

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE SUPERFICIE MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS Y SU APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE POSIBLES ANOMALÍAS DE URANIO EN LA ZONA NOROESTE DEL ESTADO AMAZONAS ”

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo.
Por los Brs. Martínez Olivares, Luis Eduardo.
Belisario Varela, Eduardo Antonio.

Caracas, mayo 2009.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE SUPERFICIE MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS Y SU APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE POSIBLES ANOMALÍAS DE URANIO EN LA ZONA NOROESTE DEL ESTADO AMAZONAS ”

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Paúl Romero

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo.
Por los Brs. Martínez Olivares, Luis Eduardo.
Belisario Varela, Eduardo Antonio.

Caracas, mayo 2009.

Caracas, 11 de mayo 2009.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Luis E. Martínez O. y Eduardo A. Belisario V. titulado:

**“ INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE SUPERFICIE
MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS Y SU APLICACIÓN
EN LA DETECCIÓN DE POSIBLES ANOMALÍAS DE URANIO EN
LA ZONA NOROESTE DEL ESTADO AMAZONAS ”**

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

Prof. Ricardo Alezones

Jurado

Prof. Orlando Cabrera

Jurado

Prof. Mauricio Hernandez

Cotutor académico

Belisario V, Eduardo A. y Martínez O, Luis E.

**INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE SUPERFICIE MEDIANTE EL
USO DE SENSORES REMOTOS Y SU APLICACIÓN EN LA
DETECCIÓN DE POSIBLES ANOMALIAS DE URANIO EN LA
ZONA NOROESTE DEL ESTADO AMAZONAS**

Tutor Académico: Prof. Paul Romero.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Geología, Minas y Geofísica. Año 2009, 128p.**

Palabras Claves: Imágenes satelitales, Escudo de Guayana, suelos,
Erosión, unidades geológicas, uranio.

Resumen. Los sistemas de teledetección, y especialmente las imágenes satelitales, se han convertido en herramientas tecnológicas al servicio del área de las geociencias, siendo utilizadas a lo largo de los últimos años por su capacidad de alcance y resolución espectral, ya que facilitan la observación, de manera global, del área fotografiada. El presente trabajo plantea la introducción de las técnicas de procesamiento de imágenes de satélites como herramienta base para la elaboración y actualización de un mapa geológico; así como también, para detectar mediante el uso de firmas espectrales, posibles anomalías de uranio en superficie o sedimentos cuaternarios en la zona noroeste del estado Amazonas; específicamente, en la región ubicada entre Isla Ratón y el Rio Cuao.

La metodología utilizada consistió en el procesamiento y calibración de la imagen satelital Landsat 7 ETM+ utilizada, con la finalidad de generar un mapa geológico que permita resaltar los rasgos topográficos, litológicos y estructurales de la zona estudiada. Se logró concluir, que el área de interés está conformada por una topografía mixta, entre zonas bajas y zonas amesetadas; litológicamente corresponde en su mayoría a rocas precámbricas, específicamente del Granito de Parguaza, en contacto discordante con rocas sedimentarias de la provincia geológica de Roraima. También se puede apreciar en una gran extensión, sedimentos aluviales provenientes de la meteorización de las rocas graníticas y/o de las altiplanicies por efecto de la erosión y la gravedad.

Se determinó, que mediante el uso de firmas espectrales de minerales asociados al uranio aplicadas en el procesamiento de la imagen Landsat 7 ETM, no se puede detectar acumulación uranífera importante o anomalía de uranio en la zona noroeste del estado Amazonas.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|---------------|
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTOS | v |
| RESUMEN | vii |
| INDICE GENERAL | viii |
| INDICE DE FIGURAS | xi |
| INDICE DE TABLAS | xvi |
| CAPITULO I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1.- Planteamiento del Problema..... | 2 |
| 1.2.- Justificación del problema..... | 3 |
| 1.3.- Objetivos..... | 4 |
| 1.3.1.- Objetivo General..... | 4 |
| 1.3.2.- Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.4.- Localización de la zona en estudio | 6 |
| CAPITULO II. ANTECEDENTES | 7 |
| CAPITULO III. GEOGRAFÍA FÍSICA | 12 |
| 3.1.- Morfología de la zona..... | 13 |
| 3.2.- Clima..... | 14 |
| 3.3.- Vegetación..... | 14 |
| 3.4.- Drenaje..... | 17 |
| 3.5.- Suelos..... | 18 |
| CAPITULO IV. MARCO TEORICO | 22 |
| 4.1.- Espectro Electromagnético..... | 23 |
| 4.2.- Teledetección y Sensores remotos..... | 26 |
| 4.2.1.- Sistema de teledetección espacial..... | 27 |
| 4.2.2.- Tipos de Sensores..... | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3.- Resolución de los Sensores..... | 30 |
| 4.3.- Firma Espectral..... | 33 |
| 4.3.1 Respuesta de la vegetación..... | 35 |
| 4.3.2 Respuesta del suelo..... | 36 |
| 4.3.3 Respuesta del agua..... | 36 |
| 4.4.- El Uranio..... | 37 |
| 4.4.1.- Geología de los depósitos de Uranio..... | 38 |
| 4.4.2.- Uranio en el Estado Amazonas..... | 39 |
| CAPITULO V. GEOLOGÍA REGIONAL..... | 42 |
| 5.1.- Geología Regional..... | 43 |
| 5.1.1.- Provincia de Imataca..... | 44 |
| 5.1.2.- Provincia de Pastora..... | 45 |
| 5.1.3.- Provincia de Cuchivero..... | 46 |
| 5.1.4.- Provincia de Roraima..... | 50 |
| 5.2.- Evolución Geotectónica Regional..... | 54 |
| 5.3.- Provincias Petrotectónicas de Amazonas..... | 61 |
| 5.4- Geología Noroccidental del Estado Amazonas..... | 63 |
| 5.4.1.- Geología Estructural..... | 66 |
| CAPITULO VI. MARCO METODOLÓGICO..... | 68 |
| 6.1.- Metodología Aplicada | 69 |
| 6.1.1.- Etapa de recopilación bibliográfica..... | 69 |
| 6.1.2.- Etapa de Laboratorio..... | 70 |
| 6.2.- Procesamiento de Imagen LANDSAT 7 ETM+..... | 73 |
| 6.2.1.- Corrección de Radiancia..... | 74 |
| 6.2.2.- Fusión de Bandas..... | 74 |
| 6.2.3.- Conversión a Formato BIL..... | 74 |

| | |
|---|------------|
| 6.2.4.- Corrección Atmosférica (FLAASH)..... | 74 |
| 6.2.5.- Corrección Fracción Mínima de Ruido (MNF)..... | 75 |
| 6.2.6.- Índice de Pureza de Píxel (PPI)..... | 75 |
| 6.2.7.- Spectral Angle Mapper (SAM)..... | 75 |
| 6.2.8.- Clasificación No Supervisada..... | 75 |
| 6.2.9.- Clasificación Supervisada..... | 76 |
| 6.2.10.- Modelo Digital de Elevación..... | 78 |
| 6.2.11.- Aplicación de Firmas Espectrales para Detección de Uranio..... | 78 |
| 6.2.12.- Elaboración del Mapa Geológico..... | 79 |
| CAPITULO VII. RESULTADOS..... | 80 |
| 7.1.- Rasgos Topográficos..... | 81 |
| 7.2.- Rasgos Hidrográficos..... | 89 |
| 7.3.- Rasgos de Vegetación y Suelos..... | 91 |
| 7.3.1 - Vegetación..... | 91 |
| 7.3.2- Suelos..... | 93 |
| 7.4.- Rasgos Litológicos..... | 94 |
| 7.5.- Rasgos Estructurales..... | 99 |
| 7.6.- Detección y Clasificación de posibles anomalías uraníferas..... | 102 |
| CAPITULO VIII. EVOLUCION MORFOLÓGICA..... | 106 |
| CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 118 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 125 |
| APÉNDICE..... | 129 |
| ANEXOS..... | 130 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1-1. Tabla de rangos de longitud, frecuencias y energías de los distintos campos del Espectro electromagnético..... | 27 |
| Tabla 1-2. Tabla de bandas espectrales de algunos satélites y sensores..... | 31 |
| Tabla 1-3. Ejemplos de resoluciones aplicadas a actividades específicas según Chuvieco 2006..... | 33 |
| Tabla 1-4. Tabla de unidades del precámbrico en el sur de Venezuela, Donde se muestra de forma resumida sus características tales como, litología, intrusiones, edad y contactos..... | 54 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1-1.- Ubicación de zona de estudio..... | 6 |
| Figura 1-2.- Ubicación de zona de estudio (Imagen Google Earth)..... | 6 |
| Figura 2-1.- Mapa de unidades de vegetación del estado Amazonas..... | 15 |
| Figura 2-2.- Mapa regiones hidrográficas del estado Amazonas..... | 17 |
| Figura 2-3.- Mapa órdenes de suelos, Municipio Atures, estado Amazonas..... | 19 |
| Figura 4-1.- Parámetros que constituyen una onda | 24 |
| Figura 4-2.- Espectro Electromagnético..... | 26 |
| Figura 4-3.- Elementos constitutivos del sistema de teledetección espacial..... | 28 |
| Figura 4-4.- Clasificación de sensores más utilizados en los sistemas de Teledetección..... | 29 |
| Figura 4-5.- Resoluciones espaciales de una imagen tomada de distintos Sensores..... | 30 |
| Figura 4-6.- Resolución radiométrica a distintos niveles digitales..... | 32 |
| Figura 4-7.- Firma espectral para distintos tipos de cubierta..... | 34 |
| Figura 4-8.- Respuesta espectral de la vegetación..... | 35 |
| Figura 4-9.- Respuesta espectral de la vegetación sana..... | 36 |
| Figura 4-10.- Mapa de las interpretaciones radiométrica y magnética de la región noroccidental del Estado Amazonas..... | 41 |
| Figura 5-1.- Ubicación de las Provincias Geológicas del Escudo de Guyana..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 5-2.- Reconstrucción esquemática del supercontinente Atlántica..... | 55 |
| Figura 5-3.- Supercontinente Gondwana y Orogénesis Brasileño Pan Africano..... | 58 |
| Figura 5-4.- Separación del Supercontinente Pangea, dando origen al Atlántico | 59 |
| Figura 5-5.- Unidades Tectonoestratigráficas del escudo de Guayana..... | 60 |
| Figura 5-6.- Mapa Geológico Esquemático del Estado Amazonas..... | 61 |
| Figura 5-7.- Distribución del grupo Roraima en el escudo de Guyana..... | 64 |
| Figura 5-8.- Secuencia estratigráfica tentativa del grupo Roraima en el Territorio Federal Amazonas | 66 |
| Figura 6-1.- Imagen satelital original e Imagen Atmosféricamente corregida..... | 71 |
| Figura 6-2.- Imagen satelital original e Imagen Geográficamente corregida..... | 72 |
| Figura 6-3.- Imagen resultado de la clasificación no supervisada..... | 76 |
| Figura 6-4.- Imagen Landsat, muestra la ubicación de tres clases distintas seleccionadas en píxeles de igual tonalidad..... | 77 |
| Figura 6-5.- Imagen final de la clasificación supervisada generada a partir de las clases y colores asignados, apoyado en mapas preexistentes..... | 77 |
| Figura 6-6.- Modelo digital 3D de la zona de estudio con la imagen Landsat 7 de la corrección atmosférica en FLAASH..... | 78 |
| Figura 6-7.- Firma espectral de la Uralita, observada en el Spectral Library..... | 79 |
| Figura 7-1.- Imagen 3D de la zona de estudio, en donde se observa la variación entre las zonas altas y bajas..... | 82 |
| Figura 7-2.- Bloque esquemático que muestra las alturas y formas que presenta la zona de planicies..... | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 7-3.- Imagen landsat 7 en combinación RGB121, donde se puede apreciar la distribución de las irregularidades topográficas en la unidad de planicie..... | 83 |
| Figura 7-4.- Imagen landsat 7 como resultado de la clasificación supervisada, donde se puede apreciar la distribución de mantos arenosos formando parte de la Unidad Planicies | 84 |
| Figura 7-5.- Bloque esquemático que muestra las alturas y formas que presenta la zona de meseta..... | 85 |
| Figura 7-6.- Imagen tomada y modificada de Google Earth 2009, donde puede observarse en la Unidad de Meseta los valles encajados producto de la acción erosiva de los drenajes presentes..... | 86 |
| Figura 7-7.- Imagen landsat 7 en combinación RGB221, donde se puede apreciar la distribución espacial de las elevaciones topográficas que representan la Unidad de Meseta..... | 86 |
| Figura 7-8.- Mapa topográfico de la zona en estudio Escala 1:100.000..... | 87 |
| Figura 7-9.- Zona de estudio en 3 dimensiones. Localización de las líneas de cortes topográficos realizados, mostrando las relaciones entre las unidades geomorficas..... | 88 |
| Figura 7-10. Secciones topográficas realizadas, secciones A-B y B-C..... | 88 |
| Figura 7-11. Mapa hidrográfico del área de estudio, escala 1:100.000..... | 89 |
| Figura 7-12. Imagen satelital en combinación RGB113, donde puede observarse en la Unidad de Meseta el comportamiento adaptado del drenaje a la dirección de las fracturas..... | 90 |
| Figura 7-13. Distribución de los tipos de vegetación interpretados a partir de la imagen satelital resultado de la clasificación supervisada generada a partir de clases y colores asignados..... | 92 |
| Figura 7-14. Imagen satelital resultado de la clasificación supervisada generada a partir de clases y colores asignados, donde se resalta la ubicación y extensión de los distintos Bosques ribereños o de galería..... | 93 |

Pág.

| | |
|---|-----|
| Figura 7-15. Imagen resultado de la clasificación no supervisada, donde se puede apreciar en el extremo inferior derecho características espectrales similares, que corresponden a sectores compuestos por partículas del mismo tamaño de grano y que conforman la Unidad de Meseta | 95 |
| Figura 7-16. Esquema que muestra la relación existente entre los bosques macrotérmicos y Submontanos con el Granito de Parguaza y Roraima | 98 |
| Figura 7-17. Imagen satelital resultado de la clasificación supervisada generada a partir de clases y colores seleccionados en distintas combinaciones, en la cual se puede definir el área que cubre estos sedimentos aluviales..... | 99 |
| Figura 7-18. Observación de las estructuras interpretadas a partir de la imagen satelital en combinación RGB113; en donde se observa las fracturas en la Unidad de Meseta y en la Unidad de Planicies | 100 |
| Figura 7-19. Resultado de la aplicación de la firma espectral de la Uralita, mediante el software ENVI | 103 |
| Figura 7-20. Resultado de la aplicación de la firma espectral de la Uvarovita, mediante el software ENVI..... | 103 |
| Figura 7-21. Resultado de la aplicación de la firma espectral de la Uvarovita, mediante el software ENVI..... | 104 |
| Figura 8-1. Imagen tomada y modificada de Google Earth 2009, donde puede observarse las formas de Inselbergs en la Unidad de Planicies | 108 |
| Figura 8-2. Imagen tomada y modificada de Google Earth 2009, donde puede observarse las formas de Inselbergs en la Unidad de Planicies | 108 |
| Figura 8-3. Mapa hipsométrico del área noroccidental del Estado Amazonas (Norte)..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8-4. Mapa hipsométrico del área noroccidental del Estado Amazonas (Sur)..... | 110 |
| Figura 8-5. Mapa hipsométrico de la zona en estudio, específicamente en el Macizo del Cuao, donde pueden observarse la variación de colores, representando las alturas entre 200 - 1800 m..... | 111 |
| Figura 8-6. Mapa topográfico de la zona en estudio, específicamente en el Macizo del Cuao..... | 112 |
| Figura 8-7. Corte topográfico realizado en la zona de estudio, donde se puede apreciar la diferencia de cota entre la primera y última superficie de erosión..... | 112 |
| Figura 8-8 y Figura 8-9. Modelo esquemático de la evolución topográfica de la zona de estudio..... | 114 |

A nuestros padres...

Luis y Eduardo

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la virgen, por ser la fuerza y la constancia para alcanzar los sueños.

A mis padres, por ser mis ejemplos a seguir, por darme toda su confianza y apoyo. A mi mama por ser mi todo, porque sin ella, no hubiera podido lograr este sueño, por ser mi guía, mi bastón, mis ganas de seguir luchando y de ser cada día una mejor persona y mejor hijo GRACIAS!!. A mi papa, por ser un gran padre, por ser mi admiración, mi ejemplo de constancia, de responsabilidad, de sacrificio y de trabajo. GRACIAS!!, por tu confianza y por creer siempre en mí, en que podía lograr esta meta.

A mis abuelos, María, Yolanda y Tino, por su cariño y sus oraciones, GRACIAS!!!

A mis hermanos, Daniel y Maireth, por estar siempre ahí cuando los necesite, por enseñarme tanto, por ser mis alegrías en todo momento, GRACIAS!!. Son únicos.

A Yeilis, por ser mi amiga, mi compañera, mi novia, mi confidente, mi mano derecha, mi apoyo, esa voz de aliento y de fuerza en los momentos más difíciles, mi complemento, por no dejarme nunca solo en cada paso que doy, GRACIAS!! Eres parte de mis sueños.

A mi tíos, (Ana, Yaya, Tino(+), Negro, Maigua, Héctor, Wilfredo, Otilio, Orangel, Francis, Edgar, Vilma) por tanto cariño y amor, por ser tan unidos, por enseñarme que todo lo que uno quiere en la vida, se puede alcanzar, por su protección, por su entrega, por estar siempre ahí, al lado de mis padres, por ser tan tíos GRACIAS!!.. Son un ejemplo.

A mi tutor, profesor Paul Romero GRACIAS!!, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto a su lado y de aprender de sus conocimientos.

Al Ingeniero Mauricio Hernández, por su incondicional ayuda, su confianza y valiosa amistad, muchas GRACIAS!!.

A mis amigos, compañeros y hermanos, (Gerardo, Darwin, Rafi, Rubén, Orlando, David, Rafael José, Leo, Cleibert, Luis Alejandro, Romar, Belisario, Paul) por estar siempre conmigo, por compartir tantos momentos juntos, momentos buenos y momentos malos, por la fiel demostración del verdadero valor de la amistad GRACIAS!!.

A la universidad, a todas esas personas que creyeron en mi y colaboraron conmigo en determinado momento como la Familia Canónico Silva, muy especialmente a la Sra. Gladys Silva, la Familia Ochoa Peña, Familia Pabón Manzano, Mónica, Mariangela, Yuli, Andres, Mirka y muchos otros, GRACIAS!! por todo su apoyo y por los momentos inolvidables que me hicieron pasar.

Luis Eduardo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi madre Cristina Varela, mi padre Euclides Belisario y a mi hermano Euclides Belisario (Goyo), por todo el apoyo, cariño y en especial por tener paciencia a lo largo de toda mi carrera como estudiante y ahora en la realización de este trabajo especial de grado, por ser un apoyo incondicional en todo momento

A mi familia, mis tías y tíos, primos y primas que siempre estuvieron dándome apoyo y a todos aquellos que se preocuparon por mí de forma sincera.

A Ana María , por ser mi esposa, mi novia, mi compañera, mi confidente, mi apoyo, mi todo a lo largo de esta carrera, esa voz de aliento y de fuerza en los momentos que decaía para volver a levantarme, por ser mis días y mis noches, por no dejarme nunca solo en cada paso que di y seguiré dando, GRACIAS!!

A mi compañero de tesis Luis Martínez por haberme dado un voto de confianza al momento de elegirme como compañero de tesis, ser un excelente amigo y darme apoyo en los momentos malos y buenos

Al profesor Paul Romero de quien recibí gran ayuda apoyo y motivación, y quien fue una guía al momento de realizar esta tesis.

A la universidad Central de Venezuela por ser la institución que abrió sus brazos para acogerme en su seno de discusión y conocimiento para convertirme en una persona con capacidad de luchar por este país y formarme académicamente. Así que siempre seré un UUUcevista

A mis amigos, (Erick Tovar, Johely Zurita) por estar siempre conmigo, por compartir tantos momentos juntos, momentos buenos y momentos malos, por esos consejos, por ese apoyo, por la fiel demostración del verdadero valor de la amistad GRACIAS!!.

Por último agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera hicieron posible la realización de esta tesis, a todos ellos GRACIAS!!

Eduardo.

Capítulo I
INTRODUCCIÓN

- Planteamiento del Problema
 - Justificación del Problema
 - Objetivos
- Localización de la Zona de Estudio

1.1.- Planteamiento del Problema:

El Estado Amazonas se encuentra ubicado en la zona sur de Venezuela y es parte del gran Escudo de Guayana. Debido a su gran extensión y difícil acceso a la mayoría de las regiones que lo conforman, no ha sido estudiado a profundidad en comparación con otras regiones del país, por tal motivo existe poca información bibliográfica y carece de una amplia cartografía geológica.

El área contemplada para el desarrollo de este proyecto, desde hace algunos años y hasta la actualidad, se considera de muy difícil acceso, debido principalmente a las características naturales propias de la región, el clima y la vegetación selvática, aunado a la condición de región fronteriza con la nación de Colombia, clasificada por el gobierno nacional como zona de seguridad y defensa; lo cual junto a la falta de vías de comunicación y de transporte, obstaculizan mucho más el normal desarrollo del levantamiento geológico del área.

La escasa atención que ha tenido el cuaternario en el Escudo de Guayana y la carencia de información geológica disponible, genera la necesidad de buscar nuevas herramientas que ayuden a cubrir esta problemática, por esta razón se recurre al uso de alta tecnología para calibrar, procesar e interpretar información proveniente de distintas fuentes. En los últimos años el avance de las ciencias de la tierra ha requerido la actualización de información geológica, en base a nuevas técnicas, teniendo como herramienta primordial las imágenes satelitales, las cuales van a permitir interpretar elementos geomorfológicos y estructurales, que aporten nuevos datos que propicien modelos geológicos teóricos en determinadas regiones.

En este sentido, el uso de sensores de percepción remota, se convierte en el pilar fundamental para generar y cartografiar información geológica actualizada del escudo de Guayana.

1.2.- Justificación del Proyecto:

Atendiendo a la necesidad de actualizar información geológica del estado Amazonas, e integrar esta información con estudios geológicos anteriores, así como también, de aportar nuevas ideas para el desarrollo de futuras investigaciones, resulta pertinente la utilización de sensores de percepción remota, en este caso mediante imágenes satelitales (Landsat 7 ETM+), las cuales por su tradición en el levantamiento de información, cobertura y resolución espectral, representa una herramienta valiosa para la realización de estudios geológicos.

Mediante distintos procesos aplicados a la imagen satelital, se pueden resaltar características topográficas, hidrográficas, estructurales y litológicas a distancia, sin ser necesario el traslado hasta el área de interés, logrando así una cartografía de alta tecnología, acertada y rápida, lo más importante, que esta técnica permite realizar una primera interpretación geológica de la zona sin mayor gasto que el análisis de las imágenes, haciendo más económico el estudio y la actualización geológica en zonas de difícil acceso.

La abundante presencia de cuerpos pegmatíticos asociados a rocas graníticas y la ocurrencia de vetas de origen hidrotermal, hacen pensar que en Venezuela, en especial en los estados Bolívar y Amazonas, existen condiciones favorables para la ocurrencia de mineralizaciones de Uranio de importancia económica. Por esta razón y mediante el uso de sensores remotos se cree poder detectar la radiación de este mineral o de sus asociados, y establecer así la capacidad de estos sensores para la detección de minerales, mediante firmas espectrales.

1.3.- Objetivos del Proyecto:

1.3.1.- General:

Generar un mapa geológico a escala 1:100.000 mediante la aplicación de técnicas de procesamiento e interpretación de imágenes satelitales (Landsat 7 ETM+); y aplicar esta herramienta para detectar la posible existencia de anomalías de uranio en el área localizada al noroeste del estado Amazonas.

1.3.2.- Específicos:

- Determinar unidades espectrales a través de las distintas combinaciones y cocientes de bandas de las imágenes Landsat 7 ETM+.

- Detectar lineaciones y estructuras mediante la interpretación de las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+.

- Determinar mediante firmas espectrales la posibilidad de clasificar zonas con posible contenido de anomalías de uranio.

- Realizar un Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio.

- Verificar los datos obtenidos en el proceso de interpretación de las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ con respecto a la recopilación bibliográfica.

- Generar un mapa geológico a escala 1:100.000 con las respuestas espectrales obtenidas, y correlacionarlas con los mapas geológicos existentes de la zona de estudio mediante la aplicación del software **ArcGis** y **Erdas**.
- Realizar la interpretación geológico-estructural de la zona de estudio, (rasgos topográficos, hidrográficos, estructurales y litológicos).

1.4.- Localización de la Zona de Estudio:

La zona de estudio está ubicada entre el municipio Autónomo Autana y municipio Autónomo de Atures, al noroeste del estado Amazonas, específicamente entre las coordenadas, Latitud ($5^{\circ} 00' 00''$ - $5^{\circ} 20' 00''$) N y Longitud ($67^{\circ} 20' 00''$ - $67^{\circ} 50' 00''$) O abarcando un área aproximada de 2.400 km², entre las cartas Isla Ratón (Hoja 6631) y Río Cuaó (Hoja 6731), formando parte del extenso escudo de Guayana. (Ver figura 1-1 y 1-2).

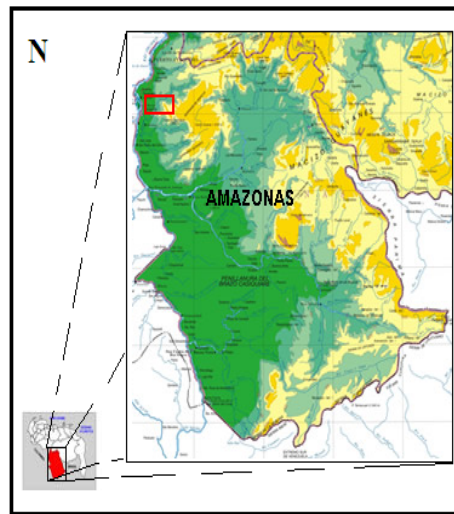


Figura 1-1. Área de estudio (polígono rojo), tomado y modificado del mapa físico de Venezuela. Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), Esc. Original 1: 250.000

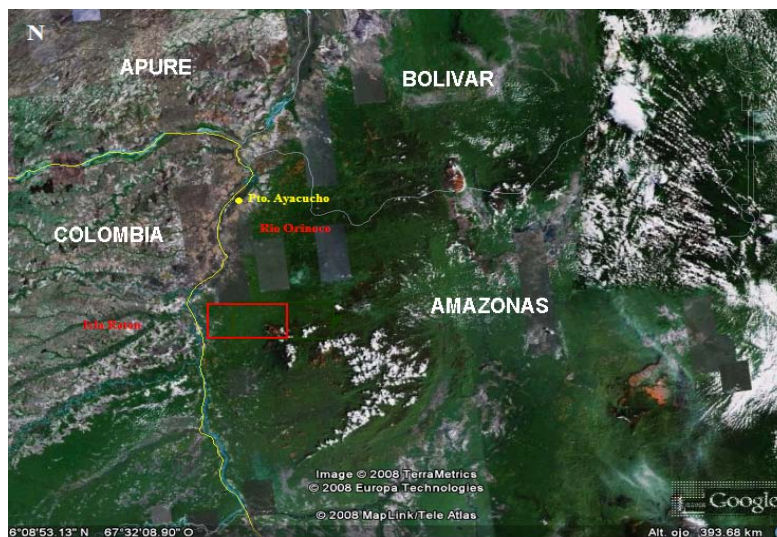


Figura 1-2. Área de estudio (polígono rojo), imagen satelital vista a 393,68 Km, adaptado de Google Earth 2008.

Capítulo II
ANTECEDENTES

De forma cronológica se presenta una visión general de los estudios geológicos regionales más importantes que se han realizado en la zona de estudio.

Brown y Sawkins (1875), Estos autores definen por primera vez la Provincia de Roraima, originalmente la describen como formación de areniscas, sedimentos precámbricos en la región limítrofe de Venezuela, Guayana y Brasil.

Dalton (1912), Es el primer autor que le designa el nombre de Serie de Roraima, a las formación de areniscas propuestas por Brown y Sawkins (1875).

McCandless (1965), McCandless propuso el nombre de Granito de Parguaza para designar un granito de grano muy grueso, masivo con textura rapakivi y rico en feldespato potásico, biotita y horblenda, expuesto desde Puerto Páez hasta Los Pijiguaos. Ubicado en la parte Nor-Oriental del Escudo de Guayana y representa una de las más grandes intrusiones graníticas anorogénicas del mundo.

Ríos (1969), Estudia la geología de la región de Caicara, estado Bolívar y define básicamente la composición del granito, la Formación de Caicara, Granito de Sta. Rosalía, Granito de St. Pedro, Metabasitas, Granito de Guaniamito y Granito de Pijiguaos.

Portillo y Colvee (1971), Realizan estudios de factibilidad de depósitos de Uranio en el estado Amazonas.

Benaim (1972), Realiza un estudio geológico en la región El Dorado – Anacoco – Botanamo, estado Bolívar. Establece para el Super Grupo Cedeño, que su base se desconoce y el tope es discordante por debajo de la Formación Roraima.

Hurley, et al. (1972), Realiza estudios mediante Rb/Sr, y define para el Complejo de Imataca, que la edad más antigua es de 3.000-3.400 m.a, mediante una muestra de granulita ácida asociada a horizontes ferríferos.

Mendoza (1972), Estudia la geología del área del Rio Suapure, en la parte noroccidental del Escudo de Guayana. Introduce el Supergrupo Cedeño para incluir dos conjuntos de rocas ígneas ácidas no comagmáticas; el Grupo Cuchivero y el Grupo Suapure, constituido este último por los granitos de Pijiguaos y El Parguaza. Divide también, con bases petrológicas y tectónicas el escudo de Guayana en cuatro provincias (Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima).

Reid (1973), Mediante un estudio estratigráfico en el área tipo del grupo Roraima, agrupo y dividió este grupo en: Formación Uairén, Formación Cuquenán, Formación Uaimapue y Mataui.

Szczerban, E. (1974), Realiza estudios geológicos y petrológicos en el área de Puerto Ayacucho, Estado Amazonas. Reconoce cuatro niveles de peneplanación y reporta que geomorfológicamente la topografía que soporta el Granito de Parguaza se encuentra en una etapa juvenil.

Moreno y Mendoza, et al. (1975), Estos autores estudian petroquímicamente las rocas graníticas del Alto Supamo, definiendo el complejo Supamo como un conjunto de rocas graníticas, intrusivas, y/o reactivadas, en rocas del Supergrupo Pastora, tales como tonalitas, trondjemitas, granodioritas, cuarzo-monzonitas, gneises y migmatitas.

Blancaneaux (1976), Realizó un estudio pedo-geomorfológico sobre las formaciones graníticas de la región de Puerto Ayacucho, Estado Amazonas.

Gaudette y otros (1977), Estudian la geología y la edad del Granito Rapakivi de Parguaza, estableciendo por Rb – Sr una edad de 1531 +/- 39 m.a.

Mendoza (1977), En el trabajo de la evolución tectónica del escudo de Guayana, presentado en el Segundo Congreso Latinoamericano de Geología, reagrupa cinco provincias o dominios petrotectónicas del estado Amazonas: Ayacucho, Manapiare, Alto Orinoco, Siapa y Casiquiare.

Ghosh (1977), Establece para un estudio del grupo Roraima en el estado Amazonas, una subdivisión de esta secuencia en: Miembro Basal, Miembro Intermedio y Miembro Superior, mediante perfiles de reconocimiento de los tepuis de cerro Sipapo, cerro Autana y cerro Paru, comparando estas secuencias con las de las áreas tipo de la parte este del estado Bolívar.

Klar (1979), En el trabajo titulado Geocronología de el Manteco – Guri y Guasipati en la Guayana venezolana, propone la edad más antigua para el Complejo Supamo de 2300 m.a.

Briceño y Schubert (1990), Proponen seis superficies de erosión en el Escudo de Guayana en el trabajo titulado Geomorfología de la Gran Sabana, Escudo de Guayana y Sureste de Venezuela, en base a que la topografía esta fuertemente controlada por una combinación de factores tectónicos, estructurales, estratigráficos y climáticos.

Carrero (2004), Define en el escudo de Guayana, (región venezolana), mediante la aplicación de sensores remotos, rocas arqueozoicas y proterozoicas de muy diversas litologías, siendo alteradas en mayor o menor escala durante una serie de eventos tectónicos mayores, cuyos periodos orogénicos comprenden edades entre 800 y 3.600 m.a.

IFLA (2004), Realiza un trabajo denominado Plan de Ordenamiento Territorial – Estado Amazonas/Valoraciones Territoriales y Opciones de Desarrollo, en el cual se clasifican para el estado Amazonas distintos tipos de suelos, demarcando su distribución y extensión.

Pasquali y Sifontes (2007), Realizan estudios de exploración de Uranio en Venezuela. Comparan grandes yacimientos uraníferos del mundo, con posibles concentraciones en el Escudo de Guayana, en función a las características geológicas de las regiones, las cuales están asociadas a levantamientos tectónicos de rocas graníticas Pre-Cámbricas en zonas adyacentes a discordancias con rocas sedimentarias.

Capítulo III
GEOGRAFÍA FÍSICA

- Morfología de la Zona
 - Clima
- Vegetación
 - Drenaje
 - Suelos

3.1.- Morfología de la zona:

El estado Amazonas está conformado por una abundante diversidad de formas terrestres de importante contraste, que generan una fisiografía en particular, en este extenso territorio.

La presencia de diferentes tipos de formaciones geológicas, de distinta litología y estructura, sometidas a los efectos de un intenso tectonismo y a la acción de los agentes climáticos, ha impulsado profundos procesos de modelado de la corteza terrestre, resultando un relieve general, caracterizado por grandes contrastes y plasmado en un exuberante paisaje, conformado típicamente por llanuras y penillanuras, que son las formas de tierra predominantes, ocupando una superficie de unos 124.386 Km², lo cual representa el 70% del territorio. En segundo término las áreas montañosas con 43.000 Km² (24%) y los tepuyes con 5.500 Km² (3%); el resto corresponde a las altiplanicies, piedemontes, colinas y valles.

Partiendo de esta visión de relieve, se puede definir en la zona de interés las siguientes unidades morfológicas:

Unidad de Amesetada: Es la zona en posición topográfica más alta y se encuentra ubicada en la parte Sur-Este del área de estudio, abarcando aproximadamente un 30% del área total, con alturas entre 1.200 a 1.600 m, se conforma por relieves tabulares, con bordes abruptos y valles encajados. Se han originado por la intensa erosión diferencial de la corteza terrestre, habiendo adquirido la forma de mesetas de gran altitud denominada altiplanicies o tepuyes, que permanecen en la parte más elevada y erguidas frente a la acción erosiva.

Unidad de Planicies: Es la unidad más extensa abarcando aproximadamente un 80% del área total. Se encuentra en la parte norte, central y occidental de la zona de estudio,

está caracterizada por presentar alturas máximas que apenas alcanzan los 200 m, y comprende dos tipos de relieves predominantes; las llanuras y penillanuras.

3.2.- Clima:

El estado Amazonas está localizado al sur del paralelo de 6°N, y por su latitud ecuatorial el clima se halla sometido a los efectos de la convergencia intertropical, caracterizado por el movimiento de grandes masas de aire cargadas de humedad que ocasionan altas precipitaciones, cuya distribución recibe la influencia de los macizos orográficos que inciden en el patrón general de la circulación atmosférica.

Según IFLA (2004), las dos terceras partes de la entidad se encuentran bajo un régimen de lluvias anuales de entre 2.500 mm y 3.500 mm, considerado como un clima muy húmedo; para las zonas bajas el régimen térmico en el estado Amazonas es bastante uniforme, con temperaturas medias anuales superiores a los 26°C, para las zonas altas se tienen temperaturas muy confortables, en el rango de 21 a 24°C, y aun más bajas (alrededor de 10°C) en las cumbres de altas montañas y tepuyes.

3.3.- Vegetación:

Según IFLA (2004), la mayor diversidad de vegetación existente en el territorio venezolano se encuentra representada en el estado Amazonas, organizada en cuatro provincias fitogeográficas que contienen cuatro biomas y 56 tipos de vegetación, de las cuales las formaciones boscosas ocupan el 93,2% de la superficie de la entidad (Ver figura 3-1).

Las características principales de los tipos de vegetación existentes en el estado Amazonas son los siguientes:

Bioma Arbóreo: ocupa el 93% de la superficie de la entidad y el 30% de superficie boscosa nacional. Está ubicado en el centro-sur del territorio, entre 100 y 500 m sobre el

nivel del mar, se pueden distinguir los Bosques macrotérmicos, ubicados a la sombra orográfica de los vientos y en tierras bajas por debajo de 500 msnm, donde la precipitación varía entre 2.000 y 2.500 mm anuales, con tres meses secos y temperatura media anual mayor a 24°C. Son bosques de 20 a 30 m de alto. Bosques submontanos, se encuentran bordeando el piedemonte y las serranías, y según su posición topográfica, se ubican desde las bases de las montañas a 400 msnm y alcanzan a 800 msnm, en especies de porte alto, entre 50 y 60 m de altura. Bosques montanos y altimontanos, los primeros se hallan ubicados entre 800 y 2.000 msnm, son bosques de mediana altura, siempre verdes y en las cumbres son de porte bajo; los altimontanos ocupan las estribaciones tepuyananas entre 2.000 y 3.000 msnm, son siempre de color verde y de porte bajo. Bosques ribereños, se encuentran en forma de franjas boscosas a lo largo de los ríos y caños, las especies pueden alcanzar los 40 m de alto.

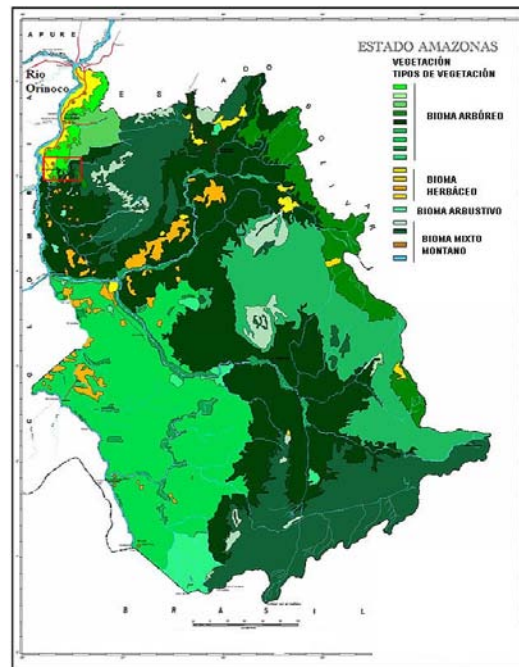


Figura 3-1. Tomado y Modificado del mapa de unidades de vegetación del estado Amazonas, Ministerio del poder popular para el ambiente, Esc. 1: 200.000. Área de estudio (polígono rojo).

Bioma Arbustivo: ocupa una pequeña superficie estimada en 3.827 ha, 2,1% del territorio del estado. Se distinguen 7 tipos diferentes de vegetación de porte bajo con una altura menor de 6 m, diferenciadas según su posición topográfica, características de los suelos y el grado de inundación. Se pueden agrupar en Arbustales macrotérmicos de tierras bajas, que se ubican a menos de 200 msnm, en áreas ribereñas, con suelos de arena blanca e inundables con aguas negras; Arbustales submesotérmicos a submicrotérmicos montanos, localizados entre 500 y 3.000 msnm, a temperaturas entre 8 y 28°C, sobre suelos de turba o sobre afloramientos rocosos.

Bioma Herbáceo (Sabanas y herbazales): ocupa una superficie de unas 8.310 ha, 4,7% del territorio de la entidad federal, agrupadas en distintas categorías. Sabanas arboladas y arbustivas no inundables, conformadas predominantemente por gramíneas, eventualmente acompañadas de pocos arbustos y árboles. Sabanas abiertas inundables, ubicadas en las llanuras inundables, con predominio de gramíneas de porte alto, sumergidas durante una gran parte del año por una lamina de agua de 1 a 2 m. Herbazales no gramíneos macrotérmicos de tierra baja, se encuentran asociados a suelos extremadamente pobres en nutrientes, contienen pocas gramíneas pero presentan gran variedad de hierbas y arbustos diferentes de los del resto de las sabanas venezolanas.

Bioma Mixto Montano: son comunidades vegetales que ocurren sobre los afloramientos rocosos graníticos conocidos localmente como "lajas", en forma de manchas, a veces constituyendo sabanas gramíneas e incluso algunos bosquecillos con árboles de 8 a 10 m de alto. Esta vegetación se encuentra ubicada en las depresiones del terreno y en las grietas, formando un estrato herbáceo de hasta 1 m. También pueden encontrarse sobre las cumbres tepuyanas de arenisca y granito.

A partir de esta clasificación, la zona de estudio, puede estar constituida por dos tipos vegetación: un 90% corresponde a la vegetación tipo Bioma Arbóreo, comprendida por bosques macrotérmicos, bosques submontanos, montanos y altimontanos; y

aproximadamente en un 10% corresponde al tipo de vegetación tipo Bioma Herbáceo, conformado por sabanas arboladas y arbustivas no inundables, sabanas abiertas inundables, herbazales no gramíneos macrotérmicos de tierra baja, herbazales gramíneos submesotérmicos de tierras intermedias, y herbazales no gramíneos mesotérmicos de tierras altas.

3.4.- Drenaje:

La red hidrográfica está conformada por un complejo sistema fluvial integrada por grandes ríos, donde el eje principal es el Orinoco, el cual, desde su nacimiento en la Sierra Parima hasta la confluencia con el Meta, tiene una longitud de 940 Km y drena una cuenca de 125.000 Km², correspondiente a algo más del 62% de la superficie de la entidad. (Ver figura 3-2).

