



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
COMITÉ ACADÉMICO DEL POSTGRADO EN GEOLOGÍA,  
MINAS, GEOFÍSICA Y PETRÓLEO**

**VEREDICTO**

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y por el Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado, presentado por el **Lic. Luis Pérez Fernández**, portador de la Cédula de Identidad No. 12.685.632, bajo el título: **“Los sistemas de información geográfica y la teledetección espacial en el análisis de la información geológica de la región Todasana-Cabo Codera-Capaya, Cordillera de la Costa”**, a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al Título de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas, dejan constancia de los siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los Miembros del Jurado, éste fijó el día 20 de Abril de 2006, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en el salón Zuloaga, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el Jurado; todo conforme a lo dispuesto en los Artículos 44, 49, 50, 51 y 52 del Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa pública del trabajo, el Jurado decidió aprobarlo por considerar, sin hacerse solidario de las ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.


Para este veredicto, el Jurado estimó que la obra examinada representa en su conjunto un aporte importante. Esta investigación aplicada presenta un enfoque novedoso dentro del área de las Ciencias Geológicas.

En fe de lo cual se levanta la presente Acta, a los veinte días del mes de Abril de 2006, dejándose también constancia de que, conforme a lo dispuesto en la normativa jurídica vigente actuó como Coordinador del Jurado el **Dr. Franco Urbani**.

  
PhD. Franck Audemar

  
PhD. Daniel Loureiro



  
Dr. Franco Urbani

Coordinador

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL EN EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA REGIÓN TODASANA-CABO CODERA-CAPAYA, CORDILLERA DE LA COSTA**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Lic. Pérez Luis  
Para optar al Título de  
Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, Abril de 2006

© Pérez Fernández Luis Alexander 2006.  
Hecho en Depósito de Ley.  
Depósito legal lft. 487200691023

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL EN EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA REGIÓN TODASANA-CABO CODERA-CAPAYA, CORDILLERA DE LA COSTA**

Tutor académico: Dr. Franco Urbani

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Lic. Pérez Luis  
Para optar al Título de  
Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, Abril de 2006

## RESUMEN

PÉREZ F. LUIS A.

### **LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL EN EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA REGIÓN TODASANA-CABO CODERA-CAPAYA, CORDILLERA DE LA COSTA**

**Tutor Académico: Dr. Franco Urbani. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2005. n° páginas. 96**

**Palabras clave:** (Cartografía geológica, sistema de información geográfica, teledetección espacial, Cordillera de la Costa)

Con el objetivo de contribuir al conocimiento geológico de la Cordillera de la Costa-Venezuela, se han aplicado algunos algoritmos automatizados y semiautomatizados basados en técnicas desarrolladas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), que permitieron implementar análisis morfométricos, espectrales y geobotánicos y su relación con las unidades geológicas que componen la Cordillera de la Costa-sección central, en un área que tiene una superficie aproximada de 1.591 km<sup>2</sup>.

En relación a las unidades geológicas, estas se presentan de forma diversa debido a que el área de estudio esta incluida en parte de un cinturón de deformación del sureste del Caribe y norte de Sudamérica localizado en el centronorte de Venezuela. Producto de esto, la Cordillera de la Costa es litológica, petrológica y geocronologicamente muy heterogénea formada por terrenos de afinidad oceánica, de margen continental y de basamento continental (AVÉ LALLEMANT 1997). Por estas razones, esta región está compuesta fundamentalmente de rocas ígneo- metamórficas de edades que van desde el Precámbrico hasta el Cretácico y marginalmente diversas unidades sedimentarias del Terciario al Reciente. Esto es evidenciado por la cartografía de geología de superficie en el área de estudio que muestra la existencia de al menos 26 unidades geológicas distintas, siendo 18 ígneo-metamórficas agrupadas por las napas de la Serranía del Litoral (Asociación Metamórfica la Costa: Complejo Nirgua (CN), Anfibolita de Cabo Codera (Ccc), Metadiorita de Todasana (Cto) y algunos cuerpos de Serpentinitas (Sp); Asociación Metamórfica Caracas: Esquisto de Chuspita (CaC), Esquisto de las Mercedes (CaM), Esquisto de las Brisas (CaB) y Mármol de Zenda (CaBz); y la Asociación Metamórfica Avila representada por las siguientes unidades geológicas: Metatonalita de Caruao (Ac), Complejo San Julián (Asj y Asjf) y

el Augengneis de Peña de Mora (APM)) y por las napas de la Serranía del Interior (Filita de Urape (Tu, Tug); y Filita de Murugurata (TM), (URBANI & RODRÍGUEZ 2004).

Como se comento anteriormente, estas unidades geológicas se correlacionaron con algunos análisis morfométricos y visuales del terreno, estos versaron en la implementación de los siguientes algoritmos: modelos digitales de elevación (MDE). A partir de este, se realizó el modelo de iluminación y sombras (MDIS) con azimuth de iluminación (45°, 90°, 135°, 180°, 215°, 270°, 315°) que sirvió para corregir la interpretaciones geológicas elaboradas anteriormente y permitió una primera mejora cartográfica tanto de las unidades geológicas en el área de estudio como las lineaciones, al incorporar nuevas diferenciaciones.

Esta diferenciación presentó un mejor basamento al incorporar, un análisis de textura (utilizando la dimensión fractal) presentando un coeficiente de correlación de 0,8 con respecto a las unidades geológicas. Siendo la dimensión fractal  $> 2,2$  para las unidades ígneo-metamórficas y  $< 2,2$  para unidades sedimentarias, explicado por las propiedades de los minerales asociados a la matriz de la roca y su resistencia tanto a la erosión como a la meteorización.

Asimismo, se incorporaron otro tipo de indicadores como el nivel de disección y pendientes, los cuales mostraron coeficientes de correlación de 0,89 y 0,815 respectivamente.

Por otro lado, se trabajó con la cobertura vegetal para poder hacer la relación con respecto a la geología de superficie. Las rocas ígneas y metamórficas presentaron una alta correlación espacial con bosques y las sedimentarias con herbazales y matorrales.

Adicionado a esto, se procesaron dos tipos de imágenes de percepción remota, entre los cuales están las imágenes Landsat 7 ETM+ path/row 003/053 y 004/054 y una imagen Radarsat; las cuales contribuyeron a disminuir la incertidumbre en algunas áreas poco muestreadas de acuerdo con la data existente, a partir de la aplicación de algunos algoritmos de realces de estructuras y extracción de unidades geológicas, entre los cuales están filtros direccionales y clasificaciones supervisadas y no supervisadas, con coeficientes de correlación en el orden de 0,53 y 0,73.

Esta información permitió la generación de la propuesta cartográfica, en la cual se enriquece el conocimiento estructural del área de estudio pasando de 298 lineaciones registradas en la literatura y en los mapas geológicos existentes a 713, de esta forma se incrementó el registro de las estructuras geológicas en un 58,2 %, ofreciéndose además un nuevo esquema geológico en relación a límites de unidades geológicas como consecuencia de la aplicación de tecnologías SIG y TE.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	
CAPÍTULO 1.-Introducción	1
1.1.- Planteamiento de la investigación	2
1.2.-Objetivos	2
CAPÍTULO 2.- Marco geológico regional	4
2.1.- Unidades Geológicas del área de estudio	5
2.1.- Fallas	9
CAPÍTULO 3.- Marco referencial	10
CAPÍTULO 4.- Marco teórico	12
4.1.-La estratigrafía y estructuras geológicas	12
4.2.- Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección Espacial	12
CAPÍTULO 5.- Metodología	14
5.1.-Diseño de la investigación	14
5.2.- Definición de variables e indicadores	14
5.3.- Instrumentos: Recolección de datos	15
5.4.-Procedimiento	16
5.5.-Análisis de los Datos	19
CAPÍTULO 6.- Resultados	
6.1.- Geología producto de técnicas SIG	20
6.1.1- Relaciones MDE, MDIS, análisis de textura, nivel de disección, pendientes- cartografía geológica	20
6.1.1.1- Dimensión fractal	37
6.1.1.2.- Nivel de disección	42
6.1.1.3.-Pendientes	42
6.1.2.- Evidencias geomórficas de fallamiento-lineamientos-cartografía geológica	47
6.1.3.- Cobertura vegetal vs. cartografía geológica	52
6.2.- Geología producto de técnicas PDI-TE	57
6.2.1.- Clasificaciones visuales y digitales	57
6.2.1.1.- Interpretación geológica con sensores activos	57
6.2.1.3.- Interpretación geológica con sensores pasivos	61

6.3.-Geología producto de la integración de técnicas SIG y TE. Síntesis de Resultados	74
CAPÍTULO 7- Sumario, conclusiones y recomendaciones	80
Bibliografía	83
Apéndice	86

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Área de estudio	3
<b>Figura 2.</b> Área de estudio (hoja 6947)	3
<b>Figura 3.</b> Configuración tectónica de la Cordillera de La Costa	4
<b>Figura 4.</b> Mapa de unidades geológicas digital de la hoja 6947	6
<b>Figura 5.</b> Mapa de muestras recolectadas en campo de la cartografía geológica existente	8
<b>Figura 6.</b> Gráfico y longitud de lineaciones	9
<b>Figura 7.</b> Esquema metodológico	14
<b>Figura 8.</b> Curvas de nivel generalizadas trazadas a partir de las 16 hojas a escala 1:25.000 de la hoja 6947	21
<b>Figura 9.</b> Modelo digital de elevaciones (MDE)	22
<b>Figura 10.</b> MDIS ( azimuth de iluminación de 315°, una altitud de 30° y strech aplicado)	23
<b>Figura 11.</b> Vista 3D MDIS	25
<b>Figura 12.</b> Ajuste geométrico de las unidades geológicas del MDIS	26
<b>Figura 13.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 45° y una elevación de 30°	28
<b>Figura 14.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 90° y una elevación de 30°	29
<b>Figura 15.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 135° y una elevación de 30°	30
<b>Figura 16.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 180° y una elevación de 30°	31
<b>Figura 17.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 225° y una elevación de 30°	32
<b>Figura 18.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 270° y una elevación de 30°	33
<b>Figura 19.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 315° y una elevación de 30°	34
<b>Figura 20.</b> Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 360° y una elevación de 30°	35

<b>Figura 21.</b> Dimensión fractal	40
<b>Figura 22.</b> Dimensión fractal reclasificada	41
<b>Figura 23.</b> Orientación del flujo y de las estructuras (azimuth)	43
<b>Figura 24.</b> Nivel de disección del terreno	44
<b>Figura 25.</b> Pendientes	45
<b>Figura 26.</b> Mapa generalizado de lineamientos	48
<b>Figura 27.</b> Mapa generalizado de evidencias geomórficas de fallamiento	49
<b>Figura 28.</b> Gráfico de longitud y azimuth de las lineaciones	50
<b>Figura 29.</b> Bloques tectónicos que conforman el área de estudio	51
<b>Figura 30.</b> Composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	53
<b>Figura 31.</b> Clasificación supervisada basada en una composición de bandas 4-3-2 de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+	54
<b>Figura 32.</b> Imagen de radar RADARSAT modo grueso, posición descendente. Marzo 1996	58
<b>Figura 33.</b> Ajuste de interpretación geológica en Imagen RADARSAT, modo grueso, posición descendente. Marzo 1996	59
<b>Figura 34.</b> Ajuste e interpretación de lineaciones en Imagen RADARSAT, modo grueso, posición descendente. Marzo 1996	60
<b>Figura 35.</b> Ajuste de unidades geológicas en una composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	62
<b>Figura 36.</b> Ajuste de lineaciones basada en una composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	63
<b>Figura 37.</b> Clasificación no supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	64
<b>Figura 38.</b> Clasificación no supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	66
<b>Figura 39.</b> Clasificación supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3	

a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	68
<b>Figura 40.</b> Campos de entrenamiento utilizados para la clasificación supervisada	69
<b>Figura 41.</b> Gráfico de separabilidad y de respuestas espectrales, derivados de la selección de campos de entrenamiento, en lugares con muestreo de campo	70
<b>Figura 42.</b> Clasificación supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	73
<b>Figura 43.</b> Localización para efectuar la clasificación supervisada de tres clases basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	73
<b>Figura 44.</b> Clasificación supervisada de tres clases basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+, Fecha de adquisición 18/10/2002	74
<b>Figura 45.</b> Cartografía geológica de superficie existente	76
<b>Figura 46.</b> Ejemplo de ajuste y aumento de detalle de la cartografía geológica de superficie	77
<b>Figura 47.</b> Cartografía geológica de superficie existente	78
<b>Figura 48.</b> Cartografía geológica de superficie ajustada	78
<b>Figura 49.</b> Estructura de datos y entidades SIG	86
<b>Figura 50.</b> Longitud de onda y frecuencia	87
<b>Figura 51.</b> Espectro electromagnético	87
<b>Figura 52.</b> Firmas espectrales	91
<b>Figura 53.</b> Tipos de reflexión	91
<b>Figura 54.</b> Corrección geométrica	94
<b>Figura 51.</b> Clasificación digital de imágenes	95

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Central de Venezuela, institución donde me he formado como estudiante y profesor.

Por otra parte quiero agradecer sinceramente a mi tutor, el Profesor Dr. Franco Urbani, por ser tan paciente y diligente en todas las formas posibles para que esta investigación fuese desarrollada.

Al Centro de Estudios Integrales del Ambiente (CENAMB) y en especial al personal del Laboratorio de Modelación Ambiental, quienes me han apoyado durante este tiempo para el desarrollo de esta investigación.

Adicionalmente el presente trabajo representa un aporte al proyecto GEODINOS (FONACIT G-2002000478).

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación constituye una aplicación de algoritmos automatizados y semiautomatizados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección Espacial (TE), en lo relativo al procesamiento y extracción digital de información de terreno y contenida en imágenes satelitales para el análisis de la geología de superficie de la región Todasana-Cabo Codera-Capaya, asimismo contribuyendo con la ampliación del conocimiento de estas herramientas y su empleo en ámbitos temáticos pocos estudiados como es el de las Geociencias que carecen de pocas experiencias en este tipo de aplicaciones. En este sentido, esta investigación esta compuesta por siete capítulos estructurados de la siguiente manera:

El capítulo 1, están integrado por el planteamiento de la investigación, los objetivos de la investigación y la delimitación territorial del área de estudio. El capítulo 2, constituido por el marco geológico regional, el cual expresa el conjunto de rocas y estructuras geológicas que configuran el área de estudio. El capítulo 3, conformado por el marco referencial, el cual muestra el análisis de antecedentes de la investigación, es decir, aquellos trabajos que tienen relación e incorporan aportes a esta investigación. El capítulo 4, integrado por el marco teórico, el cual está compuesto de dos partes fundamentales que versan de la siguiente manera: en primer lugar, sobre el conocimiento de las unidades estratigráficas y estructuras geológicas y en segundo lugar, sobre las tecnologías de la información SIG y TE en el marco del procesamiento y extracción de información contenida en imágenes satelitales. El capítulo 5, está formado por los aspectos metodológicos para llevar a cabo organizadamente y según una secuencia lógica la investigación. El capítulo 6 esta integrado por la aplicación de la metodología en el desarrollo del trabajo y los resultados experimentados. Finalmente, el capítulo 7, está compuesto por las conclusiones y recomendaciones. Asimismo, conviene destacar que se han diseñado un conjunto de anexos que complementan la información plasmada a lo largo de esta investigación y las referencias bibliográficas utilizadas.

## **1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La escasa información acerca de la geología de superficie de varios lugares y regiones de Venezuela ha sido una de las causantes del incremento de la incertidumbre para muchos estudios y toma de decisiones en el ámbito del aprovechamiento o implicaciones de este recurso en todas sus dimensiones. Los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección espacial (TE) se han convertido en una alternativa para solucionar y/o mejorar estos problemas en aplicaciones en el campo de la geología. En el caso de la geología de superficie permite homogeneizar y mejorar la cartografía geológica de un lugar, con una mayor confianza, a un menor costo y en un menor tiempo que los métodos convencionales, hecho destacable para emplearlas en la cartografía de cuerpos de rocas y minerales.

Por todas las razones expuestas surge la necesidad de elaborar un modelo para la discriminación de unidades de rocas y estructuras geológicas mediante SIG y TE, el cual aplicará a un área de estudio que tiene la particularidad de poseer amplias extensiones tanto de rocas ígneo-metamórficas como sedimentarias. En el primer grupo de rocas de la región de estudio existe un buen control de campo aproximadamente en la mitad de su extensión mientras es ausente en la otra, esto también ocurre en la extensión de las sedimentarias. Por consiguiente, se pretende mejorar la cartografía geológica del área menos conocida.

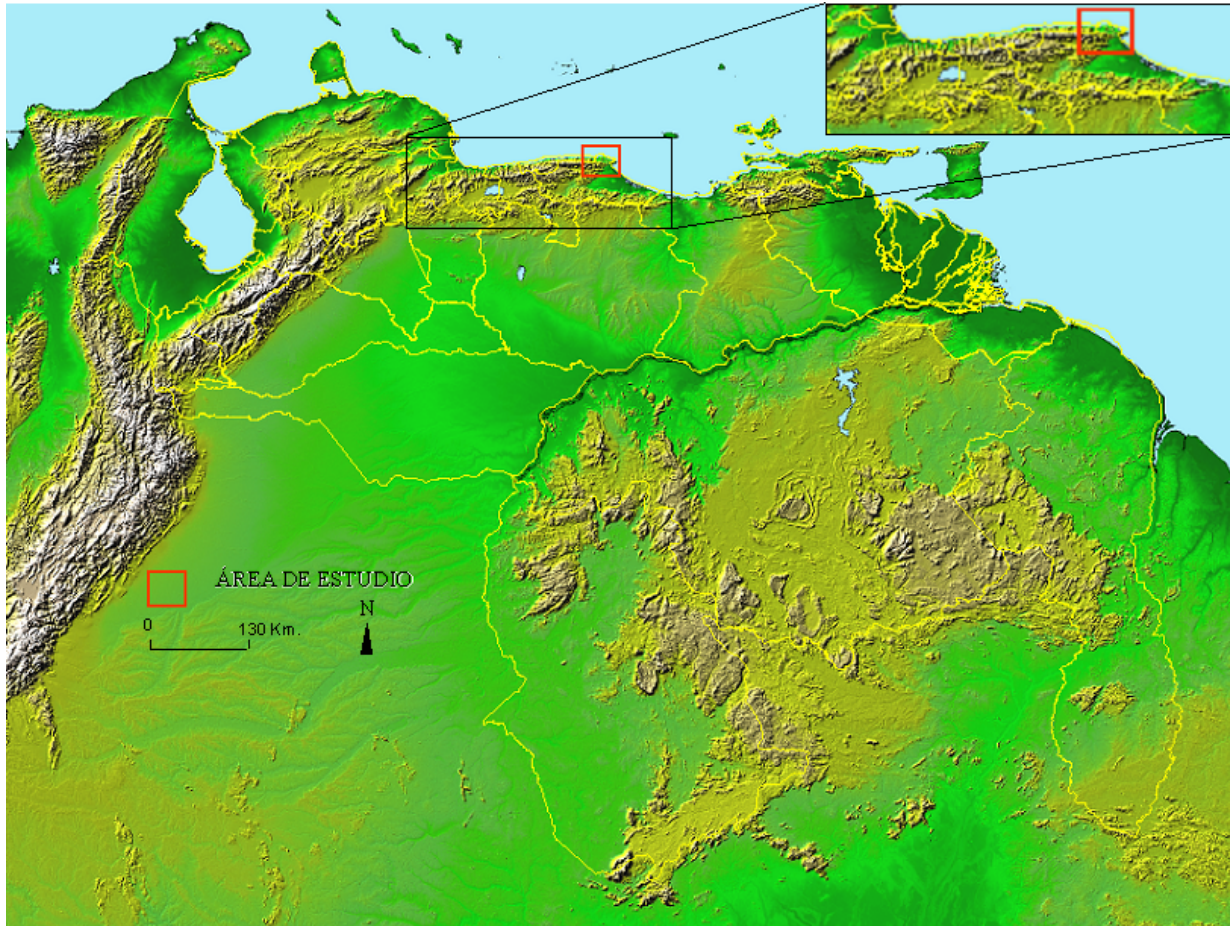
La ubicación del área de estudio corresponde con la región Todasana (noroeste)-Chuspita (suroeste), Cabo Codera (noreste)-Tacarigua de Mamporal (sureste), es decir, abarcando el área total de la hoja Higuero (6947) a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (Figuras 1 y 2).

### **1.1.-OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

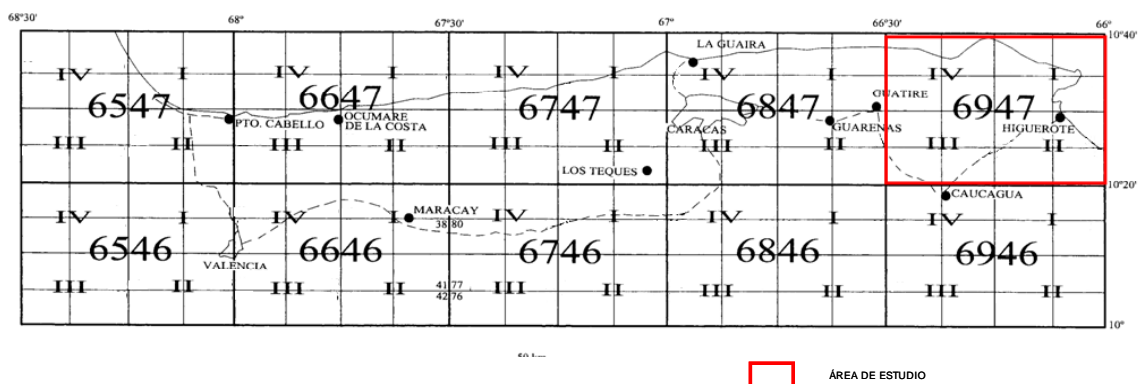
Los objetivos de la presente investigación son:

- Discriminar las unidades de rocas y estructuras geológicas en la zona en consideración, utilizando SIG y TE con la finalidad de mejorar los mapas de geología de superficie.
- Establecer y evaluar procedimientos y técnicas de extracción de información geológica en regiones tropicales utilizando SIG y TE.

- Evaluar la efectividad de las tecnologías empleadas, a través del establecimiento de comparaciones entre los productos resultantes y la cartografía geológica existente en la parte con buen control de campo y con escasa información de campo.



**Figura 1. Área de estudio**  
(Tomado de USGS 2000)



**Figura 2. Área de estudio (hoja 6947)**  
(Tomado de URBANI & RODRIGUEZ 2004)

## 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área de estudio esta incluida en parte de un cinturón de deformación del sureste del Caribe y norte de Sudamérica localizado en el centronorte de Venezuela (Figuras 1 y 2). Este cinturón corresponde con la Cordillera de la Costa, la cual se formó por colisión y transpresión oblicua entre la placa del Caribe con el margen norte de la placa suramericana (Figura 3), siendo la deformación diacrónica de oeste a este y localizándose aproximadamente en el centro norte de Venezuela en el Oligoceno (AVÉ LALLEMANT 1997).



**Figura 3. Configuración tectónica de la Cordillera de La Costa**  
(Tomado de AUDEMARD & AUDEMARD 2002)

Producto de esto, la Cordillera de la Costa es litológica, petrológica y geocronológicamente muy heterogénea, formada por terrenos de afinidad oceánica, de margen continental y de basamento continental (AVÉ LALLEMANT, 1997). Además, como consecuencia de la colisión y transpresión, elementos clave para su levantamiento, ocurrió un intenso fallamiento, evidenciado principalmente por la prominente falla de San Sebastián (Figura 3). Por otro lado, esta región está compuesta fundamentalmente de rocas ígneo-metamórficas de edades que van desde el Precámbrico hasta el Cretácico y marginalmente diversas unidades sedimentarias del Terciario al Reciente (URBANI & RODRÍGUEZ, 2004).

Para una mejor comprensión de la geología del área de estudio se compiló y homogenizó la información de la geología del área de estudio, con base en la cartografía existente para la fecha, esto no solo para contextualizar la investigación sino como uno de los insumos más importantes para la elaboración del modelo de análisis geológico.

Esta compilación y homogenización (Figura 4) es mostrada como producto de la digitalización, carga de base de datos e integración de bases atributivas en SIG, tomando como base la cartografía del *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa* (URBANI & RODRÍGUEZ, 2004). Para una mayor comprensión del mapa y expresión geológica de las unidades estratigráficas y estructuras se muestra la siguiente descripción.

## 2.1.- UNIDADES GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio se presentan un conjunto de unidades de rocas ígneo-metamórficas y sedimentarias, las cuales están resumidas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Unidades geológicas de la hoja 6947**

Tipo de roca	Estratigrafía regional	Unidad geológica	Código	Litología	
Sedimentarias		Aluvión	Qal	Aluvión	
		Formación Guatire	TGa	Conglomerado-caliza-marga-limo-arcilla limosa y arcilla	
		Formación Mamporal	Qm	Arcilla-arenisca y conglomerado	
		Formación Cauagua	TQc	Conglomerado y arcilla de color pardo rojizo	
		Formación Carenero	Taz	Lutita calcárea	
		Formación La Sabana	Ts	Arena, capas de guijarros, lutita	
		Formación La Playita	TQp	Conglomerado, arenisca, grauvaca y arcosa	
		Formación Aramina	Ta	Conglomerado-caliza-lutita arcillosa-arcilla y arenisca	
Ígneo - metamórfica	Napas de la Serranía del Litoral	Asociación Metamórfica La Costa	Complejo Nirgua	CN	Esquisto, cuarcita, esquisto anfibolítico, anfibolita
			Serpentinita	Sp	Serpentinita
			Anfibolita de Cabo Codera	Ccc	Anfibolita y Metatonalita
			Metadiorita de Todasana	Cto	Metadiorita-metagabro-anfibolita
	Napas de la Serranía del Litoral	Asociación Metamórfica Caracas	Esquisto de Chuspita	CAC	Esquisto-cuarzo-grafitoso-micáceo-carbonático
			Esquisto de Las Mercedes	CaM	Esquisto grafitoso y mármol
				CaMp	Esquisto cuarzo plagioclásico grafitoso
				CaMn	Mármol y esquisto carbonático
				CaMf	Metaconglomerado-cuarzo-feldespático-calcítico
			Esquisto de Las Brisas	CaB	Esquisto-cuarzo-albítico-muscovítico-clorítico
			Mármol de Zenda	CaBz	Mármol de Zenda
	Napas de la Serranía del Interior	Asociación Metamórfica Ávila	Metatonalita de Caruao	Ac	Metatonalita- anfibolita-metadiorita
			Complejo de San Julián	Asj	Esquisto y gneis cuarzo plagioclásico micáceo
				Asjf	Gneis y esquisto feldespático
			Augengneis de Peña de Mora	APM	Augengneis
Napas de la Serranía del Interior			Tu	Filita-metarenisca-metaconglomerado	
	Filita de Urape		Tug	Metagabro	
	Filita de Muruguata		TM	Filita grafitosa carbonática-metarenisca	

Elaboración propia a partir de (CIEN, 1997y URBANI & RODRÍGUEZ, 2004). Las abreviaturas de las unidades será usada a lo largo del texto.



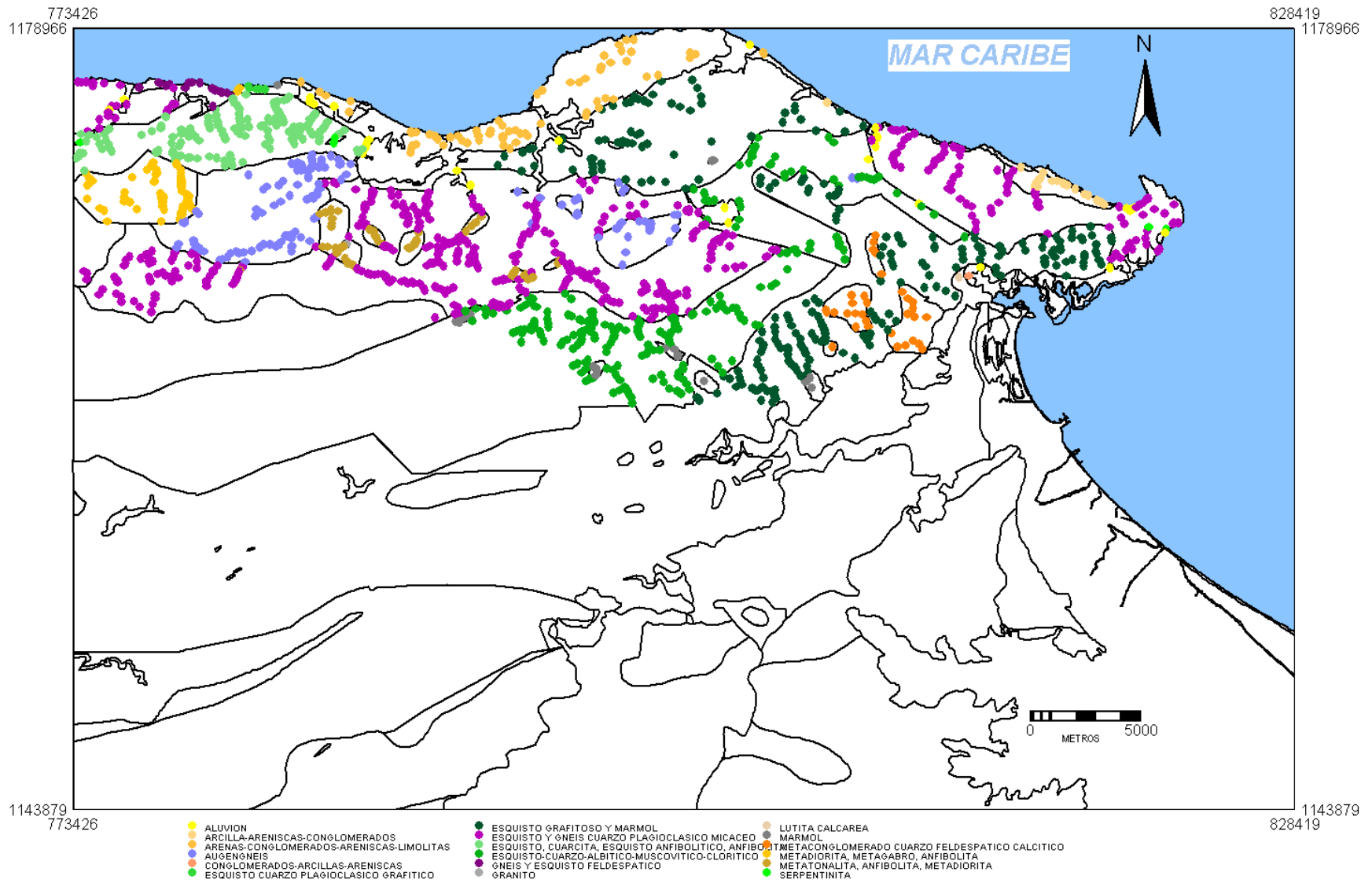
Además de conocerse cuales son las unidades geológicas presentes, un punto a destacar de la cartografía geológica existente es la presencia de muestras de campo (1.575 en total), que validan a las unidades de rocas donde existen éstas. Este hecho es importante para poder realizar las clasificaciones digitales que se implementarán posteriormente y conocer los litotipos representativos de cada unidad.

En general se puede visualizar que la mayoría de las muestras están localizadas al norte del área de estudio, quedando sin muestras el sur y especialmente el centro y suroeste de la hoja 6947 (Figura 5 y Tabla 2).

**Tabla 2. Número de muestras según litología**

Tipo de roca	Estratigrafía regional	Unidad estratigráfica	Código	Muestras	
Sedimentaria		Aluvión	Qal	33	
		Formación Mamporal	Qm	20	
		Formación Carenero	Taz	1	
		Formación La Sabana	Ts	1	
		Formación La Playita	TQp	66	
Ígneo - metamórficas	Asociación Metamórfica La Costa	Complejo Nirgua	CN	158	
		Serpentinita	Sp	7	
		Metadiorita de Todasana	Cto	72	
	Asociación Metasedimentaria Caracas			CaM	232
				CaMp	12
			Esquisto de Las Mercedes	CaMz	33
			Esquisto de Las Brisas	CaB	232
			Mármol de Zenda	CaBz	23
	Asociación Metamórfica Ávila		Metatonalita de Caruao	Ac	52
			Granito	Acg	1
				Asj	480
			Complejo de San Julián	Asjf	20
			Augengneis de Peña De Mora	APM	128
Total				1575	

La figura 5 y Tabla 2 muestran que las unidades al sur y este presentan vacíos en relación al registro de muestras en la cartografía geológica; es decir, las que presentan mayor incertidumbre y menor detalle. Sin embargo, es conveniente dejar claro que si se considera que en donde existen muestras de foliación y estratificación debieron existir muestras o visualización no reportadas de las unidades estratigráficas para la generación de la cartografía geológica, se puede decir que el suroeste del área de estudio, más específicamente donde existe la Asociación Metamórfica Ávila (sin diferenciar) y la Asociación Metasedimentaria Caracas, es donde se localiza el principal vacío de información. Asimismo, se puede destacar que aunque existen unidades geológicas como el Complejo San Julián bien detalladas, existen otras unidades que no poseen muestras y algunas con menos de 10 muestras, como la unidad APM al noreste del área de estudio, TS, CAMc, CAMa, Taz y Sp, aunque por la extensión superficial las dos últimas unidades las muestras parecen suficientes.



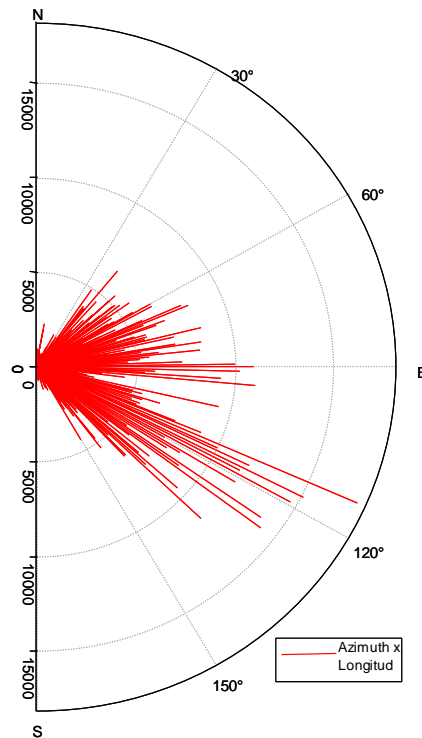
**Figura 5. Mapa de muestras recolectadas en campo de la cartografía geológica existente**

(Compilación con base en URBANI & RODRÍGUEZ, 2004)

## 2.2.- FALLAS

En relación a la expresión espacial de las fallas presentes en la cartografía geológica existente se puede decir que las principales tienen rumbo NW-SE al norte del área de estudio y NE-SW al centro y sur del área de estudio, existiendo también fallas menores con direcciones NNW-SSE con énfasis en el este del área de estudio. En total se registró una longitud total de 741,9 km de fallas en los mapas previos utilizados (Figuras 4 y 6).

Todo lo mencionado anteriormente es importante ya que partiendo del conocimiento de la geología de superficie, se pueden aplicar los algoritmos y técnicas propuestas para buscar las relaciones espaciales necesarias y así intentar mejorar la cartografía geológica del área de estudio.



**Figura 6. Gráfico y longitud de lineaciones reportadas**

### 3. MARCO REFERENCIAL

#### 3.1.-REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ASOCIADAS A LA INVESTIGACIÓN

En relación a la información litológica y estructural relacionada directamente con el área de estudio, existen las siguientes publicaciones:

- En términos de cartografía geológica las más completas son las publicadas por URBANI & QUESADA (1972), SÁNCHEZ *et al.* (1986), URBANI *et al.* (1987a, b, 2000, 2004), URBANI & OSTOS (1989). En referencia a las rocas sedimentarias de la Cuenca de Barlovento en ESPINOLA & OLLARVES (2003) Y RODRÍGUEZ Y ROJAS (2003). Toda la información anterior ha sido integrada recientemente en URBANI & RODRÍGUEZ (2004), abarcando toda la Cordillera de la Costa. En el área de estudio afloran rocas metasedimentarias y metaigneas, con edades desde el Precámbrico (Augengneiss de Peña de Mora) al Cretácico, con sedimentos no metamorfizados de edad Mioceno hasta los depósitos aluviales recientes. Es conveniente destacar que la geología de superficie será detallada posteriormente en el capítulo correspondiente.

- En relación con aplicaciones SIG y TE en ciencias geológicas, existe una carencia de investigaciones en el país. Sólo se han hecho aplicaciones en donde la información geológica es utilizada como insumo y no como tema de análisis. Sin embargo, en aplicaciones utilizando los SIG y la TE en general se pueden destacar:

- a) LOMBARDO & ROJAS (2000), quienes presentan un manejo teórico sobre la teledetección y los sensores de plataforma espacial; se utiliza la geología sólo como insumo para el diagnóstico y no como variable principal.

- b) GUEVARA (1977) elabora uno de los trabajos pioneros en el campo de la teledetección con imágenes Landsat Mapper Scanning Sensor (MSS); sin embargo, está ausente la extracción de información geológica.

