



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS**

**Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.**

**El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las Inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.**

**Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.**

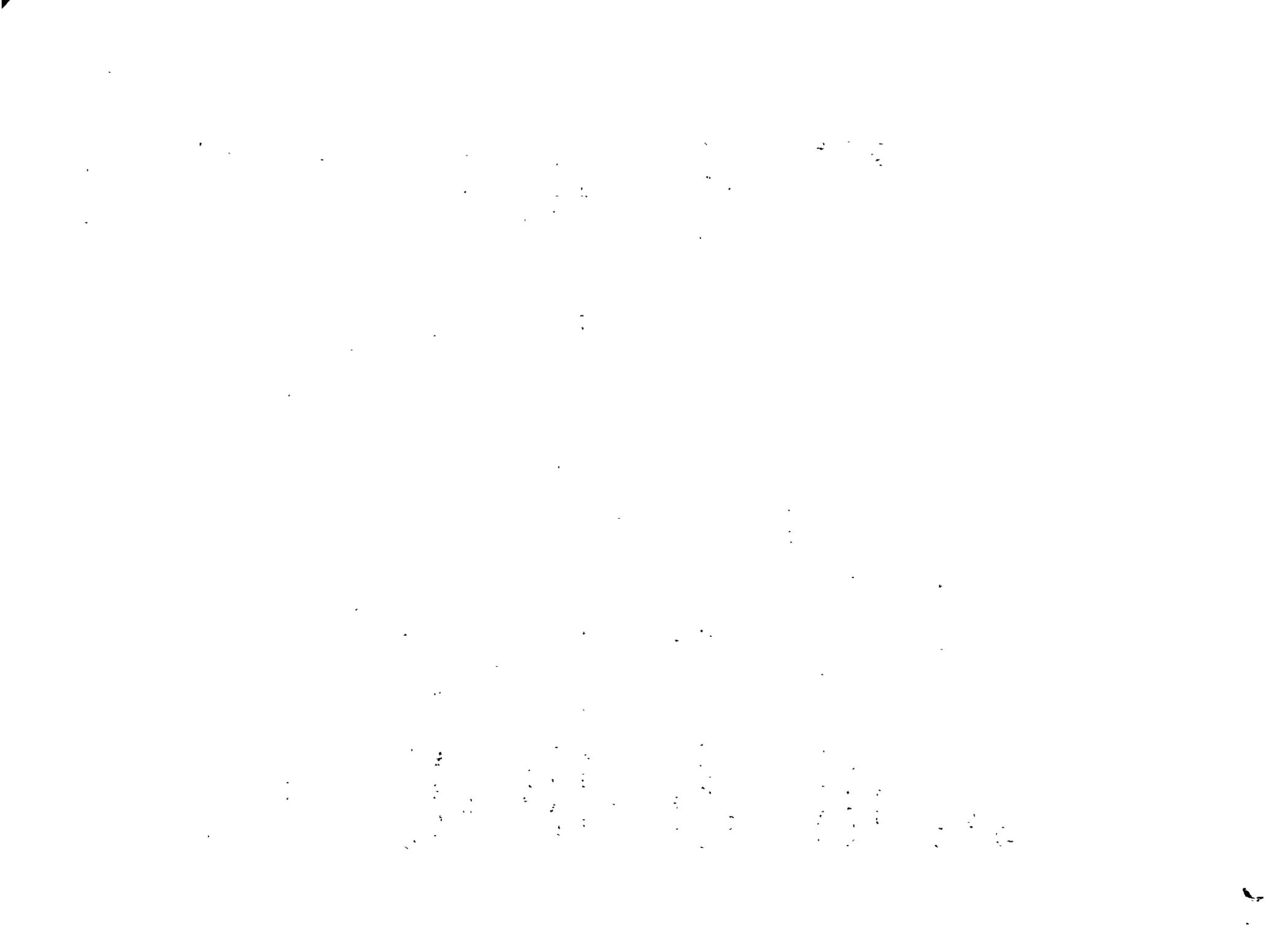
**Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.**

**Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.**

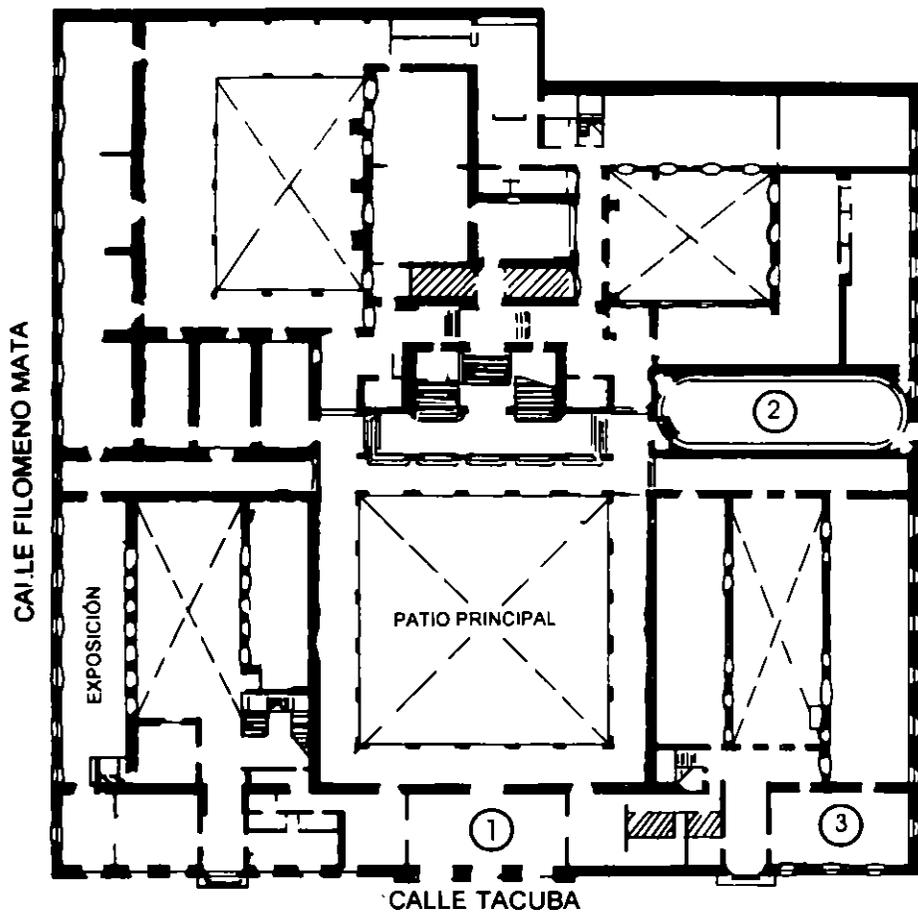
**Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.**

**Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.**

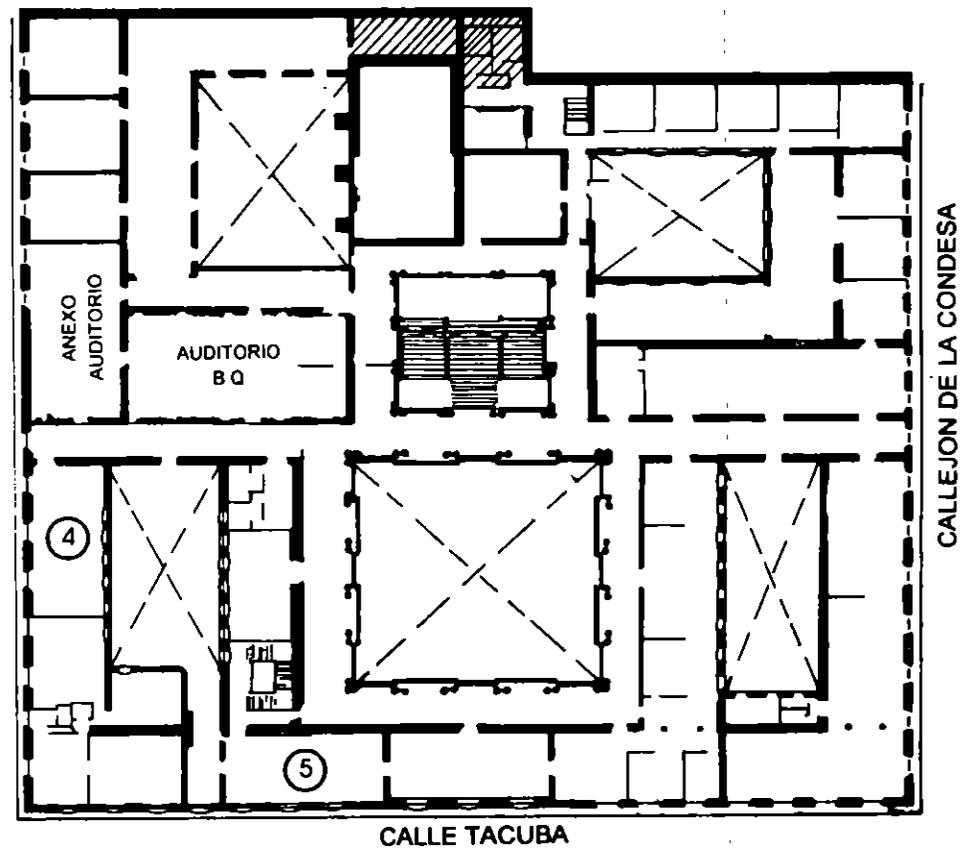
**Atentamente  
División de Educación Continua.**



# PALACIO DE MINERIA

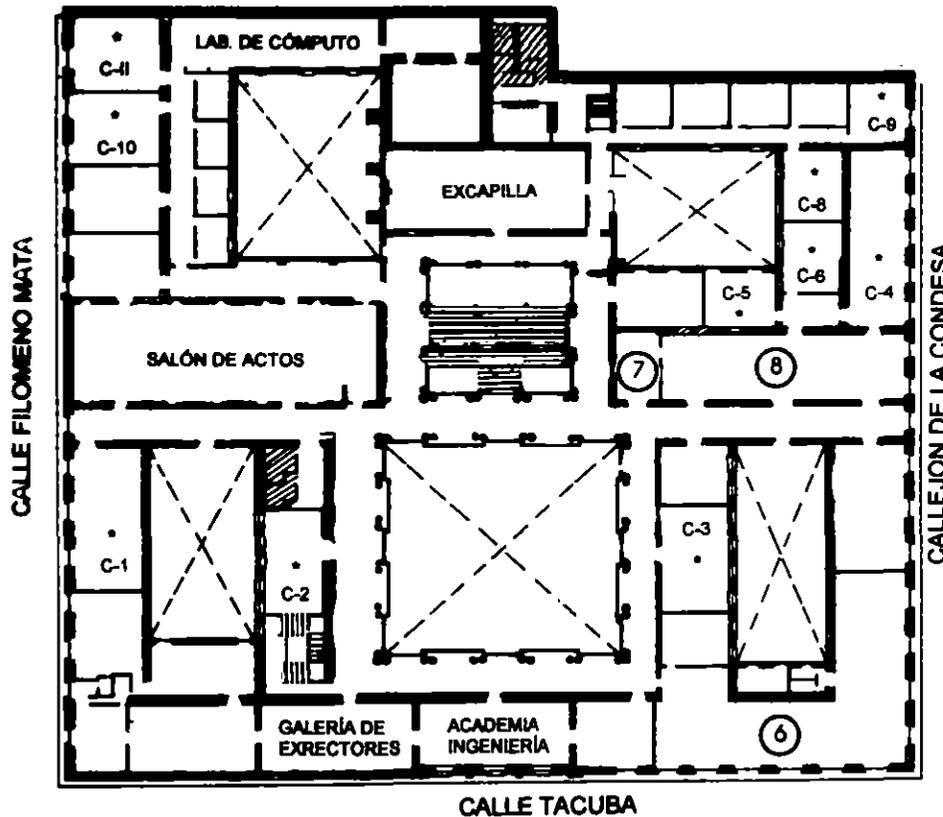


**PLANTA BAJA**



**MEZZANINNE**

# PALACIO DE MINERÍA



## GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
  2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
  3. LIBRERÍA UNAM
  4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
  5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
  6. OFICINAS GENERALES
  7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
  8. SALA DE DESCANSO
- SANITARIOS
- \* AULAS

**1er. PISO**



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.  
CURSOS ABIERTOS





1. ¿Le agradó su estancia en la División de Educación Continua?

SI

NO

Si indica que "NO" diga porqué:

---

---

2. Medio a través del cual se enteró del curso:

Periódico <i>Excélsior</i>	
Periódico <i>La Jornada</i>	
Folleto anual	
Folleto del curso	
Gaceta UNAM	
Revistas técnicas	
Otro medio (Indique cuál)	

3. ¿Qué cambios sugeriría al curso para mejorarlo?

---

---

---

---

---

---

---

4. ¿Recomendaría el curso a otra(s) persona(s) ?

SI

NO

5. ¿Qué cursos sugiere que imparta la División de Educación Continua?

---

---

---

---

---

---

---

6. Otras sugerencias:

---

---

---

---

---

---

---



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**



**IMTA**

**INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**Percepción remota aplicada al  
inventario de recursos naturales**

**1a. Versión  
2a. Edición**

**Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos  
Subcoordinación de Tecnología Informática**

**Ing. Héctor Sanvicente Sánchez.**

**Octubre de 1995**

## INDICE

INTRODUCCION .....	1
1 PRINCIPIOS FISICOS DE LA PERCEPCION REMOTA .....	3
1.1 <u>Concepto de percepción remota</u> .....	3
1.2 <u>Historia de la percepción remota</u> .....	3
1.3 <u>Espectro electromagnético</u> .....	5
1.4 <u>Interacciones de la energía con la materia</u> .....	8
1.5 <u>Elementos de un sistema de percepción remota</u> .....	14
2 SISTEMAS SENSORES Y FORMACION DE IMAGENES .....	17
2.1 <u>Concepto de sensor</u> .....	17
2.2 <u>Clasificación de los sistemas sensores</u> .....	18
2.3 <u>Formación de una imagen</u> .....	19
2.4 <u>Atributos de la escena</u> .....	23
2.5 <u>Principales sistemas sensores</u> .....	26
2.5.1 Sistema Landsat .....	26
2.5.2 Sistema Spot .....	34
3 COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LOS OBJETOS .....	40
3.1 <u>Firma espectral</u> .....	40
3.2 <u>Comportamiento espectral de la vegetación</u> .....	41
3.3 <u>Comportamiento espectral del suelo</u> .....	48
3.4 <u>Comportamiento espectral del agua</u> .....	56
4 TEORIA DEL COLOR Y GENERACION DE IMAGENES EN FALSO COLOR .....	62
4.1 <u>Propiedades de la luz</u> .....	62
4.2 <u>Concepto de color</u> .....	63
4.3 <u>Modelo RGB</u> .....	68
4.4 <u>Modelo HSV</u> .....	69
4.5 <u>Modelo HLS</u> .....	71
4.6 <u>Generación de imágenes a color y falso color</u> .....	72
5 INTERPRETACION VISUAL DE IMAGENES DE SATELITE .....	76
5.1 <u>Elementos de análisis de una imagen</u> .....	76
5.2 <u>Fotointerpretación de una banda</u> .....	79
5.3 <u>Fotointerpretación de imágenes a color y falso color</u> .....	83
BIBLIOGRAFIA .....	87

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Espectro electromagnético mostrando las bandas empleadas en percepción remota . . . . .	6
Figura 1.2 Interacciones de la energía con la materia. . . . .	9
Figura 1.3 Espectros de irradiación. . . . .	10
Figura 1.4 Exitancia espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas . . . . .	12
Figura 1.5 Elementos de un sistema de percepción remota . . . . .	15
Figura 2.1 Elementos formadores de la resolución de un sistema sensor . . . . .	17
Figura 2.2 Imagen de un objeto . . . . .	19
Figura 2.3 Clasificación de un sistema sensor . . . . .	20
Figura 2.4 Discretización de una imagen en ERT's o CIV's . . . . .	20
Figura 2.5 Escala de grises . . . . .	21
Figura 2.6 Radiómetro imageador . . . . .	22
Figura 2.7 Estructura de captación de la imagen para el MSS . . . . .	27
Figura 2.8 Vista de los sensores del TM proyectados en el plano focal principal . . . . .	30
Figura 2.9 Visión general de la estructura de captación de una imagen para el sistema sensor TM . . . . .	30
Figura 2.10 Orbitas subsecuentes del Landsat 4 y 5 . . . . .	31
Figura 2.11 Orbitas adyacentes en 16 días consecutivos para el Landsat 4 y 5 . . . . .	31
Figura 2.12 Sistema mundial de referencia (WRS) para el Landsat 4 y 5 . . . . .	32
Figura 2.13 Variación de las horas locales con los cruzamientos de las órbitas con las latitudes . . . . .	33
Figura 2.14 Cambios de los ángulos de elevación solar . . . . .	33
Figura 2.15 Orbitas subsecuentes del satélite Spot . . . . .	35
Figura 2.16 Cobertura de la mira vertical y oblicua del Spot . . . . .	35
Figura 2.17 Visada vertical de los dos instrumentos HRV del Spot . . . . .	36
Figura 2.18 Repetitividad de las observaciones durante un ciclo de 26 días, para el satélite Spot . . . . .	37
Figura 2.19 Observación estereoscópica debida al paralaje creada por dos miras con diferente ángulo . . . . .	38
Figura 2.20 Sistema de referencia mundial (GRS) para el satélite Spot . . . . .	39
Figura 3.1 Firmas espectrales de tres materiales comunes de la superficie de la tierra . . . . .	42
Figura 3.2 Comportamiento espectral de la vegetación verde . . . . .	43
Figura 3.3 (a) Firma espectral de algunas plantas. (b) Espectro de absorción de las clorofilas a y b . . . . .	44
Figura 3.4 (a) Espectro de absorción de dos carotenoides. (b) Firma espectral de una hoja en envejecimiento . . . . .	45

Figura 3.5 Relación inversa entre la reflectancia de una hoja y la absorción del agua . . . . .	46
Figura 3.6 Sección de una hoja típica con parénquima diferenciado . . .	46
Figura 3.7 Efecto del contenido de agua en la reflectancia de hojas de maíz . . . . .	47
Figura 3.8 Firma espectral de diferente número de hojas de algodón superpuestas . . . . .	49
Figura 3.9 Variación de la reflectancia espectral de coberturas gramíneas en función del Índice de Area Foliar . . . . .	49
Figura 3.10 Reflectancia espectral de tres tipos de suelo con bajo contenido de agua . . . . .	50
Figura 3.11 Triángulo de textura de suelos, mostrando los porcentajes relativos de partículas de arcilla, limo y arena . . . . .	51
Figura 3.12 Reflectancia espectral de la arena Chelsea para diferentes contenidos de agua . . . . .	51
Figura 3.13 Reflectancia espectral del lodo limoso Newtonia para varios contenidos de agua . . . . .	53
Figura 3.14 Reflectancia espectral para un suelo arcilloso típico (Pembroke) con dos contenidos de agua . . . . .	53
Figura 3.15 Relación entre el contenido de materia orgánica y la reflectancia de un suelo . . . . .	54
Figura 3.16 Relación entre el contenido de óxidos de hierro y la reflectancia de un suelo dentro de la banda 500 a 640 nm . . . . .	55
Figura 3.17 Curvas de reflectancia espectral que ilustran el efecto de remoción del contenido de óxidos de hierro y materia orgánica de un suelo . . . . .	55
Figura 3.18 Interacciones de la luz solar con el agua . . . . .	56
Figura 3.19 Curva de atenuación del agua. Intervalo de 200 a 2000 nm	58
Figura 3.20 Curvas de atenuación para varios tipos de agua . . . . .	58
Figura 3.21 Transmitancia espectral para una profundidad de 10 m en varios tipos de agua . . . . .	59
Figura 3.22 Reflectancia espectral del agua clara y agua turbia en el intervalo de 0.5 a 1.0 $\mu\text{m}$ . . . . .	61
Figura 4.1 Distribución de energía para una fuente de luz blanca . . . . .	62
Figura 4.2 Distribución de energía de una fuente de luz con una frecuencia dominante . . . . .	63
Figura 4.3 Colores estándares establecidos por la CIE en 1931 . . . . .	65
Figura 4.4 Espacio tridimensional del color (espacio tristímulus) . . . . .	65
Figura 4.5 Diagrama de cromatismo de CIE . . . . .	66
Figura 4.6 Definición de pureza y longitud de onda dominante . . . . .	67
Figura 4.7 Representación de los colores complementarios . . . . .	67
Figura 4.8 Gammas de colores para modelos de 2 y 3 colores primarios .	68
Figura 4.9 Cubo de colores del modelo RGB . . . . .	69

Figura 4.10 (a) Planta del cubo RGB al ser observado a lo largo de la diagonal de blanco a negro. (b) Hexágono de colores proyectado en el plano perpendicular a la diagonal de blanco a negro . . . . .	70
Figura 4.11 Cono hexagonal del modelo HSV . . . . .	70
Figura 4.12 Sección transversal del cono hexagonal HSV, que muestra las zonas que representan sombras, tintes y tonos de un color puro . . . . .	71
Figura 4.13 Doble cono hexagonal del modelo HLS . . . . .	72
Figura 4.14 Sistemas de combinación de color . . . . .	73
Figura 4.15 Triángulo del color para los primarios aditivos y substractivos	74

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Ventanas atmosféricas de transmisión de la radiación electromagnética . . . . .	10
Tabla 1.2 Procesos de dispersión atmosférica . . . . .	13
Tabla 2.1 Serie de satélites Landsat . . . . .	26
Tabla 2.2 Modos posibles de funcionamiento simultáneo de los instrumentos sensores HRV1 y HRV2 . . . . .	36
Tabla 5.1 Análisis comparativo entre las bandas del MSS para la discriminación de diferentes clases en una imagen . . . . .	81
Tabla 5.2 Llaves de análisis para identificación de clases de uso de suelo, obtenidas a partir de estudios en imágenes Landsat TM y correlacionadas a sensores MSS y Spot . . . . .	83

**PROGRAMA DEL CURSO  
PERCEPCION REMOTA APLICADA AL INVENTARIO DE RECURSOS NATURALES**

23 AL 27 DE OCTUBRE DE 1995

INSTRUCTORES: LIC. JORGE BRENA  
ING. HECTOR SANVICENTE  
ING. JAIME VELAZQUEZ

HORA	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES
9:00	<b>APERTURA DEL CURSO E INTRODUCCION</b>	<b>Ing. Héctor Sanvicente</b> <b>Bases físicas de la percepción remota</b> - Elementos de un sistema de percepción remota - Concepto de sensor - Clasificación de los sistemas sensores - Formación de la imagen - Atributos de la escena	<b>Ing. Héctor Sanvicente</b> <b>Características espectrales de los recursos: agua, suelo y vegetación</b> - Firma espectral - Comportamiento espectral de la vegetación - Comportamiento espectral del suelo - Comportamiento espectral del agua	<b>Ing. Jaime Velázquez</b> <b>Algoritmos para la extracción de información cuantitativa</b> - Teoría de reconocimiento de patrones - Clasificadores supervisados - Mínimas distancias - Cajas o paralelepípedos - Bayesiano - Máxima verosimilitud - Clasificadores no supervisados - Isodata - Clueter dos pasadas	<b>Lic. Jorge Brena</b> <b>Metodología para la evaluación de recursos naturales</b>
9:30	<b>Ing. Héctor Sanvicente</b> <b>Bases físicas de la percepción remota</b> - Concepto - Historia - Espectro electromagnético - Interacciones de la energía con la materia				
10:30 receso	15 min.	15 min.	15 min.	15 min.	15 min.
10:45	-continuación- Bases físicas de la percepción remota	-continuación- Bases físicas de la percepción remota	-continuación- Características espectrales de los recursos: agua, suelo y vegetación	-continuación- Algoritmos para la extracción de información cuantitativa	-continuación- Metodología para la evaluación de recursos naturales
14:00 comida	1 hr	1 hr	1 hr	1 hr	1 hr
15:00	<b>Ing. Héctor Sanvicente</b> <b>Lic. Jorge Brena</b> <b>Aplicación práctica (sistema SDS)</b> - Instalación del sistema SDS - Acceso y ejecución - Manejo de los cursores - Funciones del teclado en el sistema	<b>Ing. Héctor Sanvicente</b> <b>Lic. Jorge Brena</b> <b>Aplicación práctica (sistema SDS)</b> - Interpretación de una imagen mediante el sistema SDS - Procesos de medición del sistema - Procesos de edición de imágenes - Consulta de áreas	<b>Lic. Jorge Brena</b> <b>Aplicación práctica (bosques)</b> - Levantamiento de zonas de bosque	<b>Lic. Jorge Brena</b> <b>Aplicación práctica (cultivos)</b> - Levantamiento de zonas de cultivo	<b>Lic. Jorge Brena</b> <b>Aplicación práctica (cuerpos de agua)</b> - Levantamiento de cuerpos de agua
16:30	15 min.	15 min.	15 min.	15 min.	
16:45	-continuación- Aplicación práctica (sistema SDS)	-continuación- Aplicación práctica (sistema SDS)	-continuación- Aplicación práctica (bosques)	-continuación- Aplicación práctica (cultivos)	Evaluación final Evaluación del curso

## **OBJETIVO**

**Proporcionar la metodología de las técnicas de percepción remota disponibles para la identificación y evaluación de los recursos naturales.**

## INTRODUCCION

En la actualidad el conocimiento de los recursos que posee un país es fundamental para su desarrollo. Este conocimiento constituye la base de los programas de planeación y de estrategia de crecimiento.

Los recursos naturales tienen una razón de cambio alta, por lo que el tener una cifra exacta de su cuantificación, por medios tradicionales (fotografías aéreas, estudios de campo, etc.), resulta económicamente elevado. Esto ha motivado que cuando se requiere la cantidad en la que existe algún recursos, se empleen valores estimados a través de muy diversos métodos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la confiabilidad de un dato estimado depende de la cercanía en tiempo, de la información que alimenta el modelo de estimación.

La cartografía en México tiene una edad promedio de entre 15 y 20 años, esto hace que para recursos de alta dinámica la información existente y aun la estimada ya no se asemeje a la realidad.

Una de las formas tradicionales de cartografiar un recurso natural es a través de la interpretación de fotografías aéreas, las cuales cubren un área pequeña de la superficie y su costo es muy elevado.

Las imágenes de satélite por ser una fotografía del terreno y cubrir grandes áreas, se han visto como una alternativa de solución a este problema. De esta manera, los satélites recientes cuentan con instrumentos de alta resolución, en algunos casos comparables a las de una fotografía aérea, y en un futuro estas resoluciones serán mejoradas aún más.

Una imágenes de satélite es capturada en forma digital, lo que permite su análisis a través de computadoras o ser transportada a papel y manipulada como una fotografía tradicional.

El análisis de una imagen puede ser hecho de dos maneras: por medio de procesos automatizados y por fotointerpretación (electrónica o manual).

Los procesos automatizados, aunque rápidos y relativamente baratos, en algunos estudios pueden tener limitaciones, pues la mayoría de ellos están basados principalmente en las características espectrales de los objetos.

La fotointerpretación como una técnica totalmente desarrollada y difundida puede aplicarse a una imagen multiespectral, como es el caso de las obtenidas por los satélites. Esta técnica sigue sus mismos principios generales y aplica variantes inherentes a la característica de multiespectralidad.

En México las imágenes de satélite han tenido un uso limitado pues han sido vistas como un producto que requiere de procesos automatizados y su utilidad como una fotografía del terreno ha sido relegada.

El presente trabajo tiene como finalidad proporcionar al lector bases para el entendimiento de las imágenes de satélites y su explotación por medio de la técnica de fotointerpretación. No es un manual, sino únicamente da características de las imágenes a tomarse en cuenta en el análisis visual.

Para conseguir este fin, el trabajo está orientado en forma progresiva, esto es, comienza desde el concepto de percepción remota y sistemas de percepción remota hasta la interpretación de bandas separadas de imágenes multiespectrales y compuestas a color o falso color.

En el capítulo uno se define el concepto de percepción remota, los elementos que conforman un sistema de este tipo, el campo medido y las interacciones de él con la materia, así como algunos hechos que llevaron al surgimiento de esta técnica. Este capítulo introduce al lector en los principios físicos en que se basa la percepción remota.

El capítulo dos una vez que ya se sabe que es lo que se mide, muestra como se ejecuta la medición a través de un sistema sensor y se efectúa la formación de una imagen. En el también se especifican las características inherentes al registro y formación de la escena, que deben de tenerse en cuenta para su análisis y valía dentro de un proyecto. Un último punto de este capítulo es la descripción de las dos principales series de satélites para recursos naturales que se tienen en la actualidad.

Debido a que la radiación electromagnética es el campo de medición en un sistema de percepción remota, el capítulo tres explica la forma como esta energía interacciona con los tres principales elementos que se encuentran en la naturaleza (vegetación, agua, suelo). Esto permite entender lo que registra un sistema sensor y será observado en una imagen.

El color por sí solo es un elemento que permite diferenciar una cantidad mayor de objetos en comparación con una fotografía en blanco y negro. Cuando además del color se emplean otros elementos de análisis la cantidad de información que puede ser extraída de una fotografía se incrementa. Una imagen multiespectral, como es el caso de las imágenes de satélite, no es una imagen a color, sin embargo, puede ser vista de esta forma.

El capítulo cuatro da los conceptos de la teoría del color y la forma como aplicando dicha teoría una imagen multiespectral puede ser observada en colores, ya sea como se aprecian los objetos en la naturaleza o con tonalidades que permitan una mayor discriminación.

En el capítulo cinco y último; ya que se tiene el conocimiento de formación de una imagen, del comportamiento de los objetos registrados en ella con la radiación electromagnética y, como puede verse una imagen multiespectral a color; se proporcionan los elementos de análisis de una imagen y llaves para su interpretación banda por banda o en falso color.

# 1 PRINCIPIOS FISICOS DE LA PERCEPCION REMOTA

## 1.1 Concepto de percepción remota

El nombre de percepción remota aparece inicialmente durante las primeras misiones interplanetarias de sondas no tripuladas. A bordo de las sondas se instalaron cámaras de televisión que permitieron capturar y enviar a la tierra imágenes de regiones previamente seleccionadas de la superficie de otros planetas.

Por este hecho, la percepción remota se define como la ciencia de captar y coleccionar información de un objeto a través de medidas hechas a distancia, sin estar en contacto físico con él (Purdue University, 1976; Sabin, 1978). Esta definición involucran todos aquellos campos asociados a un objeto.

La medición de las intensidades de los campos asociados a un objeto, permite deducir las características del cuerpo que los produce o los altera. Algunos de los principales campos que se miden son el electromagnético, el de fuerzas y el acústico.

Actualmente el concepto está restringido a los métodos que emplean la energía electromagnética como medio de detección y medición de las características de un objeto (Sabin, 1978).

Con base en esto, se puede redefinir percepción remota como un conjunto de actividades, que buscan la caracterización de las propiedades de los cuerpos naturales, a través de la detección, registro y análisis del flujo de energía radiante, por ellos reflejado o emitido (Steffen, et al 1981).

## 1.2 Historia de la percepción remota

La historia de la percepción remota se sintetiza mencionando las etapas mas importantes de su desarrollo, según Nieto y Loyo (sin año).

Los telescopios fueron inventados mucho antes del siglo XIX para extender la capacidad de observación del hombre. Pero sólo hasta mediados del siglo pasado se establecieron los canales para que el medio ambiente pueda ser observado objetivamente y grabado por dispositivos artificiales.

A mediados del siglo XIX, con el auxilio de un globo, se empiezan a tomar fotografías aéreas, mismas que se utilizan en la elaboración de cartas topográficas.

A principios del siglo XX se logra romper la barrera de los 1000 metros de altura con la introducción de vuelos no tripulados de globos y cometas.

Hacia 1925 aparece la fotografía a color, para entonces la fotografía aérea tiene grandes aplicaciones en la elaboración de mapas y recolección de datos de relevancia en la planificación.

Años después, la fotografía aérea alcanzó niveles altos de sofisticación. Se logró disminuir el efecto de fenómenos atmosféricos de altura en la plataforma de vuelo y de las lentes utilizadas.

El empleo de los radares en el área de la cartografía se desarrolla con éxito a mediados del presente siglo, a pesar de la desventaja de requerir una gran energía para emitir la señal que después es captada por el sensor.

Muchas de las primeras técnicas usadas en percepción remota son desarrolladas para reconocimientos militares durante la primera y segunda guerra mundial.

De 1950 a principios de los 60's, la venida de la computadora digital y las pruebas en los procesos de modelación asociadas con la inteligencia humana, se combinan para acelerar el desarrollo de una tecnología de análisis de datos llamada reconocimiento de patrones.

Durante el mismo período, un desarrollo importante fue realizado en el diseño de sistemas sensores, particularmente para medir la energía de longitud de onda infrarroja.

En 1957 la Unión Soviética da inicio a la era espacial con el lanzamiento del Sputnik I, y con ello se abren posibilidades de alturas mayores y periodicidad en la ubicación de la plataforma de vuelo.

En 1961 el satélite Mercurio de los Estados Unidos obtiene fotografías a color, y con algunas de ellas se hace un estudio geológico del Desierto del Sáhara.

Las restricciones impuestas por la fotografía convencional: recuperación de la película, interpretación no automática y la sensibilidad restringida a una porción del espectro electromagnético; hicieron necesaria la creación de una nueva tecnología.

A partir de 1972 se inicia la serie Landsat (LAND SATELLITE), la cual está destinada exclusivamente al estudio y detección de los recursos terrestres. La primera generación constó de 3 satélites: Landsat 1 (ERST-1), puesto en órbita en 1972; Landsat 2, enviado en 1975 y Landsat 3, en 1978. Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5, puestos en órbita en 1982 y 1983 respectivamente, están activos actualmente.

En febrero de 1978 el gobierno francés decide poner en marcha el programa de observación de la tierra Spot (Satellite Pour L'Observation de la Terre), para poder tener una mayor resolución de la superficie de la tierra en las aplicaciones de las técnicas de

percepción remota con fines de conocimiento, inventario, supervisión y acondicionamiento.

La mayor originalidad del programa Spot reside en que presenta un sistema de teledetección operacional y comercial; asegurando de tal forma la obtención de la información para el desarrollo de estudios específicos. La máxima resolución en el terreno de los satélites Spot es de 10 x 10 m.

El Spot 1 fue lanzado en febrero de 1986 y a partir de mayo del mismo año comienza a transmitir información. El Spot 2 fue puesto en órbita en febrero de 1990.

### 1.3 Espectro electromagnético

La energía electromagnética puede ser definida como toda energía que se mueve con la velocidad de la luz en un patrón de ondas armónicas. La palabra armónica indica que las ondas componentes están igual y repetitivamente espaciadas en el tiempo (Sabin, 1978). La energía electromagnética incluye luz, calor y ondas de radio.

Existen dos modelos para explicar el comportamiento de la energía electromagnética: modelo ondulatorio y modelo corpuscular. El modelo ondulatorio es adecuado para longitudes de onda larga y el análisis de la propagación de la energía. Sin embargo, para los procesos de absorción y emisión, así como para longitudes de onda corta se emplea la teoría corpuscular (Steffen et al, 1981).

El espectro electromagnético es el flujo continuo de energía cuyas longitudes de onda van desde los kilómetros hasta los nanómetros. Esta energía viaja a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/seg y es capaz de propagarse en el vacío.

La porción de longitudes de onda o frecuencias en que se puede encontrar la energía electromagnética es prácticamente ilimitada. Con la tecnología actual se puede detectar la franja de frecuencias que se extiende de 1 a  $10^{24}$  Hz o longitudes de onda aproximadamente de  $10^8$  a  $10^{-15}$  metros (Steffen et al, 1981).

La distribución de la energía electromagnética se puede esquematizar según la longitud de onda o las frecuencias.

En el espectro electromagnético, a pesar de no existir fronteras bien definidas, se distinguen las siguientes regiones (figura 1.1):

- Rayos gamma: Los rayos gamma son las más penetrantes de las emisiones de sustancias radiactivas. No existe en principio un límite superior para las radiaciones gamma, a pesar de haberse encontrado una región superior de frecuencias conocida como rayos cósmicos.

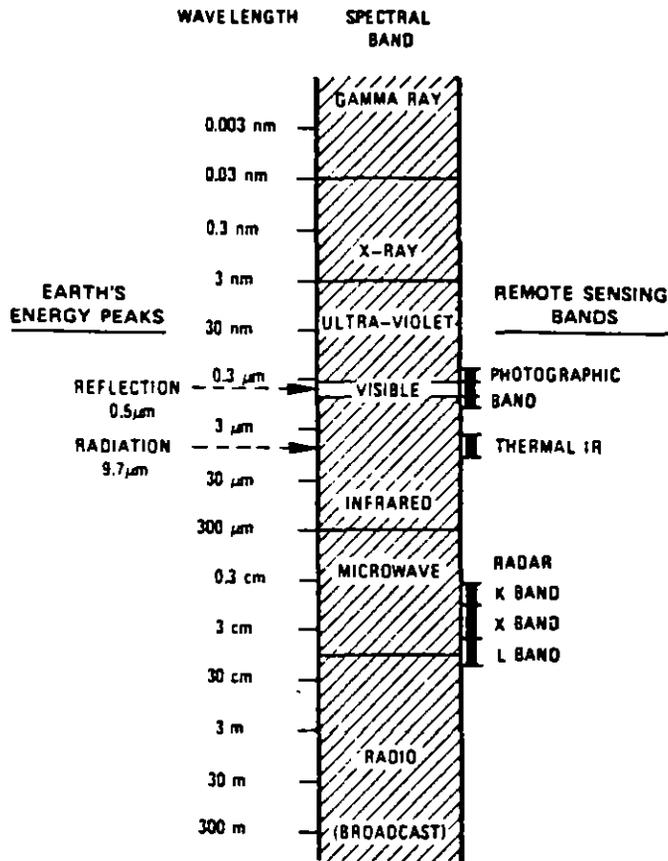


Figura 1.1 Espectro electromagnético mostrando las bandas empleadas en percepción remota (tomada de Sabin, 1978).

Esta radiación proviene del sol y es absorbida totalmente por la parte mas alta de la atmósfera, y no está disponible para percepción remota. La radiación gamma proviene de minerales radiactivos, es detectable mediante vuelos aéreos bajos como un método de exploración.

- Rayos X: Los rayos X son definidos como radiación en la región 0.03 a 3 nm, pues se constituyen de fotones de alta energía y son fuertemente penetrantes, siendo una poderosa herramienta para investigaciones sobre la estructura de la materia.

Esta radiación al llegar a la tierra es completamente absorbida por la atmósfera, no se emplea en percepción remota.

- Ultravioleta: La radiación ultravioleta engloba una extensa región del espectro electromagnético que varía de 3 nm a 0.4 μm. Es importante notar que las películas fotográficas son mas sensibles a la radiación ultravioleta que a la luz visible. A pesar de que esta región del espectro muestra un relativo potencial de aplicaciones en percepción remota tales como: detección de minerales por luminiscencia, polución de minerales por luminiscencia, contaminación marina, etc.; una fuerte

atenuación atmosférica en esta región se presenta como un gran obstáculo para su utilización.

La radiación que llega en longitudes de onda  $< 0.3 \mu\text{m}$  es absorbida completamente por el ozono en la parte superior de la atmósfera. La radiación que va de  $0.3$  a  $0.4 \mu\text{m}$  se transmite a través de la atmósfera y puede detectarse por emulsiones fotográficas y fotodetectores, sin embargo la dispersión atmosférica es severa.

- Visible: La radiación visible puede ser definida como aquella capaz de producir una sensación de visión para el ojo humano normal. Esta radiación que va desde el violeta hasta el rojo, tiene solamente una pequeña variación de longitud de onda que va desde  $0.4$  a  $0.7 \mu\text{m}$ . Este tipo de radiación puede ser producido, por luminiscencia o por cuerpos muy caliente.

Esta región es de gran importancia para la percepción remota, pues las imágenes obtenidas en ella, generalmente presentan excelente correlación con la experiencia visual del intérprete.

