



T
5.26.982
GUE

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“APLICACION 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”**

**TESIS DE GRADO
MODALIDAD TRABAJO PROFESIONAL**

Previa la obtención del Título de

INGENIERO EN GEOLOGÍA

Presentado por:

RAMON GUERRA ROBALINO



GUAYAQUIL – ECUADOR

2005

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mis padres y hermanos, así como a mis amigos que supieron inspirarme para llevar adelante el desarrollo de la presente Tesis de Grado.

A mi querido y entrañable compañero de aula y profesor Edison Navarrete Cuesta.

A mi querida Alma Mater la Escuela Superior Politécnica del Litoral que me dio una instrucción de alta calidad que me ha permitido desenvolverme en los más variados campos del hacer profesional.

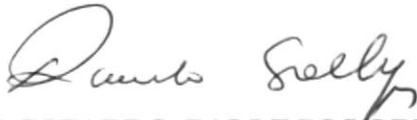
A la memoria del Ing. Gustavo Galindo Velasco que forjó grandes valores que subsisten en mi espíritu al servicio de la sociedad ecuatoriana y en especial de la ESPOL.

Al Dr. Moisés Tacle Galárraga, a mis queridos amigos los Terán Vasconez y Terán Naranjo, a mis profesores, a mis compañeros de estudios y a los de la ESPOL en general.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi querido y adorable padre Ramón Guerra Campelo, a mi querida madre Guadalupe Robalino de Guerra, a mi entrañable hermano Rolando Guerra Robalino, a mis hermanos Patricia, Piedad, Carolina, Mariana y Maria del Carmen, a mis cuñados, a mis sobrinos, a mi esposa Leticia y a mi hijo Christian.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



ING. RICARDO GALLEGOS ORTA

DECANO FICT



ING. EDISON NAVARRETE

DIRECTOR DE TESIS

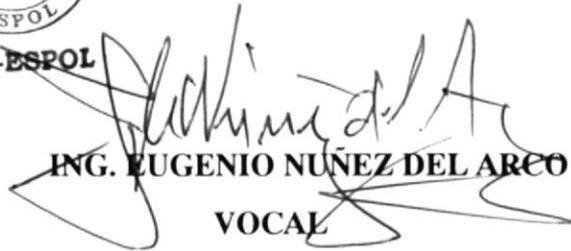


CIB-ESPOL



ING. GASTÓN PROAÑO

VOCAL



ING. EUGENIO NUÑEZ DEL ARCO

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

RAMÓN GUERRA ROBALALINO

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.



CIB-ESPOL

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Ubicación del Área de Estudio	1
2. GENERALIDADES SOBRE LA TELEDETECCIÓN Y SU APLICACIÓN EN GEOLOGÍA	3
2.1 Teledetección: Definición	3
2.2 Antecedentes	3
2.3 Las Ventajas de la Teledetección	5
2.4 Informaciones que Proporciona la Teledetección	6
2.5 Elementos Identificables por Teledetección	6
2.6 Las Aplicaciones	7
2.7 Las Aplicaciones en Geología	9
2.8 El Espectro de Radiación Electromagnética	10
2.9 Los Procesos Físicos del Color	14
3. LA TELEDETECCIÓN APLICADA AL MAPEO GEOLÓGICO	19
3.1 Programas, Equipos y Datos de la Imagen	19
3.2 Tratamientos de la Imagen y Resultados	19
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
ANEXOS	43
BIBLIOGRAFÍA	48

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Este trabajo profesional 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.

1.2 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.

1.3 Ubicación del Área de Estudio (Fig. # 1)

El área de estudio comprende una zona aproximada limitada:

en el noroeste por la Represa Azúcar,

en el noreste por la ciudad de Guayaquil, y

en el sur por la población de Posorja y la parte septentrional de la Isla Puná.

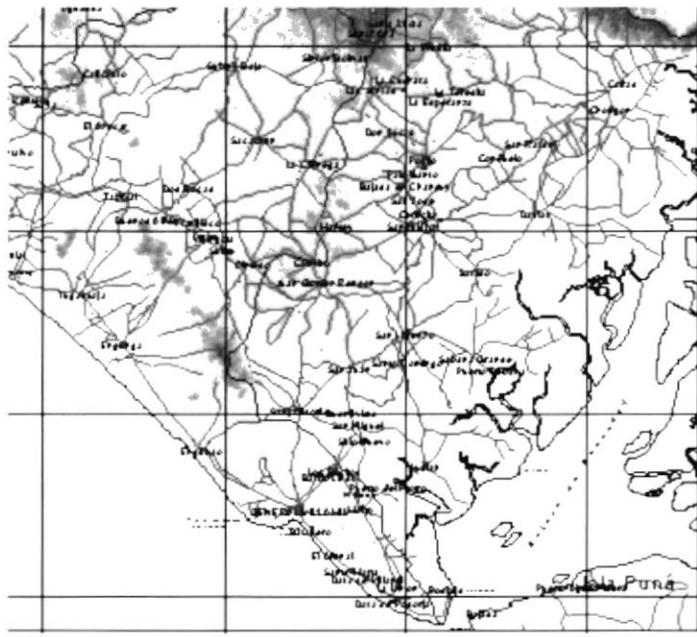


Figura # 1. Ubicación del Área de Estudio



CIB-ESPOL

2. GENERALIDADES SOBRE LA TELEDETECCIÓN Y LA APLICACIÓN EN GEOLOGÍA

2.1 Teledetección: Definición

Teledetección o detección remota, sensores remotos: literalmente corresponde a cualquiera detección a distancia. Prácticamente, cuando se habla de teledetección se piensa en la teledetección espacial que es la *tecnología* relacionada con la adquisición de datos espaciales analógicos y digitalizados mediante satélites para la observación y el estudio de procesos naturales y artificiales en el ambiente terrestre, oceánico y atmosférico de nuestra planeta. Sin embargo, la teledetección no se limita a la “**adquisición de datos**”, sino que comprende una segunda fase “**el procesamiento**” y una tercera que desemboca sobre la “**confección de documentos utilizables por los usuarios**”. Todo esto queda ilustrado en el esquema que muestra los componentes principales de un sistema de teledetección (Fig. # 2).

2.2 Antecedentes

Volar para tener una visión desde el cielo ha sido un sueño de los hombres desde hace mucho tiempo como se puede vislumbrar con la leyenda de Icaro. Desde luego la historia humana se ha sembrado de ensayos más y más exitosos.

La teledetección espacial se inició realmente a fines de los años 50 con el vuelo en el espacio del cosmonauta ruso Gagarine en el satélite **SPUTNIK**, seguido en 1960 por los satélites **TIROS** de Estados Unidos. Sin embargo, hubo que esperar el lanzamiento del primer satélite de observación de la Tierra, **LANDSAT I** seguido por **LANDSAT II** y **LANDSAT III**, con el sensor **MSS** con 4 canales en el Visible y el Infra-Rojo proximal en 1972, y con imágenes digitalizadas en una forma codificada y continua, para entrar en la era de los estudios de los procesos naturales y artificiales en la superficie de la Tierra. Estos satélites

fueron reemplazados a partir de 1981 por una nueva generación **LANDSAT IV** y **V** que, además del MSS, llevaron un sensor mucho más sofisticado, el **Thematic Mapper (TM)** con 7 canales en el Visible y el Infra-Rojo y una resolución espacial, espectral y radiométrica muy mejorada. Los satélites franceses de observación terrestre **SPOT I** lanzado en 1986, **SPOT II** en 1990 y **SPOT III** en 1993 trajeron ciertas mejoras referentes a la familia Landsat.

El procesamiento de imágenes digitalizadas empezó a ser desarrollado a principios de la década de los 60 con fines militares en los USA y otros países, antes de extenderse rápidamente al dominio civil.