Sin embargo existen un número de investigaciones que presentan la aplicación de estas tecnologías para la discriminación de tipos de rocas y estructuras geológicas a nivel mundial estando la mayoría localizadas en regiones áridas o desprovistas de vegetación, áreas donde la ausencia de la misma facilita la captación de la información geológica por los distintos sensores. Entre éstas destacan:

a) ABDULLAH & AKHIR (1997) hacen correlaciones entre las respuestas visuales de distintas composiciones de bandas con la cartografía geológica existente en las Islas Langkawi, Malasia. Esta técnica pero tomando en cuenta la vegetación, la realizan (BAQUERO *et al.*, 2001), que aplican clasificaciones no supervisadas con imágenes Landsat 7 ETM+ en la cuenca media del Magdalena, y obtuvieron fuertes correlaciones entre las señales de la cobertura vegetal y la geología de superficie.

b) AKHIR & ABDULLAH (1997) aplican algunos filtros direccionales para el tratamiento de imágenes de satélite en el realce de estructuras y lineamientos.

c) RIMAL *et al.* (2001) proponen composiciones de banda falso color, filtros paso alto para resaltar lineamientos y análisis de componentes principales para la agrupación temática de las rocas en relación a su respuesta espectral.

d) HEFFERAN *et al.* (2001) y DANISHWAR *et al.* (2001) utilizan imágenes Landsat para hacer interpretaciones visuales de tipos de rocas y lineamientos en las montañas Anti Atlas en Marruecos y en el noroeste de Kohistan, Pakistán, respectivamente.

e) ZHANG (2002) presenta criterios para seleccionar cocientes de bandas de imágenes Landsat Enhanced Thematic Mapper + (ETM+) para la realización de clasificaciones supervisadas para la cartografía geológica. En el mismo orden de ideas están el artículo de REN *et al.* (2001), en el cual se realiza una composición de bandas utilizando el Índice de Factor Optimo (OIF) de bandas, combinando la varianza total espectral entre el coeficiente de correlación entre bandas espectrales del sensor Landsat ETM+.

## **4. MARCO TEÓRICO**

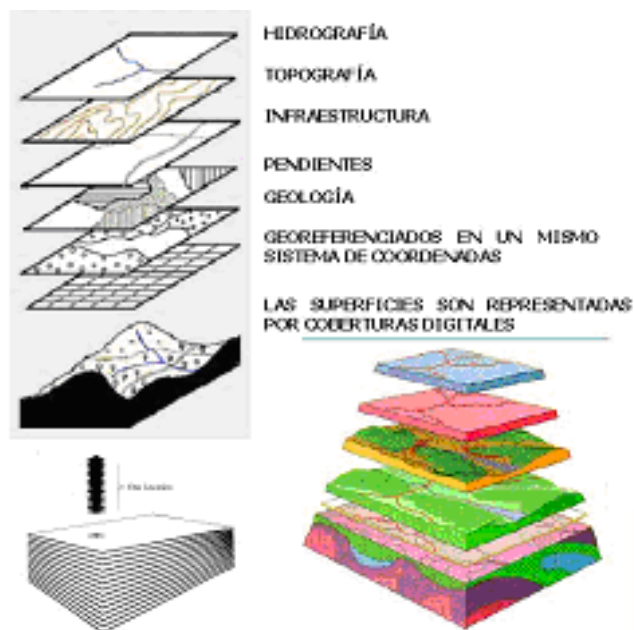
### **4. 1.- UNIDADES LITODÉMICAS Y LAS ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS**

Debido a que el área de estudio está compuesta mayoritariamente por unidades litodémicas, sólo se destacará este tipo de rocas, las cuales se caracterizan en el área de estudio por estar constituidas por rocas ígneo-metamórficas, deformadas o no, diferenciadas de las rocas sedimentarias adyacentes porque no presentan una estratificación (ICS, 1976). Las unidades litodémicas que pueden localizarse en el área de estudio de acuerdo a la escala son Complejo, Asociación y litodemo. Para mayor detalle véase Tabla 1.

Se denomina estructura geológica a la forma geométrica que adquiere en el espacio un determinado tipo de roca, o asociaciones de esa roca en relación con otras semejantes o adyacentes. Estas estructuras son diferentes según el mecanismo de formación de las rocas y los procesos posteriores a que estuvieron sometidas, por lo tanto constituyen la arquitectura estructural de las rocas resultante de las relaciones de esfuerzo-deformación producto de las fuerzas terrestres (geodinámica) que han incidido en las mismas. Las estructuras geológicas pueden dividirse según las relaciones de esfuerzo-deformación en: pliegues, fallas, fracturas, lineamientos, cadenas montañosas, entre otras (HATCHER 1995).

### **4.2.- SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y TELEDETECCIÓN ESPACIAL (TE)**

Aunque existen muchas definiciones en referencia a los SIG, la más completa establece que estos consisten en un “Sistema integrado de software, hardware, información y personal que permite manipular, analizar y presentar información que está asociada con una localización” (BURROUGHS, 1988). Estos trabajan con el principio de superposición de coberturas digitales tanto en la visualización como en la interacción de variables (BOSQUE, 1995) (Figura 6).



**Figura 6. Funcionamiento de un SIG**  
 (Modificado de ESRI 2003)

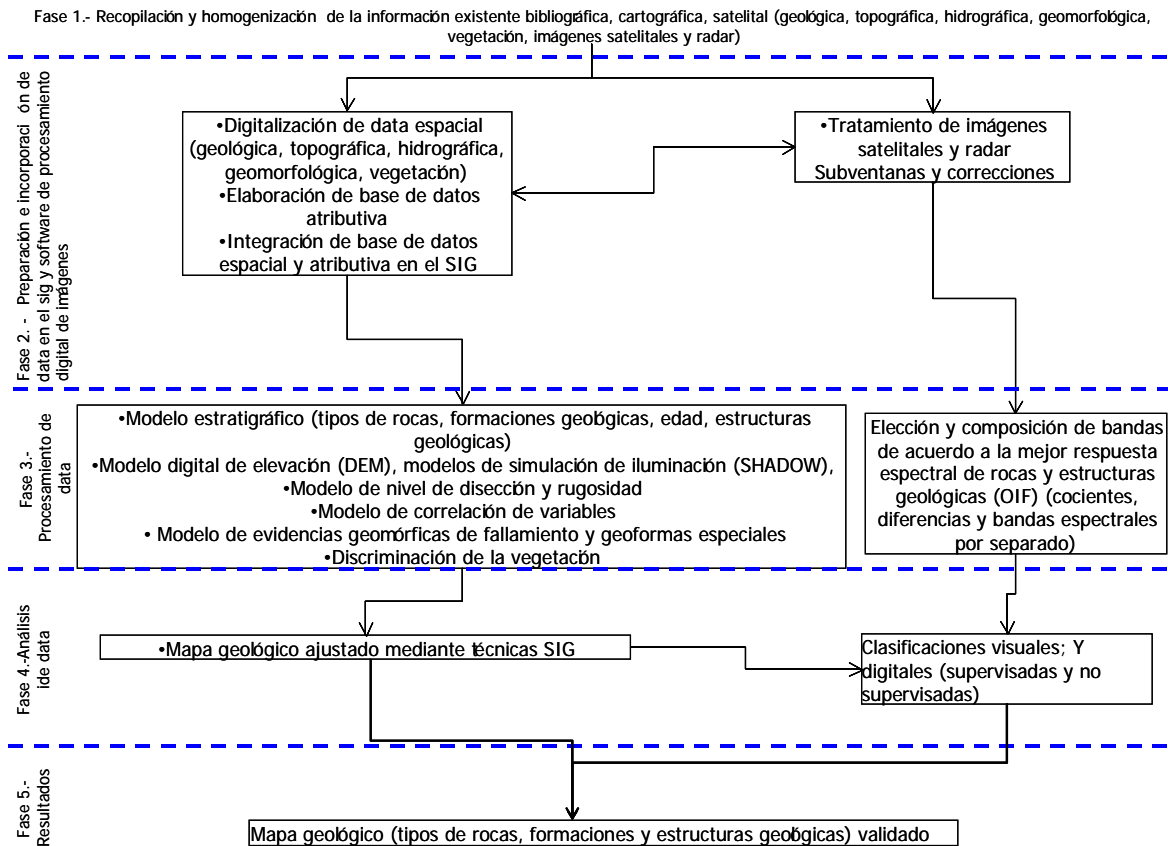
Por otra parte la TE es una “técnica que permite la adquisición de datos de la superficie terrestre a partir de sensores localizados en plataformas aéreas o espaciales” (LOMBARDO & ROJAS 2000, PUJADAS 2003) (ejemplo: fotografías aéreas, imágenes de satélite y de radar).

Sin embargo es necesario dejar claro que para la elaboración de este trabajo especial de grado se trabajará con sensores remotos de plataforma espacial. Para profundizar en estos temas teóricos véase el Anexo1.

## 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

## 5.1.-DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se basará en un intento de mejorar la cartografía geológica del área de estudio empleando los SIG y la TE. Para ello se seguirá una metodología para abordar la compilación, extracción y el ajuste de unidades litológicas y estructuras geológicas aplicando técnicas SIG y de TE (Figura 7).



**Figura 7. Esquema metodológico**

## 5.2.-DEFINICIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

Las variables e indicadores mostrados en este documento son diseñados tomando en consideración los objetivos planteados para esta investigación (Tabla 3):

**Tabla 3. Definición de variables e indicadores**

Objetivos	Variables	Subvariables	Indicadores	Fuente
Discriminar tipos de rocas y estructuras geológicas utilizando los SIG y TE	Unidades litológicas	Unidades litológicas Lineaciones	Nombre; tipo; sup. km <sup>2</sup> Tipo	URBANI & RODRÍGUEZ (2004); información geológica derivada de técnicas SIG y TE.
Establecer procedimientos y técnicas de extracción de información geológica en regiones tropicales utilizando los SIG y TE	Geología	Descrita anteriormente		
	Topografía	Altimetría	Altitud en m s.n.m	Instituto Geográfico Simón Bolívar (IGVSB) (2002). Cartas 1.25.000 correspondientes a la hoja 6947
		Modelo digital de elevaciones	Altitud en m s.n.m	Procesamiento en SIG-ILWIS 3.2, ERDAS IMAGINE 8.6 e IDRISI 32 bits.
		Modelo de iluminación y sombras	Factor de iluminación y sombra	
		Pendientes	Ángulo de inclinación	
		Cuencas	Sup_cuenca (km2)	
		Disección	Densidad (longitud disectada/superficie cuenca)	
		Rugosidad	Id_rugosidad	
	Evidencias geomórficas de fallamiento	Evidencias geomórficas de fallamiento	Tipos	Interpretación de perspectivas de modelos de sombras y aplicación de filtros direccionales en Imagen Satelital Landsat ETM+ 004/053, 003/053 (2003).
	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal	Superficie en km, tipo	Interpretación de Imágenes Satelitales Landsat ETM+ 004/053, 003/053 (2003).
Correlación de muestras litológicas, resto de variables para generar modelo probabilístico	Descritos anteriormente	Índice de Cramer (r) entre las variables analizadas, generación de modelo probabilístico y autocorrelación espacial entre productos	Procesamiento en SIG-ILWIS 3.2 e IDRISI 32 bits.	
Evaluar la efectividad de las tecnologías empleadas, a través del establecimiento de comparaciones entre los productos resultantes y la cartografía geológica existente en la parte con buen control de campo y sin información de campo.	Geología publicada y producida a partir de las técnicas diseñadas			

### 5.3.- Instrumentos: Recolección de datos

La recolección de datos tendrá distintas fuentes (bibliográfica, cartográfica, reconocimiento de campo y satelital), las cuales serán homogenizadas, procesadas y analizadas con la ayuda de los software ERDAS IMAGINE 8.6, ILWIS 3.2 Academic, IDRISI 32 bits.

Es conveniente aclarar que debido a la orientación de esta investigación todos los modelos derivados son productos del empleo de SIG y TE como herramientas fundamentales, convirtiendo estas tecnologías como únicos instrumentos de recolección y tratamiento de información.

### 5.4.-Procedimiento

Para poder cumplir con los objetivos de la investigación, se realizó el siguiente procedimiento (Figura 5):

**Fase 1.-** Recopilación y homogenización de la información: Consistió en la recopilación y homogenización de la información cartográfica, en relación a escala y contigüidad (Figura 4, Tabla 1).

**Fase 2.-** Preparación e incorporación de data en el SIG y software de procesamiento digital de imágenes. La data previamente recolectada, homogenizada e incorporada al SIG a través de la digitalización de las entidades espaciales, es integrada al SIG con la integración de la base de datos atributiva y espacial (Figura 4 y Tabla 1), además del tratamiento de las imágenes de satélite (Anexo1. Sección procesamiento digital de imágenes y correcciones).

El tratamiento de las imágenes consistió en la aplicación de varias técnicas entre las cuales está: el remuestreo (“resample”, técnica que permite ajustar el tamaño de los píxeles de una imagen y realizar las transformaciones geométricas de un datum y sistema de proyección a otro), en este sentido se traslado la imagen original del USGS ya corregida geométricamente de 30 m a 15 m para la aplicación de la fusión de bandas, técnica que se explicará posteriormente y la transformación geométrica entre el datum World Geodestic System 1984 (WGS 84) al datum Provisional South American 1956 (PSAD 56) o CANOA (Anexo 1). La corrección atmosférica se implementó con el comando “atmosco”, en IDRISI, el cual consiste en la incorporación de parámetros orbitales, efemérides del sensor y fecha de la toma para hacer los correspondientes ajustes además del comando “haze reduction” en ERDAS, para reducir el efecto de la humedad atmosférica. Por otro lado, se realizó la corrección ortométrica u ortocorrección con la aplicación del modulo “Orthobase” en ERDAS tomando la información altimétrica de las curvas de nivel. En relación a esto, se le asignó la altitud respectiva a cada celda o sitios clave en el área de estudio para corregir las deformaciones topográficas que presenta la imagen de satélite. Finalmente, se realizó la corrección radiométrica, aplicando el algoritmo de estiramiento y compresión de datos en el modelo de 0 – 255 para imágenes de 8 bits y el reescalado de 16 bits a 8 bits en el programa PCI, con la aplicación del comando “Escalar”.

**Fase 3.-** Procesamiento de los datos. En esta fase se ejecutan algoritmos computarizados, basándose en la información previamente recopilada, homogenizada e incorporada al SIG para la elaboración del mapa geológico preliminar. Además se harán las composiciones de bandas para la identificación de tipos de unidades.

Para el análisis de la información geológica y la elaboración del mapa geológico, se han considerado el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), Modelo Digital de Iluminación y Sombras (MIDIS), pendientes, análisis de textura, nivel de disección, como indicadores morfométricos que podrían ser característicos de las unidades geológicas y estructurales. La medición de relaciones espaciales se hizo sobre la base de la correlación espacial estadística entre los indicadores morfométricos y las unidades estratigráficas, expresada en un índice de correspondencia (coeficiente de Cramer) el cual va desde 0 (no correlación) hasta 1 (máxima correlación) y explica la relación del valor en este caso de la morfometría del espacio de análisis con respecto a la unidad estratigráfica que lo constituye (CLARK LABS, 2004).

Cada uno de estos productos es la base para las interpretaciones de los límites estratigráficos y tectónicos, tanto de las unidades geológicas como de las lineaciones. Por esta razón resulta conveniente destacar que los criterios generales para la interpretación geológica basada en la información proveniente de los SIG y sensores remotos, están basados en las diferencias morfológicas y de carácter cuantitativos en el espacio (matriz ráster) en relación a las variables morfométricas, topográficas y texturales, siguiendo las lineaciones para los contactos entre rocas metamórficas y sedimentarias y límites litoestratigráficos para el caso de los aluviones.

Para el cálculo del MDE, primero se digitalizaron las curvas de nivel (que para el caso de un SIG constituyen vectores de n pares de coordenadas (x,y) que describe la trayectoria de las curvas de nivel o isohipsas) y luego se interpolaron, arrojando como resultado el MDE que constituye la entidad superficie de elevaciones, la cual también fue diseñada como vista 3D.

Posteriormente, se produce el MDIS a partir de la aplicación del filtro de sombras, para luego realizar una mejora visual a partir de la manipulación del histograma de datos mediante la aplicación del algoritmo de estiramiento (Strech).

Por otro lado, se calculó la dimensión Fractal del terreno aplicando el algoritmo “Fractal Dimension” en IDRISI, obteniendo valores continuos que después fueron reclasificados o agrupados para discretizar el espacio de acuerdo a la estructura de datos y poder aplicar otros modelos de interacción espacial. Los valores continuos son explicados ya que la dimensión fractal calcula la dimensión fraccional del espacio (geometría), transformando los valores de geometría euclidiana a dimensión fraccional conociendo que en el espacio euclidiano el recorrido de la geometría de los cuerpos es de 1 a 3 siendo la dimensión topológica de una línea 1, la de un plano es 2 y la de un cubo es 3 (CLARK LABS, 2002). La transformación en fractal fracciona estos números a partir de convoluciones, tendiendo a ser continuos en un primer momento. Posteriormente, son reclasificados para el caso de esta investigación en valores de 1 a 5, reflejando una discretización de los valores geométricos del cuerpo de rocas, pudiendo destacar desde las menos rugosas en 1 hasta las mas rugosas en 5.

Además, se aplicó un análisis de dirección y acumulación de flujo hidrológico (flow direction and flow accumulation), a partir del MDE. Esto se utilizó para conocer como es el nivel de disección y la resistencia de las rocas ante procesos de erosión y meteorización.

**Fase 4.-** Análisis de data. Esta fase consiste en el análisis e interpretación de la data procesada para elaborar la cartografía geológica preliminar, basándose en técnicas SIG. Adicionado a esto, se utilizarán las composiciones de bandas descritas en la fase anterior para las distintas interpretaciones (visual y digital). Para seleccionar la mejor composición de banda en el sistema Rojo, Verde y Azul (453), se aplicó el análisis del Índice de Factor Optimo (OIF), el cual se basa en la relación de la varianza total espectral entre el coeficiente de correlación entre bandas espectrales ( $OIF = \text{sumatoria de las desviaciones estándar de cada banda} / \text{sumatoria de los coeficientes de correlación entre bandas en valor absoluto; apéndice 2}$ ).

**Fase 5.-** Resultados. Esta fase consiste en la compilación del mapa geológico producto del empleo de los SIG y la TE.

**Fase 6.-** Conclusiones y recomendaciones. En esta fase se resaltarán los resultados, la verificación de cumplimiento de objetivos, las ventajas y desventajas de la utilización de los SIG y TE para la cartografía geológica y las recomendaciones pertinentes.

### **5.5.-Análisis de los Datos**

Las técnicas para el análisis de los datos se resumen de la siguiente manera. a) Se aplicó el coeficiente de cramer para las correspondencias espaciales entre los indicadores morfométricos, geobotánicos y multiespectrales (CLARK LABS, 2002) . b) Para el caso de las para las clasificaciones no supervisadas y supervisadas se utilizó el análisis de componentes principales y análisis de probabilidad según Bayes, respectivamente (ITC, 1997).

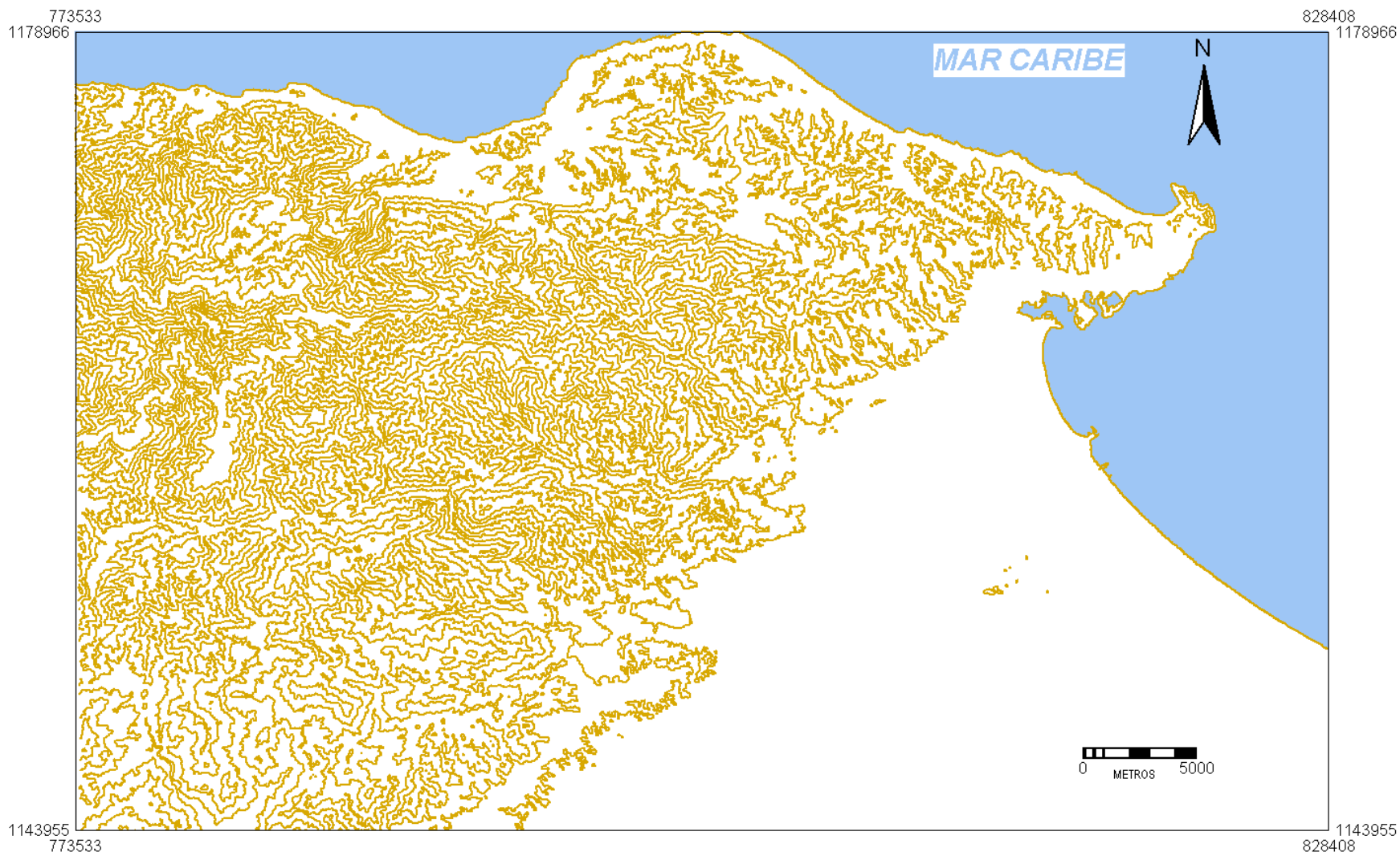
## **6.- RESULTADOS**

### **6.1.- GEOLOGÍA PRODUCTO DE TÉCNICAS SIG**

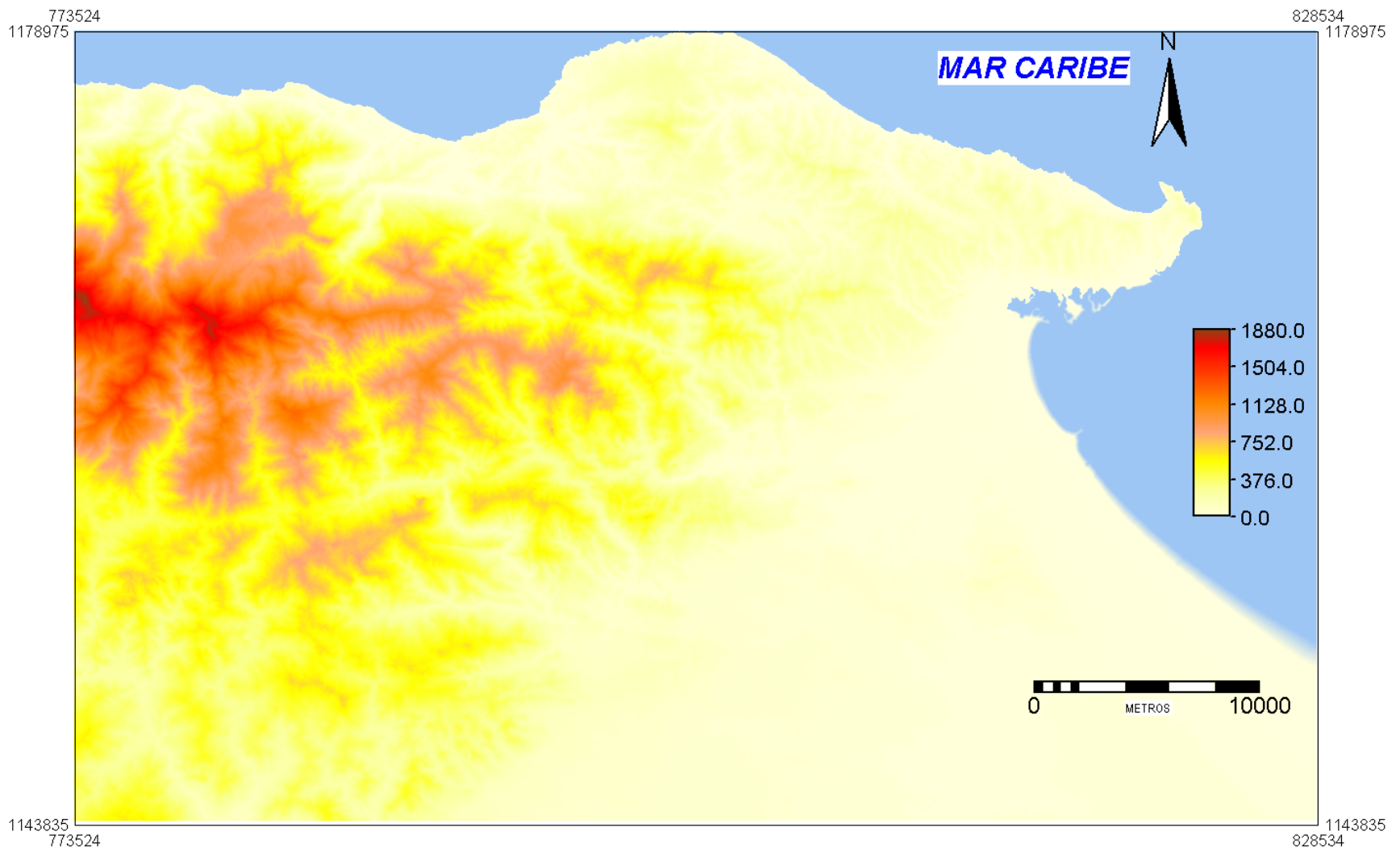
#### **6.1.1- Relaciones MDE, MDIS, análisis de textura, nivel de disección- cartografía geológica**

De acuerdo a los resultados arrojados (Figuras 8 al 10), el área de estudio presenta un relieve con diferentes matices y ambientes geológicos, con desniveles desde los 0 m s.n.m hasta los 1880 m s.n.m aproximadamente, siendo estos desniveles reflejo de la configuración de una zona montañosa que morfogénicamente es una cadena montañosa producto de la interacción tectónica entre la placa del Caribe y la placa sudamericana en colisión oblicua. Como secuencia lógica se tiene transpresión (apilamiento y deformación de materiales) y con fallamiento en respuesta a los esfuerzos. Este fallamiento principal se evidencia en el área de estudio por el conjunto de lineaciones en sentido NW-SE, NE-SW, NNW-SSE (Figura 4) que dominan la configuración estructural del área de estudio. Asimismo, en su conjunto la deformación controla el tipo de rocas que se localizan en el área, constituyendo las asociaciones ígneo-metamórficas en el macizo montañoso y las rocas sedimentarias en la planicie de Barlovento y las áreas transicionales a ambientes pelágicos.

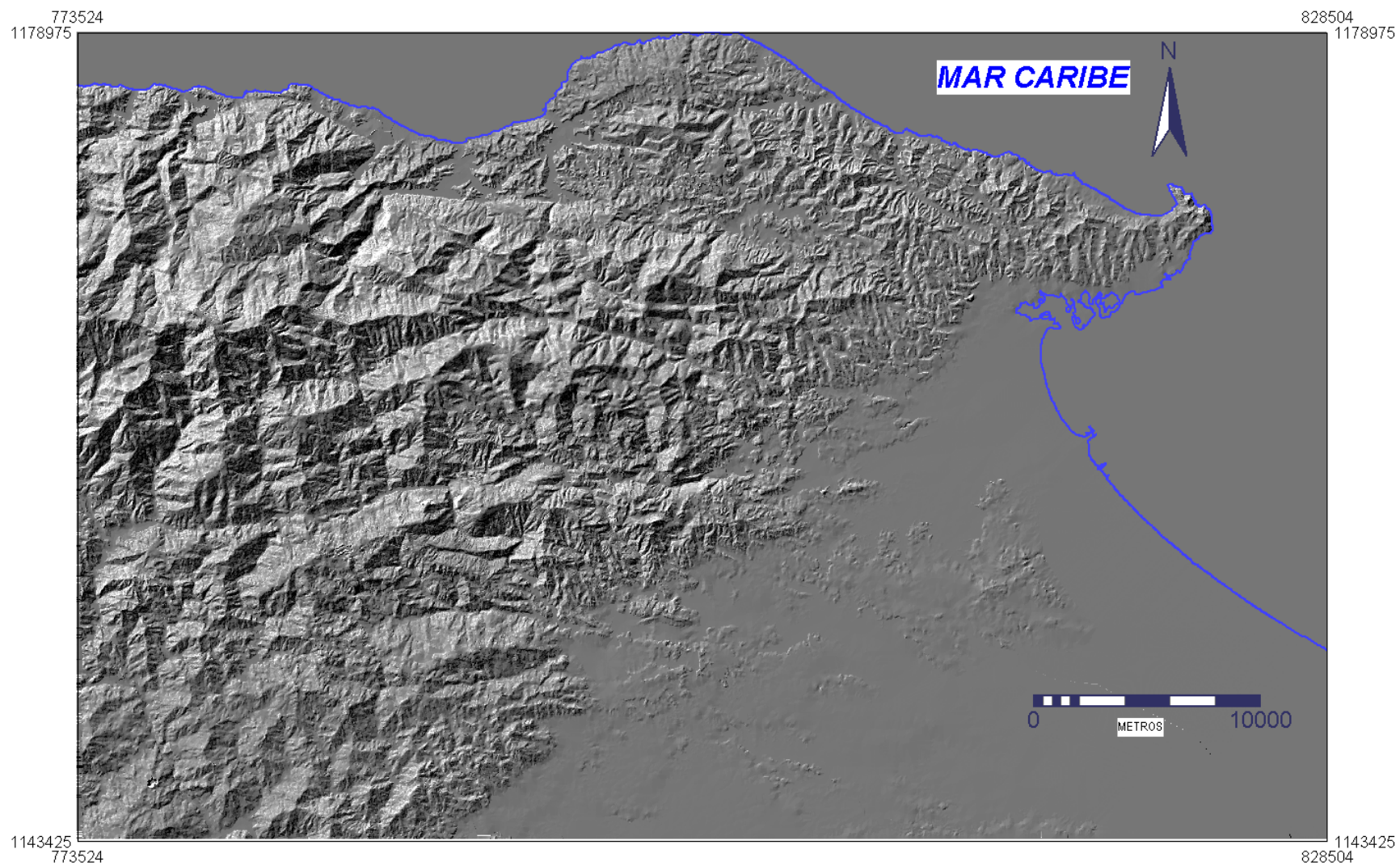
Por otro lado, dependiendo del ambiente morfoclimático y morfogénico imperante, específicamente en las áreas cercanas al mar, se asoma la posibilidad de encontrar geoformas cuya morfogénesis es producto de la acción marina como son acantilados, riscos y otras formas de abrasión. Asimismo, hacia la transición con ambientes marinos existen planicies costeras cuya formación depende principalmente de la depositación marina que se localiza al noreste y este del área de estudio, resultando en algunas ocasiones en ambientes sedimentarios lagunares y humedales, representados principalmente por la Laguna La Reina localizada al este del área de estudio y la laguna Banquito al norte, cuya granulometría principal de sedimentación son arcillas y limos; además de arenas en las barras litorales las cuales se extiende en toda el sector aluvial costero del área de estudio. Esta descripción aunque no muy extensa, ya que es motivo de otras investigaciones, intenta mostrar cual es la configuración del relieve evidenciando la existencia de distintos ambientes geológicos, hecho a tomar en consideración para poder entender las respuestas morfométricas y espectrales que posteriormente se obtendrán para poder relacionarlas con los tipos de rocas e intentar mejorar la cartografía existente.



**Figura 8. Curvas de nivel generalizadas trazadas a partir de las 16 hojas a escala 1:25.000 de la hoja 6947**  
Hojas topográficas IGVS (2004)

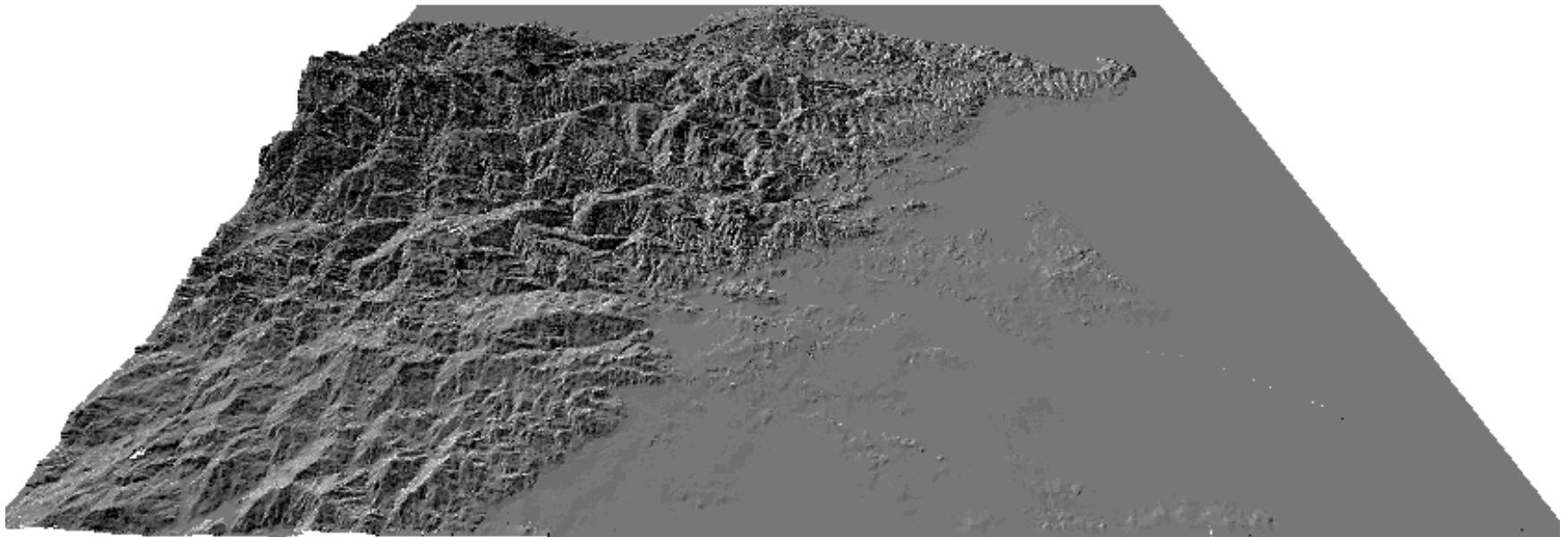


**Figura 9. Modelo digital de elevaciones (MDE)**

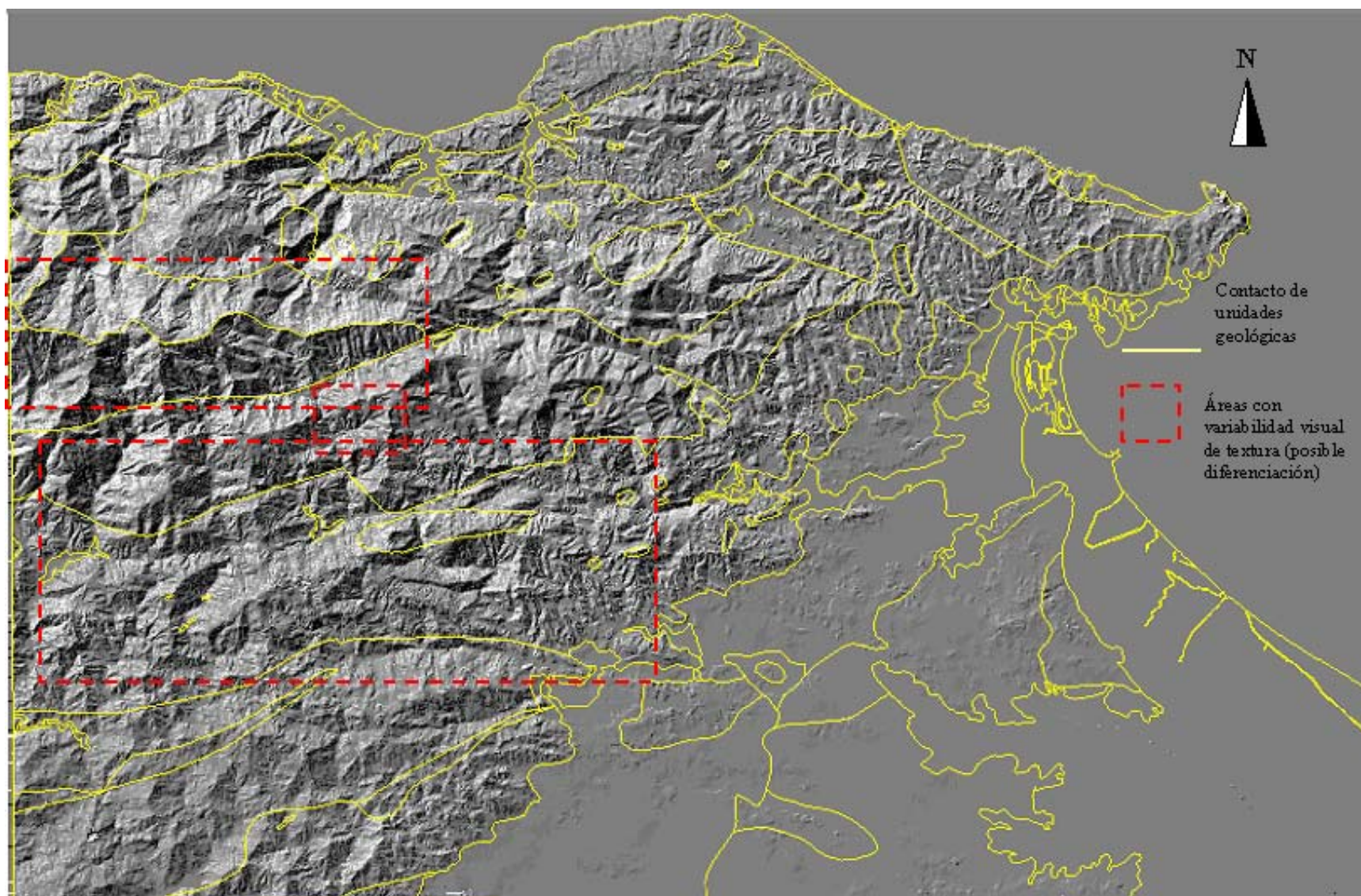


**Figura 10. MDIS ( azimuth de iluminación de 315°, una altitud de 30° y stretch aplicado)**

Retomando el procedimiento metodológico de procesamiento y análisis de data, a partir de la generación del MDE se derivaron otros modelos, entre los cuales está el modelo digital de iluminación y sombras (MDIS), (Figura 11). Esta operación se realiza para obtener una visión del terreno, con la cual se puede por un lado ajustar los límites al modelo geométrico de la superficie terrestre de las unidades geológicas (Figura 12) y por otro lado interpretar las evidencias geomórficas de fallamiento y las estructuras geológicas resultantes de la textura y apariencia del MDIS.