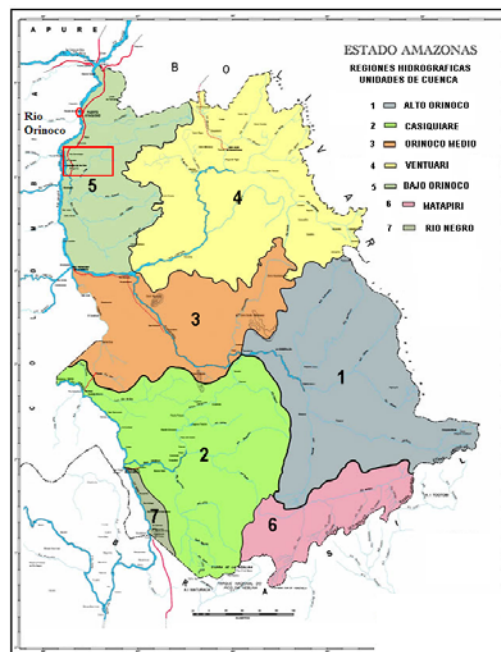


Figura 3-2. Tomado y Modificado del mapa regiones hidrográficas del estado Amazonas, Ministerio del poder popular para el ambiente, Esc. 1: 200.000. Área de estudio (polígono rojo).

El río Orinoco, aguas arriba de la influencia del brazo Casiquiare, recibe el aporte de los ríos Mavaca, Ocamo y Padamo; en el tramo comprendido entre Tama-Tama y San

Fernando de Atabapo le son tributarios los ríos Cunucunuma, Guaname, Caño Yagua, Venturi y Atabapo; en el tramo entre Atabapo y puerto ayacucho, por su margen derecho, desembocan los ríos Sipapo (Autana, Cuao y Guayapo), Samariapo y Cataniapo; por el lado de la frontera colombiana le caen los ríos Guaviare, Vichada, Tomo y Tuparro, cuya contribución se ha estimado en 78.000 millones de m³ por año, lo cual representa el 16,5% de volumen a la altura del río meta.

Las altas precipitaciones representan abundante disponibilidad de agua durante todo el año, y generan un escurrimiento o flujo permanente a través de una densa y extendida red de drenaje que discurre sobre un manto de rocas duras, resistentes a la erosión, cuyas características formaciones geológicas dan origen a numerosos saltos y raudales.

Según IFLA (2004), la calidad fisicoquímica de las aguas, se puede indicar, que poseen un bajísimo contenido de sólidos disueltos (promedio entre 25-35 mg/l) y un alto grado de acidez, definido por valores de pH inferiores a 5.0, en algunos casos menores a 4.0, según se ha detectado en los ríos Cuao, Atabapo y Río Negro, lo cual se atribuye a las altas tasas de descomposición de la materia orgánica que genera la coloración negra característica.

En consecuencia, los drenajes que se encuentran en la zona de estudio, corresponden según las regiones hidrográficas del estado Amazonas, a la región Bajo Orinoco, ubicada al N-O de la región, conformados por los ríos Autana, Guayapo, Samariapo, Sipapo y especialmente el Río Cuao, siendo estos drenajes, tributarios del Río Orinoco, que corresponde al drenaje principal de esta área.

3.5.- Suelos:

Los factores pedogenéticos existentes en Amazonas, caracterizados por altas precipitaciones y temperaturas, actuando sobre un relieve contrastante de granulometría media a gruesa, y sometidas por un largo tiempo a la acción de abundante vegetación, han

dado lugar a la formación de suelos que muestran una elevada alteración. Estos suelos característicos de esta región se pueden clasificar en: (Ver figura 3-3).

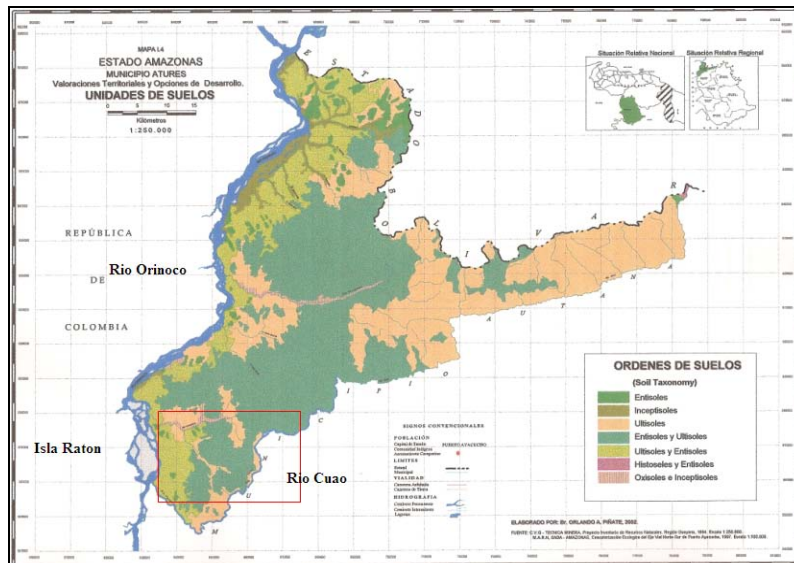


Figura 3-3. Tomado y Modificado del mapa órdenes de suelos, Municipio Atures, estado Amazonas, C.V.G. TECMIN, Esc. 1: 250.000. Zona de estudio (Polígono rojo).

Entisoles: Constituyen el primer orden de suelos de mayor importancia y presencia en la zona de estudio, predominantes en las montañas, altiplanicies, mesetas, piedemontes, y planicies. Litológicamente este tipo de suelo puede ser originado a partir de rocas de la Provincia Geológica de Cuchivero y Roraima, así como también de sedimentos de origen coluvio-aluvionales; presentando texturas livianas y ocasionalmente pesadas que en términos generales no indican un desarrollo en cuanto a su estructura. Se manifiestan como suelos de poca fertilidad natural.

En cuanto al orden de estos suelos presentes en el área, se pueden reportar para los ubicados en los paisajes de planicie, relieves de llanuras y penillanuras muy suelos profundos (>100 cm), mientras que los localizados en la vegas son superficiales o moderadamente profundos (5-40 cm), presentándose en un bioclima macrotérmico de

temperatura anual entre 18 – 24 °C. Se desarrollan a partir de rocas graníticas y areniscas, son de textura arenosa y franco arenosas.

Ultisoles: Los ultisoles constituyen el segundo orden de mayor presencia en el área de estudio. Se encuentran localizados en los paisajes de meseta, lomerío, altiplanicie, peniplanicie y planicie; estos suelos generan procesos de enriquecimiento de bases superficiales, como consecuencia de la descomposición de restos vegetales. Litológicamente al igual que los suelos **Entisoles** se han formado a partir de las rocas pertenecientes a la Provincia Geológica de Cuchivero y Roraima, así como de sedimentos de origen coluvio-aluvial del cuaternario. Pueden ser suelos moderadamente profundos a muy profundos y en ocasiones muy excepcionales pueden llegar a ser superficiales, con texturas livianas a pesadas.

Los ultisoles exhiben una baja a muy baja fertilidad natural y capacidad de intercambio catiónico, sumándose también el buen drenaje presente en el área de montaña y meseta, que disminuye al llegar a las áreas de mayor depresión. Se reporta para este orden de suelos, que son encontrados en paisajes de montaña, meseta, piedemonte y planicie, se presentan con horizontes a de 6-11 cm y 12-40 cm.

Oxisoles: Son suelos caracterizados por presentar texturas bastante pesadas, de baja a muy baja fertilidad natural, característicos de drenajes bajos a algo excesivo y de drenaje pobre hacia las áreas depresionales. Estos suelos ocupan el tercer orden en importancia en el área, se encuentran limitando al paisaje de planicie, caracterizándose por ser altamente evolucionados y de moderadamente profundos (50-100 cm) a muy profundos (>150 cm), como resultado de intensos procesos de intemperización y largos períodos de tiempo, bajo condiciones climáticas caracterizadas por fuertes precipitaciones y altas temperaturas. Litológicamente pueden estar ubicados en la Provincia Geológica de Cuchivero sobre rocas graníticas perteneciente al granito de Parguaza.

Inceptisoles: Son los suelos considerados de cuarto orden en importancia del área de estudio, destacándose por ser de bajo a moderado desarrollo evolutivo, esto se evidencia

mayormente por la presencia de una estructura pedogenética débil. Este tipo de suelo se encuentra ubicado en los paisajes de planicie, caracterizado por ser superficiales (<25 cm) a moderadamente profundos (50-100 cm) y ocasionalmente muy profundo (>150 cm) de texturas livianas a pesadas. Químicamente son suelos de baja fertilidad natural y con buen drenaje, sin embargo, es conveniente aclarar que hacia las áreas depresionales ocurren suelos cuyo drenaje es pobre. Su litología, se puede deducir que se encuentra asentado en material no consolidado del tipo roca aluvial, que se corresponde con depósitos recientes o cuaternarios.

A partir de esta clasificación, la zona de estudio, puede estar constituida primordialmente por dos tipos suelos: suelos Entisoles y suelos Ultisoles los cuales corresponden a un bioclima macrotérmico característico de la zona, y comprenden predominantemente zonas amesetadas, altiplanicies y planicies, tipos de relieves que dominan la morfología del área en estudio.

Capítulo IV
MARCO TEÓRICO

Debido a que este trabajo de investigación plantea el uso de una nueva técnica como herramienta útil para facilitar la interpretación geológica en distintas áreas; se describirán a continuación, ciertos términos que deben ser conocidos para poder entender los pasos a seguir al llevar a cabo el procesamiento de las imágenes satelitales.

Este conjunto de términos se relacionan con las teorías actuales de la energía electromagnética, como fuente principal de información; los sensores y la teledetección, herramientas que permiten obtener las imágenes de la superficie terrestre; los tipos, la resolución y principales problemas que afectan a los sensores, descripción del sensor a ser utilizado en esta investigación, así como correcciones y procesamientos aplicados a las imágenes satelitales.

4.1 Espectro Electromagnético:

La energía electromagnética es el recurso mediante el cual es transmitida la información desde cualquier objeto hasta el sensor, esta se presenta de diversas formas además de la luz visible, como ondas de radio, de microondas, ondas de calor, rayos gamma, rayos X y ultravioleta; describiendo cada uno de ellas una región específica del espectro electromagnético.

Las propiedades que caracterizan esta radiación, han sido explicadas a través de dos teorías (Chuvienco, 1990): La teoría Cuántica y la Teoría Ondulatoria. La primera concibe a la radiación como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero; mientras que la segunda, establece que la energía se propaga siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y contenido entre dos campos de fuerzas ortogonales entre si: eléctrico y magnético.

Según la teoría ondulatoria, la radiación electromagnética esta constituida por cuatro parámetros que definen sus propiedades (Ver figura 4-1):

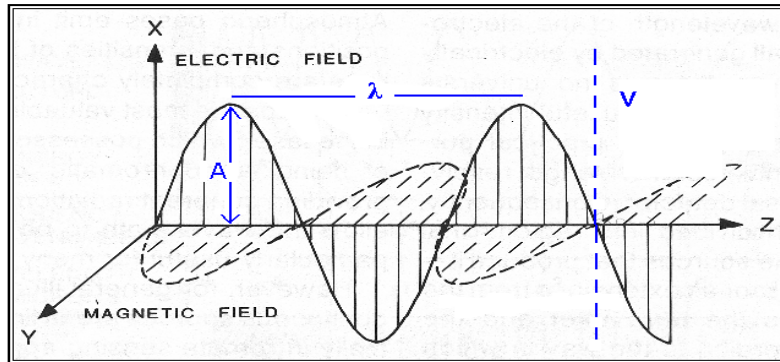


Figura 4-1. Parámetros que constituyen una onda (Tomado y modificado de CHUVIECO, 1990)

- **Amplitud (A):** Puede decirse que es la altura de la onda y se define como la máxima distancia que alcanza un punto al paso de las ondas respecto a su posición de equilibrio (Salazar, 2004).

- **Frecuencia (ν):** Es la medida del número de ondas que pasa por un punto en la unidad de tiempo. Generalmente se mide en hertzios (Hz), siendo un hertzio equivalente a una vibración por segundo. Por ello, también se utiliza el s⁻¹ como unidad para medir la frecuencia. También, se puede definir como la inversa de su período T, que es el tiempo que tarda en avanzar una distancia igual a su longitud de onda (Salazar, 2004).

- **Longitud de onda (λ):** Es la distancia entre dos crestas consecutivas, que debido a la gran variedad de longitudes de onda que existen, suelen usarse múltiplos como el kilómetro (para ondas largas como las de radio y televisión) o submúltiplos como el nanómetro o el Angstrom (para ondas cortas como la radiación visible o los rayos X) (Salazar, 2004).

- **Velocidad (v):** Es la rapidez con que se propaga la onda (Salazar, 2004), se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$C = \lambda * \nu$$

Donde:

C = Velocidad de la onda

λ = Longitud de la onda

ν = Frecuencia

Cuando la radiación electromagnética interactúa con los objetos es modificada de manera que la energía resultante incorpore información que caracterice el objeto y como consecuencia permita indirectamente su análisis.

Según la longitud de onda, una parte de la radiación incidente en el objeto se dispersa en diferentes direcciones, otra es absorbida por la materia, otra es transmitida y otra reflejada. Pero para la percepción remota, es de interés la energía reflejada o **reflectancia**, en el análisis de objetos en la superficie terrestre, y la energía emitida o **emitancia** en el caso de mediciones de temperatura.

Ahora bien, el **espectro electromagnético** propiamente dicho, es la radiación que emite o absorbe una sustancia, para el caso de la emisión se denomina Espectro de emisión y en el caso contrario, caso de la absorción Espectro de absorción. Estos espectros se observan mediante espectroscopios que, además de su función de permitir la observación del espectro, también permiten realizar medidas sobre éste, determinando la longitud de onda o la frecuencia de la radiación. (Carrero F. e Infante J. 2004)

La energía electromagnética puede ser visible al ojo humano, por esta razón y desde el punto de vista de la teledetección cabe destacar una serie de bandas espectrales, las cuales son utilizadas frecuentemente.

Espectro visible entre (0.4 -0.7 μm), única radiación electromagnética percibida por el hombre, coincide con las longitudes de onda donde la radiación solar es máxima y se distinguen tres bandas elementales que son los colores azul (0.4 a 0.5 μm), Verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm). (Ver Figura 4-2).

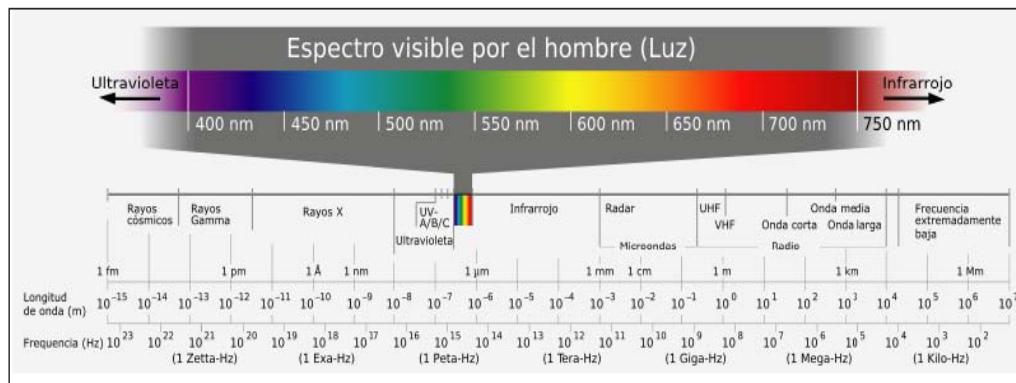


Figura 4-2. Espectro Electromagnético (Tomado de Méndez, 2002)

Existen otras series de bandas espectrales usadas en la teledetección como:

Infrarrojo próximo ($0.7 - 1.3 \mu\text{m}$) también conocido como infrarrojo reflejado o fotográfico, es de gran utilidad para la discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio ($1.3 - 8 \mu\text{m}$) en esta banda espectral se mezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico ($8 - 14 \mu\text{m}$), esta incluye la emisión del espectro terrestre.

Micro-ondas (a partir de 1mm), su interés radica en que es un tipo de energía que resulta transparente a la cubierta nubosa (Carrero F. e Infante J. 2004).

4.2 Teledetección y Sensores remotos:

La teledetección espacial es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, mediante la interacción energética entre la energía solar o energía artificial y el cuerpo a ser detectado (Chuvienco, 1990). Las cámaras y otros instrumentos que registran esta información se denominan sensores, que son transportados en aviones y satélites artificiales (plataformas),

estos sistemas de teledetección se emplean de forma habitual para el reconocimiento, la generación de mapas y la observación de los recursos y el medio ambiente de la tierra; aunque, también se han empleado para explorar otros planetas (Salazar, 2004).

| | | Longitud de onda | Frecuencia | Energía |
|--------------|-------------------------|------------------|------------|---------------|
| Radio | Muy Baja Frecuencia | > 10 km | < 30 KHz | < 1.99 e-29 J |
| | Onda Larga | < 10 km | > 30 KHz | > 1.99 e-29 J |
| | Onda media | < 650 m | > 650 KHz | > 4.31 e-28 J |
| | Onda corta | < 180 m | > 1.7 Mhz | > 1.13 e-27 J |
| | Muy alta frecuencia | < 10 m | > 30 Mhz | > 2.05 e-26 J |
| Microondas | Ultra alta frecuencia | < 1 m | > 300 Mhz | > 1.99 e-25 J |
| | | < 30 cm | > 1.0 Ghz | > 1.99 e-24 J |
| Infrarrojo | Lejano / submilimétrico | < 1 mm | > 300 Ghz | > 199 e-24 J |
| | Medio | < 50 μ m | > 6.0 Thz | > 3.98 e-21 J |
| Luz Visible | Cercano | < 2.5 μ m | > 120 Thz | > 79.5 e-21 J |
| | | < 780 nm | > 384 Thz | > 255 e-21 J |
| Ultravioleta | Cercano | < 380 nm | > 789 Thz | > 523 e-21 J |
| | Extremo | < 200 nm | > 1.5 Phz | > 993 e-21 J |
| Rayo X | | < 10 nm | > 30.0 Phz | > 19.9 e-18 J |
| Rayos Gamma | | < 10 pm | > 30.0 Ehz | > 19.9 e-15 J |

Tabla 1-1. Tabla de rangos de longitud, frecuencias y energías de los distintos campos del Espectro electromagnético (Tomado de Méndez, 2002).

4.2.1 Sistema de teledetección espacial:

El proceso de teledetección involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés. Está conformado de los siguientes elementos: (Ver figura 4-3)

1.- Fuente de energía o iluminación: El primer elemento requerido en la teledetección es disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía electromagnética al objeto de interés.

2.- Radiación y la atmósfera: La energía “viaja” desde la fuente al objeto, entrará en contacto e interactuará con la atmósfera. Esta interacción se repite por segunda vez cuando la energía “viaja” desde el objeto al sensor.

3.- Interacción con el objeto: La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades de este y de la radiación incidente.

4.- Detección de energía por el sensor: Es necesario un sensor remoto que reciba y grabe la radiación electromagnética que es reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera.

5.- Transmisión, recepción y procesamiento: La energía almacenada por el sensor debe ser transmitida, normalmente en forma electrónica, hacia una estación de recepción y procesamiento en la cual los datos serán convertidos a imágenes digitales.

6.- Interpretación y análisis: La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, con la intención de extraer información del objeto que fue iluminado (o que emitió radiación).

7.- Aplicación: Es el último paso en el proceso de teledetección, se cumple cuando aplicamos la información extraída de las imágenes del objeto para un mejor conocimiento del mismo, determinando nuevas informaciones que van servir de ayuda para resolver un problema particular.

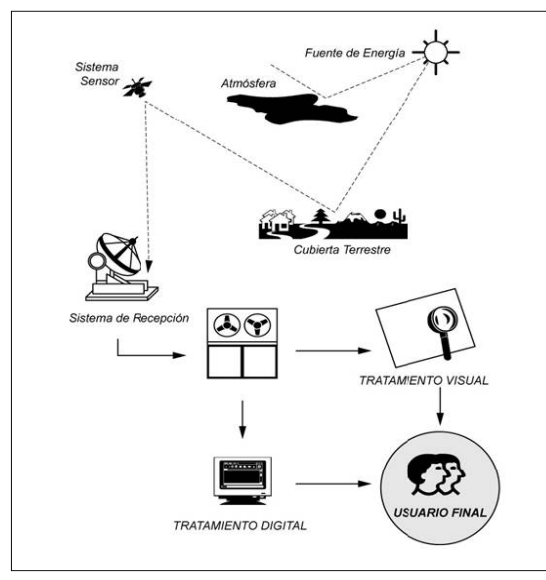


Figura 4-3. Elementos constitutivos del sistema de teledetección espacial (Tomado de Méndez, 2002).

4.2.2 Tipos de Sensores:

Existe una gran clasificación de los sensores, pero la más utilizada en los sistemas de teledetección son: (Ver figura 4-4)

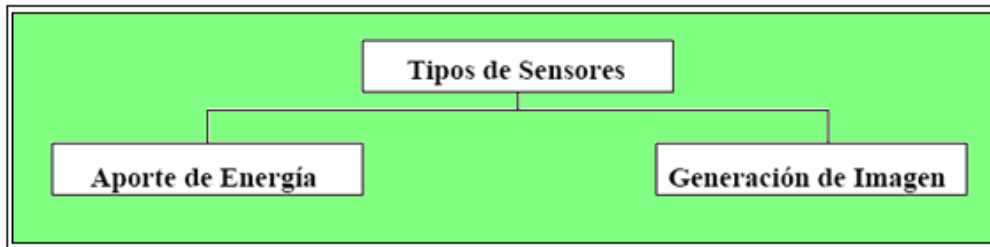


Figura 4-4. Clasificación de sensores más utilizados en los sistemas de teledetección.

Según el aporte de energía, se pueden distinguir dos tipos básicos de sensores:

- **Captadores pasivos:** detectan la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales. Existe un amplia gama de ellos: sistemas fotográficos, radiómetros multi e hiperspectrales, espectrómetros de imagen (Salazar, 2004).

- **Captadores activos:** poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación. Entre los sensores activos, el más importante es el radar (Salazar, 2004).

Según la capacidad de generar imágenes:

- **No generadores de imágenes:** Trabajan en una sola longitud de onda y entre ellos se encuentran el altímetro y el magnetómetro (Salazar, 2004).

- **Generadores de imágenes:** Operan en varias bandas, barriendo por franjas perpendiculares al desplazamiento del satélite: Plataformas espaciales, cámaras fotográficas, etc, (Salazar, 2004).

4.2.3 Resolución de los Sensores:

En el ámbito de sensores, la resolución esta dada por la combinación de sus partes y no por la acción de un pieza individual; también, se define como la capacidad que tienen los sensores para discriminar la posición, forma y límites de un cuerpo en específico, para diferenciar la variaciones mínimas de la energía irradiada desde el objeto de estudio. Un sensor se caracteriza y opera bajo los siguientes parámetros: resolución espacial, resolución espectral, resolución temporal y la resolución radiométrica (Chuvieco, 2006.).

▪ Resolución Espacial:

Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía (ver figura 4-5). Se mide en unidades de longitud (milímetros sobre la foto, ó metros sobre el terreno), y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie (Chuvieco, 2006).

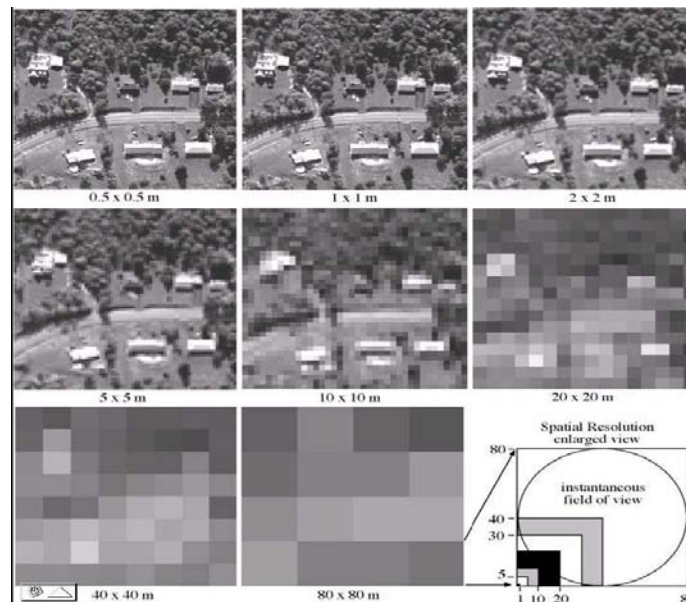


Figura 4-5. Resoluciones espaciales de una imagen tomadas de distintos sensores (Tomado de Méndez, 2002).

▪ Resolución Espectral:

Indica el número o anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En el caso de la teledetección es importante contar con una información multiespectral, esto es, registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro electromagnético. De esta manera, un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que permite caracterizar las respuestas espectrales de distintas cubiertas (ver tabla N° 1-2). Simultáneamente se requiere que dichas bandas sean estrechas, con el objetivo de recoger las señales sobre regiones coherentes del espectro. Utilizar bandas muy amplias implica realizar un promedio del valor de esa banda que puede obviar la diferencia espectral entre cubiertas de interés (Chuvienco, 2006).

| SATÉLITE | TERRA | | LANDSAT 7 | SPOT 5 | |
|-------------------|--------------|--------------|-------------|-------------------|------------|
| SENSOR | <i>MODIS</i> | <i>ASTER</i> | <i>ETM+</i> | <i>Vegetation</i> | <i>HRG</i> |
| Número bandas | 36 | 14 | 8 | 4 | 4 |
| Visible | 11 | 3 | 4 | 3 | 3 |
| Infrarrojo medio | 8 | 6 | 2 | 1 | 1 |
| Infrarrojo lejano | 17 | 5 | 1 | | |
| Pancromático | | | 1 | | 1 |

Tabla 1-2. Tabla de bandas espectrales de algunos satélites y sensores (Tomado de Méndez, 2002).

▪ Resolución radiométrica:

Se refiere a la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad de detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. En el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica viene dada por la discriminación de los niveles de grises recogidos por el film. Para los sistemas óptico – electrónicos las imágenes generalmente se presentan en formato digital, gracias a una conversión analógica – digital, realizada a bordo del satélite. El

número de valores que incluye ese rango suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor, este rango varía con el tipo de sensor. Al igual que los demás tipos de resoluciones; mientras mayor sea esta, mejor podrá ser interpretada la imagen (figura 4-6) (Chuvieco, 2006).

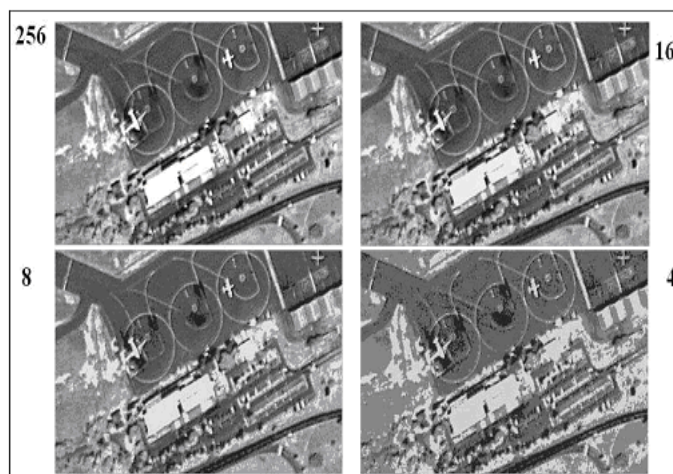


Figura 4-6 Resolución radiométrica a distintos niveles digitales: 8, 4, 3 y 2 bits (Tomado de Méndez, 2002).

▪ Resolución temporal:

Este concepto es referido a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de la cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura. (Chuvieco, 2006.).

Los cuatro casos de resolución están íntimamente relacionados; cuando se tiene mayor resolución espacial disminuye la resolución temporal y es posible que se reduzca también la espectral y la radiométrica. Un problema adicional es que al aumentar cualquiera de las cuatro resoluciones, se van a generar un volumen mayor de datos que las estaciones de trabajo tienen que procesar (Salazar, 2006).

Es por esta razón, que es conveniente aclarar primero cual será la aplicación de las imágenes; para definir cual resolución es la que más conviene aumentar.

| | |
|-------------------------|---|
| Resolución Radiométrica | <ul style="list-style-type: none"> • Detección de incendios forestales • Evaluaciones de Inundaciones • Estudios geológicos |
| Resolución Temporal | <ul style="list-style-type: none"> • Estimaciones de cosechas • Seguimientos de deforestación • Análisis climáticos |
| Resolución Espacial | <ul style="list-style-type: none"> • Catastro urbano o rural • Estrategia militar |
| Resolución Espectral | <ul style="list-style-type: none"> • Prospección minera o de hidrocarburo • Distinción de cuerpos vegetales. • Determinación de valores de humedad |

Tabla 1-3. Ejemplos de resoluciones aplicadas a actividades específicas según Chuvieco 2006

4.3 Firma Espectral:

El emisor de radiación más usual para imágenes de teledetección, es el sol, este emite la radiación que incide inicialmente con la atmósfera, en los gases presentes en la atmósfera, y en el resto de la materia presente en el universo, interactúa con la radiación, la absorbe, la refleja y la transmite.

Cuando la radiación solar ha traspasado la atmósfera interacciona con la superficie terrestre, haciendo contacto con todo tipo de materiales diferentes, aguas dulces y saladas, tierras desnudas, nieve, zonas de vegetación densa y arbustiva, ciudades, etc. Para cada tipo de superficie la radiación interacciona de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda muy concretas y reflejando otras diferentes en unas proporciones determinadas. Es esta la característica que hace posible la identificación de distintos objetos: suelo, vegetación, aguas, etc.

Mediante diversos experimentos realizados en laboratorios se han podido caracterizar el comportamiento de distintas superficies al recibir radiación y caracterizando los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión. Este comportamiento de cada objeto es lo que se llama **Firma Espectral** del mismo. (Ver figura 4-7). Tomado y modificado de (Carrero F. e Infante, J. 2004).

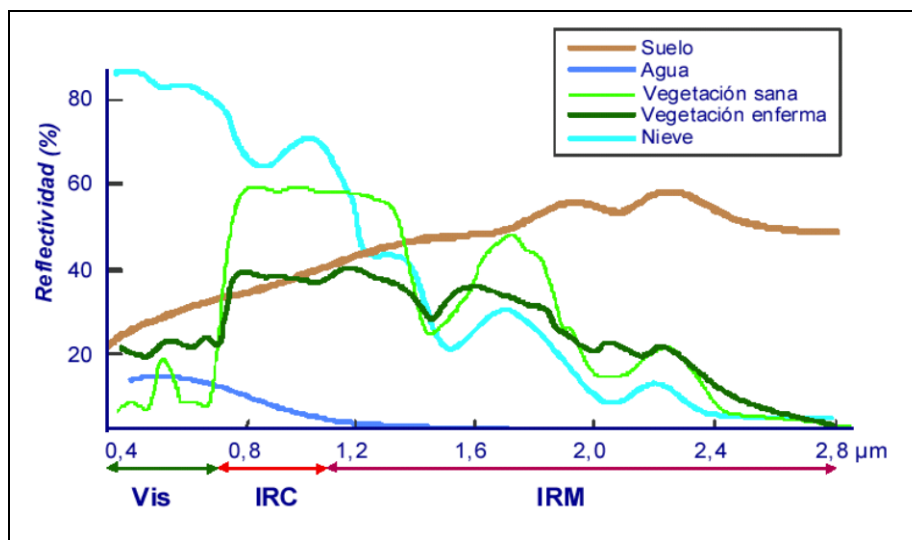


Figura 4-7. Firma espectral para distintos tipos de cubierta. (Tomado de <http://fanpaulieb.blogspot.com/2007/09/reflectancia-espectral-curvas.html>).

Al definir la firma espectral de la cubierta que se necesita estudiar, se clasifica los píxeles correspondientes a dicha cubierta. La firma espectral de la vegetación en la figura 4-7 está caracterizada por un pico de reflexión en infrarrojo cercano y permite diferenciarla de otras cubiertas que dentro del rango visible tengan respuesta espectral semejante. Por lo tanto dentro de la firma espectral, dependiendo de las longitudes de onda analizadas, se puede realizar un análisis en particular de las características de la cubierta en estudio.

Es importante tener presente que las diversas cubiertas no presentan un comportamiento único o permanente que coincida con las curvas de reflectividad espectral y que permitan reconocerlas con respecto a otras superficies.

Cada cubierta puede presentar cierta variación debido a factores como el ángulo de iluminación solar, el relieve, influencias atmosféricas, ángulo de observación entre otros, es por ello que comprender y determinar la firma espectral es esencial si se necesita diseñar instrumentos que puedan detectar los rasgos de interés.

4.3.1 Respuesta de la vegetación

En el análisis de la superficie de la vegetación a través de imágenes de satélite se deben tener en cuenta aspectos como la morfología de la cubierta (estado fenológico, proporción de sombras, geometría del follaje y contenido de humedad), y la ubicación en el relieve y su asociación con otras cubiertas o especies.

Por ejemplo, la hoja de los árboles la percibimos de color verde porque refleja con mayor intensidad las longitudes de onda visibles de ese color, esto debido al efecto absorbente de los pigmentos fotosintéticos de las hojas, mientras que absorbe el azul y el rojo por el contenido de clorofila en las hojas (Méndez, 2002). (Ver Figura 4-8 y 4-9).

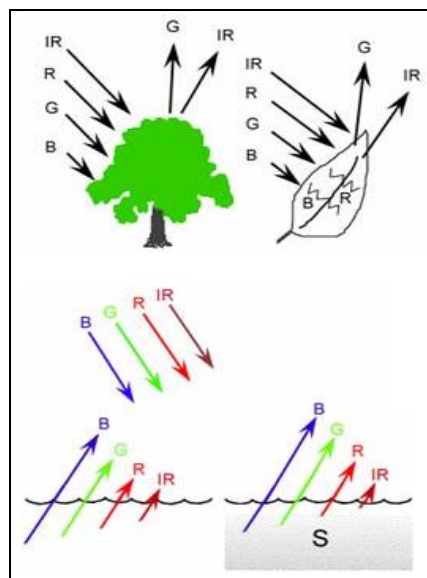


Figura 4-8. Respuesta espectral de la vegetación. Tomado Mendez (2002)

La estructura celular interna da la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano que luego va reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio. Por tanto, el contraste más nítido se presenta entre las bandas visibles (especialmente rojo) y el infrarrojo cercano. Cuanto mayor sea ese contraste, mayor será el vigor de la vegetación.

Estos tres parámetros: cantidad de pigmentos, estructura celular y contenido en agua, manifestados por la respuesta espectral de esa masa de vegetación de la que forman parte, puede servir para discernir entre unas especies y otras, su nivel de desarrollo e incluso entre su estado sanitario.

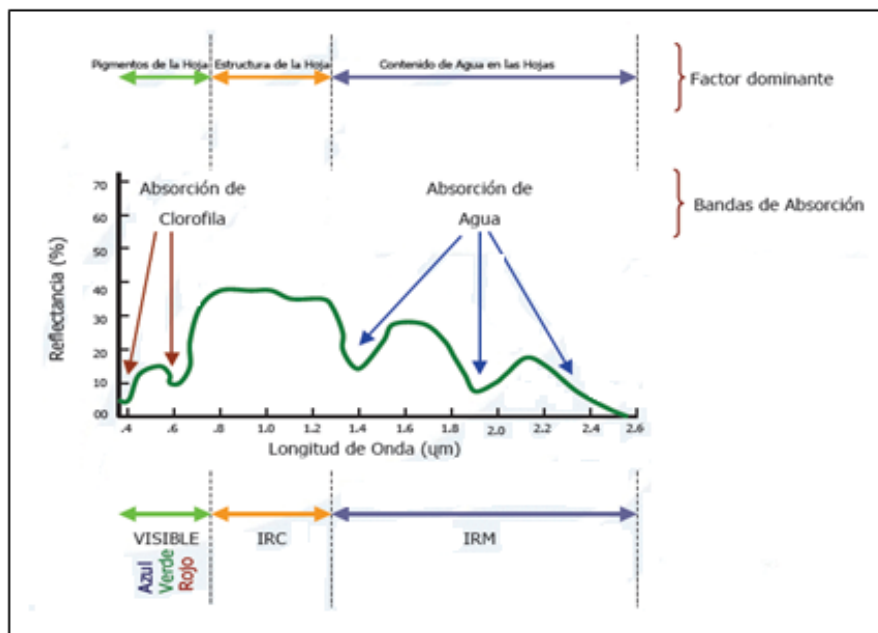


Figura 4-9. Respuesta espectral de la vegetación sana. Tomado Goyo. IGVS (2008)

4.3.2 Respuesta del suelo

La respuesta del suelo a la reflectividad de las longitudes de onda, está influenciada por características como: la composición química, textura, estructura y contenido de humedad. El contenido de materia orgánica en el suelo reduce la reflectividad.

4.3.3 Respuesta del agua

La respuesta del agua varía según la longitud de onda, dentro del espectro óptico infrarrojo. El agua tiende a absorber la energía a medida que la longitud de onda aumenta,

en el caso de las microondas, éstas son reflejadas especularmente si el agua esta tranquila; si hay turbulencia u oleajes, la energía es reflejada en varias direcciones.

La respuesta del agua también esta influenciada por la profundidad y el contenido de sedimentos que contribuyen al reflejar la energía, cuando esta llega hasta las partículas o al fondo del agua.

4.4 El Uranio:

El uranio es un elemento químico de número atómico 92 (es decir, con 92 protones en el núcleo). Su símbolo es *U*. Tiene diversos isótopos, incluidos radiactivos empleados para la fabricación de armas nucleares y la producción energética en centrales nucleares. Es una sustancia radioactiva que se presenta de forma natural. Forma parte de las rocas, tierra, aire y el agua y se halla en la naturaleza en forma de minerales, pero nunca como metal. El uranio metálico es de color plateado con superficie gris y es casi tan resistente como el acero; es uno de los elementos químicos más pesados de origen natural sobre la Tierra. Fue descubierto en 1789 por M. H. Klaproth que lo llamó así en el honor del planeta Urano que acababa de ser descubierto en 1781.

El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio-238 (U^{238}), uranio-235 (U^{235}) y uranio-234 (U^{234}). De cada gramo de uranio natural el 99,28 % de la masa es uranio-238, el 0,71% uranio-235 y 0,005% uranio-234. La relación Uranio-238/Uranio-235 es constante en toda la Tierra y el resto de los planetas del Sistema Solar. Una de las propiedades radiactivas del uranio es el periodo de semidesintegración, el tiempo que tarda la mitad del isótopo en emitir su radiación y transformarse a otra sustancia. Los periodos de semidesintegración son muy largos (cerca de 200.000 años para el ^{234}U , 700 millones de años para el ^{235}U , y 5.000 millones de años para el U^{238}).

4.4.1 Geología de los depósitos de Uranio:

El porcentaje de uranio en los primeros 16 Km de la corteza terrestre es más alto, que el de oro y plata. La única diferencia es que es muy raro encontrarlo enriquecido en tal forma, que constituya depósitos de alto grado. Por esta razón, usualmente se pueden encontrar únicamente concentraciones de bajo grado. En la corteza terrestre se distribuye el uranio perfectamente uniforme en dirección lateral, mientras que en la vertical se puede reconocer un enriquecimiento pobre cercano a la superficie. Este fenómeno proporciona algunas sugerencias para comprender el proceso de enriquecimiento del uranio durante el fraccionamiento magmático.

Las rocas basálticas contienen hasta 1 ppm, las graníticas de 3 a 4 ppm de uranio, y las volcánicas ácidas pueden contener hasta 20 ppm; pero en algunos casos el enriquecimiento en granitos o volcánicas ácidas no pueden ser suficientes para producir un depósito. También las intrusiones pegmatíticas, que se encuentran en las zonas externas de intrusiones graníticas, son frecuentemente ricas en uranio. La causa es, que en las pegmatitas se encuentran concentradas las fracciones líquidas y los residuos volátiles del magma ácido. La cantidad de uranio es usualmente muy pequeña y su explotación económica es aplicada solo cuando se encuentra en unión de otros metales o minerales que lo sean. Otro tipo de depósito ocurre cuando los últimos volátiles y fracciones líquidas del magma ácido circulan a lo largo de fallas o zonas de fricción de la cobertera sedimentaria, formando diferentes minerales de uranio, especialmente del tipo neumatolítico e hidrotermal. En ellas la Pechblenda (Uraninita UO_2), es la más común y ha llegado a formar depósitos económicos en diferentes lugares (Francia, Portugal, España, Canadá, Australia, etc).

Las concentraciones de uranio en sedimentos (areniscas o conglomerados) son los depósitos actuales más importantes de uranio. Sedimentos, depositados en cauces situados en cratons y provenientes de granitos o rocas ácidas, sedimentos clásticos continentales, como arcosas, areniscas fluviales, conglomerados o lechos de arcilla esquistosa; estas rocas

deben tener una gran extensión y no estar muy deformadas. Si el uranio se encuentra depositado en superficie o cerca de ella, permanece así únicamente en zonas ácidas, ya que en zonas húmedas es disuelto y transportado a otros lugares.

En el caso que los yacimientos de U se encuentren asociados a discordancias, se puede reconocer dos tipos de situaciones. La primera, en donde las rocas precámbricas han tenido una historia compleja de movimiento de placas, tectonismo, metamorfismo, intrusiones, extrusiones de rocas volcánicas y acción de soluciones hidrotermales, que luego han sido levantadas y erosionadas por un largo período de tiempo. Tiempo considerable de erosión y depositación en cuencas inter-cratónicas, que han dado como resultado rocas sedimentarias donde sus estratos son mayormente subhorizontales. Y un tiempo considerable de erosión que ha permitido la movilización de grandes cantidades de U, sea por meteorización-oxidación, o por circulación de soluciones hidrotermales.

