APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN EN EL MAPEO GEOLÓGICO DE UNA PARTE DE LA COSTA DEL ECUADOR UTILIZANDO UNA SUBESCENA DE LANDSAT TM Y TECNICAS ESPECIFICAS DE TRATAMIENTO DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA

Ramón Guerra Robalino [1], Edison Navarrete Cuesta[2]

[1]**Ingeniero en Geología 2005, email: ramon_guerra1@hotmail.com.**
[2]**Director de Informe Técnico. Ingeniero en Geología, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Jefe del Laboratorio de Teledetección Espacial y SIG, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Profesor de ESPOL desde 1985, email: enavarre@goliat.espol.edu.ec.**

ABSTRACT

This study is placed in an area between Guayaquil and Chanduy. The original image used in this work is an extraction of a TM Landsat scene from 21 February 1990. Principally, among others, we used the following principal digital methodology: colour composite produced from the 3, 5, 4 TM Landsat channels; principal component analysis of the 3, 5, 4 TM Landsat channels; unsupervising classification by *Nuées dynamiques* of the first and the second principal components and application of the method of mathematical morphology to obtain an automatic map; supervising classification by *Moyenne Euclidienne* of the colour composite of the 3, 5, 4 channels and application of the method of mathematical morphology to obtain another automatic map. Finally, we obtained two preliminary geological maps with the respective automatic maps that gave similar results with little differences because of the applied treatment techniques.

RESUMEN

Este estudio está localizado en un área entre Guayaquil y Chanduy. La imagen original usada en este trabajo es un extracto de una escena Landsat TM del 21 de Febrero de 1990. Entre otras, principalmente, se usó la siguiente metodología digital: composición en color producida de los canales Landsat TM 3, 5, 4; análisis de componentes principales de los canales Landsat TM 3, 5, 4; clasificación no supervisada por *Nuées dynamiques* de la primera y segunda componentes principales y aplicación del método de morfología matemática para obtener un mapa automático; clasificación supervisada por *Media Euclidiana* de la composición en color de los canales 3, 5, 4 y aplicación del método de morfología matemática para obtener otro mapa automático. Finalmente, se obtuvo dos mapas geológicos preliminares con los respectivos mapas automáticos que dieron similares resultados con pequeñas diferencias, debido a las técnicas de tratamiento aplicadas.

INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes

Este trabajo corresponde a un entrenamiento práctico realizado en el Laboratorio de Teledetección Espacial y SIG de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra entre los meses de Febrero a Marzo de 1997 bajo la dirección, guía e instrucción del Ing. Edison Navarrete Cuesta.

2. Objetivo

Aplicar las técnicas de Teledetección para la elaboración de un mapa geológico preliminar de una parte de la costa ecuatoriana comprendida entre Guayaquil y Chanduy utilizando una subescena de una imagen satelital Landsat TM .

CONTENIDO

1. Programas, Equipos y Datos de la Imagen

El tratamiento con las imágenes y los resultados obtenidos se los realizó con los dos programas desarrollados por ORSTOM (IRD), **PLANETE** y **OSIRIS**, los cuales operan en estaciones de trabajo.

El equipo utilizado en el proceso es una estación de trabajo SUN SPARC IPC-1 con sistema operativo Solaris 1.1-Openwindows y sus respectivos periféricos.

La imagen utilizada es:

Un **extracto de una imagen LANDSAT TM** del sector suroeste de la costa ecuatoriana, entre Guayaquil y la Península de Santa Elena con 6 bandas, excluida la banda térmica (banda 6), que fue tomada el 21 de Febrero de 1.990. El extracto corresponde a una imagen de 2.140 líneas y 2.521 columnas.

A continuación se describen los tratamientos y se anotan los resultados más destacables que se realizaron con la imagen y que finalmente sirvió para lograr llevar a buen término la cartografía geológica.

2. Tratamientos de la Imagen y Resultados

Composiciones en Color

La utilización de un color primario diferente para cada imagen de una serie de tres imágenes congruentes correspondientes a parámetros diferentes (banda, tiempo, polarisación, etc.), permite crear **composiciones en color** que ofrecen una forma de síntesis de la información. Se ha tomado la costumbre de nombrar las composiciones por tres cifras comenzando por la banda en azul, seguida de la banda en verde y después la banda en rojo.

Se realizaron varias composiciones en color tomando como base los bandas (canales) de LANDSAT TM que se tenían a mano en buenas condiciones, ya que hubo problemas geométricos con la TM1. Las composiciones en color realizadas fueron:

TM2,3,4 (Fig. # 1), para cuya realización se seleccionaron a través de los histogramas de frecuencia simple de cada canal, los siguientes datos de límites de pixeles:

	AZUL		VERDE		ROJO	
	min	max	min	max	min	max
DATOS	23	54	18	72	10	125

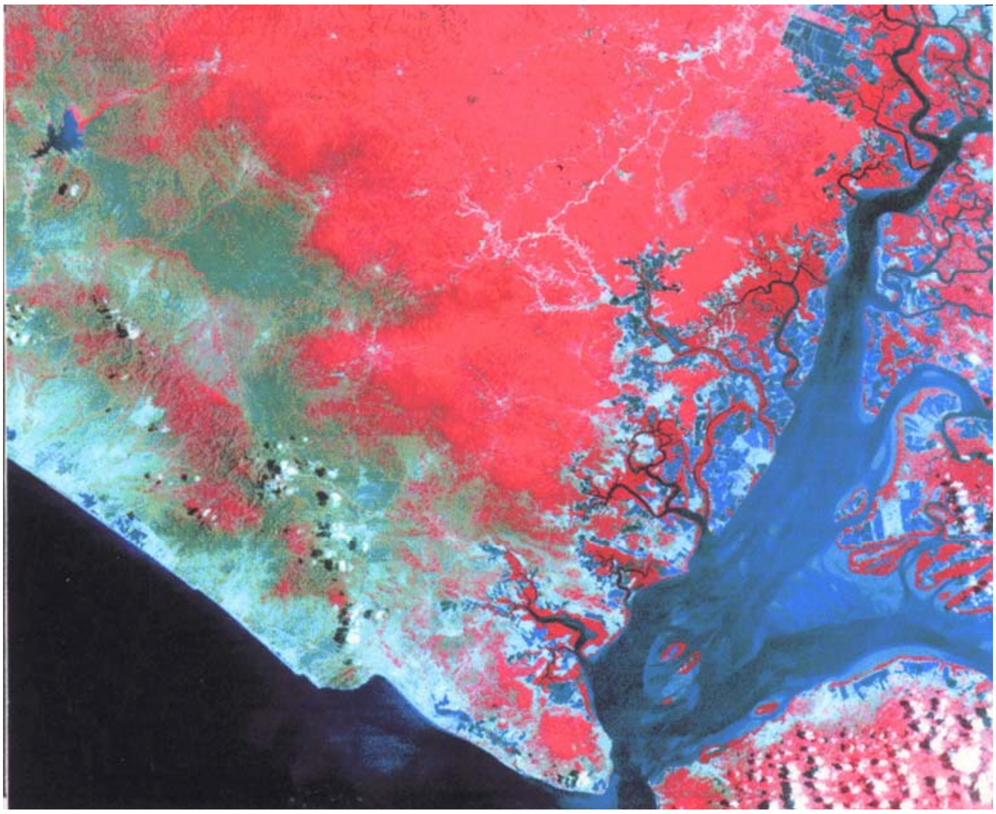


Figura # 1. Composición en color TM2,3,4

TM3,5,4 (Fig. # 2) con los siguientes datos de límites de pixeles para cada banda:

	AZUL		VERDE		ROJO	
	min	**max**	**min**	**max**	**min**	**max**
DATOS	18	72	6	149	10	125