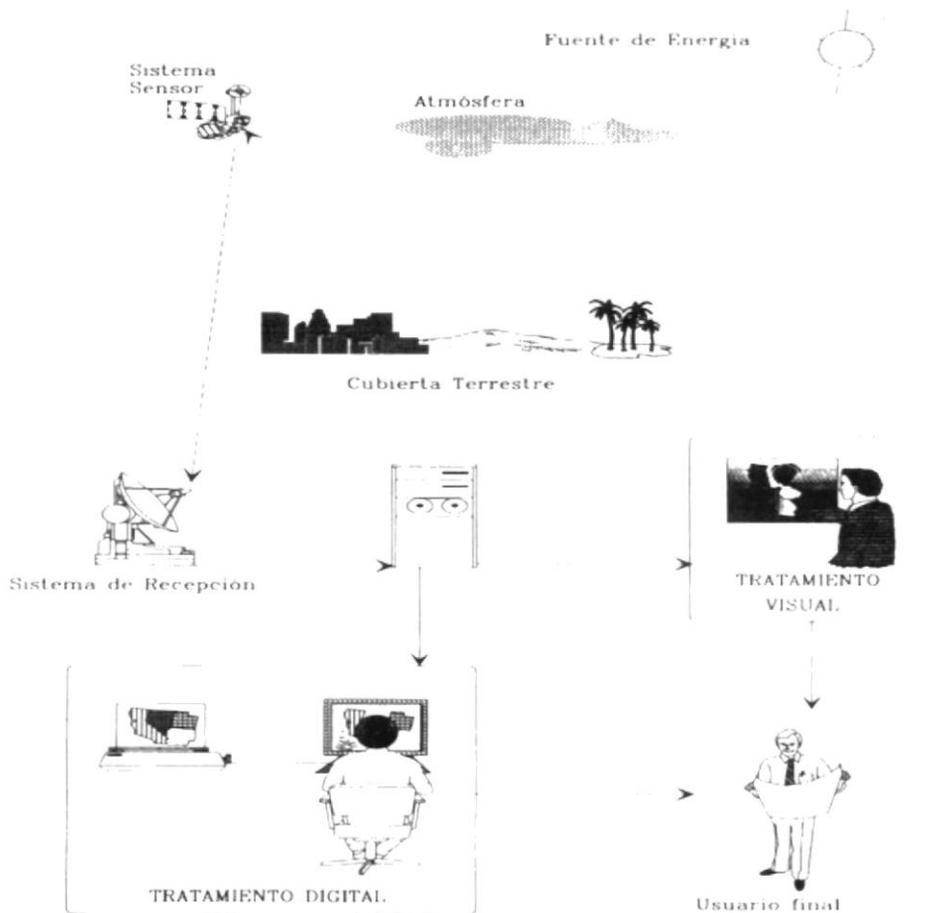


Fig. 1.1 - Componentes de un sistema de teledetección

FIGURA # 2. Componentes de un Sistema de Teledetección. Tomada del Libro de Emilio Chuvieco



CIB-ESPOL

2.3 Las Ventajas de la Teledetección

En comparación con la visión humana y la clásica observación a nivel del suelo o por aerofotografías, la teledetección espacial presenta características o ventajas específicas con la posibilidad de:

* **una visión panorámica que permite obtener imágenes de amplia superficie:** 60km x 60km con SPOT, 185 km x 185km con LANDSAT y casi la mitad de la esfera terrestre con METEOSAT.

* **adquirir, gracias a captadores específicos, informaciones en diversos segmentos del espectro electro-magnético,** dentro y fuera del dominio del visible (Visible, Infra-Rojo, Térmico, Micro-Ondas), sobre toda la superficie de la tierra y del mar, lo que permite acceso a datos hasta ahora no medibles o zonas poco accesibles. Las respuestas radiométricas, cuando tienen valores diferentes en los segmentos del espectro facilitan la determinación de la naturaleza de los elementos en la superficie de la tierra. La teledetección espacial se está volviendo ahora una fuente de información indispensable e incuestionable de los Sistemas de Información Geográfica. Es la forma más cómoda, rápida y económica de obtener datos primarios o intermedios, y continuos sobre la evolución de zonas urbanas, agrícolas, sobre problemas de contaminación y el ambiente terrestre, en general.

* **realizar sobrevuelos regulares de una misma región (repetitividad)** o de la Tierra, lo que facilita su vigilancia ocasional o continua. Con SPOT, hay ahora la posibilidad de programar parámetros de sobrevuelo: fecha, ángulo de toma,

Las limitaciones se deben principalmente a una resolución nítidamente más baja que en las fotografías aéreas y a un costo todavía alto, cosa que sin embargo, está rápidamente evolucionando en un sentido favorable.

NOTA : Los progresos de la teledetección, no hubieran sido posibles sin el extraordinario desarrollo de las tecnologías aero-espaciales e informáticas. Esta última, con el registro digitalizado de los datos, permitió el procesamiento de las enormes cantidades de datos recogidos por los satélites y dieron un fantástico impulso a la teledetección.

2.4 Informaciones que Proporciona la Teledetección

* **Informaciones radiométricas:** Mide el valor de la reflectividad de los elementos en una banda espectral (ND de los pixels)

* **Informaciones espectrales:** Sobre el valor de la reflectividad de los elementos en varias bandas espectrales: respuesta espectral.

* **Informaciones espaciales:** Sobre la geometría (tamaño, forma, superficie, ...) y textura de los elementos: estas informaciones están estrechamente ligadas a la resolución espacial variable entre 80 m para MSS de Landsat a 10 m para el canal Pancromático de Spot... Una novedad introducida por Spot es la estereografía que autoriza un diagnóstico de la topografía de gran fineza, muy apreciable en las Ciencias de la Tierra.

* **Informaciones temporales:** mediciones sucesivas de la respuesta espectral para estudiar la evolución temporal de un fenómeno, objeto,...

* **Informaciones altimétricas:** mediciones estereoscópicas para Modelos Numéricos de Terreno (MNT).

2.5 Elementos Identificables por Teledetección

Salvo raras excepciones, la teledetección no penetra en el subsuelo y solo permite observar objetos dispuestos en la superficie de la Tierra. Bajo ciertas condiciones (fondo claro, agua transparente), puede percibir elementos

dispuestos en el agua hasta pocas decenas de metros de profundidad. En la atmósfera, sin embargo, se llegan a identificar bastante bien ciertos elementos que la componen (nubes, gases, aerosoles).

Los elementos identificables mediante las respuestas espectrales corresponden a dos grupos principales:

*** Elementos artificiales** tales como:

- * Ciudades, pueblos, edificios
- * redes ferroviarias, carreteras, canales, aeropuertos
- * otras estructuras antrópicas.

*** Elementos naturales** tales como:

- * *Vegetales*: bosques, cultivos, pastizales, hortalizas, etc ...
- * *Agua*: océanos, islas, procesos costa / tierra, lagos, ríos, etc ...
- * *Atmósfera*: nubes, gases, aerosuelos, temperatura, etc...
- * *Minerales*: suelos, rocas, elementos estructurales.

2.6 Las Aplicaciones (Fig. # 3)

Hoy en día, hay cantidad de aplicaciones en los dominios de las Ciencias de la Tierra, en Hidrología, Oceanografía, Meteorología, Agronomía, Arqueología, etc..

- * Inventario del medio ambiente y estudios de impacto ambiental,
- * Estimación del crecimiento urbano y tipo de ocupación del suelo,
- * Cartografía de la cobertura vegetal del suelo (biomasa),
- * Inventarios forestales, de cultivos por especies, de pastizales, etc..,
- * Cartografía de efectos de la sequía, de la deforestación, de las áreas quemadas,
- * Estudios hidrológicos,

- * Oceanográficos,
- * Meteorológicos.