En el segundo tipo de situación, los yacimientos de U se encuentran asociados a discordancias de rocas más jóvenes, del Cretácico al Reciente, sobre un basamento que puede ser precámbrico o más joven, se forman yacimientos en las rocas sedimentarias permeables que están por encima de la discordancia. El U es lixiviado desde el basamento, generalmente de composición granítica, o de los equivalentes volcánicos félsicos de los mismos sedimentos y es transportado en forma de ión uranilo (UO_2^{+2}) hasta su precipitación, con materia orgánica u otros reductores. Los yacimientos se encuentran en areniscas y lodolitas, toman formas distintas según el flujo de las aguas con U, la disposición geométrica y el movimiento de los reductores o agentes precipitantes (Pasquali y Sifontes, 2007).

4.4.2 Uranio en el Estado Amazonas:

Los posibles grandes yacimientos de U en Venezuela deberían ser buscados preferentemente en la discordancia representada por la base del Grupo Roraima. Estos yacimientos podrían estar cubiertos por Roraima, estar cercanos a la superficie, aflorar, o haber sido erosionados.

En Venezuela, especialmente en el estado Amazonas no se conocen yacimientos, ni grandes acumulaciones de uranio, a excepción de algunas pequeñas acumulaciones de Pechblenda encontrados en el Táchira. El escudo de Guayana, escudo precámbrico del continente sudamericano, está constituido en su totalidad por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias del precámbrico, conformadas por arcosas, areniscas, conglomerados que yacen directamente sobre un basamento cristalino, familias de fracturas, fallas y paleocauces, que son característicos de distintos depósitos uraníferos en el planeta, lo cual concuerda con las características, geológicas y geoestructurales de nuestro territorio, lo que hace pensar que estas zonas, muy bien pudieran ser de un gran potencial uranífero.

Igualmente, en los alrededores de El Baúl, estado Cojedes, han sido reconocidas rocas como anómalas en su concentración de U (Sifontes, 1981 y 1985). Donde las formaciones recibieron el U, producto de la meteorización de las rocas de El Baúl, en sus cambios de ambiente oxidante a reductor, demarcando estos lugares como prospectivos para los yacimientos de U.

Como prueba de este potencial uranífero en el sur de Venezuela, se han detectado mediante estudios de prospección minera en la región noroccidental del estado Amazonas, aplicando métodos radimétricos y magnéticos, un conjunto de anomalías uraníferas y fuentes de Thorio de primera prioridad, trabajo realizado por CVG Técnica Minera (**TECMIN**) en 1977. (Ver figura 4-10).

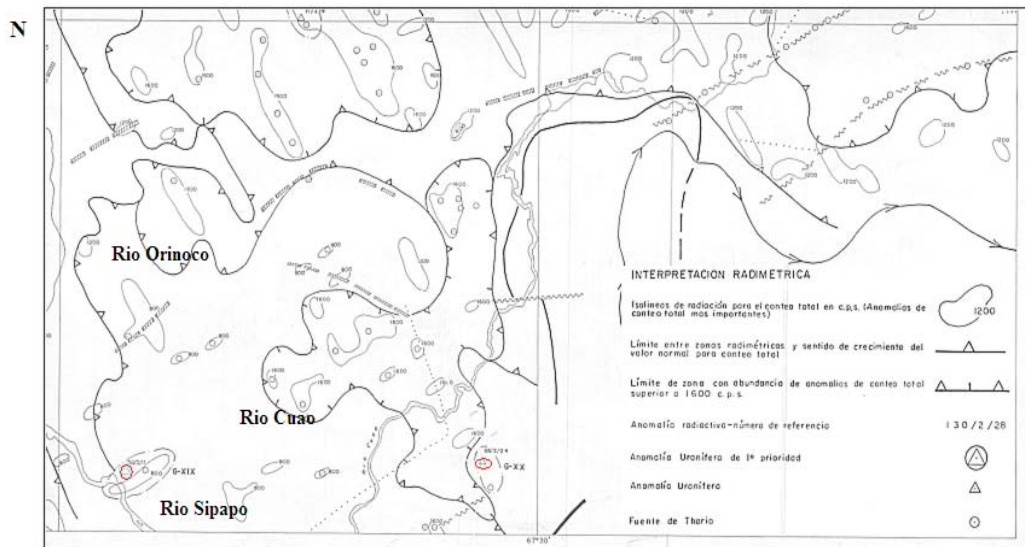


Figura 4-10. Mapa de las interpretaciones radimétrica y magnética de la región noroccidental del Estado Amazonas, específicamente de la zona de estudio a escala 1:100.000, donde se observan distintas anomalías de uranio (círculos de color rojo) y fuentes de Thorio.

Capítulo V
GEOLOGÍA REGIONAL

- Geología Regional
- Evolución Geotectónica Regional
- Provincias Piroclásticas de Amazonas
- Geología Noroccidental del Estado Amazonas

5.1.- Geología Regional:

El capítulo de Geología Regional, esta conformado por tres secciones en las cuales se tratará de describir todos los rasgos geológicos, a nivel regional, que han afectado al Escudo de Guayana, en el sur de Venezuela, específicamente, la zona de interés de esta investigación, en la región noroeste del estado Amazonas, en donde, la primera sección estará relacionada con la descripción general de la geología del escudo, en la segunda sección se realizará una reestructuración (en tiempo) de todos aquellos eventos tectónicos que ocurrieron a través de la historia y que hoy en día son los responsables de la disposición estratigráfica – estructural que se observa en esta zona, y por último, se tratará la descripción y caracterización de todas las unidades litoestratigráficas aflorantes en la región; junto a la generalización de las estructuras que conforman el área de estudio.

En Suramérica las rocas de edad precámbrica se encuentran principalmente formando parte del Escudos de Guayana y del Brasilerio, separados por la cuenca del río Amazonas, siendo ésta, la expresión de una gran geofractura que se extiende a más de 70 km en la corteza. El Escudo de Guayana presenta cierta forma oval y su región septentrional se encuentra al sur del Orinoco en Venezuela, mientras que la región meridional se adentra en Colombia, Brasil, Guayana, Surinam y Guayana Francesa. Tiene su origen en distintos movimientos tectónicos durante el Precámbrico; para el Cámbrico las extensas regiones del Brasil y Guayana fueron cubiertas por el mar y permanecieron como islas separadas por la faja del Amazonas. La región venezolana, comprende rocas arqueozoicas y proterozoicas de muy diversas litologías, las cuales fueron alteradas en mayor o menor escala durante una serie de eventos tectónicos mayores, cuyos periodos orogénicos comprenden edades entre 800 y 3600 m.a (Carrero, 2004).

Mendoza, teniendo como base caracteres petrológicos y tectónicos, ha dividido el escudo de Guayana en Venezuela en cuatro provincias conocidas como: Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima, las cuales se diferencian en sus direcciones estructurales, estilo de

deformación tectónica, asociaciones litológicas metalogénicas y edades. (Mendoza, 1972)
(Ver figura 5-1).

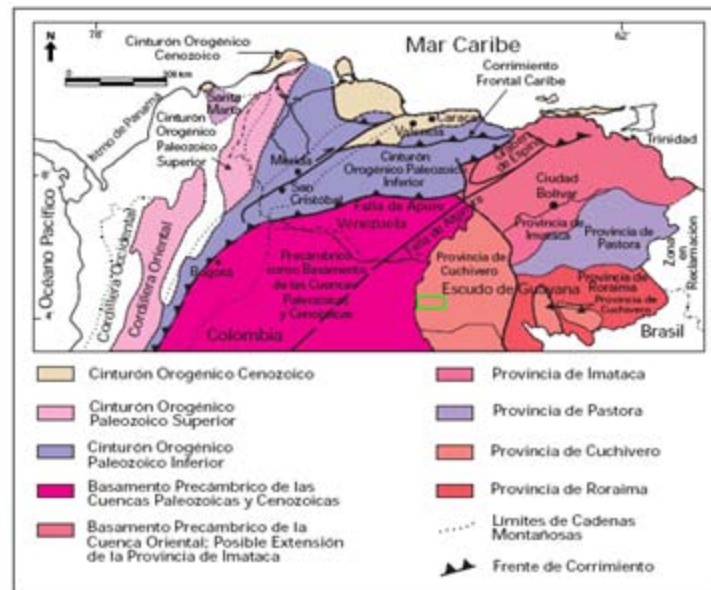


Figura 5-1. Ubicación de las Provincias Geológicas del Escudo de Guayana, (Tomado de Yoris y Ostos, 1997). Área de estudio (polígono verde).

La provincia de Imataca, en función a la clasificación petrológica, pertenece al denominado Cinturón Granulítico; la provincia de Pastora pertenece a los Cinturones de Rocas Verdes y Cuchivero se caracteriza por grandes extensiones de granitos (1800 a 2000 m.a) y granitos post-tectónicos (1500 m.a). Por su parte, la provincia de Roraima es una cobertura de sedimentos discordantes sobre rocas pertenecientes a la provincia de Pastora o Cuchivero.

5.1.1.- Provincia de Imataca:

Se encuentra situada en el extremo norte de la Guayana Venezolana y ocupa una faja de unos 500 km de longitud y de una anchura variable entre 55 y 130 km, comprendida entre las proximidades del río Caura al oeste y el estado Delta Amacuro al este, donde desaparece bajo los sedimentos del Delta (Chase, 1963, 1965).

El Complejo de Imataca está constituido por paragneises, granulitas y cuarcitas ferruginosas, intrusionados localmente por diversos cuerpos de cuarzo monzonita y granito; el metamorfismo es de alto grado, alcanzando la subfacie de la granulita piroxénica.

Las edades radimétricas determinadas hasta el momento, sugieren que la Provincia de Imataca contiene las rocas más antiguas de la Guayana Venezolana. La edad más antigua para el Complejo de Imataca es de 3000-3400 m.a, obtenida por Rb/Sr en una muestra de granulita ácida asociada a horizontes ferríferos (Hurley, 1972).

5.1.2.- Provincia de Pastora:

La Provincia Pastora se extiende desde la Falla de Guri al Norte hasta las proximidades del Parque Nacional Canaima al Sur, por el Este hasta los límites con la Zona en Reclamación del Esequibo y al Oeste hasta el Río Caura.

Pastora, está formada por cinturones de rocas verdes, delgados, tectonizados, tipo Carichapo formados en/o cerca de un arco de islas en una zona de convergencia y cinturones de rocas verdes, más anchos, jóvenes, menos tectonizados y metamorfizados, tipo Botanamo, formados en la cuenca delante del arco de islas y complejos graníticos sódicos, como el Complejo de Supamo, siendo toda la secuencia intrusionada por granitos potásicos o “sensu estricto”, dioritas y rocas gabroides con escasos complejos máficos-ultramáficos, ofiolíticos. La secuencia total supera los 11.000 m. de espesor; Rocas ultramáficas ocupan 1-2% de los antiguos cinturones de rocas verdes de Guayana, basaltos y rocas gabroides hasta un 75%, basandesitas y flujos de lavas andesíticas alrededor de un 15-17% y rocas volcánicas félsicas y piroclásticas un 8%. (Renner y Gibbs, 1.987).

El Grupo Carichapo está constituido por las formaciones Cicapra, predominantemente komatitica, basáltico tholeítica a komatitica y El Callao, típicamente basáltico-andesítica tholeíticas; (Gaudette y Olsewski, 1.978) sugieren por U-Pb en circones edades de 2800 a 2600 m.a.

El Grupo Botanamo al Sur de la Región de Guasipati, está constituido por la formación Caballape, de rocas volcánicas maficas intermedias y volcánicas sedimentarias, y Los Caribes, exclusivamente sedimentaria. Por último, El Complejo de Supamo fué considerado por Moreno y Mendoza (1.972, 1.975) como un conjunto de rocas graníticas, intrusivas, y/o reactivadas, en rocas del Supergrupo Pastora, tales como tonalitas, trondjemitas, granodioritas, cuarzo-monzonitas, gneises y migmatitas equivalentes. Actualmente la edad más antigua estimada para las rocas del Complejo de Supamo es 2300 m.a (Klar, 1979).

5.1.3.- Provincia de Cuchivero:

El conjunto litológico de la Provincia de Cuchivero consiste de rocas volcánicas ácidas e intermedias, lavas, tobas y diques de ígneas básicas, las cuales muestran un metamorfismo de bajo grado. Estas rocas volcánicas han sido intrusionadas por rocas graníticas, entre las que se distinguen desde microgranitos hasta granitos de grano grueso a muy grueso.

Las rocas volcánicas de la Provincia de Cuchivero afloran en los alrededores de Santa Elena de Uairén, al sureste del Estado Bolívar; continúan hacia el oeste y al noreste pasando por las regiones de El Chiguao y La Vergareña, hasta la región occidental del estado Bolívar, para seguir hacia el sur formando parte de estado Amazonas.

Mendoza introdujo el nombre de Supergrupo Cedeño para incluir dos conjuntos de rocas ígneas ácidas no comagmáticas; el Grupo Cuchivero y el Grupo Suapure, constituido este último por los granitos de Pijiguaos y El Parguaza. (Mendoza, 1972)

5.1.3.1.- Supergrupo Cedeño:

El supergrupo Cedeño se define como una unidad litoestratigráfica volcano-plutónica ácida, no comagmática, que comprende los grupos Cuchivero y Suapure separados entre sí por metabasitas. El Supergrupo Cedeño se extiende en dirección E-O

desde las proximidades del río Caura hasta Puerto Páez y en dirección N-S desde el río Orinoco en su tramo noreste hasta el río Ventuari; abarcando todo el distrito Cedeño del estado Bolívar y parte norte del territorio federal Amazonas. La mejor sección tipo se localiza en las proximidades del río Suapure, entre la serranía de Guacharacaima y Los Pijiguaos, donde afloran las unidades litoestratigráficas de: Granito de Santa Rosalía, metavolcánicas ácidas de la Formación Caicara; Granito de San Pedro, metabasitas, Granito de Pijiguaos, Granito rapakivi del Parguaza y el Granito de Guaniamito, expuesto unos 60 km al este de Guacharacaima. La edad establecida del Supergrupo Cedeño no está bien definida; sin embargo, se puede decir que es más joven que el Supergrupo Pastora (2200 ± 50 m.a). Se desconoce su base; su tope es discordante por debajo de la Formación Roraima. En tiempo y litología el Supergrupo Cedeño es correlativo de las meta-volcánicas ácidas y los granitos biotíticos. (Benaim, 1972).

A.- Grupo Cuchivero:

A.1.- Formación Caicara

La Formación Caicara está constituida por lavas tobáceas y brechas ácidas de color gris oscuro y granito fino, micro y macroporfídicas, moderada a extremadamente foliadas, plegadas y falladas. A pesar de tal deformación las estructuras de flujo y la estratificación ígnea originales se reconocen fácilmente. (Ríos, 1969)

Las cuarzo-latitas de la Formación Caicara han sido intrusionadas por los Granitos de Santa Rosalía, San Pedro y Parguaza, aunque localmente su contacto con los mismos es de falla. Se desconoce el basamento de las cuarzo-latitas. Por estas relaciones intrusivas, las volcánicas de Caicara deben ser más antiguas que los Granitos de Santa Rosalía y Parguaza.

A.2.- Granito de Santa Rosalía

El Granito de Santa Rosalía es masivo a semi-foliado, plutónico de grano medio a muy grueso, constituido esencialmente por cuarzo, feldespato potásico- pertita, plagioclasa: oligoclasa; biotita marrón pleocroica; hornablenda, accesorios y secundarios (titanita, apatito, epidoto, clorita, opacos y otros). (Ríos, 1969), El Granito de Santa Rosalía es intrusivo en las cuarzo-latitas de la Formación Caicara, aunque localmente el contacto puede ser de falla. El Granito Rapakivi del Parguaza se deduce intrusivo en el Granito de Santa Rosalía, en atención a la presencia de un granito porfídico en la zona de contacto.

A.3.- Granito de San Pedro

Son rocas graníticas, macizas a moderadamente foliadas, de grano fino, equigranulares, que afloran entre El Budare y Pijiguao, 3 km al oeste del paso de San Pedro en el río Suapure. El Granito de San Pedro esencialmente está constituido por cuarzo cataclástico, feldespato potásico y pertita, plagioclasa Na, accesorios y secundarios tales como biotita, apatito, opacos, clorita y epidoto en pequeñas cantidades.

El Granito de San Pedro podría equivaler a las intrusivas menores ácidas en el área del río Cuchivero (Ríos, 1969), que también intrusionan a las volcánicas.

A.4.- Metabasitas

Las metabasitas son rocas macizas de grano fino a medio y textura variable de ofítica a sub-ofítica a intersectoral. Mineralógicamente consisten en anfíbol verde oscuro a claro, plagioclasas (labradorita-andesina) más o menos alteradas, epidoto, clorita, escaso cuarzo, biotita rojiza a marrón y opacos; no se observan piroxenos. En la región del Río Suapure las metabasitas son muy escasas y siempre intrusionan rocas del Grupo Cuchivero, las cuarzo-latitas de la Formación Caicara y el Granito de Santa Rosalía, pero se observan como xenolitos en el Granito Rapakivi del Parguaza.

A.5.- Granito de Guaniamito

Es un granito gnéisico, porfídico, de grano grueso, constituido por cuarzo, biotita, feldespato alcalino, hornablenda y minerales opacos. (Ríos, 1968). El Granito de Guaniamito aflora en tres zonas diferentes: El Tigre, El Chingo y Guaniamito. Esta roca no se observa en el área del río Suapure.

B.- Grupo Suapure:

B.1.- Granito Pijiguao

Es un granito leucocrático (5% máficos) de color rosado salmón, grano fino, macizo de aspecto sub-volcánico, expuesto en la base del Domo de Pijiguao, en contacto no reaccional con el Granito Rapakivi del Parguaza. De acuerdo a estudios en imágenes de radar este granito se extiende por las partes bajas de los ríos Parguaza, Villacoa y Ventuari.

El granito es de grano fino a medio, masivo y sin desarrollo de textura gráfica. Consiste en feldespato potásico \pm pertita, plagioclasa albitica, cuarzo, biotita marrón con apatito, opacos como accesorios más frecuentes, epidoto y clorita como secundarios.

El Granito de Pijiguao siempre aflora como lajas por debajo del Granito del Parguaza. Se desconoce su edad absoluta, pero debe ser similar (o más antigua) a la del Granito del Parguaza. De acuerdo a (Ríos, 1969), el Granito de Pijiguao podría ser equivalente a los granitos de grano fino y microgranitos asociados al Granito de Guaniamito en el área del río Cuchivero.

B.2.- Granito del Parguaza

McCandless propuso este nombre para designar un granito de grano muy grueso, masivo con textura rapakivi y rico en feldespato potásico, biotita y hornablenda, expuesto desde Puerto Páez hasta Los Pijiguaos cuyos mejores afloramientos están en el Salto Maracas del río Parguaza, en las montañas de El Tigre y los Domos de Pijiguao. El Granito

del Parguaza constituye un batolito de composición homogénea en la Provincia Estructural de Amazonas ubicada en la parte Nor-Oriental del Escudo de Guayana y representa una de las más grandes intrusiones graníticas anorogénicas del mundo. (McCandless, 1965)

El Granito Rapakivi es una roca masiva sin indicios de metamorfismo o tectonismo sobreimpuestos. Sin embargo, hacia los bordes del batolito, en especial el lado oeste presenta zonas de cizalla con emplazamientos de pegmatitas. El granito se compone de cuarzo (10 - 25%), oligoclasa (15 - 30%), microclino-perfítico (25 - 55%) biotita (2 - 15%) y hornablenda (5 - 20%). La edad radiométrica de estos granitos rapakivis por el método Rb – Sr, en roca total isócrona es de 1531 ± 39 m.a (Gaudette y otros, 1977).

5.1.4.- Provincia de Roraima:

Provincia originalmente descrita como la Formación de Areniscas por (Brown y Sawkins, 1875), de sedimentos precámbricos en la región limítrofe de Venezuela, Guayana y Brasil, que luego fueron designados como la Serie de Roraima por Dalton, en 1912. Reid agrupó en la región de Santa Elena de Uairén, estos sedimentos en su área tipo, el cerro Roraima, bajo el nombre de Grupo Roraima y la subdividió en cuatro formaciones (Uairén, Kukuenán, Uaimapué y Matatuí), (Reid, 1973).

El Cerro Roraima, se encuentra en el extremo suroriental de Venezuela, en la Gran Sabana del estado Bolívar, colindante con Brasil y Guyana, extendiéndose hacia Guyana centro occidental y la parte norte de Brasil, y cubre un área de 73000 km² (Keats, 1973). Sin embargo, sedimentos del Grupo Roraima se extienden por 1500 km (Ghosh, 1977) desde el cerro Sipapo al oeste del estado Amazonas, hasta Tafelberg, en Suriname al este.

En esta área tipo, los sedimentos son casi horizontales y en posiciones normales son principalmente **cuarzo arenitas** con menores proporciones de areniscas feldespáticas, lutitas y tobas volcánicas silicificadas.

El Grupo Roraima suprayace discordantemente sobre diversos basamentos: el metamórfico del Grupo Pastora, y los metasedimentos, metavolcánicas del Grupo Cuchivero, y Formación Los Caribes en el estado Bolívar.

En el área tipo han sido descritas cuatro formaciones por (Reid, 1973):

- Formación Uairén:

Formación de aproximadamente 850 m de espesor; conglomerados y areniscas con estratificación cruzada, algunas lutitas y una capa superior delgada (2-4 m) de laterita hematítica.

- Formación Kukuenan:

Formación de 50-100 m de espesor, de lutitas de color variable, probablemente discordante sobre la Formación Uairén.

- Formación Uaimapue:

Secuencia de conglomerado basal gradando hacia arriba a arcosa roja, con intercalaciones de jaspe y ftanitas volcánicas (rojas y verdes) con estratificación cruzada, y de espesor aproximado de 250 m.

- Formación Mataui:

De 600 m de espesor, conformada por cuarzo arenitas de grano fino, con abundantes estructuras sedimentarias, tales estratificación cruzada, laminación paralela y rizaduras.

En el estado Amazonas, el Grupo Roraima ocurre en forma de tepuis aislados, entre los cuales los más conocidos cerros son: Sipapo (incluyendo Autana y Cuao), Parú, Morrocroy, Duida, Yapacana y los cerros Neblina, Avispa y Aracamuni en el extremo sur del país.

Estos sedimentos suprayacen al basamento, representado por el Granito de Parguaza, Granodioritas de Sipapo, Granitos Foliados de Santa Rosalía, gneises graníticos (Supamo?), como se observa cerca de San Juan de Manapiare, y metasedimentarias más antiguas.

La edad del Grupo Roraima ha sido determinada en forma relativa, por métodos radiométricos en rocas ígneas intrusivas (diabasas) y tobas asociadas en el grupo (Ghosh, 1977, 1978). Dataciones sobre el basamento de Granito de Parguaza y su facies cogenéticas definen edades entre 1350 a 1550 m.a.

A continuación se muestra en la tabla 1-4, de forma más resumida estas unidades del precámbrico de la zona sur de Venezuela, indicando litología, intrusiones, edad y contactos.

Tabla 1-4. Tabla de unidades del precámbrico en el sur de Venezuela, donde se muestra de forma resumida sus características tales como, litología, intrusiones, edad y contactos.

5.2.- Evolución Geotectónica Regional:

Este subcapítulo describe los principales eventos tectónicos y sedimentación asociada, ocurridos desde el precámbrico hasta el reciente, que fueron responsables de la evolución geológica en el sur de Venezuela.

Durante el Meso y Neoarqueozoico (**Orogénesis Guriense 3700 - 3400 m.a y Aroensis o Pre-Transamazónica, 2780-2600 m.a**), se originaron, bajo un régimen de muy alto gradiente geotérmico, y en zonas de subducción con menos pendientes que las actuales, primitivos cinturones de rocas verdes, con domos intrusivos gabroides-dioríticos a tonalíticos y granodioríticos, que sufrieron tectometamorfismo. Estos terrenos primitivos formaban islas y microcontinentes dentro de gigantes océanos, pero por deriva y choque se suturaron unos sobre otros, con grandes corrimientos, formando fajas tectónicas con litologías, metamorfismo y edades diferentes, estas se adicionaron unas a otras, hasta constituir el espeso cratón Imataca-Kanukú, etc., hacia 2700-2500 m.a, formando parte del primer gran supercontinente, que denominamos **Guayanensis** (Mendoza, 2005).

En el Paleoproterozoico (**Orogénesis Transamazónica, 2300-1800 m.a**) el cratón Imataca- Kanukú se fracturó y separó, Imataca a un lado y Kanukú y cratones equivalentes de Brasil, al opuesto formándose entre los bloques en deriva, el océano Pastora-Barama-

Mazzaruni, donde se produjeron, bajo un régimen de tectónica de placas similar al actual, cinturones de rocas verdes más evolucionados, formados en arcos de islas y cuencas detrás del arco, con rocas predominantes basáltico- komatíticas hacia la base, seguidas por sedimentos pelíticos profundos, con rocas volcánicas y volcanoclásticas félsicas hacia el tope. (Mendoza, 2005).

Dentro de ese régimen de tectónica de placas, se produjeron nuevas cuencas y subcuencas, nuevos y más evolucionados cinturones de rocas verdes, que recibieron espesas secuencias turbidíticas volcanogénicas, cerrándose los mares con sedimentos molasoides de colores rojos y conglomerados, suturándose y acreacionándose así las rocas de Pastora, coincidiendo o formando parte del gran Supercontinente **Atlántica**. (Ver figura 5-2).

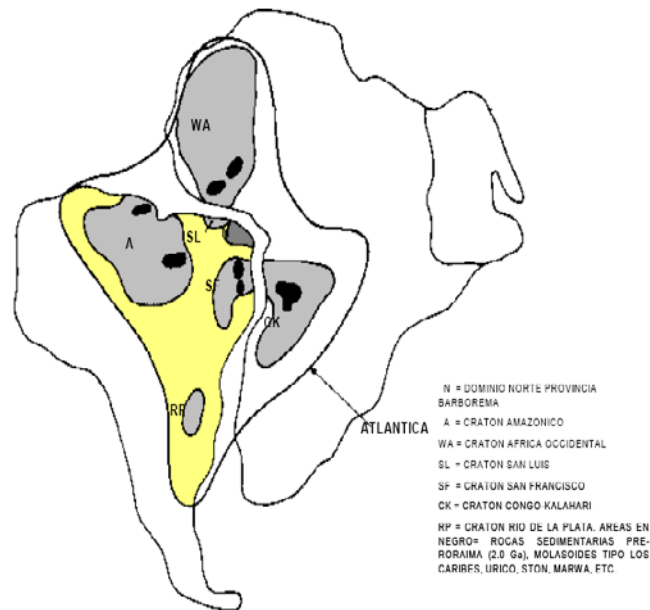


Figura 5-2. Reconstrucción esquemática del supercontinente Atlántica (Modificado de Rogers, 1996).

Hidrotermalismo y politectonismos de edad post-Supamo (2150 m.a, 2060 m.a, 1250 m.a, 950 m.a) originaron vetas de cuarzo aurífero hipo y mesotermales en zonas de

cizallamiento, tipo pórfidos de oro y cobre, en el contacto de rocas volcánicas (competentes) con rocas sedimentarias pelíticas, incompetentes.

Estos pórfidos de Cu-Au, fueron interrumpidos por intrusiones más félsicas que añadieron calor e hidrotermalismo, con nuevo aporte de Cu, Au, algo de Mo, turmalina y con ello una más amplia, diseminada y enriquecida mineralización de oro-cobre (1.3 g/t de Au y menos de 0.2% de Cu, con trazas de Mo y otros metales).

A los arcos de islas de Botanamo, acreacionados junto con Pastora a Imataca, siguió algo más tarde (unos 20-30 m.a) la fusión parcial más profunda, de material del manto que calentó, fracturó y se mezcló con material de la corteza, predominantemente granítico, para con muy poco fraccionamiento producir, en un borde continental activo tipo Andes, magmas riolíticos que se emplazaron y cristalizaron como las rocas volcánicas y piroclásticas de Caicara, cristalizando a niveles meso-catazonales sus comagmáticos granitos calco-alcalinos de la Asociación Cuchivero (granitos de Santa Rosalía y San Pedro) y sus equivalentes del arco magmático Cuchivero durante el Evento Orocaima (1980 m.a-1880 m.a), al final de la Orogénesis Transamazónica que se había iniciado hacia 2300 m.a y que concluyó hacia 1800 m.a con presedimentación de la facies molasa, post-tectónica, del Grupo Roraima. (Mendoza, 2005).

De esta forma hacia 1800 m.a se había consolidado el final de la orogénesis Transamazónica, con un gran bloque continental (Imataca+Pastora-Botanamo+ Cuchivero) y sus equivalentes hacia el Sur en Brasil y hacia el Este en África Occidental, formando parte de la amalgamación del supercontinente Atlántica-Caura.

Los granitos de Cuchivero han sido interpretados también por algunos autores como granitos post-colisión, finalizando así la orogénesis Transamazónica, pre-Cuchivero. Lo cierto es que las únicas rocas que son realmente post-tectónicas, post-orogénicas, son las de Roraima, cercanas en su base a 1800 m.a, es decir después del evento Orocaima, o Cuchivero, y por lo tanto las rocas graníticas de Cuchivero son tectónicas tardías, como lo

demuestra su débil pero constante foliación de tendencia N-NO desde Caicara hasta la provincia Tapajós en Brasil, por más de 3.000 Km. de distancia, así como su siempre presente asociación mineral metamórfica de muy bajo grado (albita-epidoto-zoicita). (Mendoza, 2005).

La zona de contacto o sutura de Imataca+Pastora con Cuhivero se localiza hacia el actual Río Caura y marca una gran discordancia en tiempo (3410 m.a y 2200 m.a de Imataca y Pastora versus 1800 m.a de Cuhivero), con tendencias estructurales (tendencias NE de Imataca, NO de Pastora y NE de Botanamo versus NO de Cuhivero) que se denomina **Frente Tectónico o Sutura Caura**. Esta sutura formó parte del “collage” que dio origen al Supercontinente Atlántica-Caura, al final de la Orogénesis Transamazónica particularizada al Evento Uatumá, hacia 1780 -1800 m.a.

Hacia el Mesoproterozoico, Imataca+Pastora+Cuhivero (parte del Supercontinente Atlántica-Caura), se fracturó profundamente hasta el manto superior. Basaltos toleíticos ascendieron por el rift continental hacia la corteza mezclándose con material basal y por extensa diferenciación, mediante cristalización fraccionada, produjeron a niveles epizonales granitos rapakivis, de El Parguaza (1540-1380 m.a por Rb/Sr y U/Pb) comagmáticos con rocas volcánicas (granodioritas del Sipapo, granito hornabléndico de Guaniamito, etc.), granitos “especializados” plagioclásicos y pegmatitas ricas en estaño, topacio, tierras raras y torio-uranio.

Sobre Pastora+Cuhivero+Parguaza se depositaron, en diferentes cuencas y tiempos (2000 m.a - 1350 m.a) sedimentos molasoides, tectónicos tardíos, en una atmósfera aún predominante en CO₂ (Supergrupo Pre-Roraima) a post-tectónicos, en una atmósfera ya dominante en oxígeno (Supergrupo Roraima), de cuencas marginales, fluvio-continenciales a marino someras, en áreas pericratónicas y cratónicas, tectónicas tardías, que fueron intrusionadas por diabasas y rocas gabroides-tonalíticas (Asociación Avanavero).

Aproximadamente entre (1200-1000 m.a), el bloque Imataca + Pastora + Cuchivero + Parguaza y Roraima colidió con el bloque Garzón-Jari Falsino de Colombia y Brasil, produciéndose la **sutura Río Negro-Atabapo-Orinoco**, formando así parte del conocido supercontinente **Rodinia**, con reactivación de antiguas fallas (Parguaza, Suapure, Cabruta, Caura, Caroní), desarrollo de metamorfismo de bajo grado y retrógrado. Estas reactivaciones acentuaron la profundidad y ancho de las fracturas; para más tarde, ser ampliadas y extendidas a profundidad, facilitando así el emplazamiento de material del manto en una corteza muy espesa con gradiente geotérmico alto, en un ambiente continental atectónico, asociados a la ruptura del Supercontinente **Rodinia**, pre- inicios de la **orogénesis Brasiliana Pan-Africano**. (Ver figura 5-3).

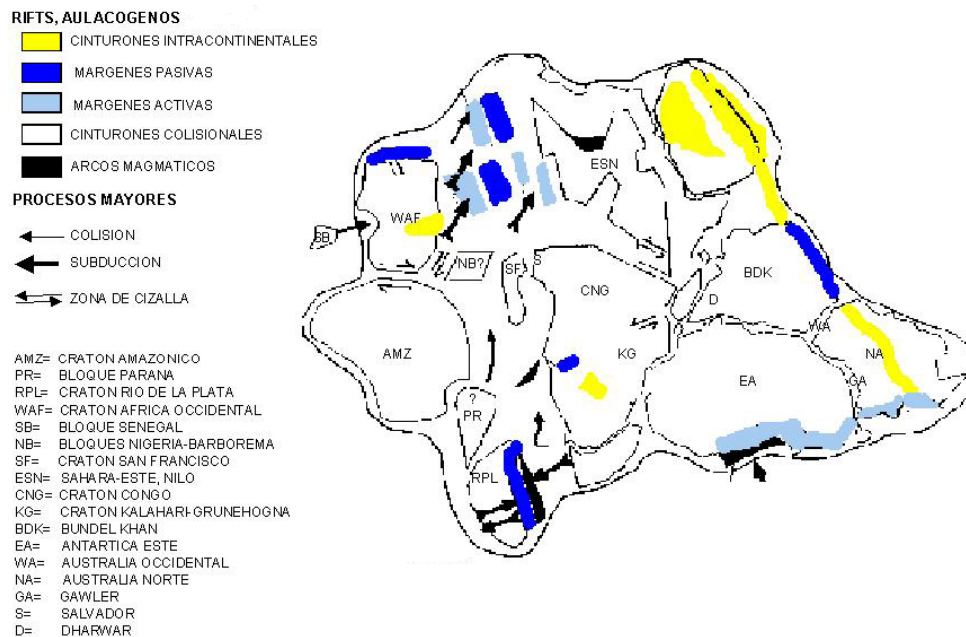


Figura 5-3. Supercontinente Gondwana y Orogenesis Brasiliano Pan Africano

(Tomado de Cordani y otros, 2000).

Hacia los 540 m.a se fueron aglutinando los fragmentos de Rodinia, formando un nuevo supercontinente denominado **Gondwana**, el cual colidió con otro supercontinente, al norte, conocido como Laurentia hacia 275 m.a, dando paso a la formación del supercontinente **Pangea**.

Hacen unos 200 m.a se inició el fracturamiento de la Pangea, la separación de África de Sur América, dando origen al Atlántico, (Ver figura 5-4) con la última reactivación de la Falla de Guri, actuando como falla transcurrente en zona continental y como falla de transformación en áreas oceánicas. A través de la Falla de Guri y de las fallas paralelas y subparalelas a ella (Fallas Guasipati, Laguna, etc.) en el Escudo de Guayana se emplazaron rocas toleíticas máficas y ultramáficas. (Mendoza, 2005).

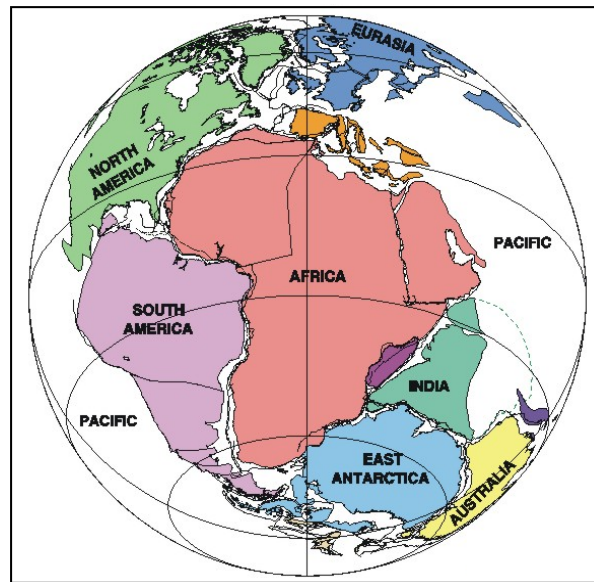
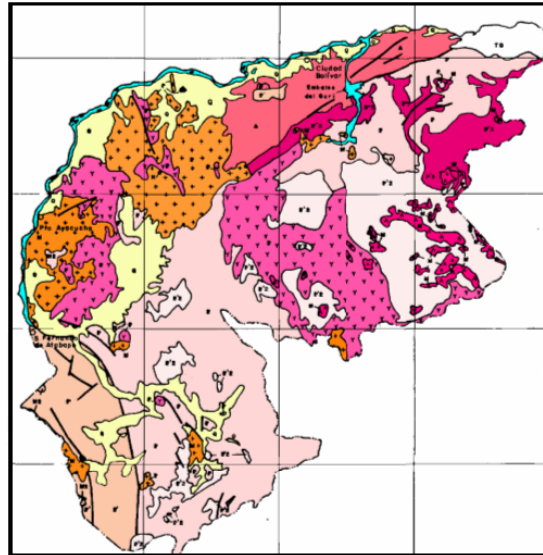


Figura 5-4. Separación del Supercontinente Pangea, dando origen al Atlántico
(Tomado de hismap.wz.cz/svet/pangea.jpg)

El Escudo de Guayana permaneció estable desde entonces con levantamientos isostáticos, dejando algunos grabens con depósitos de sedimentos de arenas con gas, de edad Terciario, como los de Guyana.

En la figura, (figura 5-5) puede observarse la disposición actual del escudo de Guayana y la distribución de las rocas o unidades tectonoestratigráficas que lo conforman, propuestas por (Pimentel y otros, 2000).



| TERRENO IMATAKA | TERRENO ORINOCO | SUPRA TERRENO |
|---|---|---|
| <p>A COMPLEJO DE IMATAKA (BASAMENTO 3.4-2.5 G)</p> | <p>Q CUARTENARIO: FORMACION MESA</p> <p>TO SEDIMENTOS TERCARIOS</p> <p>CM CARBONATITAS DE CERRO IMPACTO (EDAD DESCONOCIDA, edad kimberlitas)</p> <p>ZoM KIMBERLITAS ECLOGITICAS DE GUANIAMO (0.711 Ga)</p> <p>M+ ASOCIACION SUAPURE O GRANITOS ANOROGENICOS RAPAIVIS DEL PARGUAZA Y EQUIVALENTES (1.54-1.37 Ga)</p> <p>M2 RIFTING CONTINENTAL: MAGMATISMO BASICO DE LA ASOCIACION AVANAVERO (1.77-1.65 Ga)</p> <p>P' MAGMATISMO CALCO-ALCALINO TIPO CUCHIVERO DE ARCO MAGMATICO O INTRAPLACA SIN DIFERENCIAR DEL AMAZONAS (1.88-1.73 Ga)</p> <p>P₁ VOLCANISMO CALCO-ALCALINO DE CAICARA COMAGMATICO CON GRANITOS DEL ARCO MAGMATICO DE CUCHIVERO (1.97-1.73 Ga)</p> <p>P+ MAGMATISMO GRANITICO INTRAPLACA O DE ARCO MAGMATICO TIPO CUCHIVERO (1.95-1.80 Ga)</p> <p>P₂ ASOCIACIONES TIG REACTIVADOS (GRANITO LA ENCRUCIJADA 2.1-2.0 Ga)</p> <p>P CENTURONES DE ROCAS VERDES PASTORA, BOTANAMO (2.50-2.22 Ga)</p> <p>P₃ COMPLEJO DE SUPAMO: TTG (2.50-2.22 Ga)</p> | <p>P? SEDIMENTOS MOLASOIDES DE RORAIMA (1.79-1.45 Ga) Y PRE-RORAIMA (2.0-1.8 Ga)</p> |

Figura 5-5. Unidades Tectonoestratigraficas del escudo de Guayana (Modificado de Pimentel y otros, 2000).

5.3- Provincias Petrotectónicas de Amazonas:

A continuación se describen las rocas aflorantes en la zona de estudio, que debido a su complejidad litológica, resultó conveniente para (Mendoza y otros, 1.977) reagrupar en cinco provincias o dominios petrotectónicas del estado Amazonas: **Ayacucho, Manapiare, Alto Orinoco, Siapa y Casiquiare**. Las subprovincias Ayacucho y Manapiare equivalen al Dominio Ventuari y las del Alto Orinoco, Siapa y Casiquiare equivalen al Dominio Casiquiare. (Ver figura 5-6).

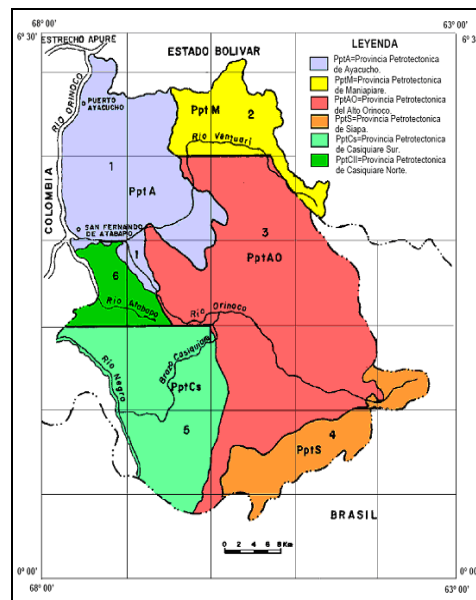


Figura 5-6. Mapa Geológico Esquemático del Estado Amazonas, (Tomado de Mendoza y Otros, 1977).

