

**DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA DEL SUELO DE LA ZONA  
COSTERA DE LA BAHÍA DE TUMACO  
A PARTIR DE FIRMAS ESPECTRALES OBTENIDAS DE IMÁGENES  
SATELITALES**

**EDWIN HORACIO CÓRDOBA AGUILAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2006**

**DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA DEL SUELO DE LA ZONA  
COSTERA DE LA BAHÍA TUMACO  
A PARTIR DE FIRMAS ESPECTRALES OBTENIDAS DE IMÁGENES  
SATELITALES**

**EDWIN HORACIO CÓRDOBA AGUILAR**

**Trabajo de grado como requisito  
para optar al título de Ingeniero  
Físico**

**Director:  
MSc. LUIS FERNANDO ECHEVERRI**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2006**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	7
<b>1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>	11
1.1 Localización geográfica.....	11
1.2 Factores climáticos.....	12
1.3 Aspectos sedimentológicos.....	13
1.3 Zonas de vida.....	14
<b>2. LA TELEDETECCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA DETERMINAR LOS COMPONENTES DEL SUELO</b>	16
2.1 Principio físico .....	18
2.2 Comportamiento espectral de componentes del suelo.....	21
2.3 Interacción de la radiación con la atmósfera.....	26
2.3.1 Absorción atmosférica.....	26
2.3.2 Dispersión atmosférica.....	27
2.3.3 Emisión atmosférica.....	28
2.4 Sensores espaciales.....	29
2.4.1 Exploradores de barrido.....	29
2.4.2 Exploradores de empuje.....	32
2.5 Resolución de un sistema sensor.....	34

2.5.1	Resolución espacial.....	35
2.5.2	Resolución espectral.....	36
2.5.3	Resolución radiométrica.....	37
2.5.4	Resolución temporal.....	37
2.6	Plataforma satelital LANDSAT 7.....	37
2.6.1	Características orbitales.....	38
<b>3.</b>	<b>PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE</b>	<b>40</b>
3.1	Distorsiones de una imagen satelital.....	40
3.1.1	Distorsiones originadas por la plataforma.....	40
3.1.2	Distorsiones provocadas por la rotación terrestre.....	40
3.1.3	Distorsiones provocadas por sensor.....	41
3.1.4	Distorsiones provocadas por la atmósfera.....	41
3.1.5	Correcciones radiométricas.....	42
3.1.6	Correcciones geométricas.....	42
3.2	Realces y mejoras de la imagen.....	44
3.2.1	Ajuste de contraste.....	44
3.2.2	Tablas de referencia de color.....	45
3.3	Análisis de componentes principales.....	45
3.4	Clasificación digital de imágenes.....	48
3.4.1	Métodos de clasificación.....	48
3.4.2	Método no supervisado.....	48
3.4.3	Método supervisado.....	50

3.5 Evaluación de la clasificación digital.....	50
3.5.1 Separabilidad de las firmas.....	51
3.5.2 Matriz de contingencia.....	51
3.6 Criterio de asignación .....	52
3.6.1 Clasificador de máxima probabilidad.....	52
3.6.2 Modulación de resultados.....	53
<b>4. DESEMPEÑO DEL MÉTODO PARA DETERMINAR LA COBERTURA</b>	
<b>DEL SUELO</b>	<b>55</b>
4.1 Selección y características de la imagen satelital .....	55
4.2 Análisis visual y realces.....	57
4.3 Clasificación digital.....	59
4.3.1 Método no supervisado.....	59
4.3.2 Método supervisado.....	60
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>62</b>
5.1 Identificación de características de la imagen.....	62
5.2 Metodología para la identificación de la línea de costa a partir de imágenes satelitales .....	64
5.3 Extracción de información temática .....	70
5.3.1 Clasificación no supervisada.....	70
5.3.2 Clasificación supervisada.....	74
5.3.2.1 Análisis de separabilidad.....	75

5.3.2.2 Matriz de contingencia.....	76
5.3.3 Ejecución de la clasificación.....	77
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>80</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>82</b>
<b>GLOSARIO DE TERMINOS</b>	<b>85</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características del sensor ETM+ .....	39
Tabla 2. Imágenes de satélite Landsat usadas en la ejecución del Proyecto.....	56
Tabla 3. Medidas estadísticas de las bandas de la imagen de la zona de Estudio.....	64
Tabla 4. Clasificación no supervisada, bandas originales.....	71
Tabla 5. Clasificación no supervisada, componentes principales.....	73
Tabla 6. Cálculo de la divergencia transformada entre categorías. ....	75
Tabla 7. Porcentaje matriz de contingencia.....	76
Tabla 8. Clasificación supervisada. Algoritmo de máxima probabilidad....	77

## LISTADO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio.....	12
Figura 2. Espectro electromagnético.....	17
Figura 3. Comportamiento espectral teórico de distintas cubiertas.....	23
Figura 4. Explorador de barrido. ETM+ de Landsat -7.....	30
Figura 5. Sistema de coordenadas modificadas. Rotación de los ejes originales.....	47
Figura 6. Imagen Landsat de la zona de estudio. Combinación 641.....	57
Figura 7. Perfil radiométrico de cuerpos de agua presentes en la Imagen.....	62
Figura 8. Identificación espectral de algunas coberturas, composición 453. Lugar: Bocana Hojas blancas, al norte de la bahía de Tumaco.....	64
Figura 9. Diagrama de alguna firmas espectrales que intervienen en la clasificación.....	66
Figura 10. Histograma original banda 4. Región del Infrarrojo Cercano.....	67
Figura 11. Imagen umbralizada.....	67
Figura 12. Histograma y gráfico de LUT para la imagen umbralizada.....	68
Figura 13. Histograma segundo componente principal.....	69
Figura 14. Histograma ecualizado y LUT para la capa 2 del ACP.....	70
Figura 15. Imagen ecualizada de la segunda capa del ACP .....	70
Figura 16. Diagrama de dispersión. Bandas infrarrojo cercano e infrarrojo medio alto.....	74
Figura 17. Subimagen ráster temática generada.....	78

## INTRODUCCIÓN

Desde sus orígenes el hombre se ha enfrentado a diversas problemáticas en el ámbito de la satisfacción de sus múltiples necesidades. Esto se incrementa día a día con el aumento de la población, disminución de los recursos y cambios en el ambiente.

Actualmente esta disyuntiva se enfrenta con el uso masivo de computadoras personales, que representan una revolución en el manejo de información. Dentro de estas nuevas herramientas y estrategias para el manejo y generación de la información, existen tecnologías basadas en captura, y procesamiento de imágenes suministradas por satélites puestos en órbitas alrededor de la tierra.

Esta forma de observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. Este término es una traducción latina del término inglés *remote sensing* que fue usado para designar cualquier medio de observación remota. Los sensores remotos permiten capturar información de los objetos sin tener un contacto directo con ellos, su uso en aplicaciones sobre recursos naturales tiene una larga data, dado que proporcionan información confiable sobre superficies extensas con alta precisión y costos razonables. El uso de estos sensores ha jugado un importante rol en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y sus superficies, planificación territorial y estudios urbanos. La tendencia actual es hacia el incremento de su utilización dado el avance tecnológico, el desarrollo de la computación y bajos costos de obtención de imágenes. Ellos pueden desenvolverse en forma conjunta o separada, y su aplicación puede abarcar un amplio espectro del conocimiento.

La teledetección engloba desde el proceso de obtener una imagen hasta el procesamiento de la información que suministra, en el contexto de una

determinada aplicación. El procesamiento digital de las imágenes satelitales pretende extraer, mejorar y resaltar la información contenida en las bandas espectrales contenidas en esas imágenes. La teledetección desde satélites, cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrecen frente a otros medios de observación más convencionales, como la fotografía aérea y salidas de campo. Entre las más importantes están la visión panorámica, la información que suministran sobre regiones no visibles del espectro electromagnético y la cobertura global y periódica de la superficie terrestre, que deriva, una de sus aplicaciones, en el análisis y determinación de los diferentes componentes del suelo.

En el marco de las aplicaciones de la teledetección la Dirección General Marítima (DIMAR), a través del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP) está desarrollando un proyecto denominado “Caracterización para la determinación de la jurisdicción de la DIMAR en el litoral pacífico colombiano” (aguas marítimas, terrenos de bajamar, playas y sistemas fluviomarinos, vegetación costera, etc.). La determinación de la vegetación costera, investigaciones previas confirman que los procedimientos convencionales (topografía, cartografía convencional) no son la mejor alternativa para desarrollar un proyecto de esta envergadura. La escala de trabajo, la extensas superficies de cubrimiento y la necesidad de mantener la información geográfica actualizada de las coberturas en las zonas de jurisdicción y aledañas a esta, demuestran la inviabilidad de abordar este proyecto por los métodos convencionales.

Existen factores que dificultan la obtención de datos *in situ* que permitan cumplir con los objetivos planteados por la DIMAR como son: la situación de orden público en zonas extensas del litoral, las condiciones climáticas, que son excepcionales con promedios de lluvia anuales entre 6000 y más de 12000 mm/año, con mas de 200 días con lluvia al año; nubosidad casi permanente; rango mareal (entre 3 y 5 metros) considerablemente mayor al del caribe colombiano (0.3 a 0.5 metros), la baja pendiente de amplios sectores costeros,

la numerosa red de ríos y sus intrincadas desembocaduras al mar y por último, la limitada existencia de cartografía básica de detalle o de vuelos aerofotogramétricos [3].

Por tal motivo, en el desarrollo de este trabajo contribuyó a la generación de información confiable que servirá como apoyo a la determinación de la jurisdicción de la DIMAR. El objetivo principal de este trabajo fue el de determinar la cobertura del suelo de la zona costera de la bahía de Tumaco, ubicada en el departamento de Nariño, Colombia. El cumplimiento de este trabajo se enmarca dentro de los objetivos de la caracterización de la jurisdicción de la DIMAR en la medida que brindará información temática suficiente para la generación de espacio cartas de cobertura del suelo.

El trabajo se desarrolló mediante el procesamiento digital imágenes de mediana resolución espacial LANDSAT-7 ETM+, que ofrecen buena cobertura y calidad de información. Se evaluó una metodología para la determinación de la línea de costa a partir de esta información satelital, lo que permitirá realizar estudios de fenómenos físicos involucrados en el litoral.

El capítulo primero del documento, presenta una descripción general de la zona de estudio: su localización geográfica, características climáticas, sedimentológicas y zonas de vida. Estos aspectos son de interés ya que alteran en un instante de tiempo dado los elementos del paisaje.

El segundo capítulo, muestra el principio físico de la interacción de la radiación con la superficie terrestre, que es el fundamento de la formación de imágenes satelitales multiespectrales. Se presenta también lo tipos de sensores y las características del sistema satelital LANDSAT-7 usado en el cumplimiento de los objetivos.

El capítulo tercero, expone los conceptos del procesamiento digital de las imágenes implementado. Muestra las distorsiones presentadas en una imagen

satelital, las bases del análisis visual, realces y transformaciones espectrales usadas, y la descripción de la clasificación y evaluación para identificar las distintas coberturas.

El capítulo cuarto y quinto, describe la metodología, resultados y sus análisis respectivamente, basados en los conceptos mostrados en los capítulos anteriores. Se presenta una metodología para la determinación del límite de separación tierra-mar (línea de costa), de suma importancia en la determinación de la jurisdicción de la DIMAR como un objetivo que surge durante la realización del proyecto. La determinación de la cobertura del suelo de la zona de estudio, se realiza usando entrenamiento supervisado y no supervisado con la finalidad de encontrar el mejor resultado entre ellos y poder generar la mejor información temática.

# 1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

## 1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra localizada al sur de la costa Pacífica Colombiana, sector del departamento de Nariño que posee una particular organización político-administrativa, determinada por su localización espacial y dinámica funcional. Delimitada al sur por Cabo Manglares, punto fronterizo con el Ecuador, y al norte en la Bocana Hojas Blancas (desembocadura del brazo del río Hojas Blancas), entre las latitudes  $2^{\circ} 10' 19''$  y  $1^{\circ} 35' 41''$  y las longitudes  $78^{\circ} 23' 36''$  y  $79^{\circ} 00' 38''$  (UTM, WGS84, Zona 17) aproximadamente. En esta zona se encuentran las islas de Bocagrande, Vaquería, La Viciosa, Isla de Tumaco y el Morro.

El borde costero de la Bahía de Tumaco comprende dos municipios: Tumaco, propiamente dicho, y Francisco Pizarro. El primero cubre el 75% de la zona y el segundo el porcentaje restante [4] Todo este territorio está inserto dentro de la planicie deltáica de Nariño, desarrollándose en su litoral los delta de los ríos Patía y Mira [5]. Por presentar las menores variaciones de temperatura en el pacífico colombiano, Tumaco cuenta con unas condiciones climáticas favorables para sus pobladores y el desarrollo de la agricultura y tipos de vegetación



Figura 1. - Localización del área de estudio

## 1.2 FACTORES CLIMÁTICOS

El análisis de los valores de precipitación registrados a través del tiempo en la región de Tumaco dan a entender que el orden de precipitación en el área de estudio es de 3066.9 mm<sup>3</sup>, con fluctuaciones entre 1928 mm<sup>3</sup> y 4206.3 mm<sup>3</sup>, donde los valores inferiores sugieren la presencia del fenómeno del niño.

Las lluvias tropicales deben su intensidad y abundancia a la fuerte inestabilidad de masas de aire húmedas que son simultáneamente cálidas. El calentamiento diurno acentúa esta inestabilidad y así en la zona son muy frecuentes las precipitaciones en la noche.

La zona de estudios presenta durante la época húmeda temperaturas superiores o iguales a 25.8 °C, exceptuando el mes de enero cuyo registro es 25.5 °C, siendo abril los meses de mayor valor con 26.1 °C; condicionada en sus características por el desplazamiento hacia el norte de la Zona de Convergencia Intertropical, ZCIT, en la región Pacífica durante esta época [4]. La humedad relativa de acuerdos con los registros obtenidos por el IDEAM y el CCCP desde el año 1992 hasta el año 2001, oscila en un rango de 80% a 90% durante el transcurso del día, correspondientes a los porcentajes más altos en

las horas de la mañana debido a que la temperatura del aire es mas baja. También se observa incremento en este parámetro cuando se generan precipitaciones, alcanzando los valores por lo general entre el 94% y 96%.

### **1.3 ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS**

La principal fuente de deposición de sedimentos en las zonas costeras son los ríos. El volumen de sedimentos se relaciona con el gradiente de la corriente, el tipo de roca, el área de drenaje de la cuenca, la densidad de la vegetación, el promedio de precipitaciones, la presencia de estuarios y construcciones hechas por el hombre las cuales atrapan sedimentos, tales como presas, piscinas (camaroneras) y sistemas de riego, las cuales atrapan sedimentos [19].

En la bahía de Tumaco el principal aporte de sedimentos se hace por vía fluvial, es así como los ríos y esteros se encargan de ello. Se destaca los aportes que recibe del río Mira, los cuales son los responsables de la existencia de las islas como Tumaco, El morro, La Viciosa y Bocagrande, entre otras.

En el interior de la bahía también son importantes los aportes de ríos pequeños, como el Rosario y el Curay, entre otros que generan extensas zonas de bajamar y numerosos bajos que dan lugar a varios canales internos. Sobre el extremo norte del área de estudio se encuentra el río Patía, que no desemboca en la Bahía pero forma una extensa red de ríos, esteros y canales del Parque Nacional Natural Sanquianga [4].

Aunque el aporte porcentual de sedimentos de estos ríos es alto son pocos los sedimentos que sobre pasan la barrera natural, desembocadura - mar, y es así como van creciendo las barras de arena, zonas de bajamar y espigas en las desembocaduras de los ríos. Las barras y bajos, llegan a extenderse varios metros mar adentro, llegando a mas de 2 kilómetros en algunas zonas, provocando una marcada disminución en la profundidad del mar (caso de las desembocaduras de los esteros Aguaclara y resurrección), en el sector

ocupado por ellos. Esta parte de la costa, consiste de planicies aluviales de baja altura y deltas con asociación de islas barreras, sistemas de playas y marismas cubiertos por manglares.

#### **1.4 ZONAS DE VIDA**

Estudios hechos por el instituto de investigaciones de recursos biológicos Alexander von Humboldt IAvH, consideran que la región del pacífico colombiano es una región dominada por el bosque tropical, diferenciándose categorías como: bosque muy húmedo tropical, bosque pluvial tropical, bosque pluvial premontano, bosque pluvial montano bajo y bosque muy húmedo montano bajo.

La bahía de Tumaco se encuentra ubicada en una región que incluye zonas de bosque pluvial premontano, en su forma transicional a bosque pluvial tropical, que ocupa la mayor parte del área boscosa y se encuentra desde el nivel del mar hasta los 600 metros de altura [4].