Se detecta con emulsiones y fotodetectores, incluye la máxima reflectancia de la superficie terrestre alrededor de  $0.5 \mu\text{m}$ .

- Infrarrojo: este tipo de radiación, de gran importancia para la percepción remota, engloba radiaciones con longitudes de onda de  $0.7$  a  $300 \mu\text{m}$ . Una de las características de la radiación infrarroja es su fácil absorción por la mayoría de las sustancias produciendo en ellas un efecto de calentamiento. Se debe de notar que la energía emitida por los cuerpos calentados se sitúa principalmente en esta región.

La interacción de esta radiación con la materia varía dependiendo de la longitud de onda. Las ventanas de transmisión atmosférica son separadas por bandas de absorción. La región de  $0.7$  a  $3 \mu\text{m}$  comprende principalmente la radiación solar reflejada por los cuerpos y no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales, por lo que se le llama infrarrojo reflectivo. La radiación desde  $0.7$  a  $0.9$  es detectada con emulsiones por lo que se le nombra radiación fotográfica infrarroja.

La porción térmica del infrarrojo posee dos ventanas principales que son: de  $0.3$  a  $5 \mu\text{m}$  y de  $8$  a  $14 \mu\text{m}$ . Las imágenes en estas longitudes de onda son adquiridas a través del uso de barredores ópticos, no por películas.

- Microondas: Las microondas se sitúan en la región de  $0.3$  a  $300$  cm. En esta porción se pueden construir dispositivos capaces de producir haces de radiación electromagnética altamente concentrados llamados radares. Los radares pueden ser para sondeo, de manera semejante al uso de un sonar en el agua. La radiación electromagnética en esta región ha sido ampliamente

utilizada en percepción remota, pues su poca atenuación por la atmósfera o por las nubes, propicia el uso de sensores de microondas en cualquier condición de tiempo.

- Ondas de radio: Estas ondas electromagnéticas tienen frecuencias relativamente bajas y consecuentemente, grandes longitudes de onda que van desde algunos centímetros a algunas centenas de metros. Las ondas electromagnéticas en esta región son utilizadas para comunicación a larga distancia, pues, además de ser poco atenuadas por la atmósfera son reflejadas por la ionósfera, propiciando una propagación de largo alcance.

La región espectral que se extiende de 0.3 a 15.0  $\mu\text{m}$  es la mas usada en percepción remota. Esta franja es conocida como espectro óptico, pues en ella los componentes ópticos de reflexión y refracción, tales como: lentes, espejos, prismas, etc.; pueden ser usados para concentrar o reorientar la radiación. En la porción derecha de la figura 1.1 se muestran las bandas mas comúnmente empleadas en percepción remota.

#### 1.4 Interacciones de la energía con la materia

Diferentes interacciones son posibles cuando la energía electromagnética encuentra materia en su camino, ya sea en estado sólido, líquido o gas.

Las interacciones que tienen lugar en la superficie de una sustancia son llamadas fenómenos superficiales, y cuando la radiación electromagnética penetra a través de la superficie resulta en interacciones llamadas fenómenos de volumen.

Las interacciones de superficie y de volumen, con la materia, producen cambios en la radiación electromagnética incidente, como son: Alteraciones de magnitud, dirección, longitud de onda, polarización y fase (Janza, et al 1975 en Sabin, 1978). La percepción remota detecta y registra estos cambios. Las imágenes y datos resultantes son interpretados para identificar remotamente las características de la materia que produjo los cambios en el registro de la radiación electromagnética (Sabin, 1978).

Durante la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, tanto la masa como la energía son conservados de acuerdo a los principios básicos de la física. Las interacciones posibles entre los cuerpos y la energía son las siguientes:

- La radiación puede ser transmitida, esto es, pasada a través de la sustancia (figura 1.2a). La velocidad de la radiación electromagnética cambia cuando ésta se transmite del aire, o el vacío, dentro de otras sustancias.

La radiación electromagnética proveniente del sol se transmite a través de la atmósfera hasta llegar a la superficie, sufriendo diferentes procesos de atenuación en forma selectiva.

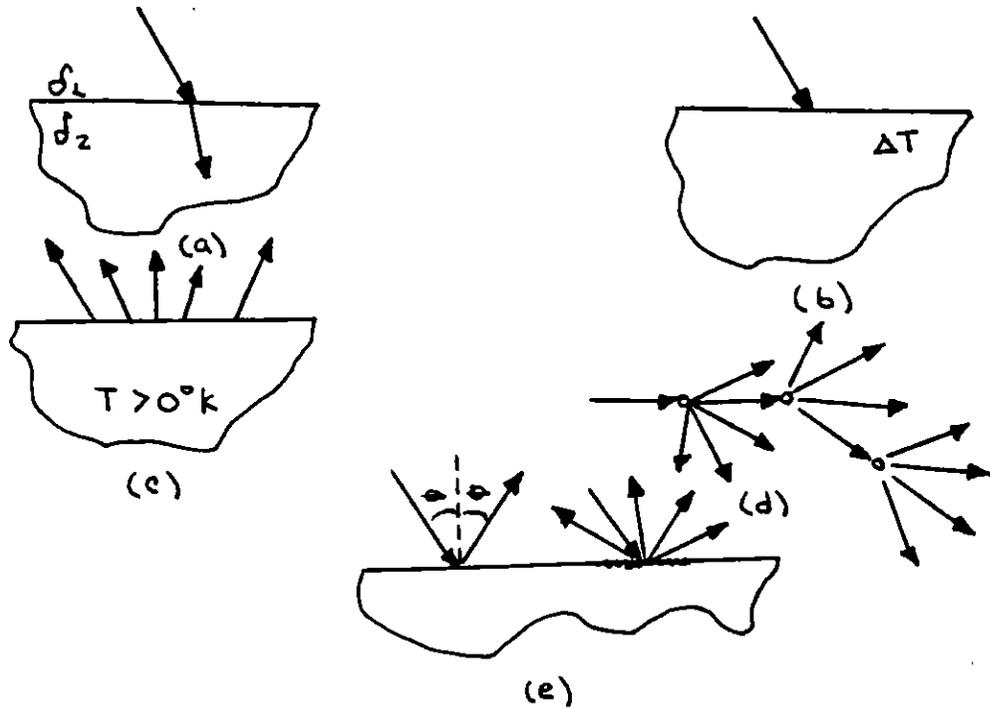


Figura 1.2 Interacciones de la energía con la materia. (a) transmisión, (b) absorción, (c) emisión, (d) dispersión y (e) reflexión.

- La radiación electromagnética puede ser absorbida por una sustancia y sufrir como consecuencia de esto un incremento en su temperatura (figura 1.2b).

La radiación electromagnética al propagarse por la atmósfera es absorbida selectivamente por sus componentes, tales como: vapor de agua, ozono, monóxido de carbono, etc.. Dentro de la porción del visible el ozono es el máximo atenuador por absorción, sin embargo, en muchos casos prácticos esta absorción es despreciada por muy pequeña.

La figura 1.3 muestra el espectro de radiación solar de la parte alta de la atmósfera y el existente al nivel del mar. En esta figura 1.3 también están indicadas las porciones donde existe absorción por los diversos constituyentes de la atmósfera y aquellas regiones por donde se transmite sin sufrir alta atenuación.

Existen a lo largo de todo el espectro regiones donde la absorción atmosférica es relativamente pequeña. Estas regiones llamadas ventanas atmosféricas, se caracterizan por una buena transmitancia de la radiación electromagnética. Por otro lado las porciones donde la energía es absorbida casi en su totalidad son llamadas bandas de absorción. En la tabla 1.1 se presentan las principales ventanas atmosféricas.

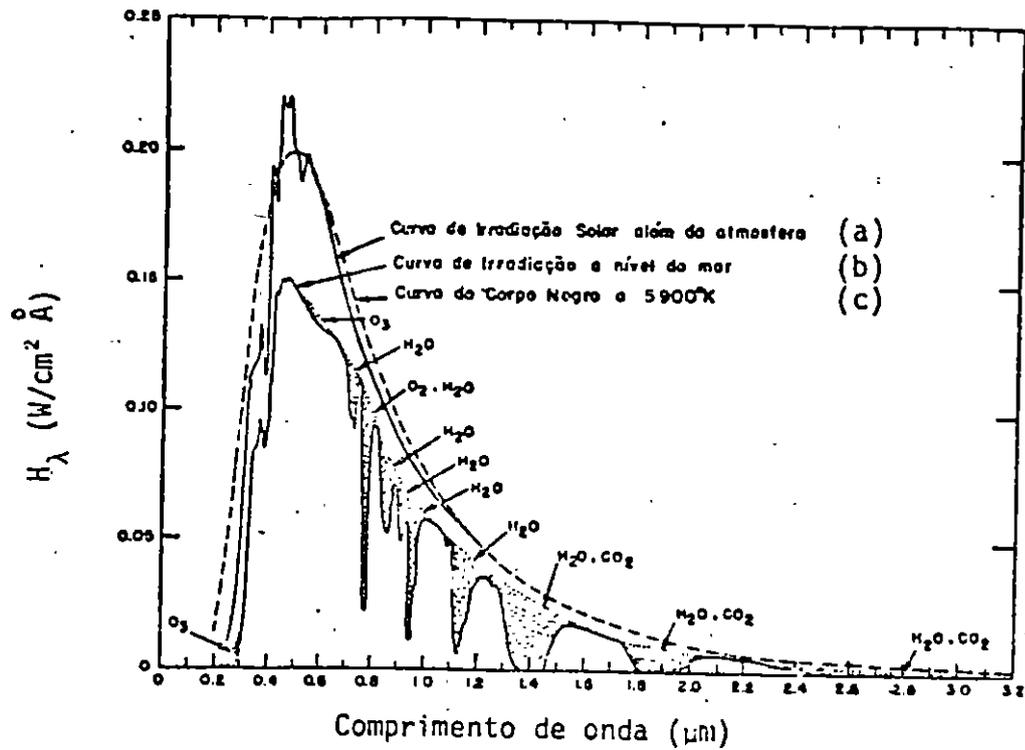


Figura 1.3 Espectros de irradiação. (a) irradiação solar en la parte alta de la atmósfera, (b) irradiação solar a nivel del mar, (c) irradiação de un cuerpo negro a 5900 °K (tomada de Steffen, et al 1981).

Ultravioleta y visible.	0.30 a 0.75 $\mu\text{m}$ . 0.77 a 0.91
Infrarrojo próximo.	1.00 - 1.12 $\mu\text{m}$ . 1.19 - 1.34 1.55 - 1.75 2.05 - 2.40
Infrarrojo medio.	3.50 - 4.16 $\mu\text{m}$ . 4.50 - 5.00
Infrarrojo termal.	8.00 - 9.20 $\mu\text{m}$ . 10.20 - 12.40 17.00 - 22.00
Microondas.	2.06 - 2.22 mm. 3.00 - 3.75 7.50 - 11.50 20.00 en adelante.

Tabla 1.1 Ventanas atmosféricas de transmisión de la radiación electromagnética.

- La radiación puede ser emitida por una sustancia como una función de su estructura y su temperatura. Toda materia a temperatura arriba del cero absoluto (0° K) emite energía (figura 1.2c).

El modelo teórico óptimo que permite calcular la energía emitida es el llamado "cuerpo negro". Un cuerpo negro es aquel que es capaz de absorber toda la energía radiante que sobre él incide y emitirla nuevamente a la atmósfera para mantenerse en equilibrio. La ley de Plank permite calcular la densidad del flujo de energía superficial (exitancia) de un cuerpo negro.

$$M_r = \frac{C_1 \tau^{-5}}{(e^{(C_2/\tau T)} - 1)}$$

donde:

$$C_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$C_2 = 1.44 \times 10^2 \text{ m } ^\circ\text{K}$$

T = temperatura

$\tau$  = longitud de onda

$M_r$  = exitancia espectral

La figura 1.4 presenta la exitancia espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas. En ella se observa que al aumentar la temperatura, radiaciones con longitudes de onda cada vez más cortas van siendo incluidas en la energía emitida, y el punto correspondiente a la máxima exitancia espectral se desplaza en esta dirección también.

Cuando se trata de cuerpos reales, se debe de introducir en la ley de Plank una constante multiplicadora conocida como emisividad.

La emisividad es definida como la razón de exitancia de un cuerpo real entre la exitancia de un cuerpo negro, a la misma temperatura. Como la exitancia de un cuerpo negro es la mayor posible para la temperatura considerada, la emisividad del cuerpo real es siempre menor que 1. Por lo tanto, la emisividad de un cuerpo caracteriza cuando este se aproxima o se aparta de un cuerpo negro.

Según este modelo los cuerpos a temperatura ambiente 300 °K (27 °C) emiten radiación electromagnética con máxima intensidad dentro de la ventana atmosférica de 8 a 14  $\mu\text{m}$ , mientras que el cuerpo negro a esta misma temperatura tiene su máxima emisión en 9.6  $\mu\text{m}$ .

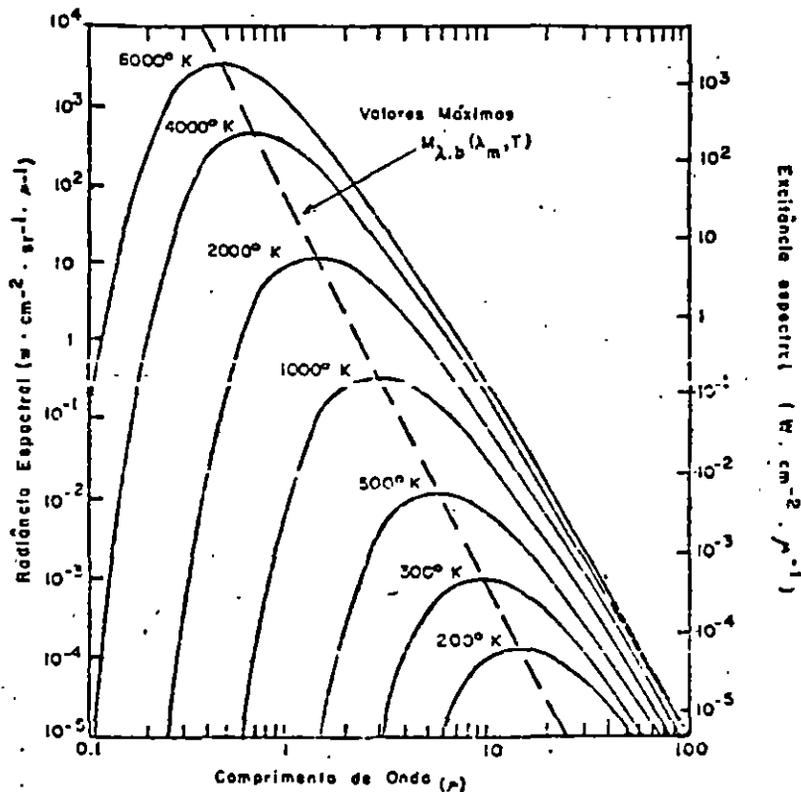


Figura 1.4 Excitancia espectral de un cuerpo negro para varias temperaturas (tomada de Steffen, et al 1981).

El sol con una temperatura superficial de casi 6000 °K, irradia grandes cantidades de energía en todas las longitudes de onda con la máxima concentración de energía ocurriendo en la porción del verde brillante (0.5 μm).

- La radiación puede ser dispersada, esto es, desviada en todas las direcciones y perdida finalmente por absorción o fuerte dispersión (figura 1.2d). La dispersión de la luz por la atmósfera es un ejemplo familiar.

Dependiendo del tamaño de los elementos dispersores y de la longitud de onda de la radiación se pueden distinguir dos tipos de dispersiones: Dispersión selectiva y dispersión no selectiva (Sabin, 1978) (tabla 1.2).

La dispersión selectiva incluye a su vez 2 tipos que son: dispersión molecular o Rayleigh y dispersión Mie. La dispersión Rayleigh es producida esencialmente por las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera, esto es, por moléculas que son mucho mas pequeñas que la longitud de onda de la radiación. La dispersión Rayleigh es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Por cada 10 ondas azules que son dispersadas (440 nm), únicamente una onda roja (700 nm) lo es. Esto explica el color azul del cielo.

La dispersión Mie es causada por partículas de humo, vapor y bruma, que son aproximadamente del mismo tamaño de la longitud de onda de la radiación electromagnética. Cuando el diámetro de las partículas dispersoras es igual a la longitud de onda de la radiación, la dispersión es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. En el caso de que los diámetros sean igual a  $3/2$ , la dispersión será proporcional al inverso de la longitud de onda.

Proceso de difusión.	Dependencia de la longitud de onda $\tau$ .	Tamaño aproximado de las partículas en $\tau$ .	Tipo de partículas.
Selectivo			
Rayleigh	$\tau^{-4}$	$\ll 0.1$	moléculas de gases.
Mie	$\tau^0$ a $\tau^{-4}$	0.1 a 10	Humo, vapor, bruma.
No selectivo	$\tau^0$	$> 10$	Polvo, niebla, nubes.

Tabla 1.2 Procesos de dispersión atmosférica (tomada de Sabin, 1978).

La dispersión no selectiva es provocada por polvo, niebla y nubes y ocurre cuando los diámetros de las partículas son mayores que 10 veces la longitud de onda de la radiación. En este caso, todas las longitudes de onda de la radiación electromagnética son dispersadas con igual intensidad. La apariencia blanca de las nubes es explicada por este proceso.

- La radiación puede ser reflejada, o sea, retornada desde la superficie de una sustancia (figura 1.2e). Este es uno de los procesos de mayor relevancia pues la mayor parte de las informaciones es obtenida a través del análisis de la energía reflejada por los objetos. A pesar de que la reflexión se considere esencialmente como un fenómeno de superficie, se debe resaltar que, dependiendo de la longitud de onda de la radiación y de las propiedades físicas del material, ella es resultante de la interacción de la radiación con las diferentes capas de subsuperficie. Por ejemplo, debido a la penetración de la radiación de longitudes de onda mayores de 5 metros en el suelo, un análisis de la energía reflejada permite una evaluación de su contenido de humedad.

Con relación a la distribución espacial de la energía reflejada por una superficie, se pueden considerar dos casos: una reflexión

especular, causada por superficies lisas; o una reflexión difusa, provocada por las superficies rugosas (figura 1.2e). Se debe observar que esta clasificación lisa o rugosa depende de la longitud de onda de la radiación y del ángulo de incidencia. Así, una superficie arenosa, que en la porción del visible se comporta como rugosa, puede parecer lisa en la banda de las microondas. Siguiendo el criterio de Rayleigh se considera una superficie como lisa cuando sus irregularidades medias son de magnitud  $h$ , dada por:

$$h \leq 1/8 \cos\theta$$

Se tiene una reflexión especular cuando la radiación incidente es retornada sin cambios desde la superficie de la sustancia, con el ángulo de reflexión igual y opuesto al ángulo de incidencia.

Una superficie rugosa puede reflejar la radiación en todas las direcciones, generando un campo de luz difusa, motivo por el cual se le llama reflexión difusa. Se puede tener radiación siendo reflejada en la misma dirección de incidencia, fenómeno conocido como retrodifusión.

En algunos casos se puede tener una mezcla de reflexión especular y difusa, pero para todos los efectos se acostumbra considerar como reflexión difusa cuando una porción considerable, del orden del 25% o mas, de la radiación es reflejada difusamente.

Las interacciones con cualquier forma particular de materia son selectivas con respecto a la longitud de onda de la radiación electromagnética y son específicas para está forma de materia, dependiendo primeramente de sus propiedades superficiales y de su estructura atómica y molecular (Colwell et al, 1963 en Sabin, 1978). Estas interacciones entre la materia y la energía proporcionan la base de la percepción remota.

### 1.5 Elementos de un sistema de percepción remota

El modelo mas simple de adquisición de datos en percepción remota es considerado para tener 4 elementos básicos (figura 1.5) que son: La fuente de iluminación, la trayectoria y medio de propagación, la escena u objeto a ser caracterizado y finalmente el sistema sensor.

Como se puede observar en la figura 1.5 la fuente emite energía la cual se propaga a través de la atmósfera, interactuando con ella y sufriendo modificaciones. Al llegar a la superficie la energía es absorbida, reflejada, transmitida y dispersada por los objetos componentes la escena, regresando parte de ella nuevamente a la atmósfera y volviendo a sufrir modificaciones. Finalmente la energía alcanza al sistema sensor donde es medida, convertida en dato y registrada para su subsecuente procesamiento.

- Fuente de iluminación: Es todo cuerpo que irradia energía electromagnética sobre un objeto, lo ilumina. Esta fuente puede ser de dos tipos externa o natural y creada por el hombre.

Una fuente externa es aquella sobre la cual no se tiene control y solo se puede hacer uso de las características regulares conocidas de ésta; esperando en forma pasiva que la iluminación sea la adecuada para efectuar la observación. En la fuente creada por el hombre se tiene un control sobre las características de la energía irradiada.

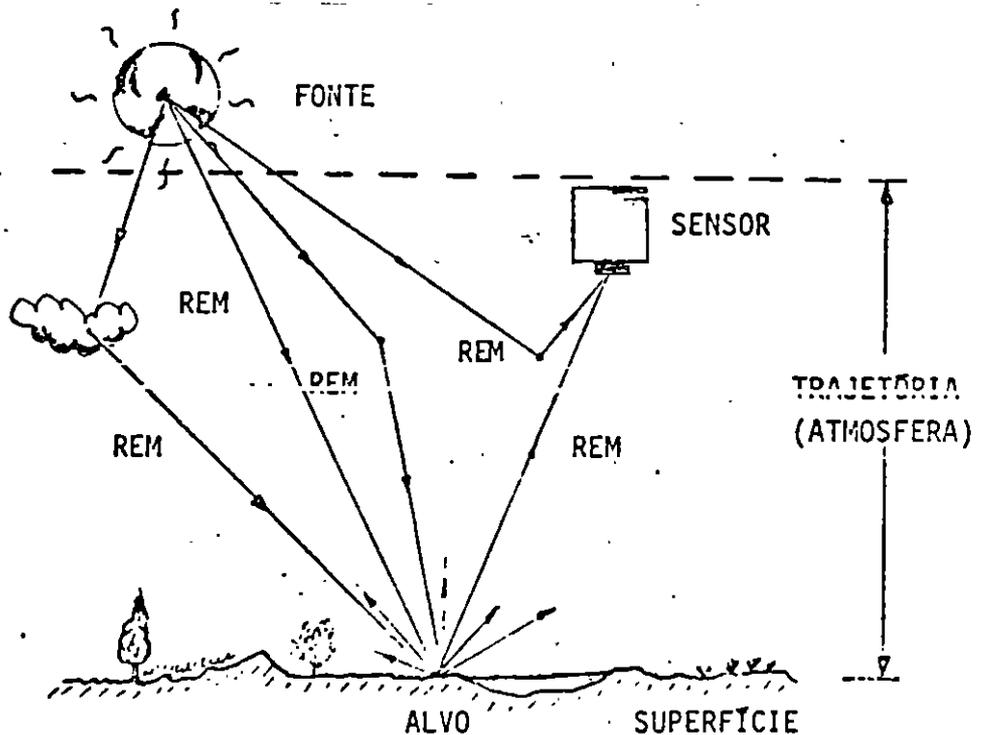


Figura 1.5 Elementos de un sistema de percepción remota.

La fuente puede ser el mismo objeto de estudio, caso en el cual la energía que alcanza al sistema sensor no es la que proviene de otro cuerpo que lo esté iluminando sino la que el mismo irradia.

- Trayectoria y medio de propagación: Es el camino que sigue la energía electromagnética desde la fuente al objeto y del objeto al sistema sensor. El medio de propagación es la materia o ausencia de ella por la cual se transmite la radiación electromagnética desde la fuente hasta el sistema sensor.
- Escena u objeto: Es todo aquello, de lo cual se necesita recabar información, que interacciona con la radiación electromagnética reflejándola o emitiéndola hacia el sistema sensor. El objeto

puede ser cualquier cuerpo o rasgo presente en la superficie terrestre tales como ríos, colinas, vegetación, rocas, etc.

- Sistema sensor: Es el instrumento que captura la radiación electromagnética (REM) emitida o reflejada por una escena y la convierte en una señal eléctrica que es grabada en forma de un dato numérico en una imagen.

## 2 SISTEMAS SENSORES Y FORMACION DE IMAGENES

### 2.1 Concepto de sensor

Como se mencionó en el capítulo anterior, el sistema sensor es el instrumento que percibe la señal proveniente del objeto de estudio, la cuantifica y la registra de manera que pueda ser analizada posteriormente. La radiación captada puede ser energía reflejada o emitida por el objeto, así como la proveniente del medio (energía dispersada por la atmósfera).

El sensor es un dispositivo que mide la energía que llega desde una área de la escena, la promedia y la asigna en forma puntual al centro de dicha zona (figura 2.1).

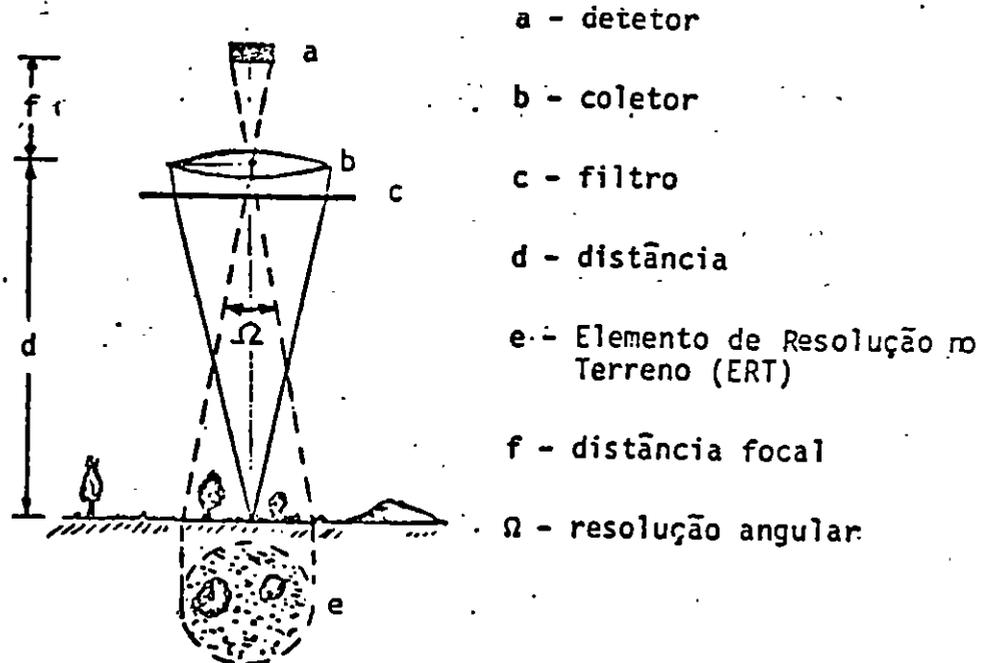


Figura 2.1 Elementos formadores de la resolución de un sistema sensor (tomada de Steffen, et al 1981).

Un sistema sensor en su versión más simple, consta de uno o mas sensores y un dispositivo de registro para la REM recibida.

La región de la escena que es visada por el sensor en un instante dado se llama campo instantáneo de visión (CIV) y, constituye la porción mínima que el sensor puede captar y discriminar. La dimensión del CIV dependerá de la altura a la que se coloque éste para tener una visión de conjunto.

Los vehículos que transportan al sistema y lo colocan a una altura determinada se les da el nombre de plataformas. Las plataformas más comunes en percepción remota son los aviones y los satélites.

Los sistemas sensores más usados son cámaras fotográficas y barredores multiespectrales.

## 2.2 Clasificación de los sistemas sensores

Los sistemas sensores pueden ser clasificados de acuerdo con las siguientes propiedades:

- Modo de operación: activo y pasivo.
- Proceso de registro (salida): imageador y no imageador.
- Proceso de captación de la radiación electromagnética: fotográfico, digital, televisión, etc.
- Sensibilidad espectral: Visible, infrarrojo, radar, térmico, etc.

Cada uno de estos tipos de sistemas sensores es caracterizado de la siguiente manera:

- Pasivos: Sistemas que captan la radiación electromagnética (REM) proveniente del objeto de estudio, cuando es iluminado por otro cuerpo o actúa el mismo como fuente. Es decir, la fuente de energía electromagnética es externa al sistema sensor y por lo tanto no se tiene un control de la radiación que sale de ésta.
- Activos: Sistemas sensores que tienen integrada una fuente de iluminación y registran la REM reflejada por los objetos al ser iluminados por ella. Esto es, poseen su propia fuente de iluminación, con características y propiedades controladas.
- Imageadores: Los que producen como salida una imagen del objeto observado. Por imagen se entiende la representación gráfica en el espacio bidimensional de las características de un objeto o escena (figura 2.2).
- No imageadores: Son aquellos que no producen una imagen del objeto observado, sino que entregan una representación puntual del mismo. Registran la radiación electromagnética reflejada o emitida por un objeto en diferentes longitudes de onda lo cual permite obtener gráficas de reflectancia o emitancia contra espacio o tiempo.
- Fotográficos: Sistemas que utilizan una película fotográfica como medio de registro de salida.
- Barredores: Sistemas que constan de un solo sensor o un arreglo de estos y generan una imagen a partir de realizar un barrido

de toda el área de la escena u objeto de estudio. El barrido consiste en la división de la escena en pequeños elementos de imagen (Elementos de resolución del terreno, ERT's o CIV's) y en la captura y registro de la energía reflejada o emitida por todos y cada uno de ellos.

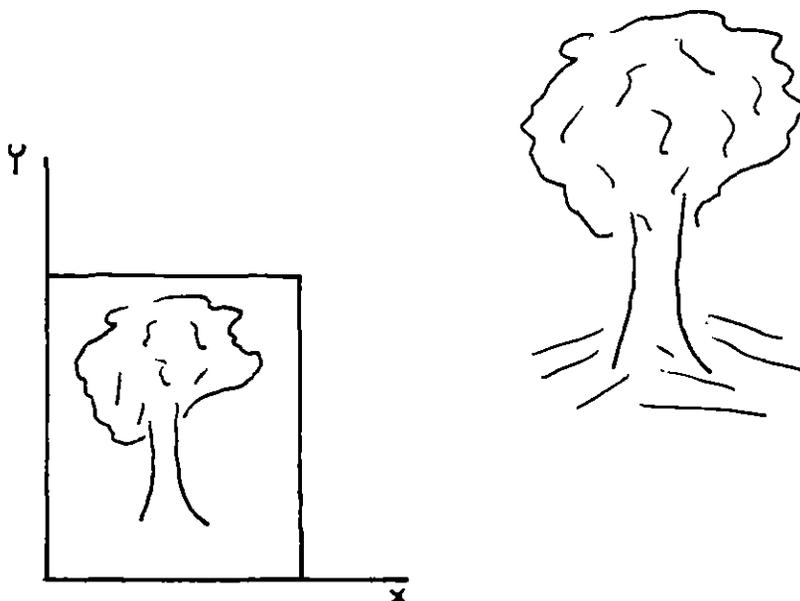


Figura 2.2 Imagen de un objeto. Representación gráfica en el espacio bidimensional.

- Televisión: Son aquellos que generan señales de televisión, por lo que captan la imagen de la escena entera. También son llamados de cuadro o Framing.

La manera como los sensores pueden ser clasificados está resumida en el cuadro sinóptico de la figura 2.3.

### 2.3 Formación de una imagen

Una imagen es el término general para cualquier representación pictórica, sin importar la longitud de onda o el dispositivo usado para producirla. Sin embargo en percepción remota es comúnmente restringido a escenas que son detectadas por medio de un sistema barredor. La mayoría de las imágenes son desplegadas en una impresión fotográfica después de haber sido registradas.

Para un sistema barredor la formación de la imagen y el registro de la misma se hace por medios fotoeléctricos a través de la discretización del objeto en ERT (figura 2.4). Es decir, el sensor es direccionado a visualizar una parte del objeto de tal manera que la energía radiante de la luz, proveniente del CIV siendo sensado, es transformada en un voltaje que a su vez es medido y ubicado dentro de una escala registrando su valor. La formación de la imagen se logra por medio de un barrido del área completa del objeto.

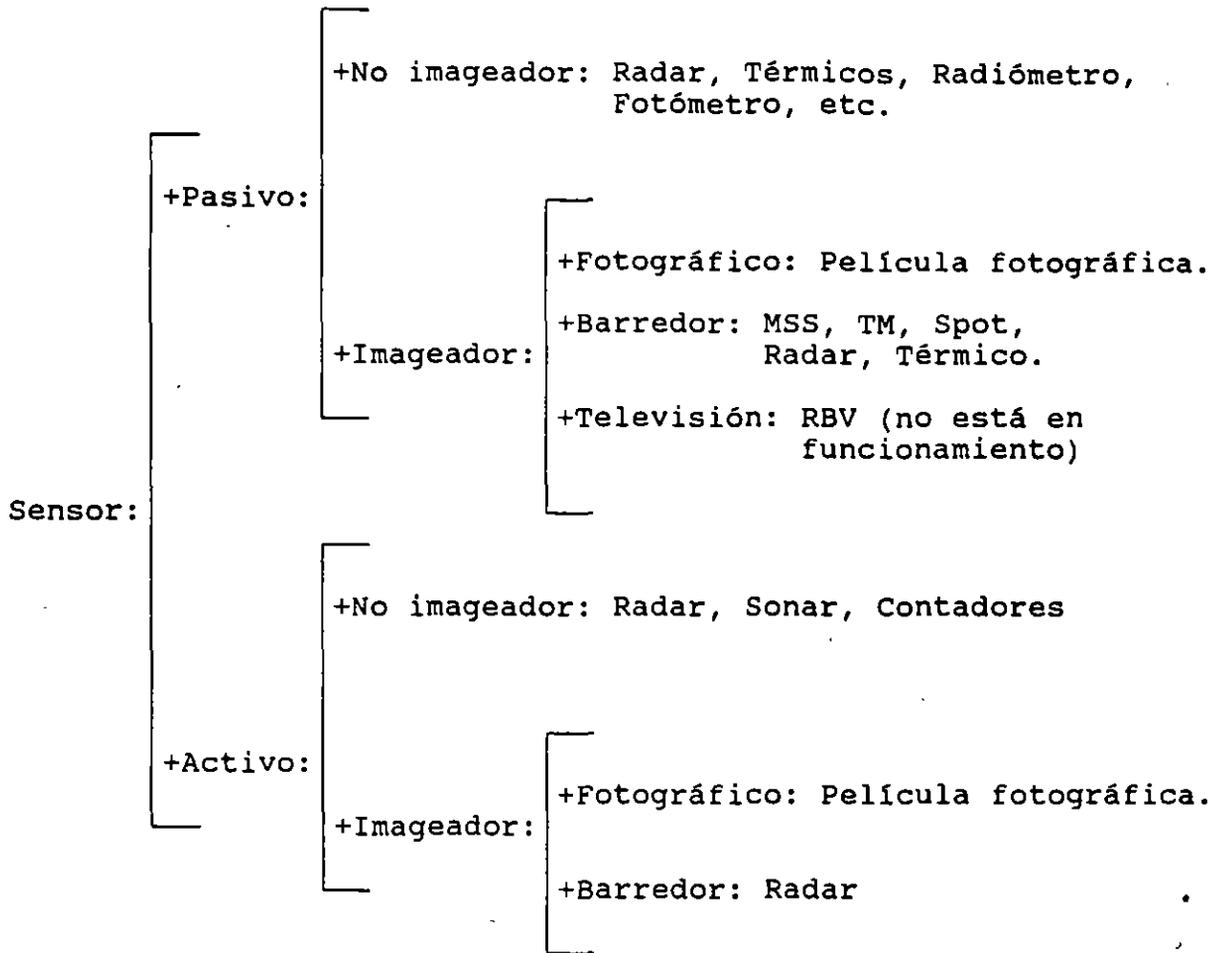


Figura 2.3 Clasificación de un sistema sensor, según: modo de operación, tipo de registro y proceso de captación de energía

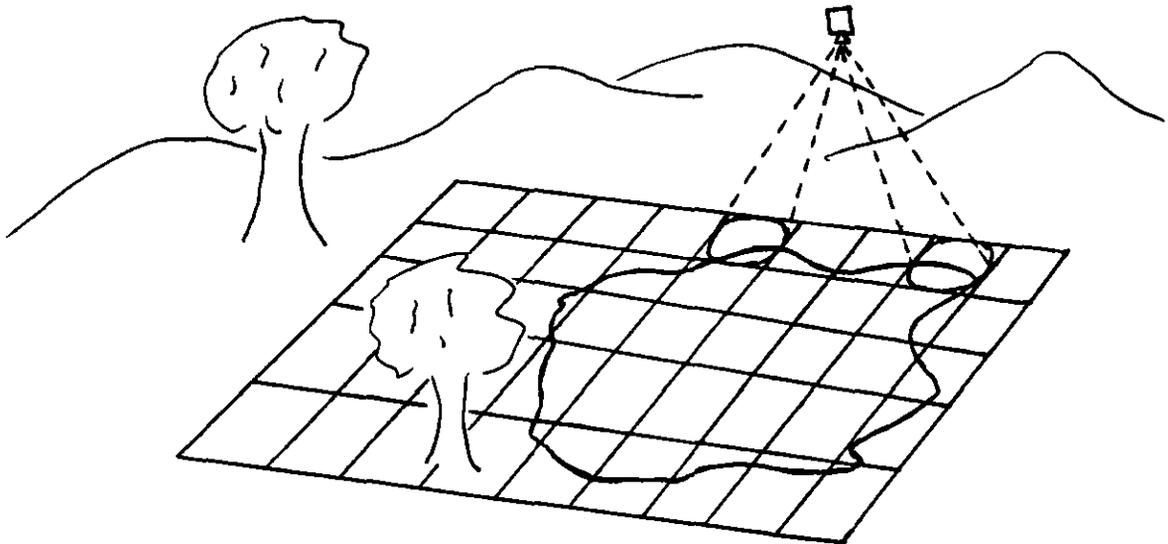


Figura 2.4 Discretización de una imagen en ERT's o CIV's.

Para tener una representación visual de la energía proveniente de un ERT, el valor registrado es asignado a un tono dentro de una escala de grises. Una escala de grises es una secuencia de tonos en la cual se corre en forma discreta el continuo que va desde el negro o ausencia de luz hasta el blanco o luz mas intensa (figura 2.5). En la práctica a cada tono se le asigna un número, de forma que se integra una secuencia numérica en la cual el color negro es asociado al valor mínimo y el blanco al valor máximo de la secuencia y los tonos intermedios a los valores medios de la misma.

El número de niveles de grises puede ser arbitrario dependiendo de la cantidad de tonos que se desee distinguir. En un sensor siempre es un múltiplo de 2 dado que las computadoras trabajan con sistemas binarios.



Figura 2.5 Escala de grises.

Debido a la forma de captura y registro una imagen puede ser vista como: a) imagen digital y b) imagen gráfica.

Una imagen digital es aquella en la que cada ERT esta dado no por una tonalidad, sino por un número que indica la intensidad de energía proveniente del elemento. Matemáticamente es una función discreta  $I(x,y)$  bidimensional definida por una malla rectangular en una cierta región y puede ser vista como una matriz de N renglones por M columnas en la que cada elemento corresponde a una celda de la malla y su valor da la evaluación de la función (Mascarenhas y Velasco, 1989).

En forma gráfica una imagen es una cuadrícula finísima de diferentes tonalidades en la que sus elementos componen la escena a manera de un rompecabezas. En esta representación cada elemento individual posee un único tono, aunque el conjunto muestre una gran diversidad.

El principal tipo de barredor que existe actualmente es un radiómetro que en el camino óptico hacia el sensor tiene instalado un espejo, el cual gira u oscila en la dirección perpendicular al deslizamiento de la plataforma (avión, satélite, etc.), desplazando el CIV y generando una línea de barradura. El movimiento del espejo debe estar sincronizado con la velocidad de la plataforma, para que en cada rotación u oscilación, una nueva línea adyacente de barradura sea generada. De esta forma, se puede tener una imagen del terreno situado por debajo.

