



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN ESPECTRAL
PARA DISTINTOS AMBIENTES TERRESTRES EN EL
CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO-
MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOMÁTICO

P R E S E N T A:

EDGAR OMAR CALZADA IGLESIAS



**DIRECTOR DE TESIS:
M.G. JUAN MANUEL NUÑEZ HERNÁNDEZ
2013**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/161/12

Señor
EDGAR OMAR CALZADA IGLESIAS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.G. JUAN MANUEL NUÑEZ HERNÁNDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO GEOMÁTICO.


"ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN ESPECTRAL PARA DISTINTOS AMBIENTES TERRESTRES EN EL CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO-MÉXICO"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LOS OBJETOS EN PERCEPCIÓN REMOTA
- III. PERCEPCIÓN REMOTA Y AMBIENTES TERRESTRES
- IV. ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN ESPECTRAL PARA DISTINTOS AMBIENTES
- V. CLASIFICACIÓN ESPECTRAL EN EL CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO-MÉXICO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 9 de noviembre del 2012.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por el apoyo, confianza y afecto que me han brindado, les agradezco sus enseñanzas y consejos los cuales me han formado y me han permitido llegar a una meta importante en mi vida personal y profesional. En verdad gracias, los quiero mucho.

A mi hermana Monse por su compañía y hacerme pasar momentos tan divertidos.

Al Ing. Juan Manuel Nuñez por su confianza, enseñanza y paciencia brindada a lo largo de esta etapa. Un agradecimiento especial por haberme dado la oportunidad de ingresar a CentroGEO, primero en mi servicio social y después como becario, ha sido una experiencia extraordinaria.

A la Facultad de Ingeniería, UNAM por haberme permitido concretar mi carrera profesional.

A CentroGEO que me ha tratado de forma maravillosa y a las personas que me permitió conocer durante su estancia: Jose Madrigal , Karla Carrillo, Sergio Mora, Edith López; gracias por su valiosa ayuda.

Por último, un agradecimiento especial al profesor Javier Aldabe, por su confianza para que pudiera combinar mi trabajo de tesis con mis estudios de posgrado.

“No basta con reconocer las competencias en las que nos sentimos bien. Hay que saber controlarlas, y eso sólo se consigue dedicándoles muchas horas de trabajo y de estudio”