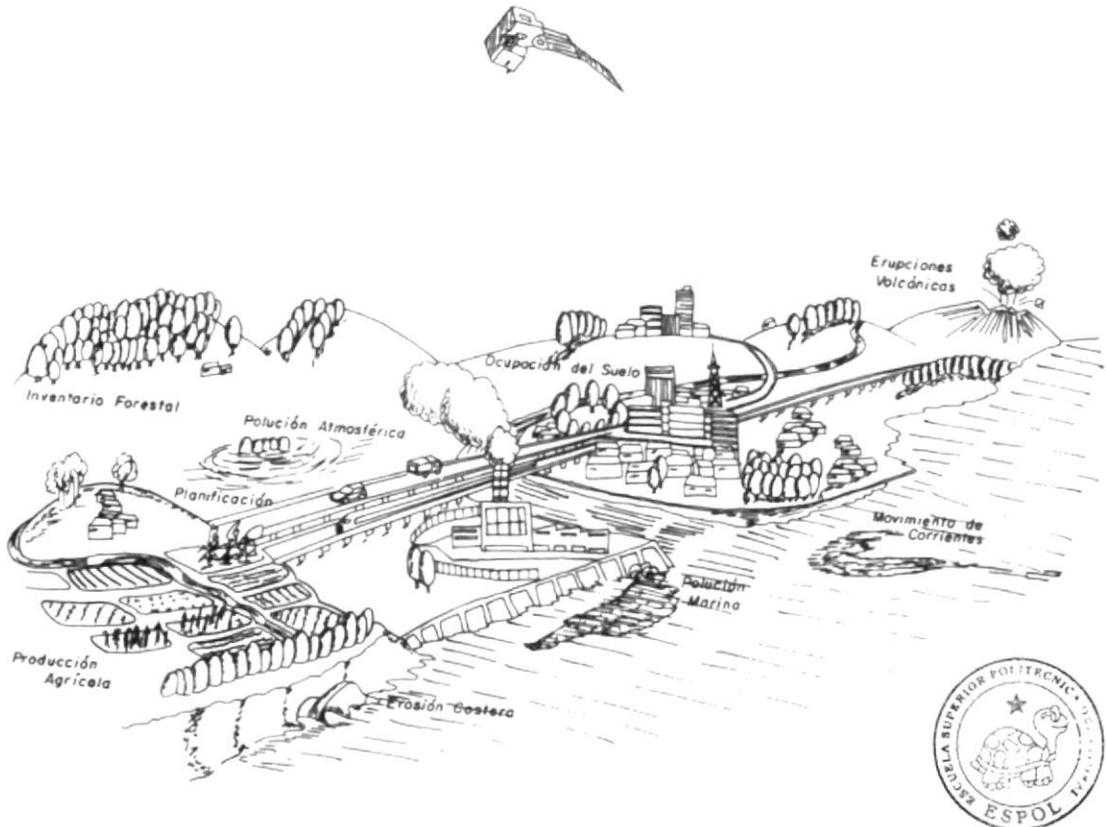


Fig. 1.4 - Aplicaciones de la teledetección espacial (Adaptado de NASDA, 1987) **CIB-ESPOL**

FIGURA # 3. Aplicaciones de la Teledetección Espacial. Tomada del Libro de Emilio Chuvieco

2.7 Las Aplicaciones en Geología

En Geología hay aplicaciones tales como:

mapeo litológico:

- formaciones sedimentarias, volcánicas, plutónicas, metamórficas;

mapeo tectónico:

- fracturación: diaclasas, fallas y planos de ruptura de naturaleza variada,
- lineamientos mal discernibles, difícilmente interpretables, reflejando muchas veces rupturas antiguas en profundidad.
- fallas activas,

búsqueda de estructuras circulares (calderas, cráteres de meteoritos, diapiros, etc...)

mapeo de la acción geomorfológica

- formas de erosión glacial, aluvial, etc...
- acumulaciones glaciales, aluviales, lacustres, eólicas, etc...
- subsidencia y sublevantamiento,



mapeo de las zonas de interés económico:

- exploración minera y petrolífera, canteras, geotecnia, etc...

prevención de riesgos naturales.

Para detectar un objeto, los sensores remotos utilizan la radiación energética reflejada o emitida por este objeto: dicha radiación se conoce bajo el nombre de "**respuesta radiométrica**" o también de "**firma o signatura espectral**". El concepto de "respuesta radiométrica" se ha vuelto muy fecundo y eficaz y es el que ha permitido el considerable desarrollo de la teledetección y del procesamiento de imágenes. En contraposición, el desarrollo de la teledetección

favoreció un mejor conocimiento del fenómeno físico que da nacimiento a la respuesta radiométrica, el "espectro de radiación electromagnética" del cual se habla a continuación.

2.8 El Espectro de Radiación Electromagnética (Fig. # 4)



CIB-ESPOL

Naturaleza y descripción

El conjunto de las radiaciones emitidas en el Universo y que llegan a la Tierra, cuya fuente principal es el Sol, corresponde al Espectro de Radiación Electro-Magnética (**EREM**). Este Espectro electro-magnético:

- * se desplaza a la velocidad de la luz (cerca de 300.000 km / s),
- * corresponde a ondas, con ancho rango de dimensión, que se extienden desde menos de 0.01 nm (1 nanómetro = 10^{-9} m) hasta varios metros, y
- * comprende las ondas visibles por nuestro ojo que van de 0.39 μ m hasta 0.70 μ m (1 μ m = 10^{-6} m), es decir del Violeta al Rojo, con mayor adaptación del ojo a la luz del Sol en las longitudes cercanas de 0.58 μ m.

La atmósfera terrestre solo deja pasar parte del EREM: las ondas Ultra-Violetas son absorbidas por el Ozono (O_3). En el Visible hay 3 bandas de fuerte absorción debido al Ozono, al vapor de agua (H_2O) y el Oxígeno (O_2), ubicadas respectivamente a 0.6 μ m, 0.71 μ m y 0.76 μ m. Se conocen otras bandas de absorción en el Infra-Rojo;

* **Los dominios del EREM utilizables en Teledetección** corresponden a longitudes que se ubican:

- del cercano **Ultra-Violeta** al cercano **Infra-Rojo** (0.35 μ m a 1.1 μ m),
- en el **Infra-Rojo mediano** (1.55 μ m a 4.2 μ m),
- en el **Infra-Rojo térmico** (8 μ m a 14 μ m),

- en las **micro-ondas** (0.8 mm a 1 m).

Principios y leyes de la radiación electromagnética

* **Una onda incidente** (ϕ_i) sobre un objeto es absorbida (ϕ_a), transmitida (ϕ_t) o reflejada (ϕ_r) tal que:

$$\phi_a + \phi_t + \phi_r = 1$$

* **Un cuerpo que absorbe todas las radiaciones** del espectro electro-magnético y las re-emite integralmente es llamado "**CUERPO NEGRO**" y en este caso: $\phi_a = 1$ y $\phi_t = \phi_r = 0$.

* **Ley de Planck:** cualquier cuerpo cuya temperatura es superior al 0 absoluto (0° Kelvin = -273 grados Celsius) emite energía infra-roja en función de la amplitud de onda.

* **Ley de Wien:** cuando más elevada es la temperatura de un cuerpo, más cortas son las ondas que emite este cuerpo.

Como consecuencia de esta ley:

- **la radiación máxima del Sol** definido como un cuerpo negro de 6000K, se ubica en la banda del Verde (0.48 μm) donde la **reflexión** tiene un rol **predominante**;

- **la radiación máxima de la Tierra**, considerada como un cuerpo negro de 300K, se ubica en la banda del **Infra-Rojo** (10 μm), donde la **emisión térmica** es **predominante**. La longitud de onda donde la emisión térmica empieza a ser más importante que la reflexión se ubica cerca de 4 μm .

* **Ley del inverso de los cuadrados:** la intensidad de la radiación recibida por el captor es función del inverso de los cuadrados de la distancia entre el paisaje y el satélite.