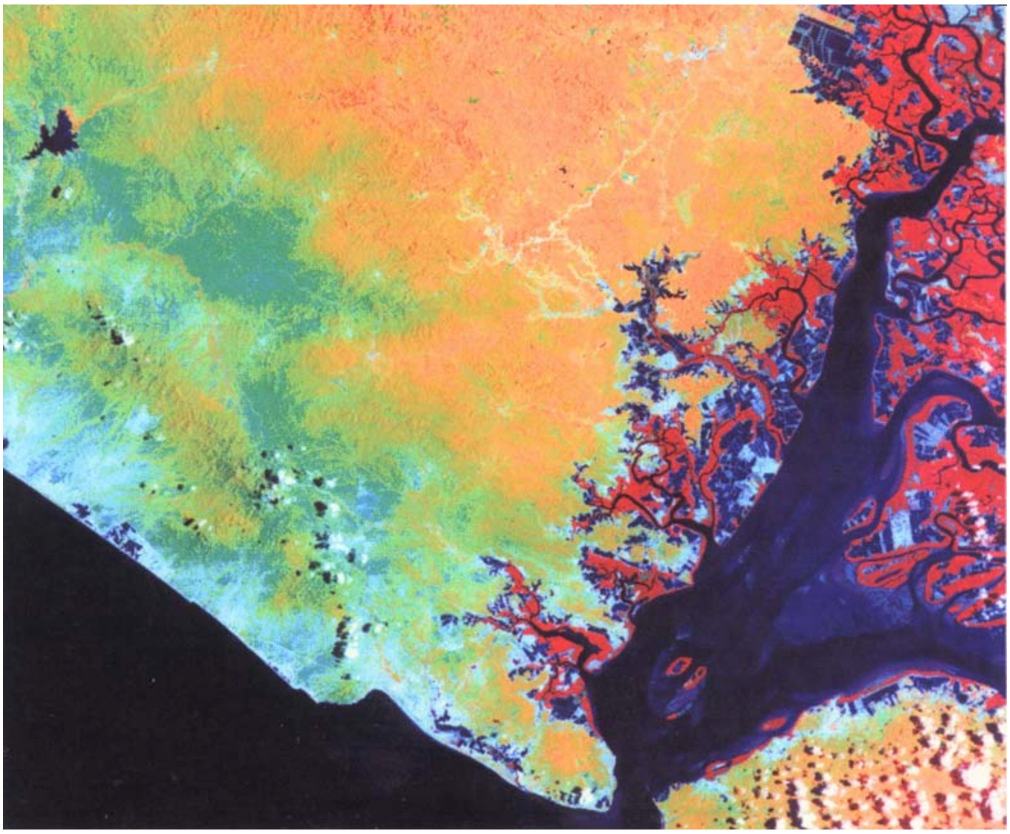


Figura # 2. Composición en color TM3,5,4

Componentes Principales

Es algunas veces limitante no poder visualizar al mismo tiempo más de tres bandas o canales, cuando la imagen que se tiene posee más de tres bandas. Entonces, el objetivo es reducir su número a tres perdiendo lo menos posible de información. La operación o algoritmo capaz de realizar tal transformación se apoya en la transformada de Hotelling.

En suma, existe con frecuencia una correlación importante entre las diferentes bandas de una imagen, lo que se traduce en composiciones en color de poco contraste. La transformada de Hotelling se encarga justamente de reducir al mínimo la correlación entre los canales de salida operando una rotación de los ejes en un espacio de M dimensiones. Los nuevos ejes o **componentes principales** son definidos por los vectores propios de las bandas de entrada. La **componente principal 1** (**ACP1**) corresponde a una imagen que contiene el máximo de varianza de los datos de entrada, mientras que la **componente principal 2** (**ACP2**) es aquella cuya varianza sigue en orden de jerarquía a la precedente y así sucesivamente para las M componentes.

Las tres primeras componentes principales constituyen la selección óptima de canales de entrada para la creación de imágenes en falsos colores. La primera corresponde aproximadamente a la brillantez global de la escena visualizada, la segunda a las diferencias espectrales mayores entre los canales de entrada y la tercera no comporta prácticamente más que el ruido residual.

En este estudio, para obtener las tres primeras **componentes principales**: **ACP1, ACP2** y **ACP3** (proceso en anexos), se utilizaron como **canales de entrada**: **TM2, TM3, TM4** y **TM5**, ya que esta combinación fue la que mejores resultados produjo.

Composición en color de las componentes principales

Se ensayaron varias composiciones en falso color de las componentes principales y la que arrojó mejor resultado es la composición **ACP3,2,1 (Fig. # 3)** tomándose los siguientes datos de límites de pixeles:

	AZUL		VERDE		ROJO	
	min	max	min	max	min	max
DATOS	1	255	1	255	17	255

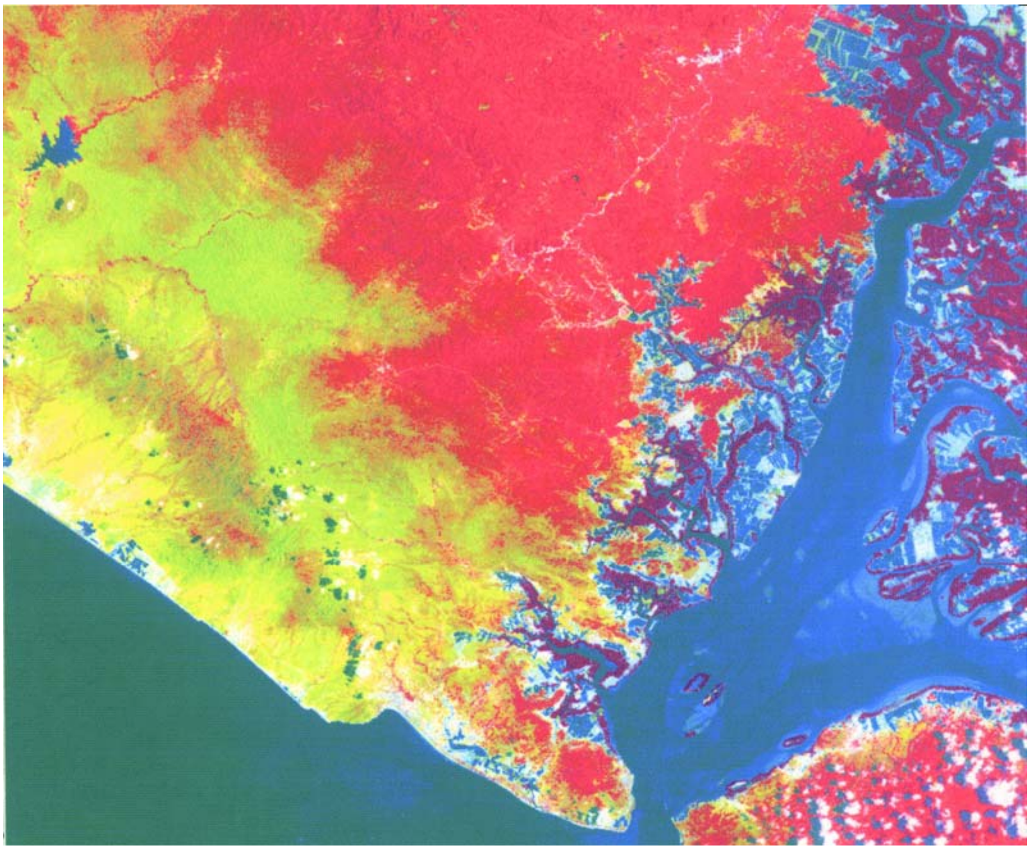


Figura # 3. Composición en color ACP3,2,1

Filtraje

Se entiende por **filtraje** toda técnica que conduce a eliminar el ruido contenido en los datos. En teoría de la información, **el ruido** está definido como todo dato no útil que enmascara la información. Este ruido puede provenir de dos fuentes diferentes:

- del sistema de medida, de transmisión o de soporte de los datos, hacen parte de esta categoría: el ruido de cuantificación, la respuesta desigual de los detectores, el ruido electrónico del captor, el tiempo de respuesta imperfecta del detector, el ruido de transmisión, etc.
- de las fuentes externas del objeto observado como la atmósfera, el relieve o la antena para las micro-ondas, etc.