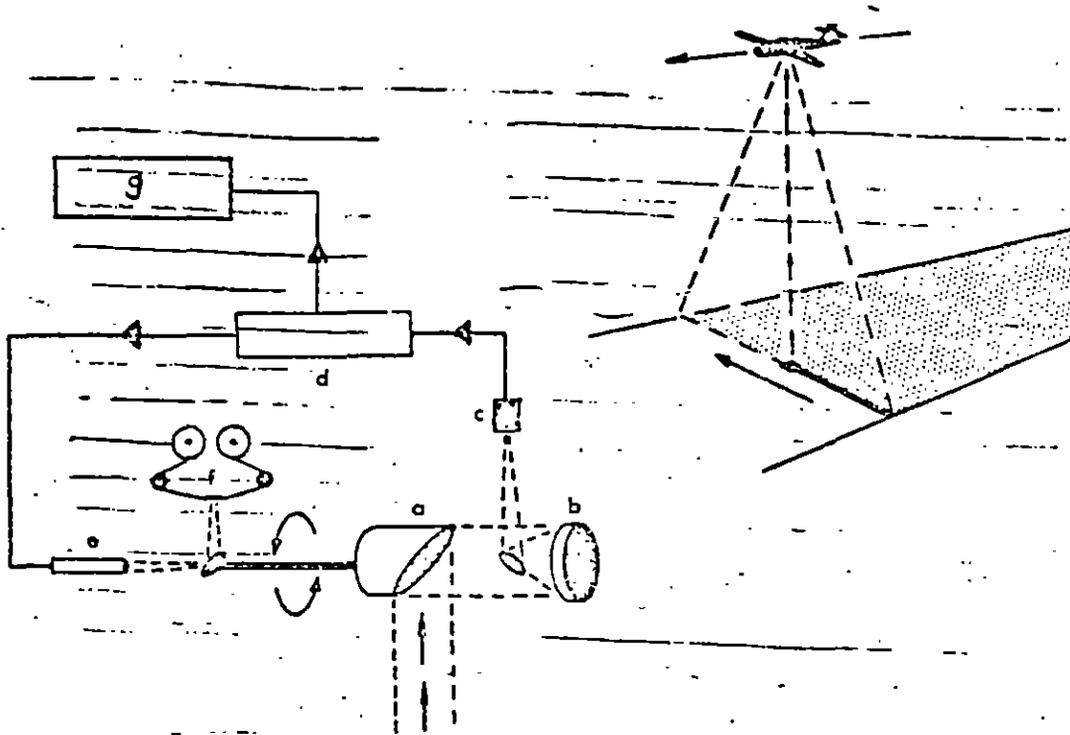


Figura 2.6 Radiómetro imageador. (a) Espejo giratorio, (b) Espejo parabólico, (c) sensor, (d) módulo de procesamiento electrónico, (e) lámpara, (f) película y (g) grabador de cintas magnéticas.

En la figura 2.6, se presenta el esquema de un radiómetro imageador. En este caso, cada línea de barradura puede ser almacenada en una cinta magnética o grabada sobre una película fotográfica. En el caso de la película fotográfica, la energía radiante proveniente de cada ERT es convertida, a través del detector y del sistema de procesamiento electrónico, en una señal eléctrica que, modula la intensidad luminosa de una pequeña lámpara. La luz de esa lámpara barre la película fotográfica por medio de un pequeño espejo. El desplazamiento de la película es hecho de tal forma que, a cada rotación u oscilación del espejo, una nueva línea de barradura es grabada sobre él.

En la mayoría de los radiómetros el área del detector define el campo instantáneo de visión (CIV) del sistema, y un filtro es colocado en la trayectoria de la radiación para restringirla a un intervalo de longitudes de onda escogido. Se puede transformar un radiómetro imageador en multispectral, esto es, capaz de observar la misma escena en diferentes intervalos de longitud de onda, a través de separadores de ventanas (prismas, redes de difracción, etc.). De esta forma, detectores separados, localizados dentro de un arreglo de sensores, observan el mismo elemento de resolución de la escena en diferentes bandas espectrales.

Un sensor remoto tiene la ventaja sobre el ojo humano de que no sólo permite la digitalización de un objeto en forma extremadamente rápida, sino en el contenido de información que puede discriminar. Dado que el ojo humano sólo puede distinguir 16 tonos de grises.

#### 2.4 Atributos de la escena

Todas las imágenes pueden ser descritas en términos de ciertas propiedades fundamentales comunes que son: escala, brillantez, contraste y resolución. El tono y la textura de la imagen son función de estas propiedades fundamentales (Sabin, 1978).

La escala es la razón de la distancia entre dos puntos en una imagen o mapa, a la correspondiente distancia sobre el terreno. La escala de una imagen es determinada por:

- El campo de visión angular del dispositivo sensor.
- La altitud desde la cual la imagen es adquirida.
- El factor de magnificación empleado en la reproducción de la imagen.

La escala óptima de una imagen es determinada por la naturaleza del proyecto de interpretación, muchos investigadores han sido sorprendidos por la cantidad de información que puede ser interpretada a partir de imágenes a escala muy pequeña.

Variaciones en la intensidad de la radiación electromagnética, proveniente de la superficie del terreno, son comúnmente desplegadas como variaciones en brillo para imágenes en blanco y negro. El brillo de un objeto es proporcional a la intensidad de radiación electromagnética que es registrada a partir de aquel objeto.

Brillantez es la magnitud de la respuesta producida en el ojo por la luz, y es una sensación subjetiva que puede ser determinada únicamente en forma aproximada. La luminancia es una medición cuantitativa de la intensidad de luz a partir de una fuente, y es medida con un dispositivo llamado fotómetro. Los interpretes de imágenes raramente hacen mediciones cuantitativas de variaciones de brillantez en una imagen. Las variaciones de brillantez pueden ser calibradas a partir de una escala de grises.

El término tono es usado para cada sombra distinguible desde el negro hasta el blanco.

En sistemas sensores como cámaras fotográficas y barredores multiespectrales, el tono de un objeto es primeramente determinado por la habilidad del objeto para reflejar la luz incidente, aunque los efectos atmosféricos y la sensibilidad del sistema sensor son también factores importantes que lo influyen.

En imágenes generadas a partir de barredores térmicos la brillantez de un objeto es proporcional al calor irradiado desde el objeto.

Para imágenes de radar la brillantez es proporcional al haz de energía siendo retro-reflejado por el objeto y captado por la antena.

Una definición de contraste de una imagen es la razón entre las partes mas brillantes y mas oscuras de la imagen. Varias expresiones son comúnmente usadas para describir el contraste, y puede haber confusión en su uso. La razón de contraste ( $C_r$ ) es ampliamente usada y es definida como (Sabin, 1978):

$$C_r = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}$$

donde:

$B_{\max}$  = máximo valor de brillantez de la escena.

$B_{\min}$  = mínimo valor de brillantez de la escena.

Note que cuando  $B_{\min} = 0$ ,  $C_r$  es infinito; cuando  $B_{\min} = B_{\max}$ ,  $C_r = 1$ . Además de describir una escena completa, la razón de contraste es también útil para describir la razón de brillantez entre un objeto y su fondo adyacente en la imagen. La razón de contraste es un factor vital para determinar la posibilidad de discriminar y detectar objetos.

Bajos contrastes pueden resultar de las siguientes causas:

- Los objetos individuales y su fondo, que forman el terreno, pueden tener una respuesta electromagnética uniforme y cercana dentro de la ventana de longitudes de onda que es registrada por el sistema sensor. En otras palabras la escena por si misma tiene una baja razón de contraste.
- La dispersión de la energía electromagnética por la atmósfera puede reducir el contraste de una escena. Este efecto es mas pronunciado en las longitudes de onda corta de la banda fotográfica del espectro electromagnético (figura 1.1).
- El sistema de percepción remota puede carecer de la suficiente sensibilidad (resolución radiométrica) para detectar y registrar el contraste del terreno. Técnicas incorrectas de registro pueden resultar en bajos contrastes en la imagen aunque la escena tenga una alta razón de contraste.

Las imágenes con una baja razón de contraste, independientemente de la causa, pueden sufrir una mejora en su contraste a través de procesos fotográficos o métodos digitales.

Actualmente se estudian cuatro características de una imagen de satélite en relación a su capacidad de resolución que son:

- Resolución espacial: Es la capacidad de un sensor para distinguir dos o mas elementos, a los cuales se les puede registrar como entidades separadas, donde la resolución es la distancia mínima entre ellos.

En una imagen la resolución espacial está relacionada con el tamaño, del área en la superficie, que representa un pixel.

- Resolución espectral: Se interpreta como la capacidad de un sensor para separar y detectar ciertos rangos de longitud de onda del espectro electromagnético.

En términos de instrumentación, resolución espectral involucra tanto el rango de frecuencias del espectro que es registrado, como el número de intervalos utilizados por el sensor: y depende del ancho de la banda y del espectro admitido por el filtro del sistema detector y la calidad de energía presente en esa porción particular del espectro.

Para una imagen, la resolución espectral esta asociada con el número de bandas que posee, sus posiciones en el espectro electromagnético y el rango de frecuencias que cada una de ellas cubre.

- Resolución radiométrica: Se define como la capacidad de un sensor para detectar la diferencia de intensidad, entre dos mediciones, cuando existe una variación en la energía que recibe el instrumento.

La resolución radiométrica en una imagen de satélite está dada por el número de niveles de grises que posee.

- Resolución temporal: Es el tiempo mínimo en el que se pueden obtener dos imágenes de satélite en forma consecutiva para la misma zona de la superficie terrestre.

Otras características de una imagen son: La detectabilidad, la reconocibilidad, firma y textura.

- La detectabilidad es la habilidad de un sistema imageador para registrar la presencia o ausencia de un objeto, aunque la identificación del objeto puede ser desconocida. Un objeto puede ser detectado aunque este sea mas pequeño que la resolución espacial del sistema sensor.

- La reconocibilidad es la habilidad para identificar un objeto en una imagen. Los objetos pueden ser detectados y discriminados y aun así no ser reconocibles. Por ejemplo, las carreteras en una imagen aparecen como líneas angostas, pero estas pueden también ser brechas y canales; entonces las líneas han sido detectadas pero no reconocidas. A diferencia de la resolución, no hay una medición cuantitativa para la detectabilidad y la reconocibilidad.

- Una firma es la expresión de un objeto en una imagen que capacita al objeto para ser identificado. Las firmas son determinadas por las características de un objeto que determina su interacción con la energía electromagnética. Las firmas de los objetos son generalmente diferentes para cada longitud de onda.
- La textura es la frecuencia de cambios y arreglos de los tonos de una imagen. Textura fina, media y gruesa son algunos de los términos usados para describirla.

## 2.5 Principales sistemas sensores

### 2.5.1 Sistema Landsat

El programa Landsat, llamado en su inicio ERST, se desarrollo con el objetivo de permitir la adquisición de datos espaciales, espectrales y temporales de la superficie de la tierra de una forma global y repetitiva. Este programa fue operado por la NASA/NOAA hasta 1985 cuando fue transferido a la empresa EOSAT (Earth Observation Satellite Company) que es una compañía privada formada por la unión de la RCA Corporation y la Hughes Aircraft Company.

La serie Landsat consta hasta el momento de 5 satélites y se contempla extenderla hasta 7. La tabla 2.1 muestra los satélites componentes de esta serie, el período de operación, y los sensores que contienen.

SATELITES	PERIODO	SENSOR
Landsat 1	23/07/72 al 05/01/78	MSS/RBV
Landsat 2	22/01/75 al 27/07/83	MSS/RBV
Landsat 3	05/03/78 al 07/09/83	MSS/RBV
Landsat 4	16/07/82 operando	MSS/TM
Landsat 5	01/03/84 operando	MSS/TM
Landsat 6	En planes	ETM
Landsat 7	En planes	ETM/MLA

Tabla 2.1 Serie de satélites Landsat. MSS = Multiespectral scanner, RBV = Return beam vidicom, TM = Thematic mapper, ETM = Enhanced thematic mapper, MLA = Multilinear array.

Como se observa en la tabla 2.1 la serie Landsat a producido imágenes por medio de tres sensores diferentes MSS (imágenes en 4 bandas con un pixel rectangular de resolución 79 x 56 m, el Landsat 3 contó con una quinta banda en la porción térmica del espectro que tenía una resolución de 120 m), RBV (sistema de televisión de 3 canales, el Landsat 3 tenía un solo canal) y TM (barredor mul-



La radiación proveniente de la escena, después de la reflexión en el espejo oscilante, es focalizada por el sistema óptico sobre una matriz de 24 terminales de fibras ópticas de manera que cada terminal recibe el flujo de radiación proveniente de un área de 79 x 79 m en la superficie (ERT).

Conducido por las fibras ópticas, el flujo de radiación es entonces descompuesto por medio de filtros en 4 conjuntos de las siguientes bandas:

- Canal 4 de 0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$ .
- Canal 5 de 0,6 a 0.7  $\mu\text{m}$ .
- Canal 6 de 0.7 a 0.8  $\mu\text{m}$ .
- Canal 7 de 0.8 a 1.1  $\mu\text{m}$ .
- Canal 8 de 10.2 a 12.6  $\mu\text{m}$  (únicamente Landsat 3).

Al alcanzar los detectores (6 por canal), la radiación es convertida en una señal eléctrica proporcional a la radiancia de la porción de la superficie incluida en el elemento de resolución del terreno correspondiente. La señal que puede variar de 0 a 4 V, es entonces cuantizada en 63 niveles posibles, siendo en seguida transmitida a la tierra o, eventualmente, grabada para transmisiones, posteriores.

El arreglo de la matriz de detectores (6 por canal) permite que durante la oscilación del espejo, 6 líneas sean barridas, del oeste hacia el este, una vez cada 9.95  $\mu\text{seg}$ . Como durante este intervalo el ERT se desplaza apenas 56 m en el sentido de la barradura; a cada elemento de resolución de la imagen o pixel se debe asociar un área de 56 x 79 m, en la superficie.

Generalmente una imagen MSS está formada por 2983 líneas y 3548 pixels, cubriendo una área de 185 x 185 Km, aproximadamente, sobre la superficie.

El mapeador temático (Thematic mapper) es un instrumento sensor (captador de imágenes) proyectado para conseguir mejor resolución (30 m máxima sobre la superficie), separación espectral (7 bandas) y fidelidad geométrica precisa, en comparación con el MSS. Es un sistema imageador de barradura perpendicular a la trayectoria y la captación de la imagen es hecha a través del espejo oscilante.

Los datos del TM son adquiridos simultáneamente en 7 bandas espectrales que son:

- Banda 1 de 0.45 a 0.52  $\mu\text{m}$ .
- Banda 2 de 0.52 a 0.60  $\mu\text{m}$ .
- Banda 3 de 0.63 a 0.69  $\mu\text{m}$ .

- Banda 4 de 0.76 a 0.90  $\mu\text{m}$ .
- Banda 5 de 1.55 a 1.75  $\mu\text{m}$ .
- Banda 6 de 10.4 a 12.5  $\mu\text{m}$ .
- Banda 7 de 2.08 a 2.35  $\mu\text{m}$ .

La imagen está formada por bandas de 6120 x 6120 pixels cubriendo un área de 185 x 185 Km. El tamaño del elemento de resolución del terreno es de 30 m para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 y de 120 m para el canal 6.

La disposición de los sensores mantiene un espacio entre bandas de 2.5 mm. Para las bandas 1 al 5 y 7 los sensores están dispuestos en forma de una estructura de líneas y columnas de 16 elementos, mientras que la banda 6 cuenta únicamente con 4 detectores. La energía captada por el sensor es convertida en señales eléctricas de bajo nivel y registrada como uno de los 256 niveles de grises posibles. La figura 2.8 da una vista de los detectores en el plano focal principal y la figura 2.9 da la estructura general de captación de una imagen.

Los satélites Landsat se desplazan de norte a sur en una órbita geocéntrica, circular, quasi-polar y heliosíncrona (el ángulo sol-tierra-satélite permanece constante), lo que garantiza condiciones semejantes de iluminación a lo largo del año en el área imageada.

Los satélites Landsat 1, 2 y 3 se localizan a una altitud de 920 Km siguiendo la órbita ubicada a 99° con respecto al ecuador. Dichos satélites atraviesan el ecuador cada 103 minutos (9:30 de la mañana hora local), período durante el cual, debido al movimiento de rotación, el punto de cruce del satélite se desplaza 2760 Km, que es la distancia entre las proyecciones de dos órbitas consecutivas. Al final de 24 horas, 14 órbitas son realizadas, las órbitas del día siguiente aparecerán desplazadas 160 Km en relación a las correspondientes de ese día. Para el día 19 el desplazamiento con respecto al día 0 desaparece y recomienza de nuevo el ciclo.

La órbita de los satélites Landsat 4 y 5 también es repetitiva y se encuentra a una altitud nominal de 705.3 Km, formando un ángulo de 98.22°. Los satélites cruzan el ecuador de norte para el sur a las 9:45 de la mañana en cada pasada. Cada órbita lleva aproximadamente 99 minutos para completarse, lo que permite un total de 14.5 órbitas por día, cubriendo la tierra entera en 16 días. Las figuras 2.10 y 2.11 muestran el paso de órbitas subsecuentes y órbitas adyacentes para los satélites Landsat 4 y 5.

La sobreposición lateral de órbitas en el ecuador es de 7.3%, al moverse hacia el norte o hacia el sur, el porcentaje de sobreposición aumenta.

BAND	WAVE LENGTH, $\mu\text{m}$	SEPARATION		OFF AXIS		FRACTION OF 0.24°
		I FOV	in	in	DEG	
6	10.4 TO 12.6	7	0.02858	0.41760	0.024926	1.03848
		34.75	0.14211	0.38935	0.23219	0.96748
5	1.55 TO 1.75	28	0.10608	0.24727	0.14758	0.61490
		45	0.1836	0.14120	0.14120	0.38110
4	0.78 TO 0.90	25	0.1020	0	0	0
3	0.63 TO 0.69	25	0.1020	0.04238	0.02630	0.10540
		25	0.1020	0.14435	0.08817	0.35906
2	0.52 TO 0.60	25	0.1020	0.24638	0.14708	0.61271
		25	0.1020	0.34838	0.20793	0.86636
1	0.48 TO 0.52	25	0.1020	0.35552	0.21218	0.88412

Figura 2.8 Vista de los sensores del TM proyectados en el plano focal principal (tomada de Sorrenti, 1989).

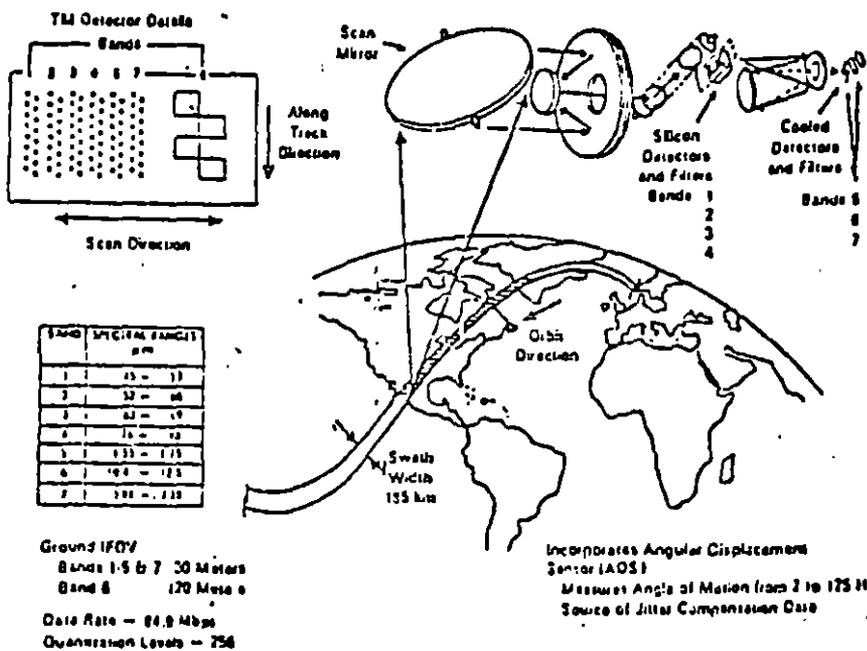


Figura 2.9 Visión general de la estructura de captación de una imagen para el sistema sensor TM (tomada de Sorrenti, 1989).

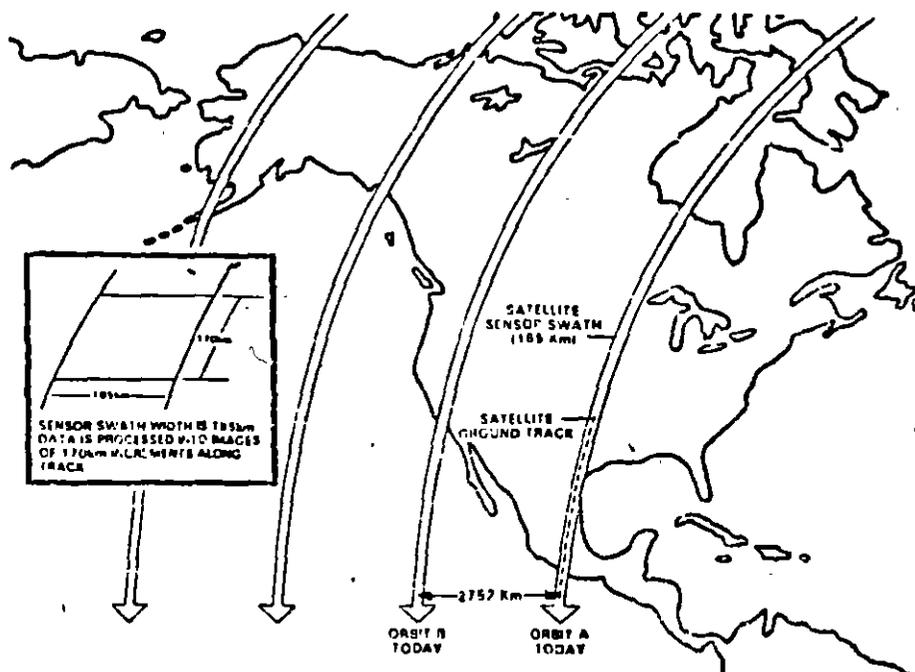


Figura 2.10 Orbitas subsecuentes del Landsat 4 y 5 (tomada de Sorrenti, 1989).

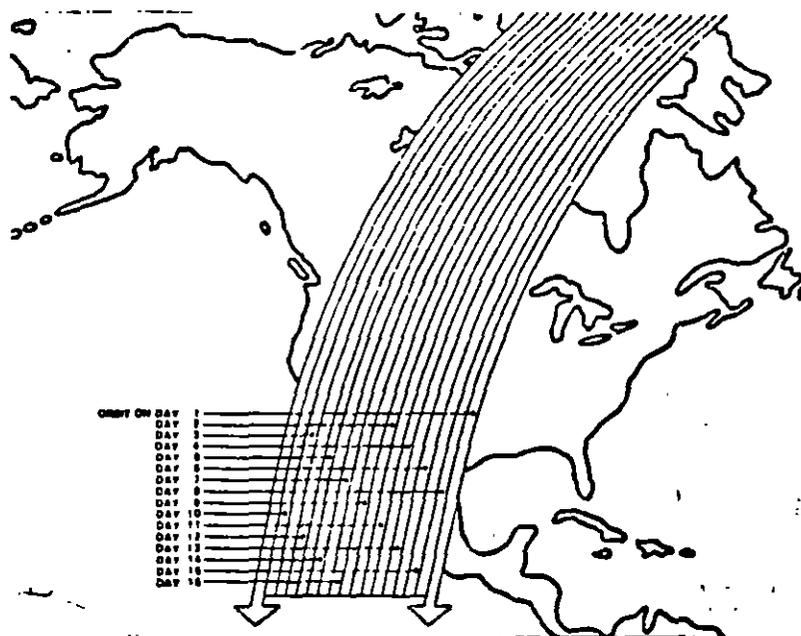


Figura 2.11 Orbitas adyacentes en 16 días consecutivos para el Landsat 4 y 5 (tomada de Sorrenti, 1989).

El sistema mundial de referencia (WRS) es una llave de localización global para las imágenes Landsat. Está basado en un sistema de

columnas y líneas (paths y rows) cuyos cruces determinan la localización nominal del centro de cada escena. Este sistema proporciona a los usuarios la correlación con las latitudes y longitudes y la facilidad de identificar cualquier posición sobre la superficie terrestre.

El esquema del WRS refleja la naturaleza repetitiva de las órbitas del Landsat y la manera como las imágenes son encuadradas después de la adquisición.

La cobertura global de la tierra es conseguida órbita por órbita a medida que el satélite va girando en torno de ésta (figuras 2.10 y 2.11). Dentro de cada órbita el satélite puede captar imágenes de 185 Km de ancho, centralizadas en el centro de la misma. En el sistema WRS los números de las órbitas (paths) están correlacionados con los centros nominales de cada órbita (figura 2.12).

Los números de línea (rows) identifican la posición de la escena en el sentido vertical y son numerados del 1 al 124 en el sentido descendente del satélite y de 125 a 248 en el sentido ascendente (figura 2.12).

La hora solar media de cada línea individual en una órbita se mantiene fija, por lo tanto todos los centros para una línea de una determinada latitud tienen una misma hora solar. La figura 2.13 muestra las variaciones de las horas locales de los cruzamiento de las órbitas con las latitudes.

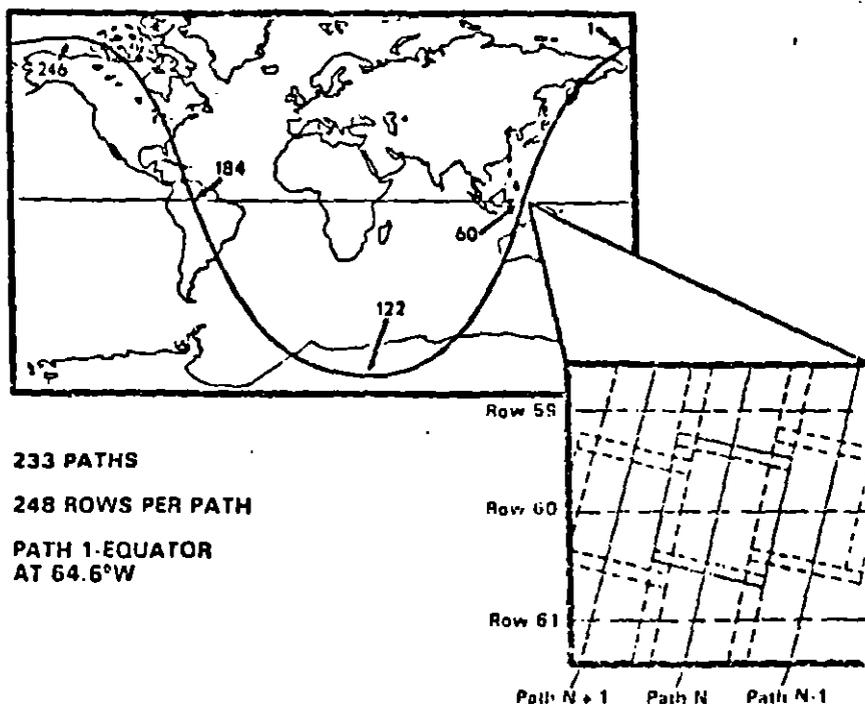


Figura 2.12 Sistema mundial de referencia (WRS) para el Landsat 4 y 5 (tomada de Sorrenti, 1989).

Cambios en el ángulo de elevación solar provocan variaciones en las condiciones de iluminación sobre las cuales una imagen es obtenida. La elevación solar fluctúa mucho a lo largo del año. Sus efectos dependen de la región a ser imageada, regiones de alta reflectancia son mas sensibles a la elevación del sol. La figura 2.14 muestra los cambios en el ángulo de elevación solar.

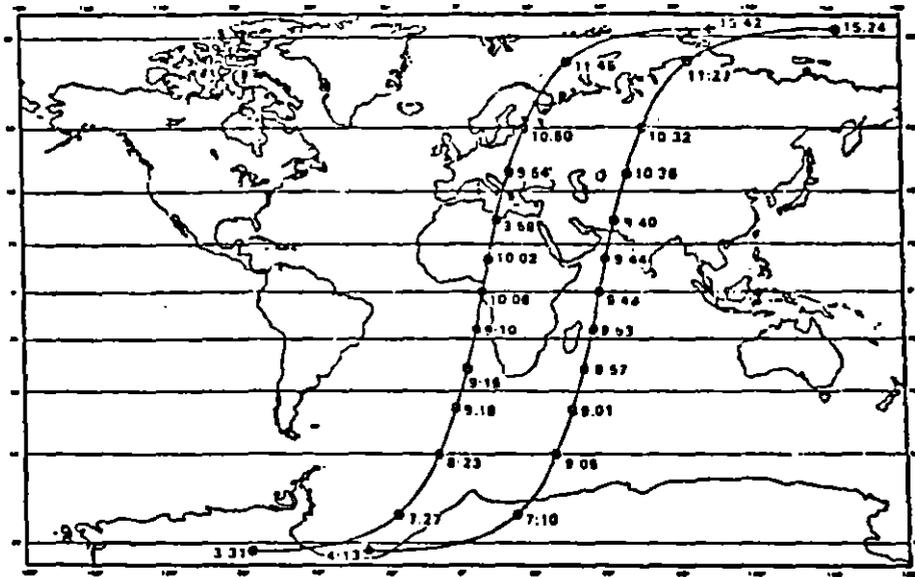


Figura 2.13 Variación de las horas locales con los cruzamientos de las órbitas con las latitudes (tomada de Sorrenti, 1989).

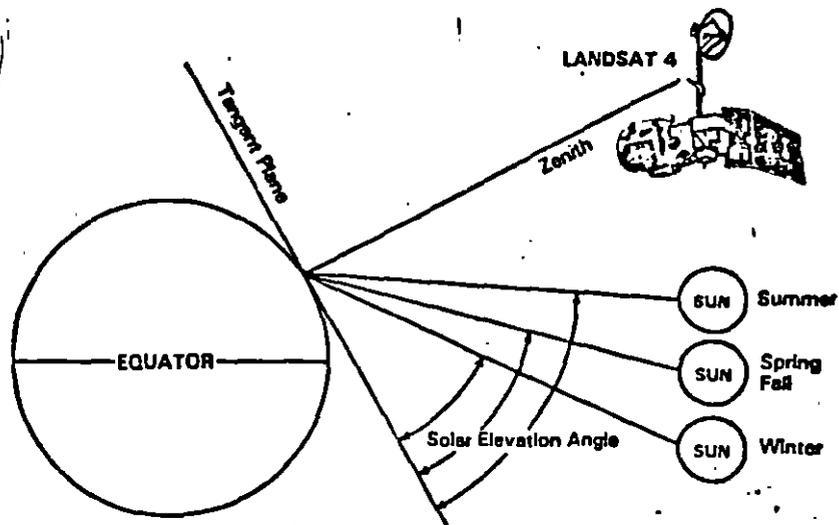


Figura 2.14 Cambios de los ángulos de elevación solar (tomada de Sorrenti, 1989).

## 2.5.2 Sistema Spot

El programa de satélites Spot (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre) es una co-participación de Francia, Suecia y Bélgica y consta de 3 satélites que poseen las mismas características. El primer satélite Spot fue puesto en órbita el 22 de febrero de 1986, el segundo en febrero de 1990 y el tercero está previsto a ser lanzado en 1995.

Los satélites Spot han sido colocados a una altitud media de 830 Km, en una órbita circular quasi polar inclinada de 8° con respecto al norte geográfico. Los satélites Spot dan la vuelta a la tierra en 101 minutos, lo cual combinado con el movimiento de rotación de la tierra hace que la traza en el suelo de 2 órbitas consecutivas aparezca desplazada, en el ecuador, 2823 Km (figura 2.15). Cada uno de los satélites Spot vuelve a pasar en la vertical de un mismo punto al cabo de 369 revoluciones, o sea cada 26 días.

Los satélites Spot están dotados de 2 instrumentos idénticos, el HRV1 y HRV2 (Haute Résolution Visible) capaces de funcionar de forma independiente. Cada instrumento barre una banda de dimensión, en sentido este-oeste, de 60 Km en mira vertical y puede alcanzar los 80 Km en visión oblicua.

A lo largo de la traza del satélite se dividen las escenas cada 60 Km. Así pues, la escena Spot cubre una superficie de 60 x 60 Km en mira vertical y hasta 60 x 80 km en visión oblicua (figura 2.16).

Ambos instrumentos cubren áreas distintas cuando realizan una mira vertical. Sin embargo, cuando los dos sensores funcionan al mismo tiempo en una toma de mira vertical, las escenas adquiridas por ambos instrumentos sufren un traslape de 3 Km. En mira vertical, la observación realizada de esta forma cubre un área de 117 Km (figura 2.17). La orientación de las escenas con respecto al norte varía en función de la latitud y del ángulo de toma de vista.

Los instrumentos poseen dos arreglos de detectores, el primero de ellos consta de 3000 sensores y se emplea para la captura de imágenes en el modo multiespectral, mientras el segundo tiene 6000 sensores y permite la adquisición de imágenes pancromáticas. Por tanto cada línea de barrido comprende 3000 puntos elementales o píxels para cada banda del modo multiespectral y 6000 en el modo pancromático.

Una escena Spot consta de 3000 líneas de 3000 puntos de 20 m en modo multibanda y de 6000 líneas de 6000 píxels de 10 m en modo pancromático. En mira oblicua, hasta 27 grados hacia el este o hacia el oeste, la dimensión en el suelo de una línea varía entre 60 Km (mira vertical) y 80 Km (mira oblicua extrema), siendo constante el número de detectores. El paso de muestreo varía en consecuencia entre 10 y 13.5 m o entre 20 y 27 m según el modo espectral. A continuación las líneas se someten a un remuestreo al paso fijo de 10 o 20 m, con lo cual aumenta el número de píxels en la línea. El descentrado observado entre cada línea se debe, entre

rentemente en uno u otro de los instrumentos y de manera simultánea o individual. Sin embargo, debido a que el transmisor del satélite posee únicamente dos canales para transmisión de datos no pueden funcionar las 4 posibilidades a un mismo tiempo. Las combinaciones posibles son mostradas en la tabla 2.2.

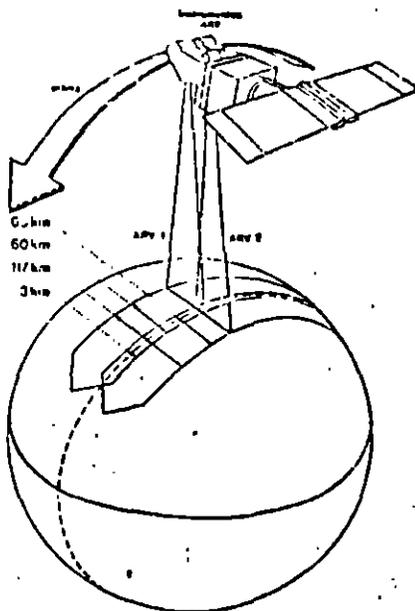


Figura 2.17 Visada vertical de los dos instrumentos HRV del Spot (tomada de CNES, 1988).

HRV1	XS	+		+		+	
	PAN		+		+	+	
HRV2	XS	+			+		+
	PAN		+	+			+

Tabla 2.2 Modos posibles de funcionamiento simultáneo de los instrumentos sensores HRV1 y HRV2.

Cuando un instrumento captura una escena, al mismo tiempo, tanto en modo pancromático como multiespectral, las dos imágenes generadas (XS y PAN) no casan perfectamente debido a la disposición de los sensores dentro del instrumento.

Las longitudes de onda para los diferentes modos son:

- banda pancromática de 0.51 a 0.73  $\mu\text{m}$ .
- banda XS1 de 0.50 a 0.59  $\mu\text{m}$ .

- banda XS2 de 0.61 a 0.68  $\mu\text{m}$ .
- banda XS3 de 0.79 a 0.89  $\mu\text{m}$ .

Como se nota, para el modo pancromático la observación se realiza en una banda espectral única, correspondiente a la parte visible del espectro sin el azul. Dicha toma de vista, efectuada en un solo canal, proporciona imágenes en blanco y negro. El tamaño del pixel es de 10 m.

En el modo multibanda se obtienen imágenes para las porciones verde, rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. La combinación de los 3 canales posibilita la consecución de composiciones a color. El tamaño del pixel es de 20 m.

Los dos instrumentos HRV del Spot están dotados de espejos orientables que permiten la visión oblicua, hacia el este o hacia el oeste de la traza, con un límite de más o menos  $27^\circ$  de la vertical. Para poder tener una mira oblicua, los espejos orientables se desplazan de  $0.6^\circ$  en  $0.6^\circ$ , lo que permite captar hasta 91 escenas o posiciones diferentes.

Tal inédita característica posibilita, por un lado, la visión estereoscópica, por otro, la observación repetida de una misma zona durante un ciclo de 26 días (figuras 2.18 y 2.19).

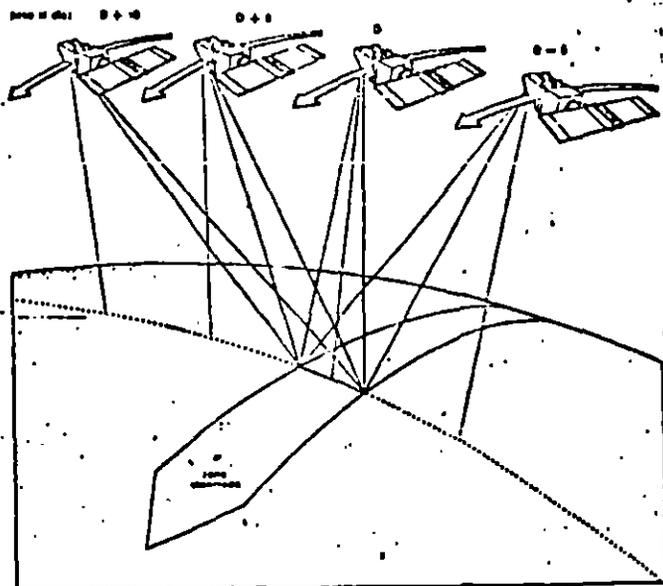


Figura 2.18 Repetitividad de las observaciones durante un ciclo de 26 días, para el satélite Spot (tomada de CNES, 1988).

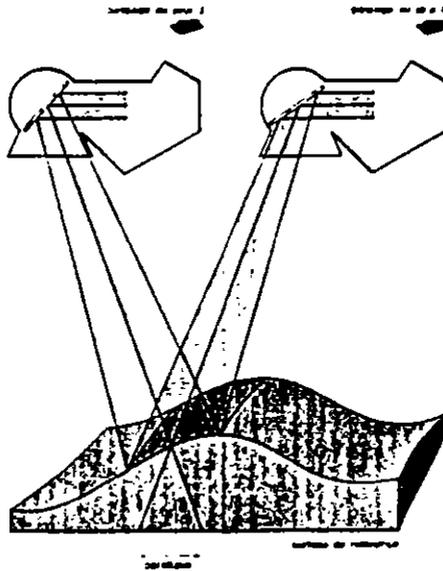


Figura 2.19 Observación estereoscópica debida a la paralaje creada por dos miras con diferente ángulo (tomada de CNES, 1988).

Un desplazamiento del ángulo de vista de  $24^\circ$  al oeste y de  $24^\circ$  al este permite obtener una relación base/altura ( $b/h$ ) de 1. Para un par estereoscópico, compuesto por una vista vertical y otra segunda realizada desde un ángulo de  $27^\circ$ , el valor de la relación  $b/h$  es de 0.5.