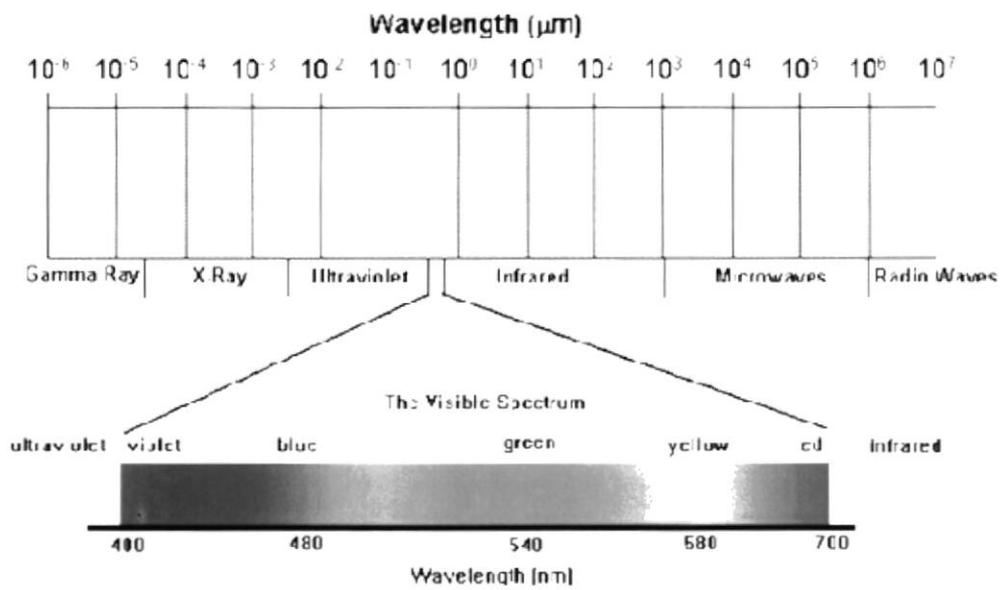


FIGURA # 4. Espectro electro-magnético

Términos y parámetros utilizados en teledetección

- * **Energía radiante (Q):** total de energía radiada en todas las direcciones en julios (J),
- * **Densidad radiante (W):** total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen en julios por metro cúbico (J/m^3),
- * **Flujo radiante (Φ):** total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo, en vatios (W),
- * **Emitancia o exitancia radiante (M):** total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo, en vatios por metro cuadrado (W/m^2),
- * **Irradiancia radiante (E):** total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. También energía incidente (W/m^2),
- * **Intensidad radiante (I):** total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω , tridimensional), se mide en vatios por estereo-radian (W/sr),
- * **Radiancia (L):** total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida, en vatios por metro cuadrado y estero-radian ($W/m^2 sr$),
- * **Radiancia espectral (L_λ):** total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido. El calificativo de espectral refiere a una determinada longitud de onda ($W/m^2 sr \mu m$),
- * **Emisividad:** relación entre la emitancia de una superficie (M) y la que ofrecería un emisor perfecto denominado **cuerpo negro** a la misma temperatura (M_n),

* **Reflectividad (?)**: relación entre el **flujo incidente** y el **flujo reflejado** por unidad de superficie (también se denomina **reflectancia**),

* **Absortividad (?)**: relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie,

* **Transmisividad (?)**: relación entre el flujo incidente y el transmitido por unidad de superficie.

* **Reflexión especular**: reflexión sobre una superficie unida, sin asperezas y sobre la cual todo el flujo es reflejado (Ley de Descartes).

* **Reflexión difusa (Lambertiana)**: reflexión sobre una superficie irregular y sobre la cual el flujo es reflejado en todas las direcciones.

2.9 Los Procesos Físicos del Color

La visualización de los datos se puede realizar en blanco y negro o, mejor dicho, en niveles de gris (un solo canal) o en niveles de color que resulta de la combinación de varios canales (3 en general). El ojo separa más fácilmente los valores en colores que los que están en gris, y ofrece más posibilidades para la interpretación visual de imágenes.

El prisma de Newton (1666)



CIB-ESPOL

Newton mostró por primera vez que la luz del día del espectro visible (blanca) se puede separar en un espectro de luz coloreada (violáceo, azul, verde, amarillo, anaranjado, rojo) y que a su vez este mismo espectro de luz coloreado puede recomponerse en luz blanca. Con este descubrimiento, y con trabajos posteriores de otros científicos se demostró que la combinación (mezcla) de los colores rojo,

verde y azul (tricromía, R-G-B) que son los 3 colores primarios, permite obtener todos los otros colores.

La representación del color en plano (Fig. # 5)

La síntesis aditiva

Si proyectamos 3 círculos de luz roja, verde y azul (colores primarios puros) sobre un fondo blanco se obtiene 4 particiones en las cuales la superposición:

- del **rojo y verde** da color **amarillo**
- del **verde y azul** da color **azul-verde o Sian,**
- del **azul y rojo** da color **violáceo o magenta**
- del **rojo, verde y azul** (en el centro) da color **blanco**

Los colores amarillo, cian y magenta son colores **secundarios**.

La síntesis sustractiva

Al inverso, si entre una fuente de luz blanca y el ojo interponemos filtros superpuestos de colores secundarios vamos a obtener:

- el color **rojo** con los filtros **violáceo + amarillo,**
- el color **verde** con los filtros **amarillo + azul verde,**
- el color **azul** con los filtros **azul-verde + violáceo,**
- el color **negro** con los tres filtros **violáceo + azul-verde + amarillo** superpuestos y que paran la luz.

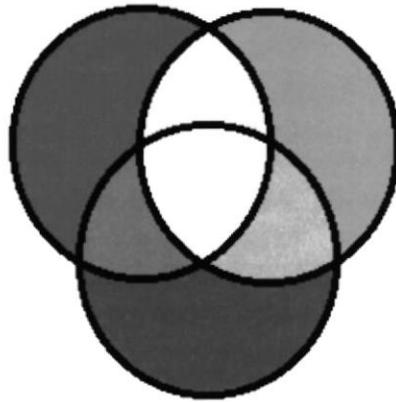


FIGURA # 5. Procesos de formación del color.



CIB-ESPOL

El círculo cromático

El círculo cromático permite una representación cómoda de los colores en un plano (Fig. 1). Sobre un círculo, los 3 colores primarios (rojo, verde, azul) se disponen en 0° , 120° y 240° de azimut mientras que los colores secundarios (amarillo, cian, magenta) se disponen a igual distancia entre los colores primarios, es decir en 60° , 180° y 300° de azimut. Hay la posibilidad de representar así toda una gama de colores, primarios, secundarios, terciarios, etc....

Sobre este círculo, 2 colores diametralmente opuestos se llaman "**colores complementarios**". Un color se anula (elimina) por un filtro de su color complementario

La representación del color en 3 dimensiones

Hay varios sistemas de representación de los colores en el espacio, siendo los más utilizados en procesamiento de imágenes:

- el sistema RGB (Rojo, Verde, Azul)

- el sistema HLS (Hue, Luminance, Saturation) o ITS (Intensidad, Tono, Saturación)

El sistema RGB

Es un sistema aditivo. El espacio de los colores está representado por un cubo unitario en R^3 cuyo origen $(0,0,0)$ es el negro y las tres componentes (vectores) de base son el rojo, el verde y el azul. Cualquier color se obtiene mezclando en proporciones convenientes tres componentes primarias. : una componente roja, una verde y una azul. Dicho color se asimila a un punto interior al cubo que está definido por sus tres coordenadas (r,g,b) .

La diagonal que une el color negro $(0,0,0)$ al color blanco $(1,1,1)$ corresponde a todos los niveles de gris (i,i,i) ; las otras esquinas del cubo definen los colores secundarios de la síntesis aditiva:

$(0,1,1)$: cian = verde + azul
 $(1,0,1)$: magenta = azul + rojo
 $(1,1,0)$: amarillo = rojo + verde

Al inverso, también se puede tomar el blanco como origen: el sistema se vuelve sustractivo y los colores usados son los mismos colores secundarios, se utilizan como base las técnicas de la impresión en color.

El sistema (o referencial) físico del color IHS (o HLS)

El espacio color puede definirse con un cono representando 3 propiedades físicas fundamentales:

- la **intensidad** o **luminosidad I** (energía) está representada por el eje del cono: varía del negro (mínimo) al blanco (máximo),

- el **tono h** (*teinte* en francés, *hue* en inglés) esta definido por un ángulo de rotación alrededor del eje L y varia de 0 (en el rojo) a 360 grados (pasando por el conjunto de los colores del arco iris: rojo, amarillo, verde, cyan, azul, magenta); corresponde a la amplitud de onda.

- **saturación S** corresponde a la distancia del eje principal L y de la pureza del color que varia de 0 (gris) a 100% (color puro).

Este sistema constituye una representación más natural que el sistema RGB y es frecuentemente utilizado para definir paletas numéricas de colores.

La representación de Munsell corresponde a este sistema.



CIB-ESPOL

3. LA TELEDETECCIÓN APLICADA AL MAPEO GEOLÓGICO

3.1 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.

3.2 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, polarización, 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. # 6), 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

TM3,5,4 (Fig. # 7) 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

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.