Posee semejanzas notables, en cuanto a sus formas vegetales, con el bosque fluvial tropical, presentando una vegetación exuberante y diversa con alturas promedio de 30 metros, gran cantidad de epifitas, bejucos y cañas; sostiene una fauna muy variada de especies, pero con baja densidad [1]. También presenta una zona de bosque muy húmedo tropical con menores registros de pluviosidad, localizada formando una franja hacia las costas.

Es importante rescatar la vegetación de manglar que se encuentra en la zona, ocupando una franja continua en la parte costera, solo interrumpida en algunos sectores al norte de la bahía por la presencia de acantilados y otros sectores con la mezcla se vegetación firme y pequeñas fracciones de playa. En general, las diferentes asociaciones boscosas son debidas a la variación de suelos, la altitud, la influencia de aguas salinas, la humedad relativa, el nivel de precipitación y el grado de intervención, entre otros factores.

Las condiciones medioambientales descritas, determinan cambios significativos en la cobertura vegetal a mediano plazo existiendo la necesidad de implementar procesos constantes de actualización en esta zona.

## 2 LA TELEDETECCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SUELO

Los elementos que componen un sistema de percepción remota son: el sensor, el objeto observado y el flujo energético que permite poner en contacto los dos primeros. Un sensor es un dispositivo que detecta y mide parámetros físicos como la radiación, y los convierte en una forma en la cual pueden ser almacenados o transmitidos. Las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto son: reflexión de la radiación con los elementos de la superficie terrestre, emisión de terrestre y por combinación de las dos anteriores.

La radiación electromagnética (REM) es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre si que se desplazan a través del espacio transportando energía de un lado a otro. A diferencia de otros tipos de oscilaciones como las de sonido, la REM no requiere de un medio para propagarse, esta puede propagarse en el vacío.

La REM puede considerarse en lugar de una serie de ondas, como un tren de partículas llamadas fotones. En esta dualidad onda-corpúsculo, cada fotón tenga una energía proporcional a la frecuencia de la onda asociada, dada por la relación de Planck:

$$E = h * \nu \quad (1)$$

Donde  $E$  es la energía del fotón,  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \cdot 10^{-34}$  W s<sup>2</sup>) y  $\nu$  es la frecuencia de la onda.

Así mismo considerando la REM como una onda, la longitud de onda  $\lambda$  y la frecuencia de oscilación  $\nu$  están relacionadas por una constante, la velocidad de la luz en el medio (en el vacío es 300000 km/s).

$$c = \lambda * \nu \quad (2)$$

Atendiendo a su longitud de onda o frecuencia dado por la ecuación 2, la REM recibe varios nombres: desde los rayos gamma (con longitudes de onda del orden de los picómetros) hasta las ondas de radio (longitudes de onda de varios kilómetros) pasando por la luz visible cuya longitud de onda está en el rango de las décimas de micra. El rango completo de longitudes de onda (o de frecuencia si se quiere) forma el espectro electromagnético, del cual la luz visible no es más que un minúsculo intervalo o banda que va desde la longitud de onda correspondiente al violeta hasta la longitud de onda del rojo.

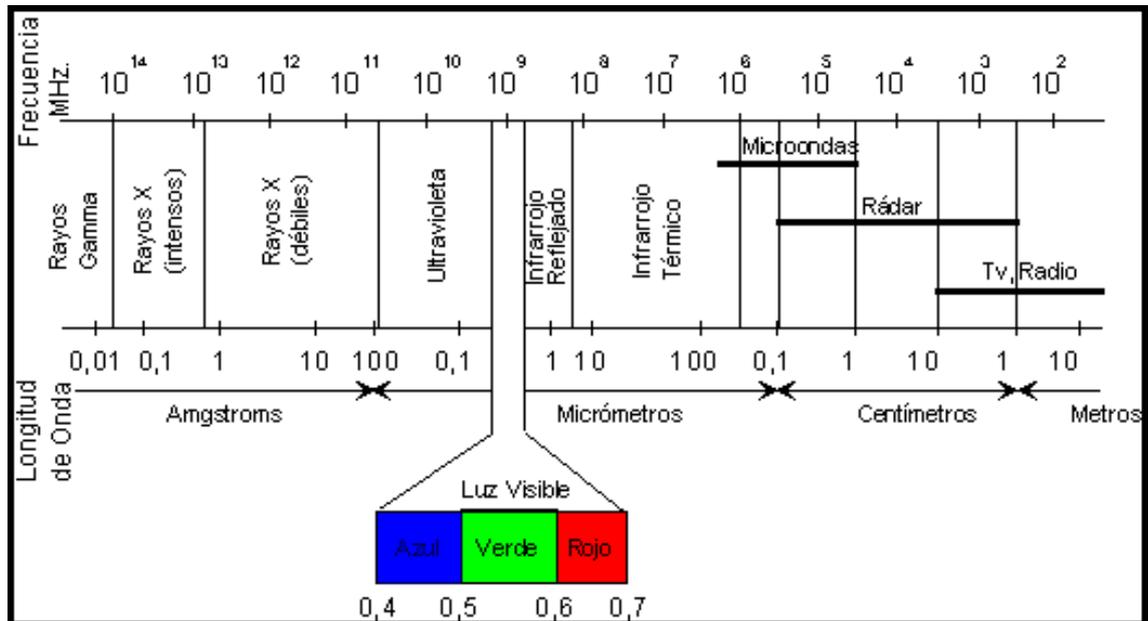


Figura 2. Espectro electromagnético

Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. Desde el punto de vista de la teledetección, las más empleadas en la tecnología actual son las siguientes:

- Espectro visible (0,4  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ). Coincide con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales las cuales son: azul (0,4  $\mu\text{m}$  a 0,5  $\mu\text{m}$ ); verde (0,5  $\mu\text{m}$  a 0,6  $\mu\text{m}$ ), y rojo (0,6  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ ), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.
- Infrarrojo cercano (0,7  $\mu\text{m}$  a 1,3  $\mu\text{m}$ ). Resulta de especial interés por que se puede discriminar masas vegetales y concentración de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ ), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Resulta idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
- Infrarrojo lejano o térmico (8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ ), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Microondas (0.1 cm a 10 cm), con gran interés por ser una longitud de onda transparente a la cubierta nubosa.

## 2.1 PRINCIPIO FÍSICO

La relación entre el flujo de energía y la longitud de onda puede establecerse con mayor rigor de acuerdo a la ley de Planck, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right\}} \quad (3)$$

Donde  $M_{n,\lambda}$  indica la emitancia radiativa espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda,  $k$  la constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ W s}^2 \text{ K}^{-1}$ )<sup>2</sup> y  $T$  la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin,  $K$ ).  $M_{n,\lambda}$  es

definida como la energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo.

En pocas palabras la fórmula de Planck señala que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273°C) radia energía, y esta incrementa con la temperatura. A la vez, a mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda mas cortas. De esta fórmula es posible reconstruir la curva de emitancia de un cuerpo negro el cual es un emisor perfecto, a distintas temperaturas. A través del gráfico es posible conocer el comportamiento radiativo de un objeto, siempre que se conozca la temperatura y la emisividad, siendo este ultimo el grado de similitud con un cuerpo negro.

A partir de la fórmula de Planck puede calcularse la longitud de onda a la cual se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura. Esta es la llamada ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{\max} = 2898 \mu\text{mK} / T \quad (4)$$

La ecuación 4, tiene una gran importancia para seleccionar la banda mas conveniente para detectar una determinada cubierta, siempre que de conozca su temperatura. Así, para el caso de incendios forestales, y teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre 540K y 700K, la ley de Wien permite situar entre 5.28 $\mu\text{m}$  y 4.30 $\mu\text{m}$  (Infrarrojo medio) la banda espectral mas adecuada para su detección. Con esta, es posible también determinar la máxima emitancia del sol, la cual está ubicada en la región visible del espectro por lo que presenta una temperatura radiante próxima a los 6000K.

Integrando la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de onda, se calcula la energía total radiada por unidad de superficie determinada por la ley de Stefan Boltzmann:

$$M_n = \sigma T^4 \quad (5)$$

Siendo  $\sigma$  la constante de Stefan Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ). Una consecuencia de esta fórmula resulta ser que la emitancia de un objeto es una función de la temperatura, y que pequeños cambios en esta suponen notables modificaciones en su emitancia radiante. Por otra parte si se conoce la temperatura de un objeto emisor es posible determinar la irradiancia incidente sobre el sensor, por cuanto la emitancia e irradiancia son funcionalmente equivalentes.

Las expresiones anteriores asumen que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, por lo que se simplifican los cálculos. Una expresión más realista añade un nuevo parámetro como factor de corrección, la emisividad ( $\varepsilon$ ):

$$M = \varepsilon M_n \quad (6)$$

La emisividad se define como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto y la que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura. Un cuerpo negro como emisor perfecto, absorbe y emite toda la energía que recibe. Un cuerpo blanco no absorbe la energía incidente si no que la reflejan por completo (emisividad=0), mientras los denominados cuerpos grises son aquellos que absorben y emiten de forma constante en distintas longitudes de onda. Los cuerpos cuya emisividad varía con la longitud de onda, son llamados radiadores selectivos y son los más comunes en la naturaleza. Es gracias a este comportamiento particular que pueden distinguirse de otro tipo de superficies en el infrarrojo térmico.

A partir de fórmulas 3 y 5, se puede estimar la emitancia total y espectral conociendo su temperatura absoluta, siendo aquella tanto mayor cuanto mas alta sea esta. En definitiva, la energía emitida desde un objeto es primariamente una función de su temperatura. Pequeños cambios en esta suponen una modificación sensible de la emitancia total, de acuerdo a la ecuación 6. Además, conociendo la temperatura de un objeto o cubierta de

interés y conociendo su emisividad será posible determinar la banda del espectro más idónea para su determinación.

## **2.2 COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE COMPONENTES DEL SUELO**

De cara a la identificación de objetos y procesos en la superficie terrestre, es de sumo interés la reflectividad de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. La reflectividad o reflectancia es entendida como la relación entre el flujo incidente y el flujo reflejado. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguirlo de los demás si se mide la radiación reflejada.

El registro de la distribución y las intensidades correspondientes de la energía reflejada o emitida por un objeto o clase de objetos por medio de las cuales se puede hacer una identificación conoce como *signatura espectral* o *firma espectral*. Resulta así fácil por ejemplo distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre diferentes tipos de suelo o diferentes tipos de vegetación. La identificación y caracterización constituye una de las tareas más importantes en la teledetección. En primera instancia ha de considerarse la propia reflectividad de las hojas, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, su perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación en su comportamiento reflectivo. Un tercer factor sería el derivado de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de la plantación, etc.

A pesar de lo anterior, es posible determinar comportamientos espectrales teóricos de la vegetación vigorosa. Así, esta cobertura muestra una reducida reflectividad en las bandas del visible, con un máximo relativo en el verde del espectro (en torno a  $0.55\mu\text{m}$ ). Por el contrario en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo

medio. Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua que almacenan en las hojas.

En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de las hojas, principalmente las clorofilas, xantofilas y caroteno (65%, 29% y 6%, aunque la proporción puede variar mucho). Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los  $0.445\mu\text{m}$ , mientras que la clorofila presenta una segunda banda de absorción alrededor de los  $0.645\mu\text{m}$ . Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los  $0.55\mu\text{m}$ , en donde el efecto absorbente es menor. Por esta razón aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, que causa este color característico de la vegetación vigorosa.

La alta reflectividad de las hojas en el infrarrojo cercano es debida a la estructura celular interna de las hojas. En concreto, es de vital importancia la caja esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, al difundir y dispersar la mayor parte de radiación incidente en esa parte del espectro. Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano, en claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en la banda rojo especialmente.

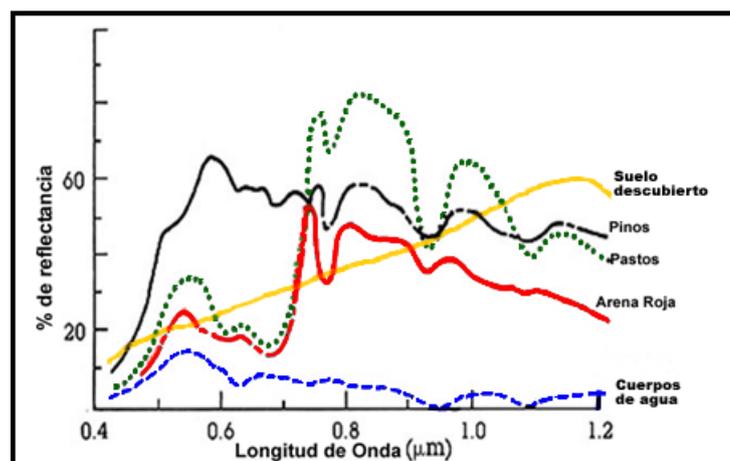
A partir de  $1.4\mu\text{m}$  el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. Las medidas de la vegetación muestran una notable diferencia en esta región del espectro entre las hojas secas y las infiltradas con agua [13], especialmente en las longitudes de onda próximas a  $1.45\mu\text{m}$ ,  $1.92\mu\text{m}$  y  $2.7\mu\text{m}$ . En general la observación en esta banda del espectro es importante para conocer el estado hídrico de las plantas.

Las curvas de reflectividad descritas pueden modificarse en función de la morfología de la hoja. Así, las hojas aciculares tienden a una mayor absorción en todas las longitudes de onda, mientras que las planas

desérticas, de tronco suculento, reflejan una mayor radiación que otras especies mesofíticas.

Es claro que el sensor no mide la radiación reflejada por hojas aisladas, sino agrupaciones de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos adicionales: el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; el índice del área foliar, especialmente sensible cuando la vegetación no cubre totalmente el suelo; las características del suelo que sustenta la vegetación: la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, etc.

Queda explícito que cualquier alteración que presente la vegetación se mostrará en un comportamiento espectral más o menos alejado del expuesto. Las hojas senescente o enferma tienden a perder actividad clorofila y, en consecuencia, a ofrecer una menor absorción en la banda azul y rojo del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que las hojas tienden a mostrar un color amarillento. Por el contrario en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de la estructura celular de la hoja. La curva espectral de hace mas plana, menos cromática.



Fuente: <http://www.eduspace.esa.int/eduspace/subtopic/default.asp?document=295&language=es>

**Figura 3. - Comportamiento espectral teórico de distintas cubiertas**

En lo que atañe a suelos desnudos, su comportamiento espectral es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva plana y de carácter ascendente (Figura 3) los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura, estructura y contenido de humedad.

En términos generales la reflectividad resulta mayor cuanto de trate de suelos finos y apelmazados. El contenido de humedad es uno de los elementos más destacados en la reflectividad del suelo para las longitudes de onda mencionadas, como consecuencia de la alta absorción del agua en estas bandas. Influye inversamente en la reflectividad del visible e infrarrojo, en torno a  $1.45\mu\text{m}$  y  $1.92\mu\text{m}$ , con mayor intensidad en las bandas de absorción del agua.

La textura, estructura y contenido de humedad están altamente relacionados. Un suelo arcilloso tiende a tener un alto contenido de humedad, fuerte estructura y fina textura, lo que se manifiesta con una baja reflectividad. En contraste, el suelo arenoso tiende a tener una débil estructura y bajo contenido de humedad, por lo que presentará una reflectividad alta. Es necesario añadir el efecto de la materia orgánica en el suelo, que tiende a oscurecerle, y, en consecuencia, a reducir su reflectividad.

Las superficies acuáticas absorben y transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absorción cuanto mayor sea la longitud de onda. Presenta una curva espectral similar a la del suelo, aunque de sentido contrario. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula. Por eso la frontera tierra agua es muy nítida en esta banda.

La variabilidad del agua es fácilmente detectable en las longitudes de onda más corta (azul, verde), y se relaciona con su profundidad, contenido de

materia en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes), y rugosidad de la superficie.

La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales del fondo. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta, ya que se mezclan en el flujo recibido la reflectividad de los fondos. En consecuencia la absorptividad será tanto mayor cuanto mas profunda sea la capa de agua.

Es importante considerar que el flujo de energía recibido por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, sino que también de otros factores externos. Las más importantes son: las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de observación. En esta última se tiene presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el haz incidente con la posición del sensor.

Esta geometría de observación está estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie. En torno a esto pueden distinguirse dos tipos de superficie, aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (especulares), y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (difusas o lambertianas). En el primer caso, el sensor solo recibe energía reflejada del suelo si está situado en la dirección del ángulo de reflexión, siendo nulo en cualquier otro caso. Si la superficie es lambertiana, la radiación es constante en cualquier ángulo de reflexión.