**Figura 11. Vista 3D MDIS**

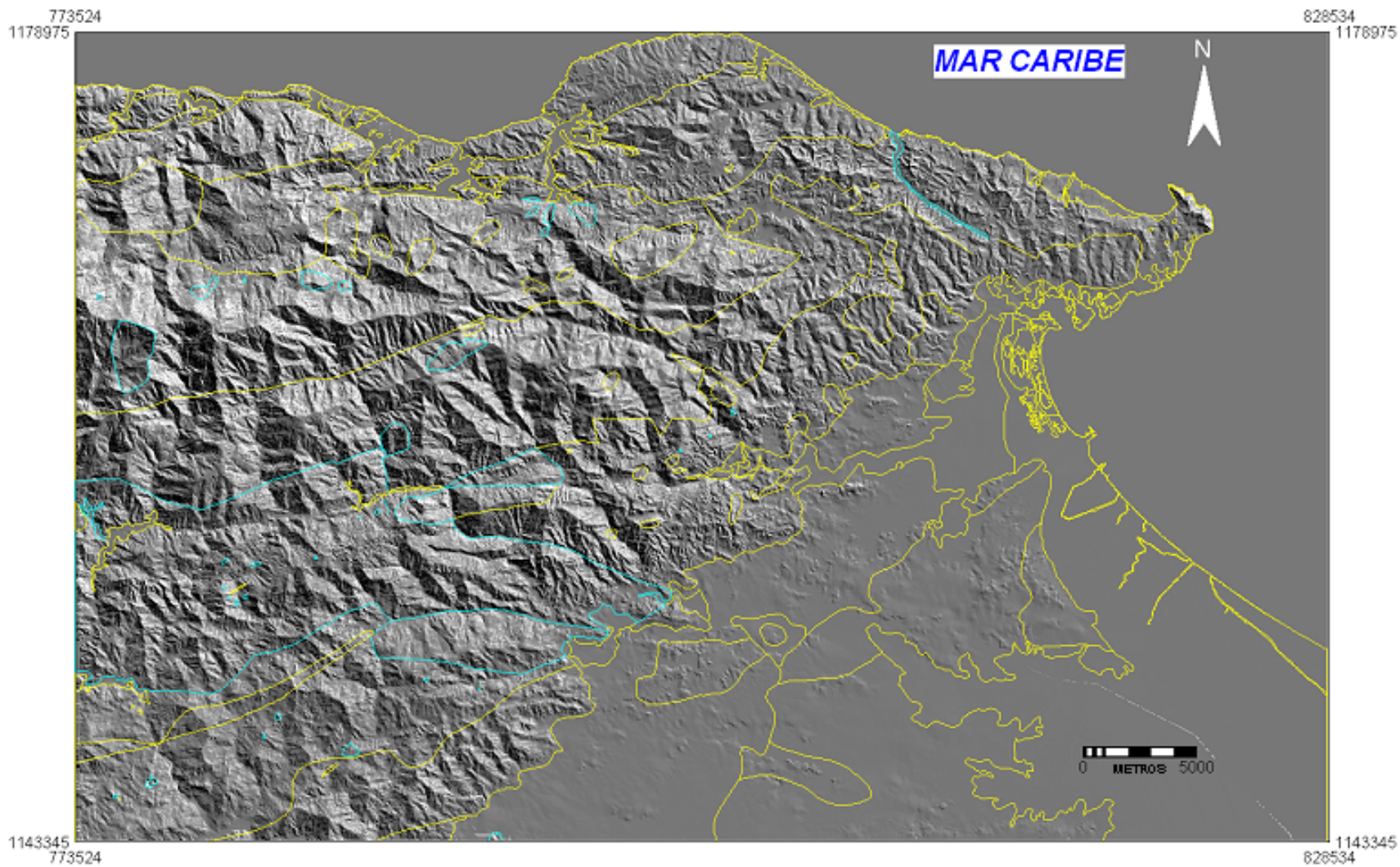


**Figura 12. Ajuste geométrico de las unidades geológicas del MDIS**

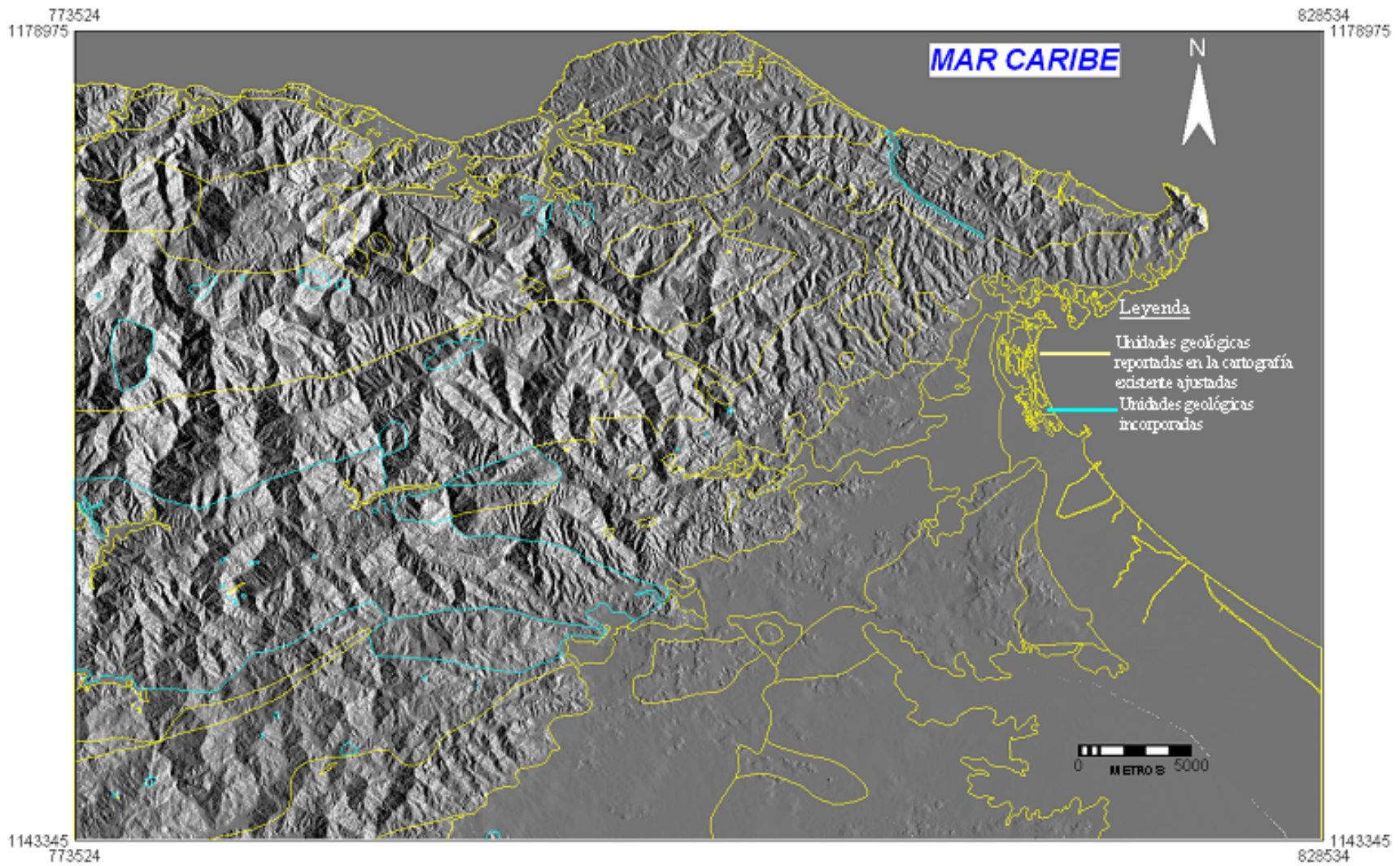
Como se mencionó anteriormente, el ajuste en términos de los límites entre unidades se llevó a cabo, ya que la data para la compilación proviene de distintas fuentes, las cuales presumiblemente utilizaron fotografías aéreas y corroboración de campo, y podría mostrar deformación geométrica con respecto a la data topográfica oficial existente, influyendo así de forma importante en los resultados de la interrelación espacial de variables, por lo cual es necesario realizar esta homogenización.

Sin embargo, utilizando esta data para el ajuste geométrico de las unidades, también se evidencia que se pueden hacer mayores diferenciaciones en términos espaciales y de rocas constitutivas de las unidades estratigráficas, dentro de los límites preexistentes sobre todo en el suroeste del área de estudio como se comentó anteriormente. En el bloque del sur, se puede visualizar un cambio de textura más rugosa al este y más difusa al oeste. En este sentido también se ha revisado la cartografía geológica y existen subunidades en el Esquisto de las Mercedes (CaM) que no están diferenciados espacialmente (Figura 12). El recuadro del centro muestra una unidad parecida al Mármol de Zenda, localizado al sureste de este recuadro, que no ha sido diferenciado, pero que muestra una morfología similar y una textura similar a esta topografía y su correspondiente roca de origen. El recuadro del norte también refleja la posibilidad de agrupar estas unidades en el Complejo San Julián (ASJ) ya que las texturas son muy similares. Sin embargo conviene destacar que la evaluación de apariencias y texturas y las diferenciaciones espaciales aparecerán posteriormente (Figura 12 y Mapa 1).

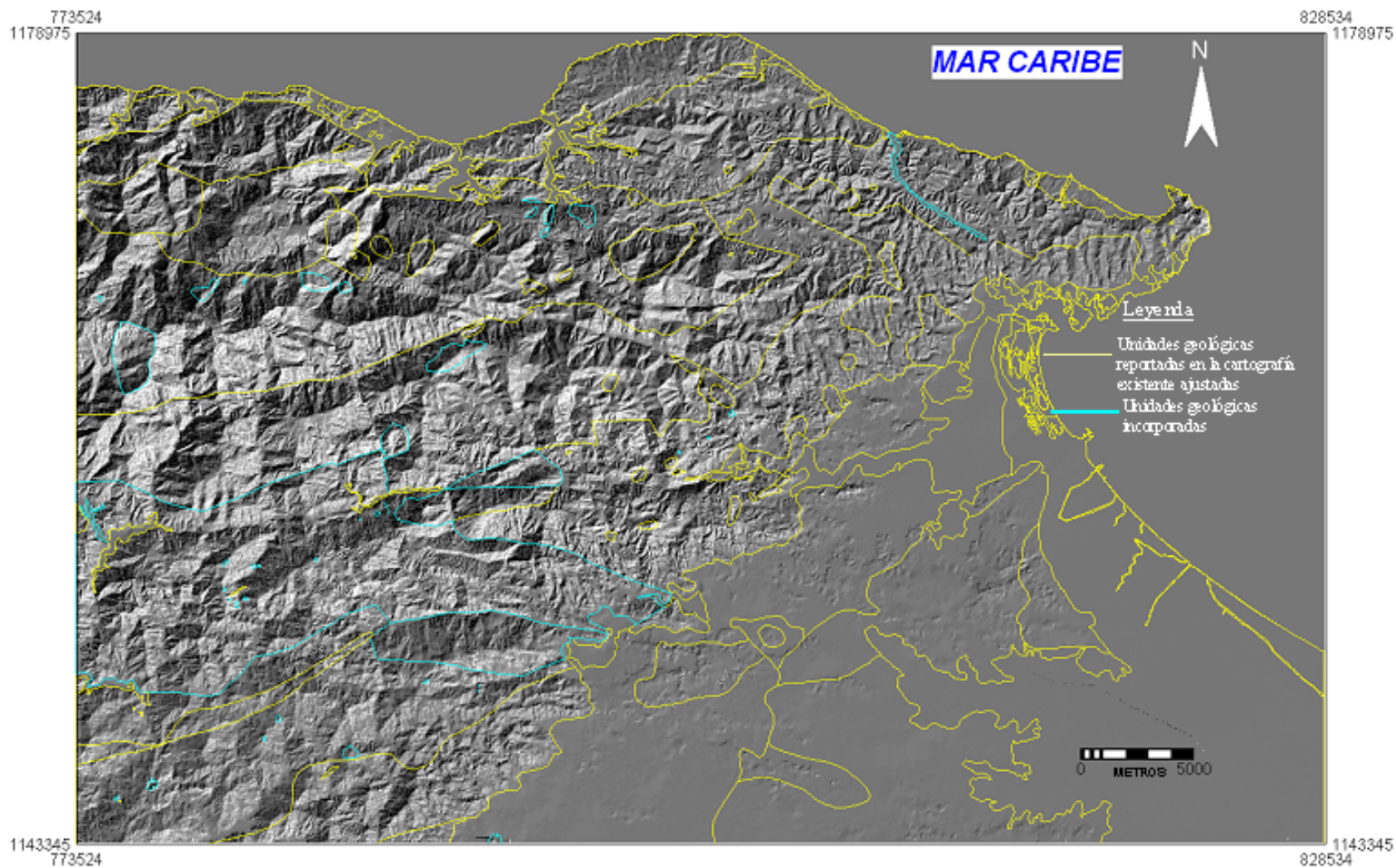
Esta diferenciación adquiere mayor sustento cuando destacamos los rasgos texturales de cada una de las unidades estratigráficas con las correspondientes vistas en las ocho direcciones específicas (Figuras 13 al 20).



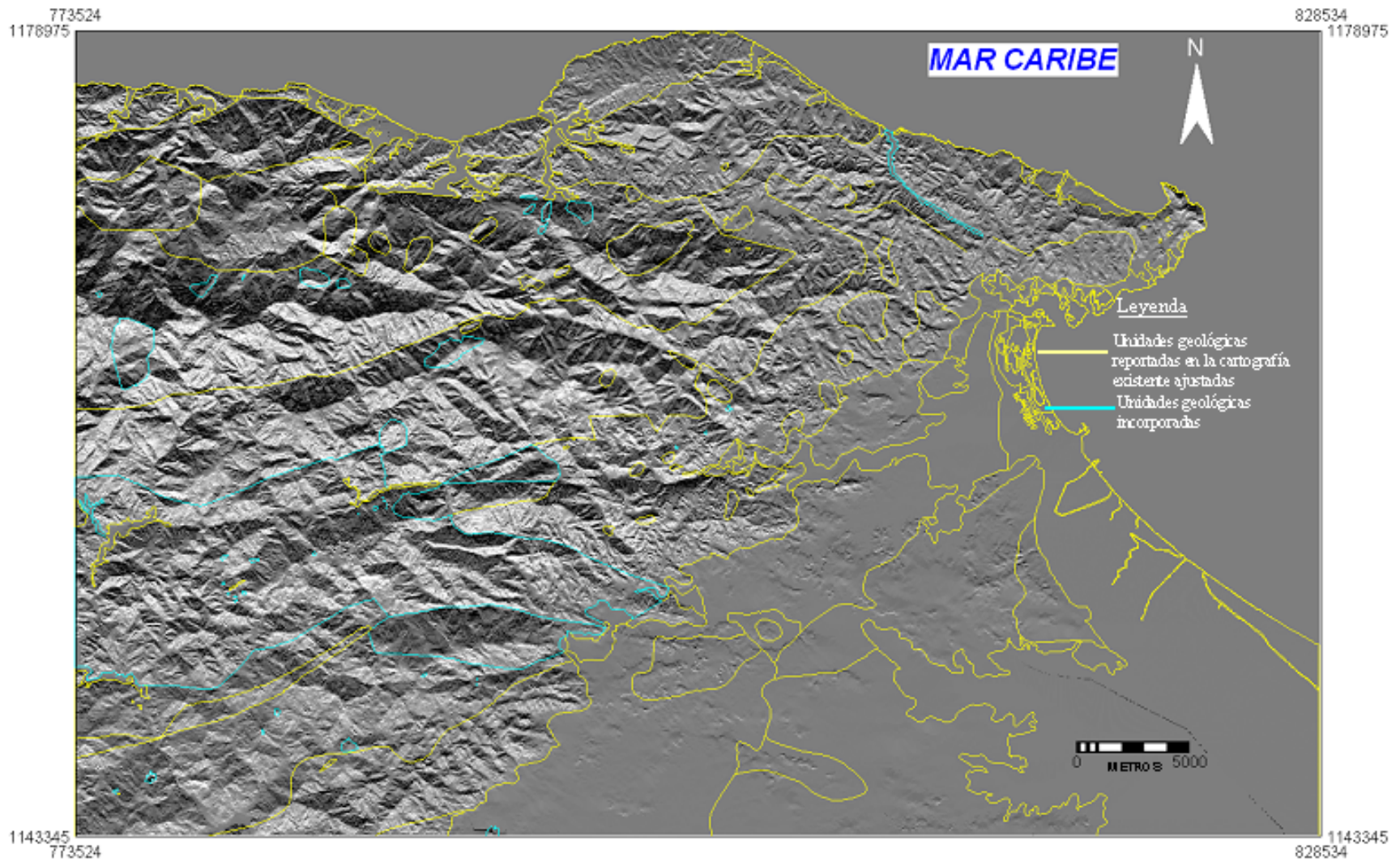
**Figura 13. Reinterpretación y ajuste de unidades geológicas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 45° y una elevación de 30°**



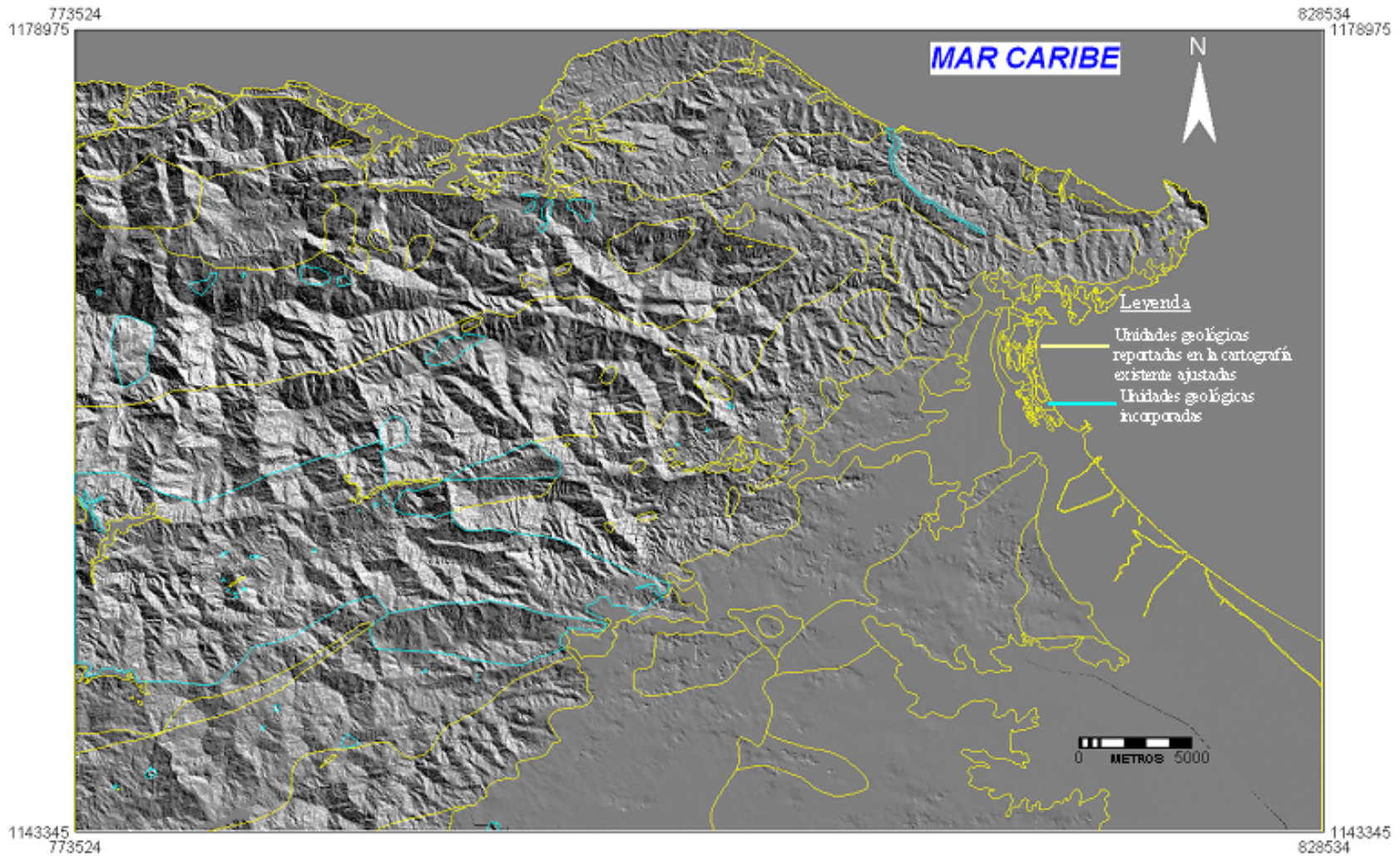
**Figura 14. Reinterpretación y ajuste de unidades geológicas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 90° y una elevación de 30°**



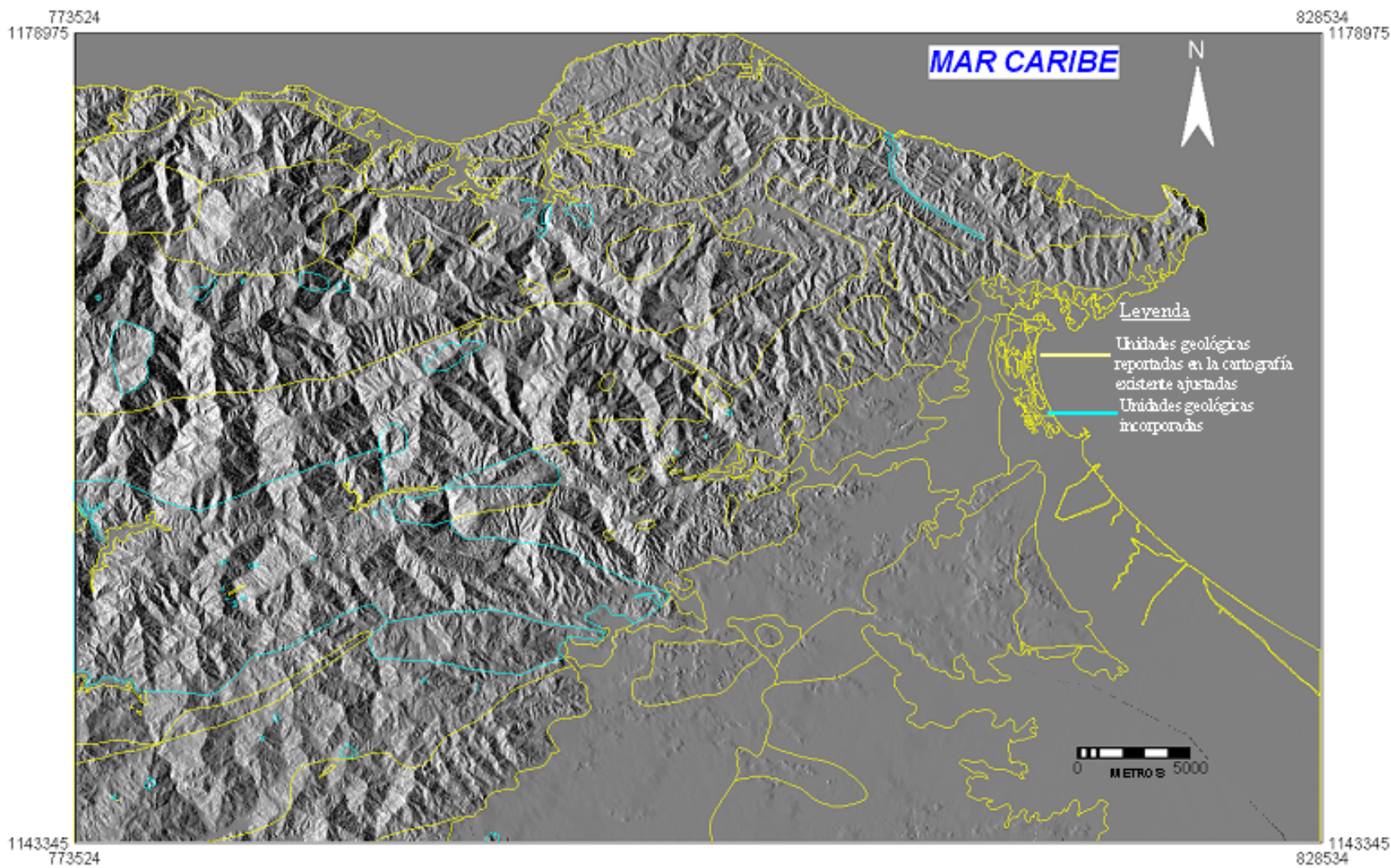
**Figura 15. Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 135° y una elevación de 30°**



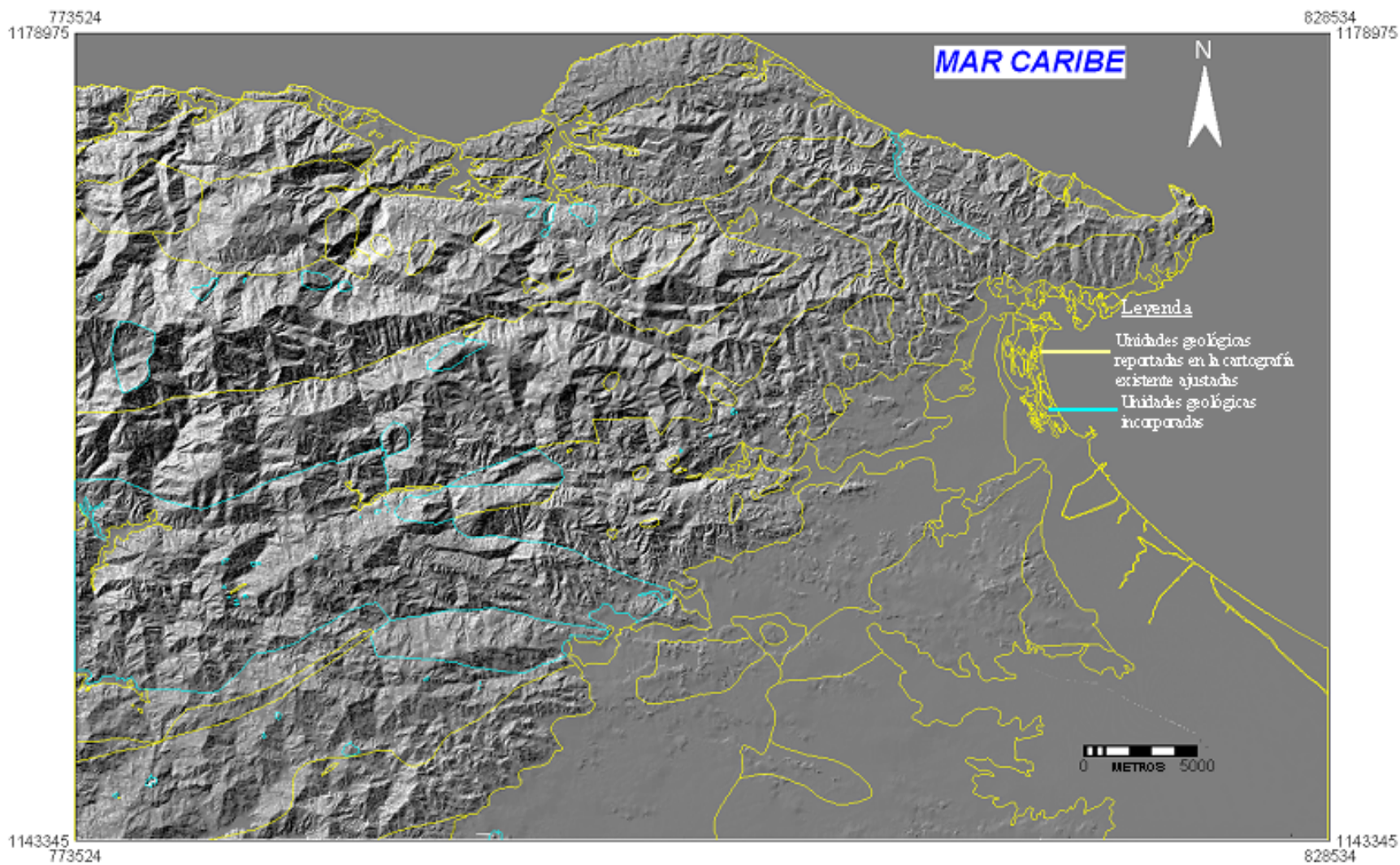
**Figura 16. Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 180° y una elevación de 30°**



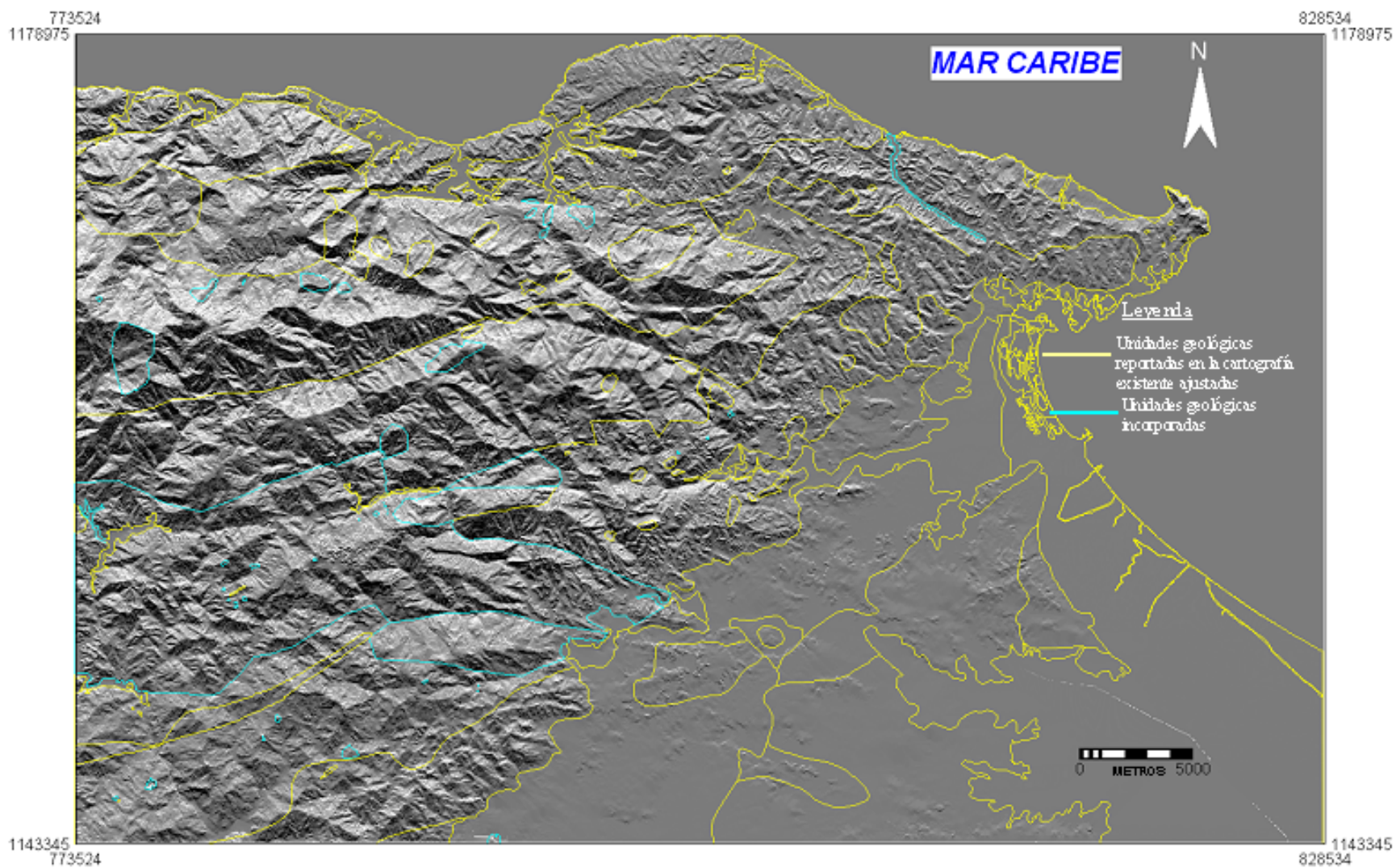
**Figura 17. Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 225° y una elevación de 30°**



**Figura 18. Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 270° y una elevación de 30°**



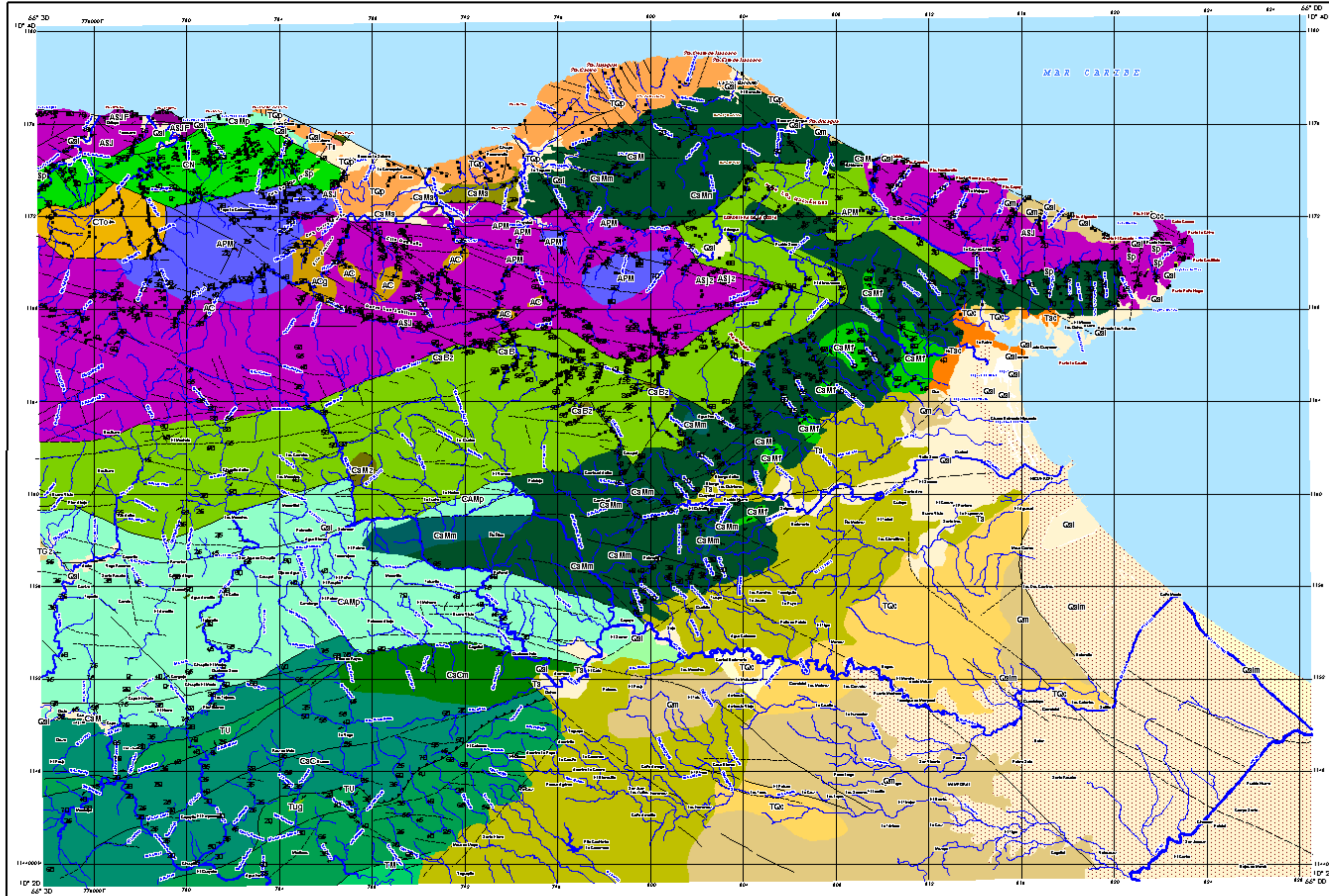
**Figura 19. Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 315° y una elevación de 30°**



**Figura 20. Reinterpretación y ajuste de unidades estratigráficas sobre la base del MDIS con un azimuth de iluminación de 360° y una elevación de 30°**

En términos de la apariencia de cada unidad y de la primera diferenciación de unidades geológica, se puede comentar lo siguiente: Las rocas sedimentarias al este y noreste del área de estudio muestran una textura simple, siendo más compleja en la medida que estén conformadas por rocas y minerales más competentes como lo son la Formación Aramina (Ta) al este y las Formaciones La Playita y La Sabana al norte (Mapa 1, Figuras 13 al 20 y Tabla 1). Por otro lado las rocas igneo-metamórficas presentan una textura más compleja y con diferentes matices. A título ilustrativo, el Augengneis de Peña de Mora muestra una textura corrugada, pero que tiende a ser homogénea, presumiblemente por su grano grueso mineralógicamente uniforme; la Metatonalita de Caruaó también presenta este comportamiento pero presenta su morfología divididas en pequeños bloques o laderas estructurales y salientes muy fuertes controlados tectónicamente (morfología alrededor del Augengneis de Peña de Mora); el Complejo de San Julián (ASJ) también presenta una estructura compleja pero menor que la de las unidades mencionadas; el Esquisto de las Mercedes muestra una estructura compleja, evidenciando cambios en la textura y topofomas dependiendo de los materiales que conforman cada una de las unidades, y en particular, las subunidades con una importante presencia de carbonatos y mármol presentan texturas más variables y sobresalientes, que el resto; El Esquisto de Las Brisas (CaB) al igual que el Esquisto de las Mercedes muestra texturas complejas, aunque presumiblemente presenta mayor cantidad de cuarzo al sur, por ende luce topográficamente más complejo; Las unidades geológicas al sur del área de estudio tienden a ser menos rugosas y más simples texturalmente que las del norte, ya que están compuestas de filitas predominantemente como las de Urape (Tu) y Murugurata (Tm) y por esquistos con materiales poco competentes como el grafito y algunos carbonatos que deben presentar alta susceptibilidad a la ocurrencia de meteorización química.