Gracias a la mira oblicua, resulta posible adquirir escenas dentro de una banda de 950 Km, paralela a la dirección de desplazamiento del satélite y centrada en su traza (figura 2.16). Dicha técnica permite aumentar la frecuencia de observación de un mismo punto durante un ciclo. Tal frecuencia varía en función de la latitud: en el ecuador se puede observar la misma región 7 veces durante los 26 días del ciclo orbital, lo que da una media de 3.7 días entre dos observaciones. Para una latitud de  $45^\circ$ , una misma región se puede observar 11 veces durante el ciclo orbital, dando una media de 2.4 días.

La serie Spot presenta también su propio sistema de referencia mundial para la ubicación geográfica de sus imágenes, denominado GRS (Grade de Referencia Spot) (figura 2.20). La GRS es un sistema mediante el cual se atribuye a cada escena dos marcas de referencia K y J, correspondientes a columnas y líneas. Las columnas quedan orientadas paralelamente a la dirección de desplazamiento del satélite y las líneas son paralelas a las latitudes. La intersección de una columna con una línea determina un nodo. El centro de cada escena Spot esta relacionada con un nodo GRS.

Una escena en la GRS cubre una área de 60 x 60 Km. Si una escena cubre un área mayor y su centro se encuentra desplazado con respecto a cualquier nodo de la GRS, debido a que fue tomada mediante una mira oblicua, se la incorpora al nodo mas cercano.

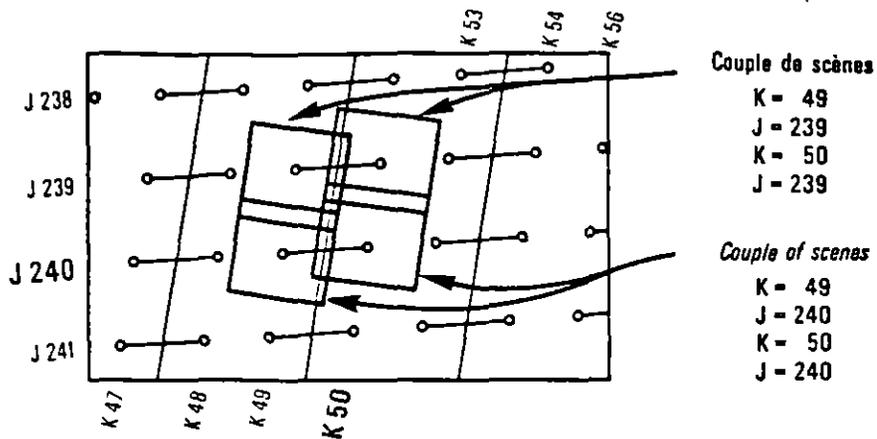


Figura 2.20 Sistema de referencia mundial (GRS) para el satélite Spot (tomada de Spot Image, 1986).

Una escena puede estar desplazada hasta 30 Km (para la derecha o la izquierda de la K nominal, pero no existirá desplazamiento en el sentido norte-sur, esto es, el centro de la imagen siempre caerá en una J del sistema GRS).

### 3 COMPORTAMIENTO ESPECTRAL DE LOS OBJETOS

#### 3.1 Firma espectral

En percepción remota el sistema sensor mide la radiación electromagnética proveniente de un objeto. La manera en que la radiación interactúa con el cuerpo y es alterada por él, dependerá de sus componentes y de su estructura interna, esto es, de las características propias del objeto.

La ecuación básica de la conservación de la energía, cuando esta incide sobre un cuerpo, es:

$$I_r = R_r + A_r + T_r$$

donde:

$I_r$  = Energía incidente.

$R_r$  = Energía reflejada.

$A_r$  = Energía absorbida.

$T_r$  = Energía transmitida.

De esta ecuación se establece que la energía proveniente de un cuerpo iluminado y captada por un sistema sensor, no es otra cosa que la energía reflejada por éste.

$$R_r = I_r - (A_r + T_r)$$

El subíndice  $r$  indica la longitud de onda de la energía y establece la dependencia de las interacciones (reflexión, absorción y transmisión) con ésta.

La cantidad de energía que es reflejada, absorbida y transmitida por un cuerpo depende de sus coeficientes de reflexión, absorción y transmisión. Cuando estos coeficientes, que también son función de la longitud de onda, se establecen a partir de la radiación o flujo de energía se conocen con el nombre de reflectancia ( $\sigma$ ), absorptancia ( $\alpha$ ) y transmitancia ( $\Gamma$ ).

$$\sigma_r = \frac{\phi_{r_r}}{\phi_{i_r}}$$

$$\alpha_r = \frac{\phi_{a_r}}{\phi_{i_r}}$$

$$\Gamma_r = \frac{\phi_{t_r}}{\phi_{i_r}}$$

$$1 = \sigma_r + \alpha_r + \Gamma_r$$

donde:

$\phi_{i_r}$  = Flujo de energía incidente.

$\phi_{r_r}$  = Flujo de energía reflejada.

$\phi_{a_r}$  = Flujo de energía absorbida.

$\phi_{t_r}$  = Flujo de energía transmitida.

$\sigma_r$  = Reflectancia espectral.

$\alpha_r$  = Absortancia espectral.

$\Gamma_r$  = Transmitancia espectral.

Debido a que los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión son una propiedad del cuerpo, una curva que muestre la variación de la reflectancia con respecto a la longitud de onda puede ser considerada como única y característica de ese cuerpo.

El valor de la reflectancia para una determinada longitud de onda se conoce como reflectancia espectral, y a su variación con respecto de ésta como función o curva de reflectancia espectral.

La función de reflectancia espectral establece la manera como la radiación electromagnética es reflejada por un objeto, y posee una forma característica para este cuerpo en determinadas condiciones. Por este motivo, a la curva de reflectancia espectral se le da el nombre de firma espectral del objeto.

La figura 3.1 muestra la firma espectral de los tres principales componentes de una escena de la superficie terrestre (vegetación, suelo, agua). El comportamiento de estos 3 elementos con respecto a la REM se estudia en los subcapítulos siguientes.

### 3.2 Comportamiento espectral de la vegetación

Según Dalton (1988) una cobertura vegetal puede ser entendida como un conjunto de elementos estructurales (tallos, raíces, hojas, etc.) con densidad y arreglo espacial característico para cada vegetación.

La radiación electromagnética reflejada, emitida o dispersada por la cobertura vegetal lleva integrada información al respecto de estas características estructurales, así como de cada uno de sus elementos.

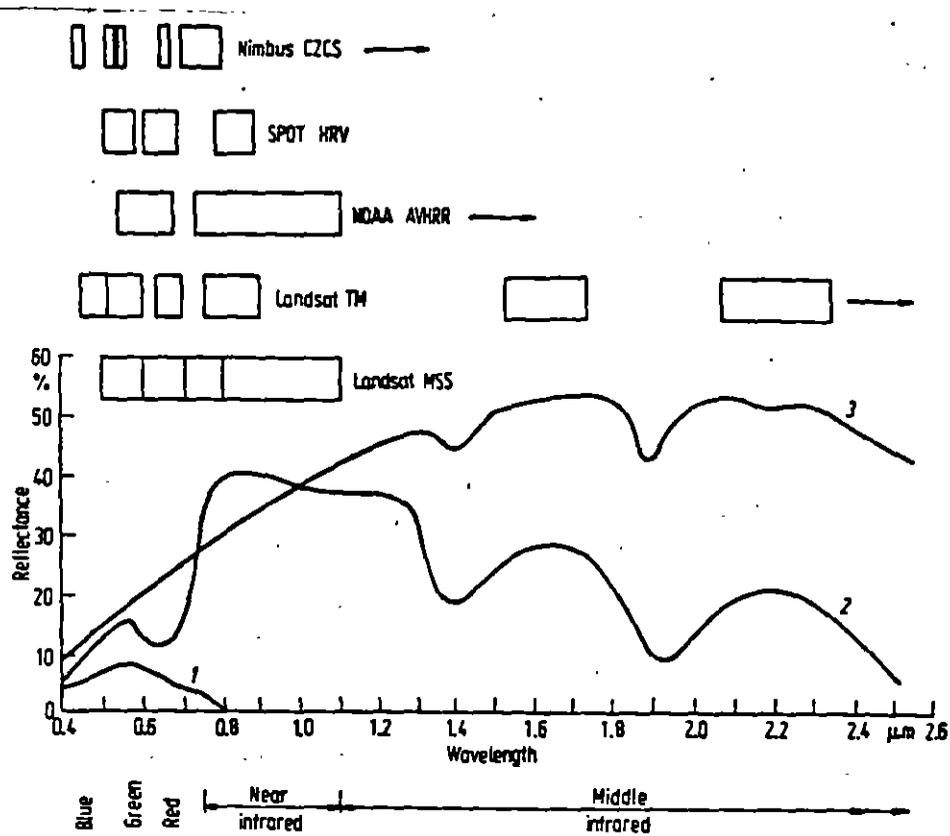


Figura 3.1 Firmas espectrales de tres materiales comunes de la superficie de la tierra. (1) Agua, (2) vegetación, (3) suelo. Posición de las bandas espectrales para los principales satélites de percepción remota (tomada de Richards, 1986).

En la mayoría de los tipos de vegetación, las hojas son los elementos estructurales mas importantes en su comportamiento espectral.

La radiación electromagnética puede sufrir uno de los siguientes procesos al incidir sobre una hoja (Dalton, 1988).

- Ser reflejada especularmente por la cutícula.
- Ser dispersada por los vellos de la hoja.
- Penetrar en la hoja de modo difuso y retornar por este mismo lado.
- Atravesar la hoja de un modo difuso.
- Ser absorbida por la hoja.

Los dos primeros mecanismos no involucran interacciones dependientes de la longitud de onda de la radiación. Esta retorna íntegramente llevando así poca información acerca de la hoja.

El tercer mecanismo es llamado reflexión difusa de la hoja y es el más importante en percepción remota, pues la radiación sufre múltiples dispersiones en el interior de la célula por lo que lleva consigo informaciones sobre la estructura y el estado de la hoja.

Los mecanismos cuarto y quinto no son otra cosa que la transmisión difusa y la absorción.

El comportamiento de la reflectancia a lo largo del espectro electromagnético genera una curva que, por integrar todas las interacciones que ocurren entre la radiación y la hoja, posee una forma propia y característica del estado en el que la hoja fue observada. A dicha curva, como se vio en el subcapítulo anterior se le da el nombre de firma espectral y para el caso de una hoja normal toma la forma mostrada en la figura 3.2.

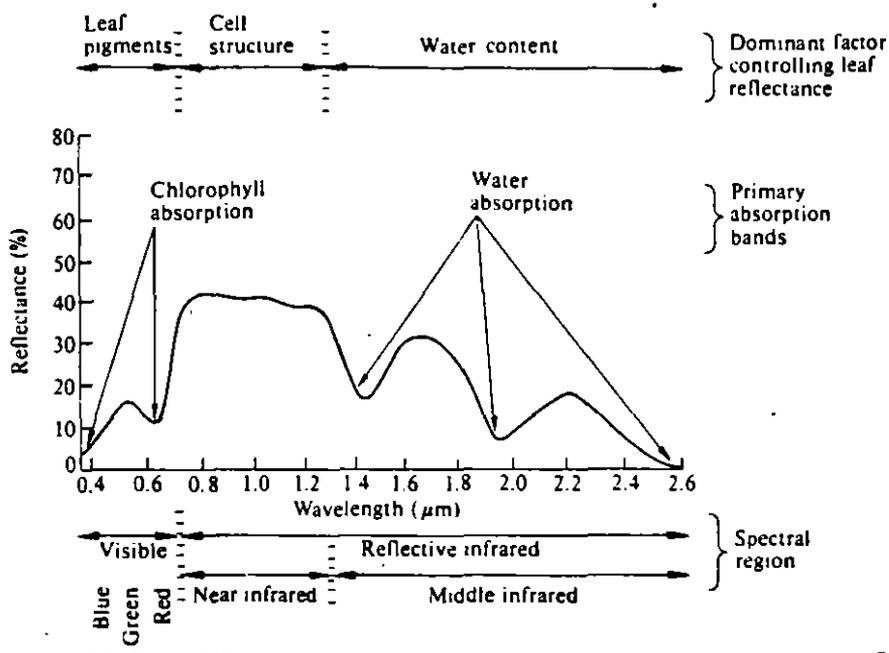


Figura 3.2 Comportamiento espectral de la vegetación verde (tomada de Hoffer, 1978).

Como se observa en la figura 3.2 el comportamiento de la reflectancia de la vegetación en cada una de las regiones del espectro electromagnético es diferente.

- Interacciones en el visible (400 a 700 nm).

En esta región la firma espectral de la hoja es caracterizada por una alta absorción que consume cerca del 60% de la irradiancia.

La reflectancia en esta porción varía desde valores casi nulos hasta un máximo cercano al 25%. Su comportamiento está bastante

ligado al espectro de absorción del conjunto de pigmentos presentes en las hojas, que en el caso de una hoja normal es dominado por la clorofila.

La figura 3.3 ilustra bien la influencia de la clorofila en las firmas espectrales de la hoja. La alta absorción que la clorofila presenta en las regiones del azul (400 a 480 nm) y el rojo (620 a 700 nm) resulta en una curva de reflectancia con un máximo en la porción verde del espectro (520 - 580 nm).

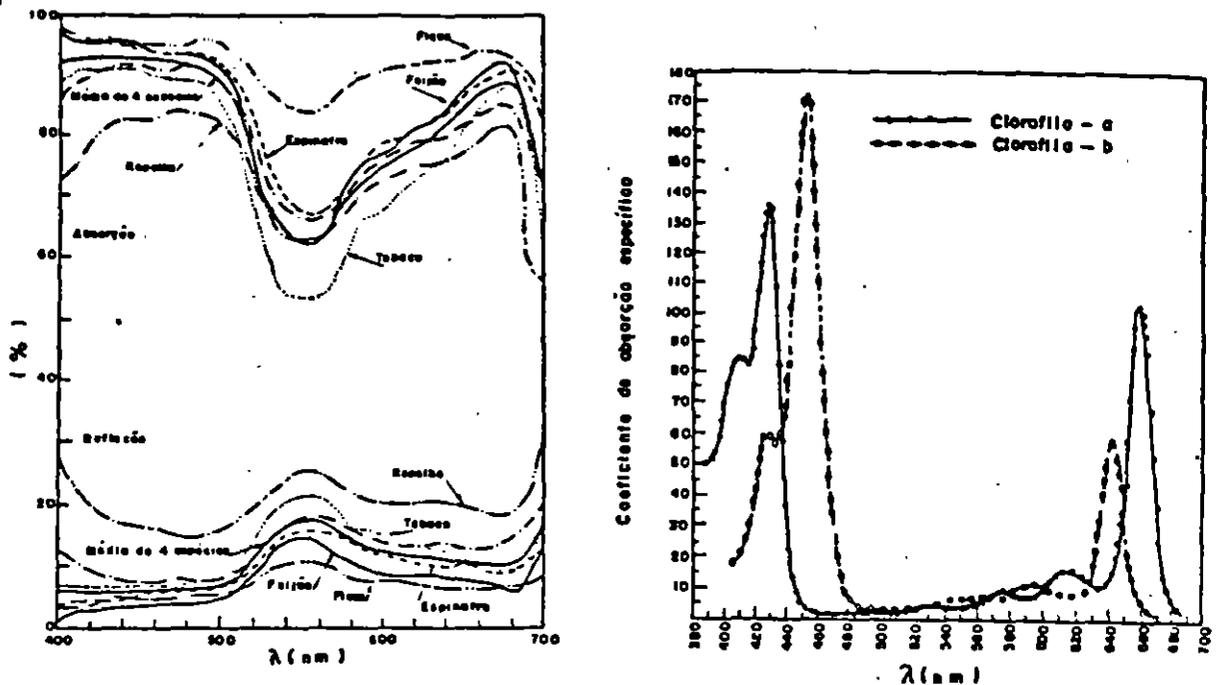


Figura 3.3 (a) Firma espectral de algunas plantas. (b) Espectro de absorción de las clorofilas a y b (tomada de Heath, 1969 en Dalton, 1988).

La reducción en el contenido de clorofila permite la manifestación de los pigmentos auxiliares de la hoja.

La figura 3.4b muestra la manifestación de los carotenoides en las hojas en proceso de envejecimiento. La figura 3.4a ilustra la alta absorción que los carotenoides presentan en la región azul y que es responsable de la baja reflectancia que la hoja presenta en esta porción durante su envejecimiento.

La degradación de la clorofila (clorose) que acompaña al envejecimiento resulta en un aumento de la reflectancia en las regiones del verde y del rojo (figura 3.4b curvas 2 y 3). La detección de la clorose se utiliza en estudios relacionados con condiciones de nutrición mineral, escasez de agua y efectos de enfermedades y plagas en la vegetación.

La curva 4 de la figura 3.4b muestra el efecto de la esclerificación de la hoja en sus estados finales, lo que resulta en una alta opacidad que reduce mucho la reflectancia de la hoja.

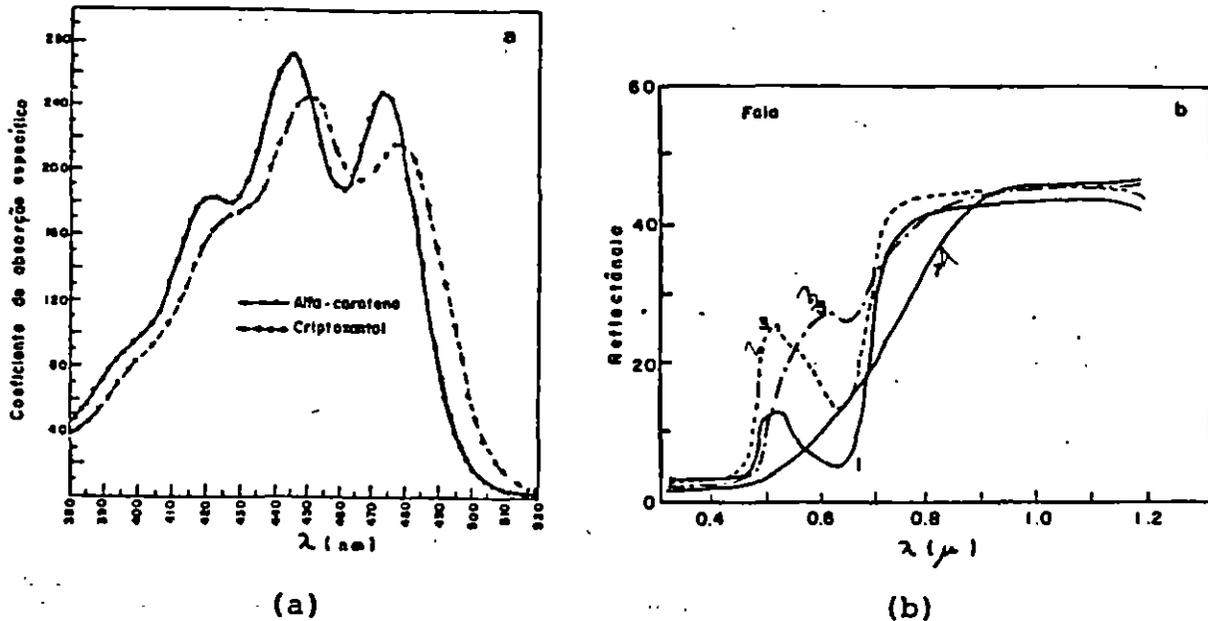


Figura 3.4 (a) Espectro de absorción de dos carotenoides. (b) Firma espectral de una hoja en envejecimiento: (1) hoja verde, (2) amarilla, (3) roja y (4) marrón (tomada de (a) Heath, 1969 y (b) Knipling, 1969 en Dalton, 1988).

- Interacciones en el infrarrojo próximo (700 a 1300 nm).

La absorción de una hoja en esta región es bajísima y debida, principalmente, a algunas bandas de absorción débil de la molécula del agua (figura 3.5). La fracción de la energía incidente retenida oscila entre un 5 y un 10%.

La reflectancia y la transmitancia varían en función del tipo de estructura del mesófilo (tejidos internos de la hoja) (figura 3.6), de su espesura y de su contenido de agua.

Mesófilos compactos favorecen la transmitancia, ya que presentan poca superficie de contacto entre el aire de los espacios intercelulares y las paredes celulares, lo que resulta en una menor frecuencia de cambios en la trayectoria de la luz.

Los mesófilos dorsiventrales o aquellos con predominancia del parénquima lagunoso tienden a reflejar más, debido al gran número de superficies de contacto entre las células y el aire (figura 3.6). Esto resulta en una mayor tasa de cambios de la trayectoria y, consecuentemente, de la energía retornando.

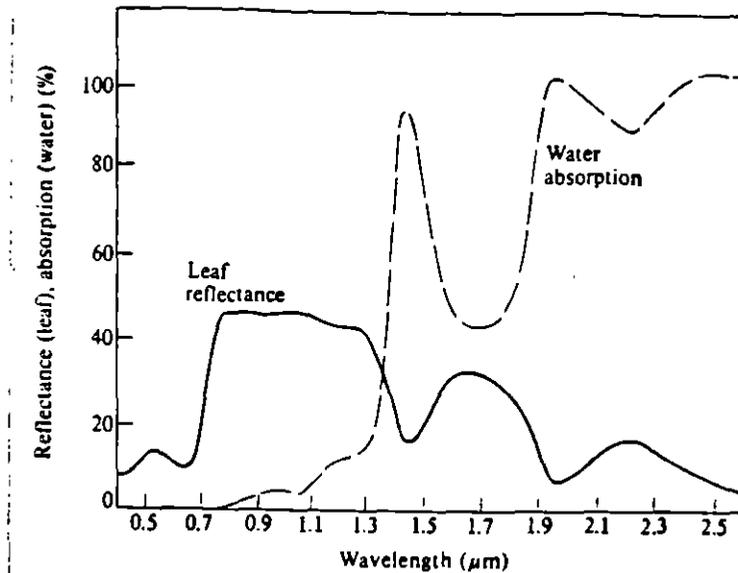


Figura 3.5 Relación inversa entre la reflectancia de una hoja y la absorción del agua. La curva de absorción del agua es medida para una capa de 1 mm de profundidad (tomada de Hoffer and Johannsen, 1969 en Hoffer, 1978).

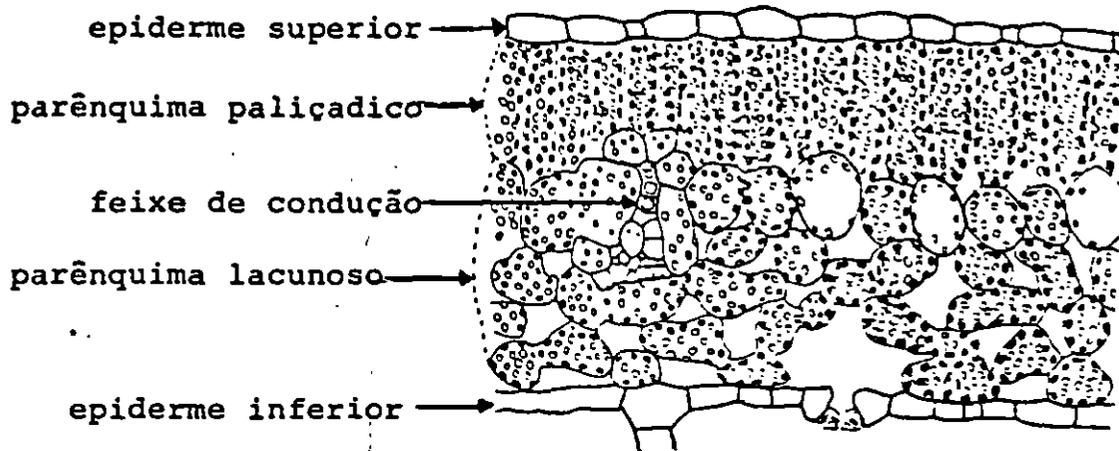


Figura 3.6 Sección de una hoja típica con parênquima diferenciado (tomada de Dalton, 1988).

El contenido de agua de la hoja favorece la absorción de la radiación, dado que ella es el material capaz de absorber en esta región del espectro (figura 3.5). Sin embargo, su manifestación directa puede ser enmascarada por el papel que el contenido de agua ejerce en la presión de turgencia, que altera la forma de la célula vegetal y es capaz de modificar el área de las interfases células-aire.

El efecto de estos mecanismos antagónicos en plantas con déficit hídrico es una tendencia de reducción de la reflectancia para aquellas con mesófilo dorsiventral y un incremento en las de mesófilo compacto.

El espesor de la hoja provoca una reducción de la transmitancia sin necesariamente afectar la reflectancia.

El análisis del comportamiento de la reflectancia de la vegetación en esta región del espectro es útil para estudios relacionados con la disponibilidad de agua y factores que interfieren en la absorción y transporte de ésta dentro de la planta (bacterias, hongos, etc.).

- Interacciones en el infrarrojo medio (1300 a 3000 nm).

En esta región el contenido de agua en la hoja presenta una alta absorción, con picos en los 1400 nm, 2000 nm y 2600 nm, lo que provoca una reducción en la reflectancia (figura 3.5).

En la figura 3.7 se observa como se incrementa la reflectancia de una hoja de maíz conforme decrece el contenido de agua.

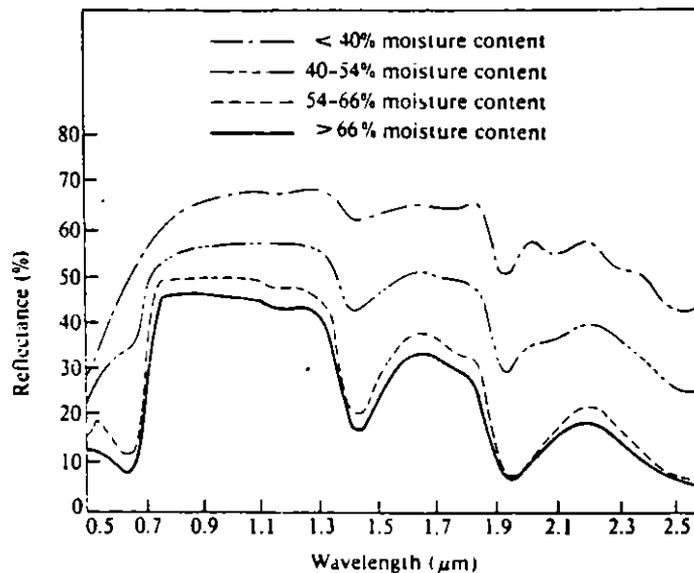


Figura 3.7 Efecto del contenido de agua en la reflectancia de hojas de maíz (tomada de Hoffer and Johannsen, 1969 en Hoffer, 1978)

Según Dalton (1988), esta región por integrar la información de las interacciones de la REM con la estructura interna de la hoja, y aquellas que ocurren por el contenido de agua, tiene un mayor potencial, que debe ser explorado, para la detección de tipos de vegetación, permitiendo un mayor detalle que el alcanzado con las porciones visible e infrarrojo próximo.

Hasta el momento se ha mencionado el comportamiento espectral de las hojas, principales contribuyentes en la radiación proveniente de una planta. Sin embargo, en el análisis de una zona con cobertura vegetal debe considerarse que la REM medida por un sensor para un CIV es la sumatoria de todas las contribuciones de los objetos integrantes del campo.

Dos conceptos que cuantifican la influencia de la vegetación en una escena son: el índice de cobertura (IC) y el índice de área foliar (IAF). El IC es el porcentaje de área efectivamente cubierta por la vegetación, y el IAF, es el área total de las hojas que hay en una región dividida por el área de ésta.

Entre los principales factores que afectan la reflectancia de una escena con cobertura vegetal están el índice de cobertura, el índice de área foliar, la presencia de sombras, la reflectancia del suelo, la reflectancia del horizonte y los ángulos de iluminación y observación. Además, de las características de reflectancia y transmitancia de sus hojas y, con menor importancia, de sus tallos, flores y otros constituyentes.

Cuando una escena posee valores de IC mayores del 30% se tiene un dominio de la vegetación en la reflectancia de la escena; para valores menores la contribución del suelo es dominante (Dalton, 1988).

Escenas de vegetación dominante y suelos claros presentan correlaciones negativas con la reflectancia en la región visible del espectro debido a la absorción de los pigmentos fotosintéticos.

Una relación semejante ocurre para el infrarrojo medio, donde el agua sustituye a los pigmentos en el papel de absorber la radiación electromagnética. Por otro lado en el infrarrojo próximo IC mayores al 30% se correlacionan positivamente (Dalton, 1988).

La superposición de hojas o capas de hojas incrementa la reflectancia de la escena en una forma asintótica (figura 3.8), o sea, es regulada por un límite, arriba del cual no hay alteraciones de la respuesta.

Esta naturaleza asintótica de la superposición de capas de hojas se correlaciona directamente con el IAF. En la figura 3.9 se observa un límite próximo a  $IAF=4$  para variaciones de la reflectancia en la región visible, y un límite tendiendo a  $IAF=10$  para la reflectancia en el infrarrojo próximo. Por debajo de estos límites la reflectancia varía inversamente al incremento de IAF en la porción del rojo y directamente en el infrarrojo próximo. En el infrarrojo medio el comportamiento de la reflectancia en relación al IAF es comparable al observado en la porción del rojo.

### 3.3 Comportamiento espectral del suelo

Las interacciones materia-energía en suelos se reducen exclusivamente a absorción y reflexión. Sin embargo, el suelo mismo es una mezcla compleja de materiales con propiedades físicas y químicas que afectan su absorción y reflectancia.

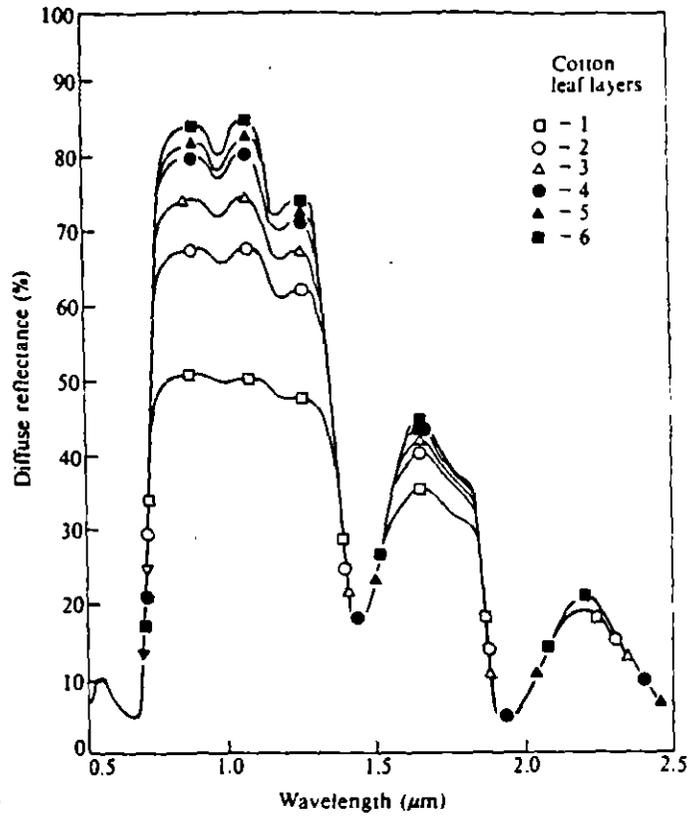


Figura 3.8 Firma espectral de diferente número de hojas de algodón superpuestas (tomada de Myers, 1970 en Hoffer, 1978).

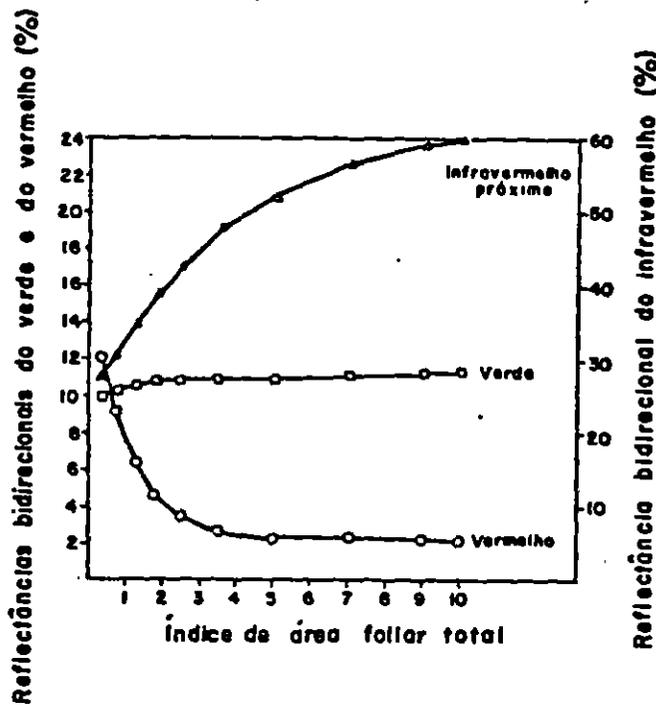


Figura 3.9 Variação de la reflectancia espectral de coberturas gramíneas en función del Índice de Area Foliar (tomada de Dalton, 1988).

Las curvas de reflectancia para la mayoría de los tipos de suelo son generalmente menos complejas en apariencia que las curvas de vegetación.

Una de las mas importantes y significativas características en las curvas de reflectancia de los suelos, es que mientras existe una gran desigualdad en su amplitud, para varios tipos y condiciones de suelos, estas diferencias son relativamente consistentes a lo largo de las múltiples regiones del espectro (figura 3.10).

Aunque las curvas de reflectancia son similares en su forma general (figura 3.10), hay un número de propiedades de los suelos interrelacionadas que alteran su amplitud, siendo las principales: El porcentaje relativo de arcilla, limo y arena, el contenido de humedad, la rugosidad de la superficie del suelo, la cantidad de materia orgánica y la cantidad de óxido de hierro (Hoffer, 1978).

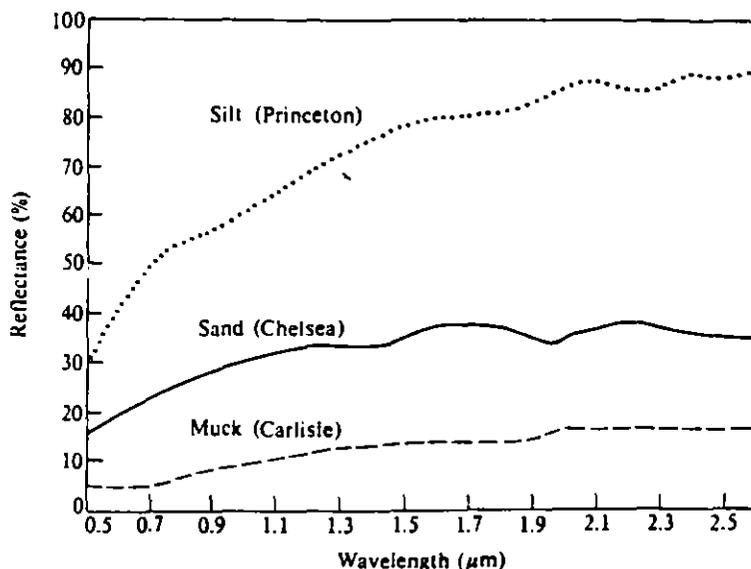


Figura 3.10 Reflectancia espectral de tres tipos de suelo con bajo contenido de agua (tomada de Hoffer, 1976).

Un suelo puede ser clasificado con base en su textura, esto es, a las proporciones relativas de partículas de arcilla, limo y arena que se encuentran presentes en su volumen (figura 3.11). Partículas de suelo menores de 0.002 mm de diámetro son definidas como arcilla, de 0.002 a 0.05 mm como limo, y de 0.05 a 2.00 mm como arena (Hoffer, 1978).

Los suelos compuestos por partículas muy pequeñas se encuentran más compactados que aquellos integrados por partículas grandes. Los espacios interpartículas son mas finos en partículas pequeñas que en grandes, esto permite que haya un mayor movimiento de aire o agua en los suelos arenosos que en los arcillosos.

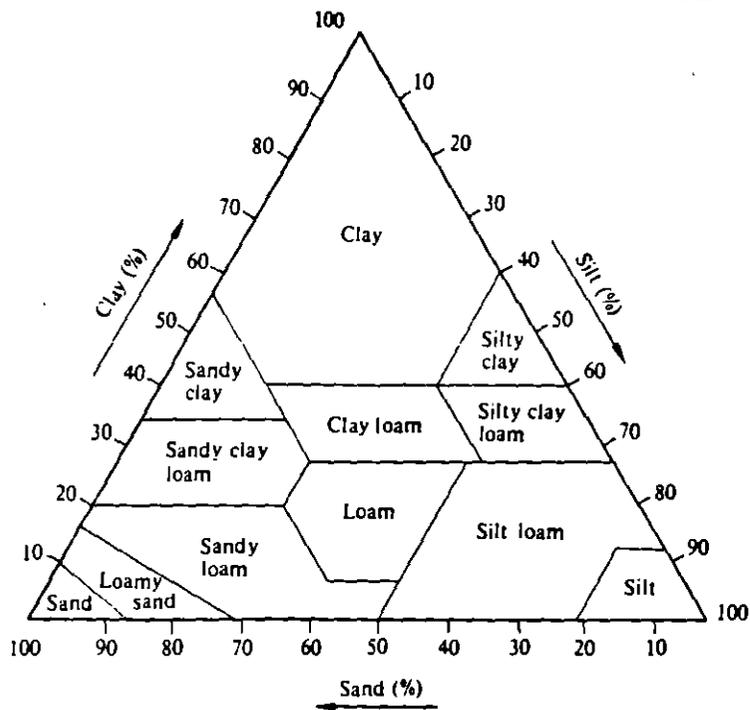


Figura 3.11 Triángulo de textura de suelos, mostrando los porcentajes relativos de partículas de arcilla, limo y arena (tomada de USDA Soil Survey Staff, 1951 en Hoffer, 1978).

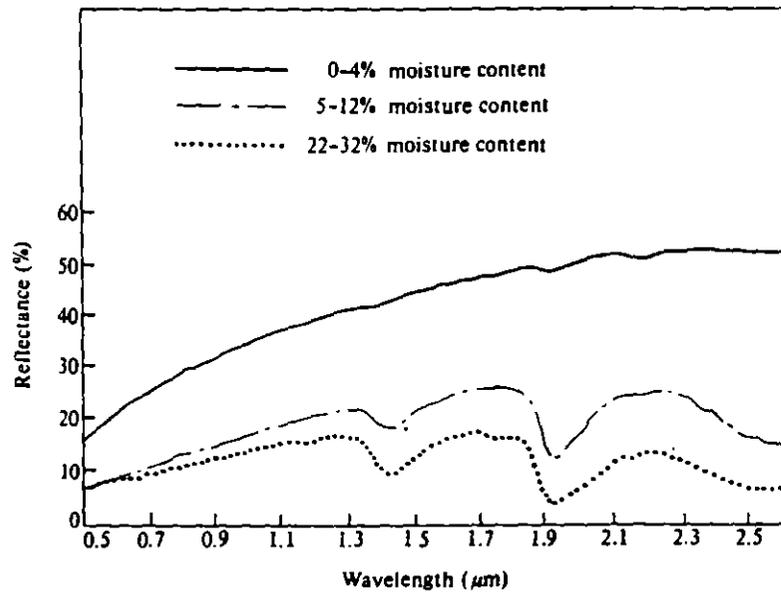


Figura 3.12 Reflectancia espectral de la arena Chelsea para diferentes contenidos de agua (tomada de Hoffer and Johannsen, 1969 en Hoffer, 1978).

Por otro lado, toda partícula posee una fina capa de agua que recubre su superficie y se mantiene unida a ella por fuerzas moleculares y atómicas. Esto hace que dicha agua no fluya o drene

por los espacios inter-partículas, ni sea evaporada al secarse el suelo. Los suelos arcillosos y limosos permiten un mayor contenido de agua de este tipo, debido a que la superficie total de las partículas es mayor que en los suelos arenosos.

Esta relación entre el tamaño de las partículas y el contenido de humedad de los suelos tiene un impacto significativo en la respuesta espectral del suelo como puede verse en las figuras 3.12, 3.13 y 3.14.