La mayor parte de las cubiertas se comportan de manera intermedio entre ambas situaciones, en función de sus características y de la longitud de onda en la que trabaje. Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho más la energía incidente que si se trata de longitudes de onda mayores, en donde esas mismas partículas pueden no impedir el comportamiento especular.

## 2.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA ATMÓSFERA

La atmósfera se compone de gases como: nitrógeno, oxígeno, anhídrido de carbónico, ozono, y argón principalmente, además de vapor de agua y aerosoles, entre otros componentes. El anhídrido carbónico, el ozono y vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética. Su efecto es triple:

- a) Absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa o nula;
- b) Dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda, y
- c) emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico.

Estos procesos introducen modificaciones, en ocasiones muy severas, en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor.

### 2.3.1 Absorción atmosférica

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda de tal forma que en algunas bandas del espectro elimina prácticamente cualquier posibilidad de observación remota. Los principales causantes de esta absorción son:

- Oxígeno atómico ( $O_2$ ), que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de  $0.1\mu\text{m}$ , así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y microondas.
- Ozono ( $O_3$ ), responsable de la eliminación de la radiación ultravioleta, inferior a  $0.3\mu\text{m}$ , así como en un sector de las microondas (entorno a  $27\text{mm}$ ).

- Vapor de agua, con una fuerte absorción entorno 6mm y otras menores entre 0.6 $\mu$ m y 2 $\mu$ m.
- Anhídrido carbónico, que absorben en el infrarrojo térmico (15 $\mu$ m), con importantes efectos en el infrarrojo medio entre 2.5 $\mu$ m y 4.5 $\mu$ m.

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes: a) Espectro visible e infrarrojo cercano, situadas entre 0.3 $\mu$ m y 1.35 $\mu$ m; b) varias en el infrarrojo medio: de 1.5 $\mu$ m a 1.8 $\mu$ m, 2 $\mu$ m a 2.4 $\mu$ m, 2.9 $\mu$ m a 4.2 $\mu$ m, y 4.5 $\mu$ m a 5.5 $\mu$ m; c) infrarrojo térmico, entre 8 $\mu$ m y 14 $\mu$ m, y d) Microondas, por encima de 20mm, en donde la atmósfera es prácticamente transparente. El diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que pretende observarse, salvo la presencia de nubes que absorben en todo el espectro óptico. Si se desea observar la atmósfera, los sectores espectrales más convenientes son, en los cuales la absorción de la atmósfera es alta.

### **2.3.2 Dispersión atmosférica**

La dispersión de la radiación electromagnética es causada por la interacción entre esta y los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (luz atmosférica). En definitiva, se reduce la radiancia directa, aumentándose la difusa. Puesto que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor. Pese a ello convendrá tener en cuenta este factor, especialmente cuando se pretenda convertir los valores digitales de una imagen a parámetros físicos, o se aborden estudios multitemporales.

Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los aerosoles y el vapor de agua. Los aerosoles son partículas en suspensión de origen muy diverso: oceánico – debidas al movimiento de las aguas -, o continental, polvo en suspensión o partículas emitidas por combustión. En función de su origen y sus características poseen muy variados tamaños, lo que implica distintos tipos de dispersión, ya que esta es muy dependiente de su diámetro. Así, la dispersión Rayleigh, cuando afecta a longitudes de onda inferiores al diámetro de la partícula; dispersión Mie, cuando trata de partículas de diámetro similar a la longitud de onda, y de dispersión no selectiva, cuando menciona a partículas de mayor tamaño.

La dispersión Rayleigh afecta a las longitudes de onda mas cortas. Es la más conocida y la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo del color azul del cielo. En fotografía aérea, es muy claro su efecto por el tono azulado que presentan los fotogramas cuando se realiza desde cierta altura.

En cuanto a la dispersión Mie, es también independiente de la longitud de onda, si bien en menor grado que la anterior. Aerosoles y polvo atmosférico son los principales responsables de este tipo de dispersión, aunque también está presente en incendios forestales o en brumas costeras. Por último, la dispersión no selectiva, afecta por igual a diversas longitudes de onda. Por esta razón, las nubes o niebla tienden a aparecer blancas, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

Los procesos de dispersión son muy complejos y difíciles de cuantificar en la imagen resultante. Normalmente no se dispone de datos contemporáneos a la adquisición de esta, por lo que la corrección atmosférica se basa en relaciones entre elementos de la propia imagen. Esta estimación puede ser burda en algunos casos, y dificulta, en última estancia, el uso de las imágenes adquirida por sensores espaciales como medida cuantitativa de parámetros biofísicos.

### **2.3.3 Emisión atmosférica**

El efecto de la emisión atmosférica fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretenden obtener mediciones de temperatura a partir de las imágenes espaciales. Al igual que cualquier cuerpo con temperatura por encima de cero absoluto, la atmósfera emite energía calorífica, por lo que este parámetro debe considerarse para separarlo de la emitancia espectral proveniente del suelo.

## **2.4 SENSORES ESPACIALES**

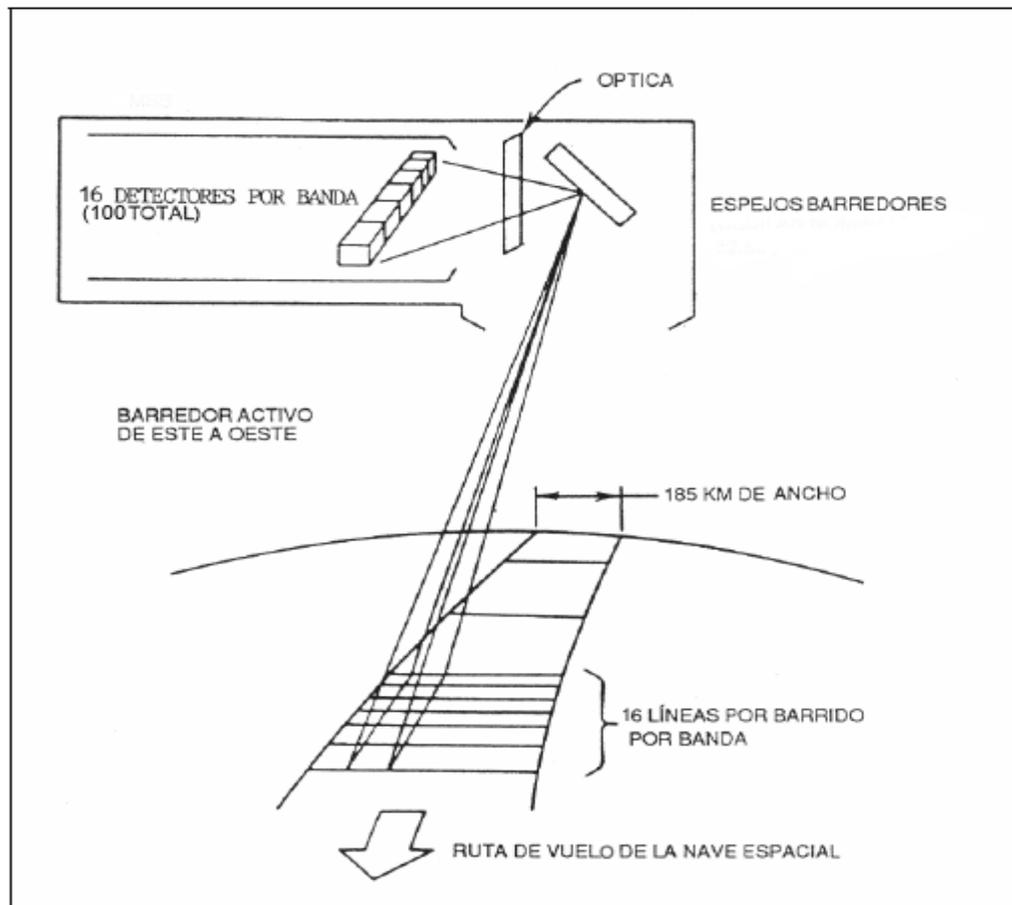
Entre las varias formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir energía procedente de las distintas cubiertas. Se habla de dos tipos de sensores. a). Pasivos, cuando se limitan a recibir energía proveniente de un foco exterior a ellos, y b). Activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.

Los sensores pasivos se limitan a recoger energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea esta reflejada por la cubierta terrestre, ya emitida de su propia temperatura. Una división general de este tipo de sensores es la siguiente: sensores fotográficos, optoelectrónicos y de antena. En el primer grupo estarían las cámaras fotográficas, en el segundo los exploradores de barrido y los de empuje, y las cámaras vidicon, mientras que los sensores pasivos de antena se conocen como radiómetros de microondas. Los sensores optoelectrónicos por ser de interés en el presente trabajo serán expuestos a continuación.

### **2.4.1 Exploradores de Barrido**

En general los sistemas optoelectrónicos poseen una óptica más o menos parecida a los sensores fotográficos, salvo un sistema de detección electrónica, que evita la dependencia de una superficie sólida. Entre estos sensores, los más habituales en teledetección espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (*scanners*). Un espejo móvil que oscila perpendicular a la dirección de la trayectoria, les permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la

traza del satélite. La radiancia recibida por este componente óptico se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y la convierten en una señal eléctrica. Esta a su vez, se transforma en un valor numérico, que puede almacenarse a bordo o transmitirse a la red de antenas receptoras.



**Figura 4. Explorador de barrido. ETM+ de Landsat -7**

El sensor convierte una señal analógica, la radiancia recibida, en un valor digital, en tal caso se habla de imágenes satelitales, en razón de su estructura interna. Estos valores numéricos pueden traducirse de nuevo, en niveles de reflectividad o temperatura, conociendo los coeficientes de calibración del sensor y las condiciones de adquisición.

El número y características de los detectores que incorpora un equipo de barrido es muy importante para explicar las condiciones de la imagen resultante. La señal enviada por el equipo óptico a estos detectores se muestra en intervalos irregulares, de tal forma que únicamente se graba un valor

numérico cada cierta distancia. Ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, que se denomina píxel. La señal detectada para cada píxel está íntimamente relacionada con el tipo de cobertura observada. Esta señal puede provenir de una superficie homogénea, con una sola cobertura, o por coberturas heterogéneas, con varias. En el primer caso, el valor del píxel definirá correctamente a dicha cubierta; en el segundo, resultará un promedio de las características espectrales de todas ellas, lo que dificultará su posterior interpretación.

En la mayor parte de los equipos de exploración por barrido, la señal se descompone a bordo en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo espacial de detectores, sensibles a ese tipo de radiación. En ese caso se habla de exploradores de barrido multiespectral, pues detectan la misma superficie de terreno en distintas bandas del espectro. El número y anchura de esas bandas (resolución espectral) está en diseño del propio sensor, del número de detectores con que cuente, de su instrumentación óptica, capacidad de almacenamiento y su transmisión de datos, etc.

Los equipos de barrido multiespectral en relación a los sensores fotográficos presentan las siguientes ventajas:

1. Permiten ampliar la banda del espectro detectada a longitudes de onda mayores al visible.
2. Mayor facilidad en la calibración y en la corrección radiométrica de los datos.
3. posibilidad de realizar coberturas sistemáticas, y de grandes espacios, además de la capacidad de transmitir datos en tiempo real.

Los sistemas más utilizados han sido incluidos en el programa Landsat ( MSS, multiespectral scanner, TM, thematic mapper, y ETM+ enhanced thematic mapper plus ) el cual fue usado en este trabajo, TIROS-NOAA (AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer), Nimbus (CZCS, Coastal Zone

Color Scanner), Skylab (S192), DMSP (Operational Linescan System, OLS), HCMM (HCMR, Heat Capacity Mapping Radiometer) y el RESURS-O (MSU-E y MSU-SK).

#### **2.4.2 Exploradores de Empuje**

En los exploradores de empuje (pushbroom) se elimina el espejo oscilante, por que disponen de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor. Estos detectores se van excitando con el movimiento orbital del satélite, puesto que se explora en cada momento, una línea completa, desplazándose esta en simultánea con la plataforma. Los detectores sólidos que forman un explorador por empuje se denominan dispositivos de carga acoplada (Charge Couple Devices, CCD).

Esta tecnología permite aumentar la resolución espacial del sistema respecto a los sistemas barredores convencionales, gracias a eliminar la parte móvil, mientras se reducen algunos problemas geométricos que se producen en los barredores, en el caso en que perdiera la sincronía entre el movimiento del espejo y el de la plataforma. Además no se requiere que los detectores sean integrados una vez por píxel, como ocurre con los exploradores de barrido, sino solo una vez por línea, lo que agiliza la detección y emisión de datos.

Como contrapartida, uno de los problemas importantes que atañe a estos equipos es la difícil calibración de su cadena de detectores. Al Aumentar notablemente su número, se precisa de complejos mecanismos de ajuste para que estos traduzcan de la misma forma, la señal recibida. En caso contrario, faltaría homogeneidad entre las columnas de la imagen, afectando a su calidad final. La operación de los exploradores de empuje en el infrarrojo térmico resulta muy complejo por el tipo de detectores que precisa, muy sensibles al calor y de difícil calibración.

Estos exploradores se han integrado a varios proyectos de teledetección espacial, como es el caso del satélite francés SPOT (sensor HRV), el satélite hindú IRS (sensor LISS) y el japonés MOS (MESSR).

Otros tipos de sensores optoelectrónicos son las Cámaras de Video y los radiómetros de microondas. Las primeras pueden trabajar en forma pancromática o en multibanda y que pueden ser usados a bordo de globos, aviones de baja altura. Los segundos son sensores que operan en el rango del espectro de las longitudes de onda larga, normalmente entre 1mm y 100mm, por ello no están afectados por las situaciones atmosféricas ni por las condiciones de iluminación.

En los sensores activos la característica común es su capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Normalmente se identifican dos tipos de sistemas dentro de los sensores activos: el radar y el LIDAR (Light Detection And Ranging).

Los primeros usos del radar se desarrollaron sobre plataformas aéreas, que mostró gran versatilidad respecto a la fotografía aérea. En los últimos años se han desarrollado sistemas que mejoran notablemente la resolución espacial que se veía afectada en los primeros prototipos, es el caso del radar de apertura sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar). Su principio de operación se basa en el efecto Doppler, que afecta a la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre el objeto y el sensor.

Además del radar de imágenes, estos satélites han incorporado otros equipos activos de microondas, como el altímetro, que mide con mucha precisión la distancia entre el satélite y la superficie marina, o el dispersómetro de vientos, que mide los campos de vientos (dirección y velocidad) sobre el océano. Además las técnicas interferométricas permiten generar modelos digitales de

elevación del terreno, a partir de la diferencia de fase en el pulso de radar para dos órbitas sucesivas.

El LIDAR es un sensor que emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano. Está formado por un láser que emite una radiación en pulsos o de manera continua que es recogida por un sistema óptico. El Lidar es efectivo sobre áreas libres de nubes y tiene una resolución mayor a los sensores radar de microondas.

Existen distintos sistemas LIDAR de acuerdo a los principales tipos de dispersión: de Mie, Rayleigh y Raman, de resonancia de absorción diferencial y de fluorescencia inducida. Cada uno de estos tipos de LIDAR se orienta a aplicaciones específicas. En teledetección de cubiertas terrestres los más usados son los de fluorescencia inducida que permite detectar manchas de aceite, algas y contaminantes del agua, condiciones de humedad en la vegetación, contenido de pigmentos y cálculo de biomasa.

## **2.5 RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR**

La resolución de un sistema sensor es definida como su habilidad para discriminar información en detalle, así la resolución depende del efecto combinado de sus distintos componentes. Una mejora de la lente - por ejemplo - no supondrá necesariamente adquirir fotografías con mayor resolución, si no se acompaña de una película de mayor sensibilidad, o no se modifican las condiciones de exposición.

Los términos “discriminar” e “información en detalle” que aparecen en la definición merecen un análisis detallado, ambos dependen del propósito y el entorno geográfico. La separabilidad entre objetos está en íntima relación con la escala de trabajo y con la complejidad del paisaje.

Por ejemplo, pueden detectarse algunos rasgos geográficos, como ríos o carreteras, de anchura inferior a la resolución espacial del sensor, siempre y cuando exista suficiente contraste radiométrico entre la señal proveniente de estos rasgos y las cubiertas vecinas. Cuanto mayor sea este contraste entre cubiertas, más se distinguirán estas.