Por otro lado complementando esta descripción, es conveniente destacar que a partir del MDIS se realizó un análisis textural más cuantitativo, a partir de la aplicación de la dimensión fractal (coeficiente de rugosidad del terreno) y en segundo lugar por el nivel de disección del terreno. Es decir, este análisis está complementado por dos indicadores morfométricos, por una parte el nivel de rugosidad del terreno que refleja la geometría de las rocas y en por otra parte el nivel de disección de la roca en el terreno que indica las propiedades de dureza y competencia de la roca.



**MAPA 1. GEOLOGÍA DE SUPERFICIE**

- LEYENDA**
- Unidades Geológicas**
- Aluvial (Qa) - Holoceno
  - Formación Margoral (Qm) - Pleistoceno
  - Formación Guaira (TGu) - Pleistoceno
  - Formación Cauagua (TQc) - (Pleistoceno-Pleistoceno)
  - Formación La Playata (TQp) - (Pleistoceno-Pleistoceno)
  - Formación La Sabana (Ts) - (Holoceno tardío-Pleistoceno)
  - Formación Arayana (Ta) - (Holoceno medio-Tardío)
  - Member Caronero (TAc) - Holoceno Tardío
- Rocas Igneas-Metamórficas**
- Asociación metamórfica La Costa (Mesozoico)**
- Metatolita de Tachara (Cto)
  - Anfibolita de Cabo Codera (Ccc)
  - Anfibolita de Sargua (Csn)
  - Serpentinista (Sp)
- Asociación metamórfica Avila (Paleozoico - Precámbrico)**
- Metatolita de Caracas (Cac)
  - Grafito (Ag) - PRE-MESOZOICO
  - Complejo San Julián (Asj)
  - Complejo San Julián (Asjf)
  - Augenite de Peña de Moca (APM) - PRE-MESOZOICO
- Rocas Metamórficas y Metasedimentarias**
- Asociación metasedimentaria Caracas (Mesozoico)**
- Esquistos de Chuspita (CAC)
  - Esquistos de Chuspita (CACm)
  - Esquistos de Las Mercedes (Cals)
  - Esquistos de Las Mercedes (Calsp)
  - Esquistos de Las Mercedes (Calm)
  - Esquistos de Las Mercedes (Calsf)
  - Esquistos de Las Mercedes (Calsi)
  - Esquistos de Las Mercedes (Calsj)
  - Mármol de Senda (CAs)
- Asociación Mapa Tectónica de la Sierra del Interior (Mesozoico)**
- Falda de Ucapa (Fu)
  - Metagabro (Tug)
  - Filita de Mucuguca (Tm)

- Símbolos Geológicos**
- Extratactación**
- Foliación
  - Foliación Vertical
  - Falla de Ángulo Alto
  - Falla Invertida
  - Falla Coberta
  - Falla Inversa
  - Contacto de unidades litológicas
  - Mostrador de campo
- Símbolos Convencionales**
- Poblaciones**
- Centros poblados, Sitios
  - Calidad
  - Carretera pavimentada
  - Carretera no pavimentada
- hidrografía**
- Permanentes
  - Intermitentes
  - Áreas inundables
  - Dehalo o resaca



Geología Higuero, Hoja 6947

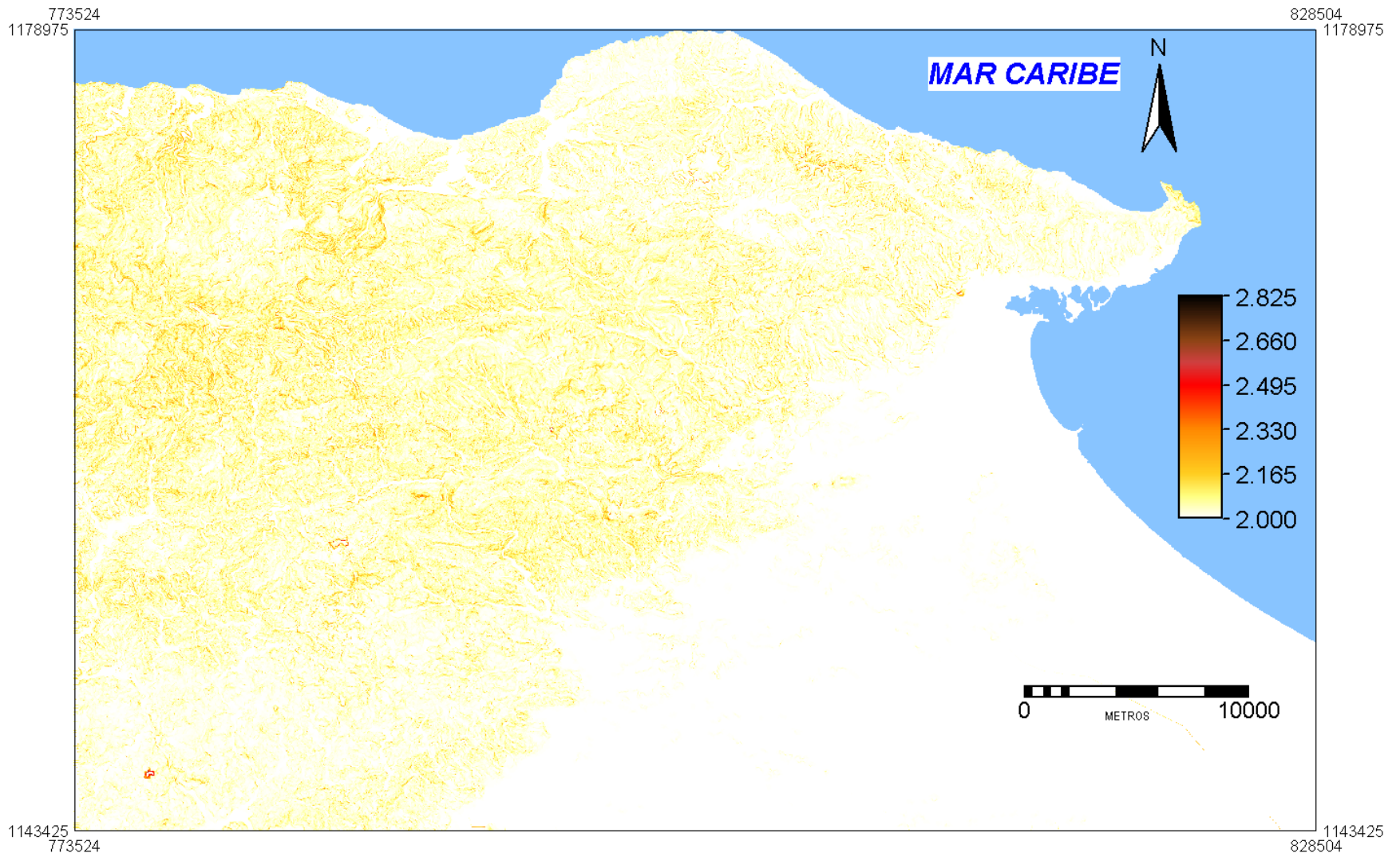
Tabla 4. Datos morfométricos, geobotánicos y espectrales del área de estudio												
Tipo de roca	Estratigrafía regional	Unidad estratigráfica	Código	Litología	Correspondencia Nivel de Rugosidad. Categoría 1 (valores de fractal entre 2-2,2)= geometría simple; categoría 2 (valores de fractal entre 2,2 - 2,4)= geometría moderadamente simple; categoría 3 (valores de fractal entre 2,4 - 2,6)= categoría moderada; categoría 4 (valores de fractal entre 2,6 - 2,8)= categoría moderadamente compleja; categoría 5 (valores de fractal entre 2,8 - 2)= geometría compleja	Pendientes	Nivel de Disección	cobertura vegetal	respuesta radiométrica de las rocas basada en la composición de bandas 453 y en 8 bits (valores entre 0 - 255)	Cluster de mayor respuesta		
Sedimentaria		Aluvión	Qal	Aluvión	categoría 1= 99,7%;categoría 2= 0,15%; resto= 0,15%	plano= 97,9%; suave=2,10%	no disectado= 35,17%; disectado= 64,83%	herbazal= 26,6; matorral= 10,35; intervenido= 37,5; resto= 25,55	100-180, llegando al nivel digital 255 (solo aluviones continentales y barra litoral); 50-70 (aluviones en humedales y lagunas -arcilla)	13,26,17(ar enas) 4,2,23,30 (arcillas)		
		Formación Guatire	TGa	Conglomerado-caliza-marga-limo-arcilla limosa y arcilla	categoría 1= 84,89%;categoría 2= 8,32%; categoría 3= 3,31%; resto= 3,38%	plano= 40,37%; suave=21,69%; ondulado= 20,82%; accidentado= 14,99; escarpado=2,14	no disectado= 33,04%; disectado= 66,96%	herbazal= 20,17; intervenido= 55,1; resto= 75,27	104-132	26,18,22		
		Formación Mamporal	Qm	Arcilla-arenisca y conglomerado	categoría 1= 99,65%;categoría 2= 0,24%; resto= 0,107%	plano= 90,84%; suave=6,94%; resto= 2,22%	no disectado= 33,04%; disectado= 66,96%	herbazal= 28,32%; intervenido= 45,41%; resto= 73,73%	80-160	26,13,22		
		Formación Caucaagua	TQc	Conglomerados y arcillas de color pardo rojizo	categoría 1= 99,8%; resto= 0,2%	plano= 88,36%; suave=9,8; ondulado= 1,55%; resto	no disectado= 28,41%; disectado= 71,59%	herbazal= 37,27%; intervenido= 46,93%; resto= 15,8%	120-180	22,26		
		Formación La Playita	TQp	Conglomerado, arenisca, grauvaca y arcosa	categoría 1= 81,56%; categoría 2= 11,51%; categoría 3= 4,69%; resto= 2,24%	plano= 16,83%; suave=28%; ondulado= 34,19%; accidentado= 19,7	no disectado= 27,75%; disectado= 72,25%	bosques= 63,35%; resto= 36,65%	87-158	16,7		
		Formación La Sabana	Ts	Arenas, capas de guijarros, lutitas	categoría 1= 88,55%;categoría 2= 5,78%; resto= 5,67%	plano= 53,62%; suave=19,33%; ondulado= 14,58%; accidentado= 10,15	no disectado= 32,18%; disectado= 67,82%	bosques= 32,24%; intervenido=48,97%; resto= 18,79%	120-220	18,22,26		
		Formación Carenero	Taz	Lutita Calcárea	categoría 1= 99,95%; resto= 0,05%	plano= 94,92% ;resto= 5,08	no disectado= 25,46%; disectado= 74,54%	herbazal= 39,87%; intervenido= 43,13%; resto= 17%	137-213	17,26,28		
		Formación Aramina	Ta	Conglomerados-calizas-lutitas arcillosas-arcillas y areniscas	categoría 1= 99,46%; resto= 0,54%	plano= 85,35%; suave= 11,36%; resto= 3,29%	no disectado= 28,37%; disectado= 71,63%	herbazal= 21,84%; bosques= 17,58%; intervenido= 32,24%; resto= 28,34%	95-176	13,22,17		
Ígneo - metamórfica	Unidades de las napas de la Serranía del Litoral	Asociación Metamórfica La Costa	Complejo Nirgua	CN	Esquisto, cuarcita, esquisto anfibolítico, anfibolita	categoría 1= 45%;categoría 2= 28,16%; categoría 3= 16,97%; resto= 9,87%	plano= 3,63% ; suave=8,45%; ondulado= 28,64%; accidentado= 52,66%; escarpado=6,37%	no disectado= 27,33%; disectado= 72,67%	bosques= 88,86%; resto= 11,14%	79-192	16,4	
			Anfibolita de Cabo Codera	Ccc	Anfibolita y Metatonalita	categoría 1= 18,71%;categoría 2= 33,6%; categoría 3= 29,12%; categoría 4=10,28; categoría 5= 8,31%	plano= 0,13% ; suave= 1,98%; ondulado= 11,07%; accidentado= 76,94%; escarpado= 9,88%	no disectado= 28,85%; disectado= 71,15%	matorral= 86%; espinar= 14%	140-178	18,30,23	
			Metadiorita de la Todasana	Cto	Metadiorita-metagabro-anfibolita	categoría 1= 43,35%;categoría 2= 29,79%; categoría 3= 18,22%; categoría 4=4,51%; categoría 5= 4,13%	plano= 2,08%; suave= 9,14%; ondulado= 29,42%; accidentado=50,72%; escarpado= 8,2%; muy escarpado= 0,42%	no disectado= 25,75%; disectado= 74,25%	bosques= 81,4%; herbazal= 10,63%; resto= 7,97%	75-200	16,4,24,25, 13	
			Serpentinita	Sp	Serpentinita	categoría 1= 52,81%;categoría 2= 27,73%; categoría 3= 14,83%; resto= 4,63%	plano= 10,70%; suave=8,64%; ondulado= 29,45%; accidentado= 49,10%	no disectado= 26,95%; disectado= 73,05%	bosques= 82,01%; herbazal= 17,59%	No medida, ya que puntualmente existe interferencia		
		Asociación Metamórfica Caracas	Esquisto de Chuspita	CAC	Esquisto-cuarzo-grafitoso-micáceo-carbonático	categoría 1= 83,80%;categoría 2= 11,36%; categoría 3= 3,49%; resto= 1,34	plano= 11,39%; suave= 30,28%; ondulado= 39,41%; accidentado=18,11%; resto= 0,81%	no disectado= 25,87%; disectado= 74,13%	bosques= 73,26%; herbazal= 7,15%; resto= 45,30%	95-204		16,13,22
				CACc	Esquisto carbonático	categoría 1= 61,82%;categoría 2= 8,76%; categoría 3= 6,48%; categoría 4= 3,90%; categoría 5= 19,05%	plano= 12,02%; suave= 29,40%; ondulado= 18,75%; accidentado=18,97%; escarpado= 5,18%; muy escarpado= 15,08%; talud= 0,61%	no disectado= 32,49%; disectado= 67,51%	bosques= 73,26%; herbazal= 7,15%; resto= 45,30%	106-204		22,13,16
			Esquisto de Las Mercedes	CaM	Esquistos grafíticos y mármol	categoría 1=67,44%;categoría 2= 19,14%; categoría 3= 9,21%; resto= 4,22%	plano= 15,12%; suave= 28,12%; ondulado= 39,07%; accidentado=22,65%; resto= 1,24%	no disectado= 25,71%; disectado= 72,29%	bosques= 44,04%; herbazal= 27,08%; matorral= 14,17%; resto= 14,71%	136-162		13,30,27
				CaMp	Esquisto cuarzo plagioclásico grafitoso	categoría 1=74,24%;categoría 2= 14,85%; categoría 3= 6,71%; resto= 4,18%	plano= 22,92%; suave= 19,01%; ondulado= 29,22%; accidentado=26,03%; resto= 2,81%	no disectado= 29,50%; disectado= 70,50%	bosques= 44%; herbazal= 27,1%; matorral= 14,17%; resto= 14,71%	69-185		16,25
				CaMm	Mármol de los Colorados	categoría 1=49,46%;categoría 2= 28,70%; categoría 3= 14,47%; resto= 7,37%	plano= 4,97%; suave= 8,78%; ondulado= 31,56%; accidentado=49,95%; resto= 4,75%	no disectado= 27,05%; disectado= 72,95%	bosques= 89,25%; resto= 10,75%	65-118		10,4,16,7,1 3
				CaMz	Metaconglomerado	categoría 1=66,46%;categoría 2= 20,84%; categoría 3= 10,39%; resto= 2,24%	plano= 18,60%; suave= 15,89%; ondulado= 28,43%; accidentado=35,63%; escarpado= 1,45%	no disectado= 32,60%; disectado= 67,40%	herbazal= 91,34%; resto= 8,66%	110-143		17,5
		Esquisto de Las Brisas	CaB	Esquisto-cuarzo-albitico-muscovítico-clorítico	categoría 1=69,17%;categoría 2= 19,17%; categoría 3= 8,20%; resto= 3,47%	plano= 20,55%; suave= 14,99%; ondulado= 30,07%; accidentado=32,04%; resto= 2,35%	no disectado= 29,39%; disectado= 70,61%	bosques= 65,67%; matorral= 31,32%; resto= 3,01%	87-168		13,30,16,4	
		Mármol de Zenda	CaBz	Mármol	categoría 1=49,46%;categoría 2= 28,70%; categoría 3= 14,47%; resto= 7,37%	plano= 4,97%; suave= 8,78%; ondulado= 31,56%; accidentado=49,95%; resto= 4,75%	no disectado= 27,05%; disectado= 72,95%	bosques= 70,86%; herbazal= 16,37%; resto= 12,77%	65-118		10,4,16,7,1 3	
		Asociación Metamórfica Ávila	Metatonalita de Caruao	Ac	Metatonalita- anfibolita-metadiorita	categoría 1= 44,14%;categoría 2= 25,43%; categoría 3= 17,70%; categoría 4=7,54%; categoría 5= 5,19%	plano= 2,08%; suave= 9,14%; ondulado= 29,42%; accidentado=50,72%; escarpado= 8,2%; muy escarpado= 0,42%	no disectado= 25,92%; disectado= 74,08%	bosques= 97,7%; resto= 2,3%	69-120		4,16,10
			Complejo de San Julián	Asj	Esquisto y gneis cuarzo plagioclásico micáceo	categoría 1= 52,53%;categoría 2= 24,94%; categoría 3= 14,41%; categoría 4=4,10%; categoría 5= 4,03%	plano= 6,53%; suave= 11,63%; ondulado= 30,51%; accidentado=46,12%; resto= 5,20%	no disectado= 26,45%; disectado= 73,55%	bosques= 77,79%; resto= 22,21%	60-140		4,16,10
				Asjf	Gneis y esquisto feldespático	categoría 1= 57,24%;categoría 2= 22,73%; categoría 3= 12,59%; categoría 4= 3,87%; categoría 5= 3,55%	plano= 10,86%; suave= 15,64%; ondulado= 26,78%; accidentado=41,64%; resto= 5,09%	no disectado= 30,63%; disectado= 69,37%	bosques= 77,79%; herbazal=7,75; resto= 14,46%	87-110		18,22,26,16
Augengneis de Peña De Mora	APM		Augengneis granítico	categoría 1= 57,24%;categoría 2= 22,83%; categoría 3= 12,16%; categoría 4= 3,36%; categoría 5= 3,21%	plano= 6,21%; suave= 14,22%; ondulado= 32,86%; accidentado=42,27%; resto= 4,43%	no disectado= 26,28%; disectado= 73,72%	bosques= 47,49%; herbazal= 7,15%; resto= 45,30%	40-70		4,16,10,7		
Unidades de las napas de la Serranía del Interior	Filita de Urape	Tu	Filita-metarenisca-metaconglomerado	categoría 1=69,17%;categoría 2= 19,17%; categoría 3= 8,20%; resto= 3,47%	plano= 10,92%; suave= 23,3%; ondulado= 39,26%; accidentado=25,43%; resto= 1,1%	no disectado= 26,62%; disectado= 73,38%	bosques= 79,22%; matorral= 10,68%; herbazal= 7,10%; resto= 3%	25-203		16,13,22,30		
	Filita de Muruguata	TM	Filita grafítica carbonática-metarenisca	categoría 1=84,55%;categoría 2= 10,15%; categoría 3= 3,76%; resto= 1,53%	plano= 26,12%; suave= 29,03%; ondulado= 27,2%; accidentado=16,74%; resto= 0,91%	no disectado= 29,8%; disectado= 70,20%	bosques= 88,23%; matorral= 9%; resto= 2,77%	79-183		16,13,22,30		
	Metagabro	Tug	Metagabro	categoría 1=80,65%;categoría 2= 14,46%; categoría 3= 3,34%; resto= 1,55%	plano= 7,23%; suave= 16,69%; ondulado= 54,28%; accidentado=20,47%; resto= 1,33%	no disectado= 24,81%; disectado= 75,19%	bosques= 100%	99-248		13,16,22		

### **6.1.1.1.-- Dimensión fractal**

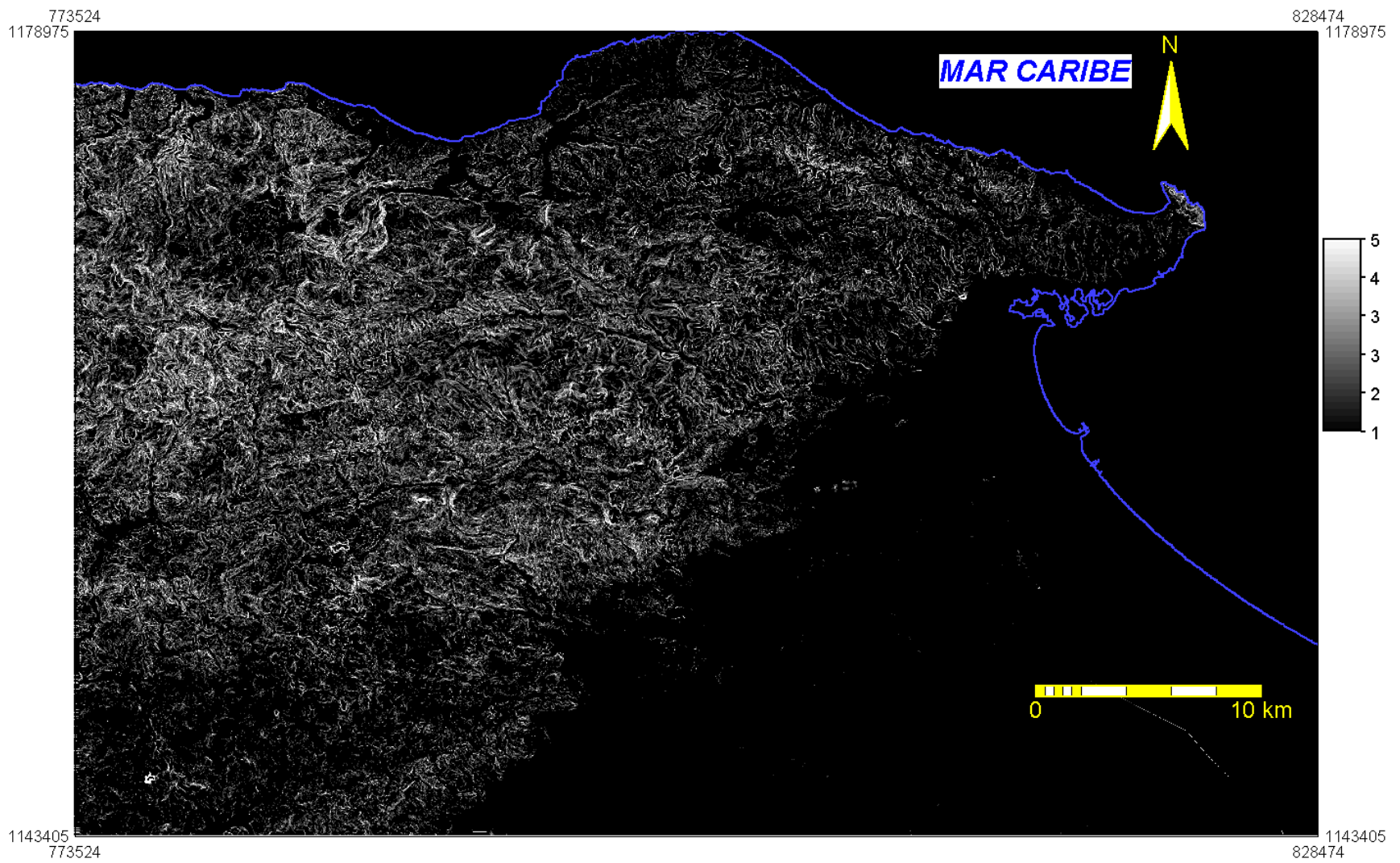
Los resultados de las relaciones espaciales de dimensión fractal (rugosidad)-cartografía geológica reflejadas por el índice de Cramer, muestran una correlación de 0,8, es decir, que en un 80% en términos espaciales, la dimensión fractal es explicada por la geometría y competencia de las rocas que comprenden las distintas unidades geológicas del área de estudio (Figuras 21 y 22). Cada una de las relaciones espaciales está registrada en la tabla 4 y en la síntesis de resultados está plasmada una discusión conjunta de los valores morfométricos, geobotánicos y espectrales. Sin embargo se puede mencionar que en general las unidades sedimentarias muestran una mayor homogeneidad en términos de la geometría del cuerpo de rocas. Esto se expresa en el área de estudio en dos grupos; un grupo que presenta claramente superficies simples, es decir, están clasificadas en el grupo (1) con dimensión fractal entre 2 –2,2 y que corresponde con las rocas sedimentarias (Aluviones 99,7%), Formación Guatire (TGz) (99,8%), Formación Mamporal (Qm) (99,7%); las formaciones La Sabana (Ts) (88,6%), la Playita (TQp) (81,6%), Caucagua (TQc) (96,8%), Aramina (Ta) (99,5%) y Carenero (Taz) (99,9%) que por ser rocas relativamente blandas en términos del conjunto geológico analizado, presentan una menor rugosidad.

El segundo grupo muestra una geometría más compleja y texturas más rugosas (dimensión fractal > 2,2), este grupo lo representan el Esquisto de las Brisas (CAB) y Esquisto de Las Mercedes, Complejo San Julián (Asj), Complejo Nirgua (CN), Esquisto de Chuspita (CACm y CACc), Augengneis de Peña de Mora (APM), Filita de Mugurata (TM), Filita de Urape (Tu), Complejo San Julián (Asjf), Granito, Mármol, Metadiorita de Todasana (Cto), Metagrabro (Tug), Metatonalita de Caruao (Ac), Serpentina y la Anfíbol

ita de Cabo Codera (Ccc). Esto es explicado por las propiedades de los minerales asociados a la matriz de la roca y su resistencia y debilidad a los procesos erosivos y de meteorización, además de la reología y su resistencia a la deformación tectónica imperante en el área de estudio.



**Figura 21. Dimensión fractal**



**Figura 22. Dimensión fractal reclasificada**

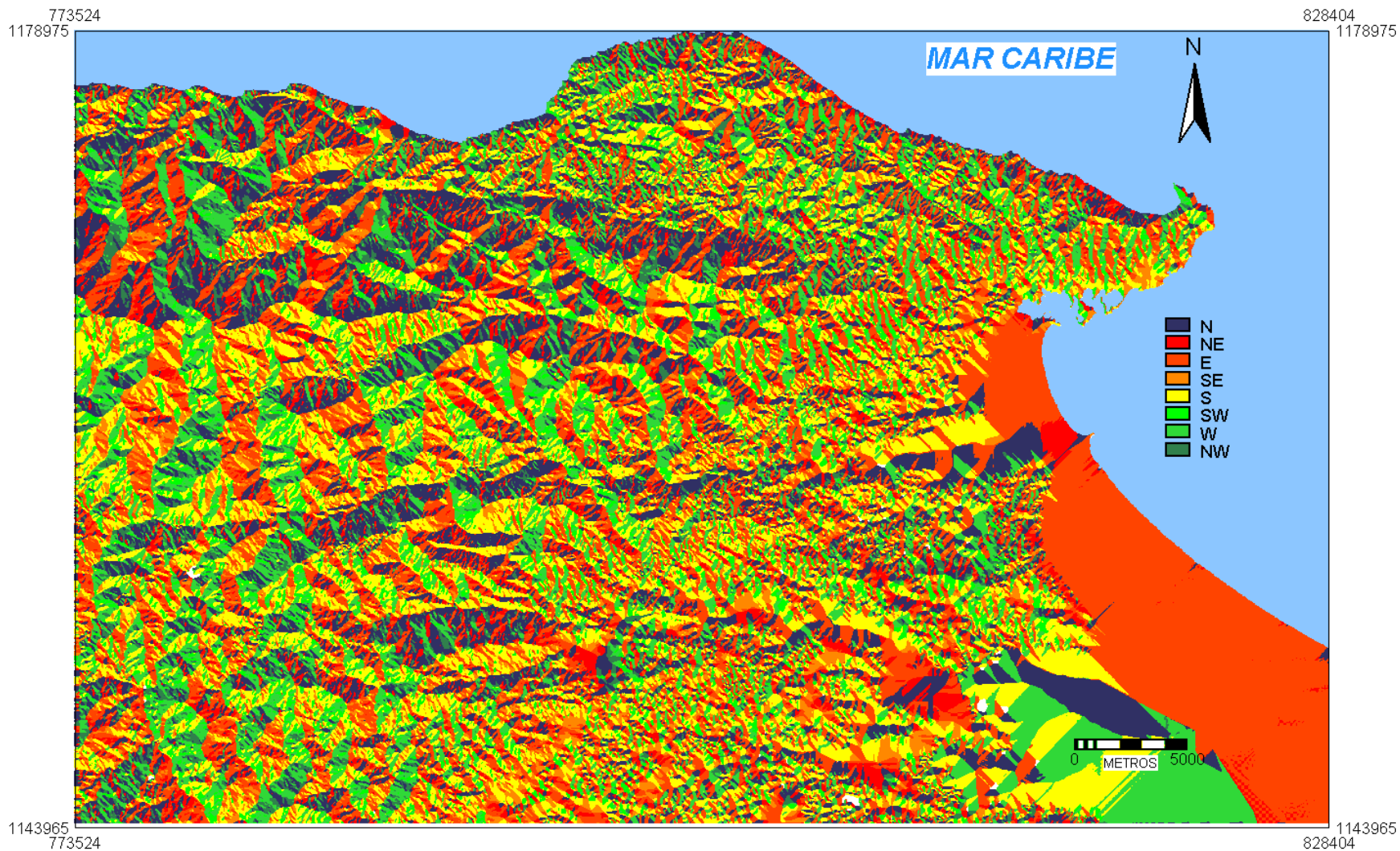
### **6.1.1.2.- Nivel de disección**

Posteriormente dentro del análisis textural se determinó el nivel de disección que poseen las rocas, que indica la competencia, el nivel de meteorización y/o erosión que posee una roca. El nivel de disección se obtuvo a través de la aplicación de un análisis de dirección y acumulación del flujo hidrológico basado en el MDE. Esto se utilizó para conocer los ejes de disección (Figuras 23 y 24) e igualmente se empleó en la mejora de la interpretación geológica, tanto de las unidades geológicas como de las lineaciones. Esta información se comparó con la superficie de las unidades de rocas para obtener el nivel de disección.

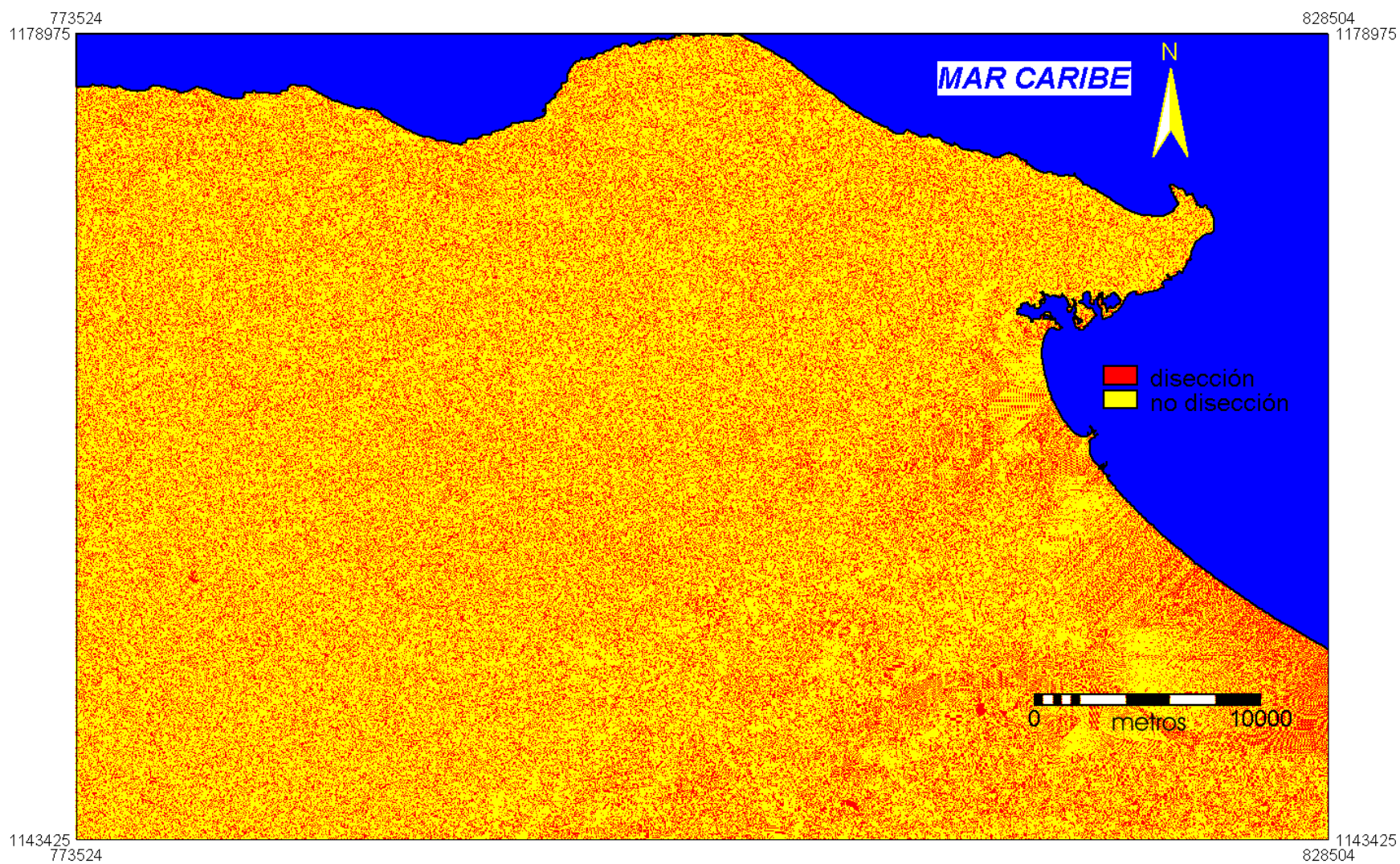
En términos generales el índice de Cramer resultó de 0,89; es decir, que en un 89% en términos espaciales, el modelo de flujo hidrológico y ejes de disección correlaciona con las unidades geológicas. En general se puede observar que los mayores niveles de disección corresponden con las rocas de menor competencia; es decir, las unidades sedimentarias, mientras que las rocas ígneas y metamórficas presentaron menor disección (Tabla 4).