Eduardo Punset

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LOS OBJETOS EN PERCEPCIÓN REMOTA..... | 4 |
| 1.1 Principios de la radiación electromagnética..... | 6 |
| 1.1.1 Proceso de Percepción Remota..... | 6 |
| 1.1.2 Leyes de la radiación electromagnética..... | 7 |
| 1.2 El espectro electromagnético en percepción remota..... | 12 |
| 1.2.1 Aplicaciones en región ultravioleta..... | 14 |
| 1.2.2 Aplicaciones en región visible..... | 15 |
| 1.2.3 Aplicaciones en región infrarroja..... | 17 |
| 1.2.4 Aplicaciones en región microondas..... | 21 |
| 1.3 Medios para obtener respuestas espectrales..... | 23 |
| 1.3.1 Respuestas espectrales..... | 23 |
| 1.3.1.1 Respuesta espectral de vegetación..... | 24 |
| 1.3.1.2 Respuesta espectral del suelo..... | 25 |
| 1.3.1.3 Respuesta espectral del agua..... | 26 |
| 1.3.2 Formas de obtención de respuestas espectrales..... | 26 |
| 1.3.2.1 Respuesta espectral a partir de un radiómetro..... | 27 |
| 1.3.2.2 Principales bibliotecas espectrales..... | 28 |
| 1.3.2.3 Otras maneras de obtener respuestas espectrales..... | 29 |
| 2. PERCEPCIÓN REMOTA Y AMBIENTES TERRESTRES..... | 31 |
| 2.1 Ambientes terrestres y paisaje fisiográfico..... | 32 |
| 2.1.1 Paisaje natural y paisaje cultural..... | 33 |
| 2.1.2 Componentes naturales de un ambiente terrestre..... | 36 |
| 2.1.3 Principales formas de relieve..... | 39 |
| 2.2 La percepción remota en diferentes ambientes terrestres..... | 42 |
| 2.2.1 Percepción remota en ambiente montañoso..... | 44 |
| 2.2.2 Percepción remota en planicies..... | 50 |
| 2.2.3 Percepción remota en zonas de transición..... | 52 |
| 3. ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN ESPECTRAL PARA DISTINTOS AMBIENTES TERRESTRES.. | 55 |
| 3.1 La clasificación espectral..... | 56 |
| 3.1.1 Reconocimiento de patrones..... | 56 |
| 3.1.1.1 Elementos visuales de interpretación..... | 58 |
| 3.1.1.2 Descriptores morfológicos..... | 64 |
| 3.1.2 Clasificación de imágenes multiespectrales..... | 66 |
| 3.2 Elementos de clasificación espectral..... | 67 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2.1 | Clasificadores duros y suaves..... | 68 |
| 3.2.2 | Clasificación supervisada y no supervisada..... | 70 |
| 3.2.3 | Clasificación puntual y contextual..... | 73 |
| 3.3 | Clasificación espectral y ambientes terrestres..... | 75 |
| 3.3.1 | Cubo de clasificaciones espectrales..... | 75 |
| 3.3.2 | Clasificadores..... | 78 |
| 3.3.2.1 | Ejemplo ISODATA..... | 79 |
| 3.3.2.2 | Ejemplo Support Vector Machine..... | 80 |
| 3.3.2.3 | Ejemplo Máxima Verosimilitud..... | 81 |
| | | |
| 4. | CLASIFICACIÓN ESPECTRAL EN EL CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO-MÉXICO.... | 82 |
| 4.1 | Procesamiento de imágenes SPOT 5 para Coordinación de Corredores y Recursos Biológicos (CCRB)..... | 83 |
| 4.1.1 | Corrección geométrica..... | 83 |
| 4.1.2 | Corrección radiométrica..... | 86 |
| 4.1.3 | Corrección atmosférica..... | 87 |
| 4.2 | Propuesta de ejercicio de clasificación espectral para distintos ambientes terrestres.. | 89. |
| 4.2.1 | Casos de estudio en CBMM..... | 89 |
| 4.2.2 | Caso Marqués de Comillas-Benemérito de las Américas..... | 90 |
| 4.2.3 | Caso Ocosingo-Selva Lacandona..... | 93 |
| 4.3 | Implementación y obtención de resultados | 97 |
| 4.3.1 | Resultados caso Marqués de Comillas-Benemérito de las Américas..... | 97 |
| 4.3.2 | Resultados caso Ocosingo-Selva Lacandona..... | 102 |
| 4.3.3 | Evaluación de clasificación caso Marqués de Comillas-Benemérito de las Américas..... | 107 |
| 4.3.4 | Evaluación de clasificación caso Ocosingo-Selva Lacandona..... | 109 |
| | | |
| 5. | CONCLUSIONES..... | 111 |
| 6. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 114 |

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se muestra una aproximación al esquema de clasificación espectral conformado por tres elementos principales: procedimiento, método y lógica. La elección de configuración de dichos elementos, obedece al tipo de ambiente terrestre, contexto, objetivo de investigación y a la información disponible. Los elementos de clasificación, permiten orientar el proceso de clasificación conforme a los objetivos establecidos por el usuario y el contexto en donde ello ocurre, conformándose en el proceso de clasificación un puente entre el usuario y el paisaje.

A partir de lo anterior, se desarrollaron dos propuestas de investigación para extracción de información de imágenes satelitales mediante clasificaciones espectrales. De esta forma, la percepción remota se muestra como un medio importante para la generación de información. Lo innovador de las propuestas de clasificación presentadas más adelante, radica en la combinación de diferentes elementos de acuerdo a la zona de estudio para obtener información dado un objetivo y su contexto, que permitan contribuir en el marco de trabajo del Corredor Biológico Mesoamericano México (CBMM).

El trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se aborda el proceso de percepción remota sus implicaciones y algunos conceptos relevantes para su entendimiento. Además, se hace una revisión del comportamiento de las principales cubiertas terrestres en el espectro electromagnético, sentando las bases para que se pueda caracterizar los objetos existentes en una escena de una imagen satelital a nivel de paisaje. En el segundo capítulo “Percepción Remota y Ambientes Terrestres”, se describen algunos de los principales ambientes terrestres en función del paisaje, donde se considera tanto el paisaje natural como el paisaje antrópico. Como una forma de aproximarse a un ambiente

terrestre se consideran tres elementos básicos: litósfera, hidrósfera y atmósfera, donde a partir de sus diferentes combinaciones se propone la división de los ambientes en tres principales: zonas de ambiente montañoso, planicies y zonas de transición.