En cuanto al significado de “información en detalle”, se refiere no solo al detalle espacial que proporciona el sensor, sino también al número y anchura de las bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal, y a su capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta. En general, el concepto de resolución implica cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

### 2.5.1 Resolución espacial

Este término designa el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen. En los sensores optoelectrónicos, como es el caso de este trabajo, se prefiere utilizar el concepto de campo de visión instantáneo (instantaneous field of view, IFOV). El IFOV se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado por el sensor.

$$IFOV = 2\text{tg}^{-1}\left(\frac{w}{2f}\right) \cong \frac{w}{f} \quad (7)$$

En donde  $w$  es el tamaño de detector y  $f$  la longitud focal del sistema de lentes. En lugar de esta definición suele utilizarse la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, que puede calcularse a partir de él, conociendo la distancia del suelo al sensor.

$$d = 2H\text{tag}\left(\frac{IFOV}{2}\right) = w\frac{H}{f} \quad (8)$$

Donde  $H$  es la altura a la cual opera el sensor. Esta distancia corresponde con el tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina PIXEL (Picture element). Esta es la medida mas general de la resolución espacial, aunque también se emplean otros términos mas complejos, como ERE (Efective Resolution Element) o EIFOV (Effective Instantaneous Field Of View), que consideran la señal detectada como una función modulada compuesta.

En general, la resolución espacial de un sensor optoelectrónico depende de varios factores, como son la altura orbital, velocidad de exploración, y el número de detectores.

El concepto de resolución espacial considera que solo serán discriminables en la imagen elementos de tamaño superior, por lo menos al del píxel, aunque varios autores han demostrado que este umbral suele elevarse a cuatro veces ese tamaño mínimo. En consecuencia, la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fidelidad finalmente obtenida en la interpretación. Cuanto menor sea el tamaño del píxel, menor también la probabilidad de que este sea un compuesto de dos o mas cubiertas fronterizas. Un píxel mixto estará definido por una señal intermedia a las distintas cubiertas que lo componen.

En consecuencia, puede no asemejarse a ninguna de ellas, lo que dificultará notablemente su identificación. Sin embargo, en el caso concreto de algunas cubiertas, singularmente las urbanas, se ha comprobado que incrementar la resolución espacial puede afectar negativamente a la interpretación, cuando esta se realiza digitalmente, al incrementar excesivamente la heterogeneidad interna de algunas categorías.

### **2.5.2 Resolución espectral**

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor. Un sensor será más idóneo cuando posea un número mayor de bandas, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, es importante que esas bandas sean suficientemente estrechas, con el objeto de recoger la señal sobre varias regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

### **2.5.3 Resolución radiométrica**

Es la capacidad que posee el sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe, es conocida normalmente como sensibilidad del sensor. En el caso de sistemas fotográficos, la resolución Radiométrica se indica por el número de niveles de gris recogidos por la película. Para los optoelectrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, por lo que la esta resolución suele identificarse con el rango de valores que codifica el sensor. Normalmente se expresa en número de bits que precisa cada elemento de la imagen para ser almacenado.

### **2.5.4 Resolución temporal**

Es la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. Se refiere a la periodicidad con la que se adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo total de abertura.

## **2.6 PLATAFORMA SATELITAL LANDSAT -7**

Una clasificación elemental de los tipos de plataformas disponibles en función de su órbita los divide en geosíncronos y heliosíncronos. Los primeros también

llamados geoestacionarios, están colocados en órbitas muy altas, lo que les permite sincronizarse al movimiento de la tierra, y observar siempre la misma zona. Además, de contar con un campo amplio de visión pueden observar, en una sola imagen, el disco completo de la Tierra que sea visible desde la longitud a que se encuentren.

Las plataformas móviles, son aquellas que observan sistemáticamente distintas zonas del planeta. Aunque la órbita puede ser elíptica, lo normal es que sea circular, a fin de mantener en lo posible la misma altura de observación para que las imágenes obtenidas sean comparables.

Estas órbitas suelen ser polares (es decir, el plano de la órbita del satélite es aproximadamente perpendicular al plano del Ecuador terrestre), con el propósito de aprovechar el movimiento de rotación del planeta a fin de que la plataforma se sitúe sobre un mismo punto cada cierto tiempo: si la Tierra rota de Oeste a Este, y la plataforma orbita de Norte a Sur de manera constante, esta podrá observar el mismo punto de la Tierra transcurrido un tiempo que dependerá de la velocidad y la altura de la órbita. A este tipo de órbitas se les denomina heliosíncronas.

### **2.6.1 Características orbitales**

La versión 7 del sistema satelital Landsat fue puesto en órbita en junio de 1999, con unas dimensiones de 4,07 m x 2,08 m y un peso aproximado de 2126 kg. Su operación es administrada por la NASA (National Space and Space Administration) y la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United States Geological Survey).

La órbita es heliocéntrica, es decir que pasa por el mismo lugar a la misma hora a una altura de 705 km con una resolución temporal de 16 días y ligeramente inclinado a 98.9°. El satélite cruza el ecuador de norte a sur entre las 10:00 AM y las 10:15 AM a una rapidez de 7.5 km/s con un tiempo

aproximado de 99 minutos por órbita. El sistema realiza 14 órbitas por día, cubriendo la tierra entre las latitudes  $81^{\circ}$  y  $-81^{\circ}$ . El tamaño de la escena es de 183 km x 170 km.

El sensor ETM+ es una mejora del TM empleado por la serie Landsat con la adición de una banda pancromática, dos rangos de ganancia, una mejor resolución espacial en la banda térmica y la inclusión de dos calibradores solares. El ETM+ posee ocho bandas que pueden obtener imágenes de alta resolución de la superficie terrestre, la resolución espacial es de 30 m en multiespectral y 15 m pancromática.

El siguiente cuadro muestra las características espectrales y espaciales del sensor ETM+. Los valores expresados en micrones, presenta los límites de las longitudes de onda a las cuales son sensible cada banda espectral.

<b>Número de la banda</b>	<b>Nombre de la banda</b>	<b>Rango espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolución espacial (m)</b>
1	Azul	0,45 - 0,52	30
2	Verde	0,53 - 0,61	30
3	Rojo	0,63 - 0,69	30
4	Infrarrojo cercano	0,78 - 0,90	30
5	Infrarrojo medio-bajo	1,55 - 1,75	30
6	Infrarrojo térmico	10,4 - 12,5	60
7	Infrarrojo medio-alto	2,09 - 2,35	30
8	Pancromático	0,52 - 0,90	15

**Tabla 1. Característica del sensor ETM+**

### **3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE**

#### **3.1 DISTORSIONES DE UNA IMAGEN SATELITAL**

Una imagen adquirida por un sensor remoto, ya sea aéreo o espacial presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a varios factores, los cuales pueden agruparse en cuatro apartados:

##### **3.1.1 Distorsiones originadas por la plataforma**

Pese a la gran estabilidad de un satélite de observación, muy superior a la que ofrece un avión, pueden producirse variaciones en la altitud de su órbita, en la velocidad, o en la orientación de cualquiera de sus tres ejes: alabeo (roll), cabeceo (pitch) y giro lateral (yaw). En el primer caso, se producen cambios en la escala de la imagen, mientras en el segundo, distorsiones de distinto tipo en su geometría de adquisición. Ambos factores se consideran no sistemáticos, puesto que aparecen de forma esporádica y son, por ello, difícilmente predecibles y complejos de manejar.

##### **3.1.2 Distorsiones provocadas por la rotación terrestre**

Teniendo en cuenta la altitud de la órbita y el área abarcada por el sensor, el efecto de la rotación terrestre puede aparecer claramente en la imagen. Por ejemplo, en el caso del sensor MSS del satélite Landsat, cada imagen de 185Km x 185Km se adquiere, en unos 28 segundos (latitudes del norte). En este lapso de tiempo, desde la primera a la última línea de barrido, la Tierra se ha desplazado sensiblemente (unos 8 Km), lo que causa, junto a la propia inclinación de la órbita, una orientación de la imagen Noreste-Suroeste. También provocada por la superficie terrestre es la variación del tamaño del píxel por efecto de la curvatura terrestre.

### **3.1.3 Distorsiones provocadas por el sensor**

Los sensores de barrido electrónico realizan una exploración perpendicular a la trayectoria del satélite, gracias al espejo oscilante que envía la radiancia registrada a una cadena de detectores de estado sólidos. Este movimiento puede alterarse por anomalías del sensor, provocando un efecto de barrido no lineal o cambios en el intervalo de recogida de información, lo que implica transformar la resolución efectiva de la imagen.

El ángulo con el que se realiza ese barrido tiene también un importante efecto sobre la imagen. En el caso de sensores de ángulo ancho de barrido (AVHRR o CZCS, por ejemplo), se presenta una distorsión panorámica amplia, tanto mayor cuanto más nos alejamos del nadir. En consecuencia, el tamaño del píxel varía sensiblemente desde el centro hacia los extremos de la imagen. Cuando se trata de sensores con menor campo de visión (MSS, TM, ETM+ o HRV), estos efectos son de menor calibre, por lo que no se tiene en cuenta en los procedimientos implementados.

### **3.1.4 Distorsiones provocadas por la atmósfera**

Los distintos elementos que componen la atmósfera causan una modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre. El efecto más importante es el de dispersión del flujo reflejado desde la superficie, a consecuencia de la presencia de aerosoles, gases y vapor de agua. Este efecto implica un aumento de la señal recibida por el sensor y es más sensible en las longitudes de onda cortas, que tienden a presentar un menor contraste entre coberturas de similar comportamiento radiométrico.

Algunos de estos problemas se solventan rutinariamente en los centros encargados de la recepción o venta de las imágenes. Otros, sin embargo, persisten, haciendo precisas una serie de técnicas de ajuste. Por ejemplo, las correcciones radiométricas son vitales para modelar parámetros físicos

a partir de la imagen o para abordar estudios multitemporales. En este último caso, también son necesarias las correcciones geométricas, así como siempre que se pretenda relacionar la imagen con algún tipo de información auxiliar.

### **3.1.5 Correcciones radiométricas.**

Este es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen caso de una recepción ideal. Dentro de este concepto se engloban los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor. Los procedimientos más comunes incluyen restauración de líneas o píxeles perdidos y correcciones del bandeo de la imagen los cuales se basan en los criterios de vecindad y operaciones con histogramas de las bandas de la imagen.

### **3.1.6 Correcciones geométricas.**

Las correcciones geométricas incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman (sus coordenadas). La transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. Esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí. En el primer caso, se pretende encontrar una relación que transfiera los ND de la imagen a su posición cartográfica, en la proyección requerida. Esto permite que la imagen resultante pueda combinarse con información auxiliar o integrarse a un sistema de información geográfica (SIG). En el segundo caso la transformación geométrica de la imagen tiene por objetivo ajustarla a otra imagen que se considera como referencia, normalmente con objeto de realizar estudios multi-temporales.

La corrección geométrica de imágenes puede abordarse de acuerdo a dos procedimientos. En el primero, denominado corrección orbital, se pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, aplicando transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello, es preciso disponer, con bastante precisión, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas, pueden corregirse errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita.

El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de modelar el error geométrico de la imagen a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control. En este caso, el error se modela inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo, como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

Ambos métodos tienen sus ventajas e inconvenientes. El primero es mucho más automático, pues los datos orbitales se reciben directamente con las imágenes y apenas se requiere intervención humana. Resulta, además muy adecuado cuando el sensor no proporciona información fiable para localizar los puntos de control, ya sea por tratarse de imágenes marinas (sin referencias visuales), ya con cobertura de nubes o con poca resolución donde apenas puedan identificarse rasgos cartográficos. Este es el procedimiento habitualmente empleado para corregir imágenes de baja resolución (AVHRR o Meteosat). Su principal inconveniente es la escasa precisión cuando la telemetría del satélite no es muy exacta o cuando la imagen incluye errores aleatorios, como los debidos a movimientos imprevistos del sensor o al relieve local, que pueden llegar a suponer desplazamientos del orden de  $\pm 5$  píxeles. No obstante, con modelos más elaborados, que pueden incluir algún punto de control terrestre, el orden de precisión se eleva hasta  $\pm 1$  píxel. Por su parte, el método de puntos de control resulta bastante tedioso, pues requiere una notable intervención humana para localizar adecuadamente esos puntos, pero

ofrece una alta precisión cuando se trabaja sobre zonas e imágenes en donde es clara la identificación de rasgos comunes a la cartografía básica.

### 3.2 REALCES Y MEJORAS DE LA IMAGEN

Los realces tratan de disponer mejor los datos para su análisis, de tal forma que sean más evidentes los rasgos de interés que presenta la imagen.

#### 3.2.1 Ajuste del contraste

Estos procesos tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización. Cada sensor codifica la radiancia en un número determinado de ND, este rango digital puede no corresponder con el número de niveles de visualización (NV) que facilita la memoria gráfica, por lo que es necesario ajustar, por algún procedimiento, ambos parámetros. Se presentan dos situaciones: a) que el rango de los ND de la imagen sea menor que el de NV facilitado por el sistema de visualización y b) que la imagen presente un mayor número de ND que posibles NV. En el primer caso se aplica una expansión del contraste, mientras en el segundo una reducción del mismo.

Es posible definir digitalmente el contraste por relación a los ND máximo y mínimo de una imagen. Tal definición puede en cualquiera de las medidas de dispersión usadas en estadística:

$$C_1 = ND_{\max} / ND_{\min} \quad (9)$$

$$C_2 = ND_{\max} - ND_{\min} \quad (10)$$

$$C_3 = S_{ND} \quad (11)$$

Las expresiones anteriores muestran tales definiciones: el cociente entre el valor máximo y el valor mínimo, el rango, y la desviación estándar (desviación típica) de los ND de la imagen. En la mayor parte de las aplicaciones se

emplea el primero de estas definiciones. A partir de estas medidas, puede juzgarse la necesidad de expandir o comprimir el contraste, en función de la capacidad de visualización ofrecida por el sistema.

### **3.2.2 Tabla de referencia de color (CLUT o LUT)**

Una tabla de referencia de color (Color Look Up Table), es una matriz numérica que indica el NV con el que se representa en pantalla cada uno de los ND de la imagen. En consecuencia no tiene por que haber una equivalencia entre los ND y los NV. En la mayor parte de los equipos de tratamiento, la LUT es una matriz numérica de 3 columnas por 256 filas. El orden de la fila indica el ND de entrada, mientras el almacenado en la tabla indica el NV con el que el ND será presentado. Las tres columnas corresponden a los colores rojo, verde, azul. El uso de las LUT disminuye las necesidades de almacenamiento además evitar la pérdida de información original, ya que no se modifican los ND originales.

Una vez realizado un correcto realce de las imágenes, es necesario obtener información de interés. Para tal fin, se realiza una discriminación de grupos de ND homogéneos dentro de la imagen en un proceso denominado clasificación digital. Una de estas clasificaciones implementadas se realiza a partir de una imagen que resulta del análisis de componentes principales, lo cual busca sintetizar varias bandas reduciendo la información redundante.

### **3.3 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES**

El objetivo del análisis de componentes principales (ACP) es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original [6]. El ACP puede aplicarse como realce previo a la interpretación visual o como procesamiento anterior a la clasificación, las cuales fueron implementadas en este trabajo. La imagen transformada puede destacar ciertas características que no eran discernibles

en los datos originales o, alternativamente, preservar la información esencial contenida en la imagen en un número menor de dimensiones.

Desde un punto de vista estadístico, el ACP facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, lo que permite identificar aquellos rasgos que aparecen en la mayoría de las bandas y aquellos que son específicos a un grupo de ellas [9]. En definitiva, proporciona una mejor distribución de los datos, frente a esos ejes de variabilidad, lo que puede facilitar una identificación más nítida de las distintas cubiertas.

Algebraicamente, el ACP genera nuevas variables (componentes), mediante una combinación lineal de las variables originales (bandas) [6]. Aunque se requiere una variabilidad total, muchas veces la mayor parte de este está contenida en un número menor de componentes.

Gráficamente se intuye que la rotación de los ejes X, Y hacia las direcciones A, B, mejorará la disposición original de los datos, y probablemente también la separación entre los grupos de píxeles homogéneos de la imagen. Esta rotación se obtiene aplicando la función del tipo:

$$CP_1 = a_{11}ND_i + a_{12}ND_k \quad (12)$$

Donde  $CP_1$  indica el calor correspondiente el primer componente principal, obtenido a partir de los ND originales de las bandas i, K, tras aplicarles unos determinados coeficientes  $a_{11}$  y  $a_{12}$ . Desde el punto de vista geométrico y como puede observarse en la figura 4, este nuevo eje solo supone una rotación de los originales.