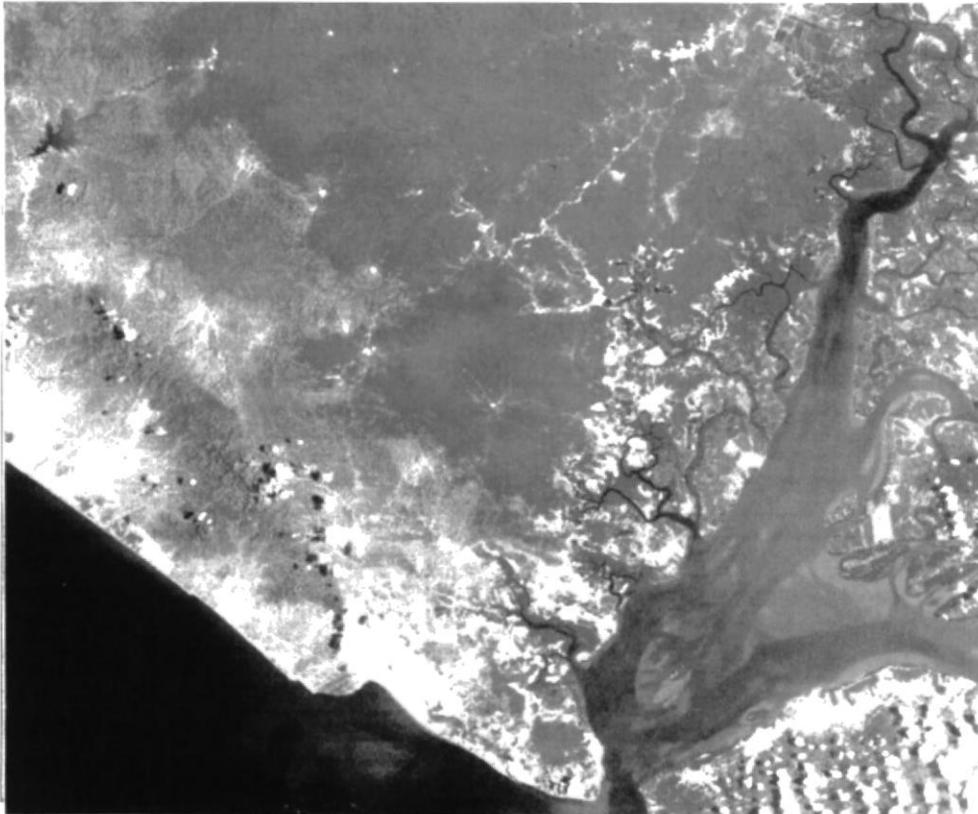


Figura # 6. Composición en color TM2,3,4

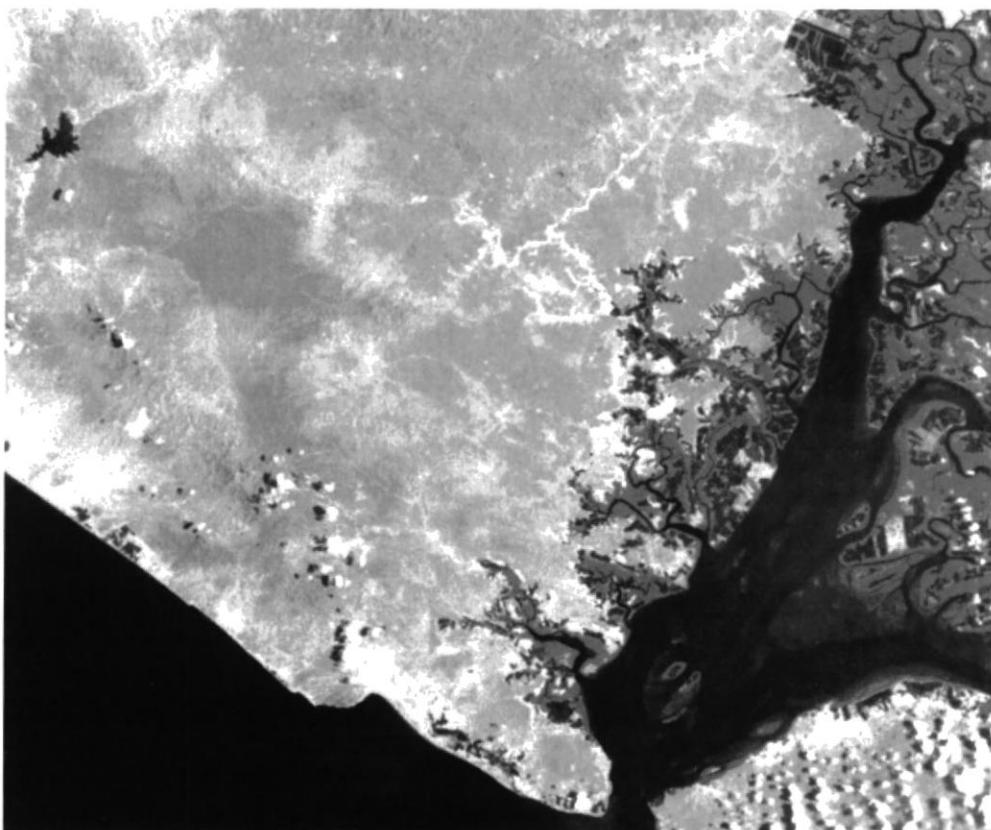


Figura # 7. Composición en color TM3,5,4



CIB-ESPOL

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**, 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. # 8)** tomándose los siguientes datos de límites de pixeles:

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

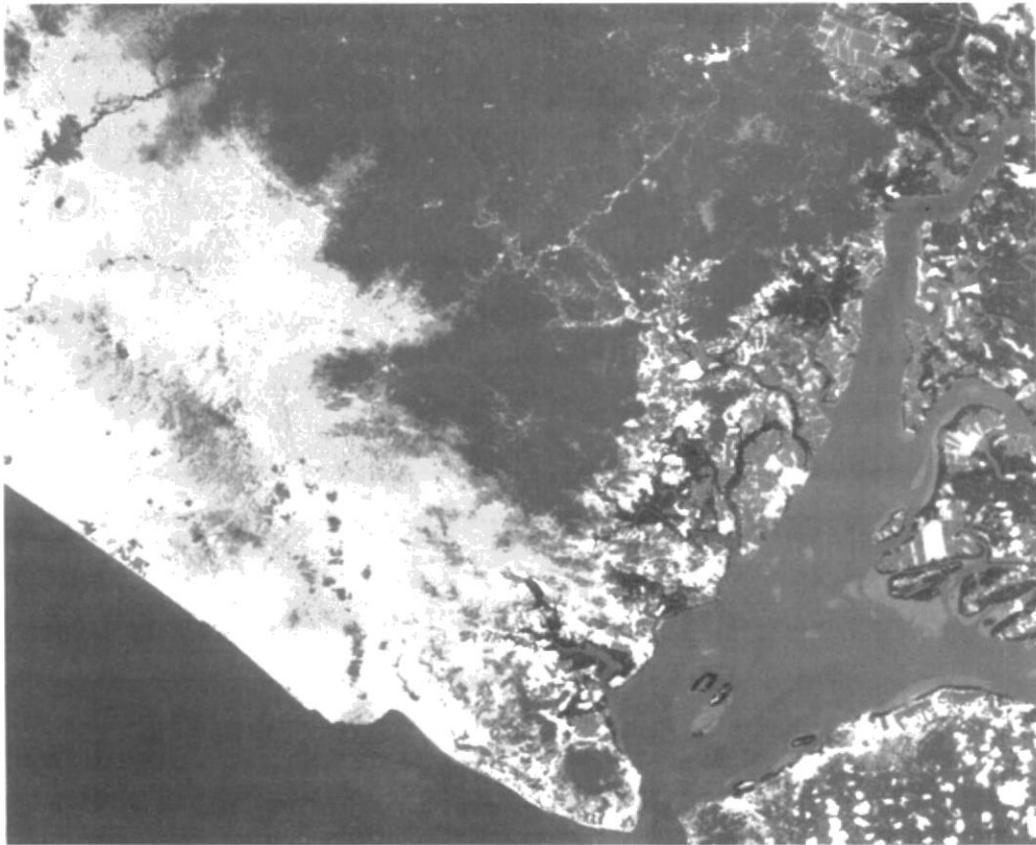


Figura # 8. Composición en color ACP3,2,1



CIB-ESPOL

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.



CIB-ESPOL

- **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 píxeles de la imagen ACP2, 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.# 9**) y luego se las pegó para obtener un mosaico de la imagen total (**Fig. # 10**).