### **6.1.1.3.- Pendientes**

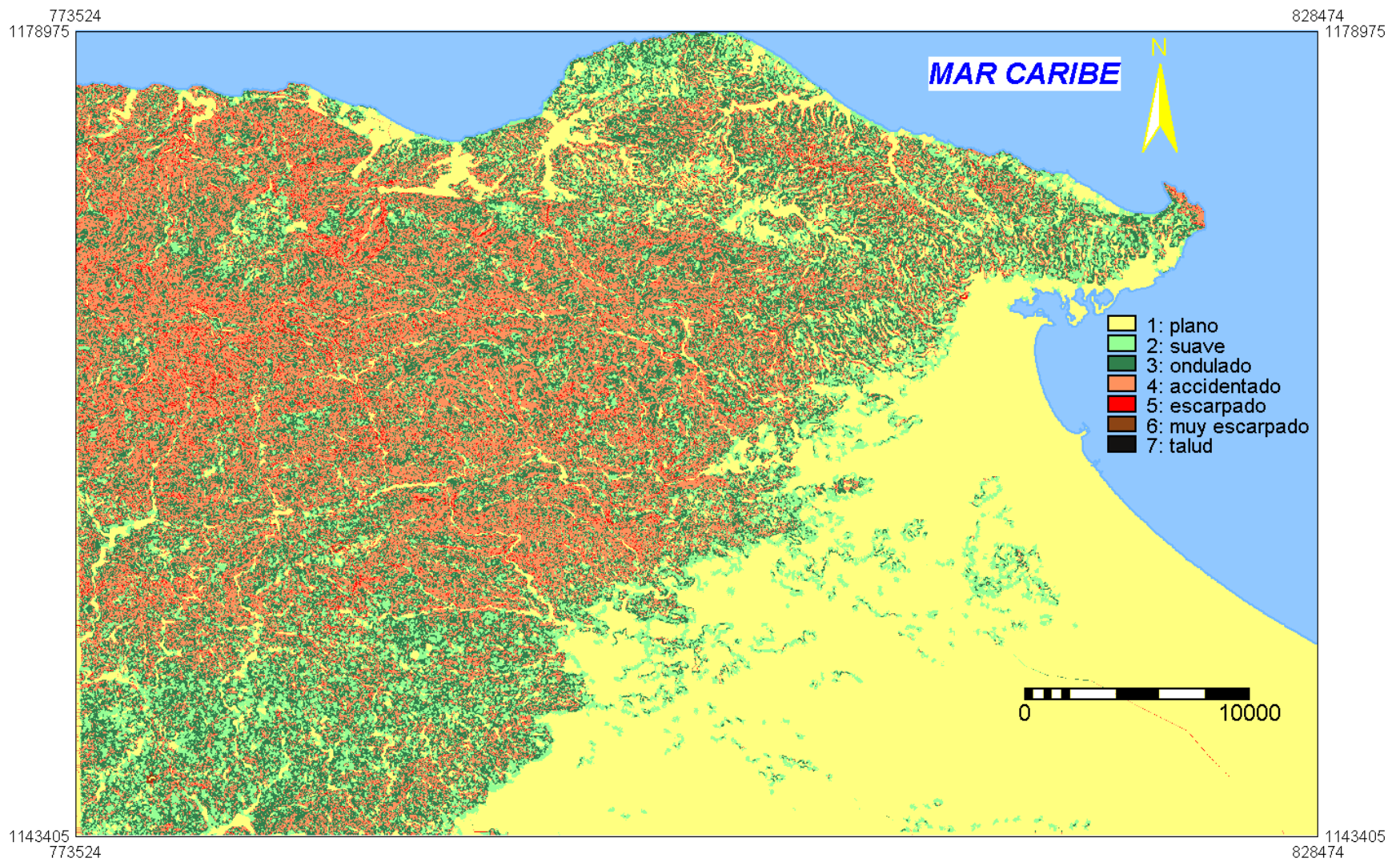
Adicionado a esto, se pudo obtener el modelo digital de pendientes como una de las variables clave para mejorar la definición de los límites de las unidades estratigráficas. Esta expresión espacial de pendiente han sido reclasificadas en las siguientes unidades de pendiente discretizado según su inclinación: Plano (0-5°), suave (5-15°), ondulado (15-30°), accidentado (30-45°), escarpado (45°-65°), muy escarpado (65-80°) y talud (80°-90°) (Figura 25).



**Figura 23. Orientación del flujo y de las estructuras (azimuth)**



**Figura 24. Nivel de disección del terreno**



**Figura 25. Pendientes**



En términos generales el índice de Cramer general aplicado fue de 0,82; es decir, que en un 82% en términos espaciales, las pendientes son explicadas por la geometría y resistencia a los agentes de erosión y meteorización de las rocas que comprenden las distintas unidades geológicas del área de estudio. Esta relación por unidades estratigráficas se comportó igual que el análisis textural cuantitativo que ofrece el resultado de la dimensión fractal, expresándose en el área de estudio en dos grupos: un grupo que presenta claramente las pendientes planas y suaves y con menores desniveles, el cual está asociado a rocas sedimentarias [Aluviones (Qal), Formación Guatire (TGa), Formación Mamporal (Qm), la Formación La Sabana (Ts), Formación la Playita (TQp), Formación Caucagua (TQc), Formación Aramina (Ta) y Formación Carenero (Taz)], que por ser rocas relativamente blandas en términos del conjunto geológico analizado presentan una menor pendiente, disminuyendo su exposición a los agentes erosivos y de meteorización desde su emplazamiento en este espacio.

El segundo grupo que presentan mayores desniveles, lo representan las unidades metamórficas: Esquisto de las Brisas (CaB) y Esquisto de Las Mercedes en todas sus variedades, Complejo San Julián (Asj) y (Asjf), Complejo Nirgua (CN), Esquisto de Chuspita (CAC y CACm), Augengneis de Peña de Mora (APM), Filita de Murugurata (TM), Filita de Urape (Tu), Metadiorita de Todasana (Cto), Metagrabro (Tug), Metatonalita de Caruao (Ac), Serpentinita (Sp) y la Anfibolita de Cabo Codera (Ccc). Esto es explicado por las propiedades de competencia de rocas y minerales.

Sin embargo, analizando la data se puede resaltar que los mayores desniveles registrados presumiblemente dependen de la diferenciación de la composición de los minerales y el resto de materiales que componen la unidad geológica, a saber los granitos y mármoles, como elementos de mayor competencia y los elementos carbonáticos y grafitosos que muestran lo contrario (tabla 4), es decir, los contrastes litológicos explican principalmente la presencia de estos desniveles.

Es de significar el hecho de que las relaciones espaciales con respecto a las unidades estratigráficas, serán retomadas posteriormente a partir del enriquecimiento de la misma con la incorporación de la vegetación, como una de las variables clave para el hallazgo de relaciones relevantes que permitan evaluar con mayor propiedad la cartografía geológica del área de estudio

y mejorarla con técnicas SIG-TE. Sin embargo, para evitar desviaciones con respecto a la utilidad de la data del MDE y MDIS, se continuará con el aprovechamiento de esta data para la interpretación de las evidencias geomórficas de fallamiento, lineaciones y las relaciones con la cartografía geológica.

### **6.1.2.- Evidencias geomórficas de fallamiento-lineaciones**

Para la interpretación de nuevas lineaciones estructurales y la validación de las ya publicadas (Figura 26 y mapa 1), se retoma el uso del MDE y el MDIS, mediante la interpretación visual de las mismas, las cuales son validadas y corroboradas con la existencia de evidencias geomórficas de fallamiento (Figura 27).

Estas lineaciones presentaron un rumbo preferencial entre 120° y 90° N, corroborando que la orientación de los esfuerzos tienen orientación NW al SE (Figura 6 y 28), aunque la deformación hace que el área esté conformada generalmente por 4 bloques (Figura 29): dos que presentan lineaciones con rumbo NW-SE al norte y centro del área de estudio, uno que presenta lineaciones con orientación NE-SW al sur del área de estudio, existiendo también lineaciones menores con direcciones NNW-SSE en la zona baja en altitud constituida por la planicie de Barlovento, que es el bloque sedimentario o cuarto bloque. El bloque del norte “Chuspa” con rocas más blandas, el bloque del centro y noreste “Todasana” con rocas más duras y que presenta la mayor deformación tectónica, el bloque del sur “Capaya” que también presenta deformación y que principalmente está compuesto por unidades de las napas de la serranía del interior y el bloque “Barlovento” (planicie de Barlovento), con unidades terciarias - cuaternarias de rocas sedimentarias.

Se totalizaron una longitud de lineaciones de 1.288 km, de los cuales 744,5 km estaban reportados en la cartografía geológica previa y 543,5 km de longitud de lineaciones fueron incorporadas sólo con técnicas SIG. Estas se han interpretado de la siguiente manera: 909 km de fallas inferidas de ángulo alto, 299,8 km de fallas de ángulo bajo, 76 km de fallas de corrimiento y 3,5 km de fallas cubiertas (Figura 26). Éstas fallas como se mencionó anteriormente fueron identificadas y verificadas por la existencia de evidencias geomórficas de fallamiento, entre las cuales se encuentran ensilladuras de falla, facetas triangulares, lomos de obturación y lineales, estructuras en cola de caballo, desplazamiento de filas y de ríos (Figura 27).

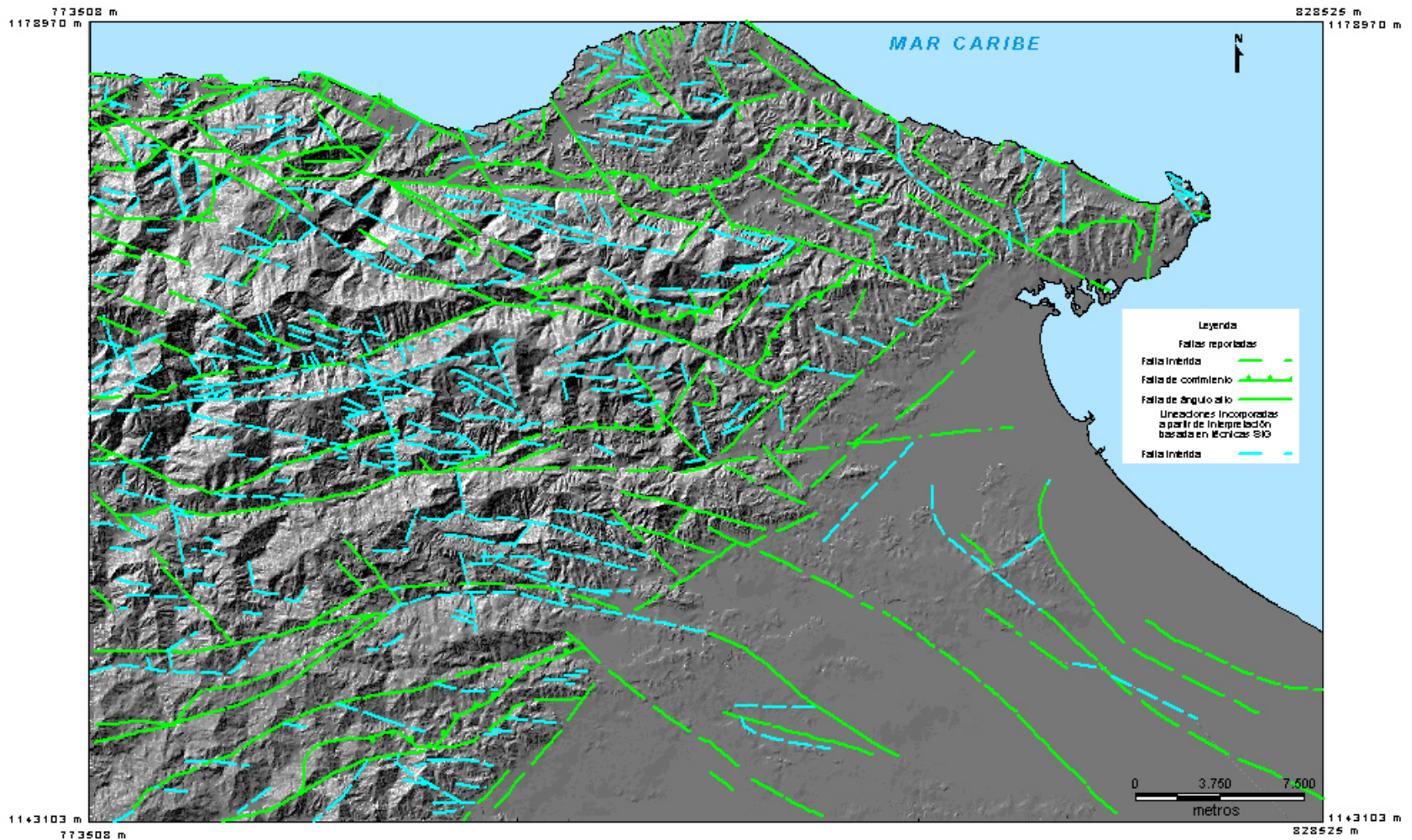
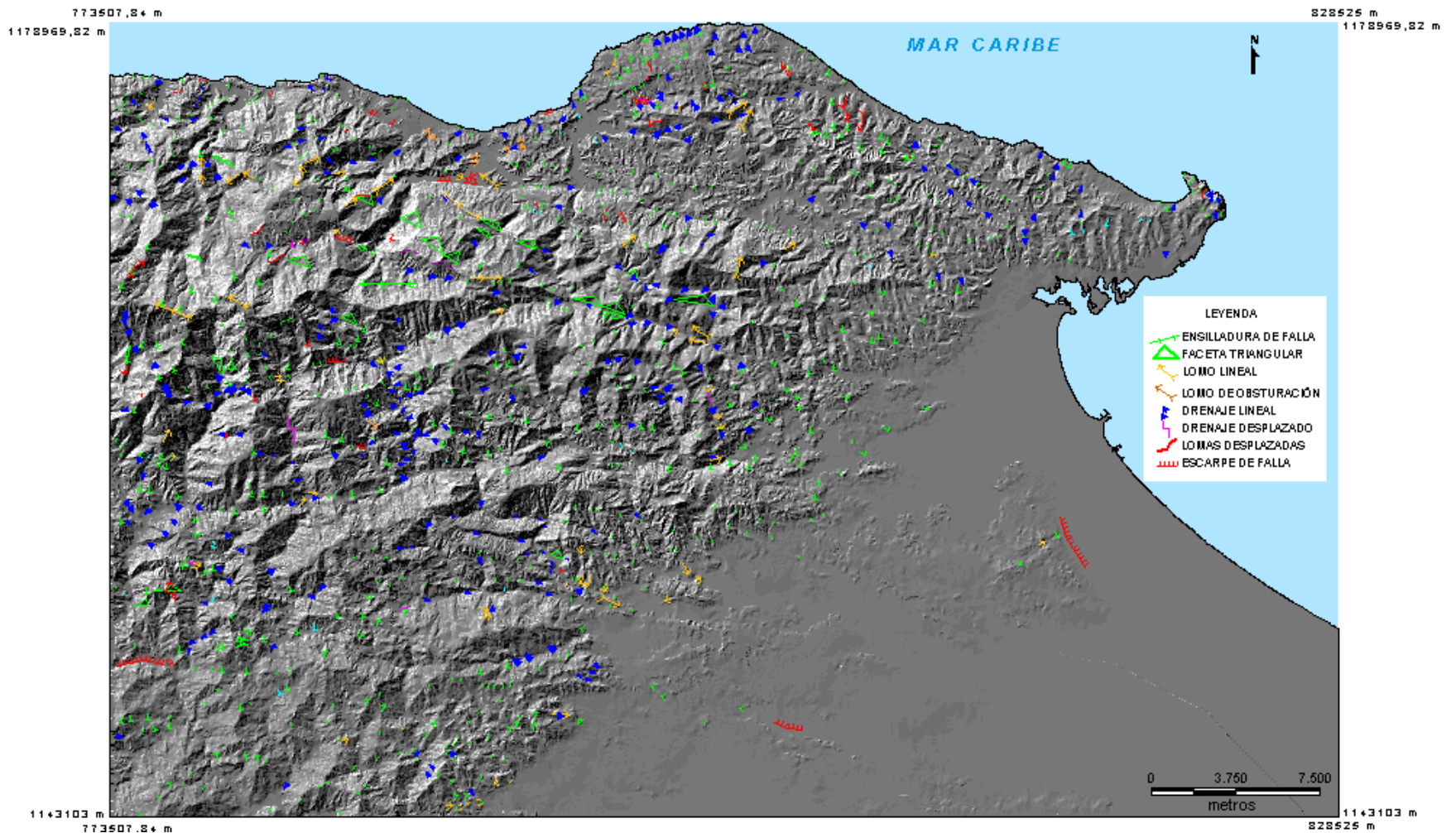
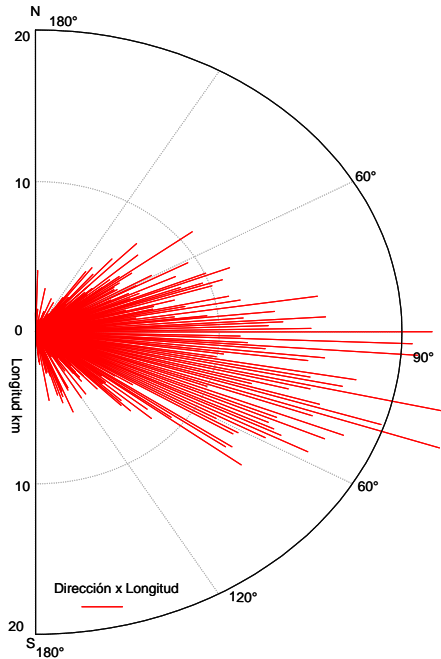


Figura 26. Mapa generalizado de lineamientos

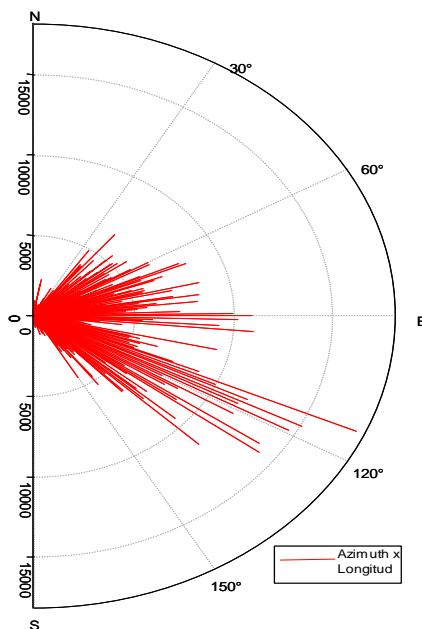


**Figura 27. Mapa generalizado de evidencias geomórficas de fallamiento**

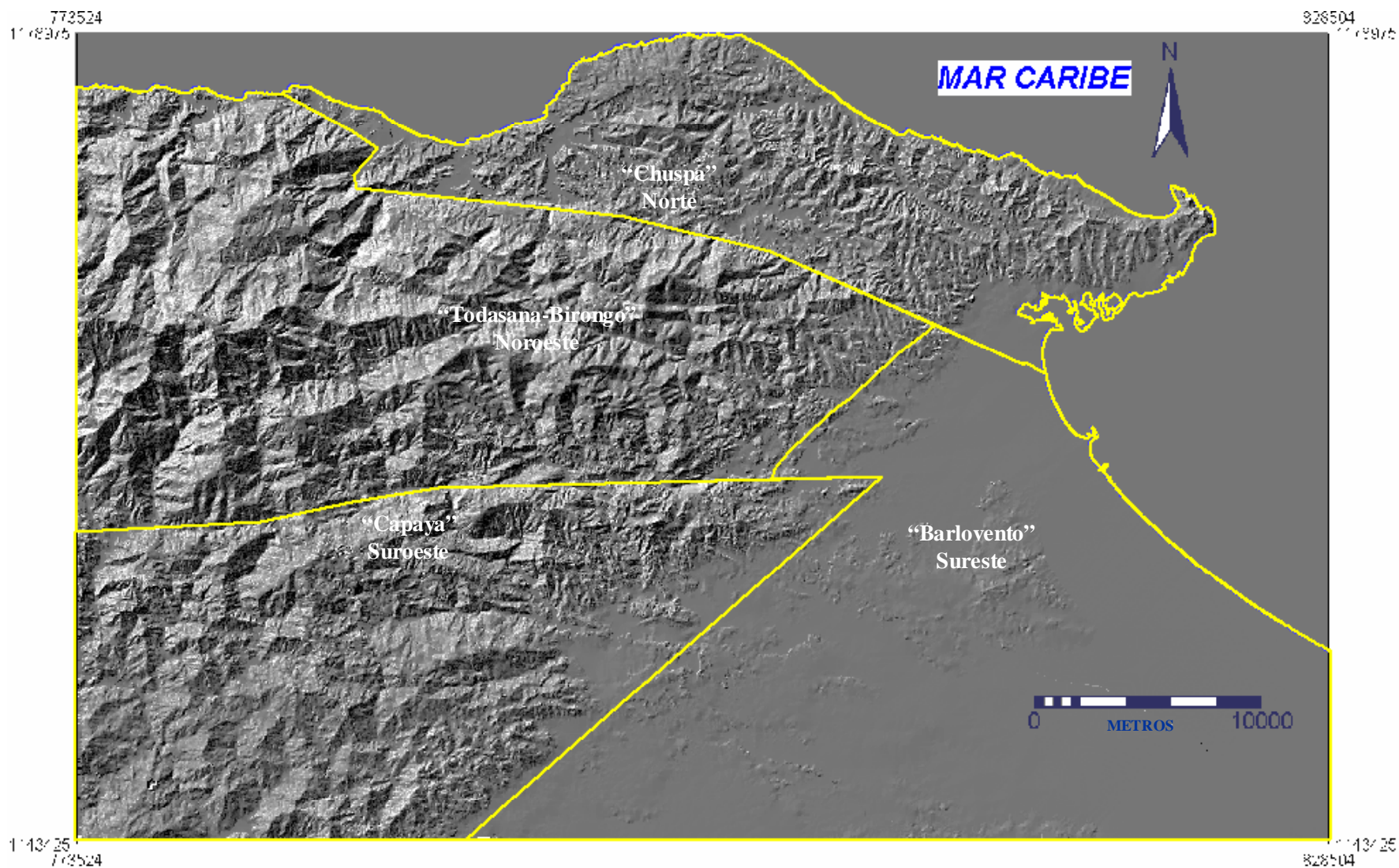


**Figura 28. Gráfico de longitud y azimuth de las lineaciones totales registradas a través del SIG**

Finalmente en este apartado, es conveniente aclarar que el incremento de lineaciones al incluir las técnicas SIG (Figura 26), en la cual se visualiza la relación entre lineaciones reportadas en la cartografía geológica existente y las incorporadas a través del análisis con técnicas SIG, se puede corroborar mejor al relacionar la figura 28 con la figura 6.



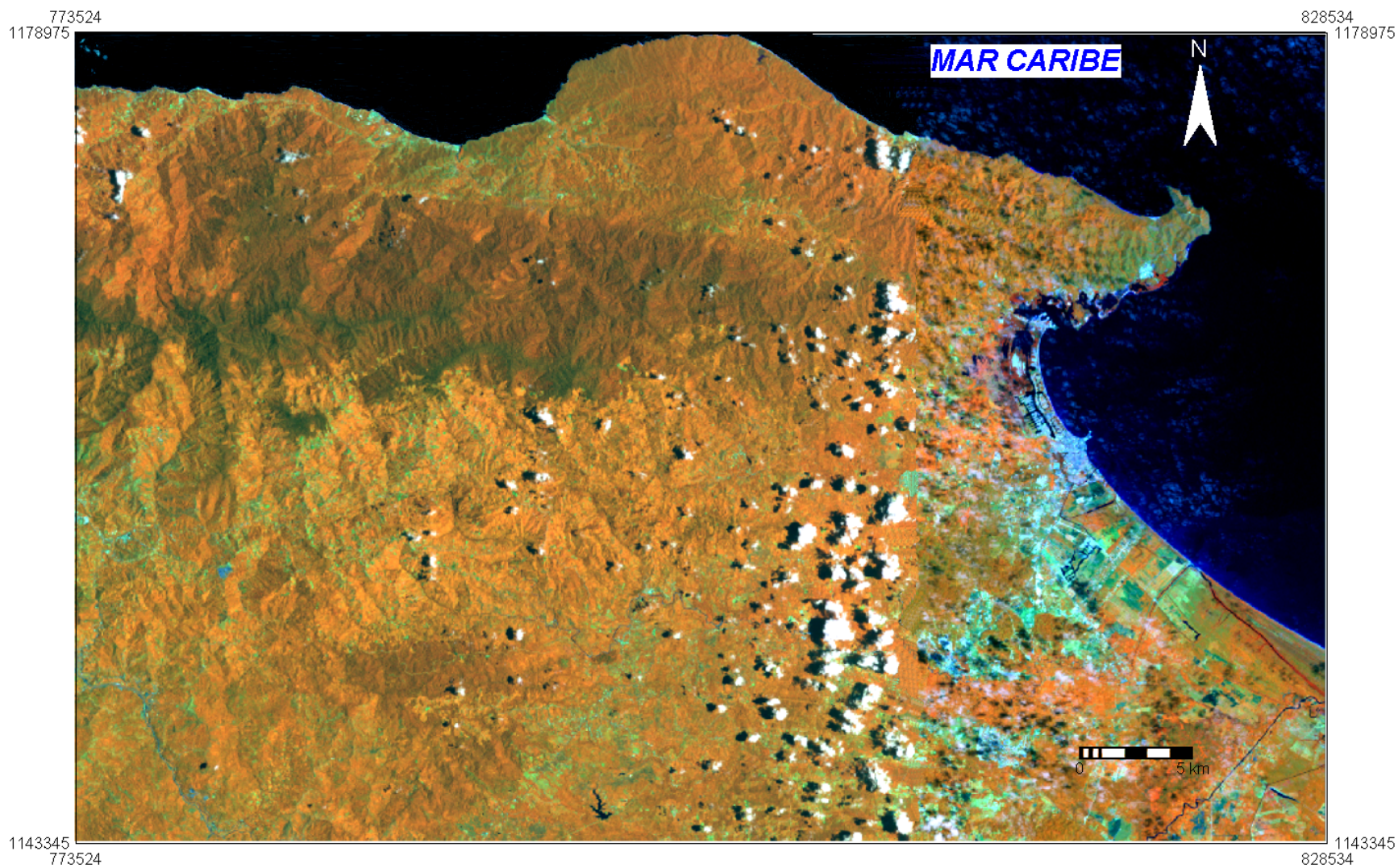
**Figura 6. Gráfico de longitud y azimuth de las lineaciones reportadas**



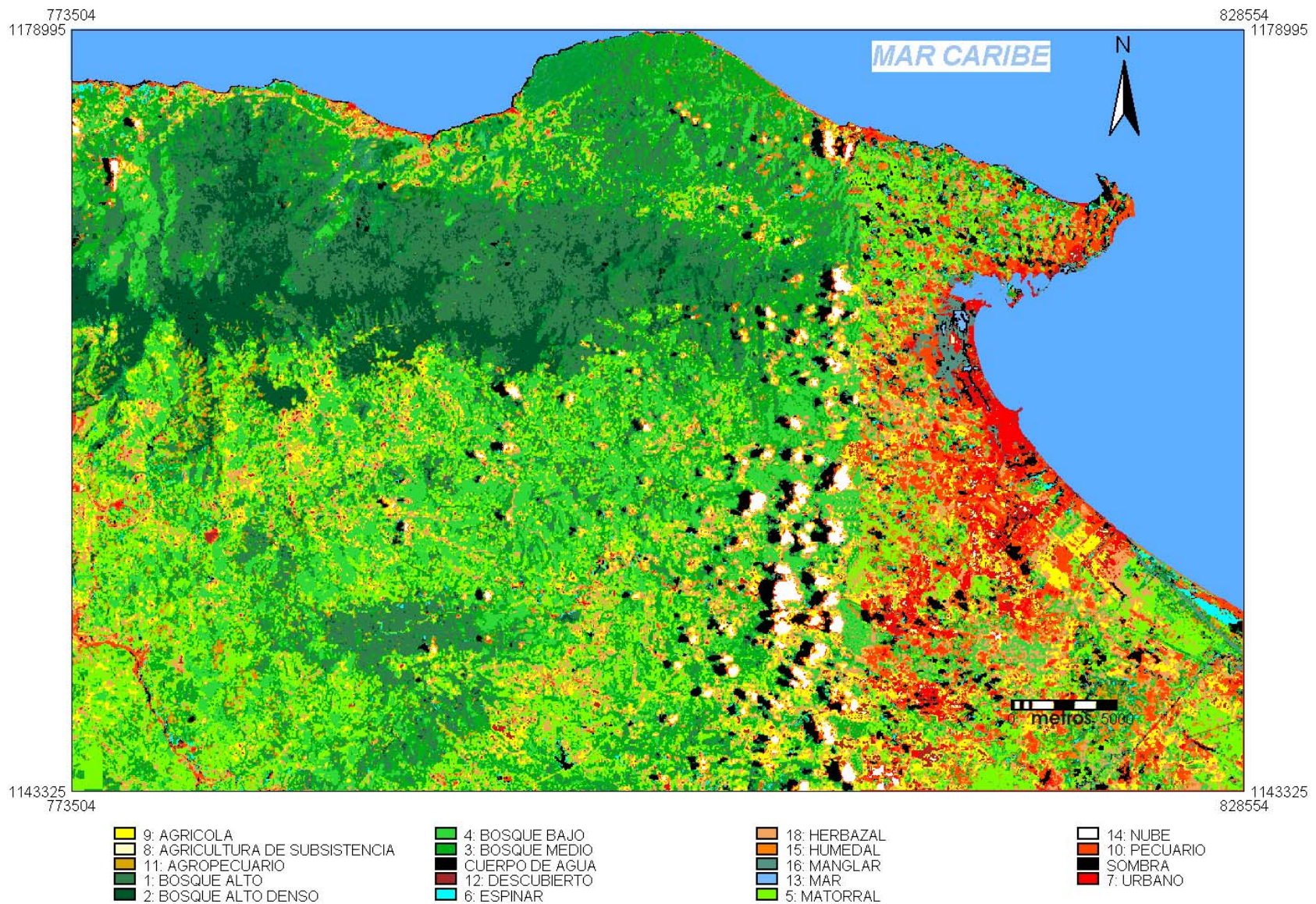
**Figura 29. Bloques tectónicos que conforman el área de estudio**

### **6.1.3.- Cobertura vegetal vs. cartografía geológica**

La cobertura vegetal fue interpretada a partir de la interpretación del mosaico y subset de imágenes de satélite Landsat ETM+ path/row 003/053 y 004/053 cuya composición de bandas es **4-5-3**, (Figura 30), ya que la vegetación y el suelo presentan una alta respuesta a partir de la composición de estas bandas del visible e infrarrojo cercano (CHUVIECO, 1999); (Figura 31 y Tabla 4). Es importante mencionar que las imágenes previamente han sido transformadas y corregidas geométrica, ortométrica, radiométrica y atmosféricamente. Para esta clasificación se seleccionaron los campos de entrenamiento de los píxel típicos de cada unidad de cobertura detectada con el comando Sample y posteriormente se aplicó el algoritmo de asociación máxima radiométrica en ILWIS.



**Figura 30. Composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**



**Figura 31. Clasificación supervisada basada en una composición de bandas 4-3-2 de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+**

Las clases son definidas sobre la base de la formación vegetal y la altura del dosel representativo para el caso de las áreas naturales; por otro lado, para una correcta clasificación se incorporaron las áreas intervenidas de acuerdo a su expresión espacial. En definitiva, las clases identificadas son: bosque alto denso, bosque alto, bosque medio, bosque bajo, matorral, herbazal, humedal, manglar, espinar, descubierto, cuerpo de agua, para el caso de cobertura vegetal y áreas naturales; urbano, agropecuario, pecuario y agrícola, para el caso del uso de la tierra, y nube y sombra de nube, por ser elementos presentes en imágenes ópticas de los sensores activos y que no deben obviarse de la definición de clases para una clasificación supervisada.

En términos generales el índice de Cramer general aplicado fue de 0,92; es decir, que en un 92% en términos espaciales, las respuestas geobotánicas de la vegetación muestran una alta correlación con el tipo de rocas y minerales presentes que comprenden las distintas unidades geológicas del área de estudio. Esta relación por unidades es la siguiente.

Para las rocas sedimentarias, las respuestas geobotánicas mostraron que la vegetación de porte bajo, es decir, herbazales, espinares y matorrales, predominan. Las relaciones son las siguientes: los aluviones (Qal), Formación Carenero, Formación Caucagua (TQc), Formación Aramina (TA) y Formación Mamporal (Qm) están asociadas a herbazales y matorrales, que son coberturas de porte bajo; no obstante existen excepciones como la Formación La Playita (TQp) y la Formación La Sabana (Ts), las cuales están asociadas a bosques medios y altos; el otro grupo de unidades ígneo-metamórficas se asocian mejor a bosques en todas sus variedades, aunque también se presentan sus excepciones: El Esquisto de las Mercedes (CaMz y CaMc) presenta una alta correlación con herbazales; la Anfibolita de Cabo Codera (CCc) está cubierta por matorrales y espinares; el Esquisto de las Mercedes (CAM) y Esquisto de Las Brisas (CAB), están asociados a bosques y herbazales de forma general, aunque esta última cobertura vegetal es producto de intervención antrópica; finalmente el Esquisto de Chuspita (CaCc, CAC, CACm), Esquisto de las Mercedes (CAMa, CAMp y CAMc), Esquisto de San Julián (Asjf) (Asj), los mármoles en todas sus expresiones, Filita de Murugurata (TM), Filita de Urape (Tu), Complejo Nirgua (CN), Metadiorita de Todasana (Cto), Metagabro (Tug), Metatonalita de Caruao (Ac), Serpentinita (Sp) y Augengneis de Peña de Mora (APM), están cubiertos por bosques mayoritariamente; sin embargo, conviene aclarar que las áreas de correspondencia espacial entre las rocas ígneo-

metamórficas y herbazales, muchas veces responde presumiblemente a la intervención humana que se ha establecido, desde la época de la colonia.

Ahora bien, destacando las respuestas particulares están la de los bosques altos y altos densos con la Asociación Metamórfica Ávila, correlacionando muy bien los bosques altos y densos con el Augengneis de Peña de Mora (APM) y con el Complejo San Julián (ASJ) aunque esta última relación pareciera depender más de la presencia de cumbres que obviamente representa un piso térmico y una barrera orográfica que favorece la formación de nubes y de precipitación, condiciones naturales que favorecen la presencia de bosques y de mayor desarrollo, además explicado por la presencia de áreas protegidas como el parque nacional el Ávila y con ausencia de vías de penetración. Por otro lado es conveniente destacar la fuerte correlación del Metagabro (Tug) y el Esquisto de las Mercedes con alta presencia de carbonatos y mármol con los bosques altos que existe en el sur y centro, pues parece un elemento determinante que es explicado por la roca sustento y por su abrupta topografía. Su presencia y distribución geográfica al sur puede ayudar a mejorar la delimitación de unidades geológicas (Tug) y (CaMm) (mapa 1).

Con respecto a los aluviones, estos presentan altas respuestas con respecto a la presencia de herbazales y espinares tanto en la barra litoral de Barlovento, como en los lechos de los ríos y planicie de Barlovento, esto a su vez acompañado de matorrales. Los manglares y humedales también se presentan soportados por aluviones, pero más arcillosos y corresponden con las lagunas y cubetas más importantes donde el nivel de base de los ríos ha sido alcanzado.

Por otro lado, en términos generales los bosques también corroboran la existencia de fallas tectónicas, por el cambio definido por el bosque alto y bajo con herbazal al norte del área de estudio y que define el contacto entre el Complejo San Julián (Asj) y el Esquisto de las Mercedes (CaM) y Esquisto de Las Brisas (CaB) (Fig 26 y 31).

Finalmente es importante destacar que estos resultados de las relaciones espaciales cobertura vegetal-cartografía geológica, así con los resultados de los indicadores morfométricos-cartografía geológica analizados previamente también corroboran la interpretación elaborada de las unidades

geológicas y de las lineaciones. Esto se contrastará mejor con el apoyo de técnicas de interpretación de sensores remotos de plataforma espacial utilizados a continuación.