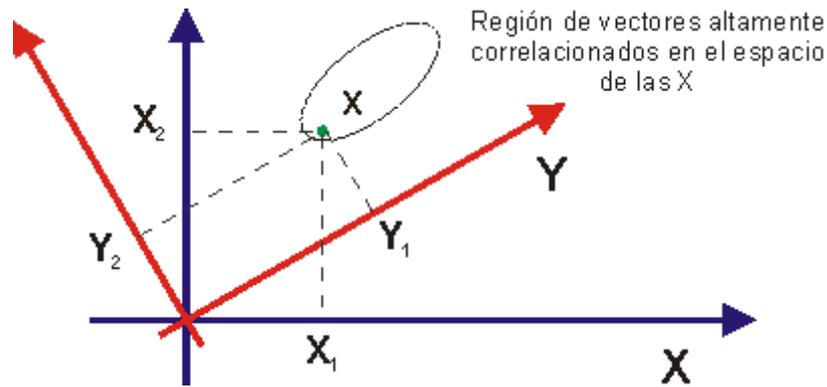


Figura 5. Sistema de coordenadas modificadas. Rotación de los ejes originales

En términos generales, los componentes principales de una imagen se obtiene de acuerdo a:

$$CP_j = \sum_{i=1,p} a_{i,j} ND_i + R_j \quad (13)$$

Donde el  $CP_j$  indica el ND correspondiente al componente principal  $j$ ,  $a_{i,j}$  el coeficiente aplicado al ND de la banda  $i$  para generar el componente  $j$  y  $R_j$  una constante que suele introducirse en cada componente para evitar valores negativos. Existen tantos componentes como bandas de la imagen, pero la forma de extraer estos componentes implica que solo los primeros tienen información significativa.

El estudio de la relación entre bandas, que es la base del ACP, puede realizarse de dos maneras, con la matriz de varianza-covarianza y la matriz de correlación. En este estudio los componentes principales más significativos fueron escogidos de acuerdo a sus varianzas asociadas, determinadas a partir de la siguiente expresión:

$$V_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1,p} \lambda_j} \quad (14)$$

Donde  $V_i$  es la varianza asociada a cada componente,  $\lambda$  son los valores propios de cada uno de los componentes que expresan la longitud de cada componente y son determinados a partir de la matriz de varianza-covarianza.

### **3.4 CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

En la mayoría de las aplicaciones en teledetección, la clasificación digital es la fase culminante del tratamiento digital de imágenes. La clasificación digital es el proceso de agrupar los píxeles en un número finito de clases individuales o de categorías de datos con base en los niveles digitales de los datos. Si un píxel satisface cierto criterio, entonces el píxel es asignado a la clase que corresponda a ese criterio.

#### **3.4.1 Métodos de clasificación**

Tradicionalmente se han dividido los métodos de entrenamiento o clasificación de dos maneras: supervisado y no supervisado, de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento.

#### **3.4.2 Método no supervisado**

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. Este entrenamiento, se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (clusters), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían formar clases temáticas de interés, posterior al agrupamiento se hace necesario interpretar el significado temático de esas categorías espectrales.

Los métodos para definir los agrupamientos espectrales se basan fundamentalmente en la selección de tres parámetros: a). variables que intervienen en el análisis, b). criterio para medir similitud o distancia entre casos, y c). criterio para agrupar los casos similares.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos grupos: uno que mida la similitud entre los píxeles, y otro que marque las condiciones del

proceso de agrupamiento. En cuanto al primero se han propuesto varios criterios para medir la distancia entre píxeles. El más utilizado se basa en la distancia euclidiana:

$$d_{a,b} = \sqrt{\sum_{i=1,m} (ND_{a,i} - ND_{b,i})^2} \quad (15)$$

Donde  $d_{a,b}$  indica la distancia entre dos píxeles cualquiera a, b;  $ND_{a,i}$  y  $ND_{b,i}$ , los niveles digitales de esos píxeles en la banda i, y m el número de bandas. También pueden usarse otros criterios para medir la distancia entre píxeles, como sería el caso de la distancia media, o de Mahalanobis.

En cuanto a los algoritmos de agrupamiento uno de los más empleados es el ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) que usa consta de los siguientes pasos:

- Se señalan una serie de media o centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario.
- Se asignan todos los píxeles de la imagen los centros de la clase más próximo.
- Se calculan de nuevo los centros de clase teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se le hayan incorporado en la fase anterior.
- Se re-ordenan los centro de la clase en función de los parámetro de control indicados por el usuario (distancia mínima entre grupos, tamaño mínimo de un grupo, desviación estándar y número de grupos).
- Se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano.
- Si el número de píxeles que se han cambiado de categoría es inferior al señalado por el usuario se termina con el proceso; en caso contrario, se retorna al tercer paso.

### **3.4.3 Método supervisado**

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. En este método se identifican áreas suficientemente representativas (áreas de entrenamiento) de cada una de las categorías que componen la leyenda. Finalizada la selección de las áreas de entrenamiento, es preciso calcular las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación estándar, matriz de varianza-covarianza, etc., a partir de los niveles digitales incluidos en las áreas de entrenamiento asignadas a la clase. Este cálculo es aplicado a todas las bandas que intervienen en la clasificación.

## **3.5 EVALUACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DIGITAL**

Independiente del método de entrenamiento empleado en definir la fase de entrenamiento antes de abordar el proceso de clasificación, conviene reflexionar sobre la separación de las categorías seleccionadas. Algunos métodos de evaluación gráficos incluyen diagramas de firmas o firmas espectrales, donde figuran, en abscisas, las bandas que intervienen en el análisis, mientras en las ordenadas los ND medios de cada categoría. El gráfico resulta útil para proporcionar una valoración de las tendencias espectrales de cada categoría.

Otras formas de identificar solapes entre categorías de acuerdo a la respuesta espectral es a través de los diagramas de dispersión, histogramas de frecuencias, este último parte del supuesto de que las categorías tienen una distribución normal. Además de los procedimientos gráficos, existen algunos criterios cuantitativos que permiten evaluar numéricamente la posibilidad de discriminar las distintas categorías. Se implementaron la separabilidad de firmas, matriz de contingencia para evaluar la clasificación supervisada. Estas se describen a continuación:

### 3.5.1 Separabilidad de las firmas

Esta utilidad calcula la distancia estadística entre firmas, esta distancia puede ser usada para determinar lo distintas que son las firmas entre si, además puede ser usada para determinar mejor el subconjunto de capas que van a ser usadas en la clasificación [7]. Existen varias opciones para medir la separabilidad de las firmas entre las que se encuentran: la distancia espectral euclidiana entre media de las firmas, distancia Jeffries-Matusita, divergencia, divergencia transformada, siendo esta ultima la implementada en este trabajo. La divergencia transformada es definida como:

$$TD_{ij} = 2 \left( 1 - \exp \left( \frac{-D_{ij}}{8} \right) \right) \quad (16)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr} \left( (C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1}) \right) + \frac{1}{2} \text{tr} \left( (C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T \right) \quad (17)$$

$i, j$  = las dos firmas comparadas (clases)

$C_i$  = matriz de covarianza de la matriz de la firma  $i$

$l$  = Vector de medias de la firma  $i$ .

$\mu_i$  = vector de medias de la firma  $i$ .

tr = Función traza

$T$  = Transpuesta de la función

$D_{ij}$  = es la medida de la divergencia entre las categorías  $i, j$ .

El valor máximo que puede tomar  $TD$  es 2000 [12], definiendo la máxima distancia entre categorías. Algunos autores [20], asumen que el uso de la  $TD$  incluye el algoritmo de máxima probabilidad que será el más conveniente para el proceso de clasificación.

### 3.5.2 Matriz de contingencia

Esta utilidad permite evaluar las firmas que se han creado a partir de las áreas de entrenamiento de la imagen. Aquí se clasifican los píxeles de la muestra de entrenamiento de la imagen, basada en las firmas. Usualmente se espera que los píxeles de un área de interés sean clasificados en la misma clase de entrenamiento. Sin embargo, los píxeles de una muestra de entrenamiento únicamente dan peso a las estadísticas de la firma. Ellos generalmente no son tan homogéneos como para que cada píxel sea

asignado a la clase esperada. La matriz de contingencia es una matriz de porcentajes que permite ver cuantos píxeles de cada muestra de entrenamiento fueron asignados a cada clase.

Las muestras de entrenamiento son clasificadas usando ciertos algoritmos entre los cuales se encuentran: paralelepípedo, máxima probabilidad (verosimilitud), distancia de Mahalanobis.

### **3.6 CRITERIOS DE ASIGNACIÓN**

Desde el punto de vista estadístico los criterios de asignación tratan de definir un área dominio, en torno al centro de cada categoría a discriminar, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas entre clases son:

- a) Mínima distancia, por el cual el píxel se asigna a la clase más cercana.
- b) Paralelepípedos, que permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociados a cada clase,
- c) Máxima probabilidad o verosimilitud, en donde el píxel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia.

Existen otros criterios de asignación los cuales disminuyen las limitaciones en cuanto al cálculo y la exigencia de contar con distribuciones normales, entre ellos, el clasificador en árbol, clasificadores basados en el contexto espacial, basados en redes neuronales y lógica difusa.

A continuación se describe el método de máxima probabilidad empleado en la clasificación supervisada de la imagen Landsat arrojando los mejores resultados.

#### **3.6.1 Clasificador de máxima probabilidad**

Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Para el caso de trabajar con una sola banda, es posible calcular esa probabilidad de acuerdo a:

$$p(x/ A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} \ell\left\{-\frac{(ND_x - \overline{ND_A})^2}{2\sigma_A^2}\right\} \quad (18)$$

Esto es, la probabilidad de que un píxel  $x$ , definido por un determinado  $ND_x$ , pertenezca a la clase A, puede calcularse a partir de la media ( $\overline{ND_A}$ ) y la varianza ( $\sigma_A^2$ ) de esa clase. Una vez determinada la probabilidad de pertenencia al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese píxel será asignado a la clase A, solo si  $p(x/ A) \geq p(x/ B)$  para todo  $A \neq B$  variando  $B$  desde 1 hasta  $m$ , siendo  $m$  el número de categoría.

Realizando una extensión a dos bandas es más conveniente mostrar un gráfico para su interpretación. Los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal. Cada una de estas elipses define un determinado nivel de probabilidad asociado a una categoría. Cuanto mayor sean las zonas de solape entre ellas, tanto mayor el riesgo de confusión mutua. El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo.

### 3.6.2 Modulación de resultados

Resulta frecuente que los resultados de una clasificación digital adolezcan de una excesiva fragmentación. En otras palabras, las diversas categorías se imbrican entre sí, en una compleja sucesión espacial. Manchas de color, más o menos homogéneas se encuentran salpicadas por píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y siendo difícil la interpretación de los resultados. Este efecto es llamado sal y pimienta (salt and pepper) y es debido a que la mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta

la pertenencia de píxeles vecino, y por otro lado, a la propia complejidad del paisaje, directamente relacionada con la aparición de píxeles de borde-fronterizos a dos o más categorías- que son los principales responsables de la discontinuidad visible del mapa.

Para solventar este problema, suele aplicarse una técnica de suavización de resultados, similar a la concepción pero no en la ejecución a los filtros pasa bajo (eliminan altas frecuencias). El objetivo último es reasignar aquellos píxeles aislados o poco significativos, facilitando una distribución espacial más nítida de las distintas categorías. Para ello se procede a comparar la clase asignada a cada píxel con la que ofrece los píxeles vecinos. Si esa clase es similar a los píxeles del entorno, se mantiene la asignación original; caso contrario, se modifica. En la terminología se distinguen dos tipos de filtro: modal y de mayoría. Otros métodos involucran el cálculo de una superficie mínima para la definición del cluster por lo cual se eliminan todos por debajo de un umbral no deseado, los más conocidos son los filtros CLUMP y SIEVE.

## **4 DESEMPEÑO DEL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA COBERTURA DEL SUELO**

Las imágenes de satélite con sus características sinópticas, multispectrales y multitemporales [2], son una de las fuentes de información más importantes en este tipo de estudios, que permiten un verdadero control del suelo y la interpretación de resultados, clarificando los fenómenos involucrados, a través de la manipulación de datos digitales [18]. La secuencia metodológica se presenta a continuación:

### **4.1 SELECCIÓN Y CARACTERÍSTICA DE LA IMAGEN SATELITAL**

Dentro de la base de datos de imágenes satelitales para exploración de la superficie terrestre con la que cuenta el CCCP, existen imágenes del programa espacial Landsat 7 (ETM+), Landsat 5 (TM), Spot e Ikonos. El sistema satelital LANDSAT-7 EMT+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) es usado comúnmente para determinar tales coberturas gracias a su amplio cubrimiento y fácil consecución, así muchos trabajos realizados en zonas costeras que usan estos sistemas han sido orientados a la generación de mapas, identificación y clasificación de distintas hábitat y biomásas [11].

El nivel de procesamiento que poseen las imágenes usadas es L1G (level 1 geometrically corrected), que contiene correcciones radiométricas y geométricas (sistemáticas). La imagen posee un tipo de datos (ND) enteros sin signo de 8 bits, esta imagen puede ser rotada, alineada y georeferenciada de acuerdo a las proyecciones de mapa que el usuario defina. Los algoritmos de corrección modelan el satélite y el sensor, usando datos generados por computadoras ubicadas sobre la plataforma; este proceso se realiza durante la adquisición de la imagen [19]. La información del sensor, plano focal y detector suministrada por el sistema de valoración de la imagen (IAS) es también usado para proveer una fidelidad geométrica global. Este producto, es libre de

distorsiones relacionadas con el sensor (vibraciones, efectos del ángulo de visión), el satélite (posición, desviaciones), y la tierra (rotación, curvatura). Así la precisión geométrica de este producto sistemáticamente corregido es inferior a 250 m en áreas de bajo relieve a nivel del mar, aunque no emplea puntos de control o modelos del relieve para obtener una precisión geodésica absoluta.

Las imágenes originales están proyectadas en el sistema Universal Transverse Mercator (UTM), zona 17, con elipsoide y datum WGS 84. Estas fueron reproyectadas con el objetivo de unificar la información temática y satelital disponible en el CCCP así:

*Proyección* : Transverse Mercator (TM)  
*Elipsoide* : Internacional 1909  
*Datum* : Internacional 1909  
*Factor de escala del meridiano central:* 1000000  
*Longitud del meridiano central:* 80° 04' 51.03" W  
*Latitud del origen de proyecciones:* 4° 35' 56.57" N  
*Falso Oeste* : 1000000  
*Falso Este* : 1000000

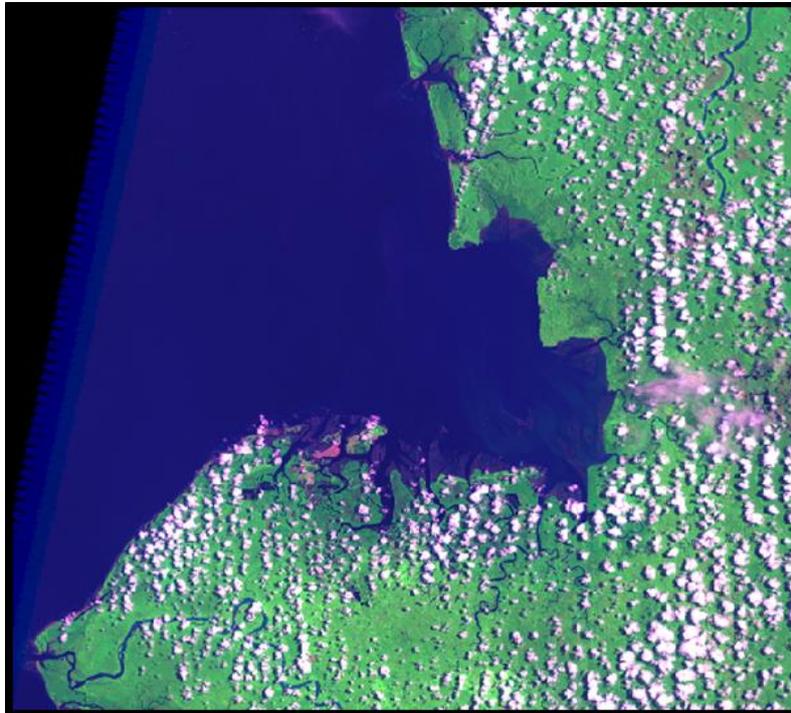
Según el sistema de referencia mundial (world reference system, WRS) las imágenes correspondientes a la zona se ubican en el path de 10 y el row de 59. La siguiente tabla muestra algunos datos de las imágenes usadas.

<b>IMAGEN</b>	<b>FECHA DE ADQUISICIÓN</b>	<b>UTILIDAD</b>
1	Febrero 18 de 2000	Análisis Visual
2	Abril 09 de 2001	Análisis Digital
3	Abril 12 de 2002	Análisis Visual

**Tabla 2. Imágenes de satélite Landsat 7, usadas en la ejecución del proyecto.**

Las imágenes adquiridas en los años 2000 y 2002 se usan como apoyo visual al proceso de clasificación digital, debido a que presentan un alto cubrimiento de nubes. A partir de estas se identifican algunos rasgos geográficos en zonas

de bajo dinamismo y transformación teniendo en cuenta pautas visuales usadas en teledetección como son el tono, textura, color.



