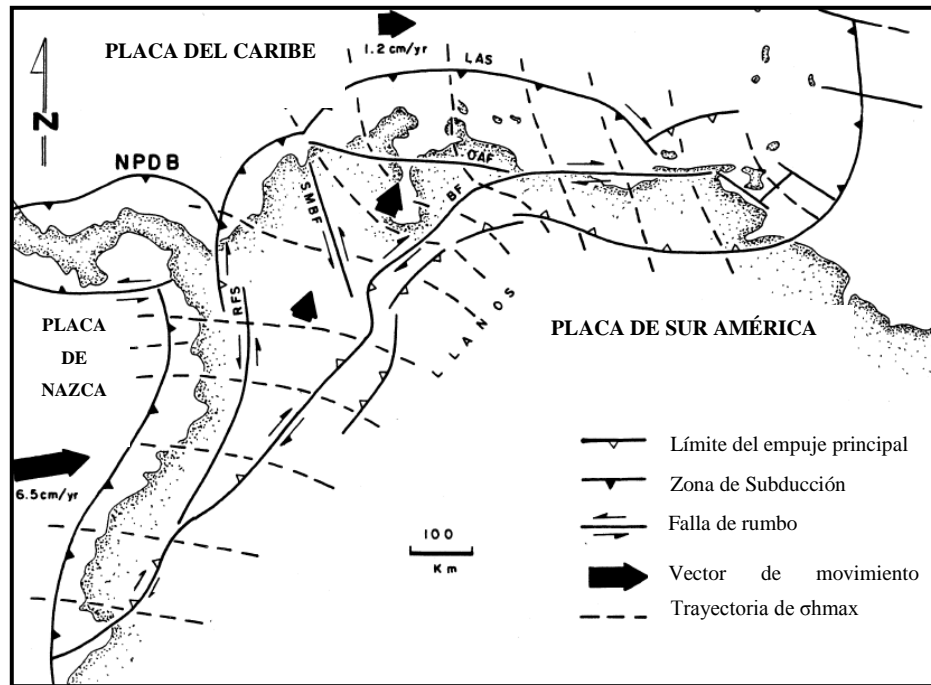


Figura 5.19 Modelo esquemático del noroeste de Sur América (tomado de Audemard & Audemard, 2002)

## CAPÍTULO VI

### SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 SUMARIO

- Se realizó un mapa geológico actualizado de San Cristóbal, a escala 1:50.000 a través de la integración geológica de la información bibliográfica recopilada, conjuntamente con los análisis de las imágenes satelitales Landsat 7, de las fotografías aéreas y la revisión geológica de campo
- El procesamiento de la imagen satelital permitió corregir las distorsiones para obtener un mejor resultado de la interpretación. Además, este procesamiento permite que pueda ser usada con otra imagen satelital y trabajar en un medio con características uniformes en ambas imágenes
- Se realizaron tres métodos para resaltar la información de las imágenes satelitales: combinaciones de bandas, clasificación supervisada y no supervisada
- La combinación de bandas, en un método sumamente flexible con el cual se puede resaltar diferentes tipos de información de la imagen satelital fácilmente y fue sumamente útil para resaltar estructuras y contactos estratigráficos.
- La combinación de bandas 642 fue la más utilizada ya que resalta la información litológica para establecer los contactos estratigráficos y permitió cartografiar correctamente el aluvión en la zona oeste del mapa, en el curso de la Quebrada La Dantera.

- La clasificación supervisada es bastante resolutive, sobre todo para determinar contactos litológicos si la información previa e introducida por el usuario al programa es sumamente veraz
- Las zonas nubladas de las imágenes satelitales no permiten obtener ningún tipo de información de esa área en específico, por lo cual es necesario recurrir a la imagen de radar, a mapas previos o hacer un trabajo de campo en dicha zona
- La interpretación de las fotografías aéreas es una herramienta muy útil y veraz porque la calidad de la imagen está muy por encima de las imágenes Landsat y permite obtener información detallada. El procedimiento de trazar la información directamente en el programa ArcGis brindó muchas facilidades a la hora de su manipulación
- El uso del programa ArcGis para integrar los datos a un SIG permitió manejar gran cantidad de información y almacenarla de manera sencilla y referenciada en WGS84 para posteriormente diseñar el mapa, publicarlo e imprimirlo. Es por esto que en la actualidad son de suma importancia en la elaboración de los trabajos geológicos
- Con el análisis del relieve se delimitaron dos unidades topográficas mayores, como lo son: la unidad de montaña que abarca casi la totalidad del mapa y la unidad de depresión que abarca una pequeña zona al oeste del mismo
- Las estructuras en el área de estudio se formaron durante la fase de deformación post Plioceno (Meier *et al.*, 1987), durante la cual se formó en orógeno andino, a excepción de los pliegues paleozoicos que corresponden a la fase de deformación infra Jurásico Tardío (Bellizia & Pimentel, 1995)
- Del análisis morfoestructural se concluye que existe una correspondencia generalizada de las estructuras y la topografía en el área de estudio y se aprecia la importancia de los binomios de dureza en la generación de las morfoestructuras.