Sistema ITS

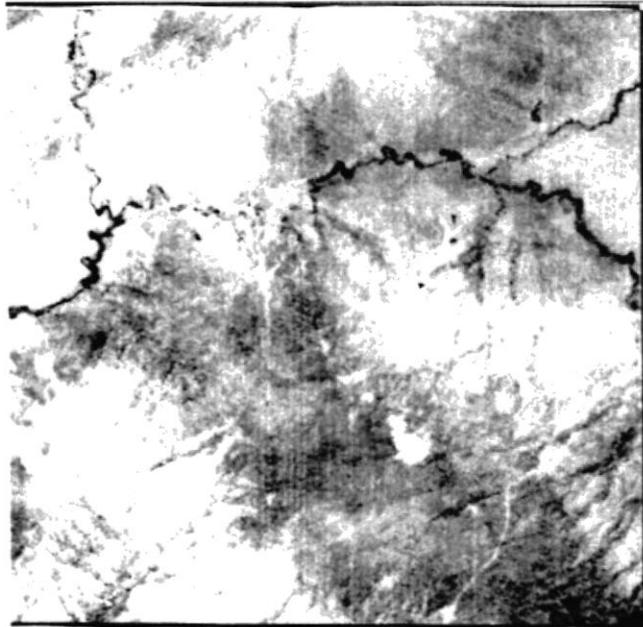
De la misma manera que un color puede ser perfectamente definido como una mezcla de cantidades de **rojo, verde y azul (Sistema RVA)** o **cian, magenta y amarillo (Sistema CMA)**, un color puede también definirse perfectamente por tres parámetros:

- **Intensidad**

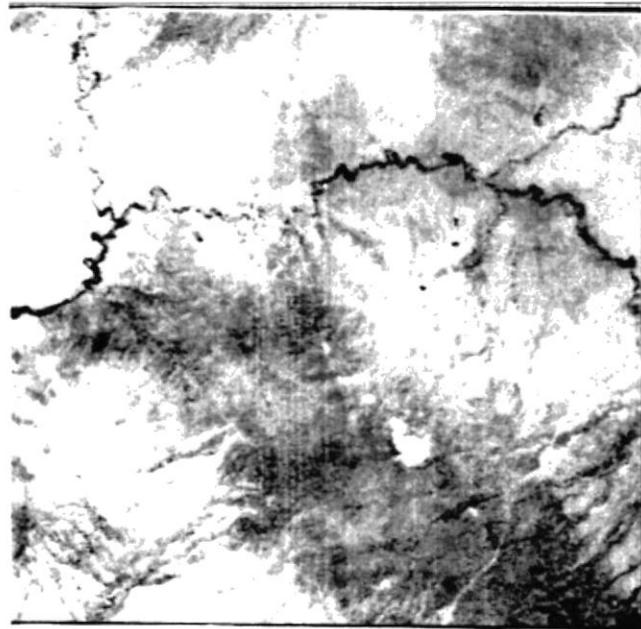
Es el grado de esclarecimiento o de ensombrecimiento de un color. La intensidad de un color corresponde a la cantidad de energía reflejada por el color de un objeto. Sobre un televisor (en negro y blanco o en colores) se puede graduar la intensidad luminosa emitida por el tubo catódico. Esta graduación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



A



B

Figura # 9. Filtraje con Transformada de Fourier sobre imágenes de 512x512: A. Muestra lineamientos E-O. B. Muestra lineamientos N-S

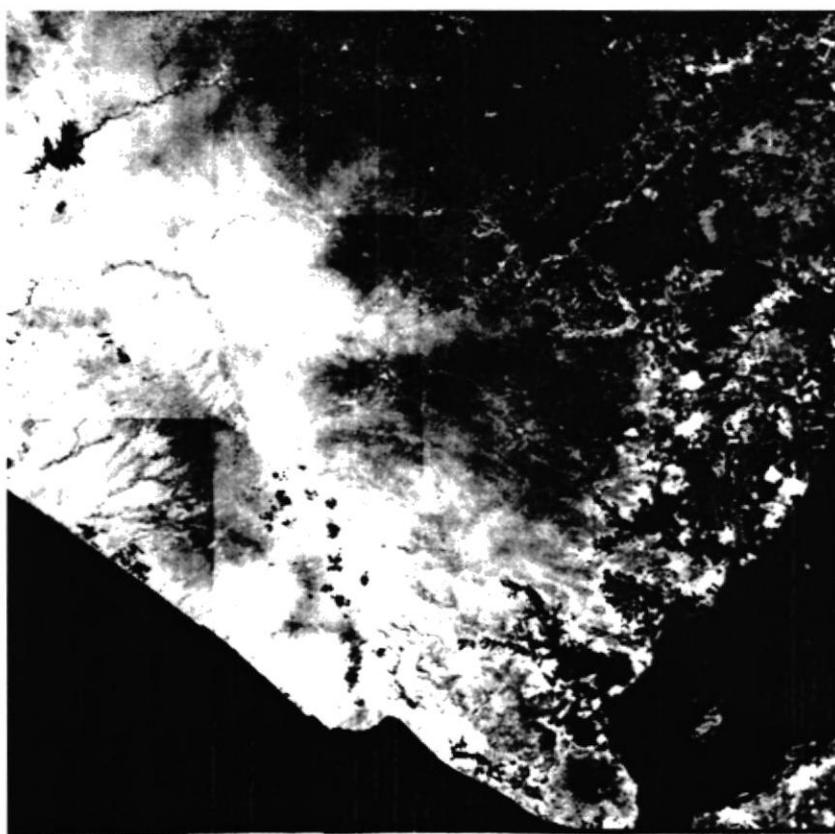


Figura # 10. Mosaico compuesto por imágenes de 512x512 obtenidas por filtraje con Transformada de Fourier



CIB-ESPOL

- **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. Entonces, 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 **PLANETE** 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. # 11**) con los siguientes datos:

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

- 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. # 12**) con los siguientes datos:

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

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.

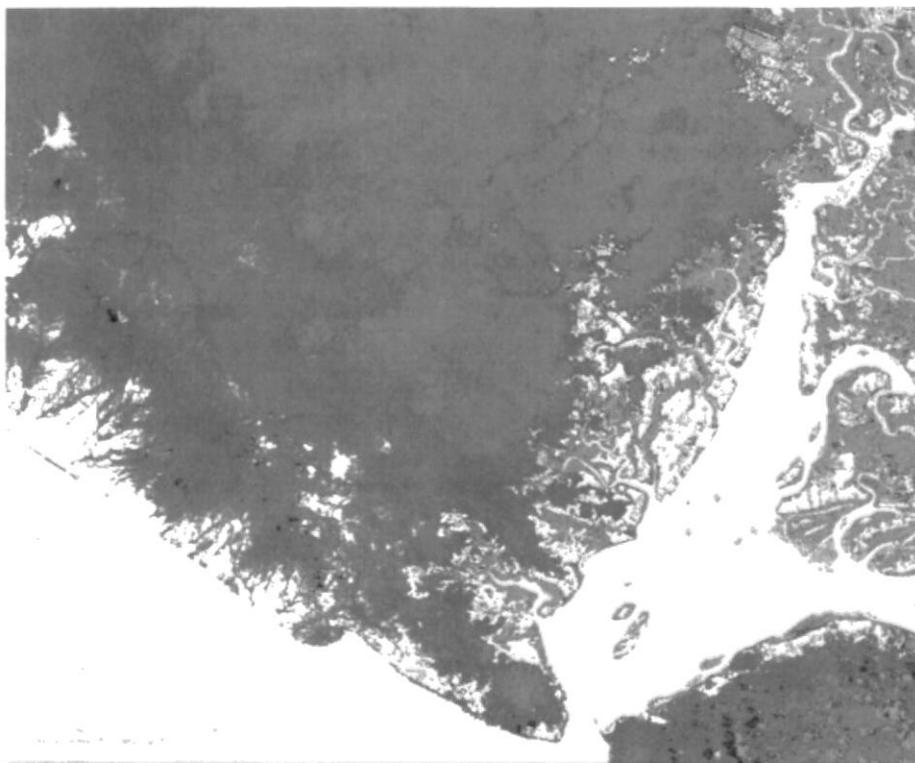


Figura # 11. Composición en color de los neocanales ITS obtenidos a partir de los canales TM3, TM5 y TM4