## **6.2.-Geología producto de técnicas procesamiento digital de imágenes (PDI)-TE**

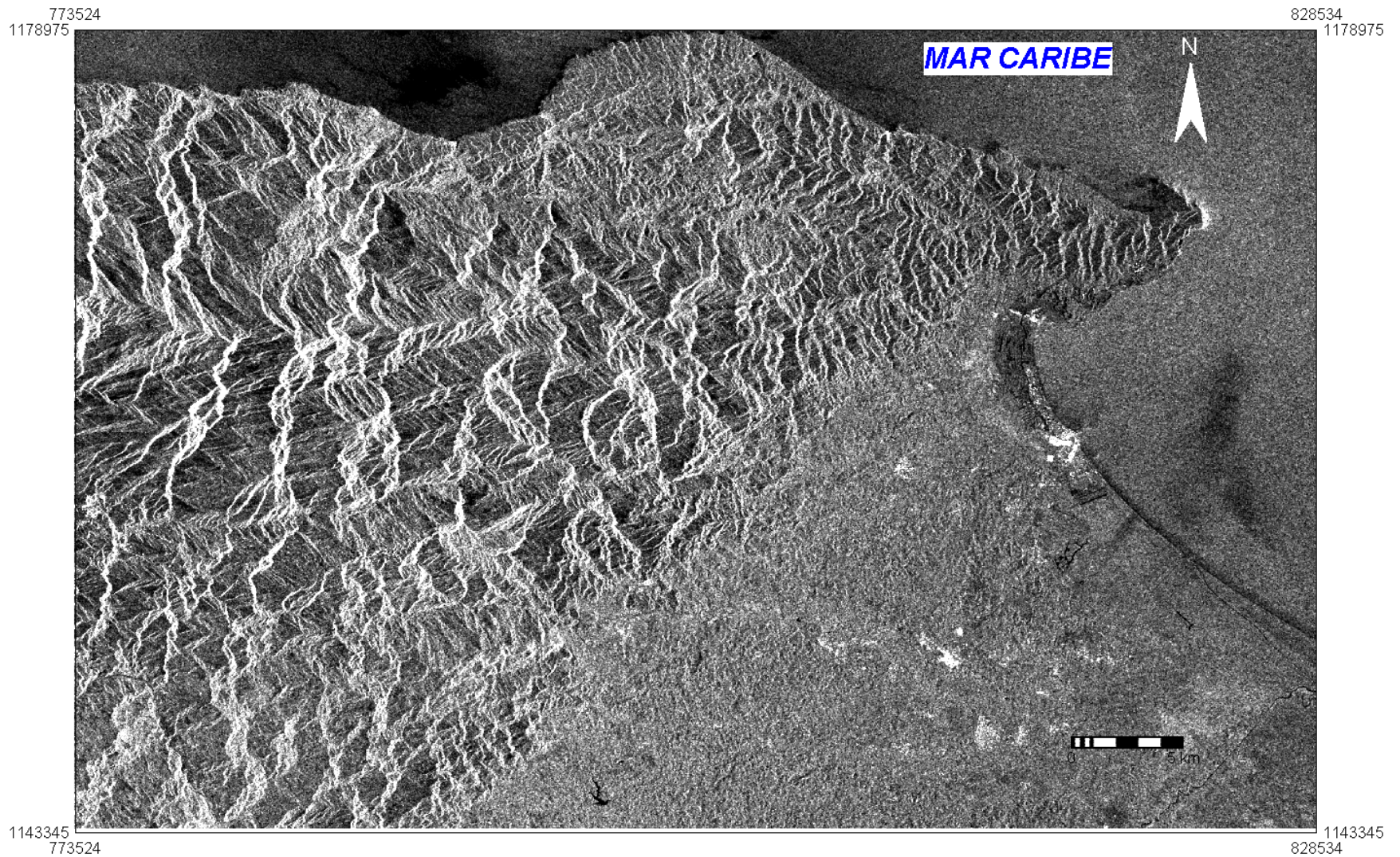
A partir del empleo de sensores remotos, se podrán mejorar las primeras interpretaciones basadas en los resultados de la aplicación de algoritmos SIG, a partir de clasificaciones visuales y digitales.

### **6.2.1.- Clasificaciones visuales y digitales**

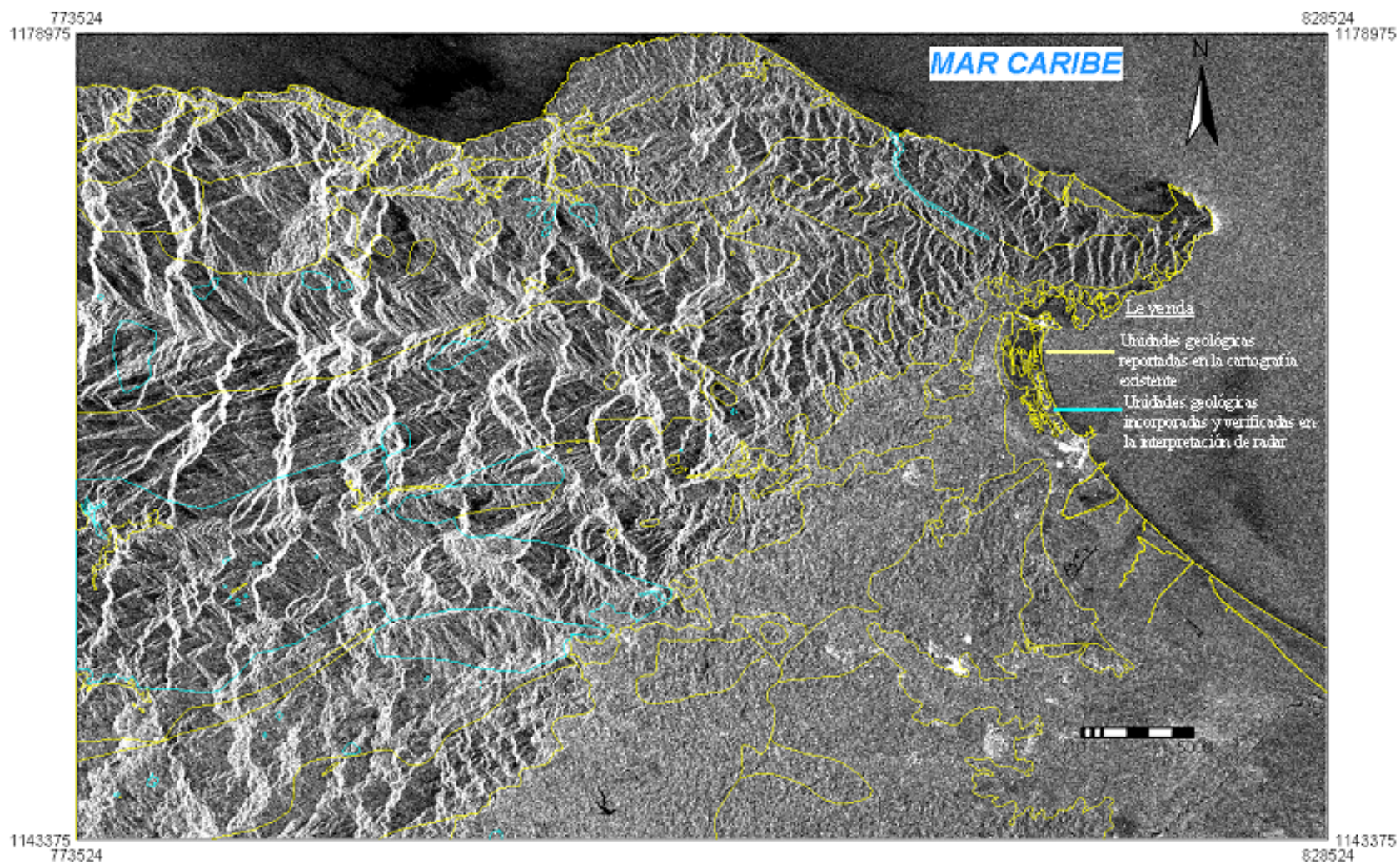
Las técnicas de extracción de información de sensores remotos son agrupadas en dos tipos visuales y digitales. Las interpretaciones visuales son llevadas a cabo mediante las diferencias de textura, contraste e intensidad. Para ello se ha implementado en sensores activos (radar) (Figura 33) y en el caso de los sensores pasivos de la composición de bandas del mosaico y subset previamente mencionado (Figura 32) (anexo 1).

#### **6.2.1.1.- Interpretación geológica con sensores activos**

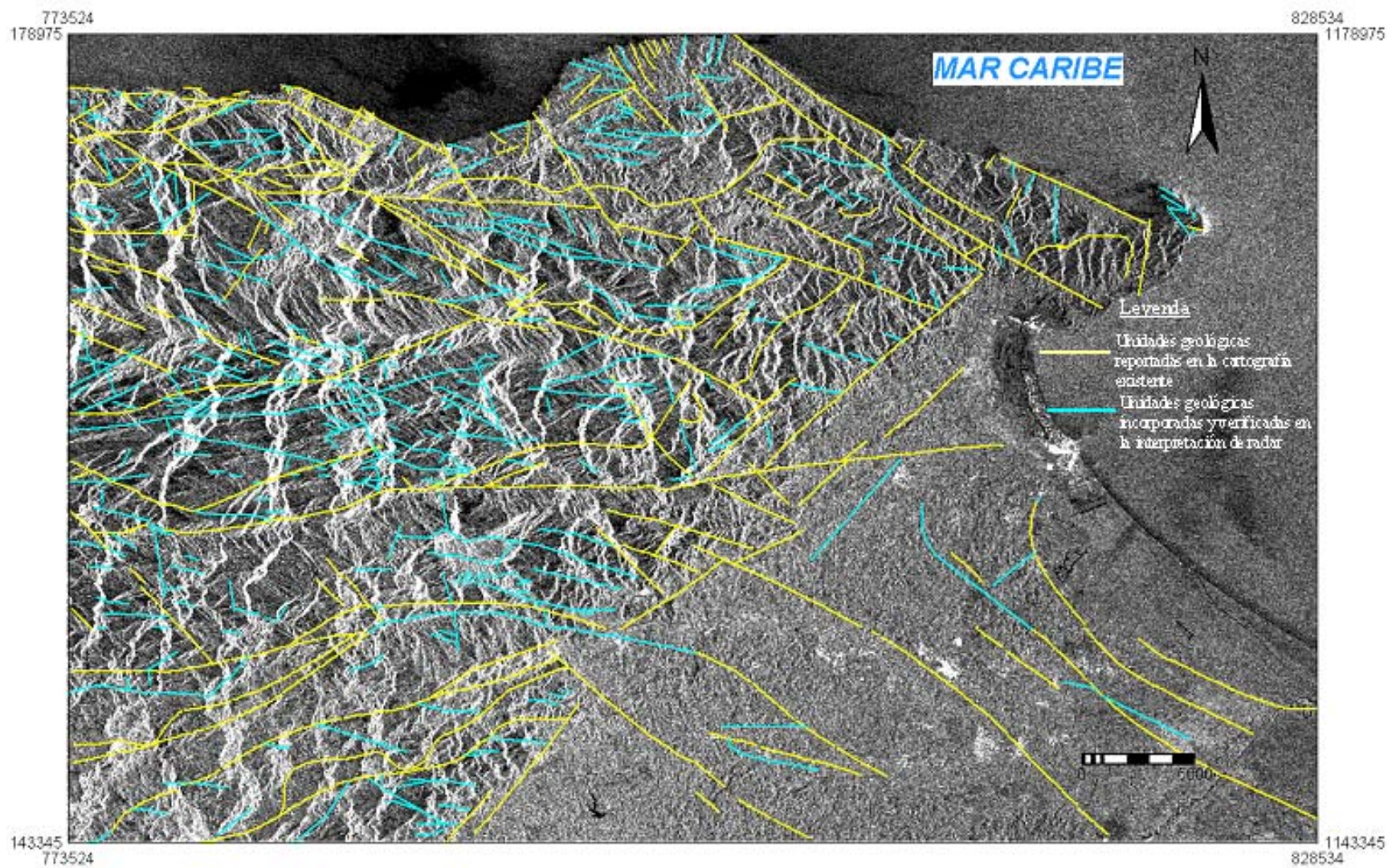
La interpretación visual en la imagen de radar se utilizó para el ajuste de las unidades geológicas (Figura 33) y su diferenciación con mayor grado de precisión, además de corroborar la existencia de las lineaciones previamente trazadas (Figura 34).



**Figura 32. Imagen de radar RADARSAT modo grueso, posición descendente. Marzo 1996  
(orientación de la toma 12,04° , instrumento: Syntetic Aperture Radar (SAR))**



**Figura 33. Ajuste de interpretación geológica en Imagen RADARSAT, modo grueso, posición descendente. Marzo 1996 (orientación de la toma 12,04° , instrumento: Synthetic Aperture Radar (SAR))**



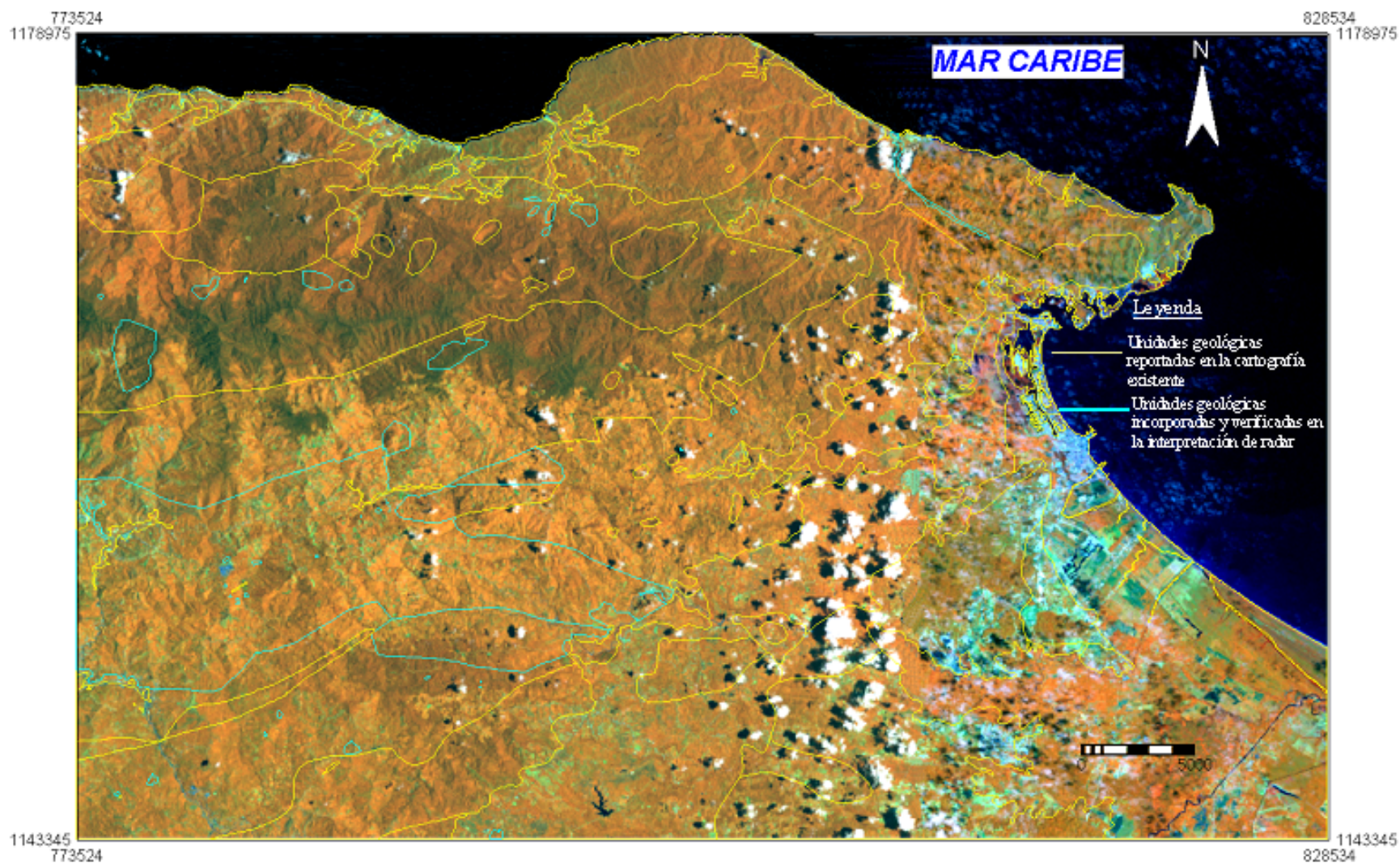
**Figura 34. Ajuste e interpretación de lineaciones en Imagen RADARSAT, modo grueso, posición descendente. Marzo 1996 (orientación de la toma 12,04°, instrumento: Synthetic Aperture Radar (SAR))**

### **6.2.1.2.- Interpretación geológica con sensores pasivos**

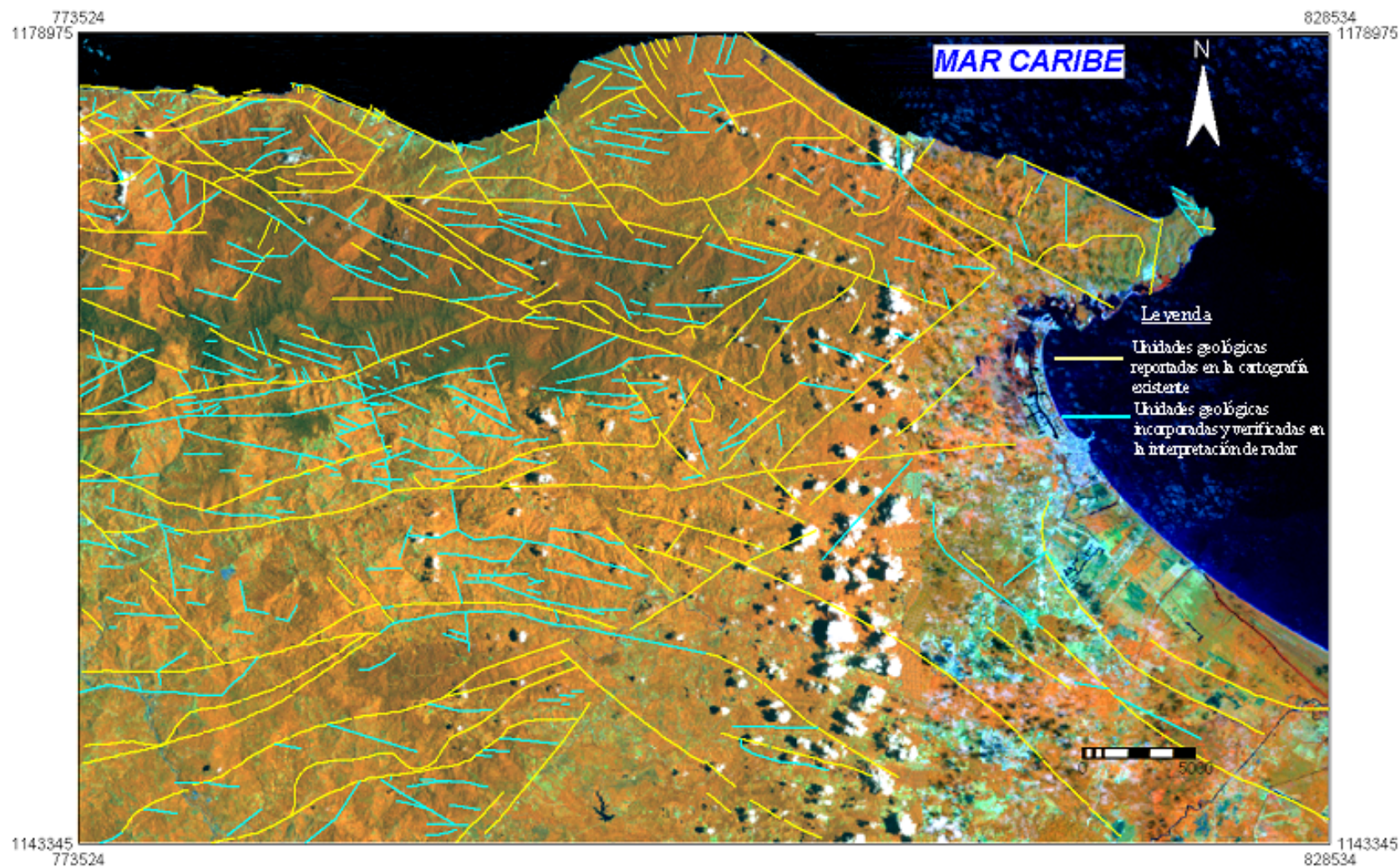
Por otro lado para la interpretación de la imagen landsat se utilizó la composición de bandas 4-5-3, ya que muestra una mayor respuesta espectral con respecto a las unidades geológicas (Figura 35) y lineaciones (Figura 36) (CHUVIECO, 1999).

Un segundo grupo de técnicas para la extracción de información de sensores remotos fue la implementación de las clasificaciones semiautomatizadas y automatizadas, las cuales consisten por un lado en la agrupación de píxeles de acuerdo a las semejanzas espectrales y estadísticas que ellos posean, el interprete sólo decide cuantas clases se deben extraer de las imágenes satelitales (clasificación no supervisada); por otro lado el interprete escoge campos de entrenamiento, es decir, sitios-muestra representativos del elemento que esté interpretando, que para el caso de la presente investigación corresponden con la selección de sitios representativos de cada unidad geológica, apoyados en las muestras existentes en los distintos trabajos de campo que se han realizado en el área de estudio. Posteriormente, el procesador de imágenes toma las respuestas espectrales que correlacionan con la selección de los campos de entrenamiento y luego diferencia en clases según la variable analizada toda la imagen de satélite. La clasificación no supervisada (Figura 37) se elaboró tomando 30 clases (igual número de clases de acuerdo a las unidades geológicas en la cartografía geológica).

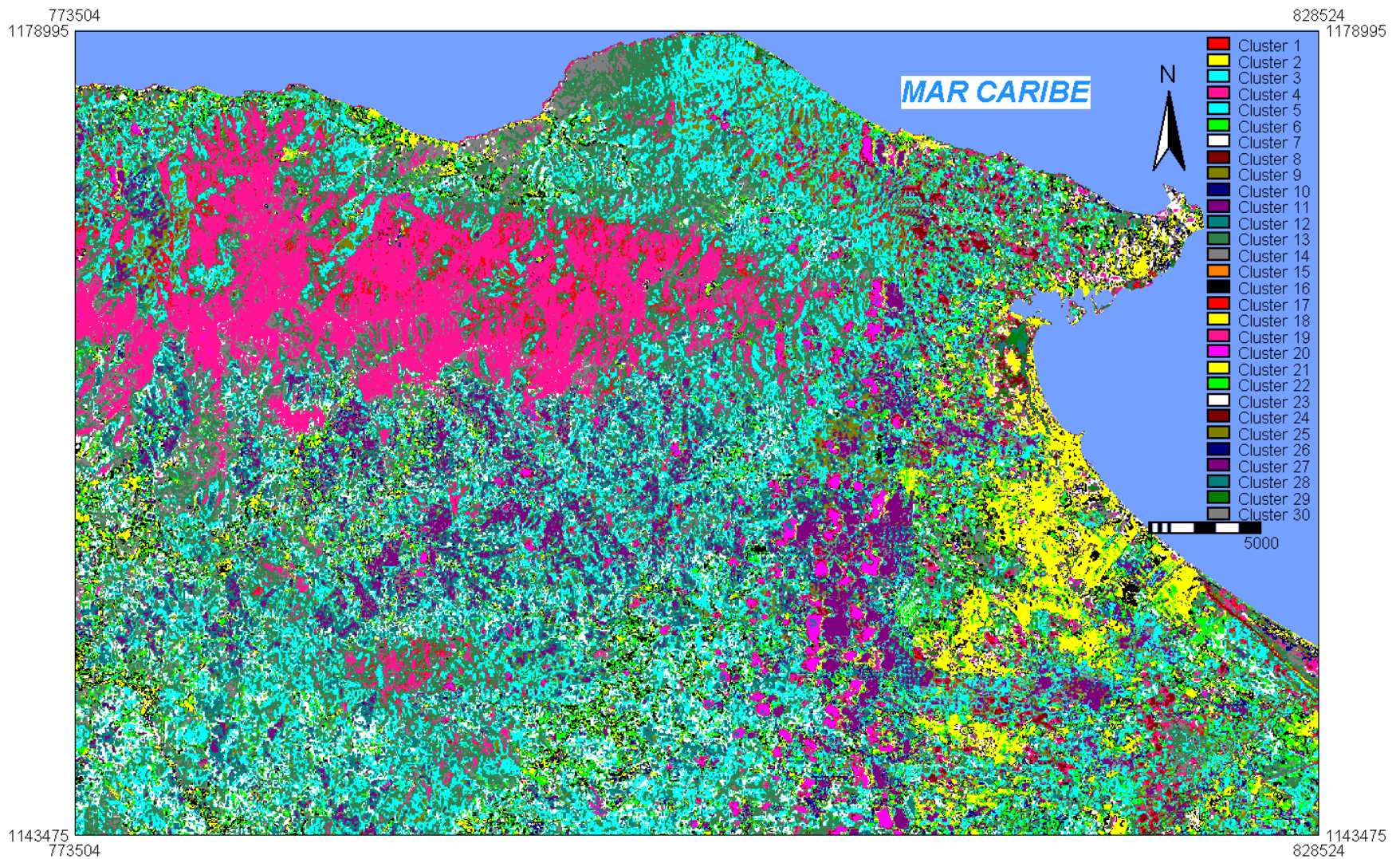
En términos generales el índice de Cramer general aplicado fue de 0,76; es decir, que en un 76% en términos espaciales, las respuestas de los cluster muestran una alta correlación con el tipo de rocas presentes que comprenden las distintas unidades geológicas del área de estudio. Aunque la correlación es la más baja con respecto a las otras variables manejadas, presenta una correspondencia aunque no muy clara, con los materiales que componen cada unidad definida por la apariencia y corroborada con el índice de Cramer.



**Figura 35. Ajuste de unidades geológicas en una composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**



**Figura 36. Ajuste de lineaciones basada en una composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**



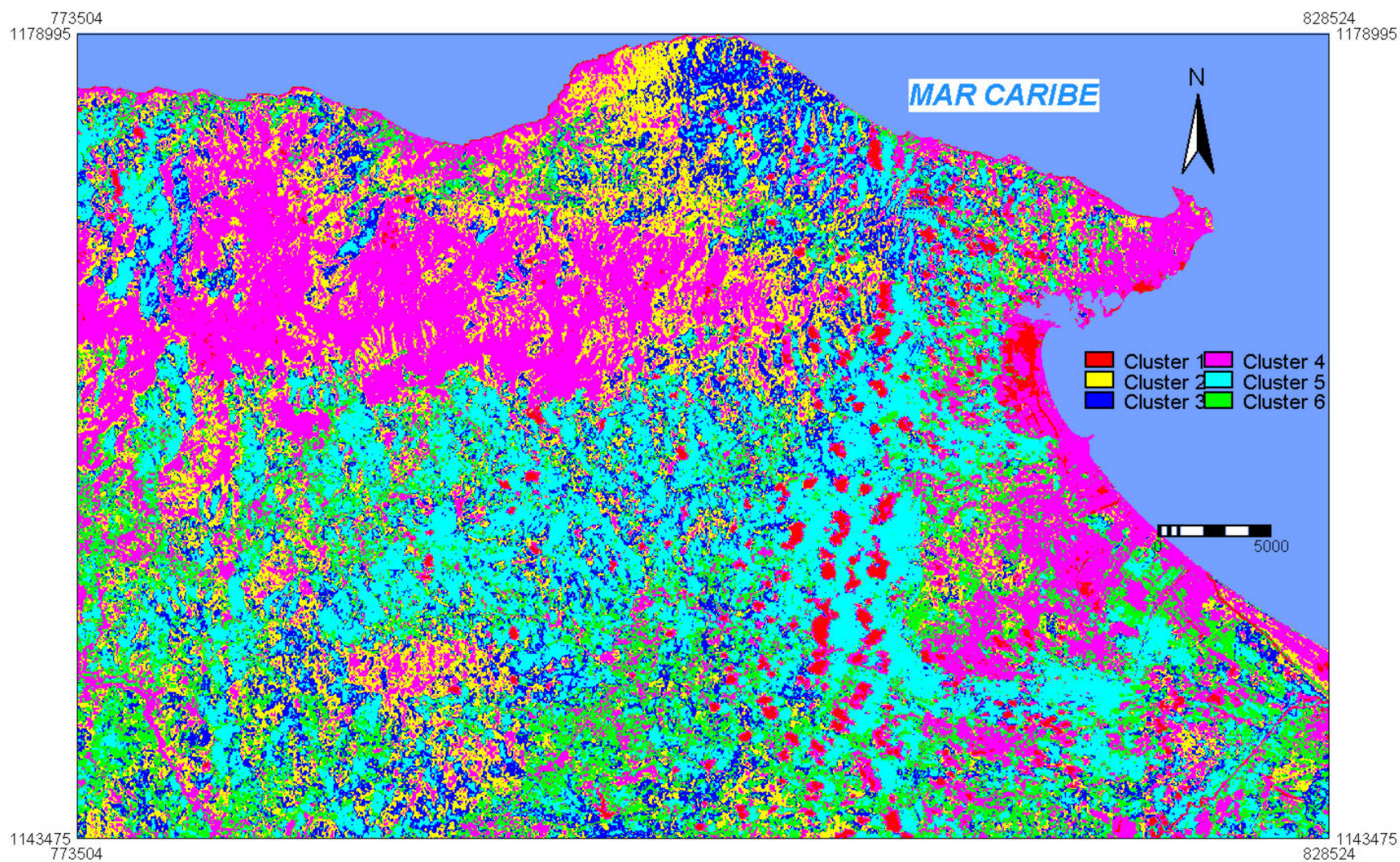
**Figura 37. Clasificación no supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**

Esto es reflejado por las siguientes relaciones: El conjunto de cluster espectrales asociados a las unidades estratigráficas sedimentarias en general presentaron el cluster 26 como el de mayor frecuencia, los conglomerados el cluster 22 y los aluviones el 17. Las unidades geológicas que poseen el mineral cuarzo y anfíbol poseen una alta concentración en el cluster 4. Los Augengneis presentaron alta relación espacial con los cluster 10 y 7. De hecho, las rocas que contienen mármol y granito poseen el cluster 7 como coincidente. Los esquistos poseen una combinación de cluster 13, 16 y 22, con una composición más diferenciada según minerales presentes. Los metaconglomerados presentan una respuesta concordante con el cluster 30, a diferencia del conglomerado sin vestigio de metamorfismo. Las filitas presentaron la combinación de los cluster 16, 13, 22 y 30, (Tabla 4).

Estos resultados son poco detallados, presumiblemente por dos aspectos: en primer lugar aunque hay bastante diferenciación en términos de unidades de rocas, la composición mineralógica de las rocas (elementos que hacen la diferencia entre las unidades geológicas), es relativamente poco diversa para el área de estudio; en segundo lugar por la característica multispectral (7 bandas temáticas) y radiométrica (8 bits) del sensor Landsat ETM+, el cual se hace limitado en relación a la escala de análisis y a la diferenciación espacial en términos morfométricos elaborada anteriormente.

Sin embargo es importante aclarar que las respuestas aunque no son tan contundentes desde el punto de vista de correlación espacial, pueden orientar acerca de la aparición de minerales y rocas de acuerdo a su diferenciación espectral en terrenos de difícil acceso. Además, estas pruebas son un buen comienzo para el estudio de estratigrafía espectral con sensores de mayor resolución espectral y radiométrica. Este hecho también vislumbra la posibilidad de confusión entre las clases que podrían resultar de la aplicación de la clasificación supervisada con la imagen Landsat, previamente analizada.

Es conveniente aclarar que también se realizó una clasificación no supervisada con 6 clases para observar si las clases corresponden con las rocas de mayor importancia en el área de estudio (Figura 38).



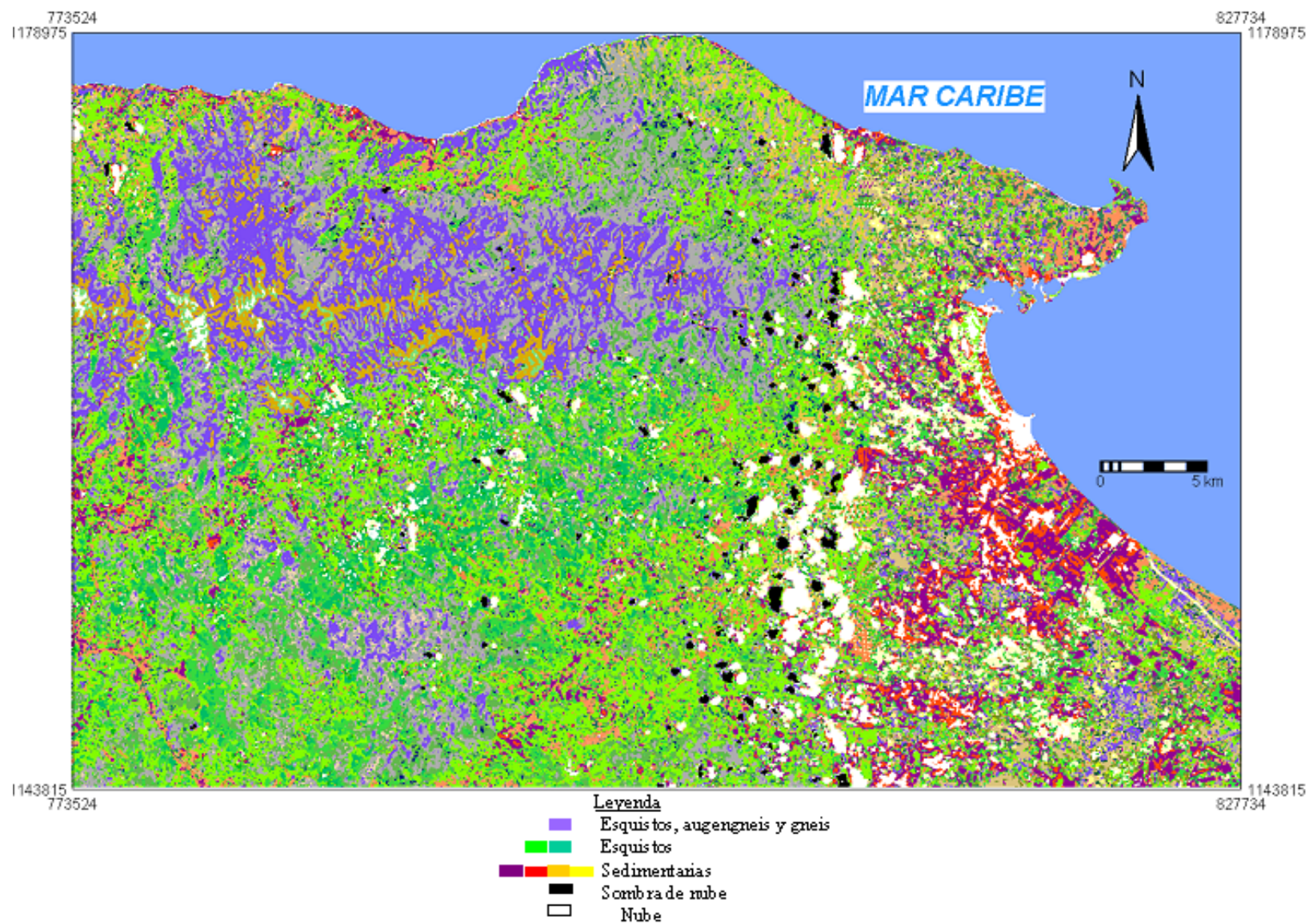
**Figura 38. Clasificación no supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**

La clasificación no supervisada, aunque también presentó confusión radiométrica y no muestra homogeneidad dentro de la mayoría de las unidades geológicas, proporciona una ayuda en relación a la delimitación de algunas unidades geológicas de mayor importancia y también presenta una buena correlación. El cluster 4 y 5 está muy relacionado a la Asociación Metamórfica Ávila; los clusters 2 y 4 están relacionados con la Filita de Murugurata (Tm); los cluster 3 y 5 presenta altas respuestas con respecto a la Asociación Metasedimentaria de Caracas; los cluster 6, 5 y 4 presentan asociación espacial con respecto a las rocas sedimentarias.