La figura 3.12 muestra la reflectancia para un suelo arenoso con tres diferentes niveles de agua. En ella se aprecia que los suelos arenosos secos no muestran un decremento significativo en la región de las bandas de absorción de agua del espectro electromagnético (1.4, 1.9 y 2.7  $\mu\text{m}$ ). Mientras que cuando contienen cantidades significativas de agua, la reflectancia de dichos suelos presenta un decremento en las bandas de absorción del agua. La razón es que la radiación que llega es fuertemente absorbida por el agua en estas longitudes de onda particulares.

Las bandas de absorción por agua para 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$  representan armónicos de las frecuencias fundamentales (2.66, 2.73 y 6.27  $\mu\text{m}$ ) a las que vibran las moléculas de agua. El decremento en la reflectancia en las bandas de absorción del agua provoca un decremento en la reflectancia en las longitudes de onda que se encuentran en medio de estas bandas.

En la porción visible del espectro hay también un decremento en la reflectancia de los suelos húmedos comparada contra la de los suelos secos. Esto provoca que los suelos se oscurezcan cuando son mojados. Si un suelo ya se encuentra húmedo, un fuerte incremento en su contenido de agua no siempre provoca un decremento proporcional en la reflectancia, es decir, oscurecimiento del color (figura 3.13).

Las partículas de limo, comparadas contra las de arena, permiten que una mayor cantidad de agua se adhiera a las partículas de suelo aun estando estos en condiciones de aireación y bien drenados.

Los suelos arcillosos presentan un decremento en la amplitud de su reflectancia con respecto a los arenosos y limosos debido a que sus partículas, extremadamente finas, retienen una mayor cantidad de agua, lo que se evidencia en la presencia de las bandas de absorción del agua en la curva de reflectancia (figura 3.14). Por otro lado el tipo de arcilla presente en un suelo (caolinita, montmorillonita, etc.) influencia la intensidad de la absorción y afecta las características de la curva espectral.

La textura, además de determinar su capacidad de almacenamiento de agua, establece la rugosidad de la superficie del suelo. Cuando el tamaño de las partículas decrece, la superficie del suelo se hace mas lisa y en consecuencia mas energía puede ser reflejada. Si el tamaño de las partículas aumenta la rugosidad de la superficie se

incrementa y la radiación incidente sufrirá pérdidas por dispersión.

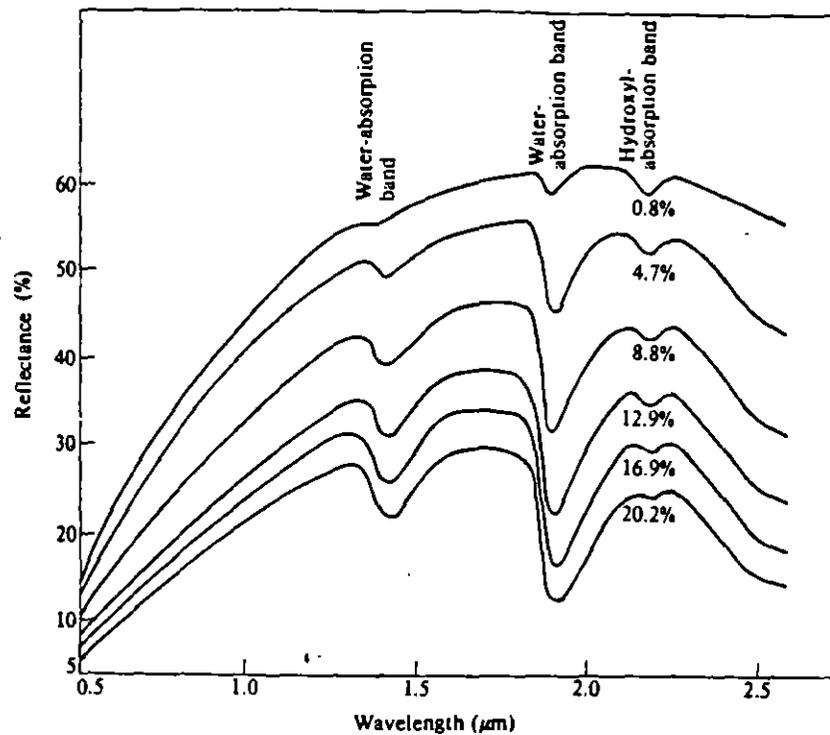


Figura 3.13 Reflectancia espectral del lodo limoso Newtonia para varios contenidos de agua (tomada de Hoffer, 1978).

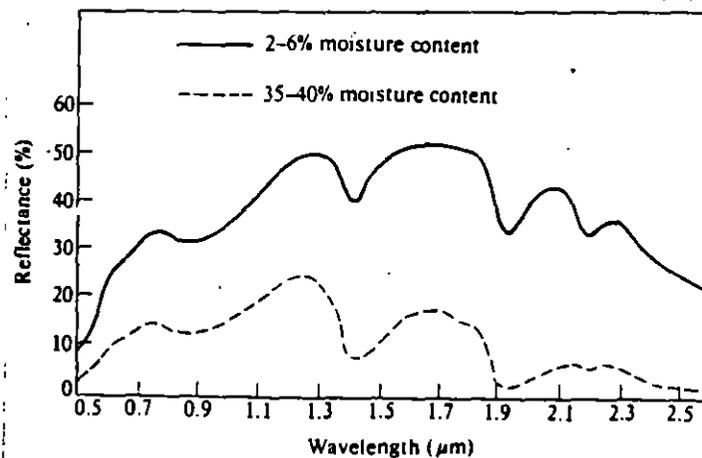


Figura 3.14 Reflectancia espectral para un suelo arcilloso típico (Pembroke) con dos contenidos de agua (tomada de Hoffer and Johannsen, 1969 en Hoffer, 1978).

Bowers and Hanks (1965, en Hoffer, 1978) calculan que un incremento en el tamaño de las partículas de 0.022 a 2.65 mm causaría un

incremento en la absorción de la radiación solar incidente de por lo menos 14%. Montgomery (1976, en Hoffer, 1978) encontró que un incremento en la cantidad de limo presente provocó un incremento en el nivel de la reflectancia de los suelos con los que el trabajaba.

El contenido de materia orgánica es otra propiedad de los suelos que influencia significativamente la curva de reflectancia de estos. Aunque el nivel de materia orgánica encontrado en la mayoría de los suelos de clima templado varía únicamente de 0.5 a 5%, un suelo con 5% de materia orgánica tendrá una tonalidad café oscura o negra. Mientras que contenidos menores resultan en colores café claro o tonos de gris. El grado de descomposición también influye en el color.

La relación entre el contenido de materia orgánica y la reflectancia a través de las longitudes de onda visibles ha mostrado tener un comportamiento curvilíneo (figura 3.15).

Por otro lado, el desarrollo de suelos bajo diferentes condiciones climáticas pero con el mismo contenido de materia orgánica puede no mostrar las mismas relaciones entre el color y la materia orgánica.

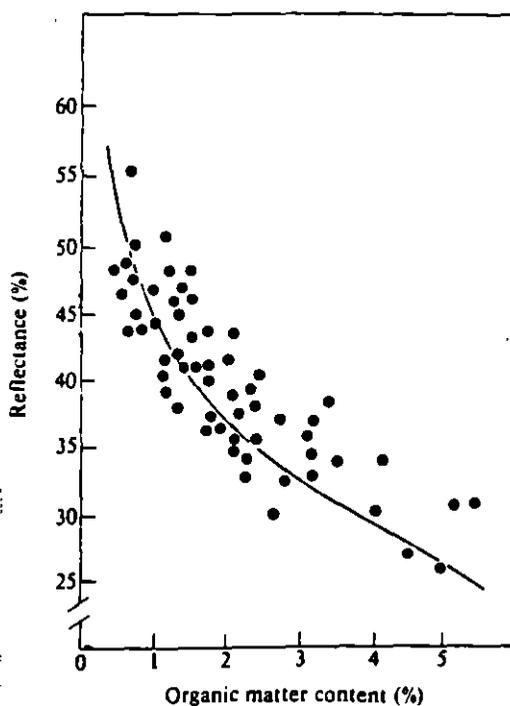


Figura 3.15 Relación entre el contenido de materia orgánica y la reflectancia de un suelo (tomada de Hoffer, 1978).

Los óxidos de hierro influyen también la respuesta espectral de los suelos. Los colores rojos de muchos suelos están generalmente relacionados a óxidos de hierro no hidratados, aunque óxidos de hierro parcialmente hidratados y dióxidos de manganeso pueden también provocar esta coloración rojiza. Un incremento en los

óxidos de hierro puede provocar un gran decremento en la reflectancia, por lo menos en la región del visible.

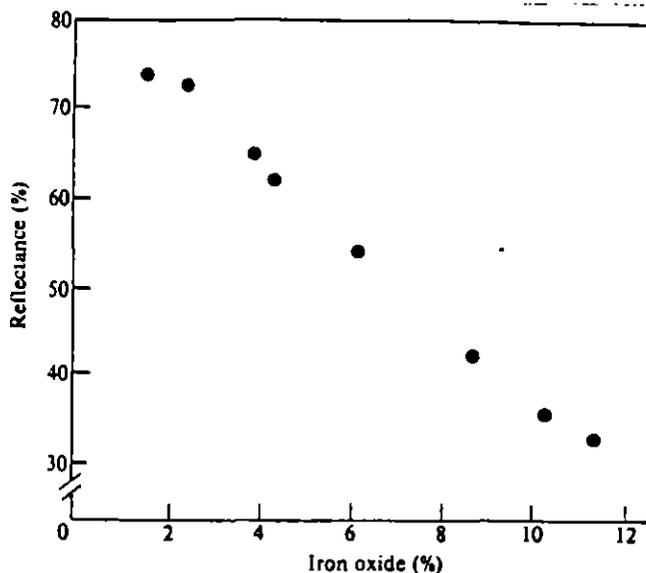


Figura 3.16 Relación entre el contenido de óxidos de hierro y la reflectancia de un suelo dentro de la banda 500 a 640 nm (tomada de Obukhov and Orlov, 1964 en Hoffer, 1978).

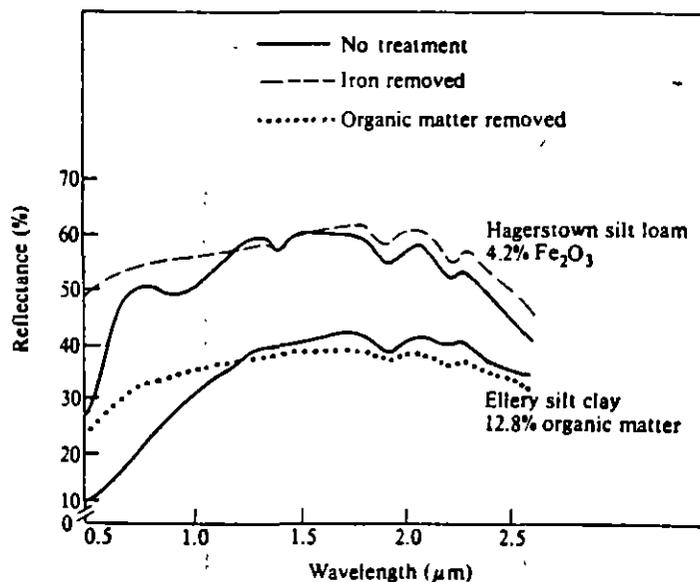


Figura 3.17 Curvas de reflectancia espectral que ilustran el efecto de remoción del contenido de óxidos de hierro y materia orgánica de un suelo (tomada de 1972 en Hoffer, 1978).

La figura 3.16 muestra como el contenido de óxidos de hierro en los suelos puede provocar una diferencia en la reflectancia de hasta un 40 %. La figura 3.17 ilustra que la remoción del óxido de hierro de un suelo provocará un marcado incremento en la reflectancia de este, dentro de la región de 0.5 a 1.1  $\mu\text{m}$ . Después de 1.1  $\mu\text{m}$  la

reflectancia no es sensiblemente afectada. En esta figura 3.17 también se observa que la remoción de la materia orgánica tiene un efecto similar.

Todos estos factores están fuertemente interrelacionados, por lo que su comportamiento espectral en forma individual, mencionado hasta el momento, podrá ser verdadero únicamente en ciertos intervalos de condiciones en que su efecto sea dominante.

### 3.4 Comportamiento espectral del agua

La luz del sol al incidir sobre una superficie de agua sufre principalmente los siguientes procesos (Tanaka, et al, 1982 en Sausen, et al 1989) (figura 3.18):

- Reflexión y/o dispersión en la superficie del agua.
- Refracción en la interfase aire-agua al momento de penetrar.
- Absorción del rayo solar por el agua misma.
- Dispersión y cambio en la dirección de propagación por partículas en suspensión.

El efecto combinado de la acción de absorción y dispersión disminuyen el total de energía que pasa a través de un cuerpo de agua, provocando su atenuación. Varios componentes provocan la atenuación de la luz en el agua, a saber (Sausen, 1989):

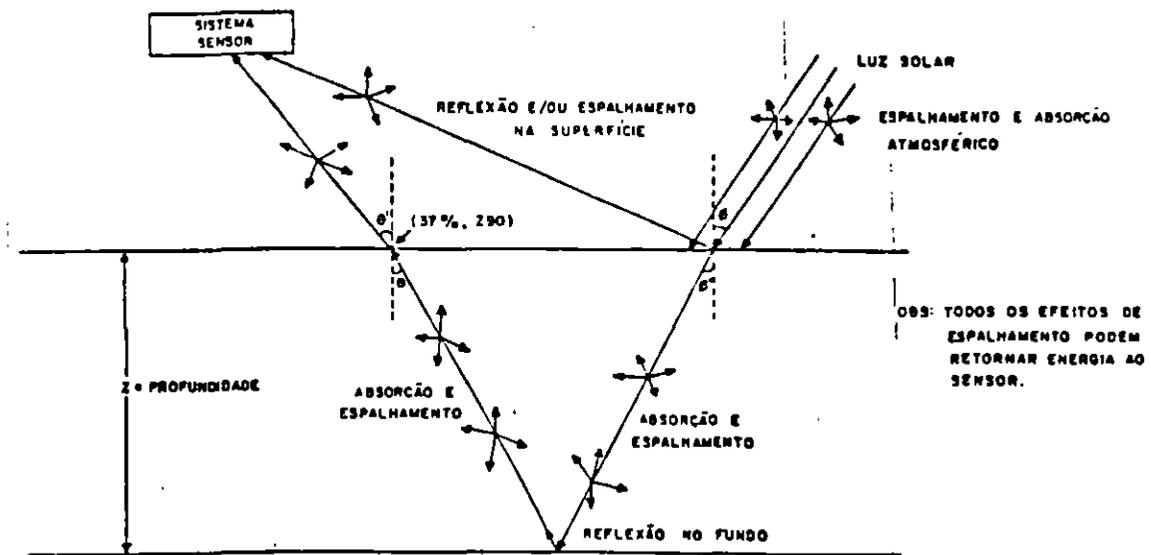


Figura 3.18 Interacciones de la luz solar con el agua (tomada de Sausen, et al 1989).

- La propia agua.
- Las sustancias amarillas u orgánicas disueltas (gelfstoff).
- fitoplancton.
- partículas inorgánicas.

El agua y el gelfstoff absorben la luz, el fitoplancton la absorbe y la dispersa y las partículas inorgánicas la dispersan (Effer e Trama, 1986 en Sausen, 1989).

La intensidad de la luz en el agua decrece exponencialmente con la distancia recorrida, esto es expresado por la ecuación:

$$I_z = I_0 e^{-dz}$$

donde:

$I_z$  = Intensidad del haz de luz a una distancia  $z$ .

$I_0$  = Irradiación en la superficie.

$z$  = Distancia recorrida por la luz.

$d$  = Coeficiente de atenuación volumétrica.

La figura 3.19 presenta la curva de atenuación del agua en el intervalo de 200 a 2000 nm del espectro electromagnético. En ella se definen 3 regiones: una en el ultravioleta, otra en la parte visible del espectro y la última en el infrarrojo.

En el visible, principalmente en la porción del azul-verde (450 a 550 nm), el coeficiente de atenuación es menor y forma una ventana de transmisión. Mientras que en las regiones del ultravioleta (abajo de 200 nm) y del infrarrojo (arriba de 700 nm), la absorción aumenta considerablemente (Jerlov y Nielsen, 1974 en Sausen, 1989).

El comportamiento espectral del agua en la región del infrarrojo reflectivo es explicado por la existencia de bandas de absorción (figura 3.5) ubicadas en los armónicos y frecuencias fundamentales (1.4, 1.9, 2.66, 2.73 y 6.27  $\mu\text{m}$ ) a las que vibran sus moléculas.

Debido a la fuerte atenuación que sufre la energía en la porción del infrarrojo reflectivo, esta región del espectro es empleada para localizar y delinear cuerpos de agua.

En la región visible del espectro, las interacciones de la materia y la energía con los cuerpos de agua son mas complejas. La reflectancia proveniente de un cuerpo involucra reflexión de la superficie del agua, de los materiales del fondo o de los materiales en suspensión dentro del cuerpo. La absorción y la transmisión no son únicamente función del agua en si, sino están también

significativamente influenciadas por los diferentes tipos y tamaños de materiales orgánicos e inorgánicos presentes en el agua.

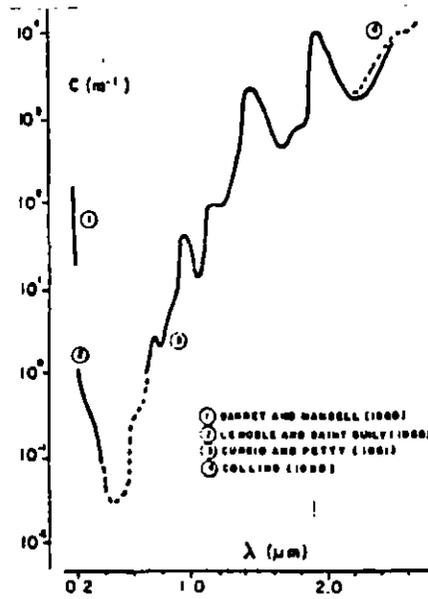


Figura 3.19 Curva de atenuación del agua. Intervalo de 200 a 2000 nm (tomada de Jerlov and Nielsen, 1974 en Sausen, et al 1989).

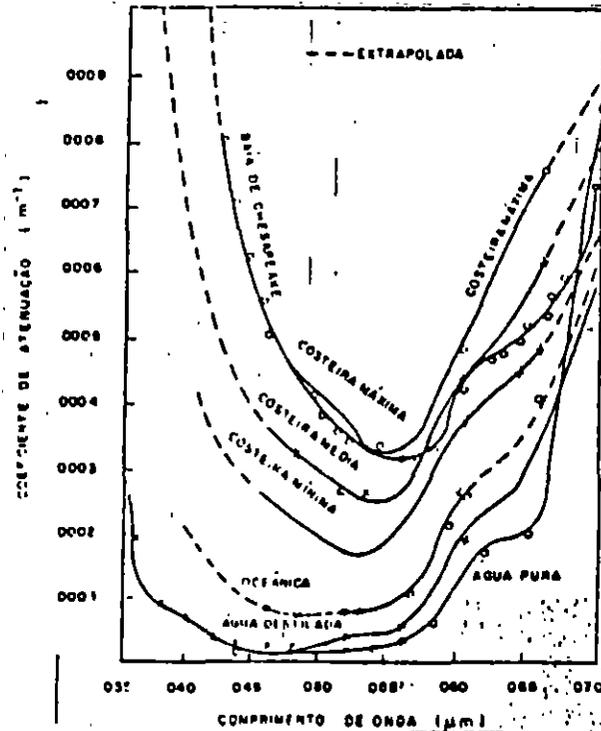


Figura 3.20 Curvas de atenuación para varios tipos de agua (tomada de Polcym and Rollin, 1969 en Sausen, et al 1989).

La figura 3.20 muestra las curvas de atenuación para aguas costeras, oceánicas y destiladas, en las longitudes de onda visibles.

En esa figura 3.20 se puede observar que los menores coeficientes de atenuación corresponden a agua destilada y a agua oceánica. Los coeficientes crecen a medida que las aguas se aproximan a las regiones, donde la concentración de sedimentos aumenta en volumen. En el intervalo de 460 a 600 nm los coeficientes de atenuación de las aguas costeras mínimas, media y máxima son respectivamente 16, 24 y 30 veces mayores que los de las aguas puras (Tanaka, 1982).

Contrariamente la transmisión de la radiación incidente para las longitudes de onda visibles es muy alta. La figura 3.21 muestra la transmitancia espectral en una capa de 10 metros de profundidad, para diversos tipos de agua. En ella se observa que la transmitancia en el agua natural decrece significativamente a medida que los niveles de turbidez aumentan.

En esta misma figura 3.21 se muestra que el máximo de la luz en el agua destilada y en el agua clara del océano, ocurre en el intervalo espectral de 440 a 540 nm, y el pico de transmitancia se localiza próximo a 480 nm (Duntley, 1963 en Sausen, et al 1989).

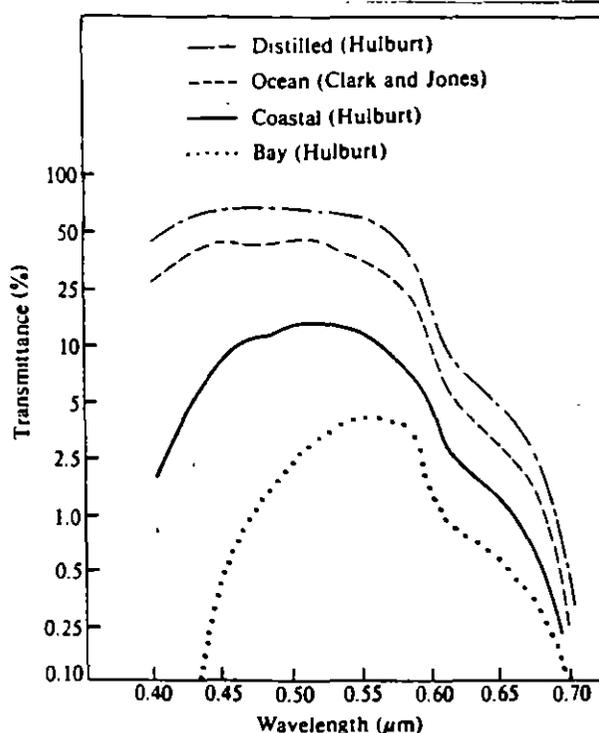


Figura 3.21 Transmitancia espectral para una profundidad de 10 m en varios tipos de agua (tomada de Specht, et al 1973 en Hoffer, 1978).

En aguas turbias o en aguas conteniendo sustancias tales como materia orgánica disuelta o plancton, el pico de longitud de onda de la transmitancia de la luz cambia en dirección de longitudes de onda más largas.

Las características de alta transmitancia y baja absorción del agua limpia indica que, donde los cuerpos de agua son relativamente someros y el agua es muy limpia, la energía reflejada que es registrada por los sistemas sensores, que operan en las longitudes de onda del visible, pueden ser una función de la arena, lodo, roca o cualquier cosa que esté en el fondo (la mayor excepción para esta aseveración será cuando ocurran reflexiones especulares en la superficie del agua, creando el así llamado "destello solar") (Hoffer, 1978).

La visibilidad dentro del agua es limitada a pocas centenas de metros en condiciones ideales. En condiciones normales la visibilidad es mucho menor (Tanaka, et al., 1982 en Sausen, et al 1989).

Si a partir de las curvas de transmitancia fueran calculadas las profundidades ideales de penetración de la luz en el agua, las mayores profundidades serían alcanzadas en aguas oceánicas, teóricamente puras, y en aguas destiladas en la porción del azul verde aproximadamente a los 480 nm. En la medida en que la turbidez aumenta ese factor de penetración será gradualmente reducido, y las longitudes de onda predominantes serán mayores (Herz, 1977 en Hoffer, 1978).

Una indicación de la relación que existe entre la longitud de onda y el potencial para determinar la profundidad del agua mediante imágenes de satélite, es tomada de Lepley, Et al (1975). Ellos estimaron que la profundidad de penetración en agua limpia para la banda de 500 a 600 nm es de 10 m, para la banda de 600 a 700 nm es de 3 m, para 700 a 800 nm de 1m y de 800 a 1100 nm de 10 cm únicamente. Otros estudios también indicaron que la banda de 500 a 600 nm es la mejor para obtener medidas de profundidad, pero que los datos Landsat son útiles exclusivamente para profundidades relativamente someras entre 5 y 15 m (Hoffer, 1978).

La turbidez es una propiedad óptica relacionada con la luz dispersada por la mayor o menor concentración de material suspendido en el agua. De esta forma un cambio en la concentración de sedimentos en suspensión, provoca un cambio en la turbidez que a su vez provoca un cambio en la reflectancia.

Bartolucci, et al. (1977) midieron la respuesta espectral del agua turbia (99 mg/l de sólidos en suspensión) y del agua clara (10 mg/l de sólidos suspendidos) en condiciones naturales (figura 3.22), encontrando que las mayores diferencias ocurren en la región de 600 a 900 nm. Estos autores constataron también que, para cuerpos de agua turbios (100 mg/l de sólidos en suspensión) la reflectancia del fondo no afecta la respuesta espectral del agua, si el fondo tuviera una profundidad mayor a 30 cm (Hoffer, 1978; Sausen, et al 1989).

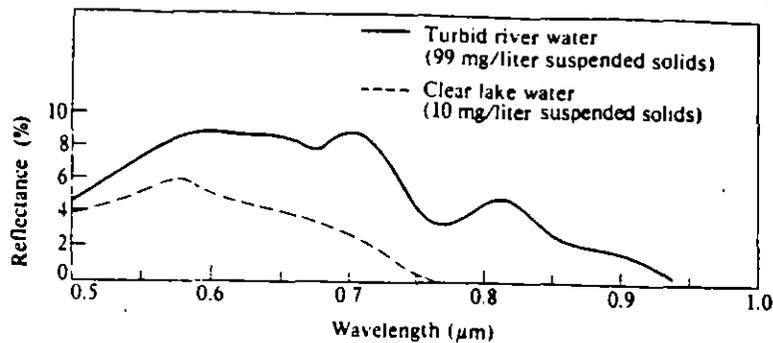


Figura 3.22 Reflectancia espectral del agua clara y agua turbia en el intervalo de 0.5 a 1.0  $\mu\text{m}$  (tomada de Bartolucci, et al 1977 en Hoffer, 1978).

En la figura 3.22 se observa que las respuestas espectrales del agua turbia y del agua limpia son muy semejantes en la porción del verde (500 a 550 nm); mientras que en las regiones del amarillo, rojo e infrarrojo próximo, que va del 550 al 900 nm, estas difieren en aproximadamente 6%. En el infrarrojo próximo, el agua limpia del lago es esencialmente negra, indicativo de la alta absorción; y el agua turbia tiene una respuesta espectral.

La radiación solar reflejada en la superficie del agua varía con el total de sedimentos en suspensión y con la longitud de onda. En general, la radiación solar reflejada entre 450 y 900 nm aumenta con el aumento en la concentración de sedimentos. La región de máxima radiación solar reflejada está alrededor de 500 nm para bajas concentraciones de sedimentos y arriba de 600 nm, para altas concentraciones de sedimentos (Ritchie, et al., 1976 en Hoffer, 1978).

La concentración de clorofila en el agua también afecta la respuesta espectral. Como es mostrado en la figura 3.23, con el aumento de la clorofila, hay un significativo decremento en el total de energía reflejada en la longitud de onda del azul, y un aumento en las longitudes de onda del verde. Esta relación entre concentración de clorofila y respuesta espectral es significativa en la medida en que los niveles de clorofila son índices útiles de la eutrofización y productividad primaria de los cuerpos de agua.

Muchas sustancias que contaminan provocan cambios en el comportamiento espectral del agua, entre ellas se tienen las sustancias amarillas o gelbstoff que alteran la curva de absorción; los derrames de petróleo, etc.

Sin embargo, algunos contaminantes no producen una diferencia observable en la respuesta espectral como puede ser la disolución de gases (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono) y sales inorgánicas (cloruro de sodio, sulfato de sodio) en agua destilada. Similarmente no se han encontrado diferencias significativas para variaciones en el nivel de PH. (Hoffer, 1978).

## 4 TEORIA DEL COLOR Y GENERACION DE IMAGENES EN FALSO COLOR

### 4.1 Propiedades de la luz

Lo que se percibe como luz es una banda de frecuencia o longitud de onda estrecha dentro del espectro electromagnético y corresponde a la porción visible del mismo (figura 1.1).

Cada valor de frecuencia (longitud de onda) de la banda visible corresponde a un color distinto. En el extremo de baja frecuencia hay un color rojo ( $4.3 \times 10^{14}$  hertz ó 700 nm) y la frecuencia mas alta que se puede percibir es un color violeta ( $7.5 \times 10^{14}$  hertz ó 400 nm). Entre estos límites de frecuencia, el ojo humano puede distinguir cerca de 400 000 colores diferentes (Hearn and Baker, 1988). Estos colores van desde los rojos a través del anaranjado y el amarillo en el extremo de baja frecuencia a los verdes, azules y violeta en el extremo de alta frecuencia.

Ya que la luz es una onda electromagnética, se puede describir los diversos colores en termino de la frecuencia o de la longitud de onda. Las dos cantidades son inversamente proporcionales entre sí, siendo la constante de proporcionalidad la velocidad de la luz.

Una fuente de luz como el sol o un foco emiten todas las frecuencias contenidas en el intervalo visible para producir la luz blanca (figura 4.1). Cuando la luz blanca incide sobre un objeto, algunas frecuencias son reflejadas y otras absorbidas por él. La combinación de frecuencias presentes en la luz reflejada por un cuerpo determina lo que percibimos como su color. Si predominan las bajas frecuencias en la luz reflejada, el objeto se describe como rojo. En este caso, se dice que la luz percibida tiene una frecuencia dominante (o bien longitud de onda dominante) en el extremo rojo del espectro (figura 4.2). La frecuencia dominante se llama asimismo color o matiz, de la luz.

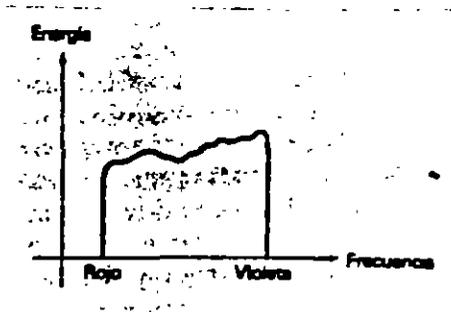


Figura 4.1 Distribución de energía para una fuente de luz blanca (tomada de Hearn and Baker, 1988).

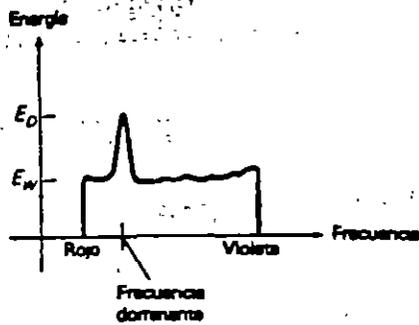


Figura 4.2 Distribución de energía de una fuente de luz con una frecuencia dominante (tomada de Hearn and Baker, 1988).

Otras propiedades además de las frecuencias son útiles para describir las características de la luz. Cuando se observa una fuente de luz, los ojos responden al color (o frecuencia dominante) y a otras sensaciones básicas que son: luminancia y pureza. La luminancia o brillantez se relaciona con su intensidad, cuanto mayor sea, más brillante se ve la fuente. La otra característica, la pureza o saturación de la luz, describe la limpidez o cuán puro se ve el color.

Estas tres características longitud de onda dominante, brillantez y pureza, se utilizan comúnmente para describir las diferentes propiedades que se perciben en una fuente de luz. El término cromaticidad se utiliza para hacer referencia colectiva de las dos propiedades que describen las características del color, la pureza y la longitud de onda dominante.

#### 4.2 Concepto de color

Cuando cada componente de frecuencia contenida en el intervalo del rojo al violeta contribuye más o menos en la misma cantidad a la energía total, el color se describe como blanco (figura 4.1). Cuando hay una frecuencia dominante (figura 4.2) se dice que la luz tiene el color correspondiente a dicha frecuencia. En la figura 4.2 la intensidad de la luz dominante es  $E_p$  y la contribución de las otras frecuencias producen luz blanca de intensidad  $E_w$ . La brillantez de la fuente se calcula como el área situada debajo de la curva, lo que da la energía total emitida. La pureza depende de la diferencia entre  $E_p$  y  $E_w$ . Cuanto mayor sea la energía  $E_p$  de la frecuencia dominante en comparación con la componente de la luz blanca  $E_w$ , tanto más pura será la luz. Se tiene una pureza del 100% cuando  $E_w = 0$  y una pureza de 0% cuando  $E_w = E_p$ .

Las características de la luz formada por la combinación de dos o más fuentes, son determinadas por ellas mismas. Dos fuentes de luz de diferente color, con intensidades elegidas adecuadamente pueden utilizarse para producir una gama de otros colores. Si las dos

fuentes se combinan para producir luz blanca, estos se conocen como colores complementarios.

Por lo general, los modelos de color que se utilizan para describir combinaciones de luz hacen uso de 3 colores para obtener una gama razonablemente amplia, llamada gama de colores de ese modelo. Los dos o tres colores que se usan para describir otros, en un modelo, se conocen como colores primarios. De esta forma la ecuación que nos permite generar un color a través de 3 primarios es:

$$\text{Color} = IP_1 + IP_2 + IP_3$$

donde:

$IP_1$  = Intensidad del primer primario.

$IP_2$  = Intensidad del segundo primario.

$IP_3$  = Intensidad del tercer primario.

No existe un conjunto único de colores primarios que describa todas las longitudes de onda posibles contenidas en el espectro visible. Para ampliar la gama de colores deben agregarse más primarios, pero esto todavía requeriría un número infinito de ellos para incluir todos los colores posibles.

Tres primarios son suficientes para muchos fines y los colores que no están en la gama de un conjunto especificado, todavía puede describirse por medio de métodos extendidos. Por ejemplo si un color no se obtiene a partir de tres primarios dados, se pueden combinar uno o dos de estos con ese color para obtener un ajuste con los primarios restantes. En este sentido amplio, puede considerarse que un conjunto de colores primarios describe todos los colores (Hearn and Baker, 1988; Rogers, 1986).

Una norma internacional para los colores primarios se estableció en 1931 por la Comisión Internacional de Iluminación (Commission Internationale de l'Eclairage, también llamada CIE). La finalidad de esta norma es la de permitir que todos los colores se definan como la suma de tres primarios.

$$\text{color} = X + Y + Z$$

Puesto que no hay tres colores en el espectro visible que puedan lograr esto, los primarios estándar establecidos por la CIE no corresponden a ningún color real (figura 4.3). El hecho de que estos primarios representen colores imaginarios no es en realidad importante, ya que cualquier color real se define por las cantidades de cada primario necesarias matemáticamente para producirlo. Cada primario de esta norma se define por su curva de distribución de energía (figura 4.3).

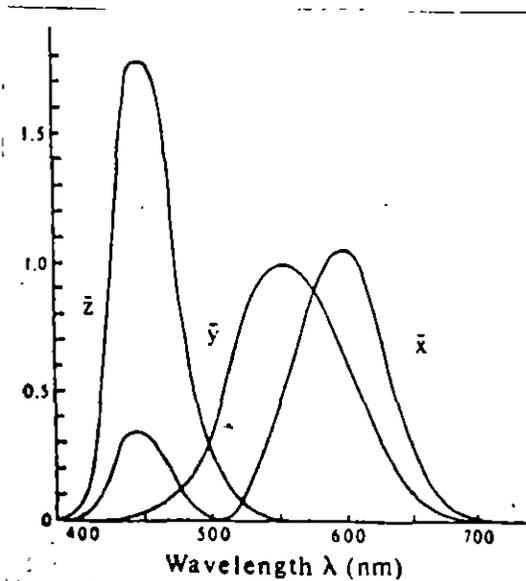


Figura 4.3 Colores estándares establecidos por la CIE en 1931 (tomada de Rogers, 1986).

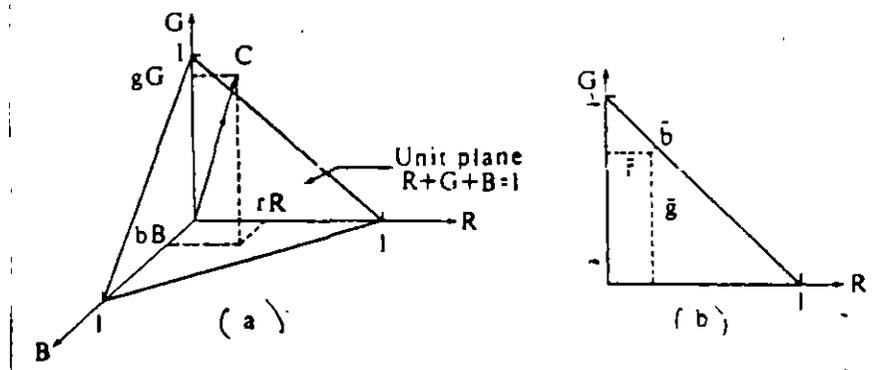


Figura 4.4 Espacio tridimensional del color (espacio tristímulus) (tomada de Rogers, 1986).

La naturaleza tridimensional del color sugiere la graficación de los valores de cada componente a lo largo de ejes ortogonales (figura 4.4a). El resultado es llamado espacio tristímulus. Cualquier color C es representado por el vector que va desde el origen hasta este, y cuyas componentes son X, Y, Z. La intersección del vector C con el plano unitario da los pesos relativos de los colores X, Y, Z requeridos para generar C. Los pesos relativos son llamados valores de cromaticidad y están dados por las coordenadas normalizadas:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

donde:

$$x + y + z = 1$$

La proyección del plano unitario como se muestra en la figura 4.4b produce un diagrama de cromaticidad. El diagrama de cromaticidad directamente proporciona una relación funcional entre 2 colores e indirectamente con el tercero.

$$z = 1 - x - y$$

Esto hace posible que se representen todos los colores en un diagrama bidimensional.

Cuando se grafican valores  $(x,y)$  para los colores del espectro visible, se obtiene la curva con forma de lengua de la figura 4.5. Esta curva se denomina diagrama de cromatismo de CIE. Los puntos de color se rotulan a lo largo de la curva de acuerdo con la longitud de onda en nanómetros, del extremo rojo al violeta del espectro. El punto C del diagrama corresponde a la posición de luz blanca conocida como C iluminante, que se utiliza como aproximación estándar de la luz natural media.

La curva de la figura 4.5 se denomina diagrama de cromatismo porque ofrece un medio para definir cuantitativamente la pureza y la longitud de onda dominante.

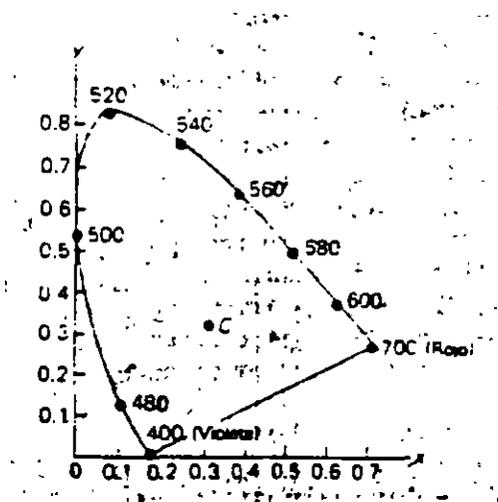


Figura 4.5 Diagrama de cromatismo de CIE (tomada de Hearn and Baker, 1988).