En el tercer capítulo “Elementos de clasificación espectral para distintos ambientes”, se describe a la clasificación como parte del reconocimiento de patrones en una imagen multiespectral, que permite la extracción de información de utilidad con respecto a un objetivo y un contexto. Para el establecimiento de un marco de clasificación, se plantea la elección de tres elementos fundamentales: lógica, procedimiento y método, donde a partir de estos elementos se construye un cubo de elementos de clasificación espectral considerando el ambiente terrestre y a partir de la combinación de información de los ejes y de las caras del cubo se obtiene diferentes resultados en función de los datos de entrada y el contexto.

En el cuarto capítulo “Clasificación espectral en el Corredor Biológico Mesoamericano México”, se describen dos casos de clasificación realizadas en el estado de Chiapas. En la descripción, se menciona el pre-procesamiento recibido para cada una de las imágenes *SPOT5* que incluyó corrección: radiométrica, geométrica y atmosférica. Posteriormente, se establecieron y eligieron los elementos del cubo de clasificaciones espectrales, como una forma de modelar a través del cubo considerando el ambiente terrestre y su contexto que se describe a continuación.

El primer caso de clasificación se realizó en los municipios de Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas, donde se estableció la relación entre las condiciones socioeconómicas de la población y el manejo de los ecosistemas de forma sustentable. El segundo caso de clasificación se realizó en el municipio de Ocosingo, Selva Lacandona, donde a partir de información de entrada (puntos GPS) se realizó una clasificación supervisada, como generación de información para la conservación de corredores biológicos de los Jaguares.

Para la realización de clasificación en cada uno de los casos se realizó la elección de los elementos de clasificación espectral, tomando a consideración la información disponible, el objetivo y el tipo de ambiente terrestre. El proceso de evaluación de los ejercicios de clasificación se realizó de forma conjunta con el usuario. El trabajo interdisciplinario, permitió enriquecer el trabajo de investigación.

CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LOS OBJETOS EN PERCEPCIÓN REMOTA

En este capítulo se hace una revisión del alcance y el papel de la percepción remota en la generación de información espacial y contextual, mediante el estudio del comportamiento de las principales cubiertas terrestres en las diferentes regiones del espectro electromagnético. Previo a la generación de información, se deben conocer los elementos integrantes del proceso de percepción remota, su definición y el papel de la radiación electromagnética en la caracterización de los objetos presentes en la superficie terrestre.

La principal forma de obtención de información de la superficie terrestre se hace a través del análisis de imágenes satelitales, correspondiente a una medida indirecta, principal diferencia con respecto a otras técnicas de extracción de información.

A lo largo del tiempo y de acuerdo a las necesidades del ambiente terrestre, la percepción remota se ha abordado desde diferentes perspectivas. Por consiguiente, es conveniente revisar algunas definiciones, desde las más tradicionales hasta las más específicas.

En 1988, de acuerdo con *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* la percepción remota fue definida formalmente como:

“La medición o adquisición de información de alguna propiedad de un objeto o fenómeno, por un sensor que no está en contacto con el objeto o fenómeno bajo estudio” (Colwell 1983).

La anterior definición, demuestra generalidad en su descripción y no atiende a los fines de este capítulo, por lo cual, es necesario establecer una definición que se exprese en términos

del contenido de información, a través del comportamiento de la radiación electromagnética respecto a los objetos presentes en la superficie terrestre.

“La percepción remota es la ciencia de adquirir, procesar e interpretar imágenes que registran la interacción entre la energía electromagnética y el objeto de estudio” (Sabins 1996).

La anterior definición es breve, sin embargo, abarca de una manera óptima el campo de estudio del presente capítulo. Por último, se puede citar una definición más detallada con respecto a percepción remota como:

Es el registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas, por medio de instrumentos como escáners y cámaras localizadas en plataformas móviles y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación , interpretación de imágenes y procesado de las mismas.(Sabins 1978)

El análisis de imágenes satelitales permite identificar objetos en la superficie terrestre con base en su comportamiento en las regiones del espectro electromagnético, complementándose mediante validación de campo e información contextual previa que se tenga de la zona de estudio. Dichos análisis, proveen información de utilidad, constante y actualizada de un lugar en específico.