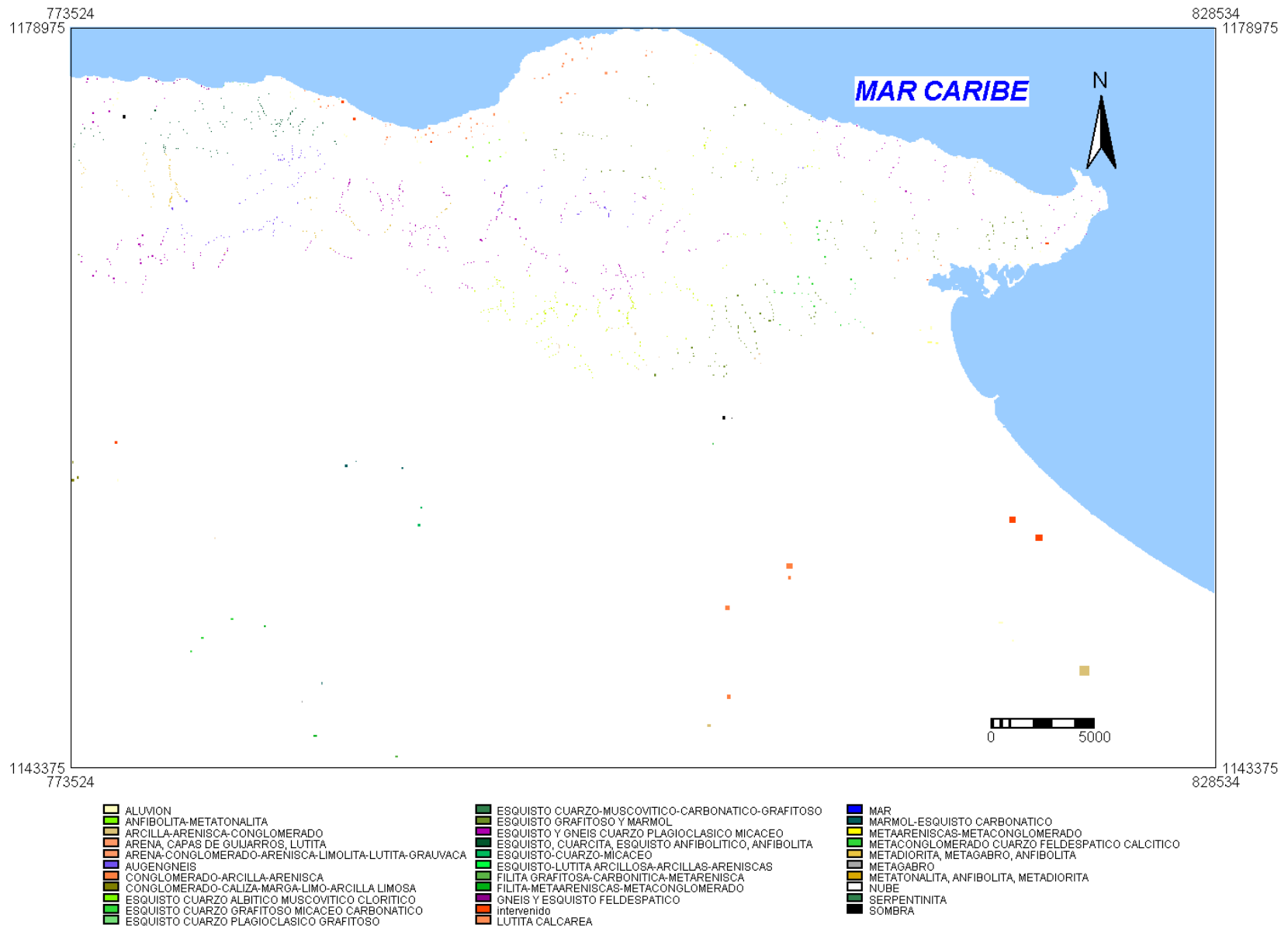
Las confusiones radiométricas obedecen a las consideraciones anteriormente expuestas, aunque se intentó también probar con otro tipo de clasificación, pero en este caso semi-automatizada, denominada clasificación supervisada (Figura 39), la cual fue implementada a partir de campos de entrenamientos sobre la mejor composición de bandas 4-5-3 para la extracción de información geológica (Figura 40) (CHUVIECO, 1999).

Por otro lado es importante resaltar que para el caso de esta investigación los campos de entrenamiento para poder aplicar la clasificación supervisada a la composición de bandas explicada anteriormente corresponden con los sitios de muestras de campo que posee la data geológica de insumo. Esta información ha sido aprovechada lógicamente con los ajustes necesarios en términos de localización espacial para la toma de campos de entrenamiento, además de incorporar sitios donde se tiene evidencia de revisión de foliación y estratificación que aunque no se tiene muestra, se asume una revisión de la unidad estratigráfica reportada en la cartografía (Mapa 1).

Para el caso de investigaciones que no posean muestras de campos y simplemente se quiere mejorar esta data, se pueden seleccionar sitios donde se conozca con mayor confianza la presencia de unidades estratigráficas características y poder aplicar este tipo de técnicas, que para el caso de esta investigación fueron los sitios donde existen muestra de foliaciones y estratificación.

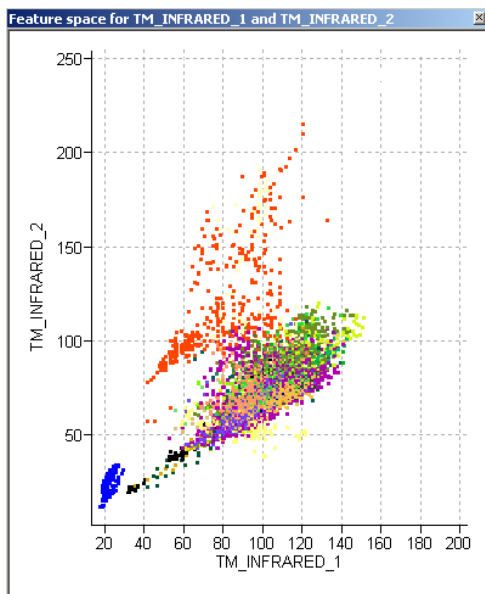


**Figura 39. Clasificación supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**



**Figura 40. Campos de entrenamiento utilizados para la clasificación no supervisada**

En términos generales el índice de Crai respuestas de los cluster muestran correlaci esta correlación es pobre por las razones ex no supervisada. Aunque existen varias u constituidas de algunas unidades agrupado Chuspita (CaC) y las Brisas (CaB), ad relacionados a distintas unidades estratigráfi manera a los sensores, aunado también a Landsat. Esto se puede evidenciar en el grá clases (Figura 41 y Tabla 4).



**Figura 41. Gráfico de separabilidad y de campos de entrenamiento,**

Del gráfico de separabilidad, utilizando l se confirma la confusión de variables presumiblemente por las causas expuestas anteriormente y que explican el pobre resultado de la clasificación supervisada.

Sin embargo, se pueden interpretar los siguientes resultados:

La Asociación Metamórfica Ávila, muestra una buena diferenciación espacial a partir de los niveles digitales agrupados en la clasificación supervisada, esto en función de su radiometría con imágenes de 8 bits. El Complejo de San Julián (Asj) mostró altas respuestas espectrales con

las  
go,  
ión  
tán  
(M),  
tán  
ual  
sor  
de

de

am,

niveles digitales entre 60 y 140, el Augengneis de Peña de Mora (APM) entre 40 y 70 y la Metatonalita de Caruao (Ac) entre 69-120 (Tabla 4).

La Asociación Metamórfica La Costa mostró una diferenciación radiométrica acotada globalmente entre los 75 y los 200 niveles digitales, el Complejo Nirgua (CN) mostró valores entre 79-192, la Anfibolita de Cabo Codera (Ccc) entre 140-178 y Metadiorita de la Todasana (Cto) muestra niveles digitales entre 75-200.

La Asociación Metasedimentaria Caracas arroja valores entre 60 y 204, con una mezcla importante en todas las variedades de esquistos presentes.

Las unidades de la Napas de la Serranía del Interior, compuesta principalmente por la Filita de Murugurata y Urape, arrojan valores entre 25 y 248.

Cada una de las respuestas radiométricas expresadas en niveles digitales dependen principalmente de las propiedades físicas y químicas de los esquistos, gneises y la metatonalita, como principales grupos de rocas que constituyen la Asociación Metamórfica Avila; de las Anfibolitas y Metadioritas de la Asociación Metamórfica La Costa; de los Esquistos de la Asociación Metasedimentaria Caracas, y de las filitas de la unidad de la Napa de la Serranía del Interior. Sin embargo, es importante aclarar que la ambigüedad en la separabilidad de las clases está determinada presumiblemente por los minerales formadores de rocas comunes entre las distintas asociaciones metamórficas, ígneo-metamórficas y metasedimentarias, así como por el nivel de esquistosidad y el nivel de intervención que afecta las respuestas capturadas por el sensor.

Esas causas también actúan en las rocas sedimentarias. Los aluviones compuestos fundamentalmente por arena, localizados fundamentalmente en barras litorales, y alrededores de los ejes de escurrimiento, mostraron respuestas espectrales con números digitales entre los 100-180, inclusive mostrando valores que llegan al nivel digital 255. Por el contrario, los aluviones compuestos principalmente por arcillas (aluviones en humedales y lagunas), mostraron niveles digitales entre 50-70. Ambas respuestas están determinadas por los minerales y la humedad

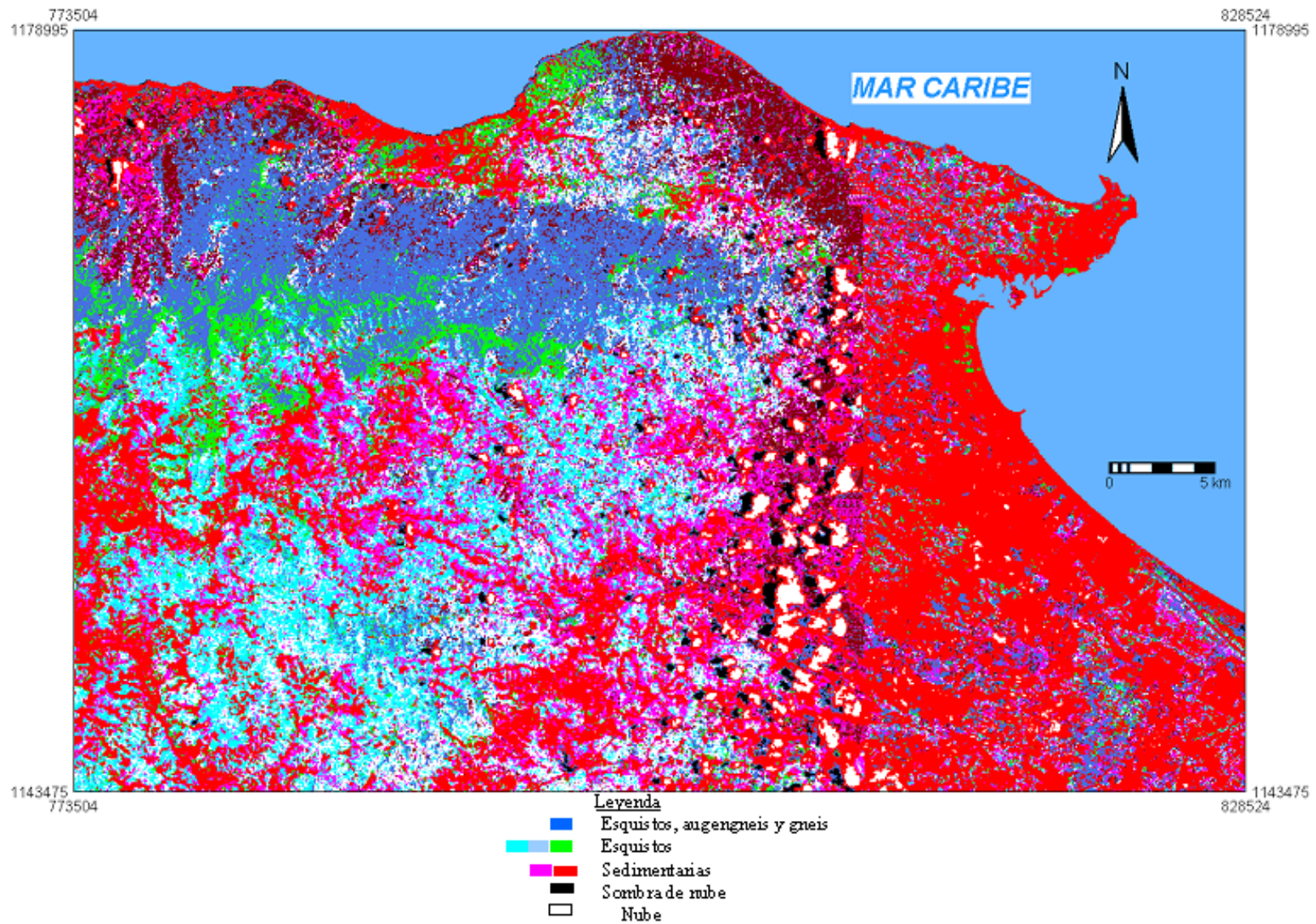
presente en estos aluviones. De esta misma forma se comportan la mayoría de las rocas sedimentarias mostrando números digitales entre 70 y 100.

Adicionado a esto, es importante señalar que al igual que la clasificación supervisada, también se hizo una clasificación por seis clases (Figura 42).

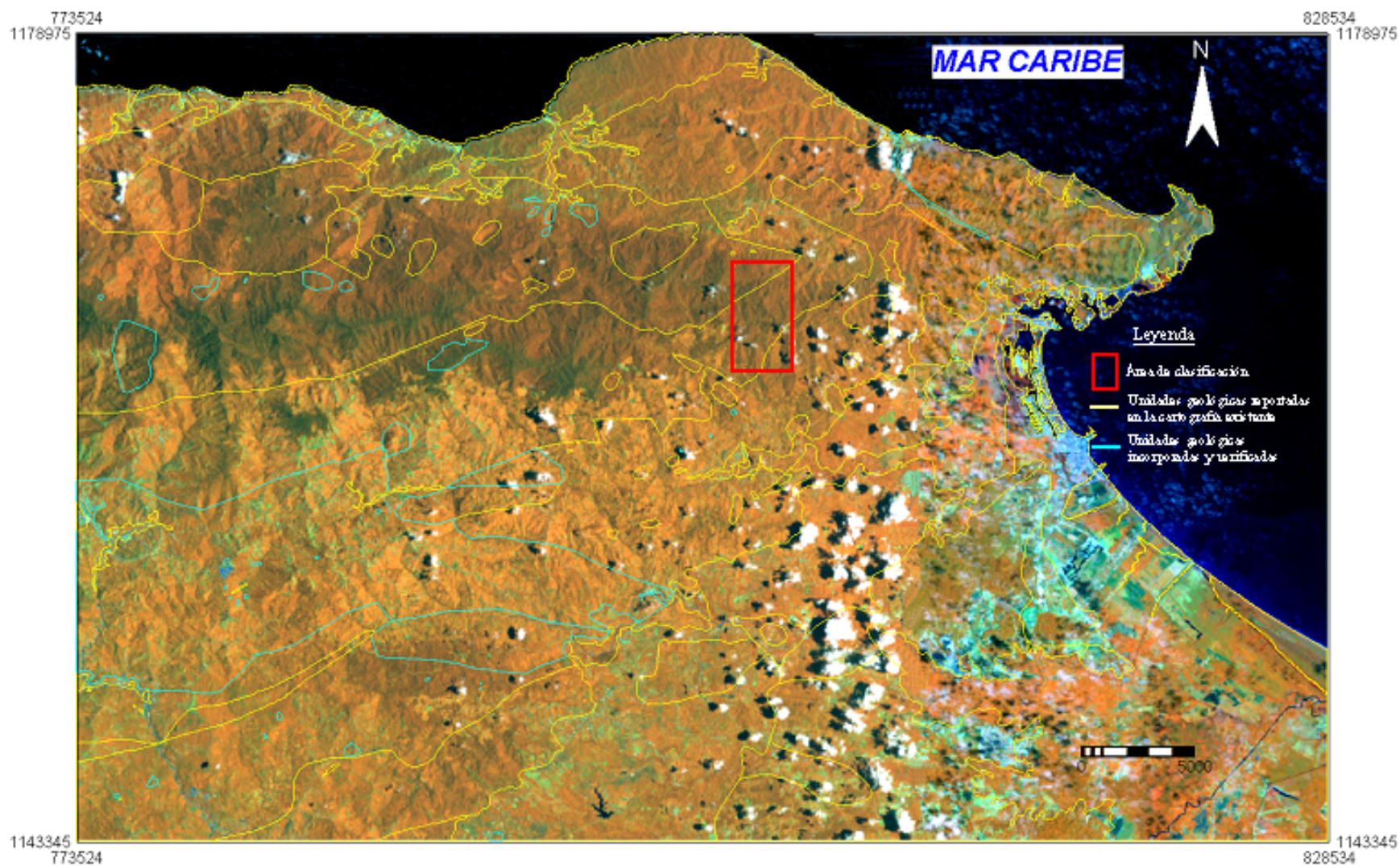
Esta clasificación también se comportó como la clasificación no supervisada de seis clases. El grupo rojo está asociado principalmente a las unidades sedimentarias e intervención; el grupo azul está asociado principalmente con la Asociación Metamórfica Ávila, al igual que con la Filita de Murugurata (Tm) y con algunas unidades que poseen carbonatos; el grupo de colores cian y blanco, están asociados a la Asociación Metamórfica Caracas y Napas de la Serranía del Litoral.

No obstante, para probar el empleo de las imágenes satelitales en la determinación de unidades geológicas, se tomó un sector al noroeste del área de estudio, sin intervención humana aparente (recuadro rojo en la Figura 43). Esta clasificación ha resultado muy favorable, diferenciando los Esquistos de San Julián (Asj), Las Brisas (CaB) y Las Mercedes (CaM) (Figura 44) y representa una oportunidad formidable para la utilización de los sensores remotos para el trabajo de cartografía geológica, incluso en áreas tropicales, que a simple vista parece complejo. Este resultado abre una línea de investigación para la cartografía geológica en espacios de difícil acceso, para así mejorar el conocimiento de las ciencias geológicas y recursos en los mismos.

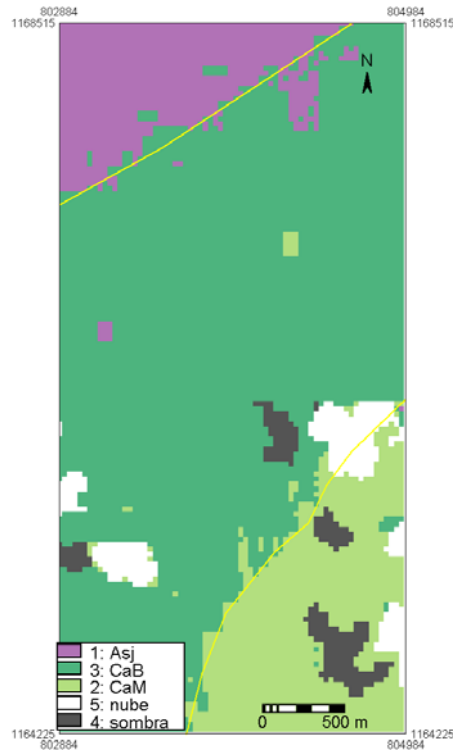
Como se mencionó anteriormente, en principio se seleccionó un área que presenta poca intervención humana para evitar los sesgos estadísticos con respecto a las respuestas espectrales que muestra la superficie terrestre al estar descubierta y modificada por actividades humanas; es decir, que estuviese cubierta por una cobertura vegetal, que aunque representaba un obstáculo por ser principalmente boscosa, esta muestra diferencias espectrales que son derivadas de los diferentes niveles de desarrollo de esa cubierta vegetal, por la presencia de distintas unidades geológicas y lineaciones; finalmente, porque afloran tres unidades geológicas disímiles con distintas composiciones químicas y cuyos contactos podían visualizarse perfectamente en el ajuste visual de la cartografía geológica a partir del procesamiento digital de las imágenes satelitales.



**Figura 42. Clasificación supervisada basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subet y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**



**Figura 43. Localización para efectuar la clasificación supervisada de tres clases basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat 003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**



**Figura 44. Clasificación supervisada de tres clases, basada en composición falso color de bandas 4-5-3 a partir de subset y mosaico de imágenes Landsat003/053 y 004/053 ETM+. Fecha de adquisición 18/10/2002**

### **6.3.-Geología producto de la integración de técnicas SIG y TE. Síntesis de los resultados**

En primer lugar el mapa resultante de tipos de rocas y estructuras geológicas basadas en técnicas SIG-TE (Mapa. 1) arrojó como resultado las clases incluidas en la tabla 4 y superó todas las expectativas posibles, reduciendo la incertidumbre existente en el área de estudio. Las relaciones se plantearon con coeficientes de Cramer altos (0,92 vegetación, 0,8 rugosidad, 0,89 disección, 0,815 pendientes). En este sentido, se han ajustado los contactos entre las unidades con respecto a las deformaciones topográficas de la superficie terrestre y se ha detallado el análisis de la geología de superficie, diferenciando unidades geológicas en el área de estudio (Figuras 45 al 48 y Mapa 1).

En las figuras 45, 46, y mapa 1, se muestra un sector ejemplo de la diferenciación elaborada en esta investigación. Se identificaron y diferenciaron internamente entre sus contactos, las unidades geológicas Esquisto de Las Brisas CAB, con la aparición del Mármol de Zenda CABz, (norte de la figura 45 y 46), corroborado no solo por la apariencia del MDIS, sino por todos los indicadores

morfométricos, geobotánicos y espectrales presentados. Adicionalmente, se diferenció la unidad geológica Esquisto de las Mercedes CaM - Esquisto grafitoso y mármol del CAMp - Esquisto cuarzo muscovítico carbonático grafitoso (centro de la figura 45), identificando además otros cuerpos de mármoles por la presencia de una mayor complejidad topográfica mostrada por el MDIS, el análisis de textura y la diferenciación espectral (Tabla 4). También, se pueden observar los ajustes hechos a la unidad CAC la cual de acuerdo a los indicadores y el análisis de la información geológica fue diferenciada de la unidad geológica CACm por presentar una superficie menos rugosa, es decir, una unidad de mayor competencia y resistencia a los procesos erosivos y de meteorización. Asimismo, se diferenció la unidad geológica TM, la cual aflora puntualmente cortando las rocas sedimentarias terciarias de la planicie de Barlovento. Finalmente, se visualiza el ajuste a las rocas sedimentarias expresadas por los aluviones localizados en los fondos de valle del área de estudio.

La aplicación de técnicas SIG para la determinación de estructuras geológicas resultó útil desde todo punto de vista, se puede notar en la Figura 27 que las fallas con color cian o azul celeste son las nuevas reconocidas a partir de la interpretación del modelo (alrededor de 415 nuevas estructuras), sustentadas a partir del reconocimiento de evidencias geomórficas clave como facetas triangulares, lomos de obturación, ríos desplazados, lomos lineales, ensilladuras de fallas, estructuras en cola de caballo y depresiones tectónicas en forma de micrograben. Por el contrario, el resto de las estructuras geológicas estaban registradas en la literatura y en los mapas geológicos existentes (298). En total se registraron 713 lineaciones, siendo el 58,2 % correspondiente a nuevos hallazgos y una longitud total de 1.298 km (Mapa 1). Asimismo, permitió la mejora de los contactos entre unidades geológicas (Figuras 14 al 21, 45 al 48 y Mapa 1), incluyendo una mayor diferenciación en la unidad Esquisto de las Mercedes - Esquisto cuarzo plagioclásico grafitoso (CaMp) y el Esquisto de Chuspita-Esquisto cuarzo grafitoso micáceo (CaCm), Oeste y Sur del área de estudio, respectivamente (Mapas 1 y 2).

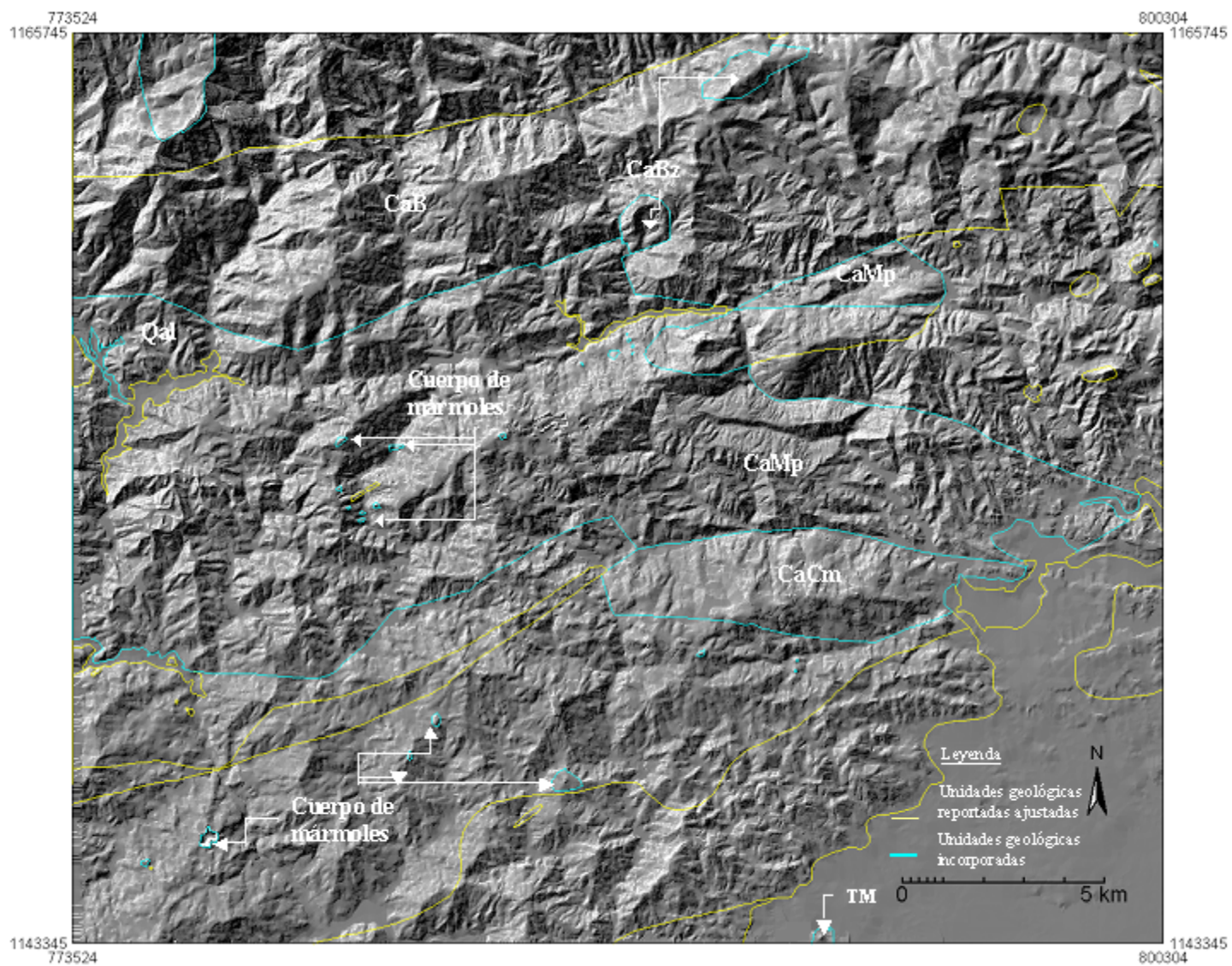
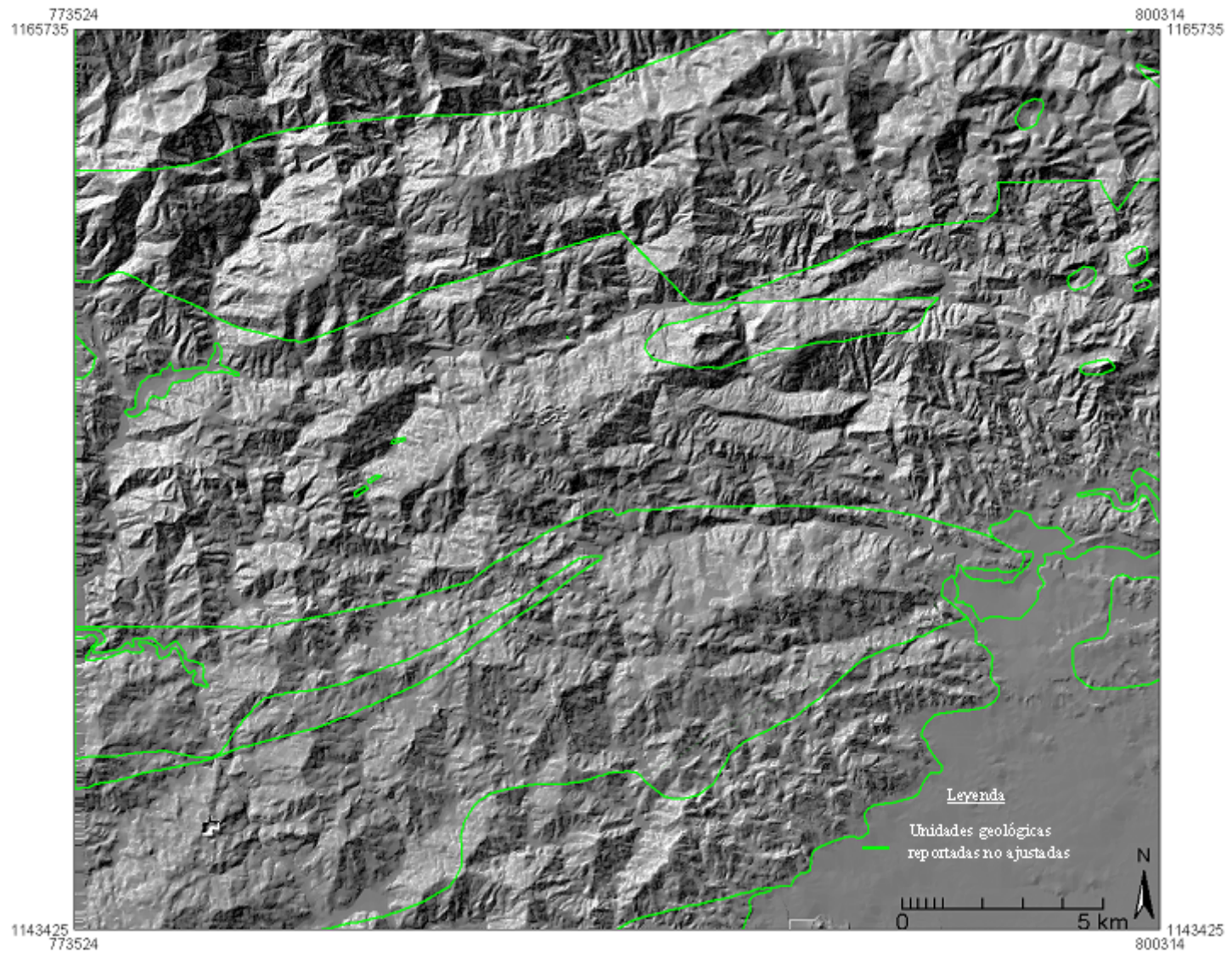
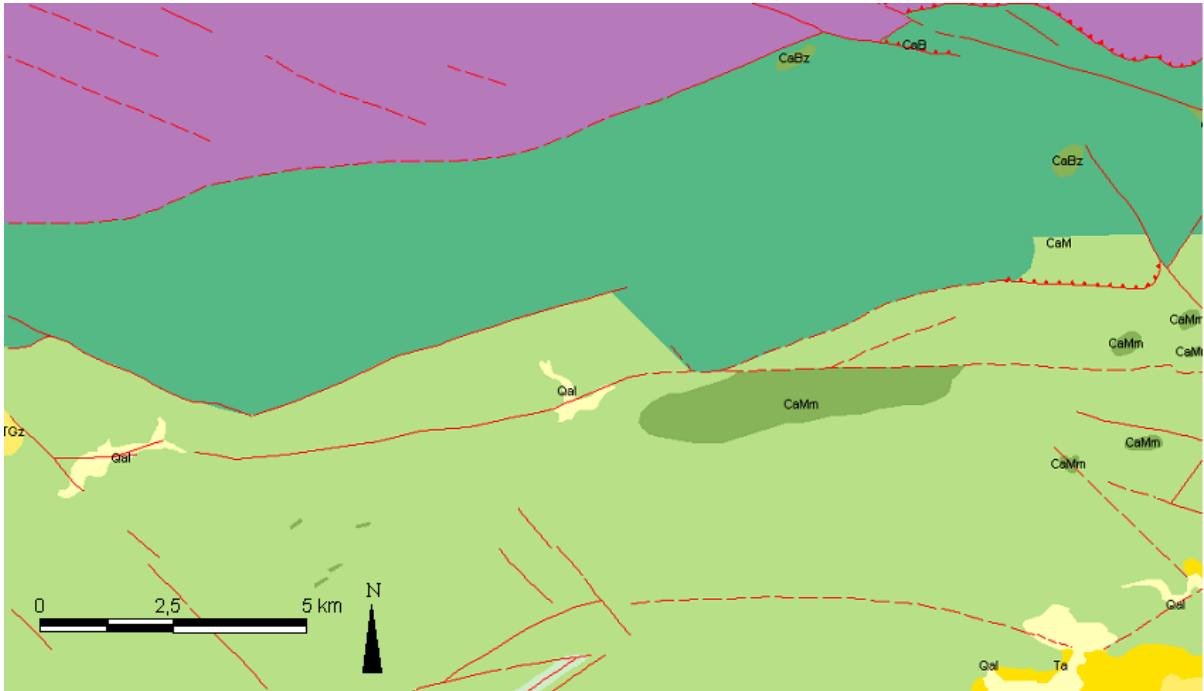


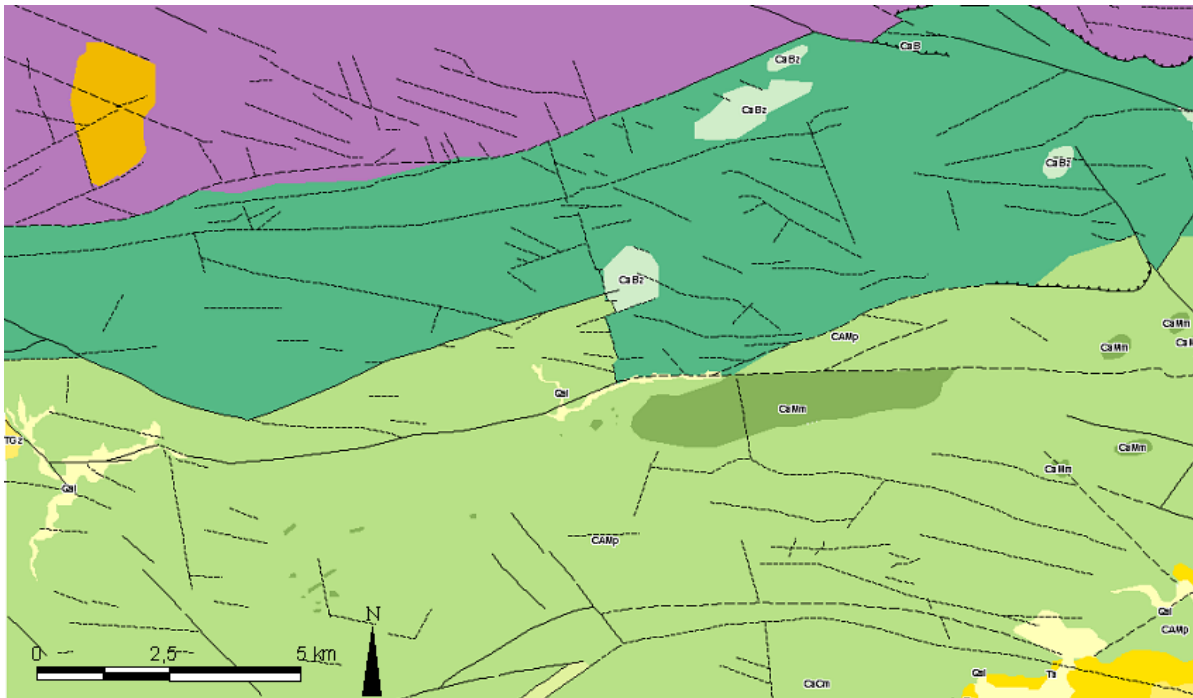
Figura 45. Ejemplo de ajuste y aumento de detalle de la cartografía geológica de superficie



**Figura 46. Cartografía geológica de superficie existente**



**Figura 47. Cartografía geológica de superficie existente**



**Figura 48. Cartografía geológica de superficie ajustada**

Por otro lado las técnicas de extracción de información a partir de imágenes de percepción remota también resultaron exitosas, sobre todo la interpretación visual, con la cual se corroboraron las lineaciones y unidades geológicas, utilizando la composición y análisis de bandas por separado 4-5-3, utilizando textura, color y reflectancia espectral (Figuras 33 al 37).

En relación a las clasificaciones no supervisada y supervisada (Figuras 38 al 40 y 43), estas resultaron buenas para el análisis global de unidades y radiométrico y la definición de sitios posibles de revisión de campo. Es importante dejar claro que los resultados de estas clasificaciones son indicadores y no muestran límites confiables de unidades. Esto se reflejó en la confusión de relaciones entre variables/cluster/clase, por tres razones fundamentales: a) la presencia de rocas y minerales similares en distintas unidades geológicas, en este caso de los esquistos en el Complejo San Julián, de las Mercedes y las Brisas, constituyeron un elemento de homogeneidad tanto de las unidades geológicas como espectralmente, a pesar de la diversidad de litotipos (Figura 42). Esto trajo como consecuencia una confusión y uniformidad del resultado de las clasificaciones, con énfasis en la supervisada; b) a la homogeneidad de las respuestas geobotánicas de los bosques, las cuales se mantienen altas para la mayoría de las unidades estratigráficas metamórficas, y de los herbazales, matorrales y espinares para la mayoría de las sedimentarias y c) por la desviación espectral que se presenta por la existencia de áreas intervenidas que no permitió en los sectores del sur una interpretación más detallada, ya que éstas se comportan como atractores importantes para las agrupaciones espectrales planteadas. Sin embargo, el resultado ha sido fructífero aplicando una clasificación no supervisada a partir de análisis cluster, en la que se hallaron las mejores relaciones; además sin despreciar la clasificación supervisada, esta mostró respuestas interesantes a nivel de grupos de rocas: Asociación Metamórfica Ávila, Asociación Metasedimentaria Caracas y su diferenciación con algunas unidades de las Napas de la Serranía del Interior y sedimentarias en la Planicie de Barlovento. En términos generales, la clasificación supervisada presenta una correspondencia según el coeficiente de Cramer de 0,53 (53%) y la no supervisada de 0,73 (73%).

Por lo explicado, las clasificaciones visuales para el campo de las ciencias geológicas todavía poseen su importancia como se muestra en las Figuras 33 al 37, siendo mejores para el ajuste de unidades geológicas y estructurales.