Para cualquier punto de color, como  $C_1$  de la figura 4.6, se define la pureza como la distancia relativa que existe desde el punto C de luz blanca hasta  $C_1$ , medida a lo largo de la recta que une C con la

curva (que representa los colores del espectro visible) y pasa por  $C_1$ . El color  $C_1$  es aproximadamente 25% puro, ya que está situado cerca de una cuarta parte de la distancia total de  $C$  a  $C_2$ . La longitud de onda dominante de cualquier color se define como el punto de cruce entre la curva espectral y la línea que une a  $C$  y ese punto de color. Para el punto de color  $C_1$  la longitud de onda dominante está en  $C_2$ .

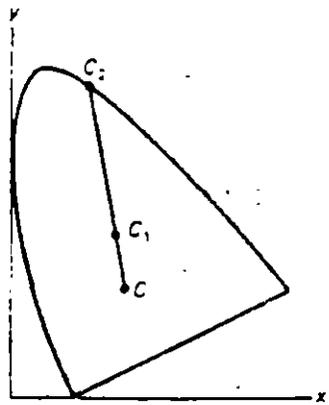


Figura 4.6 Definición de pureza y longitud de onda dominante (tomada de Hearn and Baker, 1988).

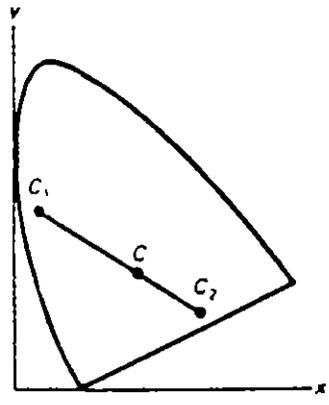


Figura 4.7 Representación de los colores complementarios (tomada de Hearn and Baker, 1988).

Los colores complementarios se representan por los dos puntos extremos de una recta que cruza por el punto  $C$ , como en la figura 4.7. Cuando los dos colores  $C_1$  y  $C_2$  se combinan en proporciones adecuadas se produce luz blanca.

Las gamas de colores se establecen en el diagrama de cromatismo con líneas que unen los puntos de color que las definen (figura 4.8). Todos los colores situados en la línea que une los puntos  $C_1$  y  $C_2$  de

la figura 4.8 pueden obtenerse combinando cantidades de los colores representados por los extremos. La gama de colores de los tres puntos  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  es el triángulo que se forma. Estos tres colores pueden combinarse para generar cualquier color contenido en el triángulo, pero no podrían producir puntos externos.

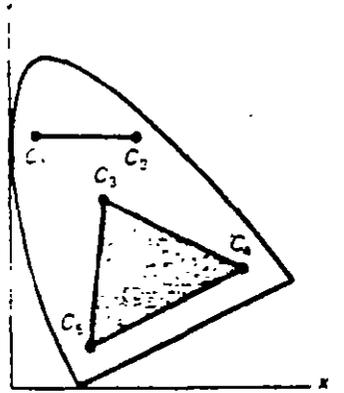


Figura 4.8 Gamas de colores para modelos de 2 y 3 colores primarios (tomada de Hearn and Baker, 1988).

#### 4.3 Modelo RGB

El ojo percibe el color a través de tres pigmentos visuales en los conos de la retina. Estos pigmentos tienen una sensibilidad pico en longitudes de onda cercanas al 630 nm (rojo), 530 nm (verde) y 450 nm (azul). Cuando dichos conos son sensibilizados el cerebro mezcla las señales registradas por cada uno de los pigmentos y percibe el color de la luz (Hearn and Baker, 1988; Rogers, 1986).

Esta teoría de la visión de tres estímulos es la base de la fotografía a color y de la mayoría de los monitores de video. Esta técnica hace uso de los 3 colores primarios rojo, verde y azul, por los que se le llama modelo RGB (debido a sus siglas en inglés: red, green, blue).

Este modelo se representa mediante el cubo unitario definido por los ejes R, G y B, como se muestra en la figura 4.9. El origen representa el negro y el vértice con coordenadas (1,1,1) es el blanco. Los vértices del cubo sobre los ejes determinan los colores primarios y los vértices restantes representan el color complementario de cada uno de ellos.

Este esquema de color es un modelo aditivo, esto es, las intensidades de los primarios se suman para producir otros colores.

Cada punto de color contenido en los límites del cubo puede representarse como la triada (R, G, B), donde los valores R, G, B se asignan en el intervalo de 0 a 1. El vértice magenta se obtiene

sumando el rojo y el azul para producir la triada (1, 0, 1) y el blanco en (1, 1, 1) es la suma de los vértices rojo, verde y azul. Las sombras de gris se representan a lo largo de la diagonal principal del cubo, del origen (negro) al vértice blanco. Cada punto situado en esta diagonal tiene una contribución igual de cada color primario, de manera que una sombra de gris en medio del negro y el blanco se representa como (0.5, 0.5, 0.5).

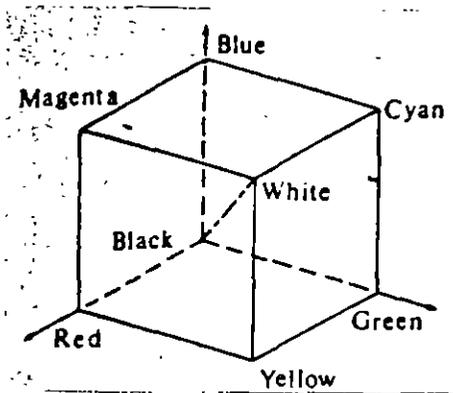


Figura 4.9 Cubo de colores del modelo RGB (tomada de Rogers, 1986).

#### 4.4 Modelo HSV

Este modelo de color emplea descripciones que tienen un aspecto mas intuitivo para el usuario. En vez de escoger colores de acuerdo con sus componentes RGB, los usuarios pueden especificar un matiz (o color) y la cantidad de blanco y negro que se agregará a éste para obtener diferentes sombras, tintes y tonos. Los tres parámetros de color de este método que se presentan a un usuario se denominan matiz, saturación y valor (hue, saturation and value), HSV.

La representación tridimensional del modelo HSV se deduce del cubo RGB. Si se observa el cubo a lo largo de la diagonal que va del vértice blanco al origen (negro), se verá un perfil que tiene la forma hexagonal que se muestra en la figura 4.10. La frontera del hexágono representa los diversos matices y se utiliza como parte superior del cono HSV (figura 4.11). En el cono hexagonal la saturación (S) se mide a lo largo de un eje horizontal y el valor (V) está situado en el eje vertical que pasa por el centro de este.

El matiz (H) se representa en un ángulo en torno al eje vertical, que va de 0° en rojo hasta 360°. Los vértices del hexágono se separan por intervalos de 60°. El amarillo está en 60°, el verde en 120°, el cian opuesto al rojo en H = 180°, etc. Los colores complementarios están 180° aparte.

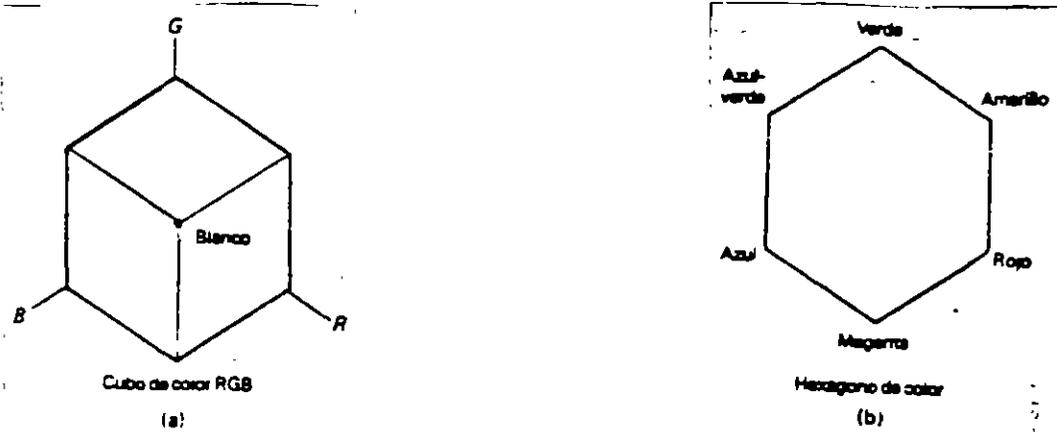


Figura 4.10 (a) Planta del cubo RGB al ser observado a lo largo de la diagonal de blanco a negro. (b) Hexágono de colores proyectado en el plano perpendicular a la diagonal de blanco a negro (tomada de Hearn and Baker, 1988).

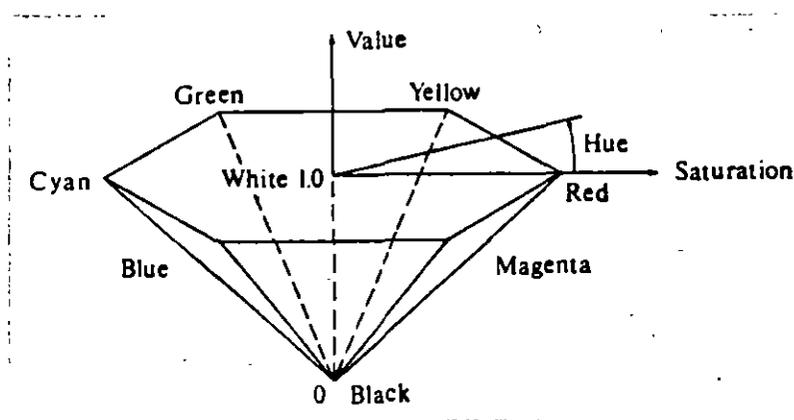


Figura 4.11 Cono hexagonal del modelo HSV (tomada de Rogers, 1986).

La saturación  $S$  varía de 0 a 1. Se representa en este método como la razón entre la pureza de un matiz seleccionado y su pureza máxima  $S = 1$ . Se dice que un matiz es 25 % puro cuando  $S = 0.25$ . En  $S = 0$  se tiene la escala de gris.

El valor  $V$  varía de 0, en la cúspide del cono hexagonal, a 1, en la parte superior. El ápice o cúspide representa el negro. En la parte superior del cono hexagonal, los colores tienen su máxima intensidad. Cuando  $V = 1$  y  $S = 1$  se tienen matices puros. El blanco es el punto en  $V = 1$  y  $S = 0$ .

Los conceptos de color asociados con los términos sombras, tintes y tonos se representan en un plano transversal del cono HSV (figura 4.12). Si se agrega negro a un matiz puro se disminuye  $V$  a lo largo de la hipotenusa del triángulo formado. Por lo tanto, varias sombras se representan con colores  $S = 1$  y  $0 \leq V \leq 1$ . Si se agrega blanco a un tono puro se producen diferentes tintes a través del

plano superior del cono hexagonal, donde los valores de los parámetros son  $V = 1$  y  $0 \leq S \leq 1$ . Diversos tonos se especifican agregando blanco y negro ( $0 \leq S \leq 1$  y  $0 \leq V \leq 1$ ), produciendo puntos de color dentro del área transversal triangular del cono hexagonal.

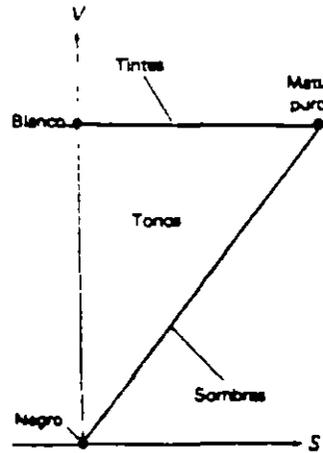


Figura 4.12 Sección transversal del cono hexagonal HSV, que muestra las zonas que representan sombras, tintes y tonos de un color puro (tomada de Hearn and Baker, 1988).

El ojo humano puede distinguir cerca de 128 matices y 130 tintes distintos (niveles de saturación). Para cada uno de éstos, se pueden seleccionar varias sombras (niveles de valor). Aproximadamente 23 sombras son discernibles con colores amarillos y pueden percibirse unas 16 sombras diferentes en el extremo azul del espectro. Esto significa que el hombre distingue alrededor de  $128 \times 130 \times 23 = 382720$  colores distintos (Hearn and Baker, 1988).

#### 4.5 Modelo HLS

Otro modelo basado en parámetros de color intuitivos es el HLS. Este modelo tiene la representación de cono doble que se muestra en la figura 4.13. Los tres parámetros de color en este modo se denominan matiz (H), claridad (L) y saturación (S).

El matiz (H) tiene el mismo significado que en el modelo HSV. Este especifica un ángulo con respecto al eje vertical que localiza un matiz seleccionado. En este modelo,  $H = 0^\circ$  corresponde al azul. Los colores restantes se especifican en torno al perímetro del cono de la misma manera que en el modelo HSV. El magenta en  $60^\circ$ , el rojo está en  $120^\circ$  y el cian se localiza en  $180^\circ$ . Una vez más los colores complementarios están  $180^\circ$  aparte en el cono doble.

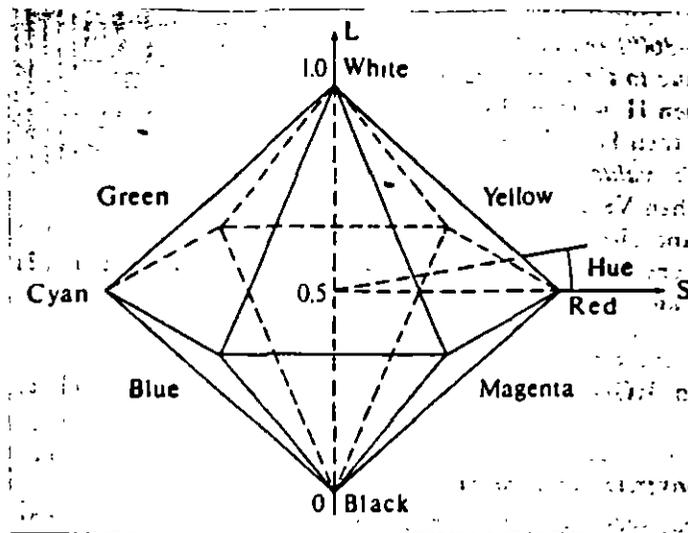


Figura 4.13 Doble cono hexagonal del modelo HLS (tomada de Rogers, 1986).

El eje vertical de este modelo se denomina claridad (L). En  $L = 0$  se tiene el negro y en  $L = 1$  está el blanco. La escala de grises se establece a lo largo del eje L y los matices puros en el plano  $L = 0.5$ .

El parámetro de saturación S especifica la pureza relativa de un color. Este parámetro varía de 0 a 1 y los matices puros son aquellos para los cuales  $S = 1$  y  $L = 0.5$ . Conforme S disminuye, se dice que los matices son menos puros. En  $S = 0$ , se tiene la escala de grises.

Este modelo al igual que el HSV, permite al usuario pensar en términos de hacer más oscuro o más claro un matiz seleccionado. Un matiz se determina con el ángulo H y la sombra, tinte o tono deseado se obtiene ajustando L y S. Los colores se hacen más claros incrementando L y se hacen más oscuros disminuyendo L. Cuando S se disminuye los colores tienden a ser grises.

#### 4.6 Generación de imágenes a color y falso color

Como se mencionó anteriormente, el ojo humano es sensible a tres colores primarios que son: El rojo, el verde y el azul. Cualquier otro color es sintetizado por el cerebro a través de la suma o adición de diferentes proporciones de estos tres colores.

El rojo, verde y azul son llamados colores primarios aditivos debido a que cuando las luces proveniente de tres cañones, una roja, otra verde y otra azul, se proyectan sobre una pantalla, en la porción central donde se tiene la sobreposición de las tres luces se observará el color blanco (figura 4.14a).

En las regiones en las que se tiene únicamente la sobreposición de 2 luces, esto es, de alguna manera se ha extraído o substraído uno de los colores primarios se generan los siguientes combinaciones:

Azul + Verde = Cian.

Azul + Rojo = Magenta.

Verde + Rojo = Amarillo.

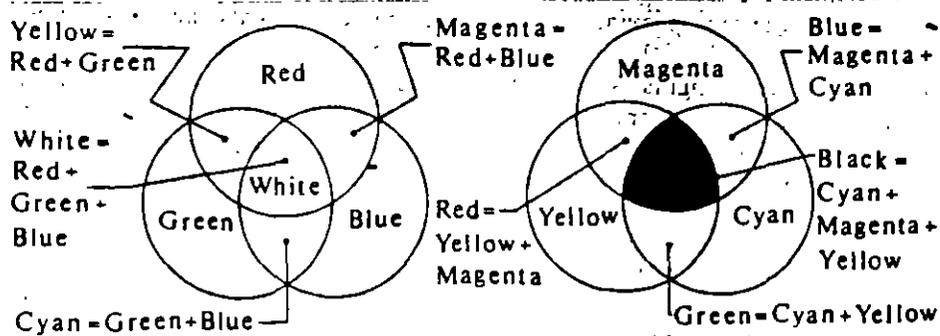


Figura 4.14 Sistemas de combinación de color. (a) aditivo, (b) substractivo (tomada de Rogers, 1986).

Los colores amarillo, cian y magenta son llamados colores primarios substractivos debido a que se generan mediante la substracción de alguno de los colores primarios aditivos. A su vez cada uno de estos colores es el color complementario de aquel que fue extraído para su generación, de tal forma que el cian es el color complementario del rojo, el magenta del verde y el azul del amarillo.

En el experimento en el que se proyecta luz, proveniente de una sola fuente, a través de 3 filtros superpuestos, donde cada uno de ellos permite únicamente la transmisión de un tipo de luz (amarilla, cian y magenta) en la porción central donde se tiene la sobreposición de los filtros se observará el color negro, pues cada uno de los 3 filtros substraerá uno de los primarios aditivos (figura 4.14b). Cuando se tiene la sobreposición de 2 filtros únicamente se permitirá la transmisión del tipo de luz común a ambos filtros.

La figura 4.15 muestra el triángulo del color en el que los vértices definen los colores primarios aditivos y las aristas los colores primarios substractivos. la arista que une dos vértices establece el color que se genera al combinar estos 2 colores aditivos, el vértice común a 2 aristas define el color que se genera al combinar estos 2 colores substractivos y el vértice opuesto a una arista da el color complementario de ésta.

Un proceso aditivo es el que se usa para generar imágenes en color en un monitor de computadora, una televisión, o una pantalla. Un proceso substractivo es el empleado para tener imágenes en papel o copia dura (enduro).

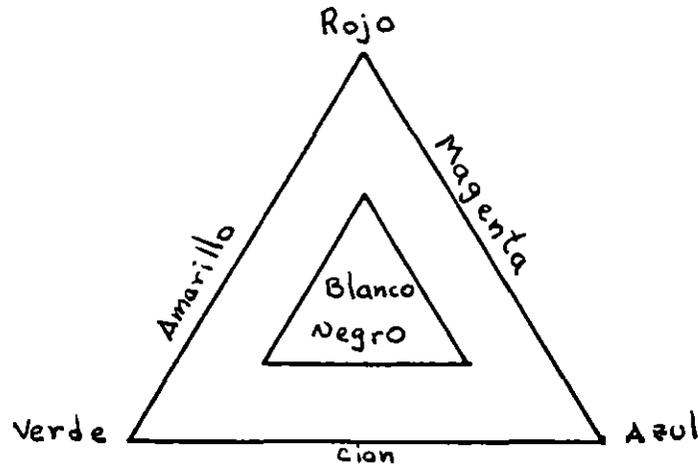


Figura 4.15 Triángulo del color para los primarios aditivos y substractivos.

Los monitores a color RGB presentan 3 cañones que proyectan luz a un mismo punto, al mismo tiempo. Cada cañón emite luz de un solo tipo (azul, verde y roja), generando mediante su combinación a diferentes intensidades el color de dicho punto.

Los dispositivos de copia dura generan una imagen mediante el empleo y mezcla de tintas que reflejan uno de los 3 colores primarios y absorben o transmiten los otros 2. De esta manera en una impresión fotográfica se tienen 3 capas de sustancias que reflejan luz de los 3 primarios en menor o mayor intensidad la cual al mezclarse establece el color observado.

En una imagen de satélite las bandas son usadas para controlar la intensidad de la luz que será emitida por los cañones de un monitor o reflejada por las sustancias de una fotografía.

Cuando una banda tomada en la porción azul del espectro electromagnético es asignada al cañón que emite luz azul, una banda registrada a partir de la porción verde del espectro se emplea para controlar el cañón verde y una banda capturada en la región roja del espectro se usa para determinar las intensidades del cañón rojo se generará una imagen en color natural.

Si se emplea alguna otra combinación como puede ser el usar la banda verde para controlar las intensidades del cañón azul, la banda roja para el cañón verde y una banda infrarroja para el cañón rojo se tendrá una imagen en falso color. Las imágenes generadas a partir de una combinación distinta, de aquella que produce una imagen en color natural, serán observadas con tonalidades diferentes de las que se aprecian en la naturaleza, motivo por el cual se les da el nombre de falso color.

Una imagen generada a partir del empleo de una banda infrarroja nos permitirá observar la energía siendo reflejada por los objetos en la región infrarroja del espectro a la cual no es sensible el ojo humano.

Diferentes combinaciones de bandas pueden usarse para generar diversos falsos colores. Cada uno de éstos presentará tonalidades que variarán dependiendo de las combinación de bandas realizadas en, dado que estas establecerán las intensidades de los cañones.

Una imagen en falso color permite resaltar u observar rasgos de la superficie que a simple vista no pueden ser discriminados, como se verá en el siguiente capítulo.

## 5 INTERPRETACION VISUAL DE IMAGENES DE SATELITE

### 5.1 Elementos de análisis de una imagen

La American Society of Photogrammetry (1960) define la interpretación fotográfica como el acto de examinar imágenes fotográficas con la finalidad de identificar objetos y analizar su significado.

Por otra parte, para Novo (1985) la interpretación visual es el conjunto de conocimientos y procedimientos ejecutados por el individuo procurando la extracción de información de una imagen óptica procesada, teniendo como instrumento básico de análisis los ojos.

En la interpretación visual, como lo menciona Novo (1985), los ojos del interprete son los instrumentos empleados para discriminar entre objetos diferentes que pueden ser observados en una escena. Esta es seguida por un proceso de elaboración mental, en que el individuo intenta relacionar el objeto discriminado y desconocido, con un conjunto de informaciones conocidas, para identificarlo.

Algunos objetos pueden ser rápidamente reconocidos, esta caracterización implica que el observador conozca la identidad del objeto, generalmente por un conocimiento a priori o experiencia.

De manera general los elementos de reconocimiento más significativos en la interpretación de imágenes de satélite son los mismos de las fotografías aéreas convencionales:

- La tonalidad y el color.
  - El comportamiento espectral.
  - El tamaño.
  - La forma.
  - La textura.
  - El padrón.
  - La altura.
  - La sombra.
  - La localización.
  - El contexto.
- Tonalidad o color: Representa el nivel de gris con que un objeto o grupo de objetos es capaz de registrar en un película fotográfica en blanco y negro. La tonalidad, para una imagen de satélite, es dada por la cantidad de energía reflejada y/o emitida por el objeto en una determinada banda espectral.

Las imágenes a color permiten que los objetos sean diferenciados a través de variaciones en el color. La percepción del color es un elemento de nuestra conciencia sobre el medio ambiente.

El color y la tonalidad de los objetos (como representativos del comportamiento espectral) están sujetos a variaciones en

función de las condiciones ambientales y de la adquisición de los datos.

Un cuerpo de agua normalmente, por atenuar la energía incidente, tiene una señal de retorno pequeña, por lo que presenta tonalidades oscuras en fotografías aéreas pancromáticas. Sin embargo, en función de la geometría, el sol, el sensor, el mismo objeto, los cuerpos de agua pueden tener tonalidades que varían del blanco (reflexión total) al negro.

- Comportamiento espectral: Otro aspecto importante en la identificación de los objetos es el conocimiento del comportamiento espectral, como fue estudiado en el capítulo 3. En una imagen correspondiente al infrarrojo, una floresta tendrá tonalidades gris claro, porque en esta región hay elevada reflexión de energía por el dosel. En una imagen captada en la región del rojo, la floresta presentará tonalidad oscura (negra), porque en esta porción del espectro la vegetación verde tiene elevada absorción de la energía debido a la clorofila.
- Tamaño: El tamaño de un objeto es uno de los más útiles factores para su identificación. A través de la medida de un objeto desconocido en una fotografía aérea, el interprete puede eliminar varias consideraciones al respecto de todos los grupos de posibles identificaciones.

Para la evaluación de las dimensiones de un objeto como elemento de identificación, se debe de tomar en cuenta la escala de la imagen que está siendo analizada.

- Forma: Las formas indican la disposición espacial de los elementos texturales con propiedades comunes.

El valor de la forma para el fotointérprete es que ella delimita la clase a la cual un objeto desconocido deba de pertenecer. Frecuentemente permite una identificación determinante y auxilia en el entendimiento del significado y función del objeto.

Es importante considerar que la forma de un objeto observado a partir de una perspectiva vertical es diferente en relación a la mira horizontal. La habilidad para comprender y discriminar un objeto a partir de su visión en un plano debe de ser desarrollada.

- Textura: Es la menor superficie continua y homogénea distinguible en la imagen fotográfica y posible de representación. Esto implica una forma y dimensiones definidas para este elemento, y que la textura fotográfica sea un patrón de arreglos de elementos texturales.

Es posible por medio de la textura diferenciar dos regiones o dos áreas que presentan la misma tonalidad.

La distinción de los elementos es una función de la escala y de la resolución espacial de los productos utilizados y del contraste entre objetos o regiones de la superficie terrestre.

La textura solo puede ser observada como "textura " en imágenes de gran escala. En imágenes de pequeña escala la textura es la combinación de los elementos de reconocimiento o interpretación, como drenaje, relieve, tonalidad, etc.

Por lo tanto, la textura (impresión visual de la rugosidad o uniformidad) es un elemento muy importante en interpretación de imágenes, principalmente cuando se refiere al radar y a los sensores para recursos naturales, donde desempeña un importante papel en la diferenciación de áreas homólogas.

- Patrón: Es definido como un arreglo espacial de los objetos. El patrón es una importante llave para descubrir el origen o función, o ambos de un objeto.

Algunos patrones son básicamente culturales, otros naturales. Mientras tanto, hay muchos patrones que resultan de la interacción de factores naturales y culturales.

Regiones culturales (tales como ciudades, carreteras, reforestamiento, áreas agrícolas, etc.) son visibles porque ellos consisten de líneas rectas u otras configuraciones regulares.

Muchas de las actividades del hombre dejan marcas en la tierra que perduran por un largo tiempo, aun después que la actividades hayan cesado (sitios arqueológicos).

El conocimiento del significado físico del patrón de drenaje es muy importante en el proceso de interpretación visual de otros temas de interés de las geociencias. Esto porque el arreglo planimétrico de los cursos del agua está íntimamente relacionado a las características físicas de las cuencas hidrográficas, como son: el relieve, la estructura geológica, la permeabilidad del suelo, la densidad de la cubierta vegetal, etc.

- Altura: La altura de los objetos ayuda también al interprete a diferenciar dos regiones que poseen tonalidades similares. Cuando se dispone de pares estereoscópicos se puede tener una visión tridimensional del terreno y disponer de la altura de los objetos.
- Sombra: Las sombras en las imágenes son resultante de la iluminación oblicua, por el sol, de la superficie del terreno, en el instante de la toma de la imagen.

En la vida normal, frecuentemente evaluamos el tamaño y la forma de los objetos o personas, observando las sombras que ellos producen.

En las fotografías aéreas las sombras algunas veces ayudan al interprete, proporcionándole representaciones del perfil de los objetos de interés. Ellas son particularmente útiles si los objetos son muy pequeños o hace falta contraste con respecto a los objetos vecinos.

- Localización: La localización de los objetos puede no ser una llave para su identificación, pero puede informarnos su significado mediante la indicación de su uso. La localización de los objetos con relación a las características del terreno u otros objetos es frecuentemente una pista determinada para la identificación de su naturaleza.
- Contexto: Algunos objetos pueden ser identificados por la compañía que ellos tienen. Algunos objetos están asociados con otros y la presencia de uno, confirma la presencia de otros.

## 5.2 Fotointerpretación de una banda

La fotointerpretación de las bandas de una imagen multiespectral, se efectúa de la misma manera que una fotografía blanco y negro normal, analizando los mismos elementos descritos en el subcapítulo anterior, pero únicamente teniendo cuidado con las tonalidades en que aparecen los objetos.

De esta manera, para llevar a cabo la interpretación es necesario conocer el comportamiento espectral (firma espectral) de los objetos que se encuentran en la imagen. Este conocimiento permitirá al especialista saber las tonalidades con las que se mostrarán los objetos, por lo que debe de auxiliarse de curvas espectrales como las mostradas en la figura 3.1.

Las características espectrales de los objetos pueden ser registradas diferencialmente en cada una de las bandas que conforman una imagen multiespectral, lo que posibilita la identificación de diferentes objetos por medio de la comparación entre canales. Por ejemplo, dos cosas distintas, como cuerpos profundos de agua y selva densa, presentan respuesta semejante en el canal 5 del MSS. Sin embargo, pueden ser fácilmente discriminados cuando se analizan en el canal 7 del MSS.

Los diferentes tipos de sensores de las dos principales misiones espaciales (Landsat y Spot), tienen sus bandas proyectadas para cubrir la porción del visible y el infrarrojo cercano (figura 3.1). De esta manera, se tiene que la banda 4 del MSS corresponde a la 2 del TM y a la 1 del Spot, la banda 5 del MSS cubre a las bandas 2 del TM y 3 del Spot y finalmente se puede decir que existe una alta correlación entre la banda 7 del MSS, la 4 del TM y la 3 del Spot.

Debido a esta sobreposición de bandas, las experiencias efectuadas para alguno de los sensores, en dicha zona, pueden fácilmente ser extrapoladas a otro sensor.

El conocimiento previo de las características de los cuerpos en cada banda auxilia en la selección de los canales adecuados para llevar a cabo la interpretación.

Por ejemplo, para el sensor MSS en levantamientos de cobertura vegetal, generalmente son usados únicamente dos canales. A pesar de que las 4 bandas ofrecen información, diversos estudios realizados demostraron que los canales MSS5 y MSS7 (3 y 4 del TM y 2 y 3 para el satélite Spot) son los mejores para la identificación de diferentes tipos de cobertura vegetal.

Tanto en el canal MSS4 como en el canal MSS5, cuanto mas densa es la vegetación, mayor es su tasa de absorción de energía electromagnética. Sin embargo, la banda MSS5 presenta un contraste mejor que el canal MSS4, permitiendo que pequeñas variaciones en la cobertura vegetal sean identificadas visualmente. En la banda MSS7 la vegetación presenta alta reflectancia, lo que la vuelve útil en la identificación de tipos de cobertura vegetal afectadas por la humedad del suelo y que tienen, por eso, su reflectancia disminuida.

Para estudios de calidad del agua las bandas 4 y 5 del MSS (TM2 y TM3 o 1 y 2 del Spot) son los mas recomendados. El canal MSS4 permite una mayor penetración de luz en el agua, y favorece estudios de sedimentación, batimetría, etc. La banda MSS5 también es sensible a las variaciones del contenido de sedimentos en suspensión en los cuerpos de agua. A pesar de no proporcionar información sobre la condición interna de los cuerpos de agua, la banda MSS7 (TM4 y Spot3) generalmente es útil en la definición de sus límites superficiales, debido a la alta absorción del agua en esta ventana del espectro.

Para estudios geológicos, en general, los mejores canales son MSS5 y MSS7 (TM3 y TM4 o Spot2 y Spot3). La banda MSS5 es útil debido a la asociación que existe entre la litología y la vegetación. La banda MSS7 es usada pues en ella los aspectos estructurales son realizados.

Para estudios de levantamiento de uso de la tierra, en general, también son usadas las bandas MSS5 y MSS7 (TM3 y TM4 o Spot2 y Spot3). En el canal MSS5 las zonas en las que se tiene la presencia del hombre como ciudades, industrias, áreas de cultivo, etc. son fácilmente identificadas. En el canal MSS7 las áreas de suelo preparado para la utilización agrícola pueden ser identificadas, así como las represas y los lagos.

Para el levantamiento de la red de drenaje nuevamente se emplean los canales MSS5 y MSS7 (TM3 y TM4 o Spot2 y Spot3). El canal MSS7 se emplea para el levantamiento de los ríos cuya anchura y posición topográfica permite la detección de la lámina de agua. Estos ríos aparecen bien definidos en el canal MSS7 pues, siendo generalmente anchos, poseen una lámina mayor de agua que permite una mayor absorción de la energía electromagnética en la porción del infrarrojo, observándose tonos mas oscuros en contraste con las

zonas adyacentes. La banda MSS5 se emplea para el mapeo del drenaje secundario en áreas de cobertura vegetal poco densa, debido a la diferencia de tonalidad entre una vegetación de galería que presenta tonos de gris oscuros, y las áreas adyacentes.

La tabla 5.1 da un análisis comparativo de algunas clases identificables en las imágenes de satélites para el sensor MSS y su equivalente en los otros sensores:

CLASE	MSS4 TM2 Spot1	MSS5 TM3 Spot2	MSS6	MSS7 TM4 Spot3
Contraste tonal.	B	E	P	P
Cuerpos de agua y sus límites.	P	B	E	E
Patrón de drenaje.	P	E	B	E
Carreteras y ciudades.	P	E	P	P
Unidades litológicas.	P	E	B	B
Unidades estructurales.	P	B	B	E
Grupos de suelo.	P	B	B	E
Límite entre vegetación nat. y reforestación.	P	E	P	B
Unidades geomorfológicas.	P	B	B	E
Uso de la tierra.	P	E	P	B
Sedimentos en suspensión.	E	E	P	P
áreas húmedas.	P	P	B	E

Tabla 5.1 Análisis comparativo entre las bandas del MSS para la discriminación de diferentes clases en una imagen. E = excelente, B = pobre y P = pobre.

Las principales aplicaciones para las que fueron proyectados los canales del mapeador temático (TM), así como aquellas que se han establecido en base a la experiencia son las siguientes:

- TM1: Estudios de batimetría de agua limpia, mapeo de cuerpos de agua y aguas costeras, sedimentos en suspensión, diferenciación entre suelo y vegetación, diferenciación entre tipos de vegetales indicando la concentración de caroteno y clorofila y eventualmente diagnóstico de la presencia de iones férricos y de manganeso.

- TM2: Caracterización de la vegetación sana (pico del verde), posibilidad de diagnóstico de la presencia de óxidos de fierro (limonita).
- TM3: Es el canal mas importante para el estudio de la vegetación. Es una banda de absorción de la clorofila, por lo que se utiliza para separar las zonas con vegetación de aquellas sin vegetación. La diferenciación de las especies vegetales, asociadas a la banda de absorción de la clorofila, puede ser realizada (división entre las bandas 3/4).
- TM4: Estudios de volumen de biomasa y delineación de cuerpos de agua y alguna posibilidad de detección de la presencia de iones férricos. Sirve también para establecer la geología y la geomorfología.
- TM5: Ofrece información con respecto al contenido de humedad de la vegetación, tipo de cultivo, humedad del suelo y vegetación con "stress" hídrico,. Posibilidad de detección de limonita (cociente de las bandas 5/1 y 5/2) y de compuestos con hidróxilos y carbonatos (cociente de bandas 5/7). También permite la separación entre nubes y nieve y el mapeamiento de la geología y la geomorfología de la región.
- TM6: Auxilia en la clasificación de la vegetación, el análisis de "stress" de la misma, la observación sobre humedad del suelo y las propiedades térmicas del suelo, rocas, vegetación y agua. Discriminación de rocas silicatadas.
- TM7: detección de minerales con hidróxilos (Al-OH, Mg-OH) e carbonatos. Indicada para mapeo de áreas con alteración hidrotermal (cociente de las bandas 5/7) y formaciones rocosas (geomorfología).

Cuando se realiza la fotointerpretación de una imagen es indispensable contar con llaves de análisis que permitan identificar los diferentes objetos que se encuentran en una escena. Una llave es integrada a partir de los elementos de análisis de una imagen.

Las llaves de análisis describen todos los elementos que deben de poseer las clases. De esta forma, la interpretación representa un proceso de identificación paso a paso, en que el técnico asigna el objeto a las clases probables y elimina paulatinamente las escogidas erróneamente.

La tabla 5.2 muestra algunas llaves de análisis para estudios de uso de suelo. Dichas llaves son integradas tomando en cuenta únicamente tres elementos de análisis en la imagen que son: Tonalidad, comportamiento espectral y textura.

CLASE	TONOS DE GRIS		TEXTURA
	TM3 MSS5 Spot2	TM4 MSS7 Spot3	
Vegetación natural.	O	C	Gruesa.
Agua limpia.	O	O	Lisa.
Agua sucia.	M	O	Lisa.
Suelo seco.	C	C/O	Gruesa a lisa.
Suelo húmedo.	O	O	Mezclada.
Vegetación quemada.	M	O	
área agrícola.	M/O	C	Lisa.
Caminos.	C	O	Lineal.
Pastos.	C/M	M/C	Lisa lustrosa.
Zona de reforestación.	O	C/M	Lisa con sombra y límites demarcados.
Arena (playas).	C	C	Lisa.
sombra.	O	O	Lisa.
nube	C	C	
área urbana.	C	O	Indefinido con delimitación de calles.
área agrícola en desarrollo.	M	O	Lisa.
Cultivo seco.	C	C	Lisa.

Tabla 5.2 Llaves de análisis para identificación de clases de uso de suelo, obtenidas a partir de estudios en imágenes Landsat TM y correlacionadas a sensores MSS y Spot. C = Claro, M = Medio y O = Oscuro.

### 5.3 Fotointerpretación de imágenes a color y falso color

Todas las impresiones visuales de los objetos presentan alguna graduación de color. Esto implica que casi todos los objetos que son vistos tienen una sensación de color asociada con ellos.

El color, en las imágenes fotográficas, pueden contribuir enormemente para la identificación del objeto juntamente con la forma, tamaño y características de la textura.

El color tiene un fuerte impacto en la habilidad humana de detectar objetos. Los cuerpos que tienen contraste con su vecindad, son mas fácilmente detectados en las fotografías a color.

Como se mencionó en el capítulo 4 el ojo humano puede distinguir cerca de 400,000 colores diferentes (Hearn and Baker, 1988).

Esta capacidad permite la pronta discriminación de los objetos en la naturaleza.

Una imagen a color puede ser clasificada en dos tipos que son: color natural o falso color. En las imágenes en color natural, como su nombre lo dice, se muestran los objetos con las tonalidades y matices que son apreciadas por el ojo humano en la naturaleza. Las imágenes en falso color, como fue visto, muestran los objetos en matices, tonos y sombras que dependen de la combinación de bandas que fue empleada para su elaboración. Generalmente se muestra información mas allá de la porción visible del espectro hacia el infrarrojo reflejado.

En las fotografías a color puede no emplearse el estereoscopio para la extracción de la información. La simple interpretación de ellas permite que informaciones, tales como: uso de suelo, ciudades, carreteras, delimitación de cuencas, trazado de los canales de los ríos, caracterización de áreas agrícolas, de áreas de vegetación natural o de reforestación, zonas de quema de vegetación, etc., pueden ser retiradas de las fotos. Esto hace el trabajo del fotointérprete mucho mas rápido y menos cansado. sin tener perdidas en la precisión con respecto a las fotografías en blanco y negro.

Unicamente cuando se desea caracterizar cosas tales como el relieve, es que se necesita el uso de estereoscopios para la interpretación.

Los canales abandonados y sus regiones asociadas son mas fáciles de delinear y mapéar en detalle mediante el uso de imágenes a color que en blanco y negro.

Muchos contaminantes del agua pueden ser detectados mediante imágenes a color, debido a la coloración del agua.

Comparándose las imágenes en color natural con el compuesto en falso color mas común (también llamado infrarrojo falso color y que se genera mediante la combinación del canal verde, rojo e infrarrojo) se tiene:

a) Imágenes en color natural.

- Son más útiles para estudios de las condiciones subacuáticas.
- Tienen demostrado ser mas efectivas en estudios extensivos de la floresta tropical.