Fecha de adquisición: 09 de abril de 2001

**Figura 6. - Imagen Landsat de la zona de estudio. Combinación 641.**

## **4.2 ANÁLISIS VISUAL Y REALCES**

El objetivo del análisis visual se implementa como apoyo a la clasificación digital para evitar confusiones entre coberturas heterogéneas, o aquellas que son similares espectralmente pero de distinto significado temático [6], sirve además para delimitar correctamente las coberturas en zonas donde se presentan fuertes concentraciones de nubes impidiendo que la clasificación automática seleccione correctamente las clases correspondientes.

El análisis visual se hace empleando tres bandas del sensor coincidiendo con la capacidad del monitor (RGB, rojo, verde, azul por sus siglas en inglés) empleado para la presentación de datos. Los monitores poseen tres cañones RGB, con los que, por combinación de estos tres colores se construye el resto de colores. Empleando estos tres colores se tiene la posibilidad de enviar cada

una de las bandas de la imagen, combinándose en la pantalla, generando nuevos colores y tonos los cuales dan información de cada componente de la imagen. Las composiciones realizadas fueron las siguientes:

Combinación en color natural 321 (rojo, verde, azul) Las bandas del visible sirven para analizar aguas poco profundas, con lo que se conseguirá describir parte de la zona de estudio.

Combinación en falso color 453 (Infrarrojo cercano, infrarrojo medio bajo, rojo) Esta combinación permitirá distinguir varios tipos de vegetación gracias a que combina las bandas infrarrojo cercano, medio en donde esta cobertura tiene teóricamente su porcentaje de reflectancia mas alto.

Se realizaron procedimientos de manipulación de contraste y manipulación de las características espectrales, con la finalidad de resaltar algunos detalles de la imagen y de mejorarlos para ser analizados cualitativamente y cuantitativamente, realizando un primer acercamiento al problema de la determinación de la línea de costa importante en al ámbito jurisdiccional. La extracción de la línea de costa y sus estudios multitemporales permiten conocer la dinámica litoral y los procesos geomorfológicos de la zona problema (erosión, acresión, etc.). Se muestran dos métodos que pueden ser tenidos en cuenta con el uso de las imágenes de satélite Landsat. Estos, toman como referencia la separación tierra-mar para su visualización y posterior vectorización.

Un primer método determina a partir de medidas de tendencia central (medias y desviaciones estándar) la banda más adecuada de la imagen Landsat que corresponde a la zona de estudio, la cual es modifica a través de la LUT para obtener una nueva imagen para un mejor análisis visual.

El segundo método toma como imagen de referencia el segundo componente principal generado a partir de la imagen original para posteriormente realizar una manipulación del histograma.

### **4.3 CLASIFICACIÓN DIGITAL**

Una de los métodos más utilizados para generar cartografía es la clasificación digital, aquí la imagen multibanda se convierte en otra imagen, del mismo tamaño y características de la original con la salvedad de que cada píxel no tiene relación con la radiancia (o ND comúnmente) si no que se trata de una etiqueta que identifica la categoría a ese píxel

Se realizaron dos tipos de clasificación, clasificación no supervisada y supervisada con el objetivo de confrontarlas y determinar los mejores resultados de acuerdo a la información que arrojó las salidas de campo.

#### **4.3.1 Método no supervisado**

Dentro de la clasificación no supervisada o automática se usaron dos tipos de imágenes: la imagen original Landsat 7 con seis bandas de resolución 30 m, y otra imagen formada partir del análisis de componentes principales. Obtenida la imagen del ACP fue necesario escalar los resultados en el rango mas común en el equipo de visualización (0-225) para su clasificación.

Este método no supervisado asigna los píxeles de la imagen a diferentes clases con base a sus niveles digitales. Para la ejecución de una clasificación no supervisada se usó método ISODATA que utiliza un algoritmo de distancia espectral mínima (distancia Euclidiana) para formar los cluster. En esta clasificación se definieron los siguientes parámetros:

- Número de clases: Se realizaron clasificaciones con diferente número de clases: 5, 10, 15, 20.
- Máximo numero de iteraciones: Es el número máximo de veces que la utilidad isodata reagrupa los datos, se usan 24 iteraciones en todas las clasificaciones.

- Umbral de convergencia: Se usa un valor de 0.95 lo que indica que cuando el 95% o más de los píxeles están en el mismo cluster entre una iteración y la otra, la utilidad debe suspender el procesamiento.

El número máximo de iteraciones y el umbral de convergencia evita que la utilidad corra demasiado tiempo o que se interrumpa en algún momento.

El método Isodata utiliza un promedio arbitrario o un promedio de un conjunto de firmas espectrales existentes con los cuales empiezan las iteraciones, cuando realiza una iteración este promedio se modifica generando nuevos cúmulos. Se realizaron clasificaciones a partir de medias espectrales generadas arbitrariamente y de medias creadas con base en firmas espectrales de cada cobertura que se identificaron en la imagen.

#### **4.3.2 Método Supervisado**

Este método parte de cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirida por experiencia previa o por trabajos de campo, en particular se dispone de información cartográfica de la zona de estudio generada por el Ministerio del Medio Ambiente y la Corporación Nacional de Fomento Forestal (CONIF) bajo el proyecto “conservación y manejo para el uso múltiple y desarrollo de los manglares en Colombia” realizado en el año de 1996 aunada a las verificaciones de campo que fueron realizadas durante el desarrollo del proyecto, forman una base de datos indispensable en la identificación de los elementos que componen el suelo.

La clasificación supervisada se desarrolló en tres procesos básicos:

- *Definición*, en donde se define áreas representativas de cada una de las clases. Se crearon firmas paramétricas y no paramétricas, las paramétricas contienen información de estadística (definidos por un vector de medias y una matriz de covarianza) y las no paramétricas no

contienen estadísticas y son independientes de las propiedades de estos datos.

- *Evaluación*, permite determinar si las muestras seleccionadas de cada una de las clases pertenece o no a ella. Se usaron alarmas, matriz de contingencia y separabilidad de las firmas que permitieron obtener una visión de la exactitud del proceso.
- *Ejecución de la clasificación*. La clasificación supervisada se realizó mediante el algoritmo de máxima probabilidad a partir del archivo de firmas espectrales creado, el cual contiene 12 firmas paramétricas y 1 firma no paramétrica.

Finalmente fue implementada una etapa de postproceso para generalizar las clases temáticas, permitiendo identificar pixeles aislados y agrupándolos en clases existentes. Se usaron filtros morfológicos Sieve que facilitaran el proceso de vectorización.

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS

El análisis visual y los realces radio métricos permitieron determinar coberturas que se usaron como complemento a la información cartográfica disponible para la clasificación. A través de este análisis se desarrollaron dos propuestas para la extracción de la línea de separación tierra-mar a partir de información satelital.

Estudios [10], muestran que el canal 1 (azul) de las imágenes Landsat es usado para el análisis de materia suspendida sobre el agua. A través de la combinación de bandas 321, fue posible diferenciar aguas turbias compuestas por sedimentos (Bahía de Tumaco, Río Mira, Rosario, y parte del río Patía que aparece en la imagen) las cuales aparecen en tono café claro. Se observó, que la turbidez del agua, relacionada con su contenido de sedimentos, implica un aumento en la reflectividad en todas las bandas del visible (B1, B2, B3).

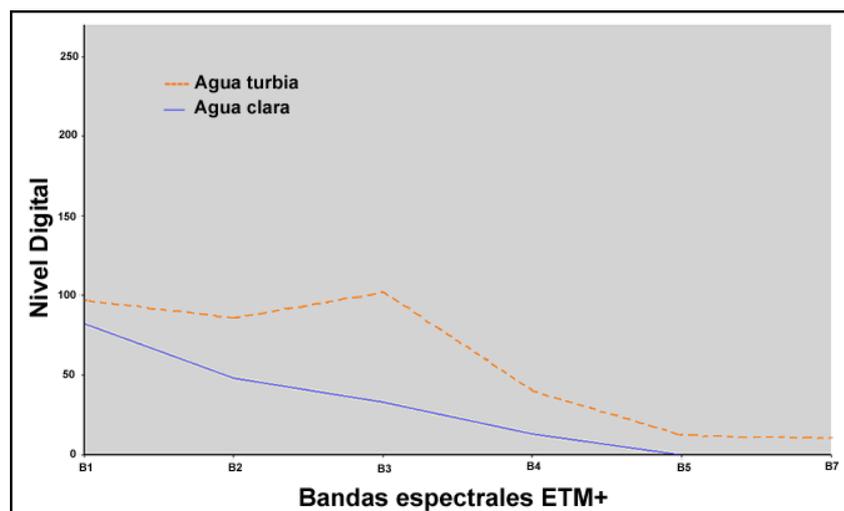


Figura 7. Perfil radiométrico de cuerpos de agua presentes en la imagen.

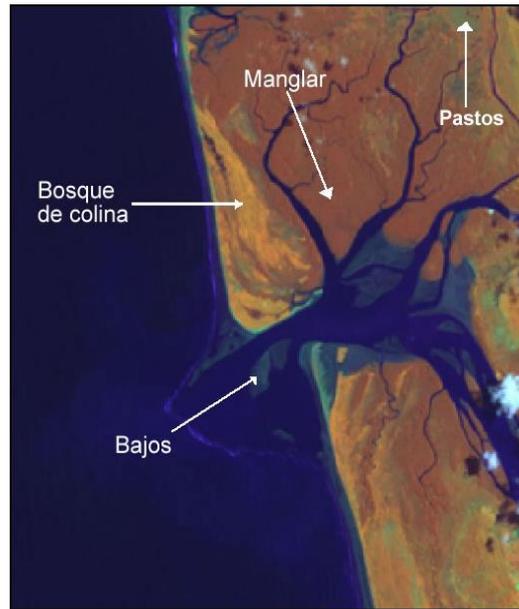
La materia suspendida sobre estos cuerpos de agua afectan los componentes bióticos, litológicos y paisajísticos alterando la cobertura vegetal, en especial las áreas cubiertas por manglar, que hacen parte de los elementos que cubren el suelo en la zona de estudio. La vegetación de tipo boscosa aparece en color verde (figura 6), cubriendo la zona de estudio en su gran mayoría.

La combinación 453 realiza con gran detalle el límite entre el agua y tierra, debido a que la reflectividad de los cuerpos de agua disminuye en las longitudes de onda larga (bandas 4 y 5) en contraste con el aumento de esta, en coberturas vegetales para las mismas bandas (Figura 8). Esta composición realza las diferencias de humedad en el suelo y es usada para el análisis de la misma, en suelos y vegetación. Generalmente el suelo húmedo aparece más oscuro [8]. Se identificaron con esta composición, bajos y terrenos de bajamar originados por la deposición de sedimentos, presentando grandes extensiones que dan lugar a varios canales internos. Conocer estas geoformas de las zonas de bajamar tienen importancia en aspectos como: el comportamiento del oleaje cuando este arriba a dichos sitios (fenómenos de difracción, refracción, etc.), el movimiento, y concentración del flujo de sedimentos y la estabilidad de estas zonas a largo plazo.

El límite entre mar y continente se diferencia a partir de la línea de vegetación permanente observada debido a la diferencia de tonos (Figura 8). Algunos tipos de vegetación se muestran en colores marrones, verdes y naranjas, así:

- Marrón, corresponde a un tipo de manglar caracterizado por su altura entre 25m y 40m.
- Amarillo, Bosques de colina.
- Verde oscuro, manglar de porte bajo entre 4m y 12m
- Verde claro, pastos y potreros.

La información anterior fue complementada con salidas de campo y con fuentes cartográficas de la zona para años anteriores con lo cual se observó que dichas coberturas no varían en su ubicación geográfica pero si levemente en su extensión.



Lugar: Bocana Hojas blancas, al norte de la bahía de Tumaco

**Figura 8. Identificación espectral de algunas coberturas, composición 453.**

## 5.2 METODOLOGÍAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE.

La primera parte del conocimiento de las medidas de tendencia central de los parámetros de la imagen, que ofrecen una primera valoración sobre el carácter de cada una de las bandas y su grado de homogeneidad [6]. El análisis de estos parámetros permitirá seleccionar la banda o combinación de bandas más idóneas para la identificación de la línea de separación tierra- mar.

Las correspondientes a la imagen de la zona de estudio se presentan a continuación:

	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Típica</b>
<b>Banda 1</b>	0	255	89.316	45.485
<b>Banda 2</b>	0	255	66.388	45.445
<b>Banda 3</b>	0	255	54.926	49.859
<b>Banda 4</b>	0	239	58.034	48.524

<b>Banda 5</b>	0	255	55.114	54.801
<b>Banda 7</b>	0	234	32.917	38.627

**Tabla 3. Medidas estadísticas de las bandas de la imagen de la zona de estudio.**

En el cuadro anterior, se puede ver que las bandas del visible presentan valores máximos (255 ND), debido a la presencia de los cristales de hielo en las nubes de la escena analizada. Estos cristales presentan una reflectividad elevada en longitudes de onda corta.

La banda 7 (Infrarrojo medio alto) presenta un menor rango, 234 niveles digitales (ND), en comparación con las otras bandas, y una menor desviación típica, por tanto presenta una menor dispersión y ofrece el peor contraste de la escena.

El canal 5 (infrarrojo medio bajo) está bastante saturado lo que se determinó por los valores mínimos y máximos, muy próximos a 0 y 255 respectivamente, presenta una desviación típica grande (54,801), indicando que los datos de esta banda están bastante dispersos. Aunque este canal es el más sensible a las alteraciones de radiancia (mejor contraste), se escogió la banda 4 (infrarrojo cercano) como una de las imágenes a manipular para la extracción del límite temporal tierra-mar, debido a que se ve menos afectada por la presencia de nubes (máximo ND es 239), además del análisis del comportamiento espectral del agua y la vegetación en la cual, la primera, presenta valores inferiores en ND cuando cae en las bandas del infrarrojo cercano y medio, y la segunda presenta valores bajos en el visible aunque con un pico en la banda verde debido a la clorofila, y alta en el infrarrojo cercano. La figura 9, muestra las firmas espectrales (tendencia media) del manglar bosques de colina y cuerpos de agua, los dos primeros hacen parte de la franja continental inmediata en gran parte de la zona de estudio, se observa en la banda 4 el comportamiento expuesto.