Para ciertas aplicaciones, en particular en Geología, interesa descubrir en las imágenes discontinuidades en las texturas más que la definición de los objetos mismos. Interesa, por ejemplo, el contorno de zonas relativamente homogéneas, lo que puede revelar la presencia de fallas o de fracturas.

El **filtraje de frecuencia** es una forma de análisis de frecuencia espacial de datos. Los filtros de frecuencia son llamados **filtros de paso alto** o **paso bajo (** según la frecuencia que transmiten) y se aplican sea para eliminar el ruido en una imagen o sea para hacer resaltar estructuras, lineamientos o texturas de la imagen. El **filtro de paso alto** no dejará aparecer en la imagen resultante más que las aristas de zonas relativamente homogéneas, mientras que, el **filtro de paso bajo** no conservará más que los grandes conjuntos homogéneos dejando a un lado los detalles de su estructura.

Para **modificar la distribución de frecuencias espaciales** contenidas en las imágenes o para crear imágenes donde las intensidades sean medidas locales de esas frecuencias, hay dos tipos de transformación posible:

- **Filtraje espacial sin transformada de la imagen:** los algoritmos modifican los valores de la imagen mediante aplicación directa de una función matemática que no depende del conjunto de elementos de esta imagen. Una aplicación de este tipo de filtros es el realce de aristas. La dirección en la cual se pasa el filtro determina los objetos que serán acentuados, aquellos que tienen una dirección normal al filtro se resaltan y aquellos que son paralelos se enmascaran.

- **Filtraje espacial con transformada de la imagen:** la función matemática de filtraje es aplicada sobre la transformada de la imagen en otro sistema de coordenadas que reposa sobre las frecuencias espaciales. Es suficiente multiplicar la respuesta espectral del filtro por la transformada de la imagen de entrada para obtener directamente la transformada de la imagen filtrada. Este tipo de filtraje permite seleccionar y poner en evidencia estructuras espaciales particulares. Se utiliza en este tipo de filtraje **la transformada de Fourier.**

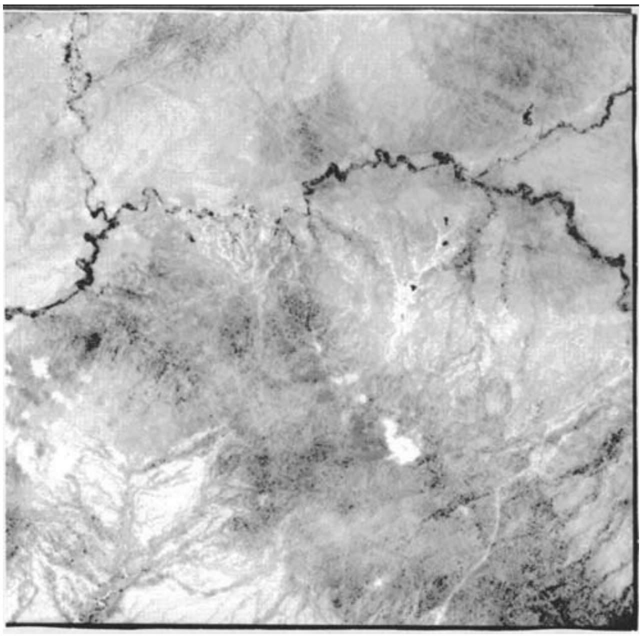
En esta parte del estudio, se aplicaron los dos métodos de filtraje espacial y se tomó como imagen base la **ACP2** obtenida anteriormente.

- **Filtraje sin transformada de la ACP2**

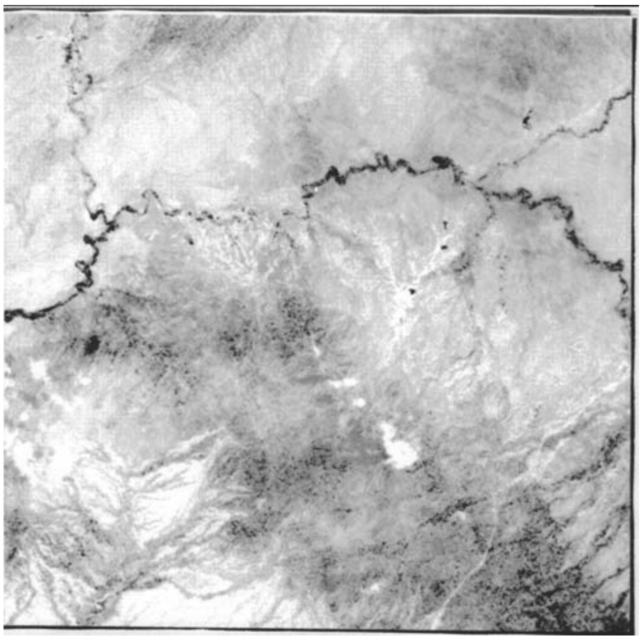
Se aplicaron todos los filtros disponibles y aplicables en Geología, que se encuentran en el programa OSIRIS, es decir: paso alto de Pratt y de Ford, gradiente, Laplaciano, lineal, Sobel, Robert, Kirsch, estadístico de mayoría, estadístico Kasvand, estadístico de la media, morfológico de dilatación y morfológico de erosión. De todos estos filtros aplicados el que mejor resultado dio para lineamientos geológicos (fallas, pliegues, etc.) es el **filtro de paso alto de pratt 3x3 de tipo I.**

- **Filtraje con transformada de Fourier de la ACP2**

En este tratamiento se trabajó con extractos de 512x512 pixeles de la imagen ACP2 (anexos), ya que el ejecutable del programa PLANETE, que hace el filtraje con la transformada de Fourier (anexos), no acepta más que imágenes cuadradas de 128x128, 256x256 o 512x512. Se obtuvieron 16 imágenes de 512x512 que cubren la parte continental de la zona de estudio, se aplicaron dos direcciones de filtraje que destacan los lineamientos N-S y E-O **(Fig.# 4)** y luego se las pegó para obtener un mosaico de la imagen total **(Fig. # 5).**



A



B

Figura # 4. Filtraje con Transformada de Fourier sobre imágenes de 512x512: A. Muestra lineamientos E-O. B. Muestra lineamientos N-S

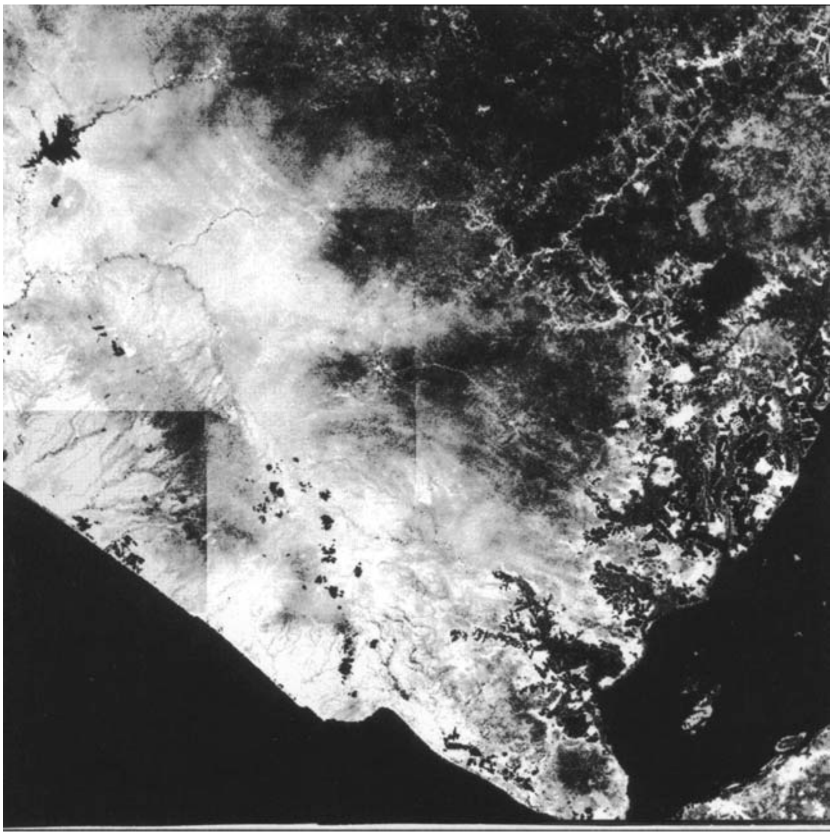


Figura # 5. Mosaico compuesto por imágenes de 512x512 obtenidas por filtraje con Transformada de Fourier

Sistema ITS

De la misma manera que un color puede ser perfectamente definido como una mezcla de cantidades de **rojo, verde y azul** (**Sistema RVA**) o **cian, magenta y amarillo** (**Sistema CMA**), un color puede también definirse perfectamente por tres parámetros:

- **Intensidad**

Es el grado de esclarecimiento o de ensombrecimiento de un color. La intensidad de un color corresponde a la cantidad de energía reflejada por el color de un objeto. Sobre un televisor (en negro y blanco o en colores) se puede graduar la intensidad luminosa emitida por el tubo catódico. Esta graduación se llama comúnmente luminosidad, luz o brillantez.