5.3.1.- Provincia Petrotectónica de Ayacucho:

La provincia incluye granitos anorogénicos más jóvenes y anteriores a 1.550 m.a, tipo Granito Rapakivi del Parguaza, Atabapo (1696 m.a por Rb/Sr, roca total), Cuao, Granito del Marieta y facies de éstos como la Granodiorita del Sipapo y las Riodacitas Porfídicas del Guayapo (1340 ± 10 m.a), el Granito de Guapuchí, etc., todos ellos intrusivos en un basamento formado por rocas volcánicas tipo Volcánicas de Caicara y granitos biotíticos tipo Santa Rosalía de la Asociación Cuchivero. Las foliaciones del basamento y fracturas en todas las rocas con orientación N 10°-30° O, están cortadas por

fracturas N 30°-50° E. A lo largo de estas fracturas y en la intersección de tales sistemas se emplazaron complejos alcalinos con relativos altos contenidos de U, Th y otros elementos.

Geomorfológicamente, la subprovincia presenta planaltos, como el de Pijiguaos, Chivapure, Cataniapo, etc, que por lixiviación tropical lluviosa dió origen a gigantescos depósitos de lateritas alúminicas o lateritas bauxíticas. Siendo Ayacucho la provincia que corresponde al área de estudio, en el noroeste del estado Amazonas.

5.3.2.- Provincia Petrotectónica de Manapiare:

Provincia compuesta de intrusiones de rocas volcánicas de los Ríos Asita y Parucito tipo Formación Caicara y de granitos biotíticos, tipo Granito de Santa Rosalia del Grupo Cuchivero, en un basamento bien expuesto en el Alto Ventuari, en las cercanías del Cerro Impacto y otras localidades. La subprovincia muestra relieve elevado y accidentado, pero menos prominente que el de la subprovincia de Ayacucho.

5.3.3.- Provincia Petrotectónica del Casiquiare:

Es una subprovincia que se caracteriza por su plano y bajo relieve conocido como Penillanura del Casiquiare y por su complejidad lito-tectono-metamórfica. Al igual se caracteriza por la ausencia total de rocas volcánicas y plutónicas tipo Grupo Cuchivero, por la escasez de metasedimentos y de sedimentos tipo Roraima. Tiene aspecto de Provincia Pastora, donde los equivalentes del Complejo Supamo han sido tectonizados y los cinturones de rocas verdes han sido parcialmente erosionados.

5.3.4.- Provincia Petrotectónica del Alto Orinoco:

Esta subprovincia se extiende desde la confluencia del Río Ventuari en el Orinoco hasta Parima y Surucucu en Brasil. Es la subprovincia intermedia en composición litológica, metamorfismo y tectonismo entre las subprovincias Manapiare y Casiquiare. Litológicamente está formada por cuarzo-monzonitas semimasivas como la de los Ríos Paru, Yureba y Marueta, gneises, granitos tonalitas y rocas gabroides tipo Complejo

Supamo, volcánicas tipo Formación Caicara y granitos tipo Santa Rosalia del Grupo Cuchivero.

5.3.5.- Provincia Petrotectónica de Siapa:

Se extiende desde la divisora de aguas del Alto Orinoco y las de su afluente Mavaca con las del Rio Siapa. Tiene la misma tendencia estructural que la Provincia de Imataca. Litológicamente se compone de metasedimentos tectonizados, cizallados de esquisto cuarzo-micaceos-estaurolitos-granatíferos y genis cuarzo-feldespaticos-epidotico-anfibolíticos o remantes de cinturón de rocas verdes, sobre un basamento de gneises tonalíticos y migmatitas equivalentes.

5.4- Geología Noroccidental del Estado Amazonas:

En base a trabajos previos realizados en la zona de estudio, se puede establecer que la geología del área noroccidental del estado Amazonas, está conformada por granitos anorogénicos tipo Granito Rapakivi del Parguaza y facies de éstos como la Granodiorita del Sipapo, todos ellos intrusivos en un basamento formado por rocas volcánicas tipo Volcánicas de Caicara y granitos biotíticos tipo Santa Rosalía de la Asociación Cuchivero.

Discordante encima de toda la secuencia desde los 6° 30' hasta los 4° de latitud norte, aparecen dispersos remanentes erosionales que constituyen numerosos tepuis de rocas del Supergrupo Roraima, diferentes estratigráficamente unos con otros (Ghosh, 1.977) pero que corresponden a la parte superior de Roraima con edad cercana a los 1500 m.a, y espesor de 1200-1400 m en las áreas de cerro Sipapo, ya que descansan discordantes sobre el Granito Rapakivi de El Parguaza, y se extienden hacia el oeste, casi hasta el Río Orinoco (Mendoza y otros, 1977). (Ver figura 5-7).

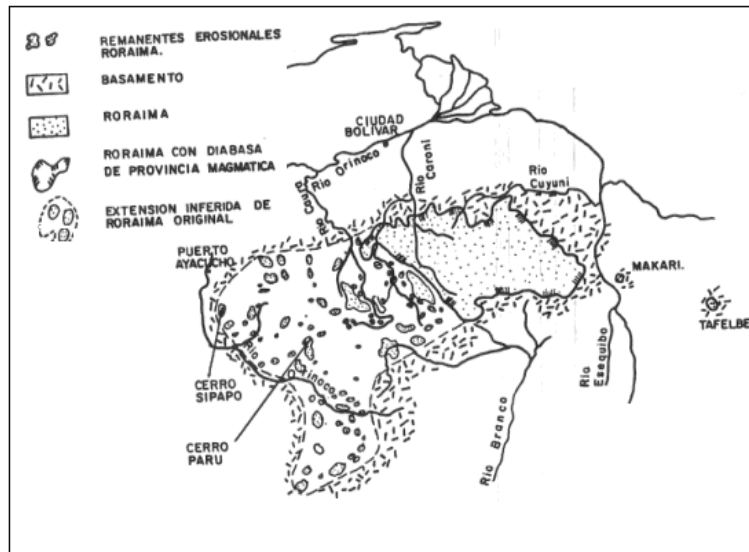


Figura 5-7. Distribución del grupo Roraima en el escudo de Guyana (Tomado de Ghosh, 1977).

En el estado Amazonas, las rocas del grupo Roraima forman cerros o tepuis, dispersos en un área extensa. Algunos de los tepuis mejor conocidos son los cerros: Bloque Sipapo (Autana, Cuao), Paru, Morrocoy, etc.

Los estratos del bloque Sipapo yacen discordantemente sobre el Granito Rapakivi del Parguaza y sus facies cogenéticas equivalentes (Mendoza, 1977). Consisten en una secuencia monótona de arenisca cuarzosa a arenisca-feldespática, de grano fino medio con salificación variable. Presenta abundante estratificación cruzada, laminaciones y estratificación gradada fina.

En términos muy generales, (Ghosh, 1977) subdivide esta secuencia en tres miembros:

- Miembro Inferior o Basal: (Roraima Basal)

Este miembro, de 300 a 400 m de espesor, se encuentra bien expuesto en el Río Asisa y en la costa noroeste del cerro Paru, está compuesto principalmente por arenisca cuarzosa de grano fino medio, muy salificada, con laminaciones de intensa estratificación

cruzada. No se ha observado feldespatos en estas areniscas, pero contienen ocasionalmente capas delgadas de pequeños clastos y bancos arenosos ricos en hematita.

- Miembro Intermedio: (Roraima Intermedio)

Miembro de 200 m de espesor, consiste en areniscas curzosas, feldespáticas a arcillosas, asociadas con una capa delgada de lutitas limosas de color gris y negro, con la presencia de estratificación cruzada bimodal, rizaduras y laminación paralela. Se considera que las lutitas negras son indicios de ambientes pobres en oxígeno. En algunas localidades del Río Paru las lutitas exhiben estructuras lenticulares posiblemente originadas por deformación.

- Miembro Superior: (Roraima Superior)

En general es similar al miembro basal, forma los prominentes acantilados típicos de los tepuis, tiene 600 a 700 m de espesor. Está compuesto por areniscas cuarzosas rojas, ferruginosas de grano medio, con ausencia de feldespato y abundante estratificación cruzada bimodal. En este miembro se presentan paleocorrientes con direcciones de fuerte competencia hacia el oeste (270° - 300°).

Una variante litológica interesante, es la presencia de capas lenticulares de arcillosita rojita que contienen en forma de laminaciones muy finas, microscópicas, laminas de carbonato de calcio y de arcillas con cristales de dolomitas diseminados en proporción variable. La presencia de capas ricas en carbonatos de calcio sugiere un ambiente marino o de aguas poco profundas.

La siguiente secuencia expuesta, es una secuencia estratigráfica tentativa, muy general de esta área, específicamente del bloque Sipapo, propuesta por (Ghosh, 1.977):

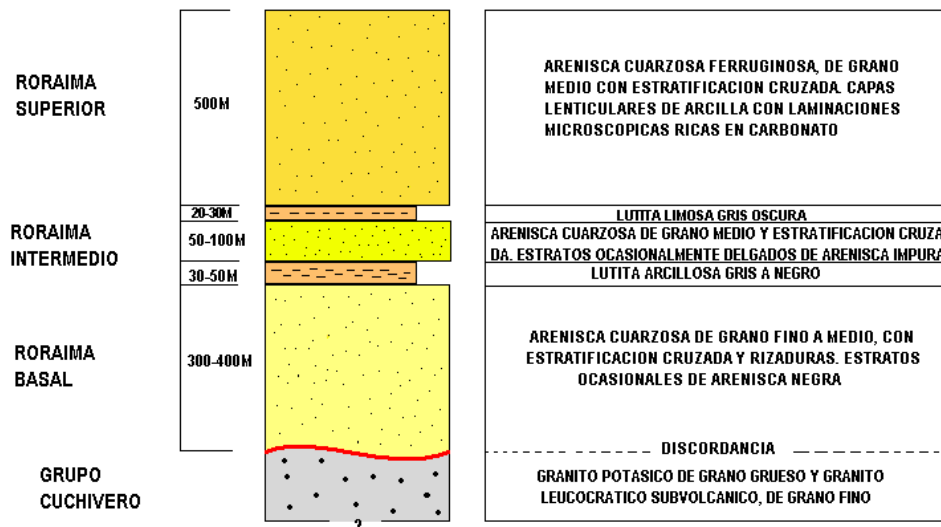


Figura 5-8. Secuencia estratigráfica tentativa del grupo Roraima en el Estado Amazonas, propuesta por (Ghosh, 1977)

5.4.1.- Geología Estructural

En el área noroccidental del estado Amazonas, las foliaciones del basamento y fracturas en todas las rocas con orientación N 10°-30° O, están cortadas por fracturas N 30°-50° E. Siendo elementos estructurales de gran importancia, que intervinieron en la evolución tectónica de dicha de zona, estas fracturas o fallas han sufrido períodos de reactivación e inversión durante las distintas fases tectónicas que actuaron a través del tiempo, afectando la forma y la sedimentación depositadas en esta.

A su vez, (Ghosh, 1.977) describe la existencia de ciertas tendencias estructurales principales que dominan la geometría de las rocas sedimentarias de Roraima en el estado Amazonas:

- 1.- Los estratos de Roraima se caracterizan por buzamientos muy suaves horizontales.
- 2.- Existencia de ocasionales fallas gravitacionales simples.
- 3.- Comportamiento vertical a subvertical de las fallas.

- 4.- Escasas fallas inversas.
- 5.- Amplios pliegues abiertos y monoclinales ocasionales.
- 6.- Las fallas o fracturas en algunas zonas presentan direcciones noreste – suroeste y noroeste – sureste, sin mayor desplazamiento.
- 7.- Reactivaciones e inversiones de fallas preexistentes.

Capítulo VI
MARCO METODOLÓGICO

6.1.- Metodología Aplicada:

Para la elaboración de la presente investigación, se elaboró un cronograma de actividades basado en dos etapas (Etapa de Recopilación Bibliográfica y Etapa de oficina); realizado en un período de tiempo de seis meses, lo que permitió llevar a efecto los objetivos planteados.

6.1.1.- Etapa de recopilación bibliográfica:

Se realizó la búsqueda, revisión y recopilación bibliográfica de textos, tesis de grado, artículos científicos, trabajos previos, material cartográfico (mapas topográficos, mapas estructurales a escala 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000 y 1:50.000), fotografías aéreas, ortofotomapas a escala 1:25.000, e imágenes satelitales (Landsat 7 ETM+) referentes a la zona de estudio; esto con la finalidad de obtener información sobre las características estructurales y estratigráficas regionales de la zona.

A continuación se detallan las actividades desarrolladas en esta etapa:

- La recopilación de trabajos previos, tesis y publicaciones se llevó a cabo en la Biblioteca Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, y Biblioteca Alonso Gamero de la facultad de ciencias (ambas ubicadas en la Universidad Central de Venezuela), Instituto de Estudios Avanzados (Universidad Simón Bolívar), Instituto Nacional de Geología y Minería de Venezuela (**INGEOMIN**), CVG Técnica Minera (**TECMIN**) empresa filial de la Corporación Venezolana de Guayana, adscrita al Ministerio del poder popular de Industrias Básicas y Minería, Ministerio del Poder Popular de Energía y Minas; y Universidad de Oriente.

- La recopilación del material cartográfico y fotogeológico se realizó en el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, en Técnica Minera (**TECMIN**) y en el Instituto Nacional de Geología y Minería de Venezuela (**INGEOMIN**).

6.1.2.- Etapa de Laboratorio:

Etapa en la cual se genera el proceso, análisis e interpretación de la información obtenida del material recopilado y de las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio. Esta se dividió a su vez en 5 fases:

A.-Fase de revisión y síntesis de la información bibliográfica recopilada.

B.-Fase de revisión de material cartográfico y fotogeológico.

C.-Fase de corrección de imágenes.

Consiste en la revisión de imágenes satelitales. Para la interpretación de las imágenes satelitales es necesario su corrección y posterior procesamiento, es por esta razón que se llevaron a cabo 3 tipos de correcciones (atmosférica, geométrica y radiométrica), con la aplicación de Software **ENVI 4.2** y **Erdas**.

Corrección atmosférica:

Permite atenuar el efecto causado por la atmósfera, en donde la presencia de aerosoles y vapor de agua conlleva a una dispersión de manera selectiva de la radiación transmitida entre la superficie y el sensor. De esta forma, la radiancia que recibe el sensor no corresponde a la emitida por la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido como consecuencia del efecto dispersor de la atmósfera (Chuvienco, 2006). (Ver figura 6-1).

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

dispersión sufrida por una imagen no se compara con otra de fecha diferente (Chuvieco, 2006).

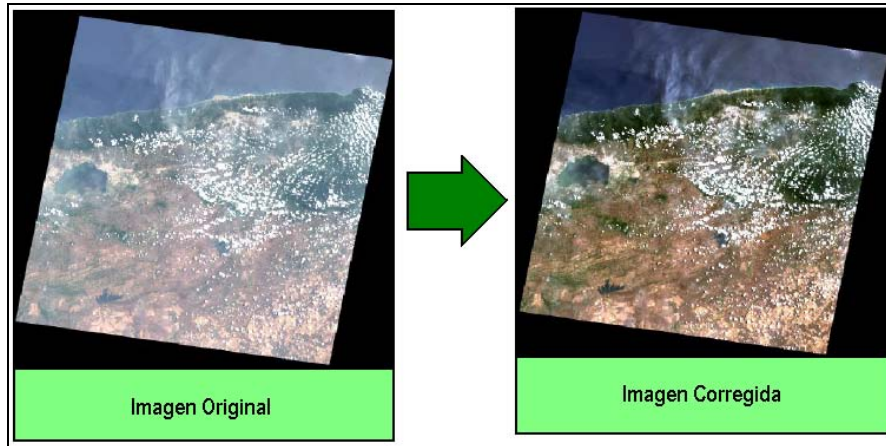


Figura 6-1. Imagen satelital original e Imagen Atmosféricamente corregida (Tomado y modificado de FII – IGVS, Curso Introductorio a la Geomática).

Corrección geométrica:

Todas las imágenes de satélites comerciales son corregidas por efecto geométrico, estas correcciones incluyen: (a) corrección de oblicuidad, que considera el aspecto del movimiento terrestre cuando una imagen es capturada, (b) corrección de la distorsión del barrido, la cual toma en cuenta que el campo instantáneo de vista cubre más territorio al final de la línea de barrido que en la mitad. La corrección geométrica va a depender del objetivo del estudio y del proyecto en que esté trabajando el usuario (Chuvieco, 2006). (Ver figura 6-2).

Para una escala de trabajo regional, basta con la corrección que le aplica el proveedor a la imagen. Por el contrario, cuando se requiere obtener más detalle de la imagen, se necesitan aplicar las correcciones correspondientes, se seleccionan puntos de control, que se encuentren en las imágenes, con la finalidad de corregir y georeferenciar las coordenadas específicas de cada uno.

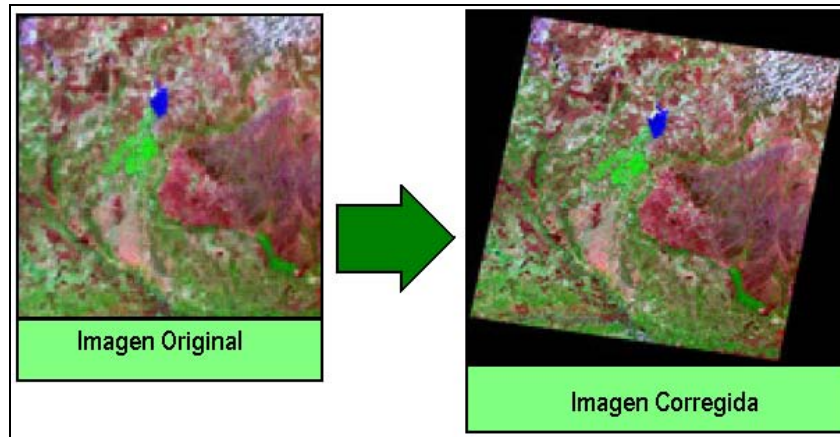


Figura 6-2. Imagen satelital original e Imagen Geográficamente corregida (Tomado y modificado de FII – IGVSb, Curso Introductorio a la Geomática).

Corrección radiométrica:

El término correcciones radiométricas corresponde y designa aquellas técnicas que modifican los niveles digitales originales, con el objeto de acercarlos a los que estarían presentes en la imagen en el caso de una recepción ideal (Chuvieco, 2006). Estas correcciones están referidas a la remoción o disminución de las distorsiones en el grado de energía electromagnética que registra cada detector.

Las correcciones radiométricas engloban las distorsiones provocadas por la atmósfera, al igual que los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor. Las distorsiones más comunes a las cuales se les puede realizar corrección son: cuando se tienen valores uniformemente elevados por la neblina atmosférica; ya que ésta, dispersa las longitudes de onda corta; bandeamientos producidos cuando los detectores se encuentran sin calibración; y los que se refieren a ruido al azar que se producen debido al desempeño no sistemático e impredecible del sensor o de la transmisión de datos (Salazar, 2006).

Resalta los parámetros geológicos y cartográficos de interés, en conjunto, con la combinación de bandas, la variación de histogramas y la aplicación de filtros que tienen

como finalidad facilitar la identificación de rasgos estructurales, estratigráficos y mineralógicos presentes en la zona.

D.- Fase de Interpretación de Imágenes.

Esta interpretación geológica se realiza en formato digital, mediante el uso de los software **ArcGIS y Erdas**, herramientas que permiten digitalizar las trazas de las capas, los contactos litológicos, las discordancias, las zonas con posible presencia de anomalías de uranio, estructuras de deformación, y los drenajes observados en el área de estudio.

Por último y mediante la aplicación del software **ENVI** se realizó un modelo digital de elevación, que facilita la interpretación de la geometría y disposición de los estratos en el espacio, permitiendo la elaboración de un mapa geológico digital a escala 1:100.000.

E.-Fase de Integración y Comparación de Información.

Consiste en integrar los datos bibliográficos, los resultados de la interpretación de imágenes satelitales e información cartográfica, mediante un análisis comparativo, con el objetivo de confirmar y/o complementar la información geológica existente.

6.2- Procesamiento de Imagen LANDSAT 7 ETM+:

Cuando los satélites de observación terrestre, capturan la radiancia o energía electromagnética reflejada por los objetos en la superficie, estos son alcanzados por la luz del sol; por lo tanto estas energías deben pasar por ciertos filtros antes de ser capturadas por estos sensores. La función de los filtros es hacer que la energía interactúe con las partículas o gases presentes en estos cuerpos y puedan ser afectadas por mecanismos de dispersión, absorción, reflexión y transmisión de la radiación.

El primer paso en esta metodología, es la obtención de la imagen y del archivo formato SCII (metadata), el cual contiene una serie de datos relativos a la imagen, fecha de adquisición, elevación del sol, azimuth, etc. Archivos descargables a través del sitio web:

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> perteneciente a la Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility.

Una vez adquirida la imagen (**P003R054**) en formato TIFF y la metadata, se procede a los siguientes pasos:

6.2.1.- Corrección de Radiancia:

Los valores de los píxeles en imágenes satelitales representan la radiancia de la superficie en forma de números digitales (ND), los cuales son calibrados para ajustarlos en un rango de valores, mediante el uso software ENVI 4.2. (Ver Apéndice).

6.2.2.- Fusión de Bandas:

Una vez obtenidas todas las imágenes con radiancia corregida, se procede a apilarlas en una sola imagen, mediante la función Layer Stacking. En este procedimiento se deben colocar las bandas en orden creciente, ya que es importante seguir la secuencia original de las bandas. (Ver Apéndice).

6.2.3.- Conversión a Formato BIL:

Los archivos de salida generados en el paso anterior se encuentran en formato BSQ (Formato Secuencial de Bandas), sin embargo para la mayoría de las aplicaciones de procesamiento del ENVI, se utiliza el formato BIL (Formato de Bandas Intercaladas por Líneas). Por esta razón se debe realizar una conversión previa de BSQ a BIL. (Ver Apéndice).

6.2.4.- Corrección Atmosférica (FLAASH):

El comando de corrección atmosférica utilizado en ENVI, es llamado FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Esta aplicación elimina de la radiancia recibida por el sensor los efectos de absorción y dispersión de la energía electromagnética, causados por partículas y moléculas atmosféricas en suspensión. (Ver Apéndice).

6.2.5.- Corrección Fracción Mínima de Ruido (MNF):

En las imágenes suceden diversos efectos de ruido debido a interferencias mecánicas en el sistema, distorsionando la señal registrada o eliminando la información radiométrica contenida. La corrección de fracción mínima de ruido permite disminuir el ruido en la data espectral. (Ver Apéndice).

6.2.6.- Índice de Pureza de Píxel (PPI):

La herramienta de Índice de Pureza de Píxel (PPI) del **ENVI 4.2** tiene como utilidad encontrar espectralmente píxeles puros o píxeles extremos en los datos multiespectrales. La finalidad de encontrar estos píxeles puros es para trabajar con la mayor cantidad de píxeles verdaderos y eliminar aquellos que no aportan información. Este procesamiento, como su nombre lo indica, se encarga de elevar el nivel de pureza de la imagen. (Ver Apéndice).

6.2.7.- Spectral Angle Mapper (SAM):

Herramienta que permite calcular la distancia angular existente entre un espectro de referencia y un píxel cualquiera; tiene como finalidad filtrar la cantidad de píxeles existentes en la data cuando éstos posean un ángulo mayor al del espectro de referencia. (Ver Apéndice).

6.2.8.- Clasificación No Supervisada:

La clasificación no supervisada define las clases espectrales que se presentan en la imagen, en función de la búsqueda automática de valores homogéneos. Es importante señalar que la intervención del usuario está centrada mucho más en la interpretación de los resultados que en la agrupación de las clases.

Esta clasificación consiste en un algoritmo de procesamiento que reconoce automáticamente las clases espectrales sin conocimiento previo del área. La separación de

estas clases se realiza usualmente mediante métodos estadísticos o geométricos por el programa. (Ver Apéndice).

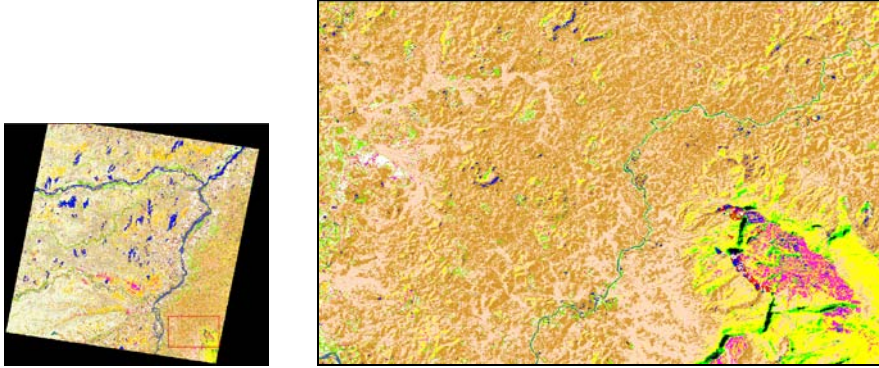


Figura 6-3. Imagen resultado de la clasificación no supervisada, procesamiento estadístico donde el software agrupa píxeles en función de características espectrales comunes.

6.2.9.- Clasificación Supervisada:

Aunque la clasificación supervisada es realizada utilizando la imagen de fusión de bandas, obtenida en el paso (6.1.2), es importante señalar que se procede de forma inversa a como se procedió con la clasificación no supervisada con los programas (**ENVI 4.2** y **ERDAS 8.5**), ya que en este caso se le asignan directamente a la imagen las distintas clases observadas, con la finalidad, que el software ubique todos los píxeles que presentan alguna similitud a lo largo de toda la extensión de la imagen. (Ver Apéndice).

Para establecer las diferencias entre las características resaltantes presentes en la zona de estudio se utilizaron firmas espectrales, donde se realizó un barrido por toda la imagen, enumerando clases para cada uno de los píxeles tomados y comparándolos con distintas clases asignadas en la misma imagen, donde se indicaron similitudes en la vegetación para aquellas firmas espectrales de igual comportamiento en la gráfica de Reflectividad/Longitud de ondas (μm). (Ver figura 6-4 y 6-5).

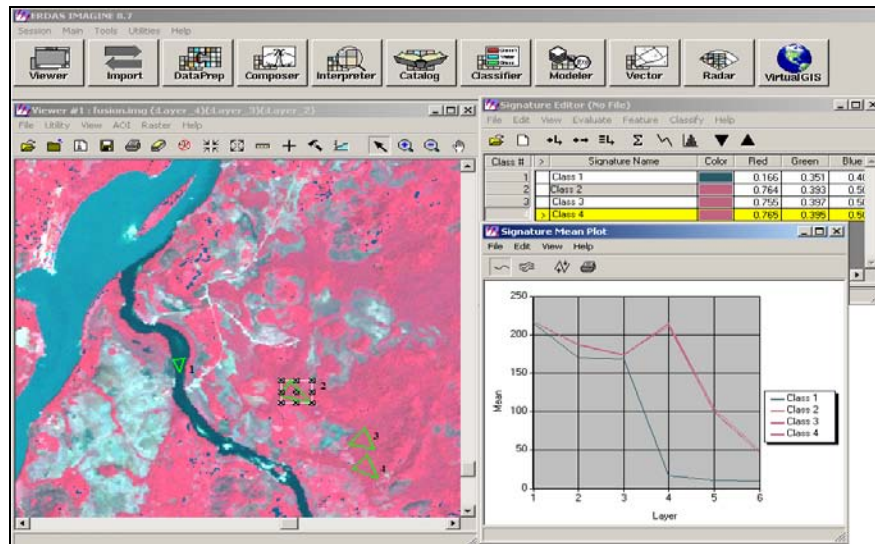


Figura 6-4. Imagen Landsat, muestra la ubicación de tres clases distintas seleccionadas en pixeles de igual tonalidad (clases 2,3 y 4), que comprueba la similitud de la vegetación, y la clase 1 seleccionada con pixeles de otra tonalidad que presenta un comportamiento distinto a las clases anteriores (corresponde al Rio Cuao). En la parte inferior derecha se muestra un cuadro con las firmas espectrales con sus respectivos comportamientos.

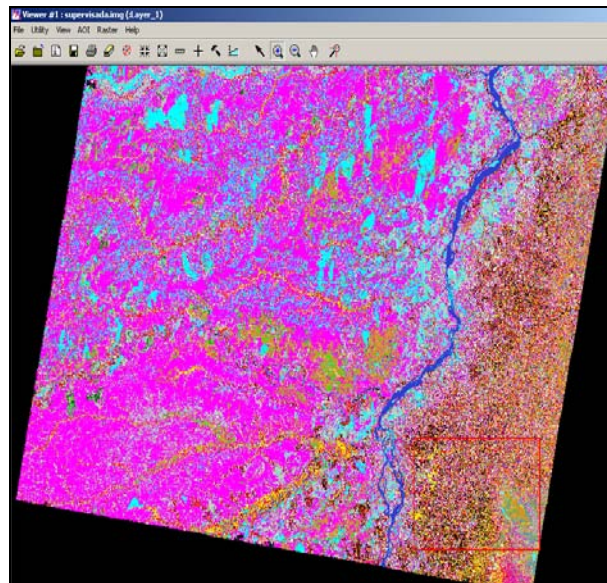


Figura 6-5. Imagen final de la clasificación supervisada generada a partir de las clases y colores asignados, apoyado en mapas preexistentes.

6.2.10.- Modelo Digital de Elevación:

Es una herramienta que nos permite observar en tres dimensiones la imagen en estudio, facilitando la observación de las trazas de capas, planos de buzamientos, estructuras de deformación, etc. (Ver figura 6-6).

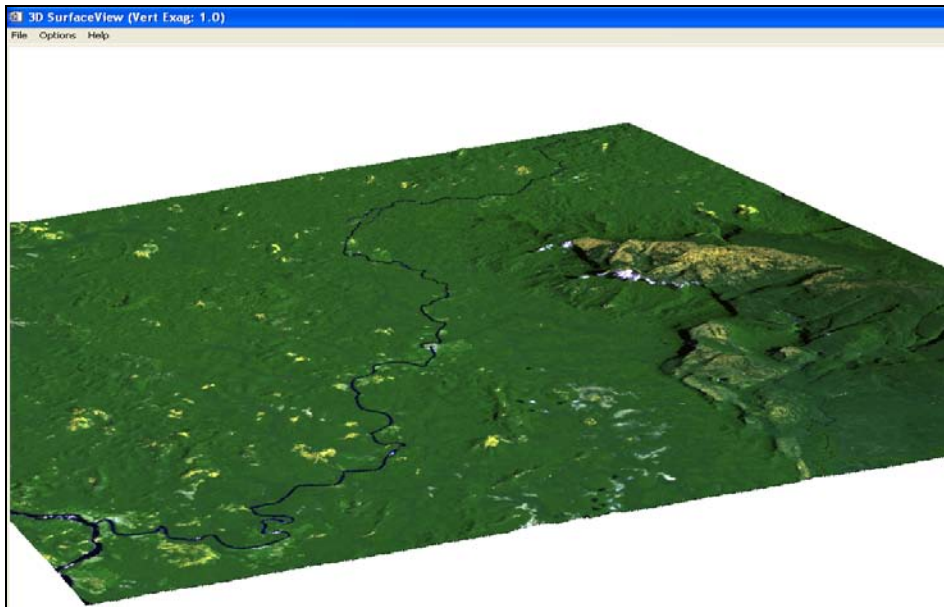


Figura 6-6. Modelo digital 3D de la zona de estudio con la imagen Landsat 7 de la corrección atmosférica en FLAASH.

6.2.11.- Aplicación de firmas espectrales para la detección de uranio:

Mediante el software ENVI 4.2 se pueden utilizar las firmas espectrales de minerales, las cuales se encuentran en el **Spectral Library** de dicho programa (Ver figura 6-7), para ser aplicadas a la imagen satelital con la finalidad de detectar algún comportamiento de estas firmas en la zona de estudio, indicando la posibilidad de encontrar cierta acumulación del mineral o minerales seleccionados para tal análisis. (Ver Apéndice).

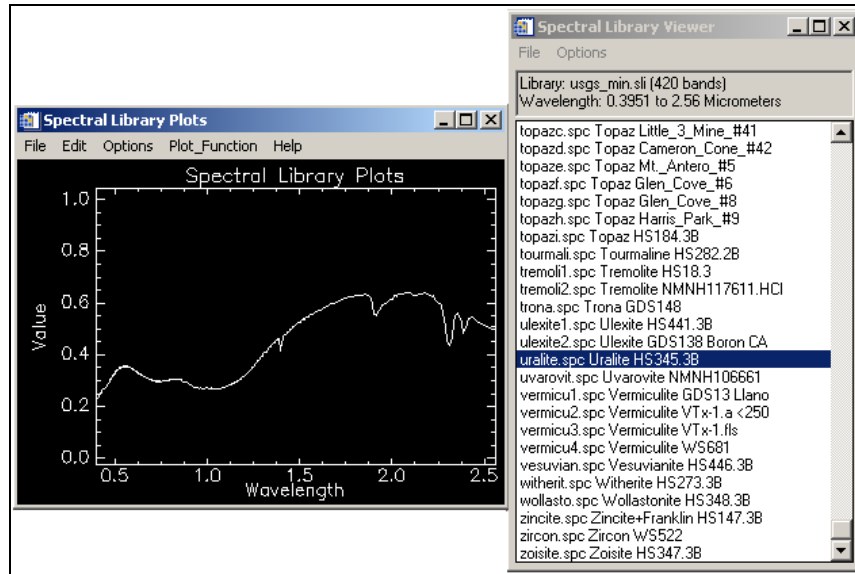


Figura 6-7. Firma espectral de la Uralita, observada en el Spectral Library.

6.2.12.- Elaboración del Mapa Geológico:

Una vez completado el manejo y análisis de los distintos productos obtenidos del procesamiento de Imagen, además de la recopilación y comparación con los mapas geológicos disponibles de la zona de estudio, se procede a la elaboración del mapa.

El mapa se elaboró usando el programa ArcGIS 9.1 específicamente en sus aplicaciones ArcMap y ArcCatalog, mediante la creación de “Shapefiles” para cada categoría (drenaje, estructuras, litología, toponimia, etc), de manera de facilitar el manejo de información.

Capítulo VII

RESULTADOS

- Descripción de Rasgos Geológicos
- Detección y Clasificación de Posibles Anomalías de Uranio

Una vez terminado el procesamiento y calibrado de la imagen satelital, procedemos a describir los rasgos topográficos, hidrográficos, estructurales, litológicos y mineralógicos de la zona en estudio, cuya interpretación permitió dilucidar la evolución morfoestructural de la misma, tomando como referencia los mapas geológico de CVG Técnica Minera (Gerencia de Proyectos Especiales – Región Guayana), el mapa topográfico e isométrico realizado.

7.1 Rasgos Topográficos

El relieve es la primera impresión que se obtiene cuando se observa un mapa, una fotografía aérea o una imagen de satélite, ya que es el producto de una serie de fenómenos naturales, así como de la interacción de los procesos exógenos y endógenos con la litología y estructuras presentes. Por esta razón, el objetivo del análisis topográfico es determinar la organización general de las formas de relieve o irregularidades. Para tal fin es necesario tener presente diversos criterios de clasificación, distribución, alturas, procesos erosivos de la zona por acción del clima, pendiente y orientación de las laderas, etc, permitiendo de esta manera la comprensión de las relaciones mutuas entre ellas, en función de la lateralidad, contigüidad y contactos entre las mismas.

En el área de estudio se observaron dos (2) relieves contrastantes, bien diferenciados, entre las zonas elevadas y las que se encuentran más bajas, adjudicándole a ésta una clasificación de topografía mixta o transicional que comprende alrededor de unos 2.400 Km². Un relieve llano (**Zona A**) denominado **Unidad de Planicies**, que representa el 70% de la superficie de la imagen, con extensión aproximada de 1.680 km², y un relieve amesetado (**Zona B**) denominado **Unidad de Meseta**, presente con el 30 % en el área de estudio, ocupando aproximadamente 720 km²; cuya distribución espacial puede ser apreciada en la figura 7-1. El Modelo Digital de Elevación (DEM), permitió diferenciar claramente los distintos tipos de relieves presentes en la zona de estudio.

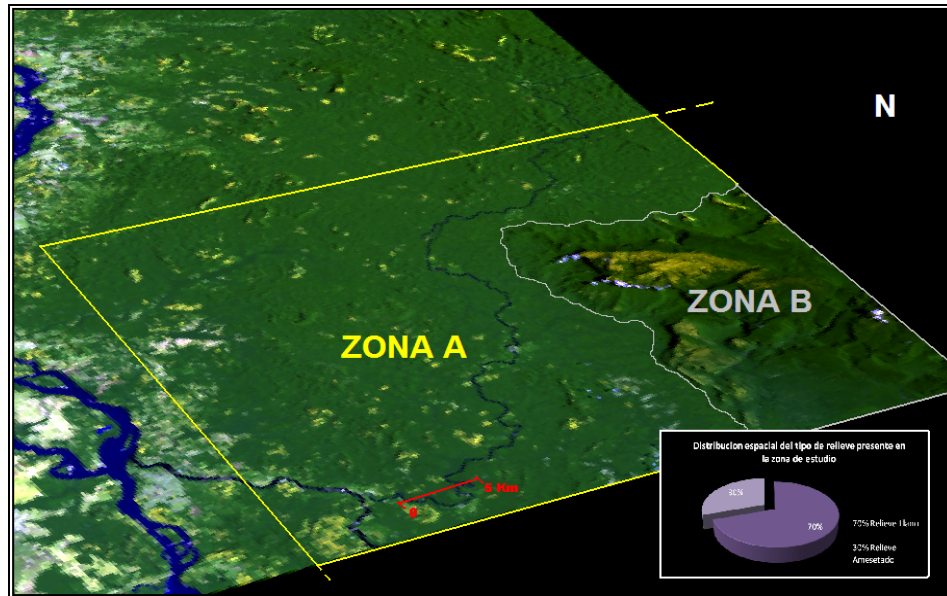


Figura 7-1. Imagen 3D de la zona de estudio, en donde se observa la variación entre las zonas altas y bajas, permitiendo diferenciar dos unidades topográficas: **Unidad de Planicies (ZONA A)** y **Unidad de Meseta (ZONA B)**.

La **Unidad de Planicies** es la más amplia de la zona, y a pesar de ser la zona con menores cotas, no es uniforme. Presenta una serie de ondulaciones y pequeños levantamientos que alcanzan los 250 m, como son los frecuentes Inselbergs y las formas dómicas graníticas, que no son más que elevaciones esporádicas, asimétricas, de cumbres convexas que presentan extensiones variables dentro de esta unidad. En estrecha relación con estos desniveles topográficos aparece regularmente un nivel fuertemente concrecionado, característico de una antigua superficie aplanada o como testigo de un antiguo proceso de aplanamiento ocasionado por un intenso evento erosivo, donde el socavamiento de la superficie por los ejes de drenaje ha determinado un modelado en media naranja (Ver figura 7-2).

Estas formas ocupan extensas áreas localizadas al norte de los Ríos Sipapo, Río Cuaoy y otras pequeñas áreas dispersas en la zona de estudio; entre las cuales destacan la Serranía de Coromoto y Serranía de Pava ubicadas en el extremo norte de la imagen. Las mismas fueron determinadas mediante el producto MNF, utilizando la combinación de

bandas RGB121 (Cañón rojo: Banda 1, Cañón verde: Banda 2, Cañón azul: Banda 1) en la imagen Landsat 7; ya que se pueden apreciar cambios notorios en las tonalidades de la imagen, alternando entre tonos color violeta e indicando irregularidades en el terreno (Ver figura 7-3).

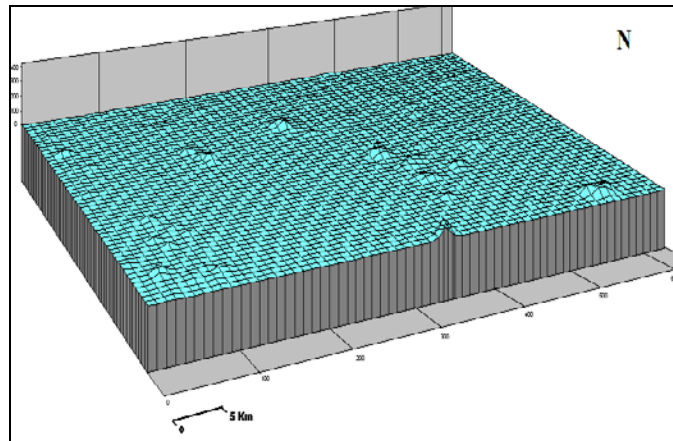


Figura 7-2. Bloque esquemático que muestra las alturas y formas que presenta esta unidad, se puede observar que este terreno posee una gran extensión llana, pero con algunas ondulaciones que llegan a alcanzar 150 – 200 m.