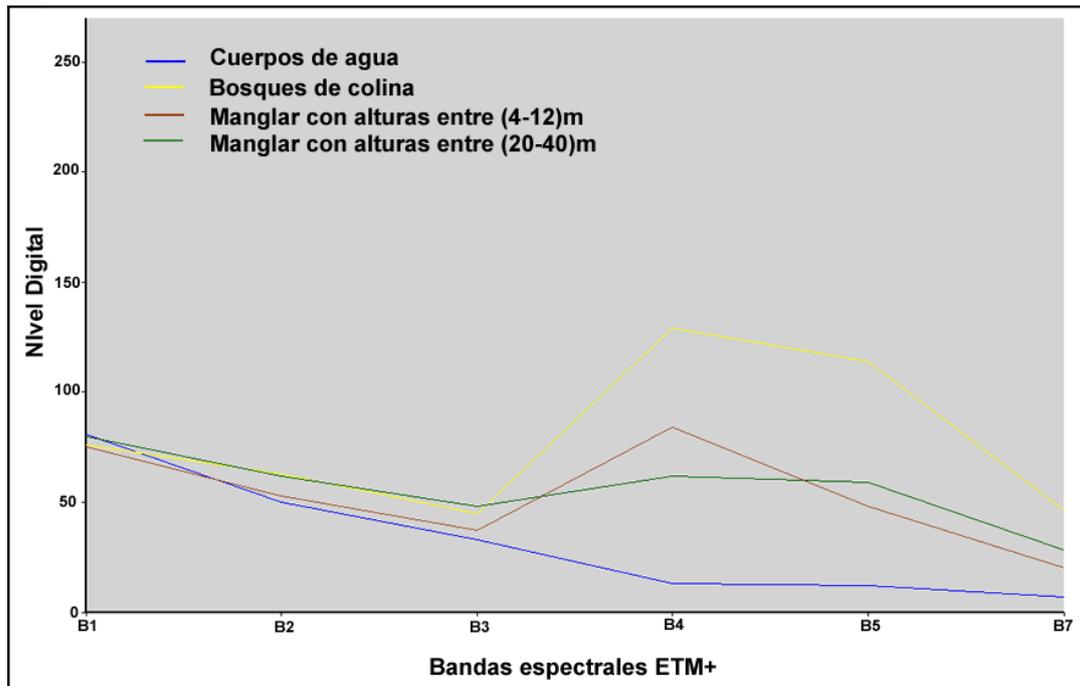
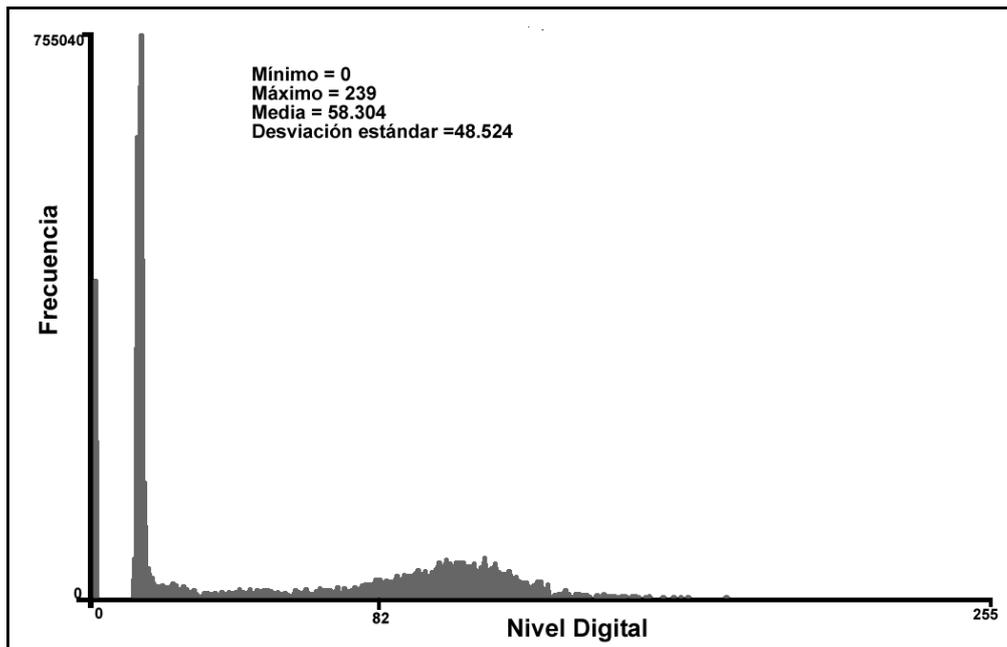


Figura 9. Diagrama de alguna firmas espectrales que intervienen en la clasificación

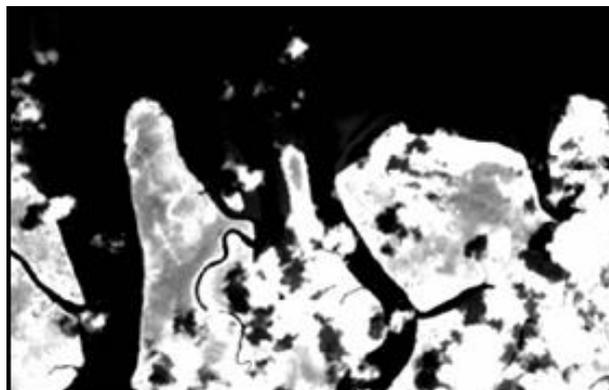
La región de interés en el primer método de la extracción de la línea de costa es el infrarrojo cercano (banda 4), por las características mencionadas.

Resulta de gran interés contar con el histograma de la banda 4, en cual brinda información sobre como se distribuye los ND en la imagen. A partir de esta información, fue posible realizar una umbralización de la imagen lográndose un mejor aspecto visual para la delimitación del límite tierra mar. La figura 10 muestra el histograma de este canal.

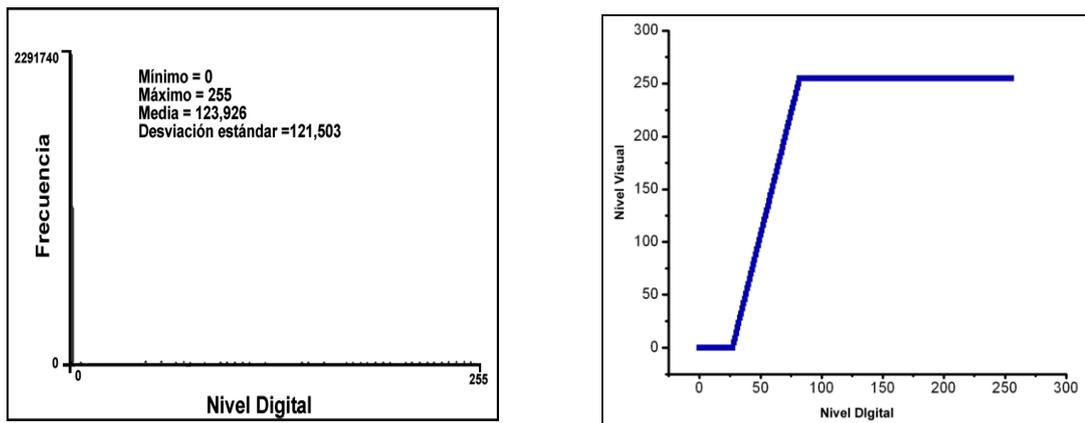


**Figura 10. Histograma original Banda 4. Región del Infrarrojo cercano**

Se observa una distribución bimodal del histograma, que permitió una razonable separación entre las clases mar y tierra mediante la consideración de un valor umbral determinado (ND = 82). En la LUT se asignó el valor de cero a los niveles digitales por debajo de este umbral. Las coberturas con niveles digitales inferiores a este umbral fueron; mar, bajamar y playas. Se presentan una gran cantidad de píxeles con valores de 0 o muy cercanos a él, que existen debido al plano de fondo (background) de la imagen. Este plano no afecta los resultados finales por su presencia en todas las bandas. El gráfico 11, muestra el resultado obtenido.



**Figura 11. Imagen umbralizada.**

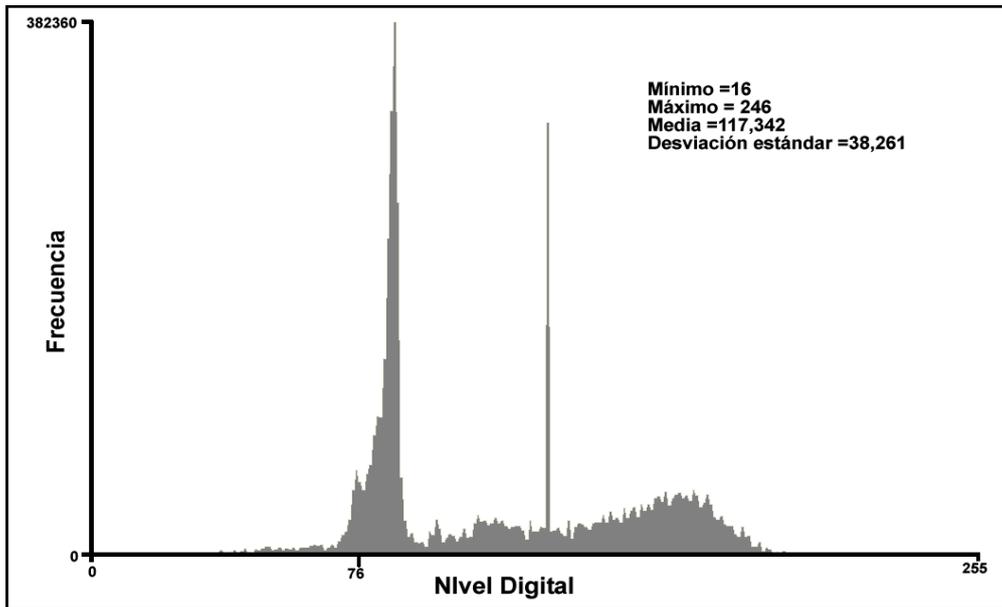


**Figura 12. a) Histograma; b) gráfico de LUT para la imagen umbralizada**

El histograma de la imagen ecualizada y la función que representa los valores de la LUT se muestran en la figura 12. Pequeños valores en ND determinan grandes variaciones a nivel visual, lo que corresponde a una expansión del contraste, específicamente una expansión lineal del contraste. Se observa que las coberturas mar, bajamar, playas, identificada con ND pequeños en la figura 11, ahora aparecen en 0, después de implementada la función de corte.

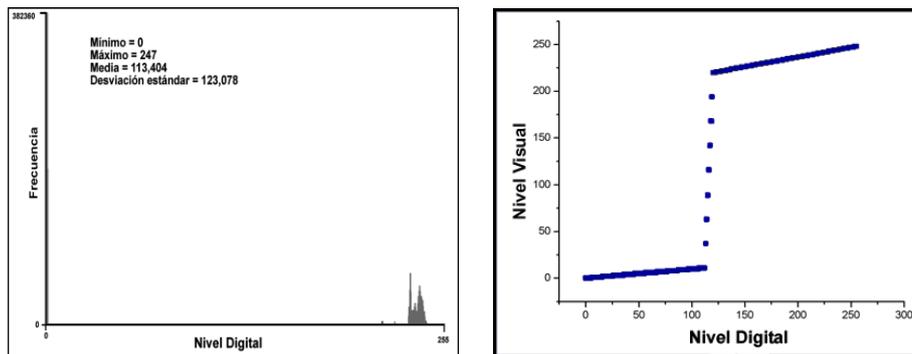
En general, el procedimiento no logró disminuir el efecto de las nubes sobre la imagen. Aunque se pudo resaltar la zona continental, las nubes se confunden espectralmente con algunas coberturas vegetales.

Otro método para la extracción de la línea de costa, consideró la segunda capa del ACP como imagen a realzar debido a que evidenció sectores con una alta actividad clorofílica, las cuales ocupan la franja costera de la zona de estudio.



**Figura 13. Histograma segundo componente principal.**

Este gráfico muestra algunos picos bien definidos de frecuencia los cuales pertenecen a coberturas fácilmente identificables: la mayor frecuencia pertenece a cuerpos de agua, el pico intermedio, corresponde a coberturas de tipo de manglar, los picos secundarios pertenecen a las demás coberturas vegetales. El máximo ubicado en 76 ND pertenece a las nubes presentes en la imagen, alejándose de las coberturas de interés (valores superiores a la media). Este comportamiento no se observó en la banda del infrarrojo cercano de la imagen original, ya que en esta las nubes contienen valores de ND grandes (cerca de 255 ND). Las características que presenta esta capa, la hacen óptima para realizar un realce del histograma. El histograma y la LUT de la imagen umbralizada, se presentan en la siguiente figura.



**Figura 14. Histograma ecualizado y LUT para la capa 2 del ACP**

Se logró una buena separación de la zona continental la cual posee valores altos en niveles digitales. En la imagen final obtenida (figura 15) se observa una disminución del efecto de las nubes. Se identifica una clara separación del límite tierra-mar a partir de la línea de vegetación permanente, lo que permitirá realizar medidas de la extensión y dinamismo de litorales.



**Figura 15. Imagen ecualizada de la segunda capa del ACP.**

## **5.3 EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA**

### **5.3.1 Clasificación no supervisada.**

El resultado del entrenamiento no supervisado a través del algoritmo ISODATA realizado a la imagen original se muestra en el cuadro 4.

Número de la clase	Nombre de clase	Área ( Ha )	Porcentaje de cubrimiento (%)
1	Cuerpos de agua	124626	27.32
2	Zonas de bajamar	34884.4	7.65
3	Sombras y playas	20197.1	4.42
4	Manglar ( 4m-12m )	16482	3.61
5	Manglar ( 25m-40m )	28354.2	6.21
6	Bosque aluvial	41935.8	9.19
7	Bosque de colina	41517	9.10
8	B. de colina Intervenido	17572	3.85
9	Pastos y potreros	15272.2	3.34
10	Zonas urbanas	9803.25	2.15
11	Nubes	54769.9	12

**Tabla 4. Clasificación no supervisada, bandas originales**

La inspección visual muestra que el bosque de colina intervenido, se confunde espectralmente con la clase *palma de coco* y *palma de aceite* las cuales serán identificadas en la clasificación supervisada (cuadro 8).

La categoría *sombras y playas* es llamada de esa manera debido a que en esta se identificaron coberturas de playas (desde el río Mira hasta la isla Bocagrande principalmente) y las sombras de las nubes, las cuales presentan perfiles espectrales similares.

Los *cuerpos de agua* incluyen recursos hídricos como el mar, ríos, lagunas y esteros, representando esta categoría el mayor cubrimiento de la zona de estudio. El agua tiene una firma espectral muy típica, y son muy pocos los casos de confusión posibles salvo en lugares en donde esta contiene muchos sedimentos como el caso de los Ríos Mira, Patía, Rosario, en la desembocadura de estos y en el interior de la bahía.

El *manglar* está clasificado de acuerdo a su altura debido a las condiciones edáficas. Se encuentran especies como *Rhizophora spp*, asociado con *Avicennia germinans*, *laguncularia recemosa*, *Pelliciera rhizophorae*, *Conocarpus erectus* y *Mora megistosperma* [4].

Llanuras aluviales, sometidos a inundaciones periódicas con acumulación de sedimentos y materia orgánica, es caracterizada por una topografía plana o cóncava y con un deficiente drenaje. Además de formaciones boscosas, se asocian tipos de vegetación herbácea flotante y vegetación arbustiva permanente. Se encontró distribuido principalmente en cercanías de los ríos Patía, Mira y Rosario.

*Bosque de colina* son planicies onduladas caracterizadas por cimas redondas o agudas, pendientes suaves y abruptas, cortas o largas, con amplitud del relieve de 50 m y una alta densidad de drenajes, se caracteriza por tener una vegetación frondosa y heterogénea.

Los *pastos y potreros* están compuestos principalmente por vegetación muy verde y de porte bajo.

La categoría *zonas urbanas* no se clasifica correctamente ya que a ella se asocian la nubosidad tenue (neblina) que aparece en algunos sectores de la imagen, sin embargo las poblaciones se identifican mediante información cartográfica disponible y salida de campo.

Las *nubes* son fácilmente discriminables, sin embargo, las áreas cubiertas con neblina, las nubes semitransparentes y los bordes de estas son lugares donde la clasificación puede ser equivocada debido al sesgo que el vapor de agua puede ocasionar en los datos espectrales.

El estudio del ACP, se realizó mediante la matriz de varianza-covarianza. Los valores propios de la matriz de varianza-covarianza expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, en última instancia, la proporción de información original que retienen [6]. Las contribuciones de cada

componentes se calcularon a partir de la ecuación 14, obteniéndose un 87.69 % para el primer componente, 10.72% para el segundo, 1.05% para el tercero, 0.36% para el cuarto, 0.08% para el quinto y 0.06% para el sexto. De acuerdo a estos porcentajes fueron seleccionados los tres primeros componentes ya que contienen un 99.47 % de la varianza de la imagen original. Con los tres primeros componentes se formó una nueva imagen la cual fue clasificada mediante el algoritmo ISODATA en el entrenamiento no supervisado.

Número de la clase	Nombre de la clase	Área ( Ha )	Porcentaje de cubrimiento (%)
1	Mar y algunos esteros	136496	29.92
2	Agua Turbia, playas	35943.8	7.88
3	Bajamar, sombras	16111.5	3.53
4	Playas	14629	3.20
5	Manglar (4m-12m)	13329.7	2.92
6	Manglar (25m-40m)	16643.5	3.64
7	Suelo despejado	11679.7	2.56
8	Manglar intervenido	13436.5	2.94
9	Bosque de aluvial	21002.6	4.60
10	Bosque de colina	30904.9	6.77
11	B. de colina intervenido	28752.5	6.30
12	Cultivos de palma	13064.3	2.86
13	Nubes, pastos, zona urbana	16233.8	3.55
14	Nubes	53542.3	11.74

**Tabla 5. Clasificación no supervisada. Componentes principales**

La clasificación a partir de ACP discriminó más categorías pero se vio afectada por el solapamiento de algunas clases y por las nubes que aparecen en la imagen. Las zonas urbanas, zonas de bajamar, son el conjunto de coberturas a las cuales se asignaron píxeles de la clase nubes o sombra de estas, además los ríos Patía y Mira se clasifican dentro de la categoría Manglar.

En términos generales, la clasificación realizada con medias creadas a partir de las firmas espectrales de estas coberturas no difiere del método que selecciona las medias automáticamente lo que se comprobó al comparar las áreas de cada cobertura y su distribución.

### 5.3.2 Clasificación supervisada.

Las firmas paramétricas se crearon a partir de la selección de áreas de interés, para obtener la mejor muestra de los píxeles a etiquetar en cada una de las clases.

Las firmas creadas fueron el resultado de recolección de campo, revisión bibliográfica y el análisis de perfiles radiométricos o espectrales como los mostrados en la figura 9, extraídos de las imágenes de la zona de estudio.