- Para la misma altura de toma la dispersión atmosférica y la absorción causan mayores pérdidas de información en la porción azul del espectro que en el infrarrojo, lo que se refleja en las imagen en color natural con respecto al infrarrojo falso color. Estas pérdidas aumentan con el aumento de la altura.
- Son superiores a los otros tipos de imágenes para la interpretación de las diferencias en los tipos de suelo.
- Las imágenes en color natural son mejores para estudios de penetración en aguas someras y proporcionan una mejor localización de las barras de los ríos. Esto se debe a que las barras son expuestas únicamente durante los períodos de niveles de agua extremadamente bajos, y su localización generalmente exige penetración en el agua.

b) Imágenes en infrarrojo falso color.

- Es mas adecuado para delinear superficies de agua.
- Es superior para ciertos estudios de vegetación incluyendo diferenciación de especies y mapeo de áreas con baja densidad de vegetación, detección de "stress" y diferenciación entre vegetación sana y enferma.
- Proporciona algunas ventajas en la demarcación de límites de vegetación y drenaje.
- Enfatiza las variaciones de la humedad del suelo y las diferencias en la vegetación de pantano y agua.
- Donde la vegetación y la humedad del suelo son parámetros de influencia, las imágenes infrarrojo falso color son superiores a las de color natural.
- En general las imágenes infrarrojo falso color son consideradas mejores que los otros tipos de imágenes porque proporcionan un contraste tonal mas preciso, que realza las regiones del terreno.
- Diversos estudios mostraron que los compuestos en infrarrojo falso color proporcionan significativamente mas información del tipo de vegetación que las fotografías pancromáticas convencionales, especialmente cuando se intenta localizar e identificar aquellos tipos de vegetación que tienen características similares. La interpretación de fotografías pancromáticas y compuestos infrarrojo falso color presentaron una exactitud de 77% y 89% respectivamente. Adicionalmente el análisis de las imágenes infrarrojo falso color requirió aproximadamente un 25% menos de tiempo para ser interpretadas que las fotos en blanco y negro.
- Las imágenes infrarrojas son muy útiles para la evaluación de las condiciones de la vegetación acuática fluctuante, crecimiento de algas y vegetación de la línea de costa donde la determinación de la presencia o ausencia de vegetación es importante. Son útiles

también para identificar áreas donde las cargas de nutrientes son altas.

En el compuesto infrarroja falso color las características observadas se asemejan a las de una fotografía tomada con película de color sensible al infrarrojo, de la siguiente manera:

- La vegetación con mayor contenido de clorofila, presenta diferentes tonos de rojo.
- Las áreas sin vegetación como zonas urbanas y suelos agrícolas sin cultivo, serán observadas en tonos grises.
- Los cuerpos de agua serán observados en color negro, si son profundos y el agua es clara. Estos se verán en diferentes tonos de azul cuando la profundidad es baja y los sólidos en suspensión es apreciable.
- Ciertos pastizales y zonas con escasa vegetación, en donde el tono del suelo tiende a predominar sobre la vegetación, es observado en color crema o tonalidades muy claras.
- Las sombras, producidas por las formas del relieve o por nubes, generalmente son de color negro.
- Las nubes se observan en color blanco.
- Las áreas de quema de vegetación aparecen en tonalidades verde oscuro, lo que las hace resaltar considerablemente con respecto a los objetos de su alrededor.

## BIBLIOGRAFIA

- CNES, 1988, SPOT instrumento de gestión y decisión, Francia, CNES, 1a. ed., 55 pp.
- Dalton, M.V., 1988, Interações da radiação solar com a vegetação, Brasil, INPE, 1a. ed., 36 pp.
- Gonzalez, R.C. and Wintz, P., 1987. Digital image processing, USA, Addison Wesley Publishing Company, 2a. ed., 503 pp.
- Hearn, D. and Baker, M.P., 1988, Gráficas por computadora, México, Prentice Hall Hispanoamérica, Trad. Vega Fagoaga, J.C., 1a. ed. en inglés, 1a. ed. en español, 379 pp.
- Hoffer, R.M., 1978, Biological and physical considerations in applying computer aided analysis techniques to remote sensor data, en: Remote sensing: the quantitative approach, USA, ed. por Swain, P.H. and Davis, S.M., McGraw Hill International Book Company, 1a. ed., 227 - 289 p.
- INPE, 1981, Considerações básicas sobre a metodologia de interpretação visual de imagens LANDSAT, Brasil, INPE, 12 pp.
- Mascarenhas, N.D.A. e Vasco, F.R.D., 1989, Processamento digital de imagens, Argentina, Kapelusz, IV Escola Brasileiro Argentina de Informática, 2a. ed., 354 pp.
- Novo, E.M., 1988, Sensoramento remoto: principios y aplicaciones, Brasil, INPE, 1a. ed., 290 - 315 p.
- Richards, J.A., 1986, Remote sensing digital image analysis: an introduction, Alemania, Springer-Verlag, 1a. ed., 281 pp.
- Rogers, D.F., 1986, Procedural elements for computer graphics, USA, McGraw Hill Book Company, 1a. ed., 433 pp.
- Sabin, F.F., 1978, Remote sensing: principles and interpretation, USA, W.H. Freeman and Company, 1a. ed., 426 pp.
- Sanvicente, H.S., 1990, Percepción remota, México, 4 pp, no publicado.
- Sausen, T.M., Pereira, M.D.B. e De Almeida, W.S., 1989, Sensoriamento remoto para estudos qualidade da água: conceitos metodológicos e exemplos de aplicações, Brasil, en preparación.
- Solis, A.Y., 1991, Despliegue de imágenes de satélite en tercera dimensión, México, ITZ, Tesis profesional, 195 pp.
- Sorrenti, L.A., 1989. Sistemas de sensoriamento remoto e sistemas sensores, Brasil, INPE, 1a. ed., 19 pp.

Sorrenti, L.A., 1989, Sistemas Landsat e Spot, Brasil, INPE, 1a. ed., 55 pp.

SPOT Image, 1986, Grille de référence SPOT (GRS), Francia, SPOT Image.

SPOT Image, 1989, Catálogo de los productos SPOT y de los servicios, Francia, SPOT Image, 1a. ed., 55 pp.

Steffen, C.A., Lorenzetti, J.A., Stech, J.L. e Souza, R.C., 1981, Sensoramento remoto: principios físicos; sensores e produtos e sistema Landsat, Brasil, INPE, 1a. ed., 81 pp.

III Curso internacional de sensoramiento remoto, apuntes, Sanvicente, H.S.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**



**Metodología para la clasificación de  
uso actual del suelo mediante el  
empleo de imágenes Landsat**

**1a. Versión  
1a. Edición**



**IMTA**  
**INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos  
Subcoordinación de Tecnología informática**

**Octubre de 1995**



## METODOLOGIA PARA LA CLASIFICACION DE USO ACTUAL DEL SUELO

Esta metodología de clasificación de uso actual del suelo se formó en el Departamento de Percepción Remota para llevar a cabo la clasificación de uso actual a partir de las imágenes de los Satélites LANDSAT, procesados mediante el sistema de clasificación automática de imágenes de satélite (SIADIS), propiedad de la CPNH.

La primera versión de esta metodología se generó en 1978 cuando se planeaba llevar a cabo un inventario de recursos naturales a nivel nacional mediante el uso de imágenes LANDSAT. Posteriormente se decidió estudiar sólo las regiones donde la Comisión realiza proyectos específicos de planeación. El primer sitio de aplicación fué la cuenca baja del Río Pánuco, donde se identificaron los siguientes usos: Agricultura, considerando los cultivos de caña, cultivos varios y huertos; pastizales y potreros; selva baja, mediana y alta; bosques, matorral y cuerpos de agua.

A partir de este primer sitio de aplicación, se definieron 6 unidades de clasificación de Uso Actual del Suelo que comprenderían las futuras zonas de análisis: cultivos, selva, bosques, matorral, pastizal y cuerpos de agua, entre otros. Es conveniente considerar aquí, que es factible incrementar el número de unidades de clasificación, en base a los requerimientos del proyecto a desarrollar.

La mejora constante del sistema SIADIS ha originado reformas dentro del proceso metodológico seguido inicialmente; dichas reformas se incluyen en esta nueva versión. Las actividades comprendidas dentro de la metodología se muestran a continuación:

- |  |   |
|--|---|
| <sup>1</sup> -DEFINICION DE AREAS DE ESTUDIO | <sup>2</sup> -PEDIDO AL EROS DATA CENTER  |
| <sup>3</sup> -TRANSPORTE                     | <sup>4</sup> -UBICACION DE LA INFORMACION |
| <sup>5</sup> -REVISION DE LA INFORMACION     | <sup>6</sup> -APOYO A LA INTERPRETACION   |
| <sup>7</sup> -DEFINICION DE PARAMETROS       | <sup>8</sup> -PREPROCESADO                |
| <sup>9</sup> -REVISION                       | <sup>10</sup> -INTEGRACION DE PARAMETROS  |
| <sup>11</sup> -PROCESADO                     | <sup>12</sup> -ELABORACION DE RUTAS       |
| <sup>13</sup> -OBTENCION DE MUESTRAS         | <sup>14</sup> -VACIADO DE DATOS           |
| <sup>15</sup> -ANALISIS DE RESULTADOS        | <sup>16</sup> -DELIMITACION DE FRONTERAS  |
| <sup>17</sup> -RESPALDO DE RESULTADOS        | <sup>18</sup> -PRESENTACION               |
| <sup>19</sup> -COMPARACION Y ACTUALIZACION   | <sup>20</sup> -DIFUSION                   |

En los párrafos siguientes se describen cada una de las actividades anteriores.

#### DEFINICION DEL AREA DE ESTUDIO:

Consiste en la tarea de señalar las zonas a examinar con el fin de que la interpretación se realice en forma coordinada cubriendo las áreas definidas. Esta función comprende también la actividad de seleccionar las imágenes que contengan la nubosidad mínima y que cubran toda la zona de interés, previa revisión de la información disponible en el EROS Data Center. (consulta de microfichas).

## PEDIDO EOSAT

Consiste en solicitar las imágenes requeridas al Centro de referencia, indicando el medio de transporte, destino y alguna particularidad de la información, misma que debe solicitarse con un tiempo estimado de aproximadamente dos meses, con el fin de tenerla a tiempo para el trabajo. Es necesario ~~considerar~~ que en la CPNH se dispone de un cubrimiento total del país con imágenes LANDSAT para los años 1979 y 1980, se tiene también algunas tomas de 1981.

## TRANSPORTE:

Consiste en establecer el conducto adecuado para que la información llegue con prontitud, cuidando los detalles de almacenaje, impuestos aduanales, pago de fletes, etc.

## UBICACION DE LA INFORMACION

Es la operación de situar la información en el plano general de cubrimiento de satélite de la República.

## REVISION DE LA INFORMACION

Consiste en verificar que las cintas y las fotografías (imágenes), correspondientes se encuentren en buenas condiciones. Además se probará que se cuenta con el apoyo previo necesario para la elaboración de la interpretación; en caso de carecer de él, se llevará a cabo.

## APOYO A LA INTERPRETACION

Es la tarea en la que mediante el análisis de la imagen fotográfica y utilizando el conocimiento previo de campo o de otra índole se definen unas zonas llamadas subimágenes de análisis, las cuales constituyen la base para la iniciación de la interpretación automática en cada imagen. La definición de Subimágenes se detalla en el apéndice 1.

## DEFINICION DE PARAMETROS

Consiste en la operación para determinar los datos que serán empleados en la interpretación automática, tales como los centros y radios de cobertura que definen las firmas espectrales detectadas. Las operaciones que comprenden actividades de la computadora, son las siguientes:

- a) La realización de clasificaciones no supervisadas
- b) Definición de los centros  $C_i$  y de los radios  $R_i$  correspondientes.
- c) Realización de clasificaciones supervisadas

## PREPROCESADO

Es la operación donde la información de las zonas de apoyo o subimágenes de análisis son clasificadas en el computador, empleando los datos obtenidos en la operación anterior de DEFINICION DE PARAMETROS.

## REVISION

Es la tarea donde se examinará el resultado obtenido por el computador para las subimágenes seleccionadas, con el objeto de calificar la exactitud y eficiencia de los parámetros escogidos para ajustarse a la realidad. Las actividades de este trabajo se describen en el apéndice 2.

## INTEGRACION DE PARAMETROS

Consiste en la integración de los diferentes patrones seleccionados (firmas espectrales), con sus parámetros correspondientes para extrapolarlos a toda la imagen analizada.

Para este proceso se unen grupos de firmas "parecidas" y se determina la región característica de cada clase.

El proceso seguido se describe en el apéndice 3.

## PROCESADO

Es la operación de correr una clasificación supervisada de toda la imagen estudiada en el computador, empleando su almacenamiento ya disponible en disco.

## ELABORACION DE RUTAS

Es la tarea que consiste en el diseño de los recorridos a seguir en las tareas de verificación. Estas rutas se elaborarán sobre la carta de Aeronavegación escala 1:100 000 la cual se empleará durante los recorridos aéreos. Las actividades y pasos necesarios se describen en el

#### apéndice 4.

##### OBTENCION DE MUESTRAS

Es la operación por la que se captarán los datos fotográficos que servirán para definir la fidelidad o ajuste a la realidad de la interpretación hecha. El proceso constará de las operaciones descritas en el apéndice 5.

##### EL VACIADO DE DATOS

Es lá actividad donde se pondrá la información tomada en la etapa anterior en planos cartográficos, debidamente localizada, con el fin de realizar la siguiente etapa de análisis. En el apéndice 6 se describen las actividades correspondientes.

##### ANALISIS DE RESULTADOS

Consiste en la comparación de los resultados de campo con el resultado del computador. De esta etapa se extrae el valor de calificación de la interpretación realizada, que deberá ser por lo menos del 85% de aciertos. En caso de que no cumpla con dicho requisito, se repetirá el proceso. El apéndice 7 describe el proceso de análisis.

##### DELIMITACION DE FRONTERAS

En esta etapa se obtienen los límites físicos reales que determinan una cierta región de una imagen; por ejemplo: límites estatales, límites de una cuenca hidrológica, etc. Consultar apéndice 8.

## RESPALDO DE RESULTADOS

Consiste en la operación de conservar en una cinta magnética la información obtenida en el proceso de clasificación, considerando además su delimitación de fronteras y sus firmas espectrales detectadas. El apéndice 9 contiene la justificación de esta actividad.

## PRESENTACION

Consiste en el ordenamiento e integración de los resultados obtenidos con el fin de que tengan una presentación útil e inmediata a cualquier posible usuario.

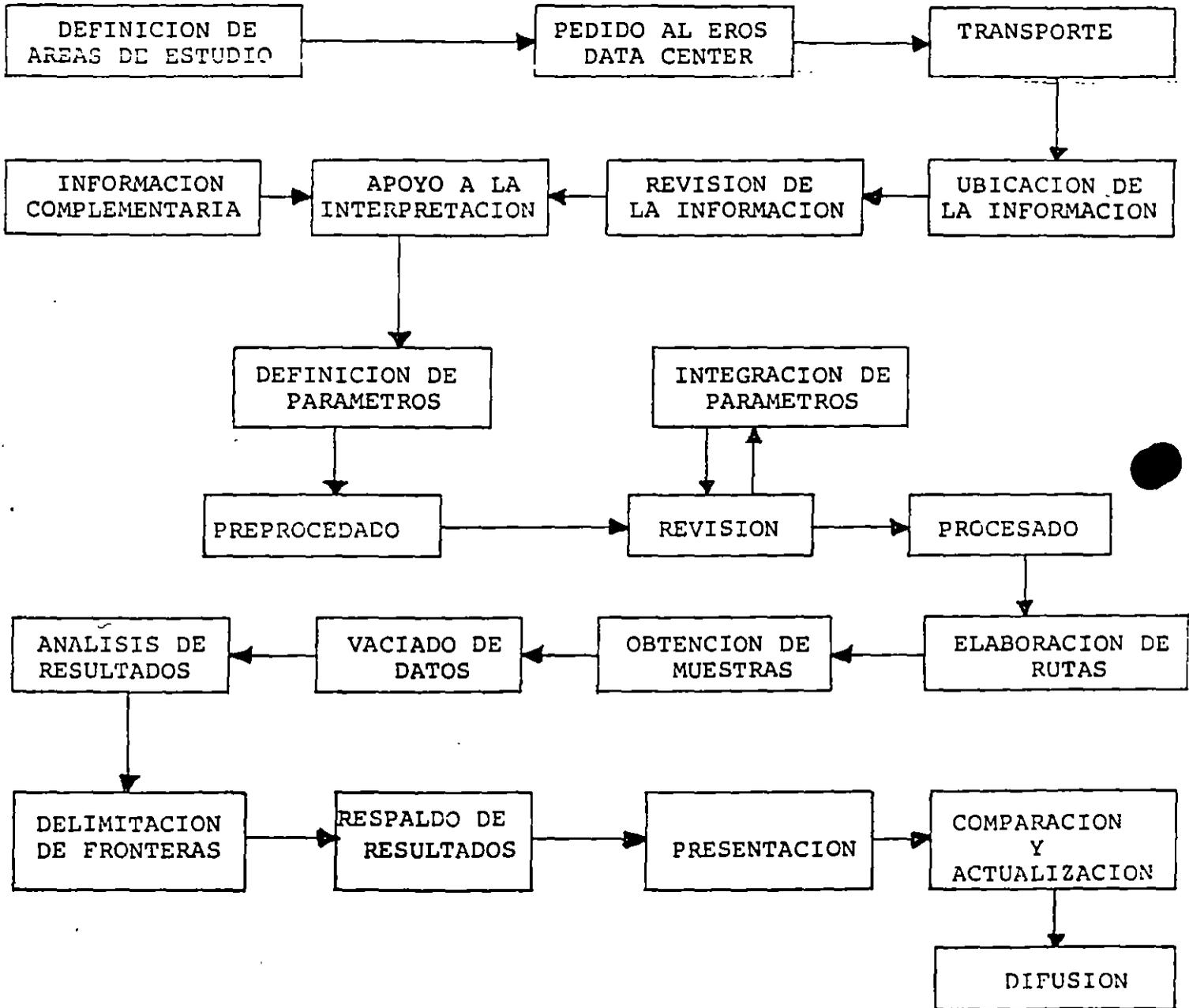
## COMPARACION Y ACTUALIZACION

Es la labor de superponer interpretaciones sucesivas, así como actualizar los datos obtenidos mediante nuevas interpretaciones.

## DIFUSION

Es la tarea de hacer llegar a todos los usuarios interesados la información obtenida en los proyectos desarrollados de clasificación de uso actual del suelo.

DIAGRAMA DE ACTIVIDADES EN LA METODOLOGIA  
PARA LA CLASIFICACION DE USO ACTUAL DEL SUELO



## APENDICE 1

### APOYO:

Se entiende por subimagen una porción "pequeña" de la imagen. Dicha porción puede ser irregular, no necesariamente un rectángulo, puede ser formada uniendo varios rectángulos de manera que no exceda el tamaño límite para una subimagen.

Las subimágenes consideradas pueden ser de análisis o de prueba.

#### A) SUBIMAGENES DE ANALISIS

Se elige un conjunto de subimágenes, mismas que servirán de base para la clasificación de la imagen completa de acuerdo con los siguientes criterios:

- a) Representatividad: Esto significa que en todo el conjunto de subimágenes deben aparecer todas las clases que pretende analizar, y de manera representativa, esto es, para cada clase debe haber una subimagen (al menos), en la cual dicha clase ocupe una tercera parte como mínimo.
- b) Verificabilidad: Por esto se entiende que en la subimagen deben aparecer suficientemente contrastadas las clases, a fin de que puedan ser más fácilmente separadas e identificadas.

El número total de estas subimágenes es arbitrario (aunque se estima que para clasificar unas 20 clases en una imagen, basta de 5 a 6). Se recomienda que cada subimagen no deberá exceder las 300 líneas por 300 columnas.

#### B) SUBIMAGENES DE PRUEBA

Se escogen también otras dos subimágenes que servirán para probar la bondad de la clasificación; esto se hará pensando primordialmente en el criterio b) anterior. El tamaño de estas subimágenes deberá ser de aproximadamente 500 líneas por 800 columnas. Las subimágenes se trabajarán en escala de 1:25 000 ó 1:50 000, dependiendo de las zonas estudiadas.

## APENDICE 2

### REVISION DE LAS SUBIMAGENES DE ANALISIS

Este proceso comprende básicamente la revisión de resultados obtenidos para una subimagen de análisis dada, comparando estos, con la porción fotográfica de la imagen correspondiente y al mismo tiempo con la información periférica disponible.

#### EL PROCESO DE ANALISIS COMPRENDE

- 1.- Delimitación exacta sobre la impresión en papel de la subimagen seleccionada, con los caracteres alfanuméricos que identifican los usos de suelo clasificados (empleo de colores).
- 2.- Comparación del inciso anterior con la porción fotográfica (ampliada), correspondiente a una escala 1:500 000 o 1:250 000.
- 3.- Mediante un proceso de fotoidentificación y fotointerpretación se lleva a cabo una estimación cualitativa y cuantitativa de los rasgos y asociación de geoformas identificadas en la subimagen de análisis, determinando de esta manera la validez de los resultados logrados.
- 4.- Cuando la distribución de valores espectrales en

en la subimagen no es correcta o bien, se requiere de mayor precisión, se vuelve a sujetar la subimagen en cuestión a nuevos procesos de clasificación no supervisada y supervisada, hasta lograr una distribución acorde con las características reales existentes en el uso del suelo.

5.- Una vez obtenida una correcta clasificación de las subimágenes seleccionadas, se procede a elaborar, con los valores espectrales de cada subimagen, un archivo general de valores para efectuar el proceso completo de la imagen LANDSAT en cuestión.

## APENDICE 3

### INTEGRACION DE PARAMETROS

Este punto trata de la unión de los grupos de firmas (1 por cada subimagen de análisis), en un sólo conjunto de firmas utilizable para clasificar toda una imagen. El procedimiento aquí es similar al descrito en el ANEXO 2, en particular, el criterio de semejanza ahí definido es válido aquí también excepto por la posible variación del factor  $F$ .

#### 1.- Obtención de datos estadísticos:

Empleando los datos obtenidos en la definición de parámetros se hace un recuento de los elementos pertenecientes a cada clase para obtener así el número de elementos de cada clase y al mismo tiempo su vector de desvia

ción estándar. El proceso anterior se realiza para cada subimagen. Al finalizar este proceso, se tienen los datos suficientes para proseguir con la siguiente etapa.

## 2.- Agrupación de firmas

Esta actividad se lleva a cabo en el siguiente orden:

- 2.1 Se ordenan las clases obtenidas de mayor a menor según el número de elementos, de acuerdo a los datos obtenidos en el inciso # 1.
- 2.2 Se toma la clase más numerosa (entre las que restan por agrupar).
- 2.3 Se identifican las clases semejantes a la elegida en 2.2 y se agrupan junto con ella.
- 2.4 La agrupación que se menciona en 2.3, se realiza tomando como firma de esta agrupación, el promedio pesado de las firmas y como radios los valores.  $\forall i = F \nabla i$  en donde  $F$  es un factor mayor o igual a 1 y  $\nabla$  es el promedio pesado de los vectores desviación estándar de las clases agrupadas.
- 2.5 Márquese las clases ya agrupadas.
- 2.6 Repítase el proceso a partir de 2.2 hasta agotar las clases por agrupar.

## APENDICE 4

### ELABORACION DE RUTAS PARA LA VERIFICACION DE RESULTADOS

Dentro del desarrollo de esta actividad se contempla la planeación de recorridos tanto terrestre como aéreos, considerando las siguientes tareas:

- 1.- Los recorridos a efectuarse tendrán una duración de una a dos semanas, dependiendo del área por verificar.
- 2.- Para viajar la zona de estudio determinada, se revisará previamente la situación meteorológica imperante en la zona por visitar, asegurando con ello la satisfacción de los objetivos de la verificación.
- 3.- El programa del recorrido terrestre se diseñará en función de los puntos por visitar y los caminos de acceso disponibles en la región estudiada. Su diseño se hará sobre planos cartográficos de la SAHOP, DEFENSA o INEGI. Durante estos recorridos se tratará de obtener el mayor número posible de información fotográfica.

- 4.- Para el recorrido aéreo se establecieron transectos de aproximadamente 100 km de longitud, entre poblaciones o puntos bien definidos geográficamente, de tal manera que cada imagen o región estudiada quede suficientemente cubierta. Se ha establecido de acuerdo a un estudio de factibilidad, que una imagen queda suficientemente cubierta cuando cuenta por lo menos con 120 fotografías y unos 60 puntos de observación grabada. Los detalles de esta actividad se descubren en el anexo 6.
  
- 5.- El programa de vuelo requerido se llevará a cabo durante la noche anterior, después de analizar la zona cubierta e identificar los puntos de mayor interés, de tal manera que se asegure el hecho de contar con las 120 fotografías necesarias. El programa de vuelo definido se analizará detalladamente con el piloto en la misma mañana de vuelo.
  
- 6.- Es conveniente entrar en contacto y mostrar a los técnicos residentes de la SARH, para la región por verificar, el programa del recorrido terrestre y aéreo por efectuar, con el objeto de iniciar así la identificación de rasgos fisiográficos de interés en la zona, aprovechando

así el conocimiento detallado del terreno de los técnicos locales de la SARH.

## APENDICE 5

### OBTENCION DE MUESTRAS EN EL TERRENO

Esta actividad consiste básicamente en la obtención de puntos del terreno dentro de una imagen analizada, con el objeto de verificar la calidad de la interpretación automática obtenida. Como se mencionó en el apéndice anterior, por cada imagen analizada se tomará un número definido de puntos de muestreo distribuidos en las rutas de verificación consideradas.

Para los recorridos de verificación terrestre se tratará de obtener el mayor número de puntos posibles, definiendo su correcta posición geográfica sobre los mapas considerados como referencia. Para cada punto se requerirá al menos de una toma fotográfica (orientada), y de una descripción sobre las condiciones del paisaje existentes, las cuales se grabarán.

Durante los recorridos de verificación aérea, para cada punto considerado, se tomarán fotografías oblicuas de 70 y 35 mm, acompañadas estas con la descripción verbal grabada sobre los tipos de vegetación predominantes (unidades de clasificación), considerando al mismo tiempo la inclusión de otros rasgos fisiográficos relacionados con las formas o accidentes del terreno, que ayu-

de a una mejor identificación del paisaje existente.

La toma de fotografías aéreas se efectuará cada 3 o 5 minutos dependiendo de las condiciones del paisaje existente en cada trayecto. Además, se sacarán estas a través de las ventanillas del avión disponible, manteniendo un control sobre los siguientes parámetros:

a) Posición de la cámara respecto al terreno (fotografías oblicuas cortas).

b) Altura y velocidad del avión.

El control de estos parámetros permitirá definir y controlar la superficie del terreno cubierta por cada foto, así como la identificación de geoformas existentes.

Como el objeto de registrar las actividades desarrolladas durante un recorrido aéreo se requiere llevar una bitácora para cada vuelo efectuado.

A continuación se describen las actividades en vuelo de los verificadores\*, así como las características para el manejo de la cámara en el avión disponible.

#### A) ACTIVIDADES EN VUELO DE LOS VERIFICADORES

1.- Registrar el tiempo de inicio de la primera toma así como cualquier interrupción de esta.

\*Los verificadores deben ser las personas que llevan a cabo los procesos de análisis de las imágenes LANDSAT.

- 2.- Anotar la altitud para cada toma o para cada grupo de estas.
- 3.- Registrar la dirección del trayecto de vuelo, su tiempo de duración y anotar cualquier cambio de dirección en el momento en que se registre, así como la velocidad de vuelo.
- 4.- Efectuar la descripción de los puntos sobresalientes.

#### B) MANEJO DE LA CAMARA EN EL AVION<sup>\*</sup>

- En esta actividad se describen los requerimientos para el manejo de cámaras HASSELBLAD.
- Durante el recorrido aéreo, el camarógrafo colocará la cámara de tal manera que a través de la ventanilla del avión disponible tome fotografías oblicuas cortas (no comprendiendo la línea del horizonte).
- El equipo fotográfico a emplear en las verificaciones, tiene la particularidad de que ninguna de sus partes requiere ser forzada, por ejemplo: si un lente, un almacenador de película o cualquier otro componente del equipo no es posible desmontarse con suavidad (sin forzarla), la razón será que se está cometiendo algún error y es posible que de continuar forzando la pieza, se puede dañar el equipo.

\* actividades a seguir en caso de no contar con camarógrafo.

- A los lentes (objetivos), no se les deben quitar sus protectores antes de usarlos, y es recomendable limpiarlos constantemente con el papel especial para este efecto.
- A los almacenadores no se les debe quitar la tapa protectora de la película, hasta no encontrarse montados en el cuerpo de la cámara. Para retirar un almacenador es necesario ponerle su tapa protectora, pues de otra forma no será posible quitarlo.
- Como montar los lentes de la cámara HASSELBLAD  
Los lentes se instalan en el cuerpo de la cámara, haciendo coincidir las dos indicaciones rojas existentes (la del lente y la del cuerpo de la cámara), y girando el lente suavemente a la derecha. Si lo anterior no es posible consulte con alguno de los camarógrafos, pues el problema se puede deber a que los resortes del obturador se encuentran desamordazados. Para retirar los lentes de la cámara será necesario tenerla lista para tomar la siguiente impresión, entonces se oprime el botón que está en el extremo inferior derecho del frente de la cámara y suavemente se gira el lente hacia la izquierda.

VACIADO DE DATOS

Esta etapa del proceso metodológico comprende las siguientes actividades:

- 1.- Elaboración de un informe de campo que contenga los datos siguientes: fecha de la visita, zona de verificación, personas que lo efectuaron, resumen de actividades, objetivos logrados, problemas encontrados y soluciones propuestas.
- 2.- Revelado y clasificación de las fotografías tomadas
- 3.- Examen de la información fotográfica obtenida con el fin de determinar que tomas se emplearán en el muestreo directo de verificación (calidad fotográfica).
- 4.- Ubicación de las fotografías oblicuas aéreas de 70mm sobre algún plano cartográfico disponible como: Cartas de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos esc. 1:1000 000, cartas de la SAHOP o de la Secretaría de la Defensa Nacional. Dentro de esta etapa, también se considera el vaciado de la información de campo grabada para cada punto de verificación considerado.

5.- Vaciado de los datos de campo sobre un desplegado de la imagen a escala 1:250 000, formado éste mediante listados con caracteres alfanuméricos:

- a) Trazado de las líneas de vuelo desarrolladas
- b) Ubicación de los puntos verificados.

## APENDICE 7

### ANALISIS DE DATOS Y COMPARACION DE RESULTADOS

La comparación de resultados se lleva a cabo entre los puntos localizados sobre los transectos establecidos y la información de campo obtenida, consistente esta en la información fotográfica aérea captada y las descripciones del paisaje grabadas. El procedimiento de análisis consiste en checar cada punto seleccionado, mediante la consideración de un criterio de fotointerpretación consistente en realizar una asociación de geofor<sup>mas</sup> del terreno, las cuales a su vez se correlacionan tanto con los tonos registrados sobre la presentación fotográfica (escala 1:500.000 o 1:250 000), de la imagen LANDSAT correspondiente, así como las fotografías oblicuas tomadas en el campo. Cada punto analizado se identifica como acierto o error de tal manera que la cuantificación total de puntos, debe arrojar un porcentaje superior al 85% de aciertos. En caso de no lograrse este objetivo, se procederá en primer lugar a rea-

grupar los valores espectrales detectados, y si el porcentaje es aún bajo, se procederá a una reclasificación de la imagen.

#### PRUEBA DE ACIERTO-ERROR

A partir de la comparación entre el contenido de los puntos verificados y sus correspondientes en los listados de la clasificación se obtiene un número  $N_a$  de aciertos y un  $N_e$  de errores. A partir de aquí se calcula el porcentaje de aciertos:

$$\text{Probabilidad de aciertos} \quad P = \frac{N_a}{N_t}$$

$$\text{En donde} \quad N_t = N_e + N_a$$

#### APENDICE 8

##### DELIMITACION DE FORNTERAS

La delimitación de fronteras consiste en definir la zona de interés mediante los vértices de un polígono irregular que circunscribe a aquella. Las coordenadas geodésicas de los vértices deben obtenerse de un mapa con proyección UTM y almacenarse en un archivo que se registra en el directorio de coordenadas del SIADIS. A este archivo debe aplicarse el proceso "Generación de un archivo de Límites", el cual contiene las intersecciones

de cada línea en la imagen con el polígono que define la zona. El último paso de la delimitación ("DELIMITACION DE UNA ZONA"), consiste en la extracción de la imagen de la información contenida únicamente dentro de los límites definidos por el archivo de límites.

En el caso en que se requiere eliminar traslapes entre imágenes, se construye primero un polígono tal que excluye el traslape entre la imagen a procesar y la imagen adyacente. Para este nuevo polígono se construye un archivo de límites, con las intersecciones para cada línea de la imagen, el cual es usado en el proceso "Delimitar una Zona" y así obtener su imagen sin la zona de traslape.

## APENDICE 9

### RESPALDO DE RESULTADOS

Como norma básica, los resultados de una clasificación supervisada de una imagen LANDSAT, así como la delimitación de sus fronteras correspondientes, al cumplir los requisitos de precisión establecidos, se deben respaldar o guardar en una cinta CCT para su conservación. Los mapas de niveles de gris por banda y los de las clasificaciones no supervisadas no se respaldan por considerarse estos como resultados preliminares, carentes de utilidad una vez que ya se tienen los resultados finales.

También en la cinta de respaldo de clasificación super  
visada se deben incluir el o los archivos con las fir-  
mas espectrales utilizadas en el proceso de clasifica-  
ción.

Las razones por las cuales se lleva a cabo el respaldo  
de información son las siguientes:

- a) Provesamiento de resultados en el sistema  
OPTRONICS para obtener impresiones fotográficas  
de ellos.
- b) Liberar espacio en el disco del computador
- c) Poder disponer nuevamente de estos resultados  
finales cuando sea necesario.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**Clasificación automática de imágenes**

**1a. Versión**

**1a. Edición**



**Coordinación de Tecnología de Sistemas Hidráulicos  
Subcoordinación de Tecnología informática**

**Ing. Héctor Sanvicente Sánchez  
Ing. Jaime Velázquez Álvarez**

**Octubre de 1995**

## INDICE

<u>INTRODUCCION</u> .....	1
1 <u>FUNDAMENTOS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES</u> .....	1
2 <u>CLASIFICACION SUPERVISADA</u> .....	7
2.1 Clasificación por el teorema de bayes .....	8
2.2 Clasificación por máxima verosimilitud .....	10
2.3 Clasificación por mínimas distancias .....	11
2.4 Clasificación por paralelepípedos .....	13
3 <u>CLASIFICACION NO SUPERVISADA</u> .....	14
3.1 Clasificación por isodata (migración de medias) .....	14
3.2 Clasificación por agrupación de dos pasadas (clustering) ..	16
4 <u>METODOLOGIAS DE CLASIFICACION</u> .....	18
4.1 Supervisada .....	18
4.2 No supervisada .....	21
<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	22

## INTRODUCCION

La clasificación de una imagen es el proceso mediante el cual se extrae información cuantitativa de los diferentes atributos ó recursos presentes en la misma (denominados clases). El resultado de la clasificación es un mapa temático donde se muestran los recursos existentes en el área de interés y con el que el analista puede responder a tres preguntas básicas: ¿ qué hay ?, ¿ cuánto es ? y ¿ en dónde está ?.

Existen diferentes algoritmos que permiten la clasificación de manera automática, auxiliándose de equipos de cómputo. Esta técnica se remonta a la década de los 50's y principios de los 60's, donde el advenimiento de la computadora digital y los intentos de modelar los procesos asociados con la inteligencia humana se combinaron para acelerar el desarrollo de la tecnología de análisis de datos llamada "reconocimiento de patrones".

Durante el mismo periodo, desarrollos significativos fueron hechos en el diseño de sistemas sensores, particularmente en la medición de energía en las longitudes de onda infrarrojas. Estos dos avances dieron origen al enfoque cuantitativo de la percepción remota, basado en la habilidad para procesar datos multispectrales de percepción remota en forma rápida y precisa.

A continuación se da una descripción de los conceptos usados en un sistema de reconocimiento de patrones. Posteriormente se presenta una interpretación geométrica del proceso de clasificación.

### 1 FUNDAMENTOS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES

Un patrón puede ser considerado como algo que tiene características espaciales ó geométricas, ya sea en dos ó tres dimensiones (Swain, 1978). Un ejemplo típico son las letras y los números en una página impresa. Si se quisiera implementar un programa de cómputo para reconocer letras por ejemplo, sería necesario que este realizara primero una serie de mediciones de cada patrón ó figura geométrica sobre la hoja y después comparar éstas con un conjunto de mediciones "típicas" almacenadas en un "diccionario de patrones". Una similitud del patrón medido con alguno de los patrones de letras del diccionario, clasificaría al patrón como tal.

Los aspectos cruciales del ejemplo anterior, y de cualquier sistema de reconocimiento de patrones, son el diccionario de datos y el método por el cual se van a comparar las mediciones del patrón con el contenido del diccionario. De hecho, una vez que las mediciones son hechas, la máquina no sabe que forma física tiene el patrón, luego entonces, es posible considerar al patrón como un conjunto bien definido de

mediciones, ya sea geométrico ó no.

La figura 1.5 muestra un modelo simple de un sistema de reconocimiento de patrones.

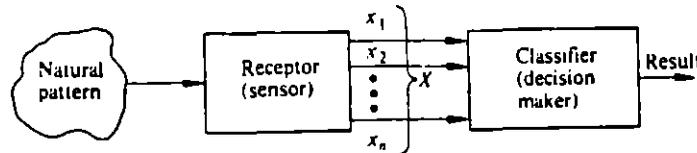


Figura 1.5 Diagrama de un sistema de reconocimiento de patrones.

En el caso de percepción remota, el receptor puede ser un barredor multiespectral ó un avión. La salida del receptor es un conjunto de n mediciones, cada una correspondiendo a un canal del barredor. Cualquier punto en el espacio de mediciones puede ser representado por el vector de medición X de n dimensiones:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{bmatrix}$$

donde  $X_i$  corresponde a la i-ésima medición para un elemento de resolución sobre el suelo (pixel).

El clasificador, implementado en una computadora, asigna el vector de medición a una clase de un conjunto de clases pre-especificadas, de acuerdo a una regla de clasificación; el resultado es una imagen temática.

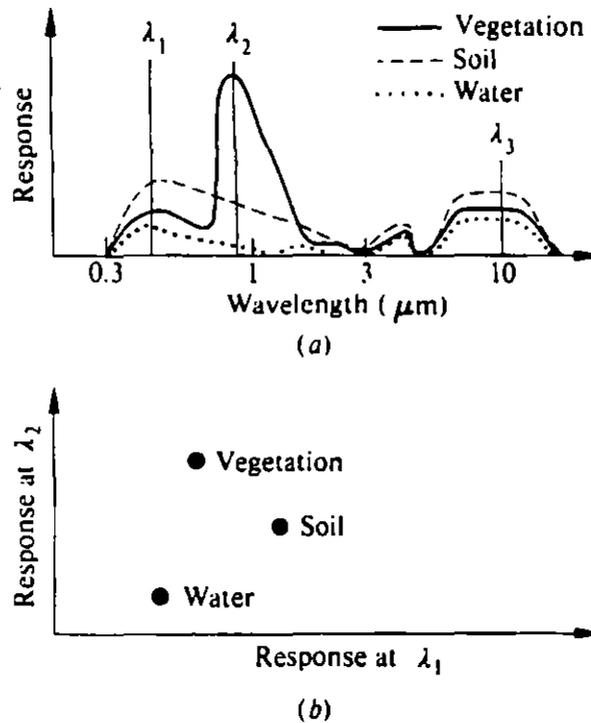
El proceso de clasificación de una imagen digital puede comprenderse mejor si se le

da una interpretación geométrica. Antes de presentarla se define el concepto de vector de datos.