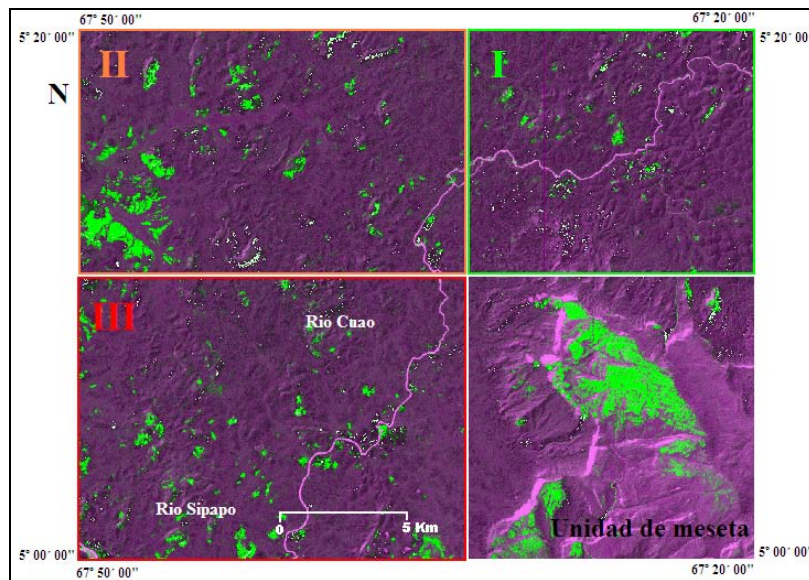


Figura 7-3. Imagen Landsat 7, MNF en combinación RGB121, donde se puede apreciar la distribución de estas formas o irregularidades topográficas en la **Unidad de Planicies**, la cual ha sido dividida en tres zonas (I, II y III) para una mejor interpretación.

Como se puede observar en la figura 7-3, estas formas topográficas conforman gran parte de la **Unidad de Planicies** (ejemplo de esto, son los sectores demarcados por los círculos segmentados), la **ZONA III**, ubicada en el extremo suroeste de la unidad, presenta la mayor distribución de elevaciones, con cotas que no sobrepasan los 250 m. Las **ZONAS I y II**, presentan en mayor cantidad las formas dómicas y de media naranja, las cuales pueden observarse interdigitadas con llanuras aluviales y presentando alturas mayores a las observadas en la **ZONA III**. En la **ZONA I**, se encuentra la mayor concentración de topografías onduladas, evidencia de los ciclos erosivos que han afectado la región. Estos rasgos son apreciables también en el mapa topográfico, mediante el comportamiento y distribución de las curvas de nivel.

La **Unidad de Planicies** se constituye en primer lugar de terrenos drenados por el cauce del Río Orinoco, Río Sipapo, Río Samariapo y Río Cuao, junto a sus respectivos afluentes. Estos terrenos se clasifican en llanuras de erosión y llanuras aluviales, formas fisiográficas derivadas a extensas zonas planas, con presencia de un manto arenoso resultante de la erosión de los macizos montañosos y de la deposición aluvial de desborde o encajada que se produce a lo largo de los principales ríos. Se ubican con mayor abundancia hacia la zona noroccidental de la imagen Ver figura 7-4, en áreas adyacentes o zonas de desbordamiento de los ríos anteriormente señalados.

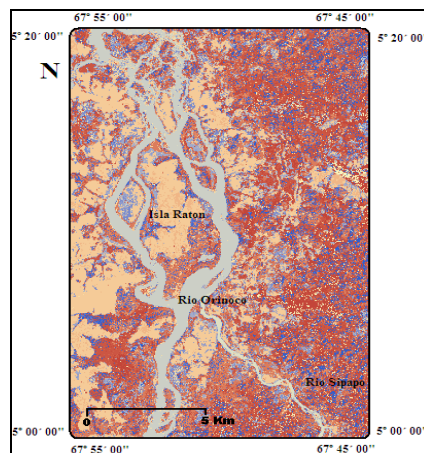


Figura 7-4. Imagen landsat 7 como resultado de la clasificación supervisada, donde se puede apreciar la distribución de estos mantos arenosos formando parte de la **Unidad de Planicies**.

La **Unidad de Meseta** constituye las formas tabulares sobresalientes, bordeadas por desniveles abruptos que llegan a superar los 100 m. Es la zona en posición topográfica más alta, siendo su altura máxima de 1.800 m, y disminuye hasta 200 m aproximadamente en el contacto con la zona de planicies. (Ver figura 7-5).

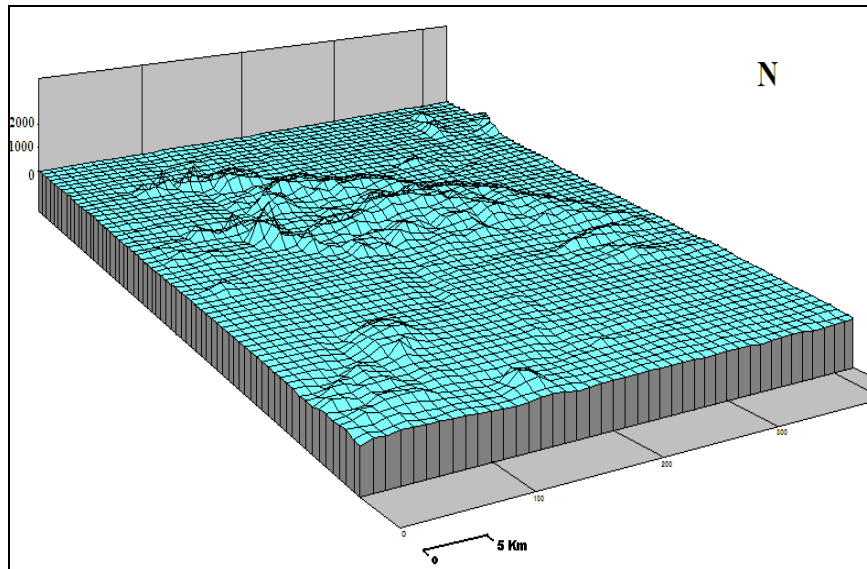


Figura 7-5. Bloque esquemático que muestra las alturas y formas que presenta la **Unidad de Meseta**, se puede observar la distribución del terreno y parte de la extensión que ocupa; nótese que en esta unidad las alturas varían entre 200 m y 1600 m, aproximadamente.

La unidad se presenta geoméricamente como un bloque con distintos desniveles, que comprende el sureste del área en estudio. Está conformada en primer lugar por extensas zonas planas en el tope y pendientes abruptas, forma muy característica de los tepuyes, los cuales son consecuencia de los cambios y transformaciones ocurridos en gran parte de los sedimentos acumulados en las tierras emergidas, y provenientes de la acción de procesos erosivos sobre el escudo. En esta unidad también se encuentran profundas zonas que constituyen valles encajados, productos de la acción erosiva de los drenajes presentes; valles amplios y estrechos, pocos profundos, en los cuales el drenaje se encuentra adaptado a la topografía. (Ver figura 7-6).

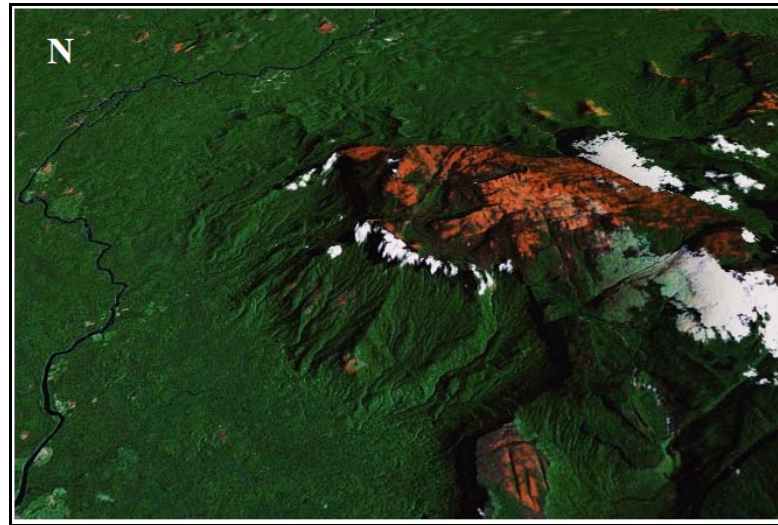


Figura 7-6. Imagen tomada y modificada de Google Earth 2009, donde puede observarse en la **Unidad de Meseta** los valles encajados producto de la acción erosiva de los drenajes presentes. ($5^{\circ}02'45''$ N $67^{\circ}27'21''$ O)

Mediante la imagen satelital landsat 7, con el producto MNF y en combinación de bandas RGB221 (Cañón rojo: Banda 2, Cañón verde: Banda 2, Cañón azul: Banda1), se pueden apreciar cambios notorios en las tonalidades de la imagen satelital, alternando entre tonos color azul, lo que permite delimitar la distribución y forma de las irregularidades topográficas, al igual que el contraste entre las distintas alturas (Ver figura 7-7).

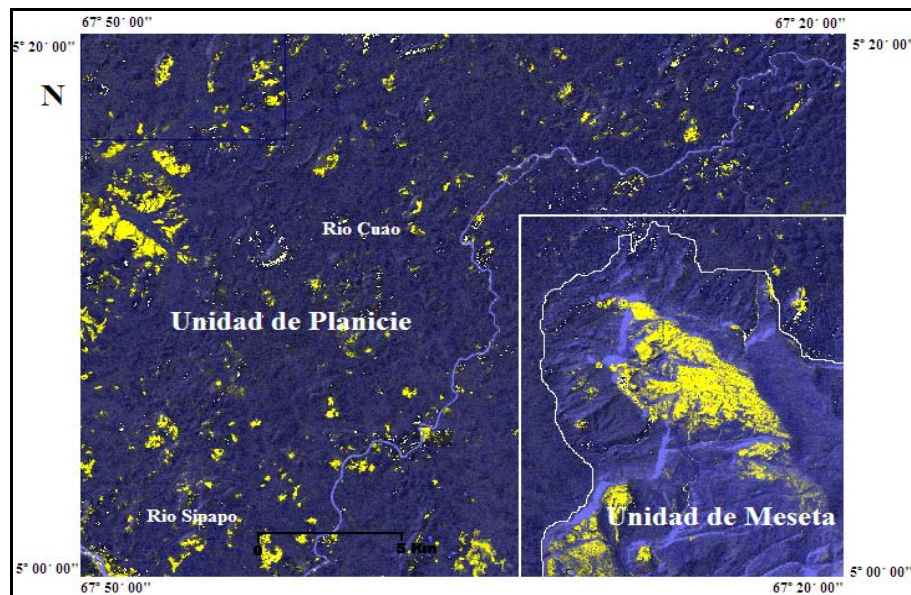


Figura 7-7. Imagen landsat 7, MNF en combinación RGB221, donde se puede apreciar la distribución espacial de las elevaciones topográficas que representan la **Unidad de Meseta**. También, se indica mediante flechas (rojas y grises) la orientación y comportamiento de las pendientes que conforman esta unidad.

En la imagen anterior se puede apreciar como esta unidad amesetada presenta una orientación de aproximadamente $N30^{\circ}O$, (indicada por la flecha roja segmentada). En el extremo este de la unidad, se observa claramente el comportamiento de estos escalones de bajas pendientes, los cuales descienden abruptamente uno con respecto al otro, con orientación aproximada $N60^{\circ}E$ (indicado por flechas rojas continuas). Al otro extremo, zona oeste de la unidad, las pendientes son mayores y las laderas tienden a estar en dirección este y noroeste (señalado por flechas color gris); sin embargo al noreste de la zona, se encuentran un conjunto de laderas uniformes y empinadas, con crestas rectilíneas a subredondeadas a lo largo de la dirección de prolongación.

El mapa topográfico (Ver figura 7-8), muestra claramente la existencia de las zonas propuestas, en el cual se puede apreciar una variación notable en la distribución de las curvas de nivel, con alturas promedios de 0-100 m y algunas irregularidades que pueden alcanzar hasta los 250 m en la **Unidad de Planicies**, hasta altitudes del orden de 1200 – 1800 m en la **Unidad de Meseta**. Así mismo, se observa que hacia el sureste de la zona, se encuentran las pendientes más altas coincidiendo con las mayores alturas; mientras que en la zona restante, las pendientes son suaves y coinciden con las altitudes bajas. El contacto entre ambas unidades tiende ser fundamentalmente, de abrupto a transicional.

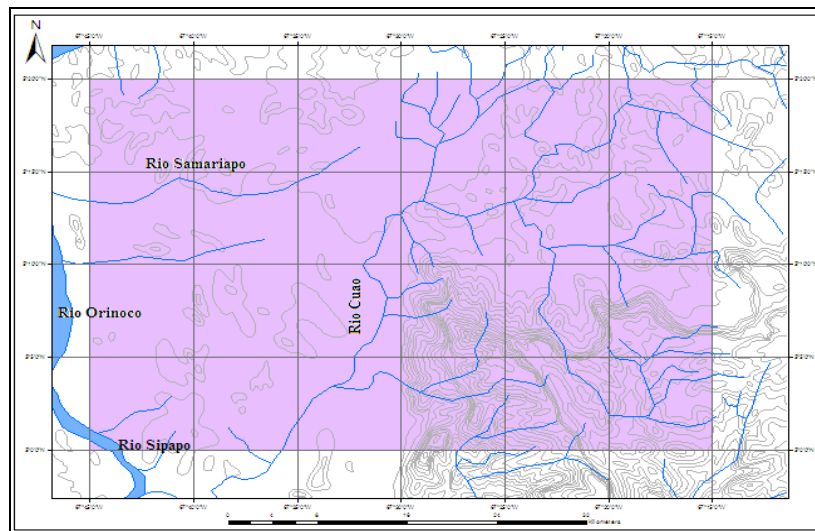


Figura 7-8. Mapa topográfico de la zona en estudio (polígono color violeta), escala 1:100.000 donde se observa la variación en la distribución de las curvas de nivel, resaltando el contraste entre las zonas bajas y zonas altas.

Igualmente, se realizaron dos cortes topográficos, el **Corte 1** con dirección EO y el **Corte 2** con dirección NS, distribuidos a lo largo de la zona de estudio (ver figuras 7-9 y 7-10), donde se observa la relación y extensión de estas unidades topográficas dentro la región de interés.

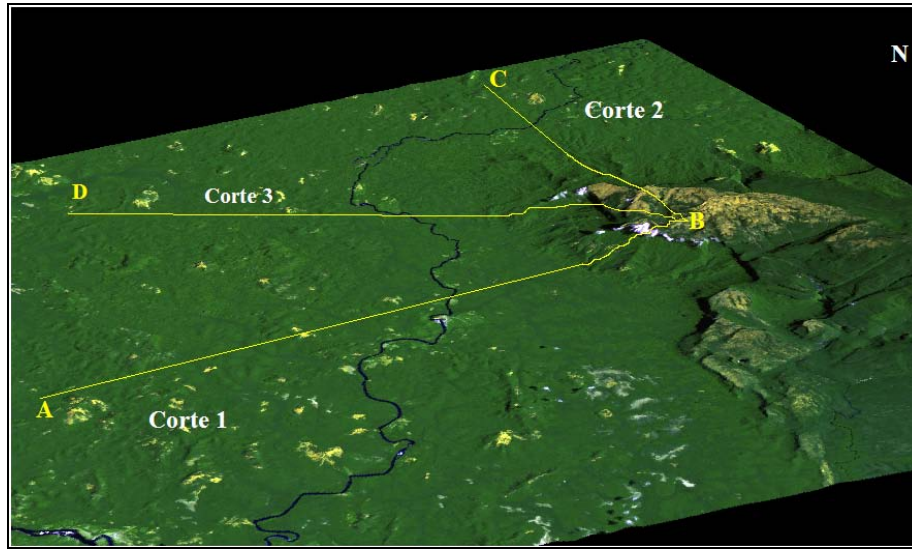


Figura 7-9. Zona de estudio en 3 dimensiones. Localización de las líneas de cortes topográficos realizados, mostrando las relaciones entre las unidades geomorfológicas.

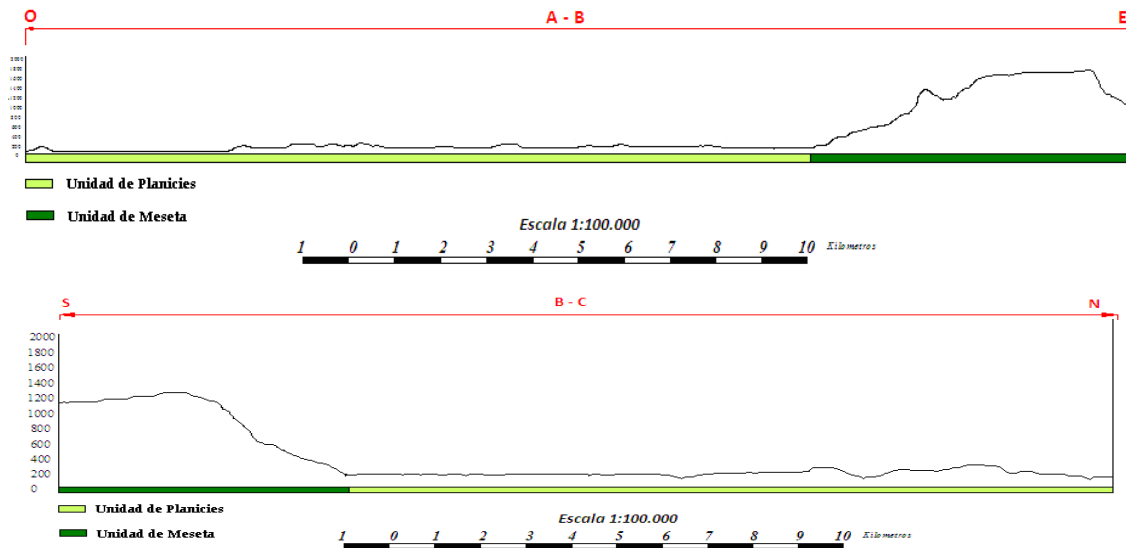


Figura 7-10. Secciones topográficas realizadas, la sección A-B' corresponde a la línea de Corte 1 y la sección B'-C corresponde a la línea de Corte 2; la ubicación de los cortes se observan en la figura anterior.

7.2 Rasgos Hidrográficos

La red hidrográfica está compuesta principalmente por la cuenca del Río Orinoco, el cual, desde su nacimiento en la Sierra Parima hasta la confluencia con el Meta, tiene una longitud de 940 Km y drena una cuenca de 125.000 Km². La zona de estudio comprende la subcuenca de Cuchivero o bajo Orinoco, al NO de la región, en donde, el Río Orinoco en conjunto con su afluente principal (Río Sipapo) y afluentes secundarios (Río Cuao y Río Samariapo), representan los drenajes más importantes, y con mayor extensión dentro del área de estudio. El drenaje restante es ocupado por ríos tributarios que complementan la red de drenajes presentes en la zona.

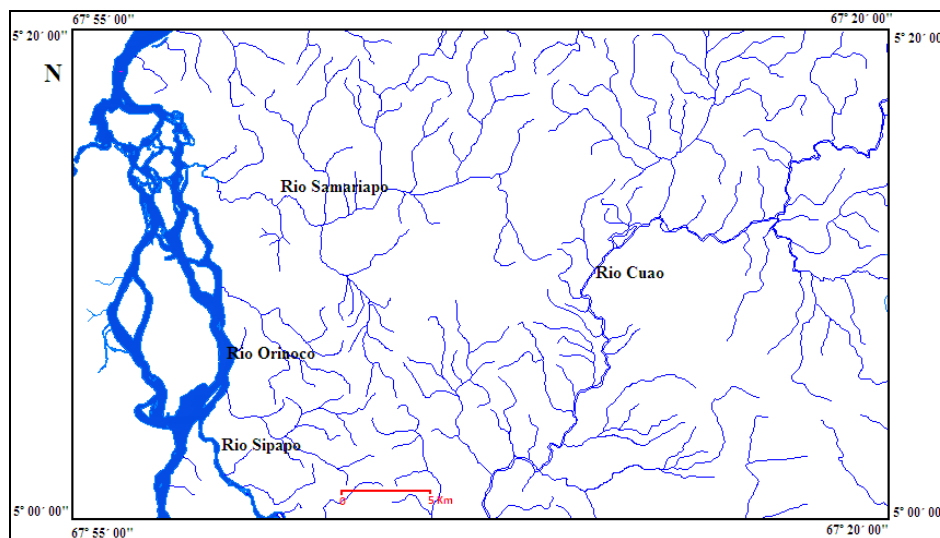


Figura 7-11. Mapa hidrográfico del área de estudio, escala 1:100.000 donde se resalta comportamiento, distribución y extensión de los drenajes principales y secundarios.

Los drenajes principales presentan distintas etapas de desarrollo entre sí y a lo largo de diversos tramos en su mismo recorrido. Por su parte, el pequeño tramo del Río Sipapo que incluye la zona de estudio, muestra características de un drenaje maduro debido al conjunto de meandros que origina a lo largo de su recorrido, productos de la baja erosión que genera sobre la superficie del terreno. El Río Cuao presenta dos tipos de desarrollo en su recorrido, uno de madurez, que es visible hacia la zona sur y central de la imagen, en

donde se observan amplios cauces suavemente entallados y con numerosos meandros; mientras que en la zona noreste, el desarrollo es distinto, con cauces un poco más angostos, presentando características de un drenaje medianamente entallado y de moderado poder erosivo. En cuanto al cauce del Rio Samariapo, se puede clasificar como un drenaje con cierto comportamiento rectilíneo, pero con marcados cursos meandricos, que lo definen como un drenaje maduro debido al bajo poder erosivo que presenta en la superficie del terreno. (Ver figura 7-11).

A nivel general, la **Unidad de Planicies** muestra una red de drenajes dendríticos a subdendríticos; mientras que en la **Unidad de Meseta** cambia a una red subparalela, presentando trayectos rectilíneos y cortos, adaptados a la topografía, formando un patrón angular (sector señalado con la letra **A**, en la figura 7-12), debido a la existencia de un conjunto de fracturas o un alto control litológico que domina la distribución del drenaje. Dicho comportamiento se puede interpretar como consecuencia de las características litológicas existentes en la zona, ya que éstas experimentan distintas respuestas, tanto de bajo como de alto grado de resistencia al poder erosivo de los drenajes. Este fenómeno puede ser respaldado con la densidad de los drenajes, debido al aumento hacia el extremo noreste y suroeste de la zona, y la disminución hacia sureste, lo que tiende a inferir, una vez más, la diferencia litológica entre las unidades de la zona.

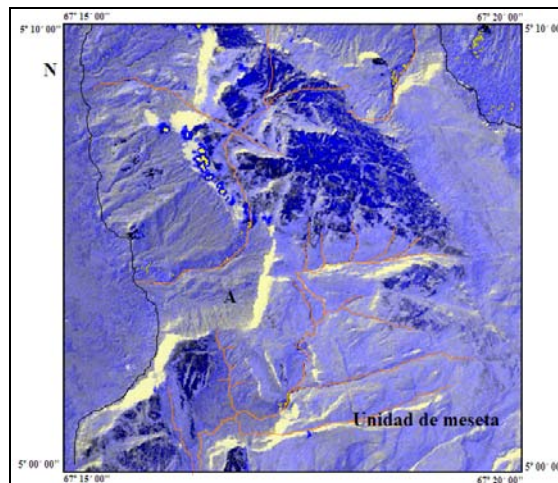


Figura 7-12. Imagen satelital en combinación RGB113, donde puede observarse en la **Unidad de Meseta** el comportamiento adaptado del drenaje (color naranja) a la dirección de las fracturas.

7.3 Rasgos Vegetación y Suelos

La vegetación y los suelos, son características importantes al estudiar una zona en particular, principalmente cuando el estudio se realiza mediante el uso de imágenes satelitales o fotografías aéreas, ya que muchas veces las superficies de los terrenos que se quieren interpretar se encuentran cubiertos por estos elementos. De esta manera, su clasificación resulta de gran utilidad para la definición de los rasgos litológicos.

7.3.1 Vegetación

Para establecer las diferencias entre las características resaltantes presentes en la zona de estudio se utilizaron firmas espectrales, donde se realizó un barrido por toda la imagen, enumerando clases para cada uno de los píxeles tomados y comparándolos con distintas clases asignadas en la misma imagen, indicando similitudes en la vegetación para aquellas firmas espectrales de igual comportamiento. La clasificación supervisada, no supervisada y específicamente la firma espectral fueron las herramientas definitivas empleadas para establecer en términos generales, los contactos entre las distintos tipos de vegetación y suelos presentes en la zona de estudio, obteniendo solo un tipo de vegetación, que por las características espectrales que se observan en la imagen y en comparación con el mapa de unidades de vegetación del estado Amazonas realizado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (2000), la vegetación de la zona de estudio puede ser clasificada en:

Bioma Arbóreo, que ocupa el 100% de la superficie de la zona, dentro de la cual, se pueden distinguir cuatro tipos (Ver figura 7-13) denominados, **Bosques macrotérmicos**, que ocupan aproximadamente un 70% y se encuentran específicamente en zonas bajas entre 50 y 200 msnm, pueden presentar alturas aproximadas a los 20m y 30m. Se distribuyen de manera homogénea en la zona norte, central y en el extremo noreste del área estudiada. **Bosques submontanos**, se encuentran bordeando las serranías o zonas altas, ocupando un 15% del área y según su posición topográfica, se ubican desde las bases de la **Unidad de Meseta** a 200 msnm hasta alcanzar 800 msnm, en especies de porte alto, entre 50m y 60m

de altura. El 10% está representado por **Bosques montanos y altimontanos**, que se encuentran entre 800 y 1.600 msnm aproximadamente, son bosques siempre verdes de mediana altura, y en las cumbres son de porte bajo.

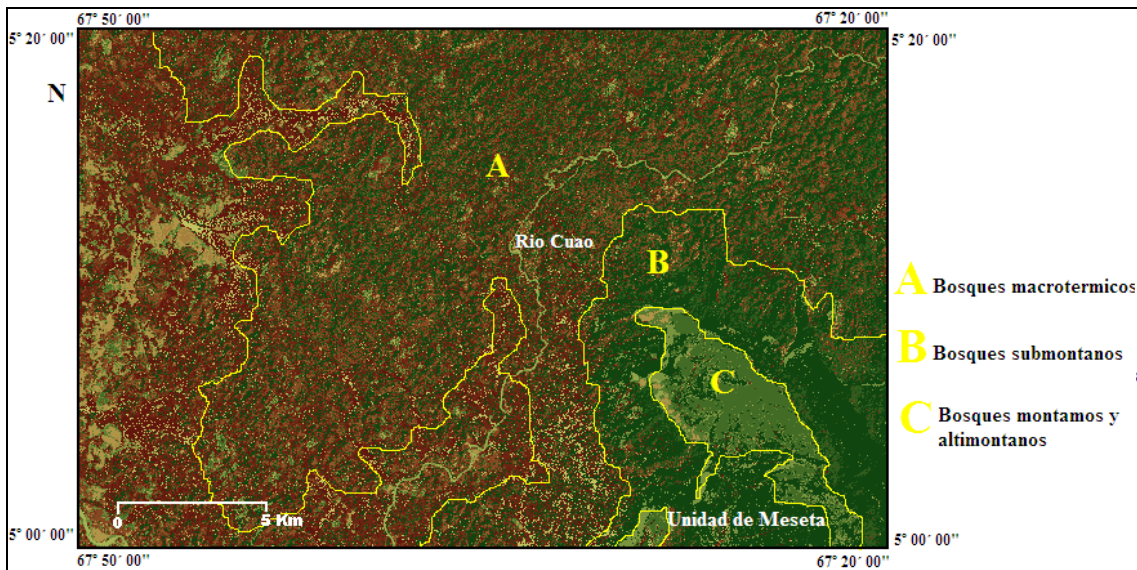


Figura 7-13. Distribución de los tipos de vegetación interpretados a partir de la imagen satelital resultado de la clasificación supervisada generada a partir de clases y colores asignados.

Por último y no menos importantes se encuentran los **Bosques ribereños o Bosques de galería**, abarcando el 5% restante del área. Los mismos se encuentran en forma de franjas boscosas a lo largo de los ríos y caños, como puede observarse detalladamente en la figura 7-14, las especies pueden alcanzar los 40m de alto.

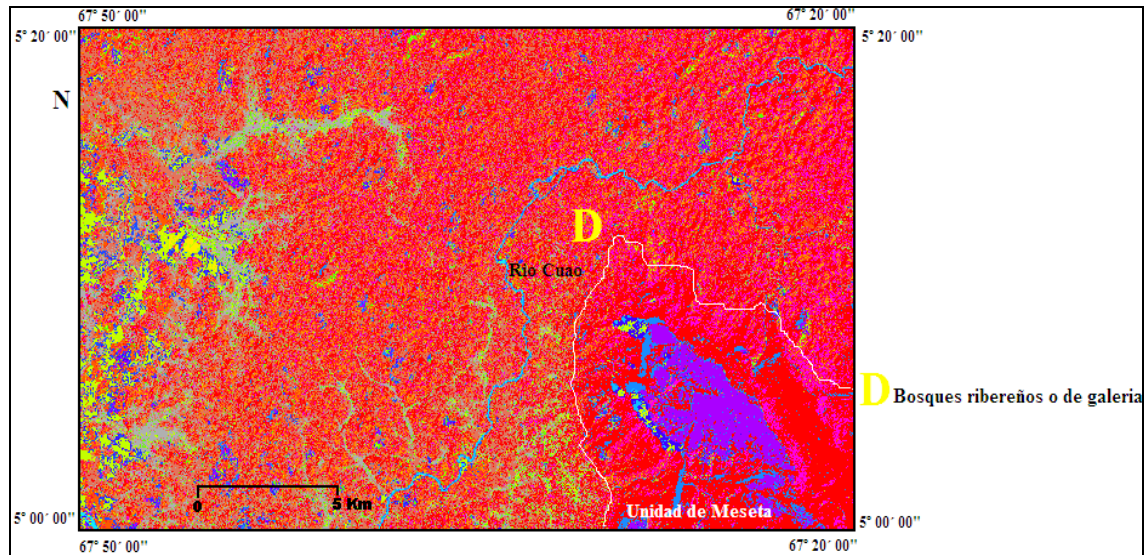


Figura 7-14. Imagen satelital resultado de la clasificación supervisada generada a partir de clases y colores asignados, donde se resalta la ubicación y extensión de los distintos Bosques ribereños o de galería.

7.3.2 Suelos

Por las características espectrales que se observan en la imagen, en combinación con estudios realizados correspondientes a los distintos tipos de suelos que conforman la zona en estudio, específicamente con el mapa de unidades de suelos del estado Amazonas, Municipio Atures (2002), aunado al análisis de relación con las características que definen la vegetación de la región, se pueden clasificar dos tipos de suelos: **Entisoles** y **Ultisoles**. Los mismos son característicos de zonas bajas, de espesor aproximado entre (50-100 cm), y se encuentran en zonas con moderada pendiente y de alteración completa de minerales primarios como feldespatos, micas, anfíboles y piróxenos. El área que ocupan estos suelos en la zona de estudio, está directamente relacionada con el área ocupada por la vegetación, es decir, corresponde al área para la cual fue clasificada la vegetación, destacándole hecho de que ésta depende de las características físico-químicas del suelo para su desarrollo y adaptación.

La abundancia de la lluvia, con la alternancia de periodos tropicales húmedos y secos caracteriza físico-químicamente estos suelos, adjudicándoles un pH muy ácido (4 a

5) y un grado de saturación variable pero débil de alrededor de 10%, lo que permite inferir que desde el punto de vista químico son suelos muy pobres, donde solo el horizonte superior húmico tiene una débil fertilidad potencial (Blancaneaux, 1976). Esto tiene efecto directo en el modelado topográfico por ser el resultado de los diferentes ciclos de erosión que han sucedido sobre el material granítico y que por condiciones locales como movimientos mecánicos de materiales, ya sean internos o superficiales, dieron origen a la evolución de estos suelos. Propiedades físicas como la gravedad, escurrimiento, variación de humedad representan fenómenos determinantes.

7.4 Rasgos Litológicos

La importancia de un análisis litológico depende de cómo la variable morfogenética actúa de manera interdependiente con las estructuras geológicas y los procesos exodinámicos, por lo que, aunque la litología no sea la variable principal que controle los relieves o modelados presentes en una zona, sigue siendo un factor influyente. De allí la importancia de conocer el tipo de litología presente en cualquier zona de estudio.

Con la intención de facilitar la delimitación de las unidades litológicas, se realizó la clasificación no supervisada a la imagen Landsat 7 ETM+ mediante el programa **ERDAS IMAGE**, con la finalidad de agrupar píxeles con características espectrales similares, para lograr discriminar aquellos rasgos que permitan hacer inferencias a estas unidades; específicamente la ubicación de los distintos elementos litológicos presentes en la toda la extensión de la imagen.

En el extremo inferior derecho de la imagen resultante de la clasificación no supervisada se logró diferenciar dos características espectrales similares, distintas a las que observan en el resto de la imagen, siendo identificadas en la figura 7-15 con la letra **A** y **B**. Estas zonas corresponden a dos tipos de litologías con características comunes, que conforman en toda su extensión a la **Unidad de Meseta**.

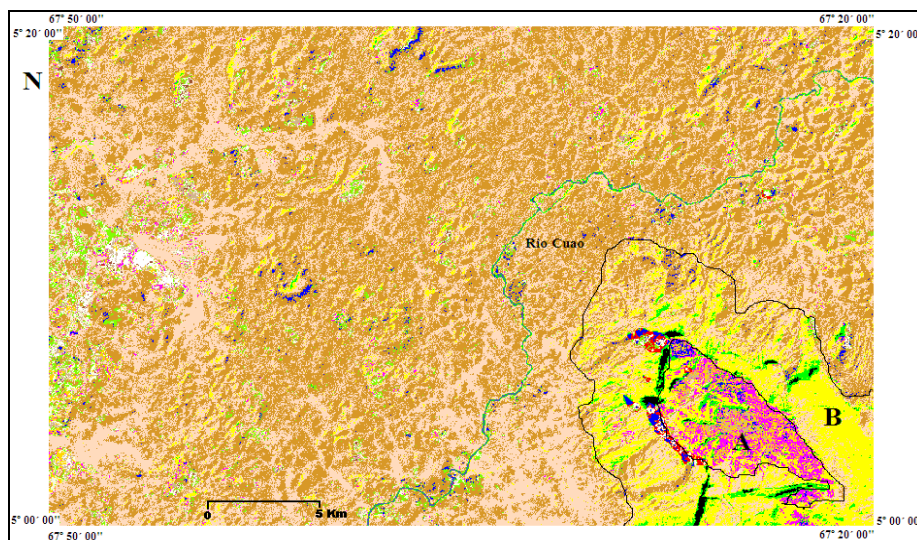


Figura 7-15. Imagen resultado de la clasificación no supervisada, donde se puede apreciar en el extremo inferior derecho características espectrales similares, identificadas con las letras **A** y **B**, de color violeta y amarillo respectivamente, que corresponden a sectores compuestos por partículas del mismo tamaño de grano y que conforman la **Unidad de Meseta**.

Partiendo del resultado obtenido mediante la clasificación no supervisada, fue pertinente realizar la clasificación supervisada para corroborar la información señalada anteriormente, logrando así una interpretación más acertada. Para este sector de la imagen, específicamente la zona correspondiente a la **Unidad de Meseta**, obtuvimos una respuesta litológica, que pudiera sugerir asociación con rocas sedimentarias, ya que estudios anteriormente realizados en la zona, establecen, datan y cartografían para esta región una litología basada en areniscas y lutitas propias del la **Provincia de Roraima**, provincia definida para el escudo de Guayana en base a características petrológicas y tectónicas por Mendoza en 1972.

El otro dominio litológico corresponde a un material muy competente expresado por una topografía llana, poco deformada y de alta resistencia a los procesos erosivos, lo cual se puede evidenciar con el comportamiento y distribución de los drenajes en la **Unidad de Planicies**. Este material litológico no pudo ser definido directamente mediante el procesamiento de imágenes satelitales (firmas espectrales, clasificación supervisada y no supervisada, entre otros), debido a que la zona abarcada por la imagen se encuentra

cubierta por vegetación, y a su vez por suelos, casi en su totalidad como puede observarse en la figura 7-13.

Para definir las características litológicas a la cual corresponde esta unidad, fue necesario establecer una relación entre la vegetación y el suelo, para posteriormente asociarlas al tipo de roca, del cual proviene dicho suelo. Esta relación se basó en primer lugar en asociar la vegetación de la zona de estudio, que corresponden a un **Bioma Arbóreo** donde predominan, en las zonas bajas por debajo de los 400 msnm los **Bosques Macrotérmicos**, característicos de clima tropical húmedo. La tasa de precipitación varía entre 2000 y 2500 mm anuales y temperatura media mayor 24°C al año; se desarrollan entre 0 y 200msnm bajo las propiedades físicas y químicas típicas de la zona. Dicho rasgo se asocia directamente con los suelos presentes, ya que predominan suelos pobres en nutrientes debido a un débil intercambio catiónico, suelos saturados y con alto desarrollo pedogenético, con un pH muy ácido (4 a 5) y un perfil de suelo de poco espesor. La capa superior contiene materia orgánica bien desarrollada ligada al soporte mineral de la roca asociada, rica en minerales primarios como feldespatos, micas, anfíboles y piroxenos, con abundancia de cuarzo, y una capa u horizonte inferior con presencia de fragmentos de granito alterado (Blancaneaux, 1976). Estas propiedades corresponden a las características que definen a los suelos Entisoles, predominantes en planicies, igualmente evidenciado en el mapa de unidades de suelos del estado Amazonas, Municipio Atures (2002), y que pueden ser originados a partir de rocas graníticas.

Esta relación entre la vegetación macrotérmica y los suelos Entisoles, en conjunto con trabajos previos realizados en la zona nos permite inferir la litología que conforma la **Unidad de Planicies**, comprendida principalmente por la **Provincia Geológica de Cuchivero** y del **Granito de Parguaza**.

Para las zonas entre 400 msnm y 800 msnm, bordeando la Serranía del Cuao se encuentran los **Bosques Submontanos**, los cuales presentan alturas que varían entre 6 y

15m, con desarrollo en terrenos fuertemente accidentados, drenados y rocosos, que caracterizan a los suelos Ultisoles. Los mismos, constituyen el segundo orden de mayor presencia en el área de estudio. Son suelos poco profundos y pueden llegar a ser superficiales, ubicándose en zonas con moderada pendiente y debido a sus condiciones físico-químicas generan procesos de enriquecimiento de bases superficiales, como consecuencia de la descomposición de restos vegetales en sedimentos de origen coluvio-aluvial del cuaternario provenientes de la **Provincia Geológica de Roraima**. Esta relación entre la vegetación Submontana y los suelos Ultisoles, igualmente en concordancia con trabajos previos realizados en la zona, permite inferir que parte de la **Unidad Meseta**, específicamente el borde de la serranía del Cuao está conformada por suelos de origen coluvio-aluvial provenientes de Roraima.

De manera general la litología que conforma la **Unidad de Planicies**, está constituida por rocas volcánicas ácidas, tobas y diques de ígneas básicas, intrusionadas por rocas graníticas, microgranitos y granitos masivos con textura rapakivi rico en feldespatos potásico, biotita y hornablenda. La siguiente figura muestra de forma esquemática la relación Vegetación – Suelo – Roca (Ver figura 7-16).

Los sedimentos recientes o cuaternarios se pueden observar mediante las firmas espectrales y la clasificación no supervisada. Se caracterizan por abarcar grandes extensiones en áreas aledañas o próximas al curso de los ríos, en especial del Río Orinoco y Río Samariapo; como se puede apreciar en la figura 7-17.

Cubren aproximadamente toda la región occidental de la zona de estudio, extendiéndose de norte a sur y generando las llamadas llanuras aluviales. Por tal motivo, se puede inferir que son sedimentos aluviales provenientes de la meteorización de las rocas graníticas y volcánicas, de la **Provincia Geológica de Cuchivero** o del **Granito Rapakivi de Parguaza**, así como también, del desmantelamiento de las altiplanicies que forman parte de la **Provincia Geológica de Roraima** por efecto de alteración física, como por ejemplo

erosión mecánica por lluvias torrenciales, alteración química como meteorización de minerales (por ejemplo formación de arcillas a partir de feldspatos y plagioclasas), y por último procesos bioquímicos, los cuales pueden deberse al crecimiento de vegetación y varias formas de vida en la superficie del granito o de las rocas sedimentarias de Roraima, oscureciendo la misma, y liberando ácidos orgánicos, sumándose al efecto físico de destrucción por las raíces.

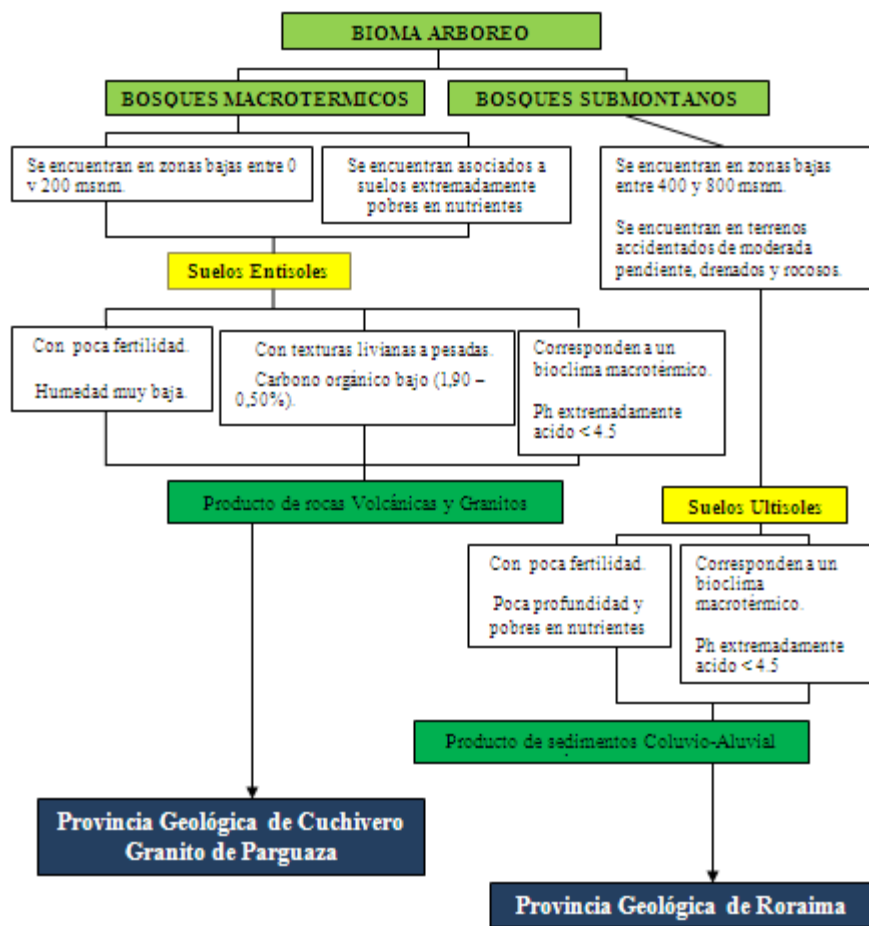


Figura 7-16. Esquema que muestra la relación existente entre los bosques macrotérmicos y Submontanos con el **Granito de Parguaza** y **Roraima**. Relación establecida para determinar las características litológicas de la zona en estudio.