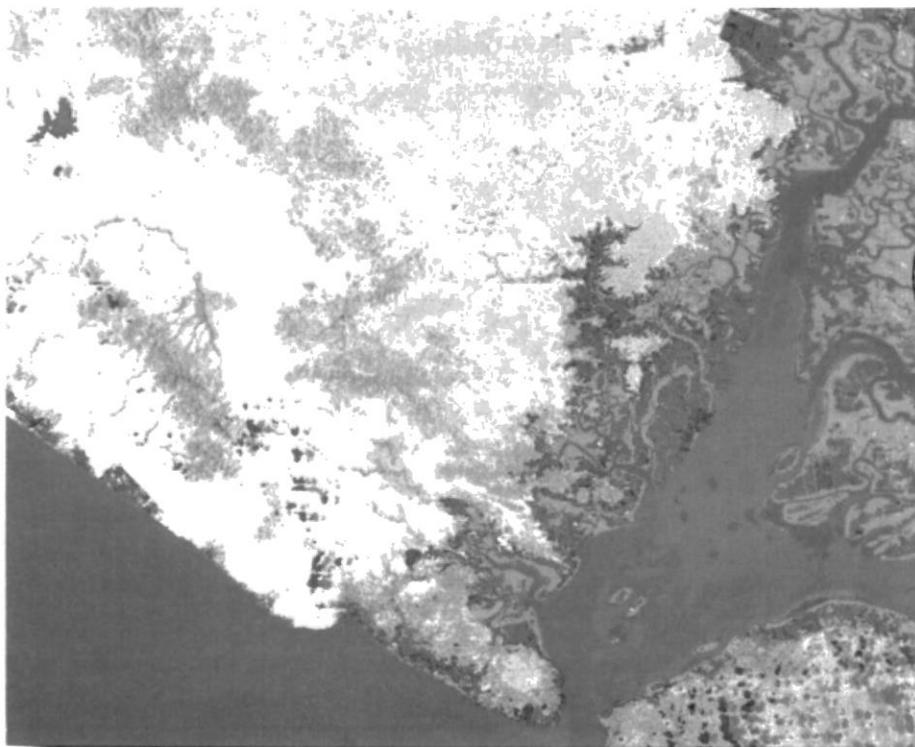


Figura # 12. Composición en color de los neocanales ITS obtenidos a partir de los canales ACP1, ACP2 y ACP3

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 píxeles, 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 utilización, 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 píxeles, 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. # 13), el cual se encuentra en el programa OSIRIS.

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. # 14).

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,

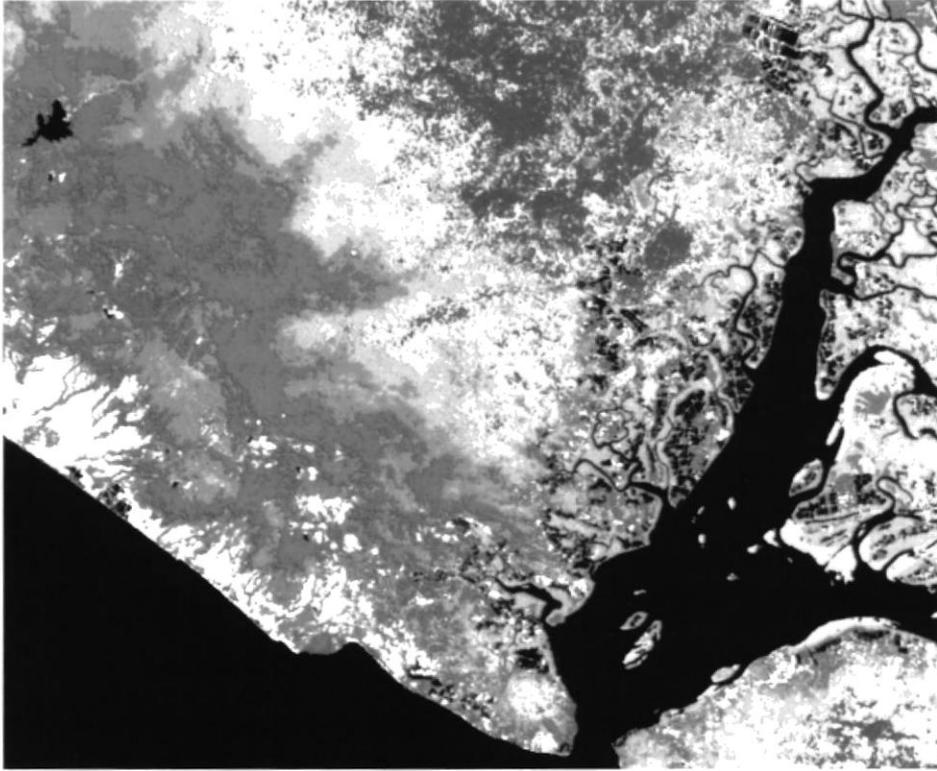


Figura # 13. Clasificación no dirigida por *Nuées Dynamiques á centres móviles* con 11 clases, a partir de los canales ACP1 y ACP2



Figura # 14. Clasificación dirigida por *Media Euclidiana* con 11 clases a partir de los canales TM3, TM5 y TM4



CIB-ESPOL

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 (ver Anexos)**. 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 fin de eliminar una parte de estos códigos se efectuó un pulimento mayoritario (elemento 5x5), seguido de una reconstrucción multiclasas utilizando una erosión de tamaño 3 con un elemento 5x5 como marcador (imagen limpia).

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. # 15**. Para esta codificación se tomaron en cuenta solo los códigos cuyos porcentajes eran mayores a 0,10%.

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. # 16**).

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 multiclasas 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. # 17**. Para esta codificación igualmente se tomó en cuenta los porcentajes mayores a 0,10 %.

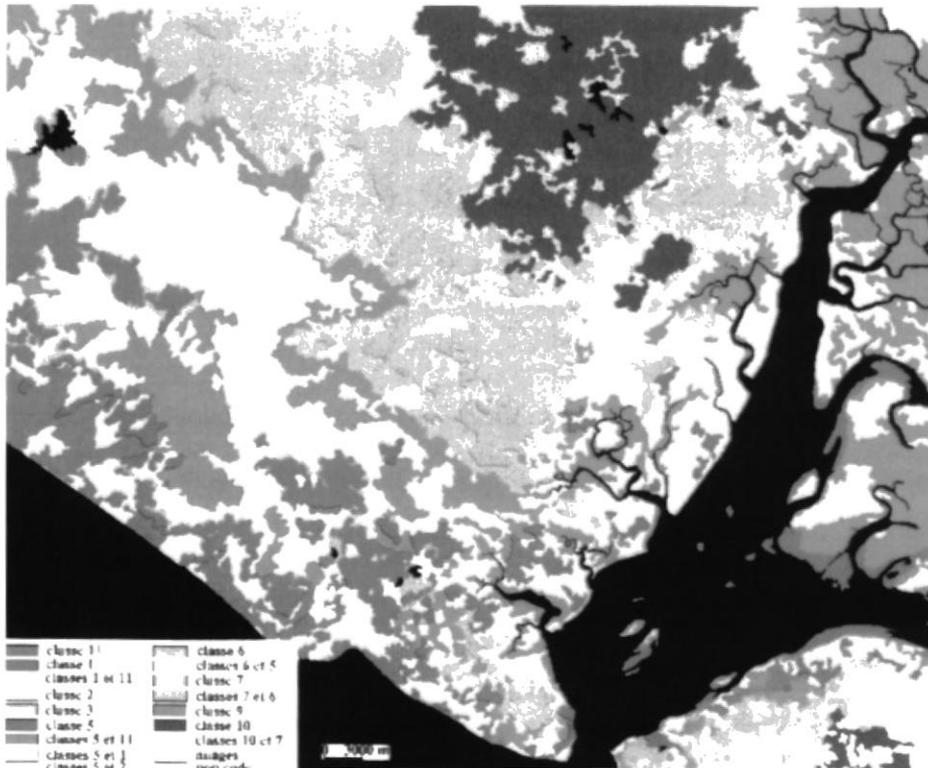


Figura # 15. Mapa automático de la imagen Landsat proveniente de la clasificación por *Nuées Dynamiques* de la Fig. # 13.