- **Tono**

Es la calidad específica de sensación, o dominancia de color debido a una radiación (o más bien un conjunto de radiaciones en el caso general) de longitud de onda determinada. Ej.: rojo, verde, amarillo, etc.

- **Saturación**

Es inversamente proporcional a la fracción de radiación blanca que debilita la coloración del rayo. En efecto los colores de los objetos están, por lo general, siempre más o menos diluidos de blanco. Se encuentra esta noción, por ejemplo, en pintura, donde se agrega el blanco a un color para disminuir su saturación.

Estos tres parámetros: Intensidad, Tono y Saturación constituyen una tripleta de propiedades necesarias y suficientes para definir un color. Entoces, el **Sistema ITS** puede ser definido como un cambio de coordenadas con respecto al sistema **RVA** o al sistema complementario **CMA.** En francés, el sistema es también llamado **ITS** (Intensité, Teinte, Saturation) y en inglés es llamado **IHS** (Intensity, Hue, Saturation).

La particularidad de este sistema de representación de colores con respecto al sistema RVA es que las coordenadas sobre cada eje, pueden ser correlacionadas con las sensaciones visuales:

- Intensidad = Luminosidad, Energía
- Tono = Naturaleza del color
- Saturación = Fuerza de la coloración

Composición en color de los canales de Intensidad, Tono y Saturación

En el estudio presente para obtener la intensidad, el tono y la saturación de la imagen tratada, se lo hizo mediante el ejecutable del programa **PIANETE** que hace esta función y crea tres neocanales en los tres parámetros respectivos. En relación a los canales de entrada para aplicar el algoritmo, se hicieron dos pruebas:

- Los canales de entrada fueron respectivamente **TM3, TM5 y TM4** y una vez obtenidos los neocanales se realizó una **composición en color,** donde **el canal de intensidad** se puso en **azul,** el **canal de tono** en **verde** y el **canal de saturación** en **rojo (Fig. # 6)** con los siguientes datos:

	AZUL		VERDE		ROJO	
	min	max	min	max	min	max
DATOS	13	134	1	179	3	115

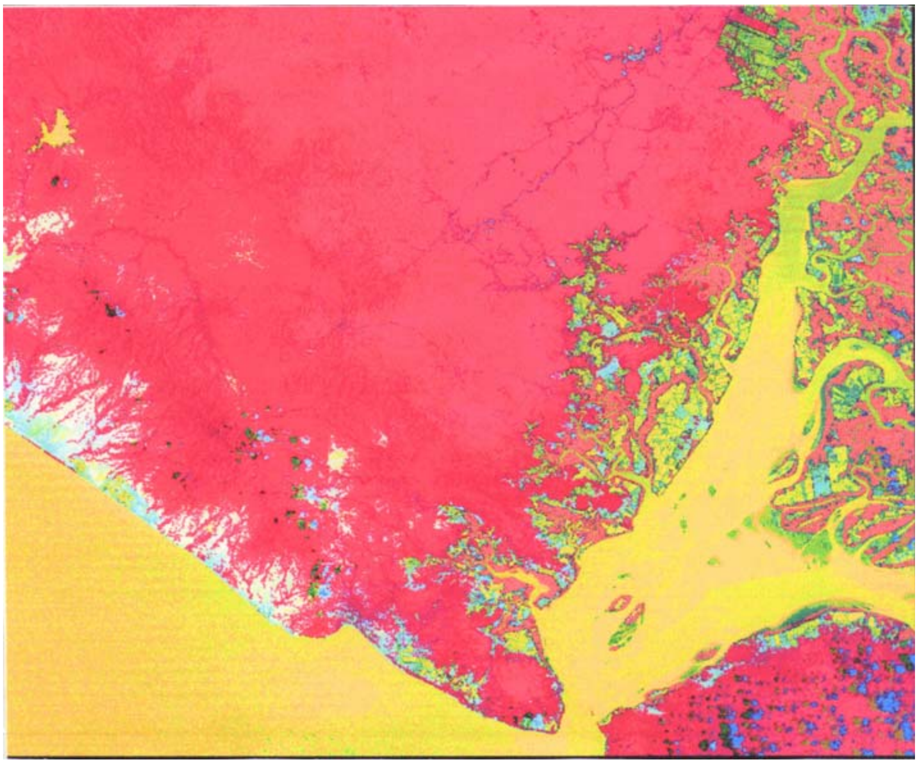


Figura # 6. Composición en color de los neocanales ITS obtenidos a partir de los canales TM3, TM5 y TM4

- Los canales de entrada fueron respectivamente **ACP1, ACP2 y ACP3** y una vez obtenidos los neocanales se realizó una **composición en color,** donde el **canal de intensidad** se puso en **azul,** el **canal de tono** en **verde** y el **canal de saturación** en **rojo (Fig. # 7)** con los siguientes datos:

	AZUL		VERDE		ROJO	
	min	max	min	max	min	max
DATOS	86	255	1	179	1	150

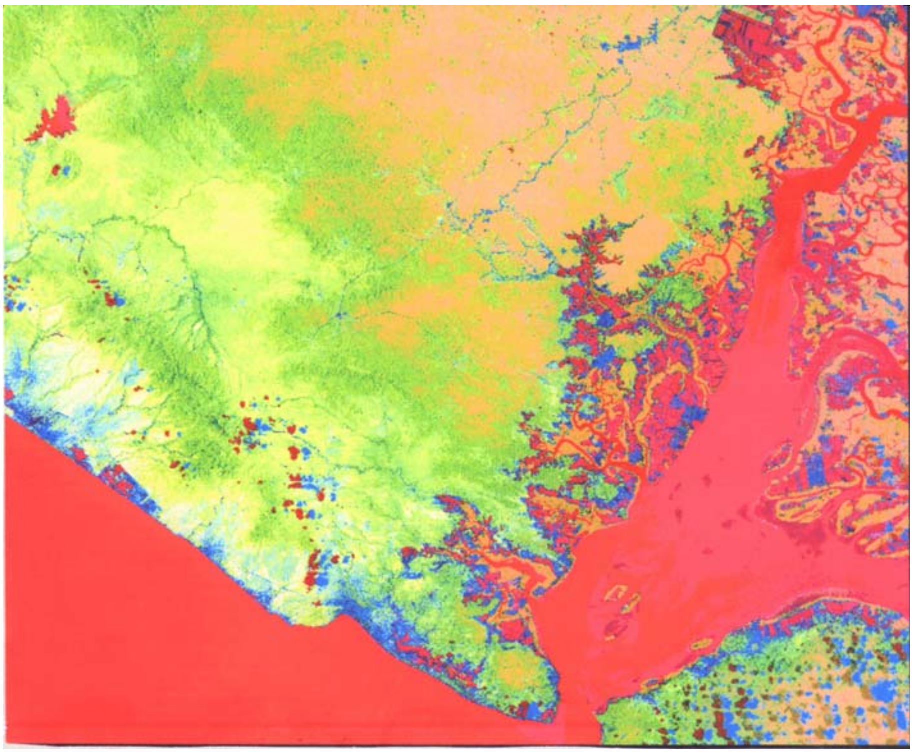


Figura # 7. Composición en color de los neocanales ITS obtenidos a partir de los canales ACP1, ACP2 y ACP3

Mediante inspección visual de las dos imágenes obtenidas, se puede ver que la que mejores resultados dio para asuntos geológicos es la segunda prueba, ya que en ella se destacan muy bien diferentes tipos de litología y estructuras geológicas.