Desde este punto de vista, se cumplieron los objetivos planteados, se diseñaron las técnicas SIG y TE que podían ser empleadas para el análisis de la información de geología de superficie, y se hicieron las comparaciones a través de los coeficientes de Cramer entre los resultados para corroborar las relaciones entre las variables y las unidades geológicas en su análisis, mejorando la confianza en el mapa de geología de superficie para el área de estudio planteada. Las técnicas basadas en TE, en todo momento, fueron complementarias y son importantes para la generación y ajuste del modelo, con la aplicación de la clasificación no supervisada y la interpretación visual, aunque se obtuvo un nivel de efectividad moderado con respecto al modelo final.

## **7.- SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Las técnicas SIG y TE tienen una importante utilidad para el ajuste e interpretación de unidades geológicas y estructuras, utilizando las herramientas MDE y MIDIS; asimismo, proporcionan importantes ventajas con la aplicación de algoritmos para la determinación de disección como el análisis de flujo hidrológico y la rugosidad del terreno con la dimensión fractal. Además, se pudieron obtener de forma automática las pendientes a partir del MDE y se pudieron hacer las interacciones necesarias para conocer las relaciones espaciales entre las variables incluidas por el modelo propuesto y las unidades geológicas y estructuras geológicas de la data existente.

Por otro lado las técnicas de TE, si bien lucen como una excelente herramienta para la determinación de cubiertas terrestres, resultaron ser poco efectivas para la diferenciación de las unidades geológicas y estructuras de forma automatizada y semiautomatizada, ya que la cubierta vegetal aunque respondió excelentemente ante los tipos de rocas, genera confusión por la poca variabilidad en términos de clases y su relación con respecto a varios tipos de roca, lo que hace complicado la utilización del sensor Landsat para definir tipos de rocas con una clasificación supervisada.

A nivel de clases, existió una confusión importante entre algunas rocas metamórficas, por el tipo de rocas y minerales coincidentes en cada una de las unidades geológicas analizadas, además que son rocas típicas con presencia de bosques en el área de estudio. La separabilidad y resolución

radiométrica y espectral de este tipo de imágenes hicieron que el modelo de TE fuese efectivo en un 63%, promediando los índices de Cramer o correspondencia entre las dos clasificaciones. La existencia de áreas intervenidas, los retrocesos en la sucesión vegetal, el mar y las arenas poco diferenciadas de áreas intervenidas hace que la separabilidad entre las clases de rocas sea compleja aunque se hayan seleccionado campos de entrenamiento con puntos de control según las muestras de roca sobre el terreno. Sin embargo, las clasificaciones no supervisadas y la interpretación visual surgieron como una alternativa que también presenta el reto de algunos ajustes, pero resultaron ser mejores con coincidencias entre 71 y 80% con respecto a los tipos de rocas, aún cuando también la clasificación no supervisada presentó confusión entre clases y su correspondencia única con respecto a un tipo de roca en los límites.

La opción más viable para las técnicas de TE en regiones tropicales fue la interpretación visual tanto de las imágenes de radar y Landsat, en la cual se tiene mayor control de la situación, ya que las texturas y contrastes se utilizaron para validar la información existente.

Las imágenes digitales procesadas de los sensores remotos de plataforma espacial, son efectivas dependiendo de la resolución espacial y espectral, por lo tanto se evidencia dificultades en el empleo del sensor Landsat para estudios muy detallados, adicionado a la inexistencia de muestras representativas en el sur del área de estudio. Además que la clasificación supervisada es fallida porque no se observan con claridad espectral las características de las unidades geológicas, ya que el área al suroeste presenta un amplio proceso antrópico, que enmascara los procesos. Esto obliga orientar mayores esfuerzos para realizar mayores investigaciones en estas regiones aplicando sensores de mejor resolución y poder construir bibliotecas espectrales de tipos de rocas que contribuyan a conocer mejor la geología de un área y poder aplicar estas herramientas con mayor incidencia en las geociencias.

Si se utilizaran imágenes hiperespectrales, es decir, imágenes con una mayor variabilidad y precisión de las distintas porciones del espectro radiométrico, se podrían realizar perfiles radiométricos y construirse una librería espectral de rocas, partiendo de la información de radar e imágenes satelitales (estratigrafía espectral). Este tipo de aplicaciones constituyen un verdadero reto para futuras investigaciones.

En términos globales, los SIG y la TE constituyen herramientas que deberían utilizarse más ampliamente en las geociencias. La posibilidad de implementar una serie de algoritmos automatizados y semiautomatizados para la extracción de información geológica a partir de imágenes satelitales e información topográfica; y la posibilidad de aplicar estadística multivariada y correlaciones espaciales para poder hallar las relaciones entre las distintas variables consideradas en el modelo; entre otras ventajas, reflejan lo importante de utilizar este conjunto de tecnologías en los estudios de las ciencias geológicas.

Asimismo, conviene realizar el chequeo respectivo de campo, en función de validar la información interpretada y reflejada en el mapa geológico sobre todo en el suroeste del área de estudio. Esta recomendación es válida tanto para las unidades geológicas con muestras petrológicas, como para las lineaciones en función de comprobar si efectivamente son fallas y de que tipo son.

En este sentido, se comprobaría la interpretación de la metatonalita de Caruao (Cto) que aflora en el noroeste del área de estudio cortando la unidad Complejo de San Julian (Asj) (Figura 48).

Lógicamente, se abre la posibilidad por una parte de hacer nuevas investigaciones en relación a la arquitectura estructural, fases de deformación y actividad tectónica en la Cordillera de la Costa y por otra parte, empezar a plantearse la toma de muestras radiométricas en el área de estudio para tener un registro con menor incertidumbre de las respuestas que pueden tener las rocas del área de estudio con respecto a la interacción de la energía electromagnética y completar una base de datos que permita conocer más sobre el conjunto de unidades geológicas de la Cordillera de la Costa.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABDULLAH I & MAT AKHIR. J. 1997. The Correlation of the Landsat Tm Images Characteristic with Geological Information. A Preliminary Result of A Case Study in Langkawi Island, Malaysia. *Revista Gisdevelopment*. GEO 8 (7): 108-125. Disponible: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ts10/ts10005.shtml> [Consulta : 2004, Enero 25]
- AKHIR M & I. ABDULLAH. 1997. Geological Applications of Landsat Tm: Mapping and Análisis of Lineaments in NW Peninsula Malaysia. *Revista Gisdevelopment*. GEO 7 (2): 15-45. Disponible: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ts10/ts10001.shtml> [Consulta : 2004, Enero 25]
- AUDEMARD F.A., MACHETTE M.N., COX, J.W., DART, R.L. & HALLER, K.M., 2000. Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions., *U.S. Geological Survey*, Open File Report # 00-018.
- AUDEMARD, F. & F.A. AUDEMARD. 2002. Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* 345: 299– 327
- AVÉ LALLEMANT H.G. 1997. Transpression, displacement partitioning, and exhumation in the Caribbean/South American plate boundary zone. *Tectonics* 16: 272-289.
- BAQUERO C. R., VINCENT. & N. LEVINE. 2001. Geological Controls on Vegetation Reflectance: An Example From Middle Magdalena Basin, Colombia. en Applications and New Opportunities in Geologic Remote Sensing. *GSA. Annual Meeting*, November 5-8, 2001. Disponible: [http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract\\_25951.htm](http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract_25951.htm) [Consulta : 2004, Enero 25]
- BOSQUE. J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Ediciones RIALP, Madrid, España. 451 p.
- BRAGA. 2000. *The Arizona University Remote Sensing Tutorial*. Disponible: <http://aria.arizona.edu/courses/tutorials/geom/html/geometric.html> [Consulta : 2004, Febrero 2]
- BURROUGHS P.A. 1988. *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assesment*. Claredon Press Oxford. 132 p.
- CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. 2000. *Fundamentals of Remote Sensing tutorial*. Disponible: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/indexe.html> [Consulta : 1999, Noviembre 25]
- CHUVIECO E. 1999. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Editorial RIALP, España (3ª Edición Revisada). 452 p.
- COMITÉ INTERFILIAL DE ESTRATIGRAFÍA Y NOMENCLATURA (CIEN). *Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela*. Disponible en: <http://www.pdv.com/lexico/> [Consulta : 2004, Julio 20]
- CLARKS LABS. 2002. *Manual de Usuario de Idrisi 32 Bits*. Clarks University Edition.
- DANISHWAR. M. 2001. Interpretation of Aster Remote Sensing Data on Northwest Kohistan Terrane, Pakistani Himalayas, en Applications and New Opportunities in Geologic Remote Sensing. *GSA. Annual Meeting*, November 5-8, 2001. Disponible: [http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract\\_24146.htm](http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract_24146.htm) [Consulta : 1999, Febrero 15]
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH SYSTEMS (ESRI). 2003. *Manual de ARCGIS Software*, ESRI Editions, USA. 152 p.
- INTERNATIONAL COMMISSION STRATIGRAPHY (ICS). 1976. *International Stratigraphic Guide*. International Union of Geological Sciences (IUGS).

- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR AEROSPACE SURVEY AND EARTH SCIENCES (ITC), 1997. *ILWIS 2.1 User's Guide*. ILWIS Department. Enschede, The Netherlands. 432 p.
- FELICÍSIMO. M. 1994. *Modelos digitales del terreno*. Publicación especial Universidad Nacional de Oviendo.
- GUEVARA H. 1977. *La percepción remota: Una metodología para la interpretación de imágenes LANDSAT, área de estudio: Zona nor-occidental del estado Falcón*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Humanidades y Educación, Escuela de Geografía, Caracas.
- HATCHER R. 1995. *Structural Geology: Principles Concepts and Problems*. Segunda edición, Prentice-Hall.
- HEFFERAN K., K RICE., H ADMOU. & M. FALKOWSKI. 2001. Remote Sensing Research in The Anti-Atlas Mountains, Morocco. Applications and New Opportunities in Geologic Remote Sensing. GSA. Annual Meeting, November 5-8, 2001. Disponible: [http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract\\_27788.htm](http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract_27788.htm) [Consulta : 2004, Marzo 12]
- LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Son, Inc., 750 p.
- LOMBARDO F. & M ROJAS. 2000. *Aplicaciones de imágenes Radarsat en los estudios geomorfológicos, caso de estudio: Cuenca del Río Bocono-Masparro*. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- PINILLA C. 1995. *Elementos de teledetección*. Ra-ma. Madrid. p 54-74.
- REN D., & M ABDELSALAM. 2001. Examples From The Neoproterozoic Allaqi Suture, Egypt. En Applications and New Opportunities in Geologic Remote Sensing GSA. Annual Meeting, November 5-8, 2001. Disponible: [http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract\\_25931.htm](http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/abstract_25931.htm) [Consulta : 1999, Febrero 15]
- RICHARDS J. 1993. *Remote Sensing Digital: Image Analysis - An Introduction*. Segunda edición. Berlin: Springer-Verlag, 334 p.
- RIMAL L., A DUVADI & MANANDHAR S. 2002. Landsat-TM Images in Geological Mapping of Surnaya Gad Area, Dadeldhura District West Nepal. *Revista Gisdevelopment*. GEO. Vol, (8). Paper 65. 998-1036. Disponible: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/geo/065> [Consulta : 1999, Febrero 15]
- SABINS F. 1996. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, Freeman and Company, New York. 1524 p.
- SILVA J., SÁNCHEZ R. & F. URBANI. 1986 *Cartografía geológica del área de Oritapo-Cabo Codera-Capaya, D.F. y Estado Miranda*. Bol. Geociencias, UCV, Caracas, (9): 1-2, incluye 10 mapas geológicos a escala 1:25.000.
- ESPÍNOLA E. & R. OLLARVES. 2002. *Estudio tectono-estratigráfico del borde septentrional de la Cuenca de Barlovento, Estado Miranda: Implicaciones neotectónicas*. Universidad Central de Venezuela. Dpto. de Geología. Trabajo especial de grado. Inédito. 244 p.
- TOUTIN TH. 1995. *Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods*. International Journal of Remote Sensing, 16: 2795-2811.
- UNIVERSITY OF CAPE TOWN-(UCT). 2000. Remote Sensing Tutorial. Disponible: <http://www.csag.uct.ac.za/Tutorials-FAQs/remote-sensing/Front/tofc.html> [Consulta : 1999, Febrero 22]

- URBANI, F. & A. QUESADA. 1972. Migmatitas y rocas asociadas del área de La Sabana, Cordillera de la Costa. *Mem. IV Congreso Geológico Venezolano, Bol. Geol., Public. Esp.* 5 (IV): 2375-2400.
- , J. SILVA, R. SÁNCHEZ, M. MARQUINA & A. CHIRINOS. 1987a. Cartografía geológica del área de La Sabana - Guatopo, D.F. y edos. Miranda y Guárico. *Bol. Geociencias UCV, Caracas*, (11), 8 mapas 1:50.000.
- , 1987b. Cartografía geológica de las hojas de Higuerote y Caucagua, D.F. y edos. Miranda y Guárico. *Bol. Geociencias (UCV, Caracas)*, (12), 2 mapas 1:100.000.
- & OSTOS, M. 1989. El Complejo Avila, Cordillera de La Costa, Venezuela. *Geos, UCV, Caracas*, (29):205-217.
- , RODRÍGUEZ J.A., BARBOSA L., RODRÍGUEZ S., MELO L., CANO L., & VIVAS V. 2000. Geología del estado Vargas, Venezuela. *Simposio Internacional: Los Aludes Torrenciales de Venezuela de Diciembre de 1999*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Caracas.
- , 2002. Nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Bol. Geociencias, UCV, Caracas*, (35).
- , 2004. *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa*. Funvisis-UCV.
- ZHANG, E. 2002. Applications of remote sensing in geological mapping. The black mountain, Nye County, Nevada as an example. *Journal of photogrammetric engineering and remote sensing* 55 (8): 1137-1145.

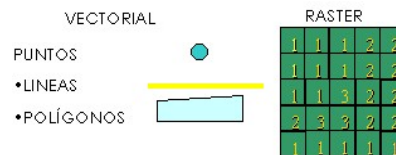
## ANEXO 1. ASPECTOS TEÓRICOS COMPLEMENTARIOS

### Aspectos complementarios relacionados con SIG

- **Tipos de estructura**

Los tipos de estructuras de datos dependen de la capacidad de análisis y de las operaciones matemáticas y estadísticas que pueden ser implementadas para cada una de ellas. Estas se dividen en dos tipos, (Figura 49):

- **RÁSTER:** Constituye una agrupación de celdas, cada una de ellas posee coordenadas terrestres y atributos asociados por una base de datos. Los algoritmos de análisis espacial están soportados por álgebra matricial.
- **VECTOR:** Como su nombre lo indica corresponde con vectores representados por: puntos, líneas y polígonos; asociados con una base de datos. Los algoritmos de análisis espacial están soportados por álgebra vectorial



**Figura 49. Estructura de datos y entidades SIG**

- **Entrada de datos.**

Existen varias modalidades, sin embargo se pueden agrupar en 3 tipos como lo son:

- Digitalización de mapas o documentos a través de mesas digitalizadoras y escáner
- A través de Bases de datos. (incluye todo tipo de fuente de información) GPS (Global Positioning System) ó Sistemas de Posicionamiento Global
- Sensores Remotos (multi e hiperespectrales, radar, fotografías aéreas)

### Aspectos complementarios relacionados con TE

#### Los sensores remotos de plataforma espacial

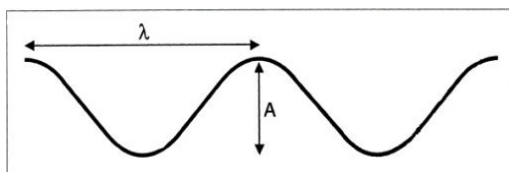
- **Concepto y funcionamiento del sistema sensor**

Un sensor remoto es un “...instrumento que detecta energía y la convierte en una señal susceptible de ser aprovechada para el estudio de la cobertura terrestre” (CHUVIECO, 1999). Esta energía corresponde con la interacción energética entre la superficie terrestre y el sensor, ya sea a causa de la reflexión de la energía solar o por la utilización de una fuente artificial, (PUJADAS, 2003).

Esta energía registrada proviene de los objetos de la superficie terrestre, los cuales según sus propiedades físico-químicas y de la longitud de onda de la radiación electromagnética a la cual estuvieron expuestos emiten una respuesta particular, (LOMBARDO & ROJAS, 2000).

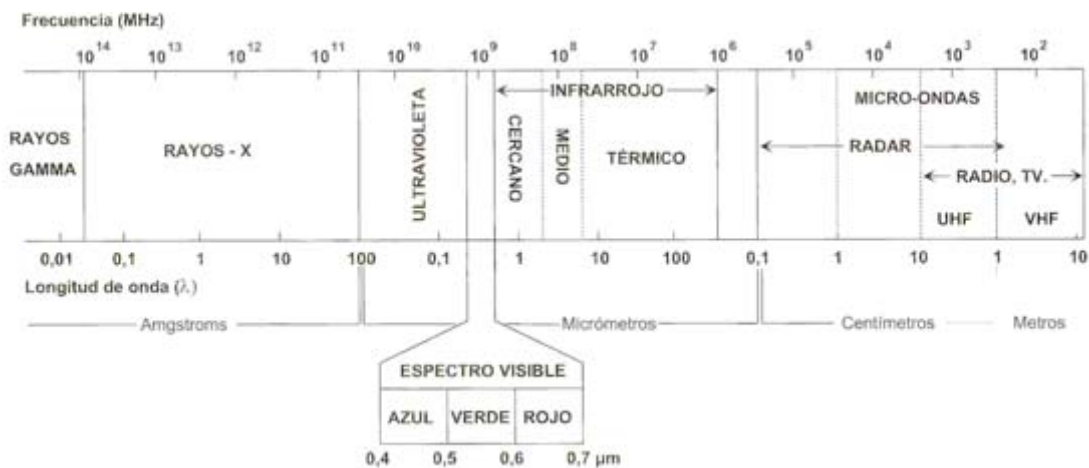
- **La radiación electromagnética**

La radiación electromagnética es una forma de energía transmitida a través del espacio en forma de ondas eléctricas y magnéticas (Figura 50), que se caracterizan por una fase constante sobre un plano perpendicular y en la dirección en la cual la onda esta viajando. Las ondas planas pueden ser descritas en términos de longitud ( $\lambda$ ) y frecuencia ( $A$ ), (PUJADAS, 2003).



**Figura 50. Longitud de onda y frecuencia**  
(PUJADAS 2003)

Por otra parte es importante mencionar que el flujo energético de radiación electromagnética se compone de campos eléctricos y magnéticos que se desplazan en el espacio a la velocidad de la luz; esta radiación ha sido clasificada en un modelo continuo denominado Espectro Electromagnético según su longitud de onda y su frecuencia, (Figura 51) (LOMBARDO & ROJAS, 2000).



**Figura 51. Espectro electromagnético**  
(CHUVIECO 1999)

Este es sido dividido en varias regiones, las cuales permiten conocer el tipo de información que el sensor está en capacidad de registrar. Las “regiones espectrales” más

utilizadas en la Teledetección Espacial se presentan a continuación:

- Espectro visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ): es la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano.
- Infrarrojo cercano (NIR) (0,7 a 1,5  $\mu\text{m}$ ): llamada también infrarrojo fotográfico, ya que puede ser captada a partir de films con emulsiones especiales.
- Infrarrojo de onda corta (SWIR) (1,5 a 2,5  $\mu\text{m}$ ).
- Infrarrojo medio (MIR) (2,5 a 8  $\mu\text{m}$ ): se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico (TIR) (8 a 14  $\mu\text{m}$ ): incluye la porción irradiada del espectro. Energía emitida por la tierra en forma de calor.
- Microondas (MW) (> 1mm): este tipo de energía se comporta transparente a la cubierta de nubes, y es la longitud de onda a la cual trabaja el radar.

Otras regiones como las de rayos Gamma, rayos X y ultravioleta no son utilizadas en la teledetección ya que la atmósfera absorbe mucha energía en estas regiones y por ello se conocen como bandas de absorción atmosférica. Los intervalos espectrales en los que no hay absorción y por lo tanto presentan alta transmisión de ondas electromagnéticas se conocen como ventanas atmosféricas y coinciden con las bandas espectrales más utilizadas en el proceso de teledetección, (CLARKS, 1999).

La radiación es captada por el sensor y se descompone en las diferentes regiones espectrales según la emitida por objetos en un espacio determinado y es convertida en información numérica discreta representada en unidades conocidas como píxeles, es decir, los que contienen la información radiométrica de los objetos en un espacio determinado. (ITC, 1997), (LOMBARDO & ROJAS, 2000). Sin embargo, es importante dejar en claro que los objetos pueden ser discriminados dependiendo de la capacidad y resolución radiométrica del sensor, esta capacidad esta definida por la porción y amplitud del espectro electromagnético que es detectado por los mismos, y es denominada “ancho espectral o banda espectral”, (CLARKS, 1999).

Para captar los objetos terrestres y de acuerdo a la región del espectro electromagnético, existen varios tipos de sensores.

- **Tipos de sensores remotos**

Los sensores remotos se clasifican en dos grupos, según la fuente emisora de la energía:

- a) Sensores pasivos
- b) Sensores activos

a) Los sensores pasivos son aquellos que perciben la energía procedente de la superficie terrestre, bien sea causada por la reflexión o bien por la emisión de la misma. Existen dos tipos de sensores pasivos: Los fotográficos y los sensores óptico-electrónicos (PINILLA, 2000).

b) Por otro lado los sensores activos son aquellos que emiten su propia energía, es decir, emiten pulsos de energía electromagnética y mide la radiación reflejada por la superficie a estudiar (PINILLA, 2000).

- **Características de las imágenes**

Una imagen representa un área bidimensional compuesta por píxeles ordenados en filas y columnas y registran tanto las coordenadas terrestres como el valor de energía radiante de la superficie terrestre, (ITC, 1997). Este valor está comprendido en 256 (0 a 255) niveles de grises o  $2^8$  para una imagen de 8 bits, (RICHARDS, 1995); la base viene expresada por la reflectancia bidireccional y la potencial por el número de bits o niveles de información disponible, el resultado es el número de niveles digitales (ND) o información que puede estar contenida en una imagen de satélite.

El tipo de información registrada en las imágenes y su nivel de detalle depende de las características del sensor del cual provienen y son parámetros importantes para su correcta utilización y óptimo aprovechamiento, (LOMBARDO & ROJAS, 2000).

- **Resoluciones**

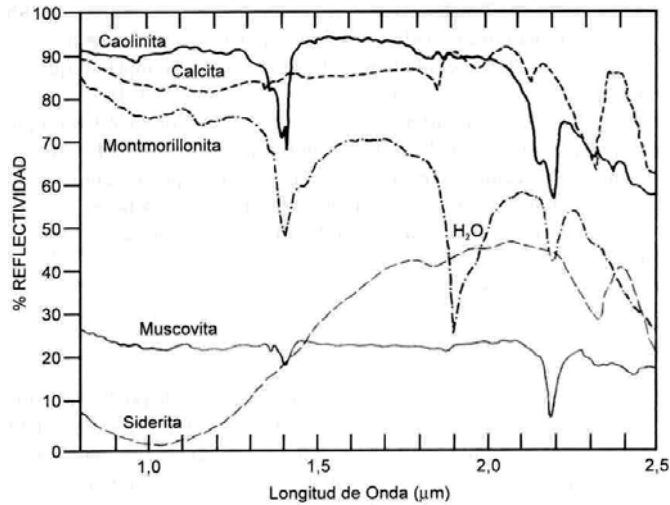
La resolución se entiende como la capacidad del sensor de captar información, es decir, el nivel de detalle de la información que puede ser captada por el sensor, siendo una de las características más importantes de las imágenes satelitales, en términos de la información que puede ser extraída y su utilidad para fines específicos, (LILLESAND & KIEFER, 1992, LOMBARDO & ROJAS, 2000). Por esta razón deben ser considerados cuatro tipos de resoluciones para la selección de la imagen, dependientes del tipo de sensor, según la aplicación a desarrollar.

Seguidamente se describen cada una de las resoluciones:

1. Resolución espacial: se refiere a la mínima unidad de superficie que puede ser captada y representada por el (PUJADAS, 2003). Es un elemento muy importante a considerar en términos de la escala de trabajo del proyecto a desarrollar.
2. Resolución espectral: Esta determinada por el número y amplitud de bandas o canales que registra el mismo, (CHUVIECO, 1999). La importancia de esta resolución radica en el mayor poder de discriminación de los distintos atributos terrestres a medida que se cubre con mas bandas de mayor detalle el espectro electromagnético, (LOMBARDO & ROJAS 2000).
3. Resolución radiométrica: Es la capacidad que tiene el sensor de detectar variaciones en el espectro y corresponde con el número de niveles digitales que pueda registrar cada píxel y estos dependen del número de bits que puede captar el sensor.
4. Resolución temporal: es la frecuencia de adquisición de datos que ofrecen los sensores (PUJADAS 2003); este tipo de resolución también depende de sus características orbitales.

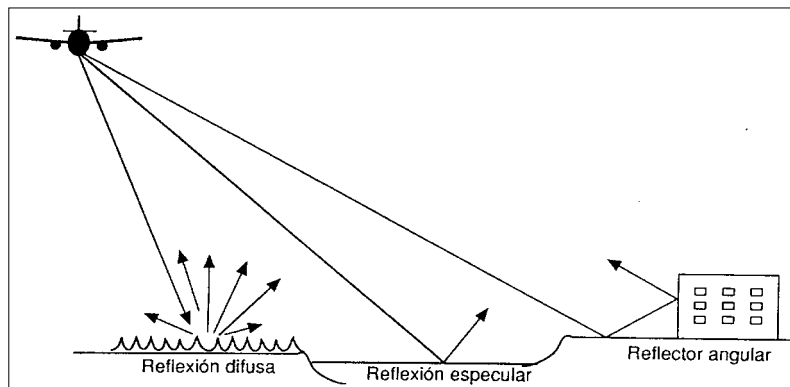
- **Firma espectral**

Como se mencionó anteriormente la información que presentan las imágenes de satélite está en función de la región espectral captada y de la respuesta radiométrica de los objetos en cada región del espectro, entonces la firma espectral es la expresión radiométrica y visual típica de un objeto en una imagen (CHUVIECO, 1999). En función de lograr un conocimiento acerca de estas respuestas, se han realizado mediciones en laboratorio para determinar aquellas regiones en la que la respuesta es mayor para cada elemento (CLARKS, 1999). El resultado de estas mediciones experimentales han sido las llamadas Firmas Espectrales Teóricas, las cuales está registradas en las denominadas librerías espectrales (USGS, 1999), y constituyen una importante información de partida para la selección de las bandas espectrales, y por consiguiente del sensor, en las cuales se destaca el elemento o elementos a analizar (Figura 52).



**Figura 52. Firmas espectrales**  
(Tomado de CHUVIECO 1999)

Las firmas espectrales guardan relación con el comportamiento de la superficie terrestre como emisora y reflectora de energía; de acuerdo a esto, la superficie observada puede comportarse como un reflector especular, reflector difuso y angular, según sea su rugosidad (Figura 53), (LOMBARDO & ROJAS, 2000; CCRS,1999) .



**Figura 53. Tipos de reflexión**  
(CCRS, 2000)

Esta diferencia se nota directamente sobre los niveles digitales obtenidos. Un reflector especular produce niveles digitales muy bajos (agua en calma, por ejemplo), (CHUVIECO, 1999), mientras que un reflector difuso produce niveles digitales medios y altos (afloramientos de caliza, por ejemplo).

De acuerdo a esto, puede establecerse que la respuesta espectral obtenida por el sensor depende generalmente del ángulo de iluminación del sol, del ángulo de observación y de la

rugosidad del terreno en términos de su comportamiento reflector; por lo tanto, un mismo objeto puede mostrar valores distintos en función de la variabilidad de estos parámetros, (LOMBARDO & ROJAS, 2000). Muchas veces estos elementos que inciden en el registro radiométrico se denominan ruido o señal de ruido, los cuales deben ser corregidos digitalmente, como se explicará posteriormente.

A partir de todo lo mencionado hasta ahora se pueden destacar los siguientes 4 parámetros: 1) rango espectral, 2) ancho de banda espectral; 3) firma espectral; 4) señal de ruido. Parámetros a tomar en cuenta en lo relativo al tratamiento de imágenes satelitales en este trabajo especial de grado.

- **Procesamiento digital e interpretación de imágenes satelitales**

El procesamiento digital de imágenes de satélite consiste en la aplicación de una serie de algoritmos estadísticos y matemáticos a una imagen con el fin de corregir defectos geométricos y radiométricos, todo esto mediante el uso de programas informáticos en un computador, (TOUTIN, 2003). Estas distorsiones tienen dos grupos de orígenes, en primer lugar el observador (tipos de plataforma espacial y sensores) cuyas tomas no siempre son ortogonales a la superficie terrestre, debido al ángulo de las tomas de adquisición del sensor, la rugosidad del terreno y las condiciones funcionales de las plataformas y sensores, (TOUTIN, 2003); En segundo lugar, lo observado (atmósfera y tierra), cuya energía emitida depende de la irregularidad de la superficie terrestre y de las condiciones atmosféricas que producen rebote y barrera de las ondas electromagnéticas sobre todo en sensores pasivos, de las variaciones de órbita y de la rotación de la tierra (movimiento cuasi elíptico), (TOUTIN, 2003). Para corregir estos defectos se emplean métodos, que se describirán a continuación:

- **Correcciones radiométricas**

En el proceso de captura de una escena, el sensor puede introducir distorsiones que desmejoran la calidad de la imagen.

Estas distorsiones se manifiestan en el bandeamiento de la imagen y en el ruido presente en el rango de brillo e intensidad captado, siendo muchas veces agrupado en una región del conjunto de niveles digitales posibles. Esto es debido a la sensibilidad de los sensores para detectar un amplio rango de brillo bajo variadas condiciones de iluminación que muchas veces no

presentan todos los objetos terrestres, por lo que al codificar la señal el sensor tiende a agruparlas en un intervalo de 256 niveles posibles, (ITC, 1997).

Para corregir el segundo tipo de error (ruido), se aplican técnicas de mejoramiento de imagen para hacer una imagen más interpretable. Estas técnicas son agrupadas en dos tipos: Mejoramiento de contraste o mejoramiento global y mejoramiento local, (ITC, 1997).

a) Mejoramiento global

El mejoramiento global o mejoramiento de contraste se realiza para mejorar la distribución de frecuencias de los niveles digitales, eliminando las distorsiones ya explicadas anteriormente. Para la corrección de estos defectos se aplican métodos de estiramiento y distribución de los niveles digitales en los 256 niveles digitales posibles.

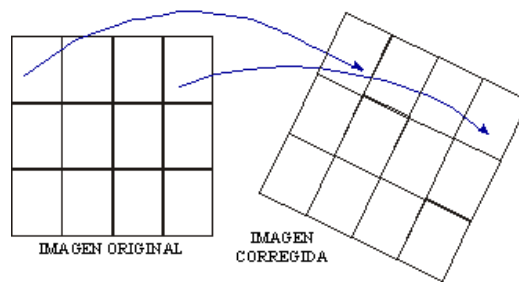
b) Mejoramiento local o espacial

En segundo lugar existe otra herramienta para corregir radiométricamente las imágenes, pero para condiciones locales en la imagen, (ITC, 1997). Esta técnica es desarrollada sobre la base de los filtros, que son funciones de tipo matricial utilizadas para el realce de distintos elementos u objetos. Los filtros son ventanas móviles, variables en tamaño, que realizan un determinado tipo de cálculo con los píxeles de la imagen y asignan el resultado a los píxeles originales de la imagen, (CCRS, 2000).

Existen una importante cantidad de filtros y su utilización depende del criterio del experto y del objetivo que se persigue, el realce o atenuación de elementos en la imagen. Por ello se destacan dos tipos de filtro comúnmente utilizados en el tratamiento digital de imágenes denominados Filtros de Paso Alto y Filtros de Paso Bajo. Los filtros de paso alto son utilizados para el realce de bordes, de allí que también se conozcan como detectores de bordes, mientras que los filtros de paso bajo al contrario de los primeros se emplean para suavizar los bordes. Por otro lado los filtros de paso alto actúan resaltando los componentes frecuenciales más altos y atenuando los más bajos, mientras que los filtros de paso bajo operan filtrando los componentes frecuenciales más bajos, (LOMBARDO & ROJAS, 2000). Dentro de los filtros paso alto con frecuencia son utilizados los llamados Filtros Direccionales, los cuales sirven para resaltar estructuras lineales en la imagen, que para el caso de la presente investigación se emplearán para el realce de lineamientos estructurales.

- **Correcciones geométricas**

Las imágenes satelitales son en muchos casos afectadas por distorsiones debidas a diversos factores: geometría del sensor, inestabilidad de la plataforma espacial, rotación de la tierra, curvatura terrestre, (ITC 1997, TOUTIN 2003, CCRS 2000). En general, estas distorsiones se refieren a la disposición errónea de los objetos en la imagen en comparación con su localización real. La corrección de estas deformaciones, al igual que las correcciones radiométricas, se realiza mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas a la imagen, que operan asignando a los píxeles de la imagen su correcta ubicación terrestre de acuerdo a un sistema de proyección especificado, (TOUTIN 2003), (CCRS 2000), (Figura 54).



**Figura 54. Corrección geométrica**

(RICHARDS, 1995; BRAGA, 2002; LOMBARDO & ROJAS, 2000)

- **Extracción de Información en Imágenes de Percepción Remota**

La extracción de información temática consiste en la lectura o agrupamiento de píxeles en función de determinados atributos. Esta interpretación es elaborada en base a los objetivos perseguidos y puede ser agrupada en dos tipos: visual y digital

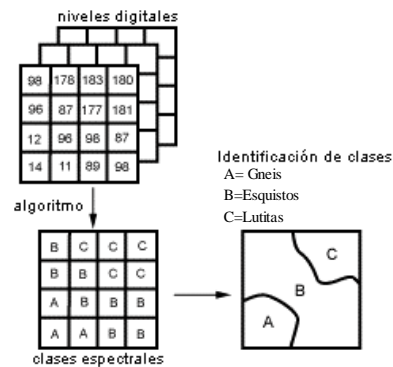
- Visual

La extracción visual de información consiste en la identificación de atributos en una imagen mediante la observación y análisis por parte de un experto, esta puede ser realizada tanto en formato analógico (sobre una imagen impresa) o en formato digital (sobre una imagen mostrada en el monitor de un computador), en este proceso el experto define los objetos a través de polígonos y líneas, ya sea en papel o vectorizando en pantalla.

- Digital

La extracción digital de información consiste en la aplicación de algoritmos matemáticos y estadísticos computarizados de reconocimiento y agrupación de valores digitales sobre la imagen en formato digital. Estos algoritmos son agrupaciones espectrales que se hacen en base a

las denominadas clasificaciones, mediante el cual se agrupan los píxeles en un número finito de clases individuales o de categorías de datos en base a los niveles digitales o de radiación registrados en la imagen, (UCT, 2003) (Figura 55). Existen dos tipos de clasificaciones: supervisadas y no supervisadas.



**Figura 51. Clasificación digital de imágenes**  
(Modificado de CCRS 2000)

- Clasificaciones supervisadas

Se refieren a la diferenciación de atributos temáticos de la imagen a partir de la selección de grupos de píxeles en ella, llamados Campos de Entrenamiento o Campos Muestra, de los cuales se conoce su representación en la realidad. El procesador de imágenes, en base a modelos matemáticos y estadísticos, selecciona todos los píxeles de la imagen que presentan la respuesta espectral igual o semejante de los campos de entrenamiento o muestra definidos y los agrupa, creando así tantas clases temáticas como campos de entrenamiento se hayan definido.

- Clasificaciones no supervisadas

Corresponden al agrupamiento de píxeles en la imagen de acuerdo a las propiedades radiométricas de los datos. El agrupamiento en clases se realiza de acuerdo a la distancia espectral mínima entre píxeles con igual o similar valor radiométrico. En este proceso, la intervención del experto se restringe al establecimiento del número de clases a obtener.

## ANEXO 2. RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL FACTOR DE ÍNDICE ÓPTIMO

La aplicación del factor de índice óptimo se realizó en ILWIS y se obtuvo como resultado la siguiente tabla:

*Tabla 5. Factor de índice óptimo*

Composición de Bandas	OIF Index Highest Ranking			
	1	ETM3	ETM4	ETM5
2	ETM1	ETM4	ETM62	2478,05
3	ETM1	ETM4	ETM61	294,17
4	ETM3	ETM4	ETM62	283,06
5	ETM3	ETM4	ETM61	171,32
6	ETM2	ETM4	ETM62	164,34

De esta se puede interpretar que la mejor composición de bandas utilizando el sensor Landsat ETM<sup>+</sup> es la 453, ya que presenta las bandas con menor correlación, entre ellas. Este cálculo como se mencionó anteriormente proviene de la aplicación de la ecuación OIF= (sumatoria de las desviaciones estándar de cada banda /sumatoria de los coeficientes de correlación entre bandas en valor absoluto). Esta ecuación se presenta a continuación:

$$OIF = \frac{Std_i + Std_j + Std_k}{|Corr_{i,j}| + |Corr_{i,k}| + |Corr_{j,k}|}$$

donde:

Std<sub>i</sub> desviación estándar de banda i

Std<sub>j</sub> desviación estándar de banda j

Std<sub>k</sub> desviación estándar de banda k

Corr<sub>ij</sub> coeficiente de correlación de banda i y banda j

Corr<sub>ik</sub> coeficiente de correlación de banda i y banda k

Corr<sub>jk</sub> coeficiente de correlación de banda j y banda k