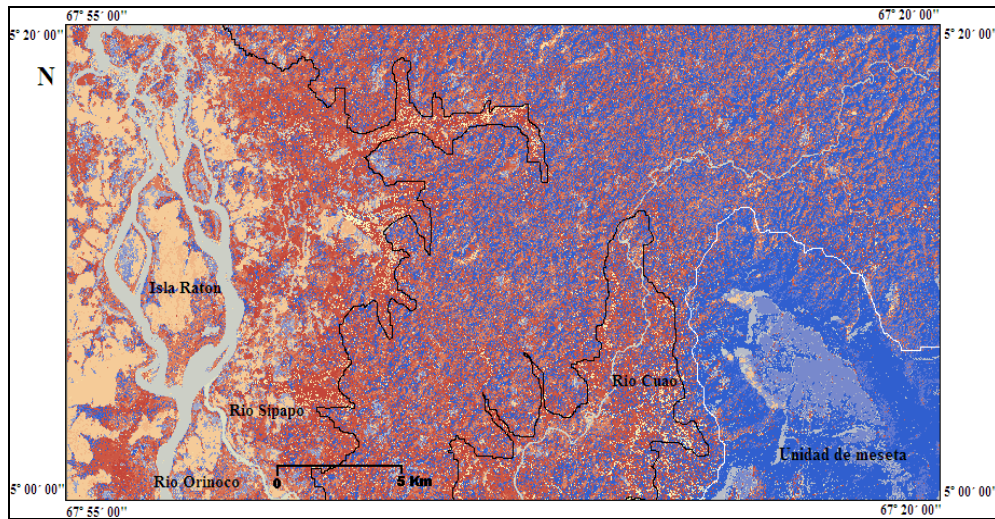


Figura 7-17. Imagen satelital resultado de la clasificación supervisada generada a partir de clases y colores seleccionados, en la cual se puede definir el área que cubre estos sedimentos aluviales.

El contacto entre las unidades topográficas está marcado por una discordancia litológica Pre - Cámbrica en la base de toda la secuencia estratigráfica de Roraima, específicamente en el Macizo del Cuao (**Unidad de Meseta**), la cual viene dada por el contacto entre una alternancia de areniscas cuarzosas, cuyo ambiente de depositación puede ser marino costero de aguas someras y lutitas limosas probablemente de ambientes lacustres pobres en oxígeno; suprayacentes a rocas graníticas y volcánicas de la **Unidad de Planicies**. Tal discordancia no puede ser detectada directamente mediante el procesamiento de la imagen satelital, sin embargo, la distribución de las unidades topográficas, así como también, el comportamiento del drenaje y las características litológicas permiten hacer inferencia de la misma, como también permite establecer que esta secuencia sedimentaria de Roraima pudo haberse depositado luego de un período de no depositación o luego de un período de erosión intenso donde la tasa de erosión supero a la tasa de sedimentación.

7.5 Rasgos Estructurales

Una vez delimitadas las zonas altas y bajas, su extensión y su relación con la geometría y dirección de los drenajes, la litología correspondiente a las unidades que

conforman la zona en estudio; comienzan a revelarse una serie de estructuras de gran importancia, las cuales, son un factor dominante en los relieves observados. Estas estructuras corresponden principalmente a familias de fracturas, que se encuentran con mayor abundancia en la **Unidad de Meseta**. El comportamiento de manera general es pseudoparalelo y con orientación que varía entre E-O y NE-SO, ejerciendo dominio en la zona.

Como se puede observar en la figura 7-18, estas fracturas en la **Unidad de Meseta**, presentan grandes longitudes y extensiones, sin mayor desplazamiento y con cierto comportamiento paralelo entre sí. Sin embargo, otro pequeño grupo se encuentra perpendicular a las fracturas principales, generando formas triangulares o de polígonos irregulares, que también pueden ser evidenciados tanto por el comportamiento del drenaje en la zona; con cambios bruscos de aproximadamente 90° que sufre la dirección del curso del río, así como trayectos completamente rectilíneos que presenta el drenaje adaptándose a la dirección de las fracturas, (sectores señalados con las letras **A** y **B** respectivamente en la figura 7-18).

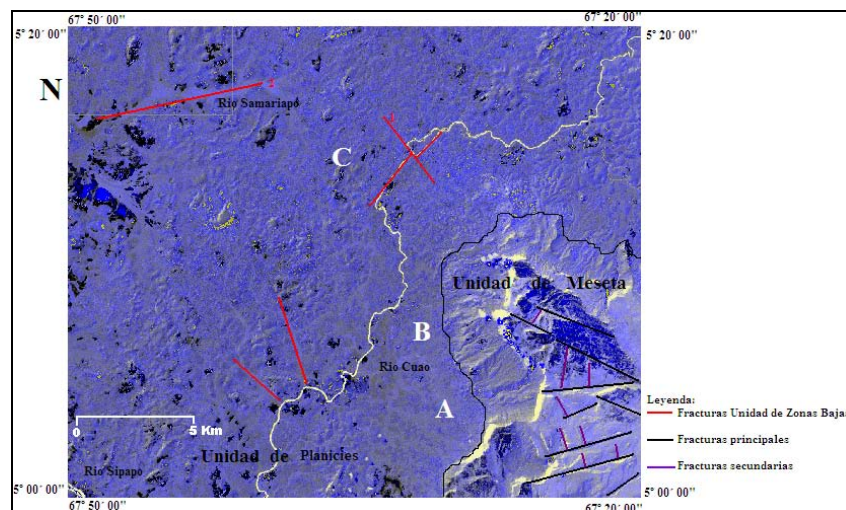


Figura 7-18. Observación de las estructuras interpretadas a partir de la imagen satelital en combinación RGB113; en donde se observa las fracturas en la **Unidad de Meseta** (color negro y morado) y en la **Unidad de Planicies** (color rojo).

De igual modo, en la **Unidad de Planicies** se pueden observar un conjunto de fracturas, señaladas en color rojo. La identificada con el numero **1**, se encuentra ubicada en la parte Nor-Central de la unidad y tiene una orientación aproximada de N45°O. Es la más resaltante ya que se puede evidenciar debido al cambio brusco que sufre la dirección mostrada por el Río Cuao en el sector señalado con la letra **C**, hecho que se observa con la bifurcación en forma de **(T)** que presenta el drenaje en esta área. Por otra parte, la fractura identificada con el numero **2**, señalada en el extremo noroeste, y la cual pudiera presentar una importante extensión, se encuentra orientada a N20°E aproximadamente, esta se evidencia por el comportamiento rectilíneo que presenta el drenaje (Río Samariapo).

Sin embargo, a nivel regional y específicamente al noreste, fuera de la zona de estudio, se observan un conjunto de fracturas que presentan características similares entre sí, siendo las fracturas principales las que en su mayoría presentan una orientación NE – SO aproximadamente. Este comportamiento no corresponde con la familia de fracturas observadas en la zona de estudio, a excepción de la aparente fractura que marca la dirección río Samariapo, la cual se tiene orientación similar. Esto permite inferir que el origen de este conjunto de fracturas no sea el mismo, es decir, que sean producidas por distintos eventos tectónicos. Por ejemplo Ghosh (1977), establece para la **Unidad de Meseta** que el origen de estas fracturas está basado a tectónica vertical del basamento, donde la cubierta superior o cubierta sedimentaria de Roraima se ajusta simplemente a la forma que genera este fallamiento, ya sea por levantamiento o combamiento del basamento, lo que trae como consecuencia a este conjunto de fracturas distribuidas a lo largo y ancho de la superficie. Igualmente por la diferencia de cota a la cual se encuentran las fracturas, se presume que la familia de fracturas presentes en la **Unidad de Meseta** son las más antiguas, ya que se pueden observar entre 800 y 1600 m de altura, lo que difiere del resto de fracturas que se encuentran en la **Unidad de Planicies** y en áreas aledañas al norte y noreste de la zona de estudio, las cuales corresponden a alturas entre 0 y 200 m, evidenciando distintos eventos tectónicos y ciclos erosivos en la región.

Cabe la posibilidad que este conjunto de fracturas encontradas en la zona de estudio y zonas adyacentes al noroeste del amazonas, sean producto de un mismo evento tectónico, pero la respuesta en superficie sea distinta para ambas unidades topográficas, ya que corresponden a materiales distintos, es decir, litologías completamente diferentes, rocas ígneo metamórficas en la **Unidad de Planicies** y rocas sedimentarias en la **Unidad de Meseta**.

7.6 Detección y Clasificación de posibles anomalías uraníferas.

Las características mineralógicas constituyen uno de los rasgos más importantes en un estudio geológico, ya que mediante estas características se puede realizar una caracterización mucho más detallada de las rocas aflorantes en determinada zona, así como también, permite inferir si la zona en estudio presenta acumulaciones importantes de algún mineral o minerales que sean económicamente explotable.

Uno de los objetivos de este proyecto, fue detectar y clasificar posibles anomalías uraníferas en la zona de estudio, mediante la aplicación de sensores remotos, específicamente a través del procesamiento de imágenes satelitales, y demostrar así la capacidad de esta herramienta para registrar firmas espectrales de minerales, es decir, determinar si es posible encontrar respuesta espectral del uranio, y definir si es factible o no esta aplicación. Para ello fueron utilizadas firmas espectrales de minerales asociados al Uranio (Uralita y Uvarovita), procesándolas en las regiones con posibles acumulaciones uraníferas, específicamente en las zonas reportadas en el mapa radiométrico – magnético de CVG Técnica Minera (**TECMIN**) en 1977, como posibles anomalías uraníferas de primera prioridad, obteniendo para cada una de estas firmas diferentes respuestas.

Para la Uralita y Uvarovita, el comportamiento de las firmas espectrales fueron nulas en toda la extensión de la zona estudiada. En cuanto a la Uralita, no se observó ninguna respuesta espectral en la imagen como se evidencia en la figura 7-19. La Uvarovita presentó un comportamiento distinto, detectando cierta respuesta en la zona suroeste de la

imagen, en áreas aledañas al Río Sipapo (figura 7-20), pero al realizar este mismo proceso al otro extremo de la imagen, se determinaron las mismas respuestas espectrales, esta vez asociadas a la presencia de nubes, lo cual indica que estas respuestas no pueden ser definidas como un resultado fidedigno para inferir alguna acumulación uranífera. (Ver figura 7-21).

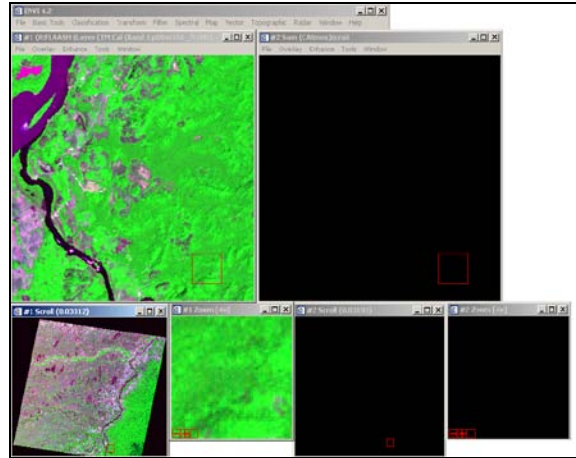


Figura 7-19. Resultado de la aplicación de la firma espectral de la Uralita, mediante el software ENVI y donde no se obtuvo ninguna respuesta espectral.

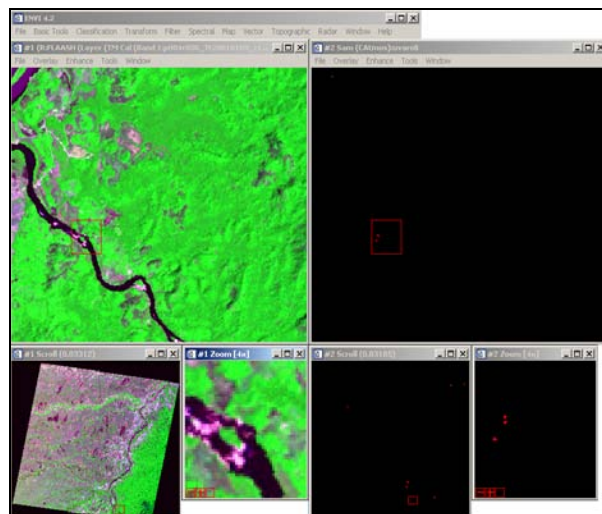


Figura 7-20. Resultado de la aplicación de la firma espectral de la Uvarovita, mediante el software ENVI y donde se obtuvo distintos comportamientos espectrales en la imagen, los cuales se encuentran ubicados en zonas aledaña al norte del Río Sipapo.

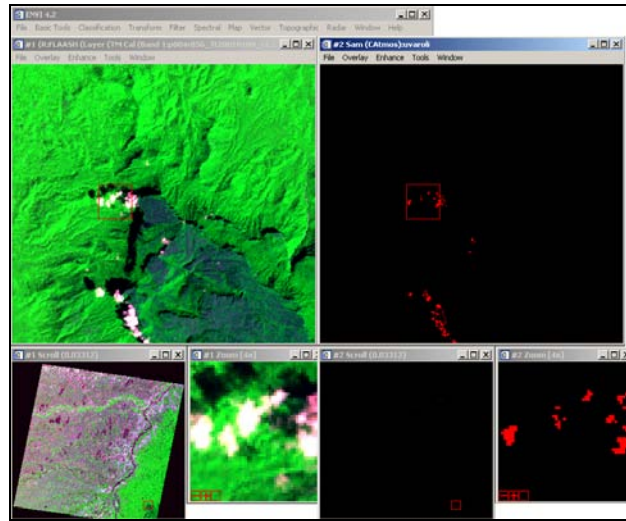


Figura 7-21. Resultado de la aplicación de la firma espectral de la Uvarovita, mediante el software ENVI y donde se obtuvo distintos comportamientos espectrales en la imagen, los cuales están asociados a las distintas nubes ubicadas en el extremo sureste, en áreas próximas a la unidad de meseta.

Este resultado espectral, puede ser causado por diversos factores, en primer lugar por limitaciones intrínsecas del programa, por ejemplo, el satélite no cuenta con el número de bandas necesario para obtener una mejor resolución y con esto, una respuesta espectral mas eficaz, segundo porque las firmas espectrales utilizadas no son exactamente las apropiadas, ya que los minerales aplicados para tal estudio no son asociados directos al uranio, y tercero porque definitivamente estas herramientas no están capacitadas para tal fin, en condiciones climáticas húmedas o tropical húmedas, con abundante vegetación, como la zona en estudio; siendo esta metodología no aplicable para la detección directa mediante firmas espectrales de minerales.

Aunque las respuestas espectrales en nuestro caso resultaron fallidas en cuanto a la detección de anomalías de uranio en la superficie de los terrenos de la zona en estudio, la misma es considerada como potencial fuente de minerales radiactivos como uranio, torio, etc. En este sentido, Bowie (1977), establece que más del 90% de las reservas mundiales de U se encuentra en asociación con rocas del Precámbrico o con rocas inmediatamente suprayacentes. De manera similar, Sifontes (1982) y Yanes (1985), analizaron un conjunto de muestras de aguas a nivel nacional, que permitieron detectar áreas anómalas en U en las

aguas de ríos relativamente grandes del estado Bolívar, es decir, donde está presente un factor de dilución alto, en un ambiente de muy altas precipitaciones. Todas las muestras anómalas provienen de cursos de agua que drenan la discordancia de la base de Roraima o zonas muy cercanas a ella, teniendo resultados muy significativos, en especial, cuando las anomalías en aguas fueron confirmadas en sedimentos finos de los mismos drenajes.

Finalmente, Pasquali y Sifontes en el IX Congreso Geológico Venezolano, proponen basándose en el trabajo de Bowie, que los posibles yacimientos grandes de U en Venezuela deberían ser buscados preferentemente en la discordancia representada por la base del Grupo Roraima. Estos yacimientos podrían estar cubiertos por Roraima, estar cercanos a la superficie, aflorar o haber sido erosionados. Procesos similares a estos posibles yacimientos pueden describirse en los depósitos uraníferos de Colorado-Wyoming de Estados Unidos y East Alligator Rivers de Australia, los cuales se encuentran asociados a rocas sedimentarias ubicadas discordantemente sobre un basamento granítico, y a levantamientos tectónicos donde las fracturas originadas por estos eventos, facilitaron el movimiento de las aguas subterráneas que transportaron el U proveniente de la erosión-oxidación a ser acumulados por precipitación en rocas sedimentarias (Bowie, 1977).

Capítulo VIII
EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA

En base a los rasgos geológicos interpretados, es posible describir como ha sido la evolución morfológica de la región noroccidental del Estado Amazonas, específicamente la correspondiente a la hoja Isla Ratón y Rio Cuao. Se puede explicar el desarrollo de las formas del relieve actual, en función a las variaciones climáticas que ha sufrido la región y de los distintos procesos físico-químicos a los cuales han estado expuestas las rocas que comprenden las distintas unidades.

Fisiográficamente la región ocupa una posición transicional entre llanuras o planicies que se extienden al oeste y al norte, y la serranía del Cuao al sur, correspondiente a las zonas altas. Esto origina un relieve de transición entre la **Unidad de Meseta** de dirección general Norte-Oeste y de aproximadamente 720 Km², constituyendo la secuencia sedimentaria de Roraima, al sur, y al Norte y Oeste la **Unidad de Planicies** donde son frecuentes los Inselbergs, término que se aplica a un relieve que surge, con rotura neta de pendiente, en una superficie llana, sea cual fuere la forma de la cumbre; y las formas dómicas graníticas.

Toda la zona donde aflora la unidad litológica de Parguaza, ha evolucionado geomorfológicamente y geoquímicamente para formar las llamadas cúpulas de granito y los Inselbergs, que no son más, que islotes de resistencia a la erosión y al proceso de modelamiento geoquímico del paisaje que ha sufrido el Macizo Guayanés a través de su larga historia (Blancaneaux, 1976). (Ver figura 8-1 y 8-2).



Figura 8-1. Imagen tomada y modificada de Google Earth 2009, donde puede observarse las formas de Inselbergs en la **Unidad de Planicies**. ($5^{\circ} 21' 42''$ N y $67^{\circ} 26' 45''$ O) eleva. 163 m.



Figura 8-2. Imagen tomada y modificada de Google Earth 2009, donde puede observarse las formas de Inselbergs en la **Unidad de Planicies**. Las formas identificadas con los números 1 y 2, son evidencia de las variaciones climáticas y de los diversos procesos erosivos que han afectado la región. ($5^{\circ} 24' 22''$ N y $67^{\circ} 26' 25''$ O) elev.195 m.

Diversos procesos de alteración física han sido responsables del modelado de dichas formas, tales como, acción del agua (la erosión mecánica por lluvias generan cierta corrosión en las rocas), desintegración termoclástica debido a la variación de temperatura, cambios climáticos y/o meteorización de minerales primarios, que se alteran y conducen a la formación de arcillas. La existencia en el relieve de estas formas aisladas es testimonio

de que toda la región ha sufrido intensa erosión y que un importante espesor de terreno ha sido acarreado.

La mayor parte del área estudiada está constituida por tierras bajas cubiertas por suelos Entisoles y Ultisoles, cuya evolución se basa en la variación clima húmedo - clima seco, que ha sucedido en el pasado. Esto ha permitido el desarrollo de suelos con alteración completa de minerales primarios (feldespatos, micas, anfíboles y piroxenos), y abundancia de cuarzo residual generando un perfil caracterizado donde solo el horizonte superior húmifero tiene una débil fertilidad potencial. La abundancia de la lluvia y el clima húmedo actual caracterizan físico-químicamente estos suelos, reportándolos como suelos ácidos a muy ácidos, pH de (4 a 5), y con un grado de saturación variable, que desde el punto de vista químico son suelos muy pobres en nutrientes.

La morfología del escudo es dominada por una serie de niveles de erosión, (Szczerban, 1974) los reporta en la región de Puerto Ayacucho, como al menos cuatro niveles de peneplanación con cotas respectivas de unos 1800 m de altura el primer nivel, el segundo a 800 m, el otro a una altura de 400 m y el último, el actual nivel del río Orinoco; lo cual pone de manifiesto al menos tres períodos de levantamiento respecto al nivel actual de los ríos Orinoco y Ventuari.

Uno de los puntos de observación más interesantes para distinguir las diferentes formas de relieve y que permite interpretar el curso de su evolución, se encuentra en la zona de estudio en las cercanías del Macizo del Cuao; donde se pueden apreciar estos niveles de erosión reportados por Szczerban. Para una mejor interpretación se logró elaborar un mapa hipsométrico regional del área noroccidental de Amazonas, al cual se le asignaron los números de cotas entre los cuales se encuentran las superficies de erosión reportadas (0 - 1800 m), aplicando para cada intervalo de cota un color distinto que permita establecer una diferencia de altura entre las mismas. (Ver figura 8-3 y 8-4).

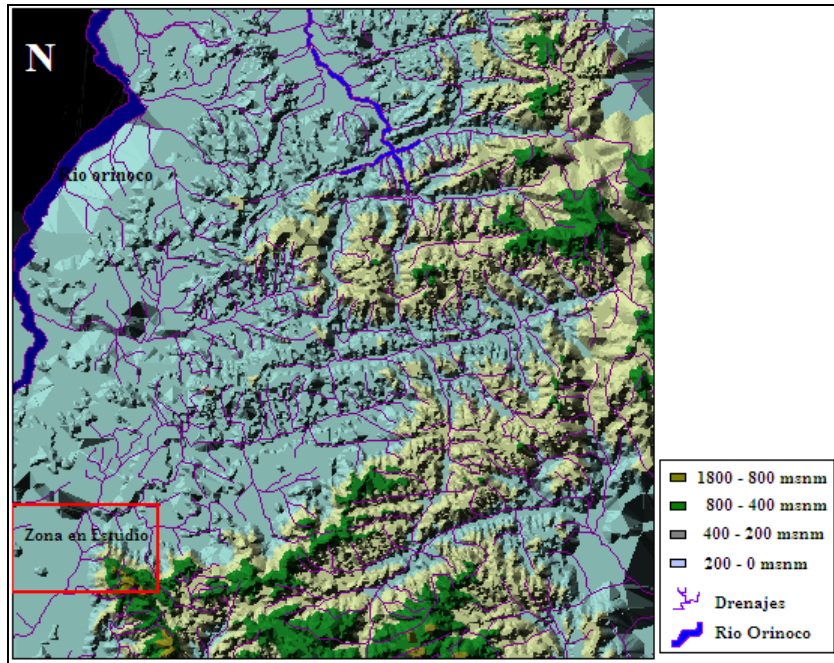


Figura 8-3. Mapa hipsométrico del área noroccidental del Estado Amazonas (Norte), donde puede observarse en distintos colores las zonas en las cuales pueden ser reconocidas las 4 superficies de erosión.

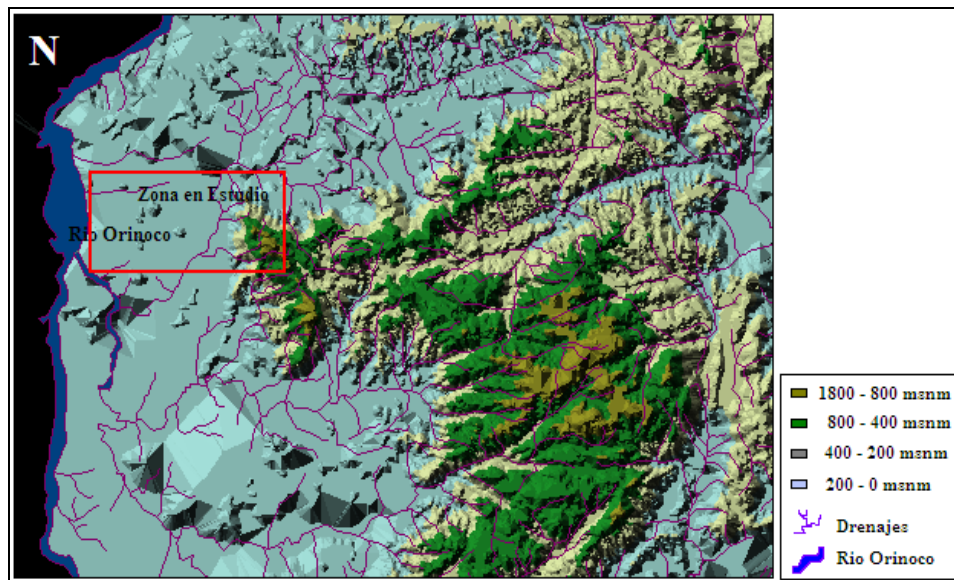


Figura 8-4. Mapa hipsométrico del área noroccidental del Estado Amazonas, donde puede observarse en distintos colores las zonas en las cuales pueden ser reconocidas las 4 superficies de erosión.

Tomando como base el mapa hipsométrico y los cortes topográficos, se puede decir que en la zona de estudio se presenta la superficie de peneplanación más antigua o el primer nivel de erosión señalado por Szczerban, el cual está asociado a las mayores alturas de la región. Nivel que corresponde al tope de la serranía del Macizo del Cuao, a cotas de 1800 m aproximadamente (Ver figura 8-5 y 8-6). La forma y la elevación de esta superficie es ampliamente controlada por el conjunto de fracturas que son evidentes en estas mesas de Roraima, en adición a la erosión química y la desintegración que han sido dominantes en el desarrollo de las mismas.

El segundo nivel de erosión corresponde a los 800 m, y el tercer nivel a 400 m, los cuales pueden ser observados al extremo este del Macizo del Cuao o **Unidad de Meseta**. Aquí se presentan los niveles de forma escalonada descendiendo hacia el noreste; parece que su origen se debe a la sucesión de episodios climáticos de excavación y acumulación. Estas superficies podrían igualmente coincidir con los niveles reconocidos por Szczerban en 1974.

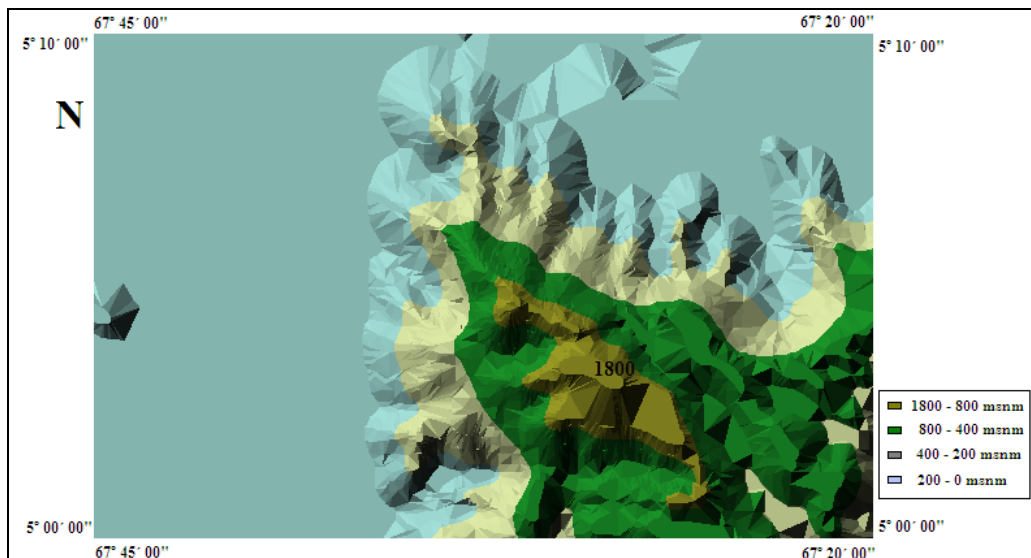


Figura 8-5. Mapa hipsométrico de la zona en estudio, específicamente en el Macizo del Cuao, donde pueden observarse la variación de colores, representando las alturas entre 200 - 1800 m y la superficie de erosión correspondiente a 1800 m.

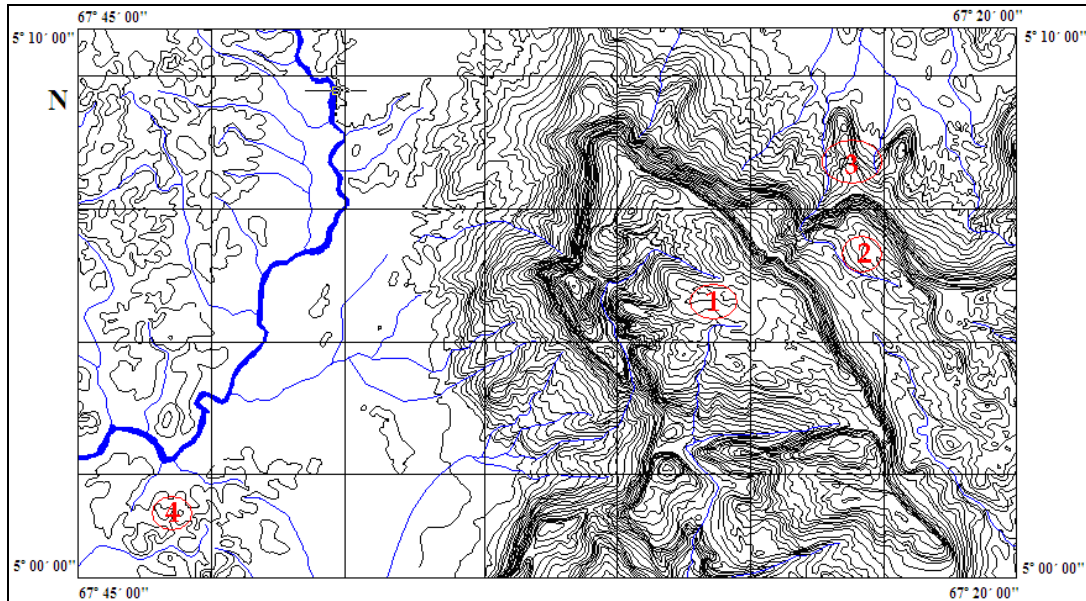


Figura 8-6. Mapa topográfico de la zona en estudio, específicamente en el Macizo del Cuao, donde pueden observarse los distintos niveles de erosión, (1) superficie de 1800m, (2) superficie de 800m, (3) superficie de 400 m y (4) superficie de 200 m.

El nivel de 200 m, corresponde a las diferentes formas graníticas, Inselbergs o domos graníticos, elevaciones esporádicas que a lo sumo llegan a alcanzar los 250 m en la **Unidad de Planicies**. También se encuentran evidencias de estas superficies aplanadas en los bordes del macizo. Dicha superficie de erosión, puede ser observada con mucho más detalle en el corte topográfico realizado en la zona de estudio (Ver figura 8-7).

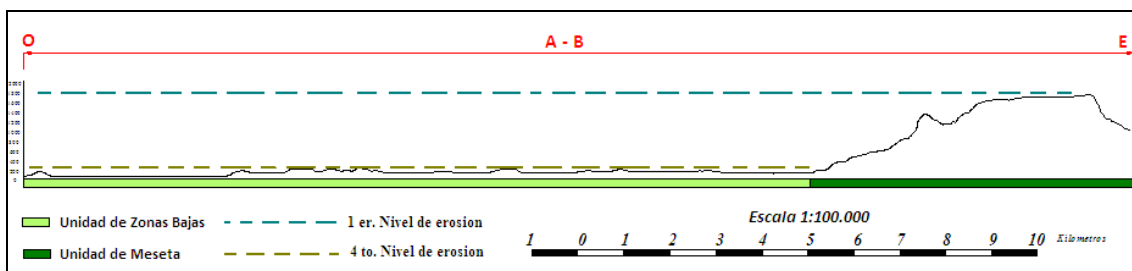


Figura 8-7. Corte topográfico realizado en la zona de estudio, donde se puede apreciar la diferencia de cota entre la primera y última superficie de erosión.

Por último, y no menos importante se puede apreciar otro nivel de erosión, que podría corresponder al nivel reconocido por Pouyllau en 1975, entre 40 y 50 m en la región de Caicara; ese nivel se presenta igualmente en la zona de estudio con la forma de planicie o de llanura aluvial, entre pequeñas irregularidades topográficas en formas de media naranja.

Igualmente estos niveles señalados y reportados en base a los rasgos descritos a partir de la interpretación de la imagen satelital, de los mapas hipsométricos y topográficos, también han sido reconocidos por (Briceño y Schubert, 1990), los cuales reportan en su trabajo de Geología de la Gran Sabana, Escudo de Guayana y Sureste de Venezuela, al menos seis niveles de erosión en el escudo, esto basándose en comparaciones con otras regiones con extensión geográfica, elevaciones y niveles similares.

La edad de estos niveles de erosión es muy controversial, es por eso, que a partir de trabajos realizados, especialmente en base al trabajo de (Schubert, 1990) se pretende demostrar mediante un modelo esquemático y especulativo la evolución topográfica del escudo, y de la zona de estudio como se puede observar en la siguiente secuencia. (Ver figura 8-8 y 8-9).

Según el modelado evolutivo propuesto por Schubert, se puede decir que la primera superficie (1) corresponde a rocas y sedimentos depositados en el Pre-Cámbrico. La misma, probablemente fue formada durante el Paleozoico, pero no es preservada en el tiempo debido a los grandes cambios climáticos a los que han estado expuestas estas regiones. (2). La superficie (A) está asociada a la edad de Auyan-Tepui formadas durante el Paleozoico y corresponde a alturas de alrededor de los 1800 y 1600 m, las cuales pueden observarse en la superficie del Macizo del Cuao actualmente. En esta etapa continúa la erosión y la meteorización química generando así el relieve presente. (3) Las superficies paleozoicas (A) y (B) dominan la zona y están formadas por varios ciclos erosivos que afectan las rocas del Grupo Roraima. Se encuentran asociadas a alturas de 800 y 1000 m, correspondientes

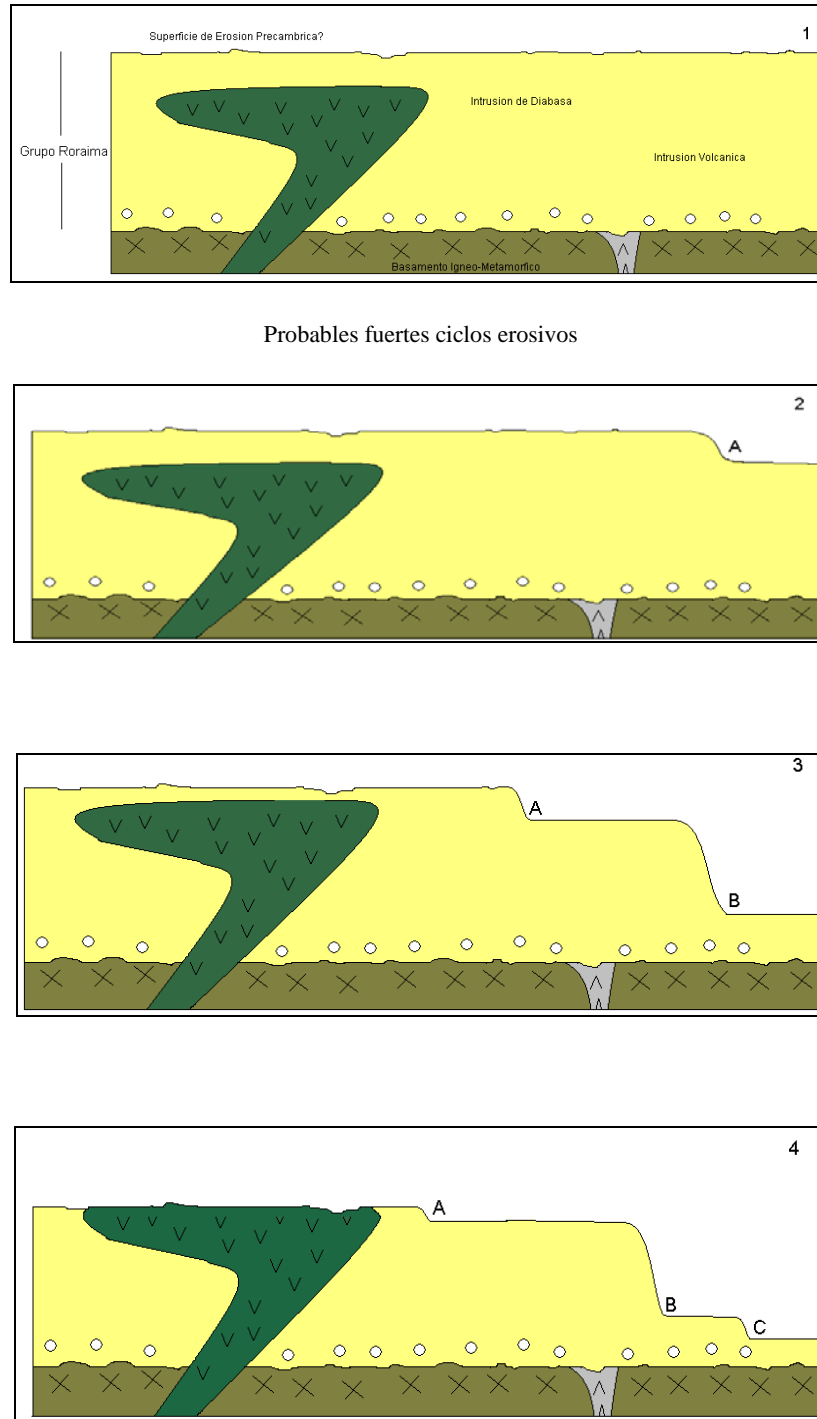


Figura 8-8. Modelo esquemático de la evolución topográfica de la zona de estudio. (A) y (B) Superficie Mesozoica. (C) Superficie Terciaria Tardía. Tomado y modificado de (Briceño y Schubert, 1990).

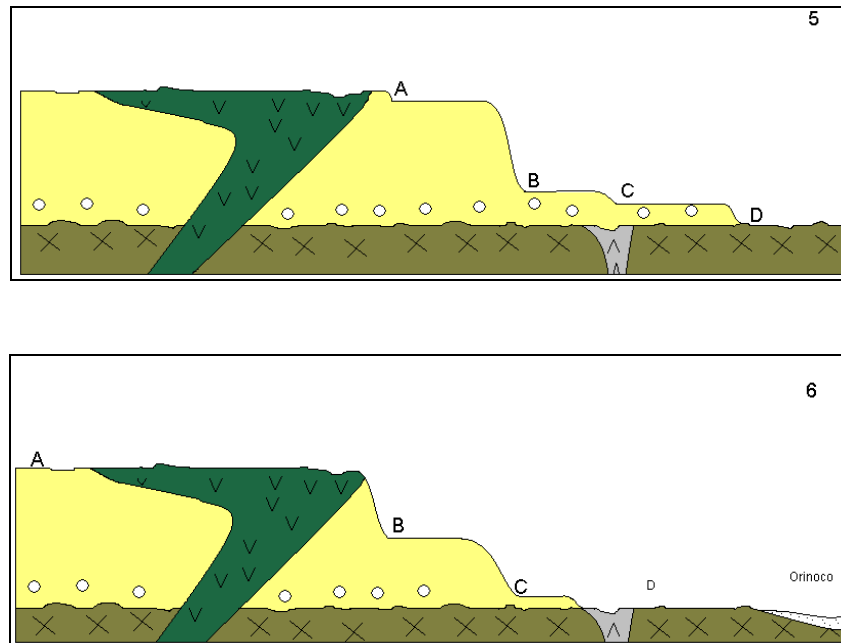


Figura 8-9. Modelo esquemático de la evolución topográfica de la zona de estudio. (D) Superficie Oligoceno- Mioceno. (6) Superficie Plio-Pleistoceno y (7) Superficie Holoceno. Tomado y modificado de (Briceño y Schubert, 1990).

a la segunda superficie de erosión reportada en la zona de estudio. (4) Superficie terciaria, el trabajo de la erosión sobre las superficies anteriores en Roraima, ha generado tres niveles de erosión, donde la superficie (C) esta reportada como la de Imataca en el estado Bolívar, y corresponde igualmente a las cotas de la tercera superficie de erosión observadas en la

Unidad Meseta de la zona estudiada, estas varían aproximadamente entre 400 y 450 m. Luego en (5) se observa el desarrollo de una superficie (D), que es datada como Oligo-Mioceno y reportada como superficie Caroní-Aro, la cual está formada en el basamento del

escudo Guayanés y se encuentra asociada a la Provincia de Cuchivero en el estado Amazonas. Se caracteriza por el desarrollo de domos graníticos e inselbergs como evidencias de un antiguo proceso de aplanamiento. Esta superficie es claramente observada en la Unidad de Planicies alcanzando niveles de cota de 200 m y representa la última superficie de erosión reportada. (6) y (7) Muestra el resultado de la erosión a los niveles superiores, dejando depósitos pleistocenos o sedimentos aluviales provenientes del río Orinoco y sus afluentes en las zonas bajas, producto de la erosión de rocas de Roraima y del basamento (Cuchivero) durante el holoceno. Esta evidencia se observa entre 0 y 50 m de altura, nivel actual del río Orinoco y río Ventuari.