Las firmas paramétricas fueron: *manglar entre 4m y 12m de altura, manglar 25m y 40m de altura, bosque aluvial, bosque de colina, pastos y potreros, zonas de bajamar, nubes, sombra de nubes, ríos que transportan sedimentos, cultivos de palma, cultivos de coco y zonas urbanas.*

La firma no paramétrica fue creada mediante un espacio característico o diagrama de dispersión de la imagen, que muestra como están distribuidos los datos de una imagen en un espacio bidimensional compuesto por unas bandas X y Y cualquiera (figura 16). La firma no paramétrica creada corresponde a la clase *mar*, seleccionada para que incluya todos los píxeles que pertenecen a esa clase. El espacio característico se creó con las bandas 4 y 5 (Infrarrojo cercano e infrarrojo medio bajo) las cuales permitieron una buena separación de la clase en el diagrama.

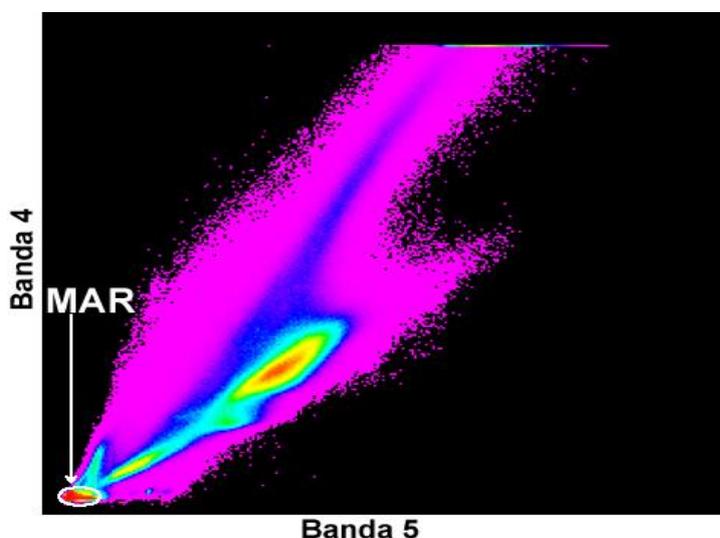


Figura 16. Diagrama de dispersión. Infrarrojo cercano e infrarrojo medio alto

Los métodos de evaluación de la clasificación que fueron implementados con el objetivo de examinar la clasificación, se basan en el cálculo de estadísticas de la imagen.

### 5.3.2.1 Análisis de separabilidad.

La tabla 6, contiene los valores del grado de separabilidad entre las clases creadas en la clasificación supervisada a través del algoritmo de máxima probabilidad.

Estos datos permiten efectuar las valoraciones previas sobre posibles confusiones entre las clases. Se puede apreciar que todas las categorías son espectralmente nítidas, permitiendo distinguirse entre ellas, a excepción de la clase 3 (bosque de colina). Existe un pequeño solape entre esta cubierta y *palma de coco* (valor 1999). La mínima distancia se encuentra entre las cubiertas *bosque de colina* y *bosque aluvial* (Valor 1994), lo que ocasiona un ligero desacierto en la clasificación de estas últimas coberturas.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
3			1994	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1999	2000	2000
4				2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
5					2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
6						2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
7							2000	2000	2000	2000	2000	2000
8								2000	2000	2000	2000	2000
9									2000	2000	2000	2000
10										2000	2000	2000
11											2000	2000
12												2000

**Tabla 6. Cálculo de la divergencia transformada entre categorías.**

Como se indicó con anterioridad (3.4.2), esta medida puede ser utilizada para determinar la combinación idónea de bandas para ser usada en la clasificación digital. En tal caso, se encontró que el subconjunto 1, 3, 4, 6 (bandas del azul, rojo, infrarrojo, infrarrojo medio alto respectivamente) contiene en promedio la

mejor separación, con un valor de 2000 y el mínimo mas alto en comparación con otros subconjuntos, con un valor de 1994.

### 5.3.2.2 Matriz de contingencia

Esta matriz es de aplicación únicamente a las clases para las que la firma espectral se ha definido mediante un conjunto de píxeles en la imagen de satélite, es decir, se aplica a las firmas paramétricas. Por tanto, aquellas muestras cogidas en el espacio característico, como es la categoría *mar*, no estará representada en esta matriz.

El criterio de decisión usado es el de Máxima Probabilidad el cual considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una probabilidad normal [16], y que será usado en el proceso de clasificación. Los resultados de este análisis se muestran en la siguiente tabla:

CÓDIGO	CATEGORÍA	PORCENTAJE DE ASIGNACIÓN
1	Manglar 4m-12m	99.13
2	Manglar 25m-40m	99.00
3	Bosque de Colina	90.74
4	Bosque Aluvial	94.15
5	Pastos y potreros	100
6	Nubes	98.70
7	Zonas urbana	99.26
8	Sombra de nubes	98.46
9	Zonas de bajamar	100
10	Mar	--
11	Palma de coco	96.70
12	Cultivos de palma	99.33
13	Ríos sedimentos	99.21

**Tabla 7. Porcentaje Matriz de Contingencia**

Se observa, que solo las categorías zonas de bajamar, pastos y potreros se clasificaran correctamente (100%), las restantes con un alto grado de certeza.

La clase *bosque de colina* aparece con un porcentaje de 90. 74 %, que se considera relativamente bajo en relación a las otras clases, indicando posibles

confusiones en la clasificación siendo coherente con lo obtenido en análisis de separabilidad.

En general el 97.89 % de los píxeles de la imagen (salvo los que pertenecen a la clase *mar*) se clasificaron mediante el algoritmo de máxima probabilidad acertadamente. Este porcentaje se presenta como el mejor promedio frente a valores de menores que presentan algoritmos de agrupamientos menos robustos.

### 5.3.3 Ejecución

Los resultados arrojados en el análisis de separabilidad y de matriz de contingencia, usando el método paramétrico de máxima probabilidad mostraron óptimos resultados en la identificación y extracción de las coberturas creadas. La clasificación supervisada mediante el algoritmo paramétrico de máxima probabilidad mostró mejores resultados debido a su robustez y por que se ajustó con más rigor a la disposición original de los datos. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro:

CATEGORÍA	ÁREA (Ha)	PORCENTAJE
Manglar 4m-12m	4160.52	0.9647
Manglar 25m-40m	22124.1	5.1298
Bosque de colina	44750.4	10.3760
Bosque aluvial	40702	9.4373
Pastos y potreros	6286.77	1.4577
Nubes	117738	27.2991
Zonas urbana	1944.54	0.4509
Sombra de nubes	19566	4.5366
Zonas de bajamar	11397	2.6425
Mar	150442	34.8820
Palma de coco	2516.76	0.5835
Palma de aceite	8216.46	1.9051
Ríos con sedimentos	1444.14	0.3348

**Tabla 8. Clasificación supervisada. Algoritmo de máxima probabilidad**

Los resultados indican el que el cubrimiento de las nubes en la imagen usada es considerable, sin embargo su efecto fue disminuido con el análisis visual de otras escenas. Es importante destacar la gran cobertura de manglar en la zona,

en donde coexisten grandes especies de animales. Este tipo de vegetación ubicado a lo largo de la franja costera juega un papel importante en el control de fenómenos naturales como inundaciones, estabilización de la línea costera, erosión y Tsunamis.

Las coberturas *palma de coco* y *palma de aceite* identificadas mediante clasificación supervisada constituyen una de las principales fuente de explotación agrícola de la zona, lo que las constituye como elementos de vital importancia en el análisis de su distribución espacial.

Posterior a la clasificación el filtro Sieve permitió eliminar grupos de clases que no contenían información, se aplicó a la imagen temática utilizando un umbral de tres píxeles para eliminar los grupos de dos píxeles dentro de la clasificación los cuales no corresponden a ninguna cobertura. Inicialmente se definieron 16 clases, las cuales en el proceso de reclasificación se redujo finalmente a 13 clases (Tabla 8), esta reclasificación es necesaria debido a que evita el solape entre clases con similar respuesta espectral [14].

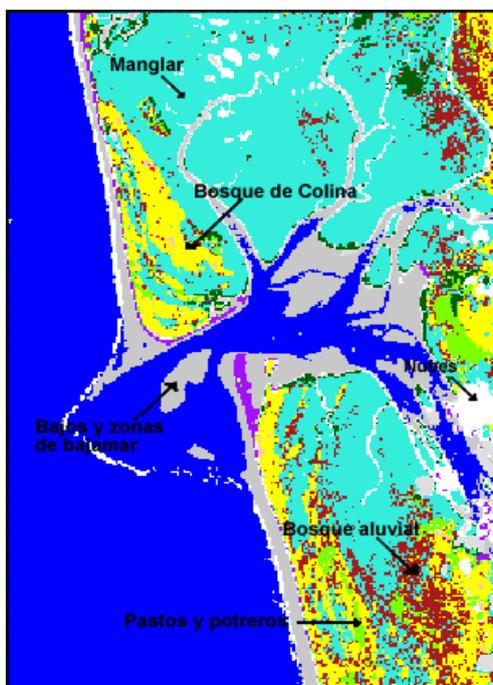


Figura 17. Subimagen ráster temática generada.

La figura 17, muestra una subimagen de la escena raster temática de la zona de estudio, obtenida en la clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima probabilidad. El proceso final de digitalización y generación del mapa de cobertura del suelo se lleva a cabo en el área de Modelado Integral de Zonas Costeras del Centro Control Contaminación del Pacífico con la información que suministra este proyecto.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La secuencia metodológica implementada para determinar los componentes del suelo, constituye la síntesis de un conjunto de combinaciones probadas, que generan información temática de la zona de estudio.

Se usaron métodos de clasificación supervisado y no supervisado en el desarrollo metodológico. La clasificación no supervisada usando información no redundante que se origina del análisis de componentes principales discrimina clases más significativas en relación al procedimiento desarrollado mediante las bandas originales. Sin embargo, se recomienda implementar una clasificación con bandas no correlacionadas con algoritmos de métodos supervisados los cuales ofrecen mayor control del procedimiento y una mejor evaluación de los resultados.

El algoritmo de máxima probabilidad aplicado en la clasificación supervisada generó resultados confiables, evaluados mediante la separabilidad de firmas, matriz de contingencia y valorados a través de salidas de campo, sin embargo es preciso seguir estudiando la aplicación de los distintos métodos de clasificación de patrones, que permitan la discriminación de algunos sectores de cubierta muy heterogéneos como son los enfoque basados en redes neuronales y lógica difusa.

De los métodos propuestos para la identificación de la línea de separación tierra-mar, el que se fundamenta en el análisis de componentes principales permitió realizar una buena delimitación basados en la diferencia entre zonas húmedas y zonas semisecas. Aunque la determinación de la línea de costa no es un problema que tiene solución trivial, debido a las múltiples variables naturales y antrópicas que intervienen, este trabajo propone una metodología para su identificación a partir de información satelital. Las condiciones medioambientales de la zona permiten un alto cubrimiento de nubes, con lo

que se requiere realizar un análisis de estos factores y realizar correcciones atmosféricas a las imágenes satelitales para estudios posteriores de cualquier tipo.

Esta información generada servirá para producir espacio cartas de cobertura del suelo a mediana escala (1:10000) con lo cual se cumple con el problema planteado posibilitando la aplicación de la metodología a otras áreas del Litoral del Pacífico Colombiano que sean de interés en la determinación de la jurisdicción de la DIMAR o en la identificación y conservación de zonas naturales por parte de otras entidades territoriales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Calero, L. (1995). El municipio de Tumaco y su medio ambiente. En: CCCP (2003). Aportes al entendimiento de la Bahía de Tumaco, entorno Oceanográfico, Costero y de Riesgo. Editorial DIMAR. Bogotá, 168 p.
- [2]. Cerón L. y López J. (1999). Fotogrametría: Análisis visual y digital de imágenes satelitales. Universidad del Cauca
- [3]. Centro Control Contaminación del Pacífico, (2004). Inventario de la información satelital disponible de la zona costera del Departamento de Nariño como soporte para la compra de imágenes de satélite necesarias para caracterizar el Litoral del pacífico Colombiano.
- [4]. Centro Control Contaminación del Pacífico (2003). Aportes al entendimiento de la Bahía de Tumaco, entorno Oceanográfico, Costero y de Riesgo. Editorial DIMAR. Bogotá, 168 p
- [5]. Centro Control Contaminación del Pacífico (2001). Proyecto Estudio de las Condiciones Hidroquímicas, Físicas y de la Contaminación Caso de Estudio Ensenada de Tumaco. Informe Técnico. San Andrés de Tumaco: CCCP, Colombia.
- [6]. Chuvieco, E.1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. España
- [7]. ERDAS IMAGINE (2001). Tour guide. Atlanta, Estados Unidos
- [8]. Fernández A, Herrero E. 2001. El satélite LANDSAT, Análisis Visual de Imágenes Obtenidas del Sensor ETM+ Satélite Landsat.

- [9]. Ferrero, B. S. Palacio, M. G. Campanella, O. (2005). Análisis de Componentes Principales en Teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- [10]. Gagliardini A. D., Amoroso O. R., Dell' Arciprete P., Yorio P. y Orensanz J. (2004). Detection of small-scale coastal oceanographic processes through Landsat TM/ETM+ images: implications for the study of biological processes along the Patagonian coasts of Argentina. *Gayana (concepc)* Vol. 68 No. 2, supl, p. 194-200.
- [11]. Gagliardini A. D., Rivas A. (2004). Environmental characteristic of San Matías gulf obtained from Landsat-TM and ETM+ data. *Gayana (concepc)*, Vol. 68, No. 2, Supl, p. 525-531.
- [12]. Haack, B.N. (1983). An analysis of Thematic Mapper simulator data for urban environments, *Remote sensing of Environments* En: Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. Madrid España.
- [13]. Knipling, E. B (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation, *Remote sensing of environment* En Chuvieco, E (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. Madrid España.
- [14]. Labrada M. (2005). Evaluación de cambios de cobertura vegetal de manglares mediante la aplicación de los sensores remotos. Ciudad de la Habana. Cuba
- [15]. Mogollón D. A. y Otero D. L. (2004). La Teledetección como alternativa para la determinación de la extensión del Pacífico Colombiano. *Centro Control Contaminación del Pacífico, Boletín Científico* No. 11. Año 2004, p. 89-108.
- [16]. Schowengerdt R.A. (1997). *Models and methods for image processing*. Universidad de Arizona. Segunda edición San Diego. USA

[17]. Tovar, A. 2002. Variación de la línea de costa entre los años 1958 y 2000 en la Ensenada de Tumaco, Departamento de Nariño. Medellín, 132 pp. Trabajo de grado. Universidad EAFIT. Facultad de Ingenierías. Departamento de Geología.

[18]. Tuomisto, H, Linna A, y Kalliola R. (1994). Use of digitally processed satellite images in studies of tropical rain forest vegetation. Remote sensing, vol. 15 No. 8, p. 1595-1610.

[19]. United State Geological Survey (2005). Levels of processing

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**BANDA ESPECTRAL:** Conjunto de longitudes de onda o frecuencias con comportamiento espectral similar.

**BARRIDO MULTIESPECTRAL:** Exploración secuencial de la superficie de la tierra, en donde se divide la radiación captada en diversas bandas espectrales.

**CAMPO INSTANTANEO DE VISIÓN (IFOV):** Este término expresa el ángulo exacto de visión que es detectado en cada pauta de visión en un sistema de exploración electrónica. Normalmente se mide en grados o microradianes y se relaciona con la superficie real abarcada por el sistema.

**CLUSTER:** Se habla de cluster o conglomerado cuando los píxeles o elementos de una imagen tienden a formar grupos con similares condiciones espectrales. El agrupamiento automático no supervisado pretende encontrar estos grupos espectrales idóneos como reflejo de los naturalmente existentes en la imagen.

**CONTRASTE:** Diferencia de valor o tono entre las áreas más claras y más oscuras de la imagen.

**DIGITALIZACIÓN:** El concepto se refiere a cualquier conversión de un documento analógico en formato numérico.

**ELIPSOIDE WGS 84:** World Geodetic System 1984. Es un sistema de referencia para la forma de la tierra (elipsoide) y un modelo gravitacional.

**NIVEL DIGITAL:** Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor optoelectrónico.

**PROYECCIÓN UTM:** Proyección conforme Universal Transverse Mercator

**SIGNATURA O FIRMA ESPECTRAL:** Forma peculiar de reflejar o emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Está afectada por las características físicas o químicas del objeto que interaccionan con la energía electromagnética y varía según la longitud de onda.

**SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA:** Conjunto de herramientas que permiten almacenar, recuperar, modificar y combinar cualquier tipo de variables georreferenciadas.

**VISUALIZACIÓN DE DATOS:** cualquier representación de imágenes digitales. Puede realizarse en un monitor de rayos catódicos, un plotter electrostático, plotter de láser o impresora de líneas.