Clasificación

El objetivo de las **técnicas de reconocimiento automático de formas** consiste en identificar la clase a la cual pertenece cada objeto contenido en una imagen analizada. Se pueden definir clases de objetos a partir de muchos criterios: físicos, biológicos, culturales, etc.

Este proceso de análisis que lleva a la creación de imágenes temáticas, es decir de imágenes cuyo contenido no representa solo una medida sino una interpretación y una categorización de la naturaleza de los objetos asociados a los pixeles, se presta bien a un tratamiento con computadores. En efecto, una vez establecidos los criterios de clasificación, el computador puede aplicarlos rápidamente para determinar la clase de cada uno de los numerosos elementos de las imágenes.

El proceso de clasificación se presenta en tres etapas:

- el establecimiento de **firmas espectrales** específicas de cada clase
- la **clasificación de cada pixel** en función de las firmas espectrales
- la verificación de los resultados.

El establecimiento de clases de firmas espectrales puede hacerse a partir de dos situaciones iniciales distintas. En el primer caso, se posee el conocimiento *a priori* sobre la naturaleza de los objetos contenidos en la imagen y entonces, es suficiente comunicar esta información al computador para su utlización, se dice entonces que la **clasificación** es **dirigida** o **supervisada** (en inglés, **supervised classification**).En el segundo caso, ninguna información preliminar sobre las firmas espectrales de los objetos a clasificar se le comunica al computador, el cual entonces deberá buscar, por asociación entre los pixeles, las firmas espectrales más comunes en la imagen y deducir las firmas espectrales de los objetos virtuales, se dice entonces que la **clasificación** es **no dirigida** o **no supervisada.** También, se dice que puede existir una **clasificación pseudo-dirigida** en el caso que se conozcan los límites de los objetos en la imagen, sin poder hacer un buen etiquetaje.

Clasificación No Dirigida

Luego de analizar las composiciones en color obtenidas por los métodos aplicados anteriormente a la imagen Landsat TM, se escogió hacer una clasificación no dirigida con las dos primeras componentes principales (ACP1 y ACP2) tomando 11 clases y aplicando el método de ***Nuees Dynamiques à centres mobiles*** **(Fig. # 8)**, el cual se encuentra en el programa OSIRIS.

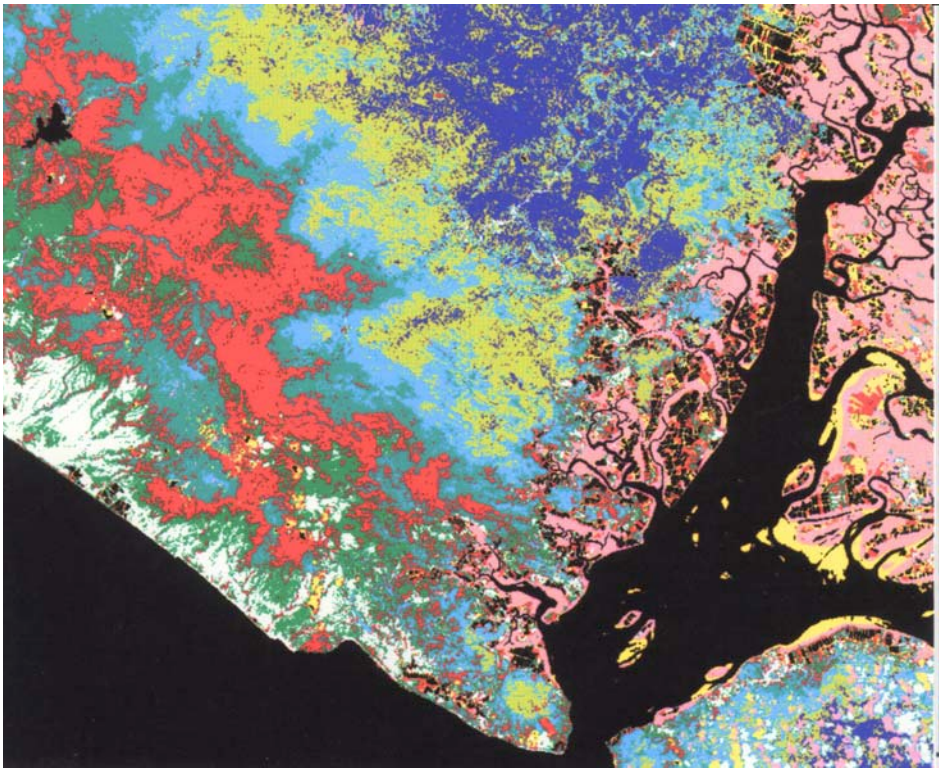


Figura # 8. Clasificación no dirigida por *Nuées Dynamiques á centres móviles* con 11 clases, a partir de los canales ACP1 y ACP2

Clasificación Dirigida

Se escogió hacer una clasificación dirigida mediante el método de ***Media Euclidiana*** que se encuentra en el programa PLANETE, para lo cual se tomó la composición en color de las bandas TM3, TM5 y TM4, en la que se hicieron 3 zonas de muestreo en cada una de las 11 clases que componen la clasificación, obteniéndose finalmente una imagen resultado de la clasificación **(Fig. # 9).**

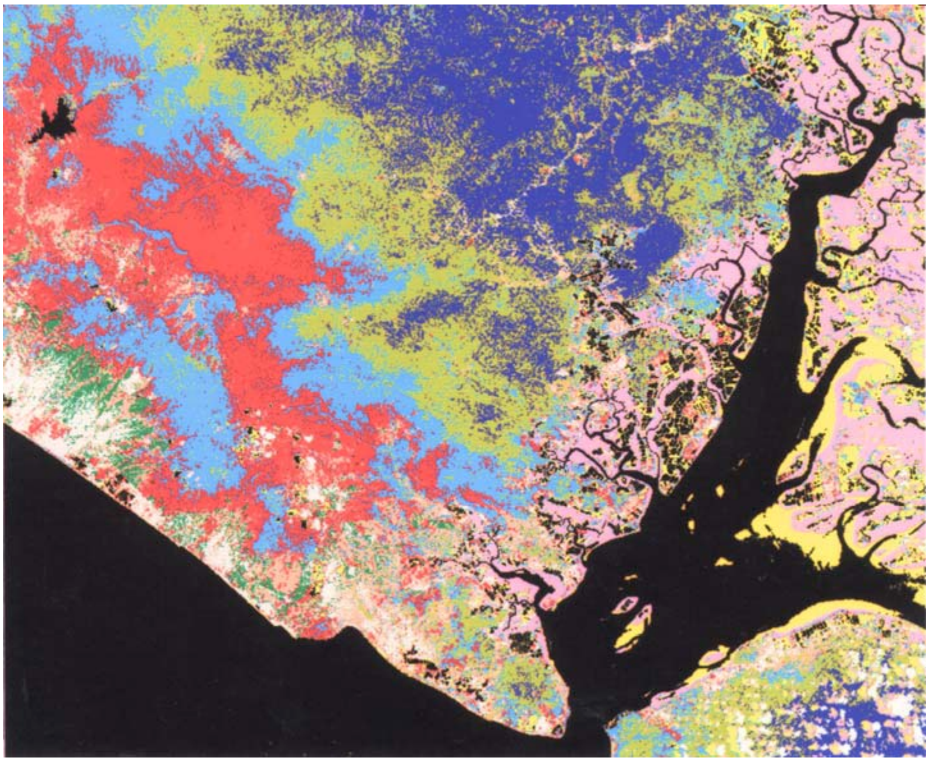


Figura # 9. Clasificación dirigida por *Media Euclidiana* con 11 clases a partir de los canales TM3, TM5 y TM4

Como se puede observar de la inspección visual de las dos imágenes obtenidas, los resultados de las clasificaciones son muy parecidos.