El paisaje que observamos en la actualidad, es el resultado de la influencia de los distintos mecanismos que han actuado durante milenios de años, y como se menciona anteriormente, uno de los mecanismos principales es el clima, que según trabajos previos, han actuado en diferentes fases:

Primera Fase:

Fase tropical húmeda con estaciones secas más cortas que las lluviosas, donde se produce una redistribución de hierro y se forman así las llamadas corazas ferruginosas.

Segunda Fase:

En un clima relativamente seco se encuentra una redistribución de elementos a lo largo de la toposecuencia entre Inselbergs, graníticos y los glacis, que son simplemente formas topográficas de pendiente longitudinal constante o ligeramente cóncava, el agua es suministrada por escurrimiento sobre la superficie de los inselbergs, socaba el pie de los mismos, endereza las vertientes y produce los glacis.

Tercera Fase:

El clima nuevamente se hace más húmedo, generándose un modelado ondulado, debido a la infiltración de agua y destrucción de la coraza ferruginosa.

Cuarta Fase:

Se produce durante un periodo muy seco; lo que ocasiona que haya una desaparición casi completa de la vegetación, quedando el suelo sometido a la erosión eólica en su mayoría, y a medida que desaparece la vegetación, los Inselbergs pierden los suelos que lo cubrían, y en los glaciares removidos, los suelos adelgazan. El paisaje general para este periodo es de grandes campos desérticos con inselbergs muertos y aislados.

Quinta Fase:

Genera el nuevo modelado y se efectúa en un clima más húmedo (clima actual del estado Amazonas). Se produce el hundimiento de la red hidrográfica y el retomado superficial de los productos concrecionados, tomando el paisaje el aspecto de una superficie de erosión ondulada con un relieve en media naranja.

Una vez obtenidos todos los resultados se comparó con los mapas realizados previamente en la zona noroccidental del estado Amazonas, mapas de suelos, de vegetación, geológicos y topográficos, obteniendo una correspondencia entre los estudios previos y los resultados obtenidos a través de la interpretación de las imágenes en más de un 90%. Como resultado final se obtuvo el mapa geológico actualizado a escala 1:100.000 (Ver Anexo).

Capítulo IX

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La aplicación de esta herramienta, la cual está basada en la interpretación visual y espectral de imágenes satelitales, permite determinar y resaltar aquellas estructuras presentes en la superficie terrestre e inferir su comportamiento en el subsuelo; así como también, mediante clasificaciones supervisadas y no supervisadas, facilitar la delimitación de distintos tipos de vegetación, suelos y unidades en base a características espectrales comunes.

- La clasificación no supervisada, fue utilizada con la finalidad de discriminar rasgos litológicos, rasgos de vegetación y suelos, teniendo como resultado, para cada uno de estos rasgos, comportamientos espectrales similares dentro de la imagen; permitiendo definir inicialmente la extensión y distribución de la vegetación y el suelo; también, permitió inferir el contacto correspondiente a la Formación de Roraima y el Granito de Parguaza.

- Con la aplicación de las correcciones (atmosféricas, geométricas y radiométricas) se logro eliminar algunas sombras presentes en la imagen, al igual que desplazamiento alguno existente entre las imágenes, mapas topográficos y mapas geológicos; a través de estas correcciones se obtuvo la definición de estructuras, siendo el producto MNF el de mayor aporte de información; generando así una imagen adecuada para la interpretación geológica.

- Otra herramienta que facilita la discriminación de rasgos importantes, es el modelo digital de elevación (DEM), ya que permite hacer observaciones en 3D de los cuerpos topográficos en la imagen y definir las unidades topográficas presentes en la zona de estudio, mediante una visión tridimensional en profundidad, de éstos cuerpos; obteniendo así, la geometría real de las estructuras presentes.

- La correspondencia entre las imágenes procesadas y el mapa geológico de CVG-TECMIN demuestra que la herramienta es confiable para la realización de un cartografiado geológico.

- Se logró realizar un mapa geológico actualizado a escala 1:100.000 mediante la integración geológica de la información recopilada de datos bibliográficos y trabajos previos con los resultados del análisis de imágenes satelitales (Landsat 7 ETM), donde fue posible evidenciar la correspondencia entre la geología superficial obtenida de los estudios previos y la información obtenida de las imágenes multispectrales.

- Se demostró mediante firmas espectrales de minerales asociados al Uranio, que a través del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 7 ETM, no se pueden detectar acumulación alguna del mismo en esta zona, es decir, esta herramienta no es aplicable para la detección de anomalías o firmas espectrales asociadas al Uranio en zonas tropicales húmedas. Además que el satélite con el cual fueron capturadas estas imágenes no cumple con el número de bandas para tener una resolución más eficiente; debido a que la resolución es muy baja, de unos 30 m por pixel.

- Se observaron dos relieves contrastantes bien diferenciados entre las zonas elevadas y las que se encuentran más bajas, adjudicándole a esta zona una clasificación de topografía mixta; **Unidad de Planicie** representada por suelos residuales y aluviales, y por litología característica de la provincia geológica de Cuchivero, específicamente del Granito de textura Rapakivi del Parguaza. **Unidad de meseta**, correspondiente a la provincia geológica de Roraima, constituida por rocas sedimentarias, las cuales se encuentran suprayacentes a la provincia de Cuchivero en contacto discordantemente litológico.

- El drenaje en general presenta una red dendrítica y con algunos comportamientos meandricos, especialmente en el río Cuao y río Sipapo. En su mayoría se puede clasificar como un drenaje maduro debido a su moderado poder erosivo y de entallamiento variable

de suave a medio. En las zonas altas el drenaje es rectilíneo a subangular adaptado perfectamente a la topografía.

- Por la relación establecida entre vegetación-suelo y en combinación con estudios realizados correspondientes a los distintos tipos de suelos que conforman la zona en estudio, se pueden clasificar dos tipos de suelos: Entisoles y Ultisoles.

- Se identificó una discordancia litológica Pre - Cámbrica en la base de toda la secuencia estratigráfica de Roraima, la cual viene dada por el contacto entre una alternancia de areniscas cuarzosas y lutitas limosas, correspondientes a Roraima, suprayacentes a rocas volcánicas ácidas e intermedias del Granito de Parguaza.

- La meseta del Cuao, y el conjunto de irregularidades topográficas presentes en la zona, como los Inselbergs y domos graníticos, son la evidencia o el resultado del trabajo de la erosión, meteorización, entallamiento de los drenajes y de los distintos cambios de climáticos que han afectado la zona, que se alternan entre climas húmedos y climas secos.

- El uso de combinaciones de las bandas en RGB de la imagen Landsat y especialmente la transformación mínima de ruido (MNF), permitió observar que la zona en estudio se encuentra altamente fracturada, tanto en la Unidad de Planicies, como en la Unidad de Meseta, siendo más abundantes en esta última. Este conjunto de fracturas presentan un comportamiento pseudoparalelo, con orientación que oscilan entre E-W y NE-SW; son estructuras sin mayor desplazamiento, las cuales se pueden originar por tectónica vertical del basamento.

- La relación vegetación-suelo-roca, se convirtió en el criterio de diferenciación clave para asociar, definir y cartografiar a la provincia geológica de Cuchivero en la zona de estudio.

- Las llanuras aluviales ubicadas en el extremo noroccidental de la zona de estudio están conformadas por sedimentos en gran parte provenientes de la base de la secuencia sedimentaria de Roraima y del Granito de Parguaza.

- Se logró identificar 4 superficies de erosión, las cuales coinciden con las reportadas por (Szczerban, 1974) y por (Briceño y Schubert, 1990); correspondiendo la primera superficie o nivel de erosión al tope del macizo del Cuao en la Unidad de Meseta, y la última superficie corresponde al nivel actual del río Orinoco, en la Unidad de Planicies.

- Se infiere que algunas acumulaciones de Uranio se pueden encontrar en el contacto entre la **Unidad de Planicies y Unidad de Meseta**, ya que las condiciones geológicas de la zona, establecen mediante estudios previos, que la mayor concentración de minerales radioactivos, como el Uranio se encuentran asociados a las discordancias Pre-Cámbricas, entre rocas sedimentarias y rocas graníticas.

RECOMENDACIONES

- Aplicar esta metodología de trabajo, como punto de partida, para realizar el estudio geológico de una zona determinada, ya que permite obtener suficiente información al momento de realizar estudios en áreas con alta complejidad topográfica y selvática, especialmente en regiones de difícil acceso.

- Para hacer un estudio basado en imágenes LANDSAT, se debe disponer de otras herramientas tales como mapas topográficos, imágenes de radar, mapas geológicos previos, en las cuales apoyar la información de las imágenes LANDSAT, incluyendo según las posibilidades disponibles, salidas de campo para corroborar la información.

- El estudio de las imágenes multiespectrales muestran con claridad diferentes litologías mediante el uso de firmas espectrales, por lo que se recomienda para estudios geológicos. Sin embargo para zonas con abundante vegetación o nubosidad se sugiere utilizar como apoyo imágenes de radar, con el objetivo de mejorar la interpretación en aquellas áreas donde estos elementos no permiten visualizar la superficie de interés.

- Se recomienda el uso de otros sensores, radares de baja órbita (por tener mayor resolución), imágenes satelitales como las ASTER, HYPERION, SPOT, etc, que con una mayor cantidad de bandas y una mejor resolución, pueden detallar más aspectos tanto litológicos, estructurales y mineralógicos. Estos sensores pueden permitir la realización de una caracterización mineralógica más detallada, y así obtener resultados más precisos.

- Analizar si es recomendable o conveniente emprender una exploración nacional para el Uranio, a fin de determinar si el país pudiese contar con materia prima, también en el sector nuclear.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benaim N. (1974). Geología de la Región El Dorado-Anacoco-Botanamo, Estado Bolívar. Conf. Geol. Interguanas.,1972, MEM Pub.Esp.p. 198-206.

Blancaneaux (1976), Estudio Pedo-Geomorfológico sobre las Formaciones Graníticas de la Región de Puerto Ayacucho, Estado Amazonas, Venezuela. IV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maturín, 22 – 27 de Agosto de 1976.

Briceño H and Schuber C. (1990). Geomorphology of Gran Sabana, Guayana shield, southeastern Venezuela. *Geomorphology*. Vol. 3. 125-41.

Carrero D, Franklin J, Infante J. (2004). Clasificación mineralógica del cerro Bolívar y el cuadrilátero San Isidro a través del análisis multiespectral, utilizando imágenes de satélites Landsat 7 ETM +. P: 215.

Chuvioco E. (2006). Teledetección Ambiental. Observación de la Tierra desde el Espacio. 2da Edición. Editorial Ariel Ciencia, Barcelona, España. 583 pág.

Gaudette H, Mendoza V, Hurley P.M y Fairbairn N.W. (1978). Geology and Age of the Parguaza Rapakivi Granite, Venezuela. En. Geol. Soc. America. Bull V 89, p. 1335-1340.

Ghosh S.K. (1977). Geología del grupo de Roraima en Território Federal Amazonas,V Congreso geológico venezolano. Tema I, Caracas – Venezuela.

González De Juana C, Iturralte J. M^a y Picard X. (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolífera. Caracas. Foninves, 2 tomos. 1031 p.

Hurley P.M, Fairbairnsn H.W, Gaudette H, Mendoza V y Espejo A. (1977). Progress Report on Rb-Sr age in Dating Northern Guayana Shield. En Cong. Latinoamericano 2, Caracas. MEM Pub. Esp. 7, P. 3035-3044.

Instituto Forestal Latinoamericano, (2004). Proyecto del plan de ordenamiento territorial del Estado Amazonas. Tomo I, Estado Mérida – Venezuela. P. 35.

Klar W. (1979). Geochronology of the El Manteco-Guri and Guasipati area Venezuela Guayana Shield. En: Cleveland and Western Res. Univer. Ph D. –Thesis, 163 p.

MacCandless G.C. (1.965). Reconocimiento Geológico de la Región Noroccidental del Estado Bolívar. En: MEM, Bol.Geol. V 7, N 13, p. 19-28.

Mendez L. (2002). Curso de Geomática, Nivel Intermedio. Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar.

Mendoza V. (1972). Geología del Área del Río Suapure, parte Noroccidental del Escudo de Guayana. En: MEM bol. Geol. Pub. Esp. N 6. P306-336

Mendoza V, Ríos J.-H, Moreno L.A, Benaim N y Tepedino V. (1975). Evolución geoquímica de rocas graníticas de la Guayana Venezolana. En: 10 Cong. Interguianas, Belem, Brasil, 1975, Mem. P.558 -575.

Mendoza V. (1977). Evolución Tectónica del Escudo de Guayana. En: 2 Cong. Latinoamericano Geol. Caracas, 1973. MEM Pub. Esp. N 7, V3, p 2237-2270.

Mendoza V. (2000). Geotectonic Evolution of Guayana Shield, Venezuela, En: 31 Int. Geolog. Congress, Rio de Janeiro, Brasil, Agosto 2000.

Mendoza V. (2005). Geología de Venezuela Tomo I: Escudo de Guayana, Andes Venezolanos y Sistema Montañoso del Caribe. Universidad de Oriente, Escuela ciencia de la tierra.

Pasquali y Sifontes. (2007). Exploración de Uranio en Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Ciencias de la Tierra. Caracas.

Pimentel de B, Gaudette H.E y Olsewsky W.J. (1.985). “Nuevas dataciones en el basamento de la cadena Caribe”. En: Mem. VI. Cong. Geol. Venezolano, Caracas, 3, p. 1.979-1.994.

Portillo U, Colvéé G. (1971). El Uranio. Revisión bibliográfica. Factibilidades de desarrollo en el Territorio Federal Amazonas.

Reid A.R. (1974). Stratigraphy of the type area of the Roraima Group, Venezuela. En: Conf. Geol. Interguayananas, MEM, Pub. Esp. N 6, p.343-353.

Ríos J.H. (1.972). Geología de la Región de Caicara, Estado Bolívar. En: IV Cong. Geol. Venezolano, MEM Pub. Esp. V 5, N3, p.1759-1782.

Salazar J. (2004). Detección de Elementos Litológicos y Estructurales a través del Procesamiento e Interpretación de Imágenes Satelitales para la Exploración Petrolera en el Norte de la Subcuenca de Guárico. Caso de Estudio: Formación El Pao y sus alrededores. Escuela de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geología, U.D.O., Ciudad Bolívar, Venezuela. Trabajo Espacial de Grado, Inédito. 157 pág.

Szczerban E. (1974). Geología y Petrológica del área de Puerto Ayacucho, Estado Amazonas, Venezuela. Unidad de Geol. Caracas. MOP-CODESUR.

w.w.w. hismap.wz.cz/svet/pangea.jpg. Consulta: 2008, Octubre 13.

w.w.w.bgeo.com.py/landsat7.html. Consulta: 2008, Noviembre 23.

w.w.w. Google Earth 2009. Consulta: 2009, Marzo 17.

APÉNDICE

- *Procesamiento de Imágenes
LANDSAT 7ETM +*

Procesamiento de Imágenes LANDSAT 7 ETM+

4.2.1 Corrección de Radiancia:

▪ En el menú principal de ENVI, se selecciona la ventana **Basic Tools**; luego, se hace clic sobre **Preprocessing** → **Calibration Utilities** → **Lantsad TM** y se activa una ventana titulada **TM Calibration Input File**; aquí, se selecciona uno de los archivos TIFF, pertenecientes a una de las bandas y se presiona **OK**. Este paso se repite tantas veces como imágenes TIFF se tengan. En la figura 4-4, se observa la imagen con sus bandas en formato TIFF.

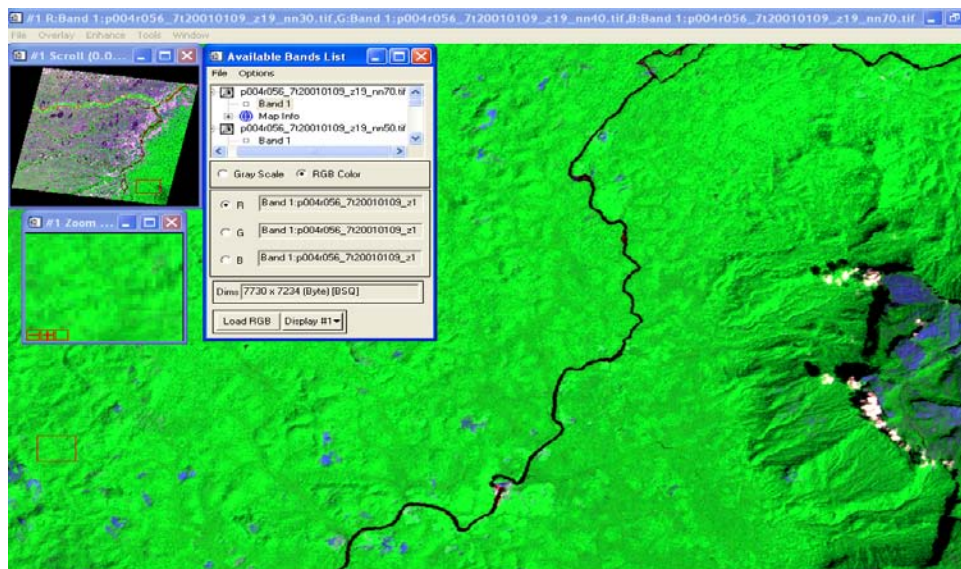


Figura 4-4. Visualización de la imagen con las bandas en formatos TIFF.

▪ Se activa una nueva ventana denominada **TM Calibration Parameters**; en la cual, se debe colocar los datos relacionados con fecha de adquisición, escala mínima y máxima de la imagen, elevación del sol y tipo de calibración requerida (los valores máximos y mínimos de radiancia). Por último, se hace clic sobre **Choose** para darle dirección de salida a este archivo. (Ver figura 4-5). Cabe destacar que este procedimiento se aplica para cada una de las bandas que se deseen calibrar y se repite tantas veces como

imágenes se tengan. Los datos y valores asociados a la imagen, se encuentran en el archivo de formato ASCII (metadata), se abren generalmente con un block de notas.

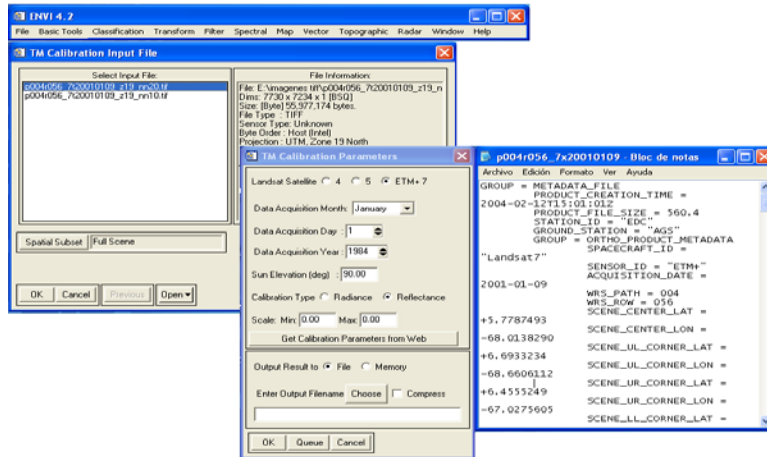


Figura 4-5. Corrida del proceso de calibración de los archivos en formato TIFF para ser transformados a radiancia.

4.2.2.- Fusión de Bandas:

Para ello, en el menú principal de ENVI, se selecciona la ventana **Basic Tools**, seguido del comando **Layer Stracking**; se abre una ventana titulada **Layer Stracking Parameters**, se hace clic sobre **Import File**, donde se selecciona las bandas antes calibradas y luego se presiona la opción **OK**. Por último, se hace clic sobre la opción **Choose** para indicar la dirección de salida del archivo y se presiona **OK** (Ver figura 4-6).

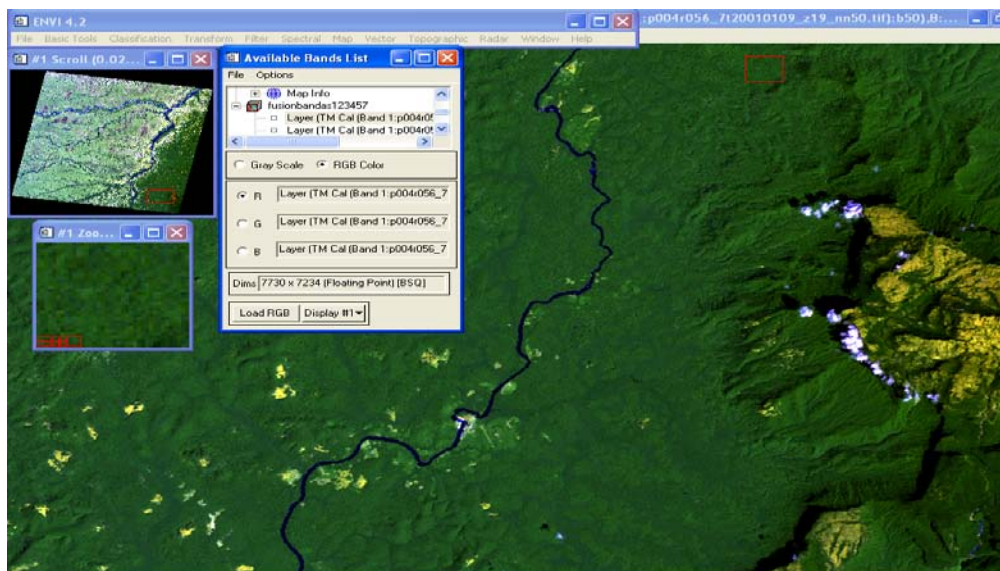


Figura 4-6. Vista de la imagen con las bandas fusionadas y calibradas a radiancia; cabe destacar, que la diferencia no se observa desde el punto de vista físico, sino desde el punto de vista espectral

4.2.3.- Conversión a Formato BIL:

▪ Para realizar esta conversión, se selecciona **Basic Tools** en el menú principal de ENVI, presionar la opción **Convert Data (BSQ, BIL, BIP)**; inmediatamente, se abre una ventana titulada **Convert File Parameters**, se hace clic sobre el formato BIL y seguidamente en “Choose”, se escribe el nombre de salida al archivo y presiona **OK**. (Ver figura 4-7 y 4-8).

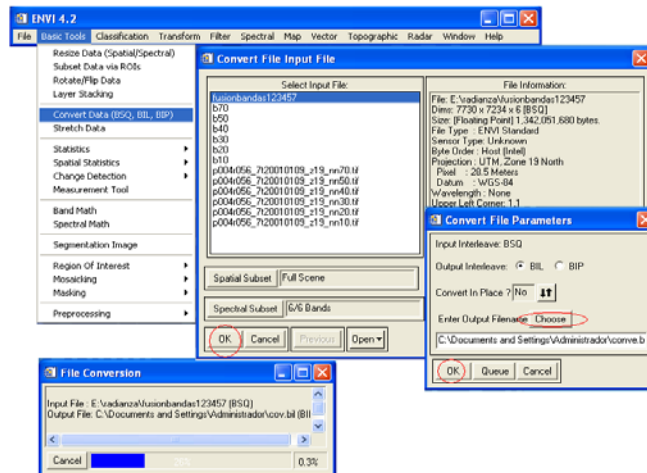


Figura 4-7. Observación del procesamiento de la conversión del formato BSQ al formato BIL.

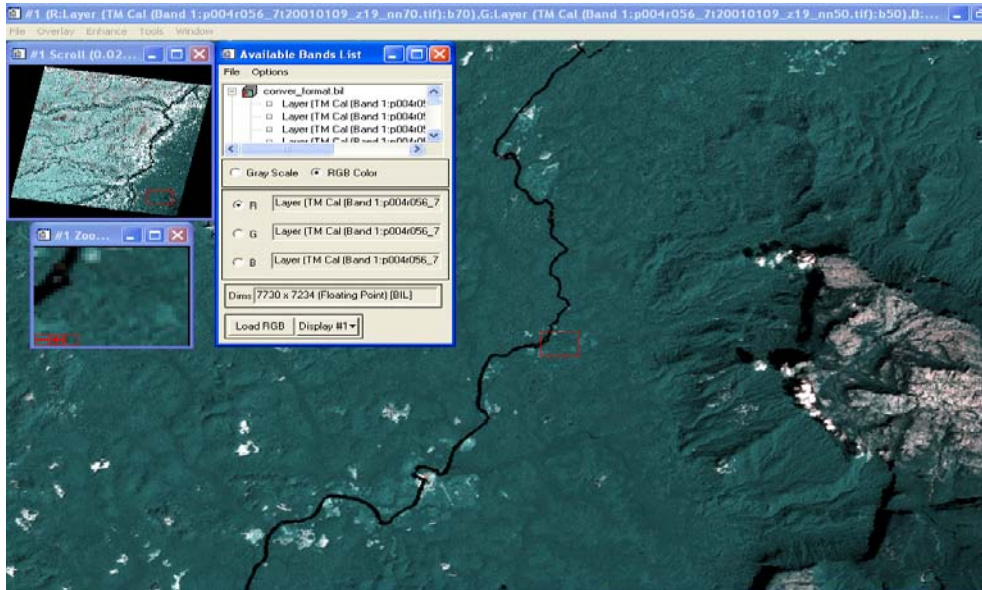


Figura 4-8. Visualización de las bandas de las imágenes Lantsad en formato BIL.

4.2.4.- Corrección Atmosférica (FLAASH):

- Para efectuar las correcciones con el módulo FLAASH, en el menú principal de ENVI, se selecciona la ventana **Basic Tools**, luego se hace clic sobre **Preprocessing** → **Calibration Utilities** → **FLAASH**.

- Se abre una ventana titulada **FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters**, se hace clic sobre **Input Radiance Image**, se activa otra ventana denominada **FLAASH Input File**; en esta, se selecciona el archivo creado (en formato BIL) y se presiona **OK**. Posteriormente, se despliega una ventana nueva denominada **Enter ASCII Filename Containing Wavelengths**, en donde se debe buscar el archivo de extensión.TXT (un block de notas), en el cual se encuentran los valores de frecuencia de ondas, para luego hacer clic en abrir. Consecutivamente, se despliega otra ventana titulada **Radiance Scale Factor**, en donde se selecciona la opción **Use Single Scale Factor for all Bands**, y se hace clic en **OK**.

- Se selecciona en la opción **Output Reflectance File**, en la cual se escribe la dirección que va a guardar el archivo de reflectancia generado. Posteriormente, se selecciona **Output Directory for FLAASH File** y se escoge la dirección de salida del archivo FLAASH; en la barra que se encuentra al lado de **Rootname FLAASH File**.

- Se hace clic sobre **Sensor Tipe**, y se selecciona el tipo de sensor que generó la imagen, sensor Landsat TM7; inmediatamente, el software coloca la altitud a la cual se encuentra este sensor. En la ventana inferior, se coloca la diferencia de cota o elevación promedio presente en la imagen; y se mantiene igual el tamaño del píxel.

- Posteriormente, se busca el archivo de formato ASCII (metadata). Este archivo, contiene la data relacionada con la fecha y la hora de la adquisición de la imagen, además, de las coordenadas longitud y latitud de localización del centro de la imagen. Se hace clic en la barra **Multispectral Settings**, se activa otra ventana, y se selecciona el archivo **Kauffman Tanre Aerosol Retrieval**, donde se selecciona para la opción **KT Upper Channel**, la banda 7 y para **KT Lower Channel** la banda 3. Una

vez introducidos los parámetros, se hace clic sobre **Apply** e inicia el proceso de corrección por este módulo (Ver figuras 4-9 y 4-10).

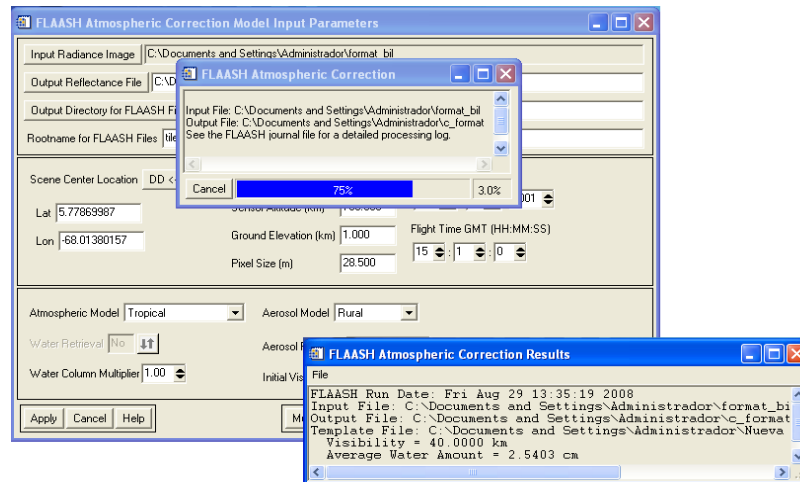


Figura 4-9. Corrida del procesamiento de corrección atmosférica con el módulo FLAASH.

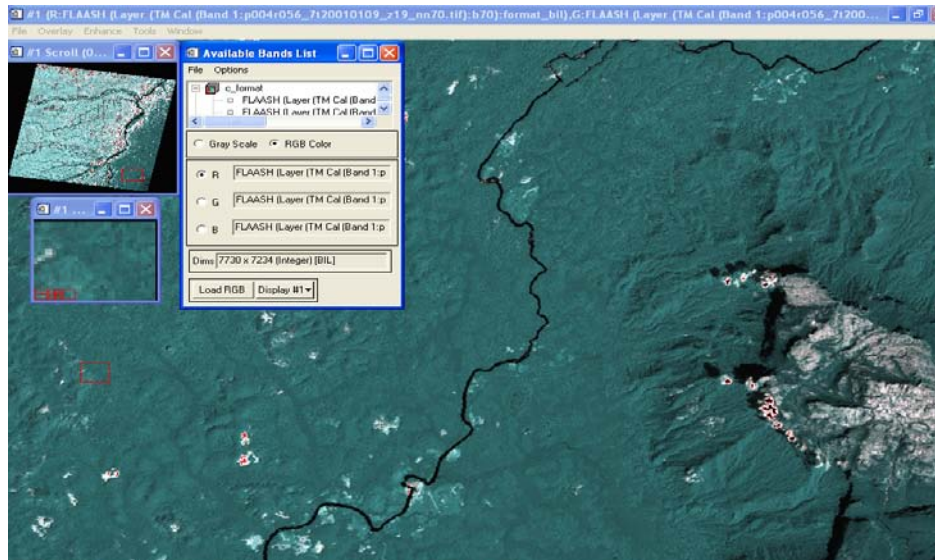


Figura 4-10. Resultados de la corrección atmosférica con el módulo FLAASH y observación de la imagen corregida con tres de sus bandas.


4.2.5.- Corrección Fracción Mínima de Ruido (MNF):

- Se realiza la conversión de imágenes de formato TIFF a formato IMG, este proceso se repite para cada una de las imágenes TIFF.

- Una vez obtenidas todas las imágenes en formato IMG, se procede a apilarlas en una sola imagen, mediante la función **Layer Stack**. Este procedimiento se realiza en orden de bandas.

En segundo lugar, es necesario generar una imagen pura, donde se procede a extraer los pixeles que guardan relación directa con las nubes y sus sombras, para ello es necesario la construcción de un archivo tipo Shapefile en el programa **ARGIS 9.1**.

- Para efectuar esta operación es necesario abrir el archivo de extensión IMG que contiene la fusión de las imágenes. Al realizar esta acción, aparece una ventana **ArcCatalog- ArcView** en la cual se selecciona la opción **New** y luego **Shapefile**. (Ver figura 4-11).

- Se realizan los polígonos que van a cubrir las nubes y sombras, para la realización de estos polígonos se debe pulsar el botón **Editor** ubicado en la barra de herramientas y en el menú desplegable seleccionar la opción **Start Editing**. Se pulsa el icono  y se delimita el borde de las nubes y sombras, creando un polígono cerrado. (Ver figura 4-12).

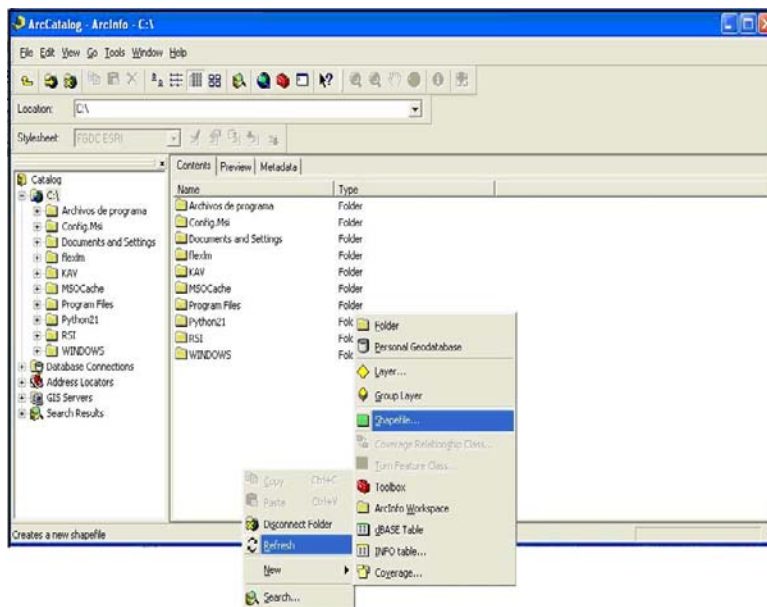


Figura 4-11. La imagen muestra la herramienta que se debe utilizar (ArcCatalog) para generar el archivo Shapefile.

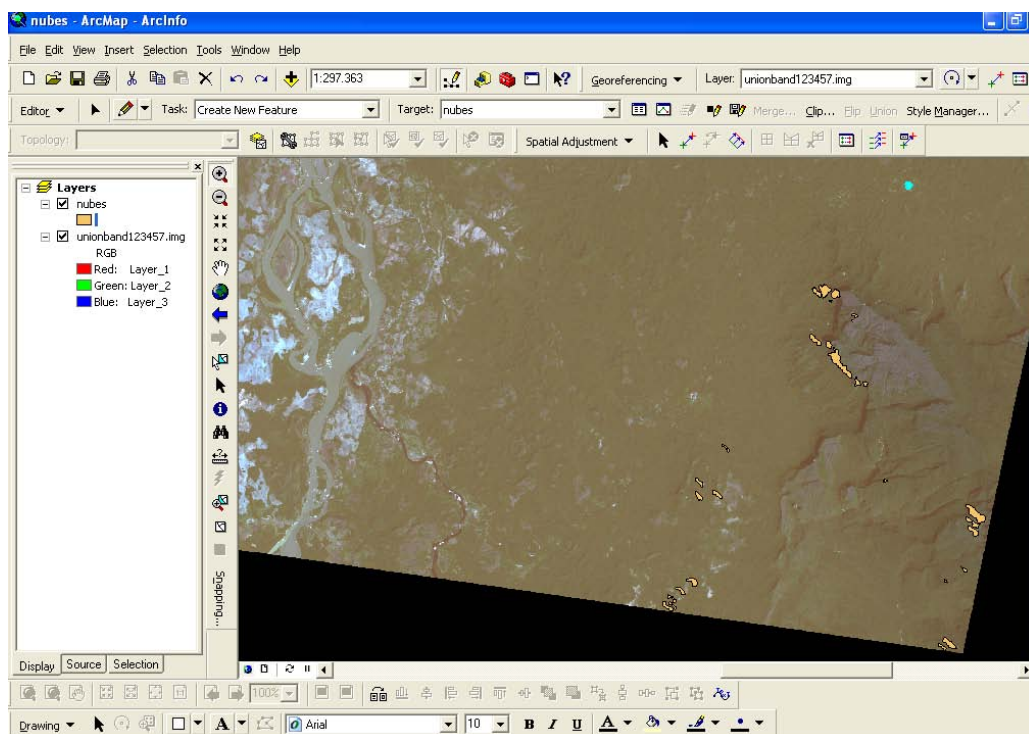


Figura 4-12. El color naranja muestra los polígonos realizados para encerrar tanto las nubes como las sombras que estas generan.

El archivo generado se importa al software **ENVI**, donde posteriormente se genera una máscara que se adjunta a la imagen generada luego de realizar la corrección atmosférica (FLAASH), de manera de eliminar estos elementos (nubes y sombras) al momento de realizar la corrección MNF.

El procedimiento de creación del archivo de la máscara es el siguiente:

- En el menú principal de ENVI, se hace clic en la ventana **Basic Tools**, seguido de **Open Vector File** y se activa una pantalla denominada **Import Vector File Parameters**; se hace clic sobre el archivo entrante, se presiona en el botón **“Choose”**, se escribe un nombre de salida y se aplica el **OK**. Se despliega otra ventana titulada **Available Vector List**, en donde se selecciona el archivo recién importado y se hace clic sobre **Load**

Selected; nuevamente, aparece otra ventana, en donde se selecciona el vector de Windows a la cual se va a adjuntar el archivo shapfile y hace clic en **Apply**. Luego, en esta ventana, se presiona en **File** → **Export Active Layer to ROIs** y se despliega otra ventana, en ésta, se selecciona el método de corrección (que en este caso es la primera opción) y se presiona **OK**.

- Para la construcción de máscara, se presiona **Basic Tools** en el menú principal de ENVI, seguido de **Masking**→ **Build Mask** y se activa una ventana titulada **Mask Definition**, se selecciona un determinado **Display** y se presiona **OK**. Inmediatamente, se genera una nueva ventana en donde se selecciona **Import ROIs**, se activa otra ventana definida **Mask Definition Input ROIs**, se hace un clic sobre el archivo recién importado y presiona **OK**. Se devuelve a la ventana anterior, se presiona **Choose**, se le dan un nombre de salida y se hace un clic sobre **Apply**. (Ver figura 4-13 y 4-14).

Una vez realizado estos pasos, se procede a realizar la corrección de fracción mínima de ruido (MNF).

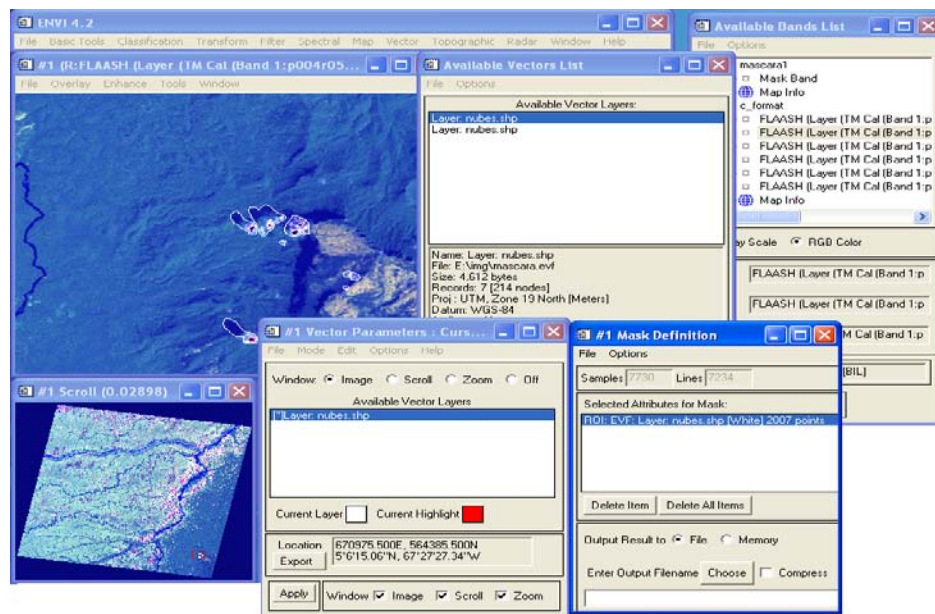


Figura 4-13. Corrida del procesamiento de la construcción de la máscara.

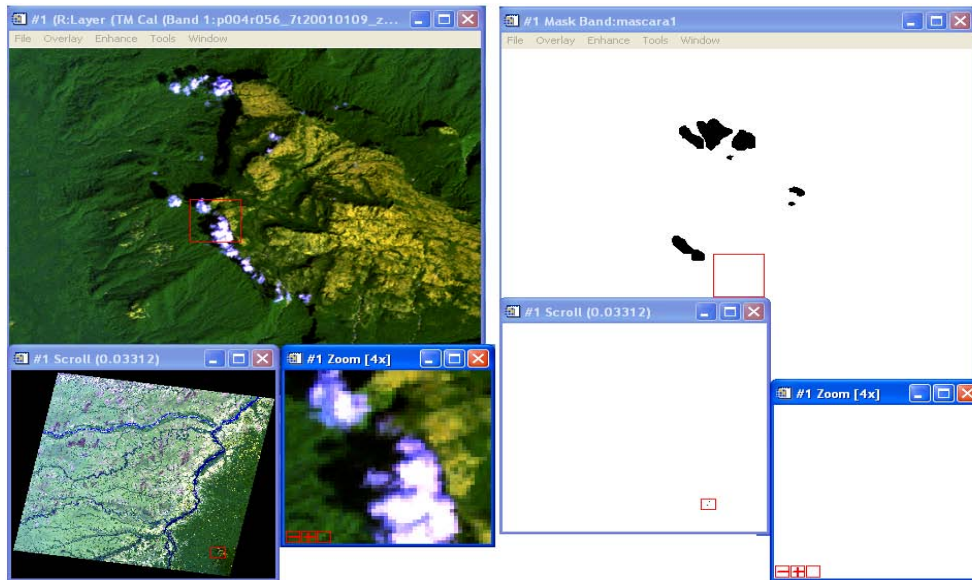


Figura 4-14. Resultados y vista de una máscara asociada a nubes y sombras.