Un vector de datos es un arreglo ordenado de números. Cada número en el arreglo representa un dato proveniente de una simple medición, tal como sucede con la respuesta en una banda de un barredor multiespectral para un punto sobre el suelo. Como ejemplo considere un vector de 4 dimensiones formado con las mediciones del barredor MSS:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 53 \\ 87 \\ 20 \\ 15 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{--- dato de la banda 1} \\ \\ \leftarrow \text{--- dato de la banda 3} \end{array}$$

Un vector de n dimensiones producido por un barredor multiespectral para cada elemento de resolución sobre el suelo (pixel) puede ser graficado en el espacio n - dimensional. Por simplicidad, en la figura 1.1 se muestra un ejemplo en dos dimensiones, en el cual se han seleccionado dos longitudes de onda para representar los vectores correspondientes a tres recursos: vegetación, suelo y agua.

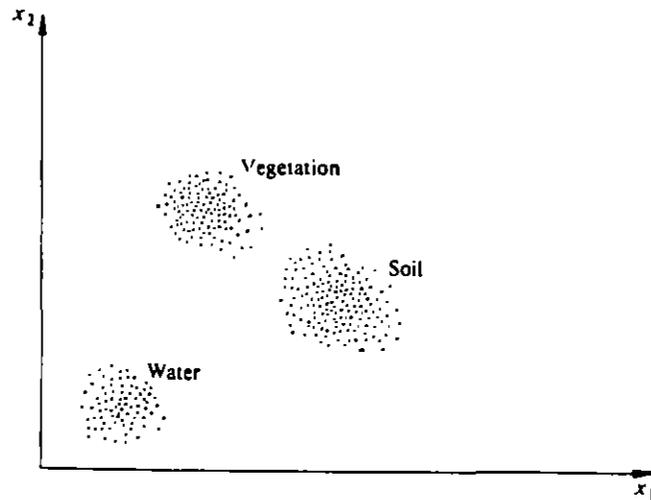


**Figura 1.1** (a) Respuesta espectral de tres clases y (b) su representación en el espacio bidimensional.

Hay otra característica de los datos de reflectancia que debe ser tomada en cuenta en el ejemplo teórico para presentar una adecuada descripción del enfoque cuantitativo.

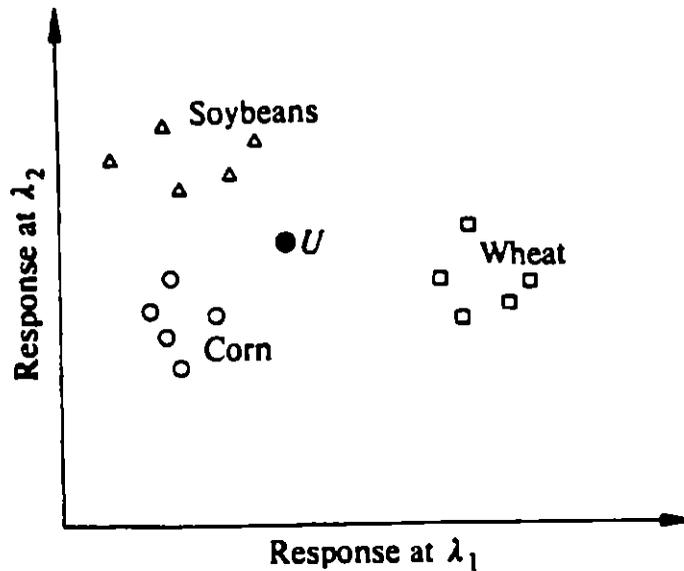
Mientras que los patrones de respuesta espectral de la vegetación tienden a ser el mismo, hay pequeñas variaciones entre los tipos de vegetación y aún dentro de un mismo tipo. Este fenómeno, el cual es característico de los datos de percepción remota, resulta de la aleatoriedad inherente de la naturaleza, esto es, variaciones al azar en la orientación de la hoja, estado de desarrollo de los cultivos, condiciones atmosféricas, y aún "ruido" en el equipo sensor.

Esto significa que los datos para vegetación y las otras clases no deberá ser un punto, sino un cluster ó nube de puntos, la cual puede ser descrita por una distribución estadística. La situación real se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2** Nubes de puntos de datos para tres clases.

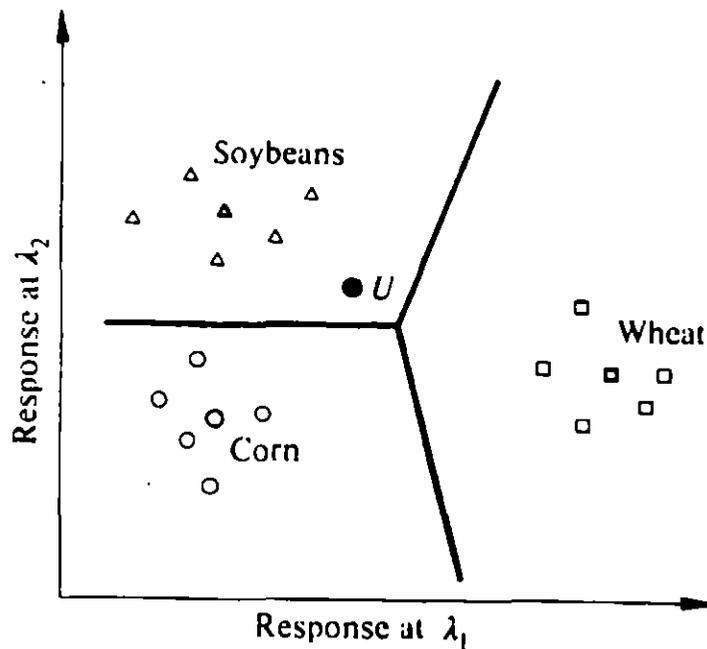
Se observa de la figura que las nubes correspondientes a cubiertas del suelo específicas son más ó menos distintas y es posible en tales casos asociar regiones del espacio de medición con cada una de las cubiertas. Se dice entonces que estas cubiertas de suelo son discriminables, es decir, se pueden diferenciar una de otra. La tarea de análisis, por lo tanto, es decidir como se divide el espacio  $n$ -dimensional en regiones asociadas con cada clase para que un punto ó vector de datos ocurriendo en cualquier parte del espacio sea asignado a una de ellas. La otra pregunta que surge es ¿ Cual regla se usa para asignar ó clasificar un punto desconocido, marcado como  $U$  en la figura 1.3, con alguna de las tres clases ?.



**Figura 1.3** Respuesta espectral hipotética en dos dimensiones para tres cultivos (soya, trigo y maíz) y un punto desconocido (U).

Hay muchos algoritmos propuestos en la literatura estadística e ingenieril para contestar estas preguntas. El mas simple se ilustra en la figura 1.4. En este caso se determinó el valor medio de cada clase de material y se marcó con negritas, luego se trazaron líneas equidistantes a las medias. Estas líneas tienen el efecto de dividir el espacio en 3 regiones, tal que cada punto en el espacio es asociado con una clase. Dichas líneas se denominan límites de decisión, ya que permiten decidir a que clase pertenece un punto desconocido, dependiendo de la región donde éste se ubique. Así, el punto desconocido U es clasificado como soya.

Otra forma de clasificar el punto sería medir la distancia que existe entre él y los centros de cada clase y asignarlo a aquélla cuya distancia sea la menor de todas.



**Figura 1.4** Regiones y límites de decisión para la clasificación de un dato desconocido (U).

En la realidad es muy difícil establecer los límites de decisión, ya que pueden existir traslapes entre clases. Debido a esto, se ha optado por usar el concepto de muestras de entrenamiento, donde se determina por métodos estadísticos las características de cada clase de interés, como podrían ser sus centros y sus radios. Posteriormente se definen las reglas de decisión, es decir, la forma en la que se asignarán los puntos desconocidos a una de ellas. Es común utilizar las distancias geométrica ó estadística para tal fin.

Los procesos de clasificación multiespectral automática se dividen en dos tipos: supervisados y no supervisados. A continuación se describe cada uno, así como los algoritmos mas usados en cada tipo.

## 2 CLASIFICACION SUPERVISADA

En una clasificación supervisada, la identidad y posición en la imagen de algunos de los tipos de cobertura, tales como, áreas urbanas, agrícolas, bosques, etc. son conocidas a priori a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas, mapas, y experiencia personal (Heaslip, 1975 en Jensen, 1986). El analista intenta localizar sitios en la imagen que representen ejemplos homogéneos de esos tipos de cobertura conocidas (Townshend, 1981 en Jensen, 1986). Estas áreas son llamadas sitios de entrenamiento porque sus características espectrales son usadas para entrenar al algoritmo de clasificación para el eventual mapeo de coberturas del resto de la imagen. Parámetros estadísticos multivariados (media, desviación estándar, matriz de covariancia, matrices de correlación, etc.) son calculados para cada sitio de entrenamiento.

### 2.1 Clasificación por el teorema de bayes

Esta regla de decisión asigna cada pixel que tiene un vector de posición  $X$ , en el espacio espectral, a la clase que sea más probable de haberle dado origen. El vector de medición  $X$  consiste de  $n$  elementos, esto es, el número de bandas siendo analizadas para llevar a cabo la clasificación.

El algoritmo asume que los datos estadísticos de entrenamiento para cada clase son normalmente distribuidos. Datos de entrenamiento con histogramas bi o trimodales no son ideales. En tales casos, las modas individuales probablemente representan clases que deberían ser tratadas individualmente y etiquetadas como clases separadas. Esto produciría clases de entrenamiento unimodales que cumplirían con el requerimiento de distribución normal (Jensen, 1986).

representando las clases espectrales por

$c_i$ , donde  $i = 1, 2, \dots, m$ ; y  $m$  es el número total de clases.

Para tratar de determinar la clase a la cual un pixel en la posición  $X$  pertenece, el método se basa estrictamente en la probabilidad condicional (Richards, 1986)

$p(c_i/X)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$

Esto es,  $p(c_i/X)$  da la probabilidad de que la clase sea  $c_i$  dado que se está examinando un pixel en la posición  $X$ , o, la probabilidad de que la clase correcta sea  $c_i$ , para un pixel en la posición  $X$ .

La regla de clasificación es ejecutada de acuerdo a:

$$X \in c_i \text{ si } p(c_i/X) > p(c_j/X) \text{ para toda } j \neq i$$

Para clasificar el vector de mediciones  $X$  de un pixel desconocido dentro de una clase, la regla de decisión calcula el valor  $p(c_i/X)$  para cada clase. Esta asigna el pixel a la clase que tiene el valor más grande o máximo.

Los pixels de entrenamiento pueden ser usados para estimar la distribución de probabilidades de cada tipo de cobertura, las cuales describen la posibilidad de encontrar un pixel de la clase  $c_i$  en la posición  $X$ . La distribución de probabilidad para una clase  $c_i$  se representa por  $p(X/c_i)$ , la cual se interpreta como: la probabilidad de encontrar un pixel en la posición  $X$  dado que estamos en la clase  $c_i$ .

La probabilidad de que un pixel en la posición  $X$  en el espacio espectral sea un pixel de la clase  $c_i$  está dada por el producto  $p(X/c_i)p(c_i)$  donde  $p(c_i)$  es la probabilidad de que la clase  $c_i$  ocurra en la imagen. A este producto se le da el nombre de probabilidad conjunta y se escribe como

$$p(X, c_i) = p(X/c_i)p(c_i)$$

Como la probabilidad conjunta expresa la posibilidad de que  $X$  y  $c_i$  existan juntas, ésta se puede escribir también como:

$$p(c_i, X) = p(c_i/X)p(X)$$

donde  $p(X)$  es la probabilidad de encontrar un pixel en la posición  $X$  a partir de cualquier clase.

De las definiciones de probabilidad conjunta se establece que

$$p(c_i/X) = p(X/c_i)p(c_i)/p(X)$$

el cual es conocido como el teorema de Bayes.  $p(c_i)$  es llamada la probabilidad a priori porque es la probabilidad con la cual cualquier pixel puede ser adivinado antes de la clasificación. De esta misma manera  $p(c_i/X)$  es llamada la probabilidad a posteriori.

Empleando el teorema de bayes en la regla de clasificación se tiene que

$$X \in c_i \text{ si } p(X/c_i)p(c_i) > p(X/c_j)p(c_j) \text{ para toda } j \neq i$$

donde  $p(X)$  ha sido removido por ser factor común.

resulta conveniente matemáticamente definir la función

$$\begin{aligned}
 P_i(X) &= \ln\{p(X/c_i)p(c_i)\} \\
 &= \ln\{p(X/c_i)\} + \ln\{p(c_i)\}
 \end{aligned}$$

Introduciendo esta función la regla de clasificación queda como

$$X \in c_i \text{ si } P_i(X) > P_j(X) \text{ para toda } j \neq i$$

La función  $P_i(X)$  es llamada función discriminante.

Como se mencionó anteriormente es asumido que la distribución de probabilidad para cada clase tienen la forma de un modelo normal multivariado. De esta forma, considerando  $n$  bandas se tiene que (Richards, 1986; Swain and Davis, 1978)

$$p(X/c_i) = (2\pi)^{-n/2} \det(V_i)^{-1/2} \exp\{-\frac{1}{2}(X-M_i)' V_i^{-1} (X-M_i)\}$$

donde  $M_i$  y  $V_i$  son el vector de medias y la matriz de covarianza de los datos de entrenamiento para la clase  $c_i$ . Sustituyendo el modelo de distribución normal multivariado en la definición de función discriminante  $P_i(X)$  y considerando la regla de clasificación se tiene (Jensen, 1986; Richards, 1986; Swain and Davis, 1978).

$$P_i(X) = \ln\{p(c_i)\} - \frac{1}{2}\ln\{\det(V_i)\} - \frac{1}{2}(X-M_i)' V_i^{-1} (X-M_i)$$

El término resultante  $-n/2\ln(2\pi)$  es común a todos los  $P_i(x)$  por lo que al ser sustituido en la regla de clasificación se eliminaría, además de no ayudar a la discriminación motivo por el cual es ignorado.

## 2.2 Clasificación por máxima verosimilitud

La regla de decisión de máxima verosimilitud es idéntica a la de Bayes excepto que ésta asume que cada clase es igualmente probable (Hord, 1982 en Jensen, 1986).

La ecuación que define a  $P_i(X)$  asume que todas las clases tienen una probabilidad a priori,  $p(c_i)$ , de ocurrencia en el terreno. El sentido común nos recuerda que en la mayoría de las aplicaciones de sensores remotos hay una alta probabilidad de encontrar algunas clases más frecuentemente que las otras, por lo que a través de este término es posible incluir esta probabilidad a priori en la decisión de clasificación. Sin embargo, frecuentemente el analista no tiene información útil o suficiente sobre esta probabilidad  $p(c_i)$  caso en el cual una situación de igual probabilidad a priori es asumida. Esta consideración hace que

$$p(c_i) = p(c_j) \text{ para toda } j \neq i$$

por lo que el término  $\ln\{p(c_i)\}$  es una constante común a todos los  $P_i(X)$  que al ser sustituido en la regla de clasificación se eliminará, motivo por el cual puede ser ignorado. De la misma forma el factor común  $1/2$  puede ser removido.

El algoritmo de máxima verosimilitud hace uso del vector de medias,  $M_i$ , para cada clase y de la matriz de covariancias de la clase,  $V_i$ . La regla de decisión aplicada a vectores de medición desconocidos,  $X$ , es (Jensen, 1986; Richards, 1986; Swain and Davis, 1978):

$$X \in c_i \text{ si } P_i(X) > P_j(X) \text{ para toda } j \neq i$$

donde  $j, i = 1, 2, \dots, m$  posibles clases, y

$$P_i(X) = -\ln\{\det(V_i)\} - (X-M_i)^t V_i^{-1} (X-M_i)$$

donde  $P_i(X)$  es la probabilidad del vector  $X$  de pertenecer a la clase  $c_i$  y  $\det(V_i)$  es el determinante de la matriz de covariancia  $V_i$ .

Para clasificar el vector de mediciones  $X$  de un pixel desconocido dentro de una clase, la regla de decisión calcula el valor  $P_i(X)$  para cada clase y asigna el pixel a la clase que tiene el valor más grande o máximo.

### 2.3 Clasificación por mínimas distancias

Cuando el número de muestras de entrenamiento por clase es limitado puede ser más efectivo emplear un clasificador que no haga uso de la información de covariancia, sino que dependa únicamente de la posición de las medias de las clases espectrales (Richards, 1986).

El clasificador de mínimas distancias, o más preciso, clasificador de la distancia mínima a la media de las clases hace uso únicamente de los vectores de medias de las clases espectrales,  $M_i$ , obtenidos a partir de los datos de entrenamiento.

Para ejecutar la clasificación por mínimas distancias se calcula la distancia,  $D(X, M_i)$ , desde cada pixel desconocido,  $X$ , a cada vector de medias,  $M_i$ , y se asigna el pixel a la clase cuya media se encuentra más cercana. De esta manera la regla de clasificación es (Richards, 1986)

$$X \in c_i \text{ si } D(X, M_i) < D(X, M_j) \text{ para toda } j \neq i$$

donde  $j, i = 1, 2, \dots, m$  posibles clases.

Las dos distancias más usadas son la distancia euclidiana, basada en el teorema de

pitágoras y la distancia de alrededor del bloque (Jensen, 1986).

La distancia euclidiana en el espacio n-dimensional se define como (Jensen, 1986; Davis and Swain, 1978):

$$D(X, M_i) = \text{sqr} \left( \sum_{k=1}^n (\mu_{ik} - BV_{jk})^2 \right)$$

La distancia de alrededor de un bloque en el espacio n-dimensional se define como (Jensen, 1986; Davis and Swain, 1978):

$$D(X, M_i) = \sum_{k=1}^n |\mu_{ik} - BV_{jk}|$$

donde  $\mu_{ik}$  es el valor medio de la clase  $c_i$  en la banda  $k$  y  $BV_{jk}$  es el valor del pixel en la posición  $(j, l)$  de la imagen en la banda  $k$ .

Es obvio que cualquier pixel será definitivamente asignado a una de las clases, esto es, no habrá pixels sin clasificar.

Muchos algoritmos de mínimas distancias permiten al analista especificar una distancia o umbral de pertenencia a partir del valor medio de la clase. De esta forma, un pixel no será asignado a una categoría, aunque ésta sea el valor medio más cercano, si la distancia a ella sobrepasa este umbral.

Debido a que los datos de covariancia no son usados en mínimas distancias los modelos de las clases son simétricos en el dominio espectral. Clases elongadas no serán bien modeladas. Varias clases espectrales pueden ser necesarias con este algoritmo donde sólo una es encontrada por máxima verosimilitud (Richards, 1986).

Esta regla de decisión es computacionalmente simple y puede resultar en clasificaciones de exactitud comparable a otros algoritmos computacionalmente más intensos, tales como el de máxima verosimilitud (Hixson et al., 1980 en Jensen, 1986).

En una clasificación por máxima verosimilitud, cada clase es modelada por una distribución de probabilidad normal multivariada, que toma en cuenta la dispersión de los datos en cualquier dirección particular del espectro a través de la matriz de covariancias. Sin embargo, cuando se considera la matriz de covariancia,  $V_i$ , de todas las clases, a ser diagonal e igual y las variancias en cada componente a ser idénticas

$$V_i = \sigma^2 \text{ para toda } i$$

Los modelos de las clases son simétricos y las clasificaciones por mínimas distancias y máxima verosimilitud son equivalentes (Richards, 1986).

## 2.4 Clasificación por paralelepípedos

Este algoritmo está basado en una simple lógica booleana "y/o". Los valores de brillantes para cada pixel de entrenamiento, en la imagen multispectral, son usados para producir vectores de medias n-dimensional,  $M_i = (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}, \dots, \mu_{in})$ , con  $\mu_{ik}$  siendo el valor medio de los datos de entrenamiento para la clase  $c_i$  en la banda  $k$  de las  $m$  posibles clases previamente definidas.  $\sigma_{ik}$  es la desviación estándar de los datos de entrenamiento de la clase  $c_i$  en la banda  $k$  de las  $m$  posibles.

El método emplea dos fronteras de decisión una inferior y otra superior sobre cada eje del espacio espectral, definidas como:

$$\text{Inf}_{ik} = \mu_{ik} - x\sigma_{ik}$$

$$\text{Sup}_{ik} = \mu_{ik} + x\sigma_{ik}$$

Donde  $x$  es el número de veces que se tomará la desviación estándar ( $\sigma_{ik}$ ) de la clase  $c_i$  en la banda  $k$  para establecer el valor umbral de las fronteras a partir del valor medio  $\mu_{ik}$ .

De esta manera un algoritmo de paralelepípedo decide si  $BV_{ijk}$  está en la clase  $c_i$ , si y sólo si,

$$\text{Inf}_{ik} < = BV_{ijk} < = \text{Sup}_{ik}$$

donde  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  número de clases.

$k = 1, 2, 3, \dots, n$  número de bandas.

Estas fronteras de decisión forman un paralelepípedo n-dimensional en el espacio de las bandas. Si el valor del pixel cae sobre el valor umbral inferior y bajo el valor umbral superior para todas las  $n$  bandas evaluadas, el pixel es asignado a esta clase. Cuando el valor de un pixel desconocido no satisface ninguno de los criterios de lógica booleana, éste es asignado a la categoría de desconocido.

Incrementando el tamaño del umbral, de 2 o 3 veces la desviación estándar, se

incrementa el tamaño del paralelepípedo y se reduce el número de pixels asignados a la clase desconocida, pero esta acción puede también introducir una cantidad de traslape significativo entre paralelepípedos, resultando en una clasificación errónea.

El algoritmo de paralelepípedos es un método computacionalmente eficiente para clasificar. Desafortunadamente, debido a que algunos paralelepípedos se traslapan, es posible que un pixel satisfaga los criterios para más de una clase. En tales casos es usual asignarlo a la primera clase para la cual éste cumple todos los criterios. Otra solución es tomar un criterio de asignar el pixel a aquella clase cuyo centro se encuentre a la mínima distancia.

### 3 CLASIFICACION NO SUPERVISADA

En una clasificación no supervisada, las identidades de los tipos de cobertura a ser especificadas como clases dentro de una escena, generalmente no son conocidas a priori, porque se carece de un trabajo de campo o los rasgos de la superficie en la imagen no están bien definidos. La computadora es requerida para agrupar los pixels dentro de diferentes clases espectrales, de acuerdo a algún criterio estadístico determinado. Es entonces la responsabilidad del analista etiquetar estos grupos (clusters).

Pixels que pertenecen a una agrupación particular, son espectralmente similares. Muchos criterios de similitud han sido propuestos, pero aquellos empleados comúnmente en procedimientos de agrupación, son generalmente, la simple medición de distancias en el espacio multispectral. Las distancias más frecuentemente empleadas son la euclidiana y la de alrededor de bloque (mencionadas en el inciso 5.1.3).

Los algoritmos de aglomeración o agrupación (Clustering) usados para clasificación no supervisada, generalmente varían de acuerdo a la eficiencia a la cual la aglomeración tiene lugar.

#### 3.1 Clasificación por isodata (migración de medias)

El procedimiento de optimización interactiva de agrupamiento, también llamado técnica de migración de medias o isodata, está basado en asignar los pixels de la imagen dentro de unos candidatos a grupos y posteriormente mover ellos de un grupo a otro, de manera que la suma del error cuadrático se reduzca.

El algoritmo de optimización interactiva es implementado mediante los siguientes pasos (Richards, 1986).

Se inicializa el procedimiento mediante el establecimiento de  $C$  puntos en el espacio multiespectral que sirven como candidatos a centros de agrupación. los cuales son llamados

$$M_i, i = 1, 2, \dots, C.$$

La selección de los  $M_i$  es arbitraria, con la excepción de que no puede haber dos centros con el mismo valor.

En la práctica, el número de grupos real u óptimo es desconocido. Es frecuente seleccionar un número alto de grupos, teniendo en cuenta que los grupos pueden ser unidos después que el proceso ha terminado o durante uno de los pasos de interacción.

Cuando no se tiene un conocimiento a priori de los centros de los grupos que permita llevar a cabo la inicialización, éstos generalmente son seleccionados uniformemente espaciados a lo largo de la diagonal que une el origen del espacio espectral con el punto correspondiente a los máximos valores de brillantez. Esta selección puede ser redefinida, si el usuario ha calculado el histograma, en tal caso los centros de los grupos serán inicializados uniformemente a lo largo de la diagonal que une los extremos de los datos multiespectrales reales.

Se barren todos y cada uno de los pixels en la imagen, para establecer su localización  $X$  en el espacio espectral y medir su distancia con respecto a los candidatos a centros de grupo,  $D(X, M_i)$ . Las distancias de un pixel a los diferentes centros son examinadas y el pixel es asignado al candidato a centro de grupo más cercano (criterio de mínima distancia). Esta asignación será hecha en base a la medición de distancia euclidiana o de alrededor de bloque o cualquier otra que haya sido seleccionada.

Para cada  $M_i$ , se calcula un valor medio a partir de los pixels que hayan sido asignados a encontrarse alrededor de él. De esta forma se calcula un nuevo juego de medias denotado por

$$m_i, i = 1, 2, \dots, C.$$

Se comparan el juego de candidatos a centro de grupos,  $M_i$ , con el juego de valores medios,  $m_i$ , de tal forma que

si  $m_i = M_i$ , para toda  $i$ , el procedimiento es terminado.

si  $m_i \neq M_i$ , entonces  $M_i = m_i$ , y el control es retornado a barrer la imagen.

En este paso se permite examinar los agrupamientos para ver si alguno de los grupos contiene tan pocos elementos que pueda ser despreciado, si dos o más centros de

grupos son tan cercanos que pueden ser unidos o si un agrupamiento demasiado elongado debe ser separado en dos nuevos grupos.

La mayor limitación de la técnica de isodata es la necesidad de especificar el número de centros de agrupamiento. Si esta especificación es demasiado grande, entonces una unión de grupos deberá ser hecha posteriormente. Si es demasiado pequeña se tendrán algunas clases multimodales.

Sin importar si la especificación inicial de centros de grupos es grande o pequeña, el algoritmo de isodata es computacionalmente caro debido al gran número de iteraciones y operaciones que se realizan.

Al terminar un agrupamiento, a todos aquellos pixels dentro de un grupo se les asigna un símbolo para indicar que todos ellos pertenecen al mismo grupo. Usando estos símbolos un mapa de grupos o clases espectrales puede ser producido.

### 3.2 Clasificación por agrupación de dos pasadas (clustering)

Este algoritmo recibe su nombre debido a que opera en modo de dos pasadas (es decir, se barre la imagen dos veces). En la primera pasada el programa construye las agrupaciones (clusters) y obtiene el vector de media asociado con cada una de ellas. En el segundo paso, un algoritmo de clasificación por mínima distancia al valor medio es aplicado a toda la imagen, donde cada pixel es asignado a uno de los grupos creados en la pasada uno (Jensen, 1986).

Inicialmente el analista proporciona: Un radio en el espacio espectral ( $R$ ), usado para determinar cuando una nueva agrupación deberá ser formada. Un parámetro de distancia espectral ( $C$ ), usado cuando se unen dos agrupaciones. El número de pixels ( $N$ ), a ser evaluados antes de hacer una unión de agrupaciones o entre uniones de agrupaciones. El número máximo de agrupaciones ( $C_{max}$ ), que serán identificadas por el algoritmo.

Comenzando por el origen de la imagen (línea 1, columna 1), los pixels son evaluados secuencialmente de izquierda a derecha. Después que una línea es procesada la siguiente línea de datos es evaluada.

Primero, se determina que el pixel 1 en la imagen,  $X_1$ , representa el vector de medias para la agrupación 1 ( $M_1$ ; la dimensión  $n$  del vector depende del número de bandas usadas en la clasificación no supervisada).

$$M_1 = X_1, n_1 = 1 \text{ y } cont = 1$$

donde  $n_1$  es el número de elementos en la agrupación 1 y  $cont$  es el número de

agrupaciones definidas.

Se considera el pixel 2,  $X_2$ , y se calcula la distancia espectral de este pixel a la agrupación 1,  $D(X_2, M_1)$ .

si  $D(X_2, M_1) > R$  y  $\text{cont} < C_{\text{max}}$ , entonces  $M_2 = X_2$ ,  $n_2 = 1$  y  $\text{cont} = \text{cont} + 1$

Debido a que todavía no se han identificado todas las agrupaciones ( $C_{\text{max}}$ )

si  $D(X_2, M_1) < R$ , entonces  $n_1 = 2$  y  $M_1 = \frac{1}{2}(X_1 + X_2)$

Se considera el siguiente pixel,  $X_i$ , y se calcula la distancia espectral de éste a cada una de las agrupaciones,  $D(X_i, M_j)$ .

si  $D(X_i, M_j) > R$  y  $\text{cont} < C_{\text{max}}$ , entonces  $M_j = X_i$ ,  $n_j = 1$  y  $\text{cont} = \text{cont} + 1$

donde  $M_j$  representa una nueva clase definida y  $j < C_{\text{max}}$ . Debido a que todavía no se han identificado todas las agrupaciones ( $C_{\text{max}}$ )

si  $D(X_i, M_j) < R$ , entonces  $n_j = n_j + 1$  y  $M_j = (1/n_j) \{n_j'(M_j) + X_i\}$

donde  $n_j'$  es el número de elementos de la clase  $M_j$  antes de ser incrementado en uno.

La acumulación de agrupaciones continúa hasta que el número de pixels evaluado es mayor que  $N$  o  $\text{cont}$  es mayor o igual que  $C_{\text{max}}$ . En este punto, el programa checa si existen agrupaciones que se unan. Para lograr esto se calcula la distancia entre los vectores medios de las agrupaciones  $D(M_i, M_j)$  y se checa si existen dos agrupaciones separadas una distancia espectral menor que  $C$ .

si  $D(M_i, M_j) < C$ , entonces  $n_i = n_i + n_j$ ,  $M_i = (1/n_i) \{n_i'(M_i) + n_j(X_j)\}$  y  $\text{cont} = \text{cont} - 1$

donde  $n_i'$  es el número de elementos de la clase  $M_i$  antes de ser incrementado en  $n_j$ .

Este proceso se ejecuta hasta que no hay más grupos separados una distancia menor que  $C$ . Entonces el siguiente pixel es considerado. El proceso continúa iterando hasta que la imagen entera es examinada.

Algunos programas no evalúan cada línea y cada columna de la imagen para calcular los vectores medios de las agrupaciones. En vez de esto, ellos realizan un muestreo cada  $i$ -ésimo renglón y cada  $j$ -ésima columna para identificar el  $C_{\text{max}}$  de agrupaciones. La decisión de muestrear la imagen es dejada al analista.

Mientras más puntos son agregados a una agrupación, el desplazamiento de la media es menos drástico debido a que la nueva media calculada es pesada por el número de

pixels actuales en la agrupación. El punto final es la posición espectral del vector de medias que es usado como una firma en el clasificador de mínimas distancias aplicado en el paso 2.

Los datos finales del vector de medias son usados dentro de un algoritmo de mínimas distancias para clasificar todos los pixels en la imagen dentro de alguna de las agrupaciones calculadas.

#### 4 METODOLOGIAS DE CLASIFICACION

##### 4.1 Supervisada

Es importante saber que hay una diferencia fundamental entre lo que llamaremos "clase de información" y "clase espectral" (Jensen, 1986). Clases de información son aquellas que el hombre define. Clases espectrales son aquellas inherentes a los datos de percepción remota y que deben ser identificados y etiquetados por el analista.

Un analista debe entender bien las características espectrales y espaciales del sistema sensor y ser capaz de relacionar estos parámetros a los tipos y proporciones de materiales encontrados dentro de la escena y dentro del CIV del pixel. Si estos parámetros son entendidos, las clases espectrales pueden ser reetiquetadas como clases de información cuando sea necesario.

Como primer paso de una clasificación supervisada se deben definir las categorías o tipos de cobertura a ser identificados dentro de la imagen. Estas son las clases de información y pueden ser, por ejemplo, agua, zonas urbanas, bosques, etc. Las categorías de interés deben ser cuidadosamente seleccionadas para llevar a cabo una clasificación exitosa.

Se debe establecer un esquema apropiado de clasificación para las coberturas. Si ya existen sistemas de clasificación reconocidos nacionalmente, es mejor adoptar o modificar éstos que inventar uno nuevo que sea usado exclusivamente por uno mismo. Esto permite mostrar la importancia de los resultados de nuestra clasificación a la luz de otros estudios y facilitar la mezcla de datos (Rhind and Hudson, 1980 en Jensen, 1986).

Por otro lado, debe ser notado que hay una relación entre el nivel de detalle en un esquema de clasificación, y la resolución espacial del sistema de percepción remota usado para proporcionar información. Esto sugiere que el nivel de detalle en el sistema de clasificación deseado, dicta la resolución espacial de los datos de sensores remotos que deberían ser usados. La resolución espectral es también una consideración importante. Sin embargo, no es un parámetro tan crítico como los datos de resolución

espacial, pues la mayoría de los sistemas sensores (Landsat MSS, TM, Spot, etc.) registran la energía en aproximadamente las mismas porciones del visible y el infrarrojo medio.

Posteriormente, se lleva a cabo la selección de los sitios representativos, dentro de la imagen, para cada una de las clases deseadas. Estos sitios, llamados campos de entrenamiento, no deben ser atípicos, sino representar la norma de cada clase. A los pixels contenidos en ellos se les llama pixels o datos de entrenamiento.

Los sitios de entrenamiento para cada clase pueden ser establecidos mediante visitas de campo, mapas, fotografías aéreas, o aún mediante la fotointerpretación de compuestos en falso color generados a partir de las bandas de la misma imagen.

Respecto a la obtención de información basada en visitas de campo, éstas se deben hacer en un período de tiempo cercano al de la captura de la imagen, de otra manera pueden existir errores debidos a variaciones temporales.

Los datos de entrenamiento serán de valor si el ambiente del cual fueron obtenidos es relativamente homogéneo. Si esto no ocurre, se tendrán problemas de extensión de firma, esto es, no será posible extender nuestros datos de entrenamiento a través del espacio (x,y).

La manera más fácil de remediar esta situación es, recopilar todos los factores ambientales que puedan contribuir a los problemas de extensión de firmas, como diferencias en los tipos de suelo, turbidez del agua, especies de cultivos, condiciones de humedad inusual en el suelo, etc. Estas condiciones ambientales deben ser cuidadosamente anotadas en la imagen y la selección de los sitios de entrenamiento hecha basada en la estratificación geográfica de estos datos.

Una vez que los factores de extensión de firma han sido evaluados y el analista ha seleccionado los sitios de entrenamiento representativos para cada una de las clases, se deben extraer las estadísticas espectrales de los sitios de entrenamiento.

Cada sitio es generalmente compuesto de muchos pixels; la regla general es, si los datos están siendo extraídos de  $n$  bandas, el número mínimo de pixels de entrenamiento en una clase debería ser  $n + 1$ . Esta condición permitirá encontrar el inverso de la matriz de covariancia para cada clase a ser calculada, lo cual es importante en algunos algoritmos de clasificación. Idealmente, un número mayor de  $10n$  pixels de datos de entrenamiento son coleccionados para cada clase (Richards, 1986, Jensen, 1986).

Las estadísticas de entrenamiento son analizadas para seleccionar las bandas que son más efectivas en discriminar las clases, esto es, aquellas que son más apropiadas para ser usadas en el proceso de clasificación.

La discriminación de bandas es comúnmente llamada selección de rasgos, el objetivo es borrar, a partir de un análisis, aquellas bandas que proporcionan únicamente información espectral redundante. De esta manera la dimensionalidad (es decir, el número de bandas a ser procesadas) del juego de datos puede ser reducida. Este proceso minimiza el costo de la clasificación digital de la imagen, pero no la exactitud.

La selección de rasgos puede involucrar tanto métodos gráficos, como análisis estadístico para determinar el grado de separación entre las clases. Combinaciones de bandas son normalmente hechas, de acuerdo a su habilidad potencial para discriminar cada clase de las otras.

Ya que se tienen definidas las bandas que permiten una mejor discriminación de los rasgos, se lleva a cabo la definición del algoritmo a emplear. La selección de una regla de clasificación o decisión depende de la naturaleza de los datos de entrada y de la salida deseada (Friedman, 1980 en Jensen, 1986). Algoritmos de clasificación paramétricos asumen que las clases consideradas son gaussianas en naturaleza (es decir, normalmente distribuidas). Algoritmos de clasificación no paramétricos no hacen tal suposición.

Se deben usar los datos de entrenamiento para estimar los parámetros del algoritmo de clasificación particular a ser usado; estos parámetros son las propiedades del modelo de probabilidad empleado o las ecuaciones que definen las particiones en el espacio espectral. El juego de parámetros, para una clase dada, es llamado la firma de la clase.

Los algoritmos de clasificación más frecuentemente usados son: paralelepípedos, mínimas distancias, máxima verosimilitud y bayesiano.

Las firmas obtenidas a partir de los campos de entrenamiento, se emplean como entrada del algoritmo de clasificación seleccionado para etiquetar cada uno de los pixels en la imagen, dentro de uno de los tipos de cobertura deseados (clases de información). En este paso el total de la imagen es clasificada, mientras que en la fase de entrenamiento únicamente un porcentaje pequeño (entre 1 y 5%) de pixels es identificado por otros medios.

La clasificación de la imagen se efectúa con  $n$  bandas que permiten una mejor discriminación de las clases.

Dos tipos de salida son disponibles a partir de una clasificación. Una es el mapa temático (o de clases) en el cual los pixels son etiquetados y representados por un color o símbolo para identificar que ellos pertenecen a una clase. La otra es una tabla que resume el número de pixels en la imagen que pertenece a cada una de las clases y el área que éstos cubren.

## 4.2 No supervisada

En contraste a la clasificación supervisada, la clasificación no supervisada requiere únicamente de una cantidad mínima de entradas por parte del analista. Es un proceso por medio del cual, operaciones numéricas son ejecutadas para buscar la agrupación natural de las propiedades espectrales de los pixels, siendo examinados dentro del espacio multiespectral de los rasgos.

El usuario permite que la computadora seleccione las medias de las clases y las matrices de covariancia a ser usadas en la clasificación. Una vez que los datos son clasificados, el analista intenta, a posteriori, asignar estas clases naturales o espectrales a las clases de información de interés (Robinove, 1981 en Jensen, 1986).

Para llevar a cabo la correlación entre las clases espectrales y las clases de información, es necesario evaluar la localización de las agrupaciones en la imagen y en diagramas de dispersión bi o tridimensionales (dispersogramas), etiquetarlas si es posible, y ver si cualquiera de ellas se pueden combinar.

La etiquetación de las agrupaciones, es generalmente ejecutada, por medio de desplegar interactivamente todos los pixels asignados a una agrupación individual sobre la pantalla. De esta manera es posible identificar, su localización y asociaciones espaciales. Este análisis visual interactivo, en conjunción con la información proporcionada por los dispersogramas, permite al analista asociar las agrupaciones dentro de clases de información.

Generalmente hay más información presente en una clasificación no supervisada que en una clasificación supervisada, esto se debe a que muchas veces no se muestrean todas las clases durante el proceso de entrenamiento.

## BIBLIOGRAFIA

González, R.C. and Wint, P., 1987, Digital image processing, USA, Addison Wesley Publishing Company, 2a. ed., 503 pp.

Jensen, J.R., 1986, Introductory digital image processing, USA, Prentice-Hall, 1a. ed., 375 pp.

Richards, J.A., 1986, Remote Sensing digital image analysis: an introduction, Alemania, Springer-Verlag, 1a. ed., 281 pp.

Sabin, F.F., 1978, Remote Sensing: principles and interpretation, USA, W.H. Freeman and Company, 1a. ed., 426 pp.

Swain, P.H., 1978, Remote Sensing the quantitative approach, USA, McGraw-Hill Company, 1a. ed., 386 pp.