Morfología Matemática

La Morfología Matemática se interesa en la forma de los objetos. El principio de base de este método consiste en comparar los objetos que se quieren analizar a otro objeto de forma conocida, llamado **elemento estructurante**. Los parámetros que se tienen en cuenta en morfología matemática son la forma, el contraste, el color y la disposición de los objetos en la imagen. El elemento estructurante es la base de la morfología matemática. Se lo puede representar como una matriz binaria que muestra un objeto de forma generalmente muy simple al cual los objetos de la imagen serán comparados. La comparación de los objetos con estos elementos estructurales sigue un proceso lógico inspirado en la teoría de conjuntos, es decir que se basa en los criterios de unión, intersección, inclusión, complementación y diferencia entre los conjuntos de objetos y los elementos estructurantes.

Se llega entonces a realizar sobre las imágenes una serie de operaciones llamadas **erosión, dilatación, apertura** y **cierre,** cuya combinación conduce a transformaciones de vecindad llamadas **adelgazamiento, espesamiento** y **esqueletización.** Las aplicaciones de estos métodos son muy variadas: cartografía temática, análisis de estructuras curvas en Geología, etc.

Cartografía Automática utilizando la Morfología Matemática

Esta aplicación de la Morfología Matemática, se desarrolla mediante los siguientes pasos:

- Obtención de una **imagen clasificada**.
- Transformación de cada clase en una imagen binaria.
- Erosión de las imágenes binarizadas
- Reconstrucción de las imágenes erosionadas
- Limpieza de las imágenes reconstruidas
- Cierre de imágenes limpiadas mediante dilatación y erosión sucesivas
- "Bacheo" (relleno de huecos) de imágenes cerradas
- Nueva limpieza de imágenes
- Creación de una **imagen total**, mediante la reunión (suma) de las imágenes de las clases binarizadas que han pasado por los pasos anteriores
- Recodificación de las clases puras y mezcladas de la **imagen total reunida**
- Obtención de la **imagen en bruto** a partir de la imagen total reunida
- "Pulimento mayoritario" y reconstrucción multiclases de la imagen en bruto
- Recodificación final y obtención de la imagen final, llamada **imagen limpia**.

Cartografía automática con la Clasificación de *Nuées Dynamiques*

Para realizar esta parte se tomó como base la imagen obtenida anteriormente en la sección de Clasificación no dirigida. En el programa OSIRIS, las clases se numeran de 0 a n, pero para efectuar una leyenda no se utiliza el código 0, por lo que la clase 0 se la codificó a 11. La clase 4 contiene exclusivamente el agua y la clase 8 representa las nubes, las otras 9 clases se binarizaron y se trataron de la manera siguiente:

- limpieza por reconstrucción,
- extracción de las entidades conexas más importantes después de la nivelación en conexidad 8,
- cierre de tamaño 2 con un elemento octogonal,
- bacheo de huecos
- eventualmente eliminación de las entidades más pequeñas.

El proceso descrito a continuación se encuentra resumido en la **TABLA 1**. Las clases 0 (=11), 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9 se codificaron en potencias de 2 (de 1 a 128). Estas clases se reunieron y las clases no vacías se recodificaron a continuación (primera reunión). Se hizo una primera recodificación de estas 46 clases agregando la clase 10 codificada en 32, lo mismo que las nubes codificadas en 64. Todo lo que estaba en 0 se codificó en 128. La última operación consistió en filtrar la imagen con el mar codificado en 0 (multiplicación por la máscara de agua). Este filtraje permite rectificar la costa y los cauces de los ríos, ya que al momento del cierre la parte correspondiente a la tierra pudo haber sido exagerada (imagen en bruto).

La imagen en bruto contiene un cierto número de códigos que representan mezclas de clases. Se debe notar que para esos códigos los porcentajes no son muy significativos; todos los porcentajes se calculan en función del tamaño de la imagen. Con el fín de eliminar una parte de estos códigos se efectuó un pulimento mayoritario (elemento 5x5), seguido de una reconstrucción multiclases utilizando una erosión de tamaño 3 con un elemento 5x5 como marcador (imagen limpia).

TABLA 1

	primera reunión			imagen en bruto		imagen limpia		codific.	codific.
códigos	clases	recodif.	códigos	# pixeles	porcent.	# pixeles	porcent.	final	interpret.
0	4	0	agua	1.279.491	23,72	1.281.558	23,75	0	4
1	0=11	1	1	121.332	2,25	122.655	2,28	1	11
2	1	2	2	258.892	4,80	261.414	4,84	2	1
3	1+0	3	3	104.842	1,94	103.629	1,92	3	
4	2	4	4	377.621	7,00	383.066	7,10	4	2
5	2+0	5	5	138	0,00				
6	2+1	6	6	114.427	2,12	109.643	2,03	5	
7	2+(1+0)	7	7	545	0,01	408	0,01		
8	3	8	8	54.541	1,01	50.926	0,94	6	3
16	5	9	9	398.808	7,39	413.792	7,67	7	5
17	5+0	10	10	235	0,00				
18	5+1	11	11	12.720	0,24	9.551	0,18	8	
19	5+(1+0)	12	12	275	0,00	375	0,00		
20	5+2	13	13	106.915	1,98	96.096	1,78	9	
22	5+(2+1)	14	14	1.268	0,02	794	0,01		
24	5+3	15	15	21	0,00				
32	6	16	16	310.871	5,76	319.696	5,93	10	6
33	6+0	17	17	19	0,00				
34	6+1	18	18	657	0,01	213	0,00		
48	6+5	19	19	64.572	1,20	55.630	1,03	11	
64	7	20	20	423.344	7,85	428.234	7,94	12	7
72	7+3	21	21	13	0,00				
80	7+5	22	22	80	0,00				
96	7+6	23	23	156.762	2,90	151.044	2,80	13	12
124	7+6+5+3+2	24	24	79	0,00				
128	9	25	25	367.083	6,80	361.353	6,70	14	9
130	9+1	26	26	114	0,00				
136	9+3	27	27	567	0,01	425	0,01		
144	9+5	28	28	47	0,00				
160	9+6	29	29	135	0,00				
192	9+7	30	30	34	0,00				
	10		32	386.062	7,16	388.234	7,20	15	10
	10+3		40	9	0,00				
	10+(5+(2+1)		46	638	0,01	613	0,01		
	10+6		48	3.864	0,07	3.791	0,07		
	10+7		52	150.212	2,78	148.567	2,76	16	
	10+(7+6)		55	2.153	0,03	2.163	0,04		
	nubes		64	44.649	0,83	53.256	0,99	17	8
	nub+0		65	4.193	0,07	4.557	0,08	17	
	nub+1		66	1.071	0,02	1.110	0,02	17	
	nub+(1+0)		67	590	0,01	269	0,00	17	
	nub+2		68	1.039	0,02	1.008	0,02	17	
	nub+(2+1)		70	403	0,01	406	0,01	17	
	nub+3		72	830	0,02	741	0,01	17	
	nub+5		73	1.089	0,02	693	0,01	17	
	nub+6		80	7.312	0,13	5.862	0,10	17	
	nub+(6+5)		83	23	0,00				
	nub+7		84	916	0,02	566	0,01		
	nub+9		89	14	0,00				
	nub+10		96	5.403	0,10	5.136	0,10	17	
	nub +10+7		116	39	0,00				
	no codific.		128	627.972	11,64	627.462	11,63	18	13

En la imagen limpia ciertos códigos correspondientes a mezclas de clases han desaparecido, otros han quedado pero su representación ha disminuido, en cambio otros tienen una representación significativa. Con el fin de simplificar la representación de esta imagen se efectúa una codificación final, cuyo resultado es la **Fig. # 10**. Para esta codificación se tomaron en cuenta solo los códigos cuyos porcentajes eran mayores a 0,10% .