- Para realizar la transformación de la fracción mínima del ruido (MNF), se selecciona el comando **Spectral** en el menú principal de ENVI, seguido de **MNF Rotation** → **Forward MNF** → **Estimate Noise Statistics From Data** y se activa una ventana denominada **MNF Transform Input File**, se señala el archivo del SWIR recién creado y se presiona **OK**. Se despliega una nueva ventana titulada **Forward MNF Transform Parameters** y se escriben un nombre de salida estadístico para el ruido en la primera barra, un nombre de salida estadístico para el MNF en la segunda barra y un tercer nombre de salida para el archivo MNF en la tercera barra; se presiona **OK** y se inicia el algoritmo. (Ver figura 4-15 y 4-16).

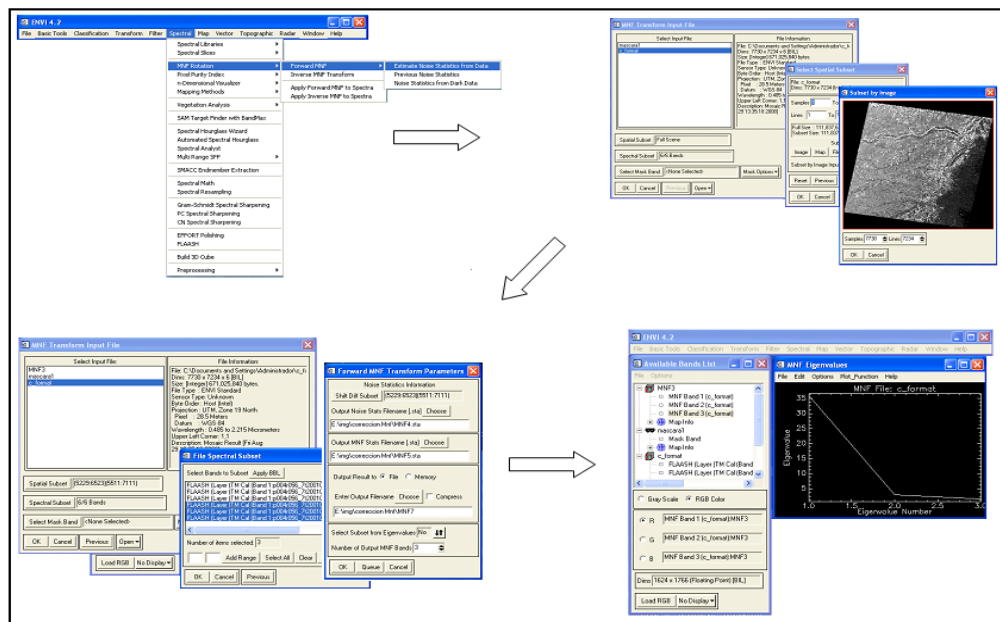


Figura 4-15. Pasos a seguir para la obtención de la Fracción Mínima del Ruido (MNF).

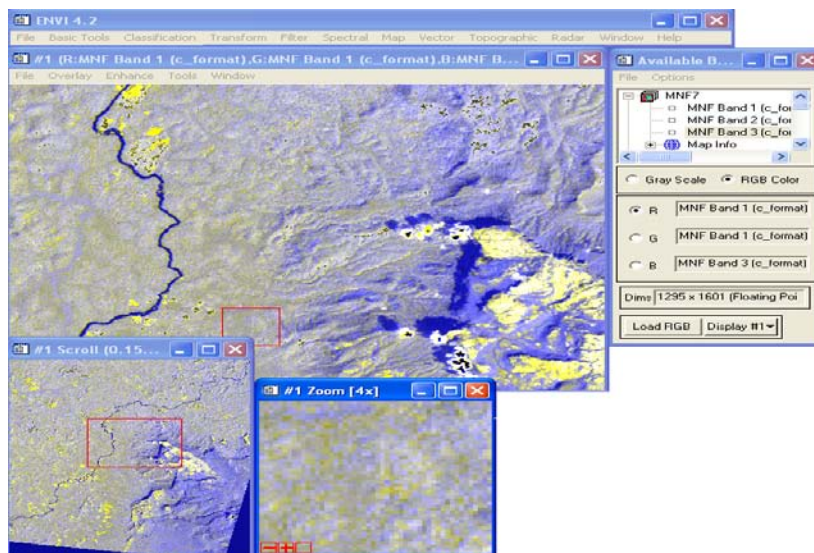


Figura 4-16. Vista de una imagen con una combinación de bandas del MNF.

4.2.6.- Índice de Pureza de Píxel (PPI):

- Para efectuar este procesamiento, se selecciona el comando **Spectral** en el menú principal de ENVI, seguido de **Píxel Purity Index** → **[FAST] New Output Bands** y se activa una ventana denominada **Fast Píxel Purity Index Input Data File**, en esta ventana, se selecciona el archivo MNF creado en el proceso anterior y se presiona **Spectral Subset** para escoger las tres primeras de las seis bandas y se hace clic en **OK**. Regresamos a la ventana anterior y nuevamente se presiona **OK**; se abre una nueva ventana denominada **Fast Píxel Purity Index Parameters**, donde se escoge el número de iteraciones y el factor de tolerancia que permita finalizar el proceso de selección de estos píxeles extremos, escogemos una dirección de salida de este archivo y se hace clic en **OK**. (Ver figura 4-17).

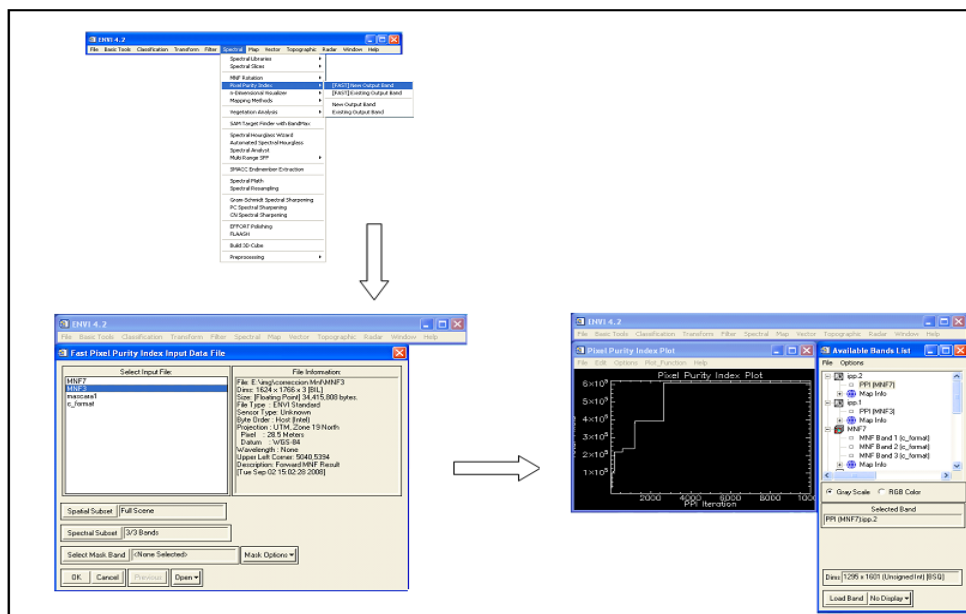


Figura 4-17. Corrida del procesamiento de selección del número total de píxeles extremos.

- Luego se procede a utilizar el **Visualizador N Dimensional**, herramienta que permite obtener los píxeles puros de la imagen, a través de la distribución del espectro de valores extremos. Para conocer la cantidad de píxeles extremos seleccionados por el algoritmo, se debe abrir primero la imagen con las modificaciones realizadas por este algoritmo (en la ventana **Available Bands List**). Sobre esta imagen, se selecciona en su menú la opción **Overlay** → **Density Slice** y se despliega una nueva ventana titulada **Density**

Slice Bands Choice, se selecciona el archivo PPI y se hace clic sobre **OK**; aparecerá otra ventana mostrando los valores de rango de la cantidad de píxeles seleccionados.

- Seguidamente, se visualizan los píxeles extremos encontrados por PPI en el espacio de mezcla espectral (ver figura 4-18); en este paso y de forma manual, se seleccionan los píxeles aun más extremos, esto con la finalidad de obtener una data un poco más exacta o pura. La selección manual de estos píxeles más extremos, se lleva a cabo haciendo clic sobre la ventana titulada **n-D Controls**; en la cual, se van a seleccionar los edmenber y firmas espectrales resultantes del algoritmo anterior. A continuación se presiona **Options** → **Show Axes**, opción que permite mostrar los ejes y → **3D: Drive Axes**, para generar movimiento a la vista tridimensional; Visualizados los píxeles extremos en la vista 3D, estos se seleccionan asignándoles distintos colores, para así definir clases de píxeles similares, para ello, se hace clic sobre **Class** → **Ítems 1:20** → **Y el color a selección**. Al seleccionar los edmenber, se procede a hacer clic con el botón derecho del Mouse y se escoge **Export All**; donde, se despliega una ventana que contiene los edmenbers escogidos en la parte anterior, y en la cual se puede definir la cantidad de clases seleccionadas junto a los colores asociados a cada una de ellas.

- Por último, se aplica el algoritmo **Spectral Angle Mapper (SAM)**, herramienta que permite calcular la distancia angular existente entre un espectro de referencia y un píxel cualquiera; tiene como finalidad filtrar la cantidad de píxeles existentes en la data cuando éstos posean un ángulo mayor al del espectro de referencia.

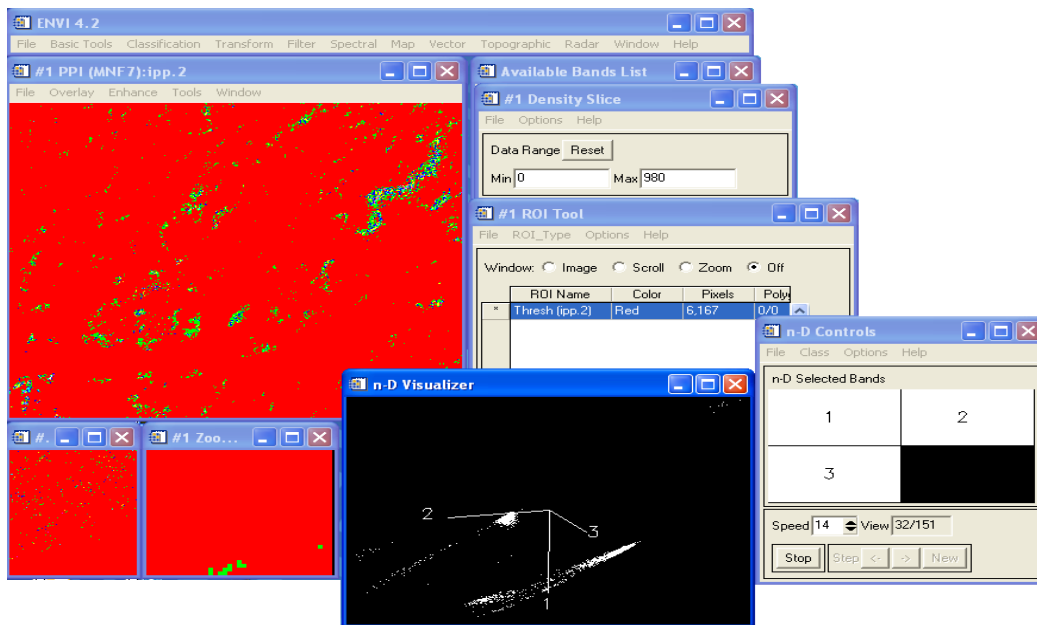


Figura 4-18. Visualización del espacio espectral y del proceso para la selección manual de los píxeles extremos.

- Para llevar a cabo este algoritmo, se selecciona el comando **Spectral** en el menú principal de ENVI, seguido de **Mapping Methods** → **Spectral Angle Mapper**; se genera una ventana titulada **Classification Input File**, donde, se selecciona el archivo MNF creado en procesos anteriores y se presiona **Spectral Subset** para escoger las tres primeras de las seis bandas (debido que éstas poseen aproximadamente el 80% de la información total de la data) y se hace clic en **OK**.

- Por ultimo se activa una nueva ventana denominada **Endmember Collection: SAM**, en esta se presiona la opción **Import** → **from ROI/EVF from input file** y se despliega otra ventana titulada **Select Regions for Stats Calculat**; para seleccionar las clases formadas en la parte anterior, se presiona **OK** → **Apply**. Luego se genera una nueva ventana definida como **Spectral Angle Mapper Parameters**, en la cual, se puede modificar el ángulo existente entre los píxeles y el espectro de referencia; donde se le asignan los nombres de salida de estos archivos y se presiona **OK**.

4.2.7.- Clasificación No Supervisada:

▪ En el programa ENVI se abre la imagen con corrección atmosférica FLAASH. En la ventana de título **Available Band List** se seleccionan las tres primeras bandas para los tres cañones. Luego en el menú principal de la ventana de la imagen se pulsa la opción **File**, seguidamente las opciones **Save Image As** y la opción **Image File**. (Ver figura 4-19).

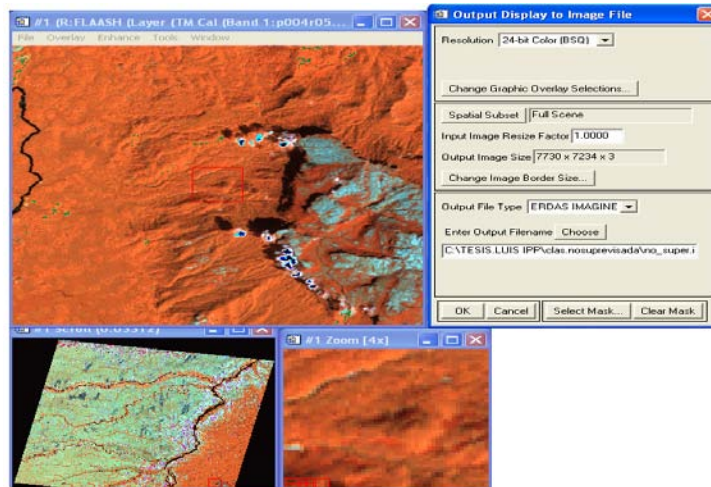


Figura 4-19. Observación de la imagen corregida con el módulo FLAASH en tres de sus bandas y corrido del proceso de conversión a formato IMG.

▪ Aparece la ventana **Output Display To Image File**; Se escoge la opción **ERDAS IMAGE**, la ruta y el nombre de archivo de salida, en el cuadro de selección. Este procedimiento se repite para las tres bandas restantes.

▪ Con el programa **ERDAS IMAGE**, se procede a realizar la unión de las imágenes obtenidas en el paso anterior, utilizando la función **Layer Staking**, la cual se encuentra en la barra del menú principal al pulsar la opción **Interpreter** y luego la opción **Utilities**.

▪ Una vez terminada la fusión de las imágenes, se pulsa la opción **Classifier** en la barra del menú principal y se selecciona la opción **Unsupervised Classification**. Luego en la ventana **Unsupervised Classification (Isodata)**, se introduce el archivo generado en el procedimiento anterior (unión de las imágenes) en la opción **Input Raster**. En la opción **Output Cluster Layer** se escoge la ruta y el nombre del archivo imagen de salida;

finalmente en la opción **Output Signature Set** el nombre y ruta de salida del archivo que contiene las clases obtenidas. Se presiona **OK**. (Ver figura 4-20).

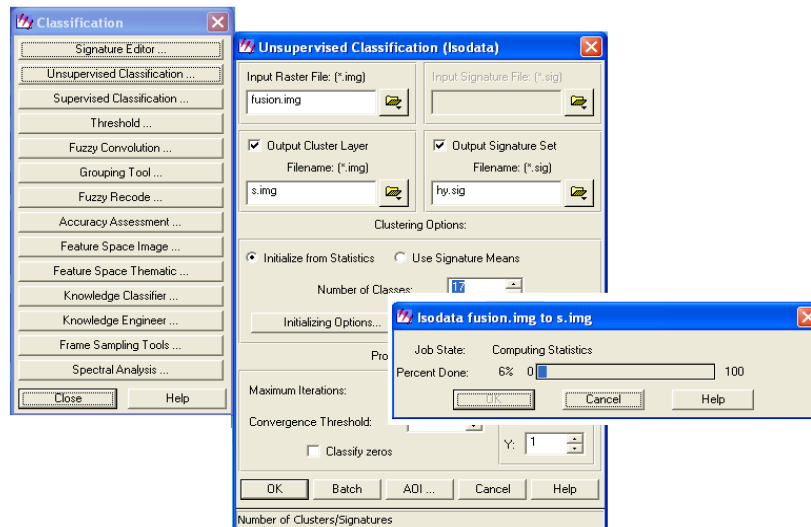


Figura 4-20. Corrida del procesamiento para la Clasificación No Supervisada.

- Finalizado el proceso, en la ventana de título **Viewer #1** se abre el archivo creado anteriormente, pulsando el botón derecho del mouse aparece una ventana y se selecciona la opción **Fit Image To Window**. Se obtiene la imagen generada a partir la Clasificación No Supervisada. (Ver figura 4-21).

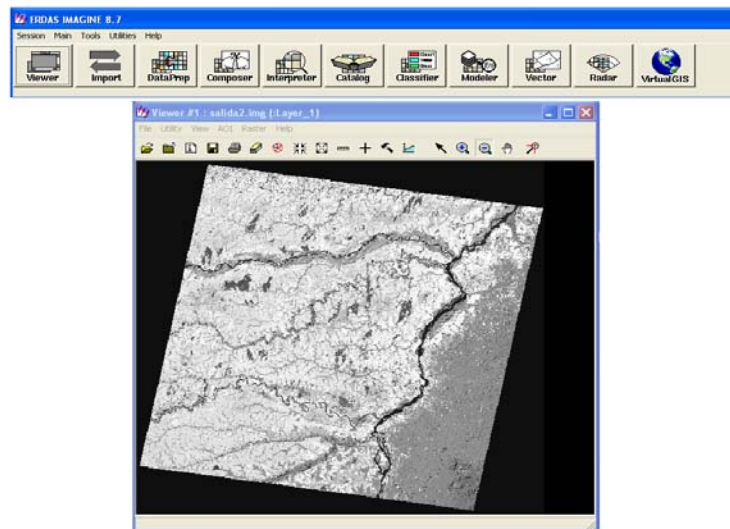


Figura 4-21. Imagen final de la clasificación no supervisada en escala de grises para su posterior interpretación.

- En el menú de la ventana **Viewer #1** se selecciona la opción **Raster** y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Attributes**, seguidamente aparece una ventana que contiene todas las clases obtenidas donde se procede a realizar la interpretación.

4.2.8.- Clasificación Supervisada:

La clasificación supervisada se realiza mediante funciones contenidas en el programa **ERDAS 8.5**, de la siguiente manera:

- Se abre la imagen obtenida en el paso (4.2.2), luego en el menú principal se pulsa la opción **Classifier**, en el menú desplegable se selecciona **Signature Editor** y se crea el archivo que contendrá las clases.

- En la ventana de título **Viewer #1** se selecciona la opción **Raster**, para luego pulsar **Tools**. En la ventana de herramientas de título **Raster** que aparece se selecciona el icono que corresponde a formas poligonales, seguidamente se procede a encerrar alguna zona de la cual se tenga información, en un polígono y se edita el nombre de la clase generada. Este procedimiento se repite para cada clase de la que se tenga información (Ver figura 4-22).

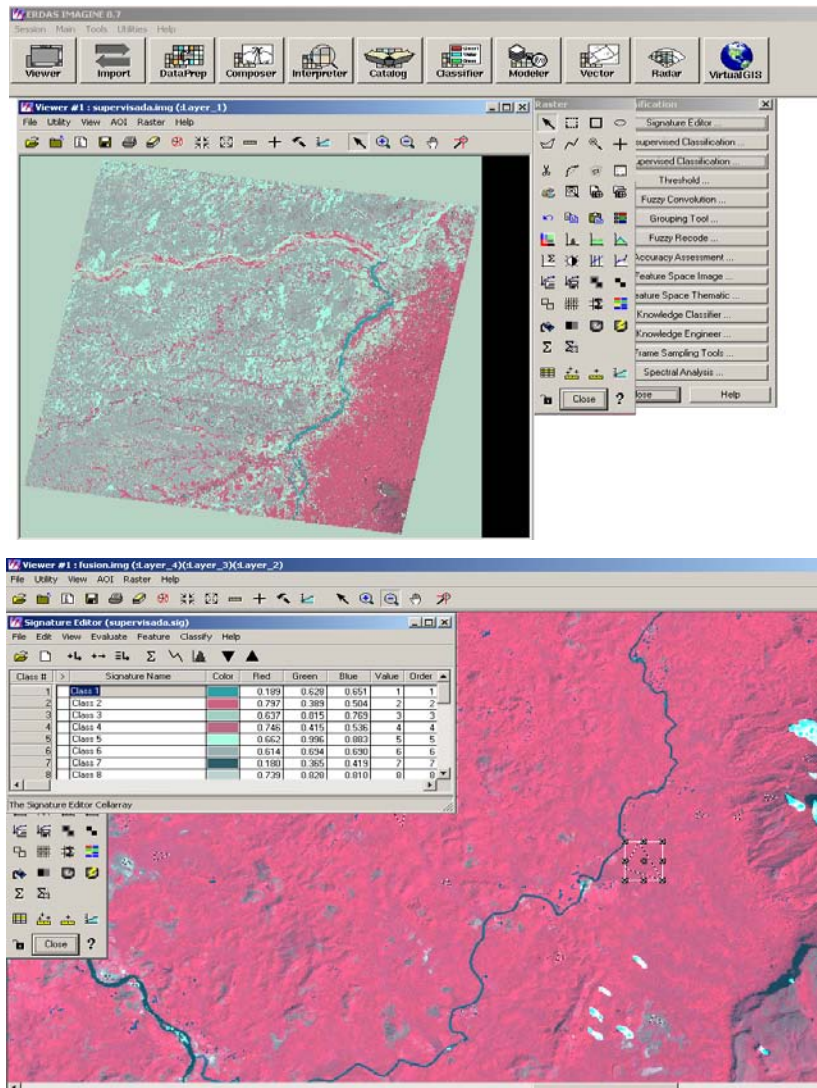


Figura 4-22. Corrida del procesamiento para la clasificación supervisada mediante el programa ERDAS 8.5.

- En el menú principal se pulsa la opción **Classifer**, para luego seleccionar la opción **Supervised Classification**, en donde se introduce el nombre del archivo generado en el procedimiento fusión de imágenes (paso 4.2.2) en la opción **Input Raster**. En esta opción se introduce el archivo generado que contiene las clases designadas; luego en la opción **Classified file**, se introduce el nombre y ruta de salida

del archivo que se generara. Finalmente, se comienza el análisis estadístico representando su avance en una barra de progreso.

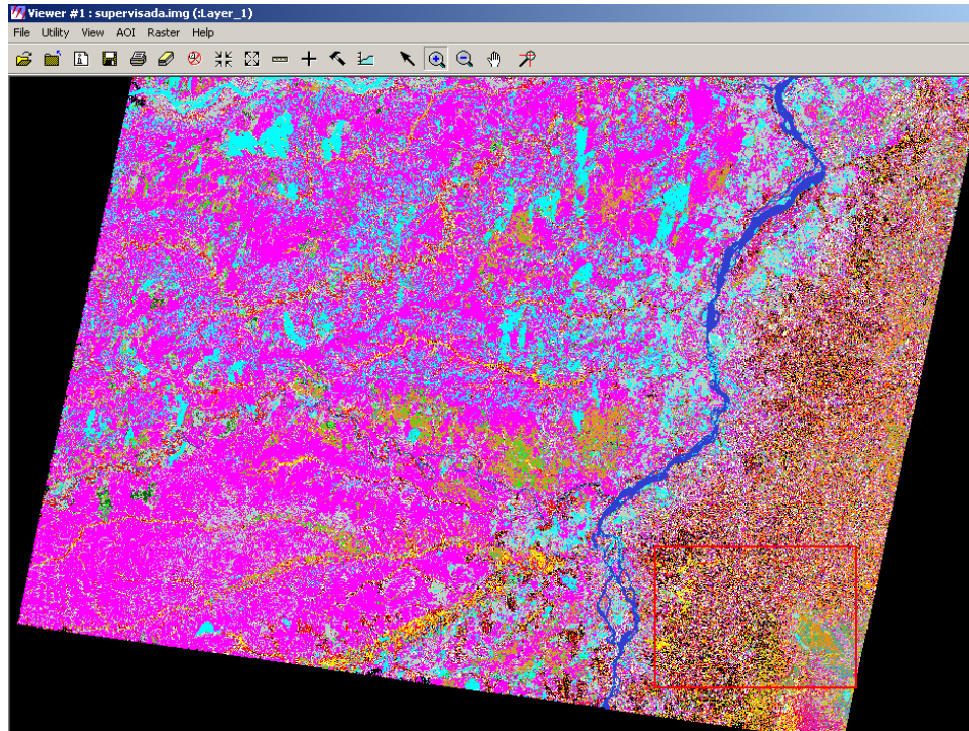


Figura 4-23. Imagen final de la clasificación supervisada generada a partir de las clases y colores asignados, apoyado en mapas preexistentes.

4.2.10.- Modelo Digital de Elevación:

Los pasos a seguir para realizar dicho procedimiento en el programa **ENVI 4.2.**

- Inicialmente se procede a abrir la imagen de la corrección atmosférica en **FLAASH**, donde se seleccionó una combinación de bandas de (7 RED, 5 GREEN, 1 BLUE).
- Posteriormente se selecciona la opción **3D Surfaceview**. Donde se despliega la ventana titulada **Associated DEM Input File** en la cual se permite seleccionar una de las 6 bandas de la imagen **FLAASH** y se presiona **OK**. (Ver figura 4-24).

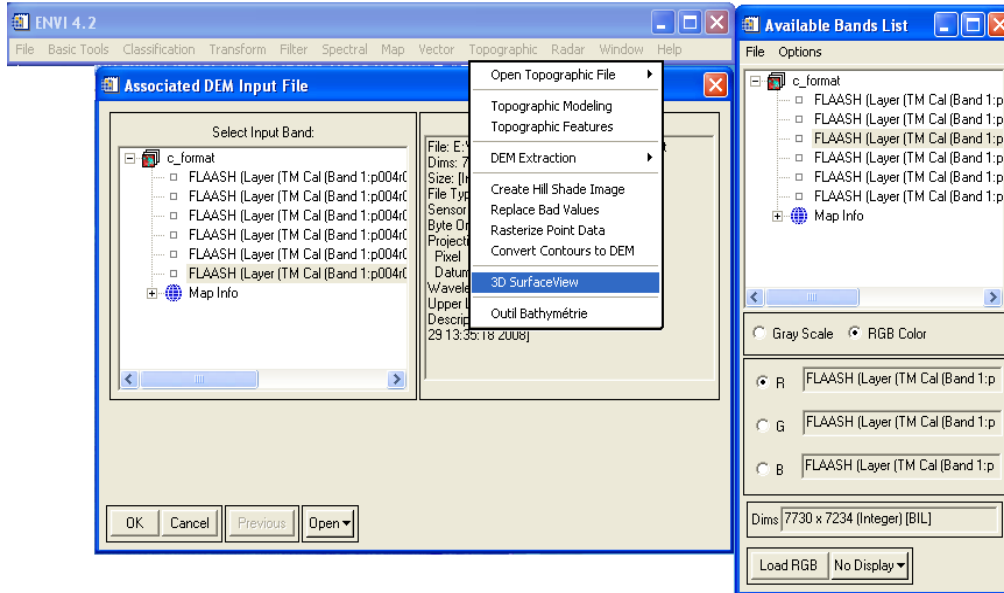


Figura 4-24. Selección de bandas en la imagen Flaash para la generación del modelo 3D.

- Se despliega la ventana **3D SurfaceView Input Parameters**, en la cual se genera la delimitación de la zona de estudio haciendo click en el botón **Espatial Subset**, posteriormente se abre una venta **Select Spatial Subset**, se selecciona la opción **Image**, y se genera un recuadro de color rojo el cual va a permitir la ampliación o reducción del área a la cual se le aplicara el modelo **3D**. (Ver figura 4-25).

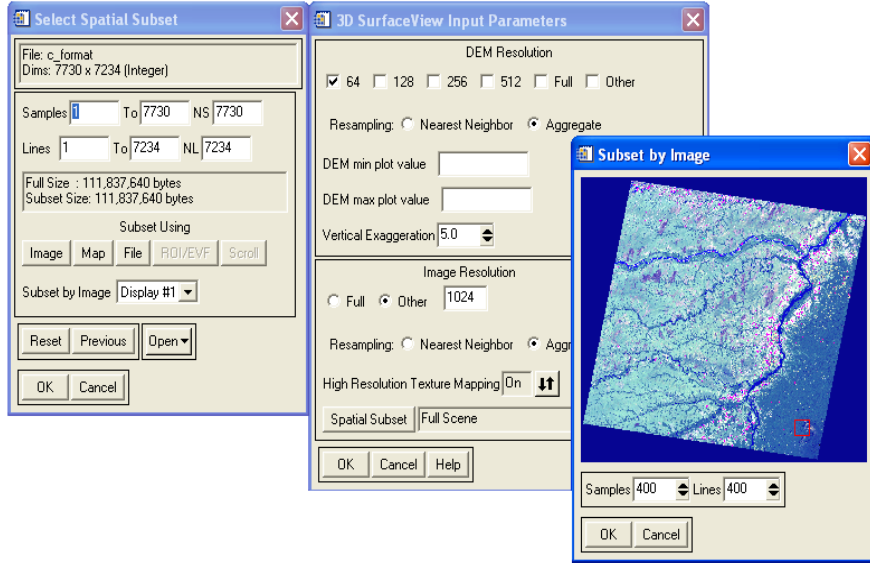


Figura 4-25. Continuación del proceso de construcción del Modelo Digital de Elevación (DEM).

- Una vez realizado todos estos procedimientos se genera la imagen digital con el modelo de elevación, teniendo como resultado un mejor realce de la topografía. (Ver figura 4-26).

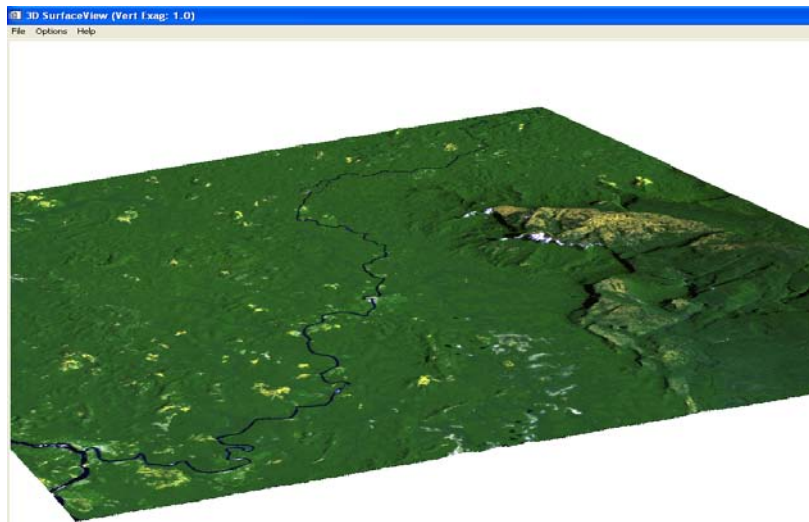


Figura 4-26. Modelo digital 3D de la zona de estudio con la imagen Landsat 7 de la corrección atmosférica en FLAASH.

4.2.11.- Aplicación de firmas espectrales para la detección de uranio:

A continuación se muestran los pasos a seguir para realizar dicho procedimiento en el programa **ENVI 4.2**:

- Inicialmente se procede a abrir la imagen de la corrección atmosférica en **FLAASH**, donde se seleccionó una combinación de bandas de (7 RED, 5 GREEN, 1 BLUE).
- Posteriormente se selecciona la opción **Spectral** en el menú principal, luego en el menú desplegable, se selecciona **Spectral Libraries** y **Spectral Library viewer** como puede observarse en la figura 4-27.

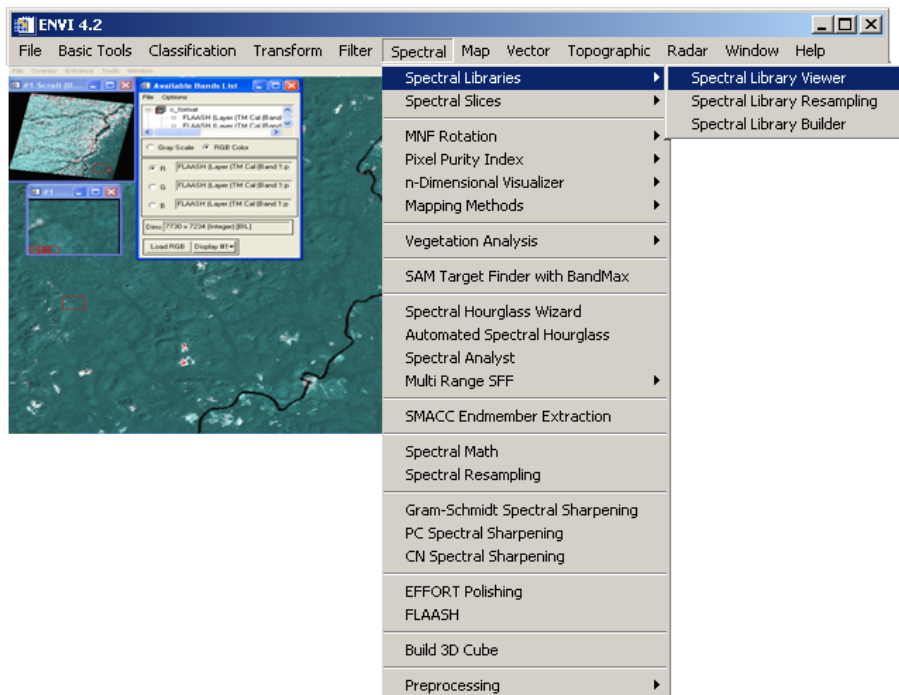


Figura 4-27. Selección de firmas espectrales de minerales asociados al Uranio, en el Spectral Libraries.

- Al abrir la ventana Spectral Library Viewer, se muestra la lista con una variedad de minerales, donde se escoge el o los minerales que serán de gran utilidad para su posterior análisis, en este caso minerales asociados al Uranio (Uralita y Uvarovita), ya que no se encuentra la firma espectral del Uranio en la librería. (Ver figura 4-28).

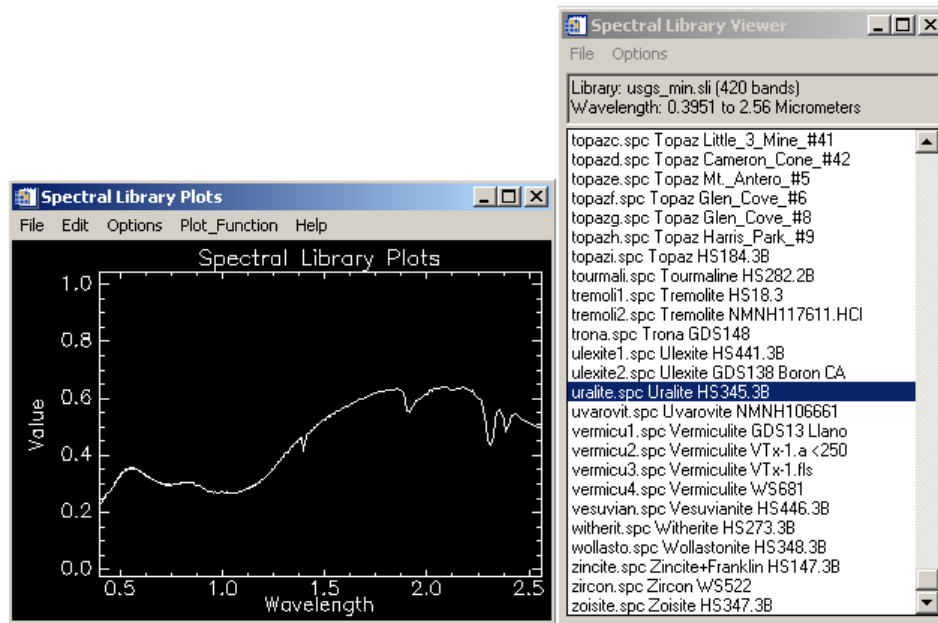


Figura 4-28. Firma espectral de la Uralita, mineral asociado al Uranio, seleccionado en el Spectral Library Viewer.

- Una vez escogidos los minerales, se procede a seleccionar en la ventana desplegable **Spectral**, la opción **Mapping Methods** y luego **Spectral Angle Mapper**, donde se muestra la ventana titulada **Classification Input File**, en la cual se abre la imagen de corrección atmosférica en **FLAASH** y se importa el mineral de la librería, como se puede observar en la figura 4-29, Comenzando así el proceso.

- Terminado el proceso se obtiene para cada firma espectral utilizada un resultado, el cual va a demostrar si la firma espectral de cada mineral tiene relación o no con la imagen satelital, lo que permite definir la correspondencia de estos minerales con una zona en específico de la imagen, e igualmente inferir la presencia de alguna acumulación importante de estos. (Ver figura 4-30).

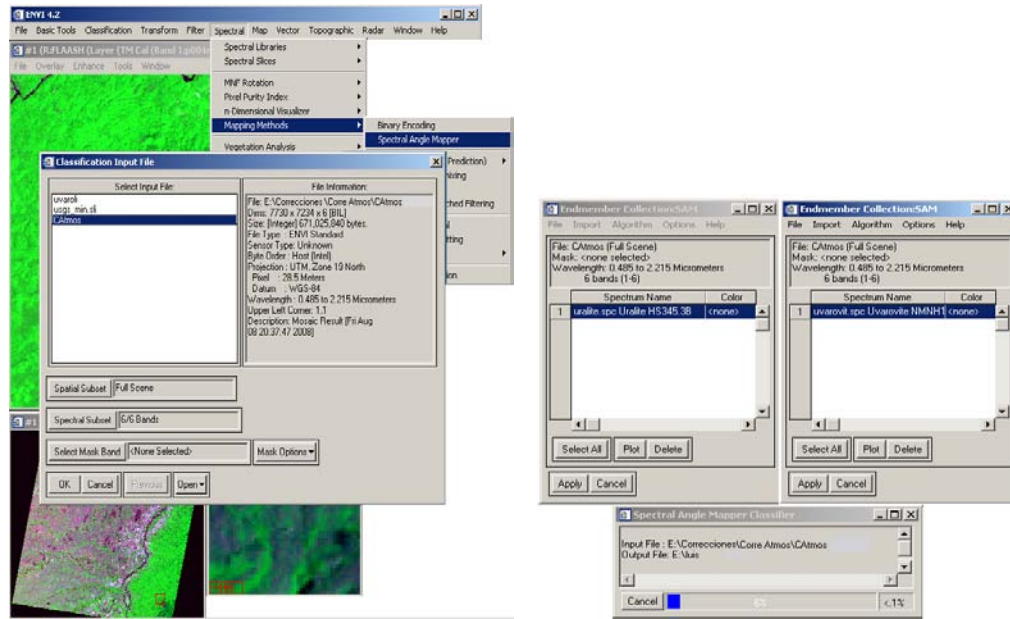


Figura 4-29. Corrido del procesamiento de firmas espectrales de minerales asociados al Uranio, mediante el programa ENVI y mediante el cual se pretende detectar posibles acumulaciones importantes.

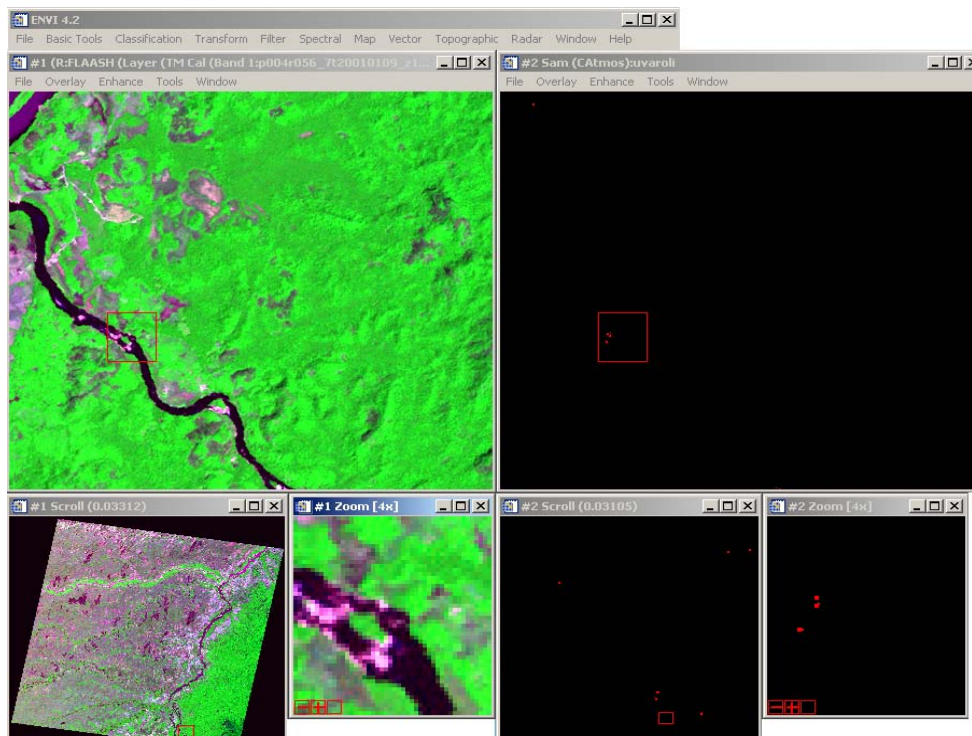


Figura 4-30. Resultado del corrido de firmas espectrales de minerales asociados al Uranio en la imagen Landsat, donde se muestra en los recuadros de fondo color negro la correspondencia (puntos rojos) de las firmas espectrales con la imagen.