## 6.2 CONCLUSIONES

- Gracias a las evidencias observadas durante el análisis de las imágenes satelitales, se pudo trazar de manera acertada las estructuras, principalmente las fallas. De esta forma, se cartografiaron nuevamente las trazas de las fallas de Boconó, Loma de Pio, Capacho, entre otras
- Mediante la revisión geológica de campo se pudo corroborar información y corregir errores de interpretación realizados sobre las imágenes o de los mapas previos usados y así, se cartografiaron correctamente los contactos litológicos en algunas zonas y las rocas pertenecientes al Terciario en la vía de Macanillo, a la altura de Caño Seco
- El mapa geológico de: San Cristóbal, escala 1:100.000, del Ministerio de Energía y Minas, edición 1, 1986, presenta una interpretación estructural actualizada y más acertada que los mapas Creole, pero la interpretación estratigráfica no se corresponde con los datos de campo y con la interpretación de las imágenes
- Los mapas realizados por la Creole Petroleum Corporation presentan una interpretación estratigráfica que se corresponde con mucha exactitud con lo observado en las imágenes satelitales y en la revisión geológica de campo. Pero, la interpretación estructural en muchos casos, no es tan fidedigna.
- Las fallas observadas corresponden a fallas de rumbo con un componente inverso importante y fallas inversas, con orientaciones predominantes NE-SO y NNE-SSO al norte y hacia el suroeste tienden a NS al igual que los pliegues, lo que permite concluir que la zona se encuentra sujeta a esfuerzos compresivos en direcciones NNO-SSE y EO como afirman Audemard & Audemard en el 2002
- Mediante el análisis geomorfológico se obtienen evidencias de que la expresión topográfica de la región está controlada por el dominio de las estructuras sobre los agentes erosivos

- En base a lo mencionado por Audemard & Audemard (2002) y lo observado en los análisis de las discordancias y de las fases de deformación, se plantea que la edad de la Formación Betijoque pueda ser Plio-Pleistocena

### **6.3 RECOMENDACIONES**

- Usar la imagen Landsat más actualizada y con la menor cantidad de nubes posibles para tener acceso a la mayor cantidad de información
- Intentar el apilamiento de bandas incluyendo también la banda pancromática 8, ya que esta es la que posee mejor resolución
- Hacer uso de las imágenes obtenidas por el satélite Spot, ya que poseen una resolución de hasta más de 10 veces mayor que las del Landsat
- Realizar la revisión geológica de campo durante la estación seca y hacer un levantamiento detallado en la zona noroeste del mapa, entre las poblaciones de Ureña y San Pedro del Río ya que es una zona compleja estructural y estratigráficamente
- Realizar la clasificación y datación de las rocas Terciarias y Precámbricas sin diferenciar que se encuentran en el área
- Se recomienda usar los programas de procesamiento, análisis y edición más actualizados y en un equipo cuyo hardware cumpla de sobra los requerimientos de los mismos
- Recopilar la mayor cantidad de información previa, para contar con un buen soporte de información
- Adquirir la de fotografías aéreas de la región para poder cubrir la mayor cantidad de área de la zona

**BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS**

- Albrizzio, C. (2001). *Interpretación de Mapas. Mapas topograficos*. Caracas: UCV. Escuela de geología, minas y geofísica.
- Alonso, F. (15 de Diciembre de 2003). *Cooperativa de Enseñanza y Aprendizaje Geográfico Integral*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2009, de Teledetección : <http://www.ceagi.org/portal/>
- Alonso, F. (7 de Febrero de 2001). *Fotointerpretación y Teledetección*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2009, de Universidad de Murcia: <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/>
- Alonso, F. (13 de Febrero de 2006). *SIGMUR* . Recuperado el 1 de Octubre de 2009, de SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia: <http://www.um.es/geograf/sigmur/index.html>
- Arnold, H. (1966). Upper paleozoic Sabaneta-Palmarito sequence of Mérida Andes, Venezuela. En *AAPG Bulletin*, 50(11) (págs. 2366-2387).
- Audemard, F. E., & Audemard, F. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. En *Tectonophysics* (págs. 299– 327).
- Audemard, F. A. (2003). Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. En *Quaternary International* 101–102 (págs. 43-65).
- Bellizia, A., & Pimentel, N. (1995). Consolidación de Terrenos Continentales Gondwanicos Precámbrico-Paleozoicos en Los Andes de Venezuela. En *Publicación especial N° 10 del Boletín de Geología del Ministerio de Energía y Minas* (págs. 227-255).
- Blasquez, L. (1944). La Clasificación de los Elementos Topográficos. En *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo XI-7.
- Caires, J., & Jaimes, G. (2008). *Actualización de la cartografía geológica de la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Canache, M., Pilloud, A., Trustkowski, J., & Gamarra, S. (1994). Revisión estratigráfica de la sección cretácica del río Maraca, Serranía de Perijá,

- Venezuela. En *V Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera de las Cuencas Subandinas*, Sociedad Venezolana de Geólogos. (págs. 240-241). Caracas.
- Canada Centre for Remote Sensing. (2007). *Fundamentals of Remote Sensing*. Recuperado el 17 de Agosto de 2009, de Natural Resources Canada: [http://ccrs.nrcan.gc.ca/index\\_e.php](http://ccrs.nrcan.gc.ca/index_e.php)
- Creole Petroleum Corporation. (1964). Paleozoic rocks of Mérida Andes, Venezuela. En *AAPG Bulletin*, 48 (1) (págs. 70-84). Tulsa, Estados Unidos: American Association of Petroleum Geologists.
- ENVI. (2008). *ENVI 4.5 Help*.
- ERDAS. (2001). *ERDAS Tour Guide*. Estados Unidos de América.
- Erlich, R., Palmer-Koleman, S., & Lorente, M. (2000). Geochemical characterization of oceanographic and climatic changes recorded in upper Albian to lower Maastrichtian strata, western Venezuela. En *SEPM Research Conference: Paleogeography and Hydrocarbon Potential of The La Luna Formation and Related Cretaceous Anoxic Systems*. SEPM.
- Fernández, I., & Herrero, E. (5 de Marzo de 2001). *El Satelite Landsat. Analisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satelite Landsat*. Recuperado el 27 de Agosto de 2009, de <http://www.caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf>
- Fierro, I., & Paredes, J. (1987). *Estratigrafía regional del Paleoceno, Oligoceno, Mioceno, Plioceno y Cuaternario de los estados Táchira, Apure y Barinas*. Informe Inédito de Servigeomin para Corpoven.
- Gherzi, J., & Guillón, D. (2008). *Actualización Geológica a través de Imágenes Satelitales (Landsat 7 ETM) de la Zona Centro-Occidental de La Sierra de Perijá entre las siguientes coordenadas: Longitud (72°30'-73°00') y Latitud (10°00'-10°20')*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- González de Juana, C., Iturralde de Arozena, J., & Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Caracas, Venezuela: Foninves.
- Gosh, S. (1984). Late Cretaceous condensed sequence Venezuelan Andes. En *GSA Memoir* (págs. 317-323).
- Hernandez, K. C., & Pérez, I. (2008). *Caracterización química y bioestratigráfica del límite Cenomaniense-Turonense de la Formación La Luna, Quebrada La Ortiza, estado Táchira*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

- Heybroek, F. (1953). *Geological report on the mountain range west of Block "B" (Eastern rim of the Cordillera Oriental, Táchira-Apure, western Venezuela)*. Informe Inédito. Shell/Corpoven.
- Landsat 7 history*. (s.f.). Recuperado el 27 de Septiembre de 2009, de NASA: [http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat7.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php)
- Léxico Estratigráfico de Venezuela, versión electrónica*. (1999). Obtenido de PDVSA: <http://www.pdvsa.com/lexico/>
- Lillesand, T. (2000). *Remote sensing and image interpretation*. New York: John Wiley and Sons.
- Lora, E. (2005). *Sistemas de información geográfica. Aplicación en hidráulica de ríos y costas*. Recuperado el 27 de Agosto de 2009, de Universidad del Norte, Laboratorios de ensayos hidráulicos de las flores: <http://www.uninorte.edu.co/extensiones/IDS/Ponencias/memorias%207%20de%20octubre/8%20presentacion%20SIG%2020%20anos%20del%20IDEHA.pdf>
- Meier, B., Schwander, M., & Laubscher, H. (1987). The tectonics of Tachira; a sample of North Andean tectonics. En J.-P. Schaer, & J. Rodgers, *The anatomy of mountain ranges* (págs. 229-237). Estados Unidos.
- Méndez, W., & De Ponte, L. (2008). *Actualización geológica de la zona sur de la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat 7 ETM (hojas topográficas 5544-5644)*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Mora, J. (1980). *Geología del área de Rubio: zona este Estado Táchira*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Moreno, J. (1980). *Estudio geológico de una región al noreste de la población de Rubio Edo. Táchira*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Noyola, M. C., Hinojosa, A., & Martín, A. (2005). Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22 (2), 229-245.
- Parnaud, F., Gou, Y., Pascual, J.-C., Capello, M. A., Truskowski, I., & Passalacqua, H. (1995). Stratigraphic Synthesis of Western Venezuela. En A. Tankard, R. Suárez, & H. Welsink, *Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62* (págs. 681-698). Tulsa : American Association of Petroleum Geologists.