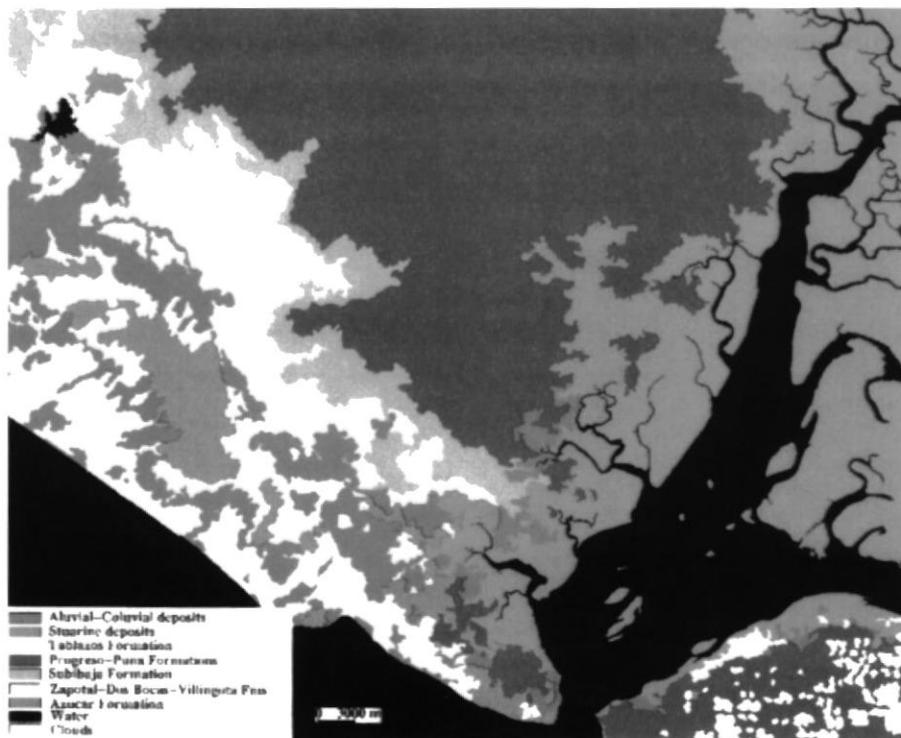


Figura # 16. Mapa geológico de la imagen Landsat proveniente de la interpretación del mapa automático de la Fig. # 15



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. # 18**).

Por último, como aporte adicional al presente trabajo, se incluye un Mapa Litológico Preliminar de Escala 1:150.000 de la zona estudiada, como documento adjunto a esta memoria.

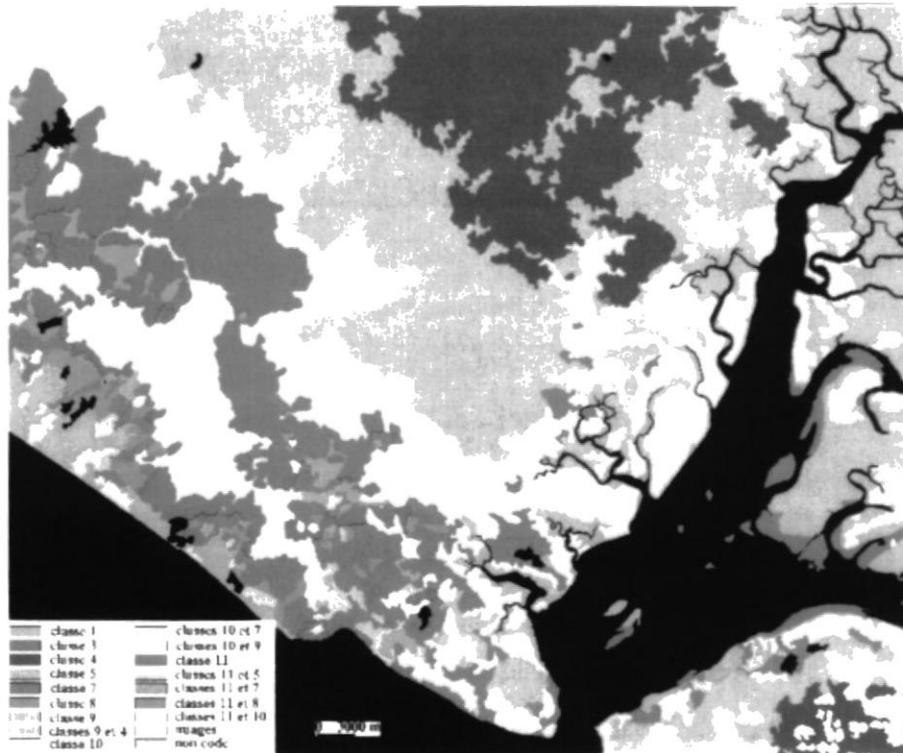


Figura # 17. Mapa automático de la imagen Landsat obtenido de la clasificación por *Media Euclidiana* de la Fig. # 14

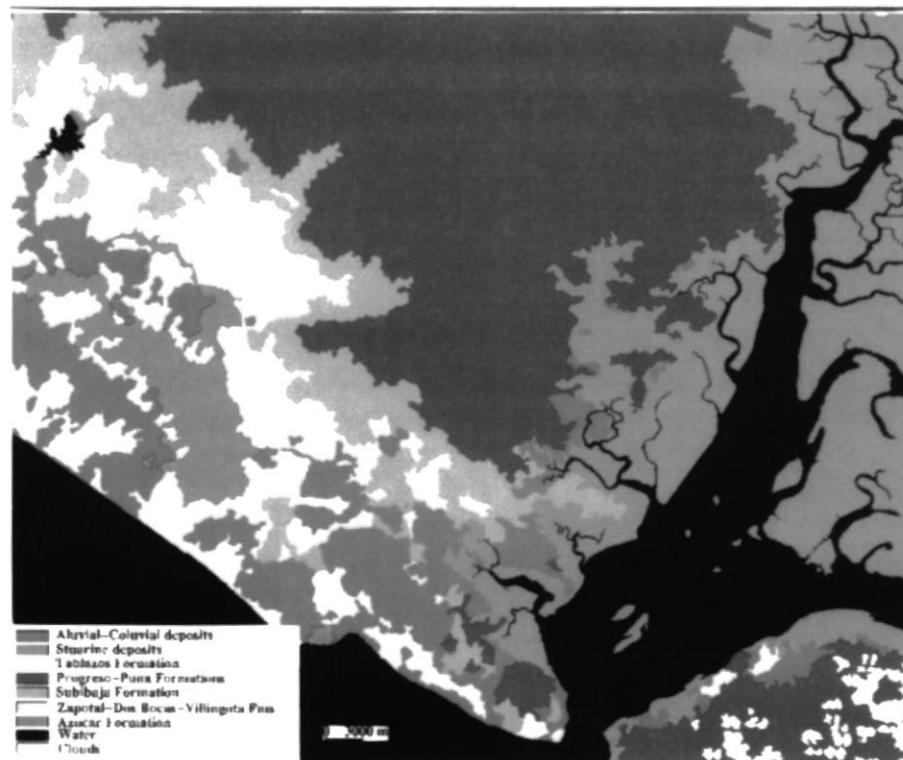


Figura # 18. Mapa geológico de la imagen Landsat obtenido de la interpretación del mapa automático de la Fig. # 17



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

- El Análisis de las composiciones en color del extracto de la imagen Landsat TM realizadas por los diferentes tratamientos, permite señalar las composiciones TM3,4,5 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 píxeles.
- 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 los 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.

Como trabajo complementario al presente estudio, **se recomienda**, en base a la integración de los mapas geológicos preliminares generados en este trabajo, hacer la revisión de campo respectiva para elaborar el Mapa Geológico Definitivo de la Zona.

ANEXOS



CIB-ESPOL

TABLA 1

códigos	primera reunión		códigos	imagen en bruto		imagen limpia		codific.	codific. interpret.
	clases	recodif.		# pixeles	porcent.	# pixeles	porcent.	final	
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

TABLA 2

códigos	primera reunión		códigos	imagen en bruto		imagen limpia		código	
	clases	recodific.		# 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

BIBLIOGRAFIA

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).



CIB-ESPOL