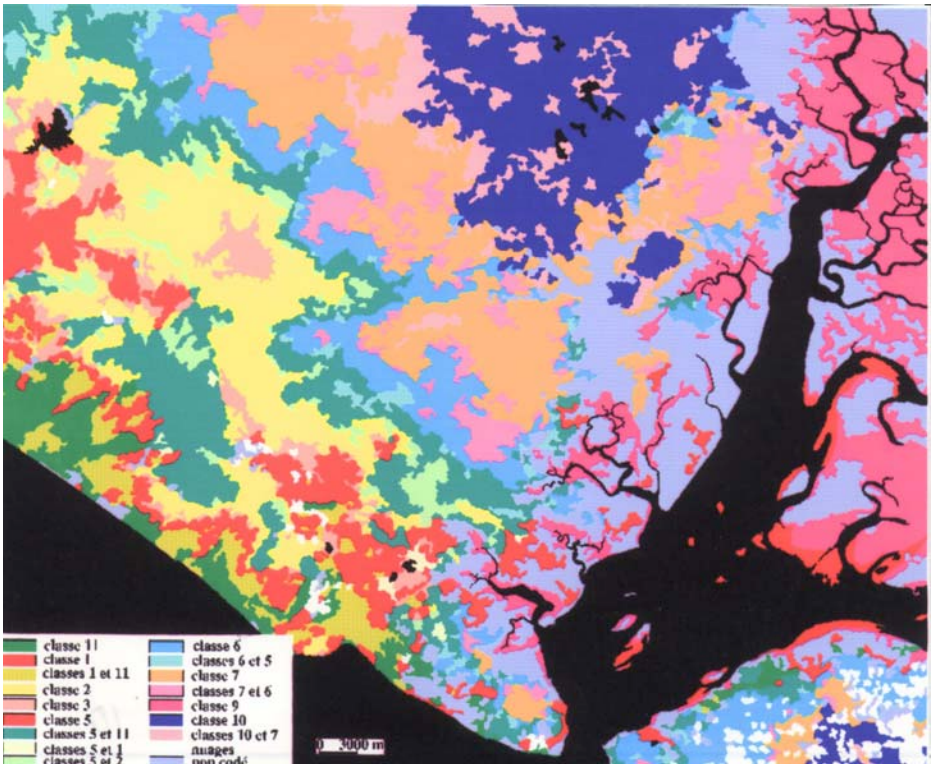


Figura # 10. Mapa automático de la imagen Landsat proveniente de la clasificación por *Nuées Dynamiques* de la Fig. # 8.

Cartografía geológica con la Clasificación de *Nuées Dynamiques*

La imagen limpia, obtenida anteriormente mediante el método automático descrito, contenía mezclas de clases que se interpretaron en términos geológicos. Después de esta operación se dio a la imagen un código interpretado que permitió obtener el mapa geológico preliminar **(Fig. # 11).**

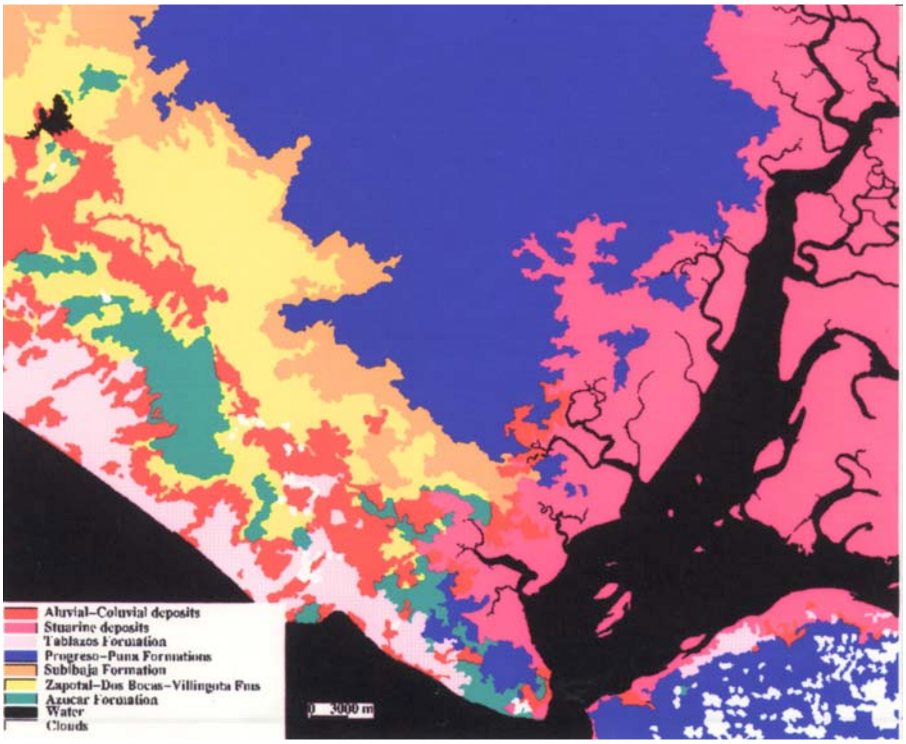


Figura # 11. Mapa geológico de la imagen Landsat proveniente de la interpretación del mapa automático de la Fig. # 10

Cartografía automática con la Clasificación de *Media Euclidiana*

El procedimiento es muy parecido al descrito anteriormente y todo el proceso se encuentra resumido en la **TABLA 2**, solo se debe acotar que a las clases reunidas en la imagen en bruto, se les aplicó un pulimento mayoritario y una reconstrucción multiclases con una erosión de tamaño 5, obteniéndose de esta manera la imagen limpia a la cual se le efectuó una codificación final, cuyo resultado es la **Fig. # 12.** Para esta codificación igualmente se tomó en cuenta los porcentajes mayores a 0,10 % .

TABLA 2

	primera reunión			imagen en bruto		imagen limpia		código	
códigos	clases	recodific.	códigos	# de pixeles	porcent.	# de pixeles	porcent.	final	interpret.
0	6	0	agua	1.279.491	23,72	1.282.451	23,77	0	6
1	1	1	1	454.394	8,42	454.805	8,43	1	1
2	3	2	2	67.306	1,25	53.682	1,00	2	3
3	1+3	3	3	6.420	0,12	2.102	0,04		
4	4	4	4	507.930	9,41	517.523	9,59	3	4
5	4+1	5	5	32	0,00				
8	5	6	6	82.458	1,53	87.546	1,62	4	5
16	7	7	7	349.700	6,48	364.379	6,75	5	7
32	8	8	8	24.316	0,45	25.358	0,47	6	8
40	8+5	9	9	9.583	0,18	8.123	0,15		
48	8+7	10	10	2.451	0,05	1.442	0,03		
64	9	11	11	630.776	11,69	648.601	12,02	7	9
65	9+1	12	12	309	0,00				
68	9+4	13	13	259.267	4,80	255.619	4,74	8	
128	10	14	14	522.674	9,69	548.331	10,16	9	10
129	10+1	15	15	697	0,01				
130	10+3	16	16	6	0,00				
132	10+4	17	17	645	0,01				
136	10+5	18	18	15	0,00				
144	10+7	19	19	152.471	2,83	138.714	2,57	10	
160	10+8	20	20	269	0,00				
192	10+9	21	21	76.852	1,42	60.067	1,11	11	
196	10+9+4	22	22	643	0,01				
	11		32	253.011	4,69	279.666	5,18	12	11
	11+1		33	467	0,01				
	11+4		36	1.461	0,03	350	0,01		
	11+5		38	42.612	0,79	39.557	0,73	13	
	11+7		39	59.613	1,10	51.242	0,95	14	
	11+8		40	29.798	0,55	23.251	0,43	15	
	11+8+5		41	1.304	0,02				
	11+8+7		42	439	0,01				
	11+9		43	2.463	0,04	6.562	0,12		
	11+9+4		45	189	0,00				
	11+10		46	20.435	0,38	14.254	0,26	16	
	11+10+7		51	1.600	0,03				
	11+10+9		53	111	0,00				
	nubes		64	37.979	0,70	41.272	0,76	17	
	nub+1+3		67	13.751	0,25	11.482	0,21	17	
	nub+5		70	3.718	0,07	2.546	0,05	17	
	nub+7		71	815	0,02	844	0,01	17	
	nub+9		75	9.629	0,18	6.242	0,12	17	
	nub+(9+4)		77	15	0,00				
	nub+10		78	522	0,01				
	nub+(10+7)		83	36	0,00				
	nub+11		96	707	0,01				
	nub+(11+5)		102	408	0,01				
	no codific.		128	477.150	8,84	486.929	9,02	18	