- Paruelo, J. (Mayo de 2007). *Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas vinculadas a la Agricultura*. Recuperado el 2009 de Agosto de 15, de Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires: [http://www.ifeva.edu.ar/~paruelo/SIG/Cap\\_PBPR.pdf](http://www.ifeva.edu.ar/~paruelo/SIG/Cap_PBPR.pdf)
- Pastrana, S. (s.f.). *Geomorfología*. Recuperado el 02 de Octubre de 2009, de <http://club.telepolis.com/geografo/geomorfologia/geomorfologia.htm>
- Perez, K., Soriano, R., & Valenzuela, A. (2008). *Actualización de la geología a escala 1:100.000 de un sector de La Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat 7 ETM (coordenadas 72°00' a 73°00' long. oeste y 10°40' a 11°00' lat. norte)*. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Ramirez, C., & Campos, V. (1972). Geología de la región de La Grita-San Cristóbal, Estado Táchira. En *Congreso Geológico Venezolano, 4th, Memoria, Vol. 2 ; Boletín de Geología Publicación Especial vol. 5* (págs. 861-897 ). Caracas.
- Renz, O. (1959). Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental. , Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform., 3(7): 209. En *Bol. Geol., Caracas, 5(10): Resumen (1960) en: Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform., 3(7): 209.* (págs. 3-48). Caracas.
- Schubert, C. (1967). *Geology of the Barinitas-Santo Domingo Region, Southeastern Venezuelan Andes*. Tesis Doctoral. The Rice University. Texas.
- Schubert, C., Sifontes, R., Padrón, V., Vélez, J., Loaiza, J., & Loaiza, P. (1979). Formación La Quinta (Jurásico), andes merideños: geología de la sección tipo. En *Acta Cient. Venez.*, 30 (págs. 42-55).
- Shagam, R. (1972). Evolución tectónica de los Andes venezolanos. En *Congreso Geológico Venezolano, 4th Memoria* (Vol. 2, págs. 1201-1261). Caracas, Venezuela.
- Short, N. (23 de Septiembre de 2009). *Dr. Nicholas Short's Remote Sensing Tutorial*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2009, de <http://rst.gsfc.nasa.gov/>
- Singer, A., & Beltran, C. (1996). Active Faulting in the Southern Venezuelan Andes and Colombian Borderland. En *Third ISAG* (págs. 243-246). St Malo, Francia.
- Sutton, A. (1946). Geology of Maracaibo Basin, Venezuela. En *AAPG Bulletin, 30 (10)* (págs. 1621-1741). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.
- Tortajada, J. (1997). Uso de la teledetección en la enseñanza de Tierra, La Luna y Marte (empleo de técnicas especiales en situaciones de prácticas ). En *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (págs. 54-59).

- Trump, G., & Salvador, A. (1964). *Guidebook to the geology of western Táchira*. . Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.
- Useche, A., & Fierro, I. (1972). Geología de la región de Pregonero, Estados Táchira y Mérida. En *Congreso Geológico Venezolano, 4th, Memoria, Vol. 2 ; Boletín de Geología Publicación Especial vol. 5* (págs. 963-998). Caracas.
- Vivancos, J., Llastarri, A., Grau, M., & Vivancos, D. (2005). *La Tierra a vista de satélite*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2009, de Introducción a la Teledetección: <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/>

**ANEXOS**

---

---

Anexo 1

Columna estratigráfica generalizada, San Cristóbal, estado Táchira

---

---

Anexo 2

Mapa Geológico de San Cristóbal, escala 1:50.000