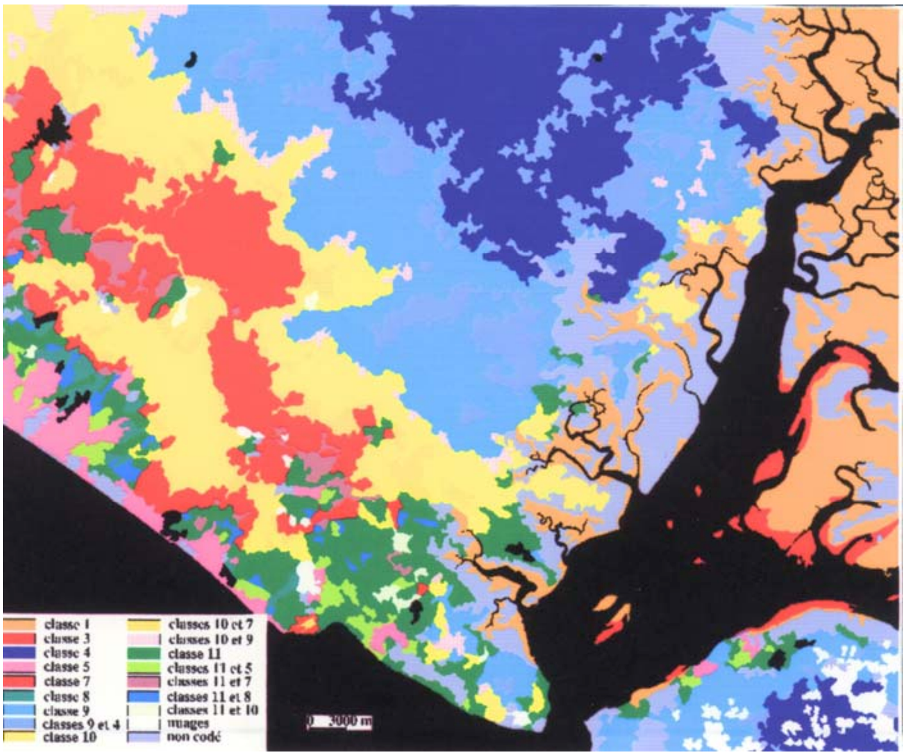


Figura # 12. Mapa automático de la imagen Landsat obtenido de la clasificación por *Media Euclidiana* de la Fig. # 9

Cartografía geológica con la Clasificación de *Media Euclidiana*

Tomando como base la imagen limpia obtenida en el proceso anterior se interpretó geológicamente y se la codificó obteniéndose el mapa geológico preliminar **(Fig. # 13).**

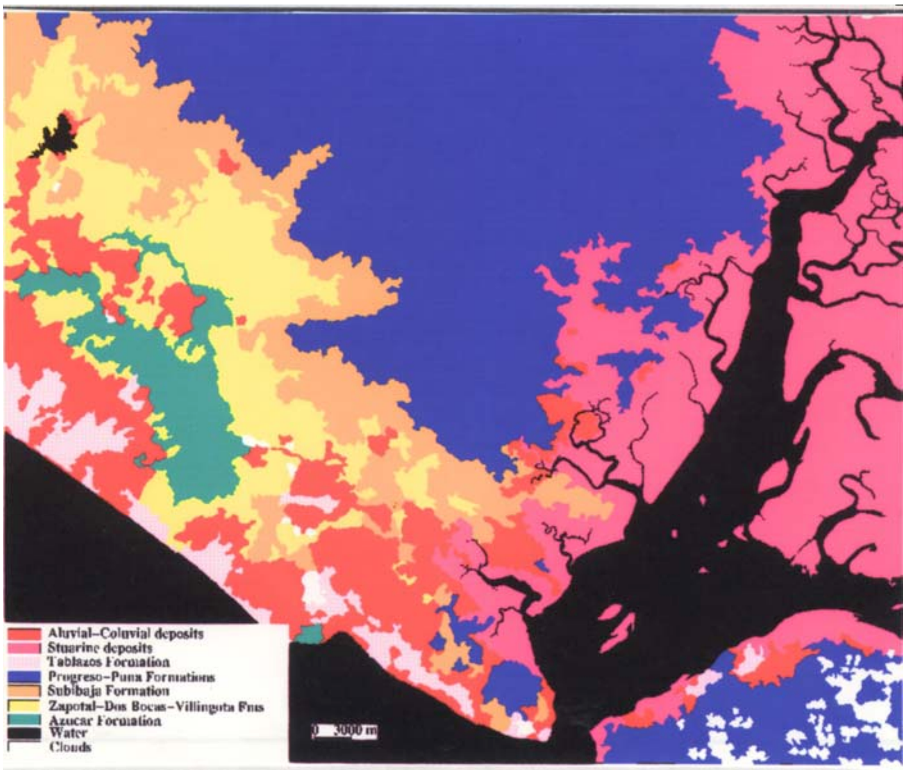


Figura # 13. Mapa geológico de la imagen Landsat obtenido de la interpretación del mapa automático de la Fig. # 12

CONCLUSIONES

El Análisis de las composiciones en color del extracto de la imagen Landsat TM realizadas por los diferentes tratamientos, permite señalar las composiciones TM 3,4,5 Y ACP3,2,1 como la que destacan mejor los aspectos geológicos de litología y estructuras de la zona estudiada. En el primer caso, la utilización de un canal visible y dos de infrarrojo es una buena combinación para resaltar aspectos relacionados con la litología. En el segundo caso, la utilización de las componentes principales con la combinación realizada, destaca de manera muy marcada las estructuras de pliegues y lineamientos en el contraste entre los colores verde y rojo, es decir entre las ACP1 y ACP2 respectivamente.

Se comprobó que la ACP2 es el tratamiento que mejor destaca los aspectos geológicos estructurales, por lo que se escogió este canal para la aplicación de los diferentes filtros de tipo espacial.

Entre los filtros que no utilizan la transformada de la imagen, el que dio mejores resultados fue el filtro de paso alto de pratt 3x3 tipo I que resalta muy bien los lineamientos y pliegues de la zona estudiada.

El filtraje con la transformada de Fourier presentó ventajas y desventajas relacionadas con la aplicación del filtro en imágenes pequeñas de 512x512 pixeles.

El análisis de la clasificación no dirigida por Nuées Dynamiques á centres móviles a partir de ACP1 y ACP" y de la clasificación dirigida por Media Euclidiana, a partir de TM3, TM5 y TM4, ambas con 11 clases, permite decir que los métodos dan resultados generales similares y que las diferencias en las extensiones de las clases que se notan en las imágenes se deben a la forma en que se seleccionan las firmas espectrales, automáticamente en la primera y mediante indicación en la segunda.

Las diferencias entre las clases de lo mapas automáticos de la imagen, proviene de las diferencias que se observaron entre las clasificaciones que se tomaron como base para aplicar la morfología matemática. En cambio, los mapas geológicos preliminares, aunque toman como base los mapas automáticos anteriores, solo presentan pocas diferencias porque se ha utilizado un conocimiento de campo básico.

REFERENCIAS

1. S. Benitez, "Evolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-tertiaire" (Thèse de doctorat, Univ. J. Fourier-Grenoble, 1995), 221 p.

2. E. Chuvieco, Fundamentos de Teledetección Espacial (Ediciones RIALP, S.A., Madrid, 1990), 453 p.

3. G. Laubacher, E. Navarrete, Teledetección y Procesamiento de Imágenes (Tercera Revisión, ESPOL, 2001), 111 p.

4. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Mapa Geológico Nacional de la República del Ecuador – Escala 1:1'000.000 (Segunda Aproximación, 1982).