Además, la percepción remota permite estimar y monitorear variables biofísicas (medidas directamente de un sensor remoto) e híbridas (se emplea más de una variable biofísica).

De esta manera, se puede considerar a la percepción remota como importante generador de información espacial a nivel global, para hacer estudios de áreas de una manera rápida, precisa y en superficies muy extensas. Sin olvidarse de la obtención de datos *in situ*.

1.1 Principios de la Radiación Electromagnética

1.1.1 Proceso de Percepción Remota

Para poder obtener información utilizando técnicas de percepción remota, debemos describir cada uno de los elementos que implica el proceso de percepción remota. De acuerdo con CCRS (*Canada Centre for Remote Sensing*) el proceso se puede resumir en 7 elementos principales, descritos a continuación (Fig. 1):

- A. Fuente de energía o iluminación¹. El sol como fuente de energía que provee de energía electromagnética al objeto de interés en la superficie terrestre.
- B. Radiación y Atmósfera. La energía que viaja de su fuente de origen al objeto de interés, tiene contacto con la atmósfera.
- C. Interacción con el objeto. Existen ciertos tipos de interacción entre la radiación que incide y el objeto de interés, las cuales dependen principalmente de las características del objeto y de la radiación.
- D. Sensor. La energía que es dispersada o emitida por el objeto de interés, viaja de nuevo por la atmósfera y es captada por un sistema diseñado para registrar la radiación electromagnética.
- E. Transmisión y recepción de datos. La energía registrada por el sensor es enviada de manera codificada a una estación, donde es decodificada a una imagen digital.
- F. Procesamiento. Las imágenes digitales son tratadas mediante procesos computacionales que permiten extraer información acerca del objeto de interés.
- G. Aplicación. Última etapa del proceso que permite generar nueva información para asistir o solucionar un problema particular. Los productos finales, generalmente son mapas temáticos.

¹ El sol no es la única fuente de iluminación, existen dispositivos contruidos por el hombre como fuente artificial de energía.

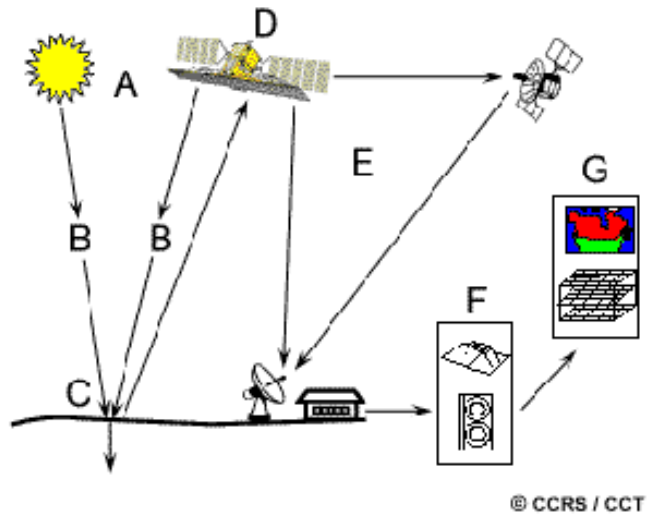


Figura 1. Proceso de percepción remota

Los sistemas de percepción remota emplean sensores activos y pasivos, la principal diferencia radica de acuerdo a la fuente de energía que utilizan para capturar información. Los métodos activos, tienen su propia fuente de energía y producen señales en forma de ondas electromagnéticas que posteriormente registran en sus sistemas de captura, como ejemplos tenemos el radar y el lidar, por el contrario, los pasivos solo registran la radiación emitida por el sol.

1.1.2 Leyes de la radiación electromagnética

El principal requerimiento en percepción remota, es una fuente de energía que ilumine al objeto de interés en la superficie terrestre, la energía viaja a través de la atmósfera en forma de radiación electromagnética.

La radiación electromagnética se define como un fenómeno ondulatorio de transporte de energía, formado por un campo magnético y uno eléctrico perpendiculares entre sí, cuya velocidad de desplazamiento en el vacío es de $c = 3 \times 10^9$ m/s. (Fig. 2) Al conjunto de los campos magnético y eléctrico se les llama campo de radiación.

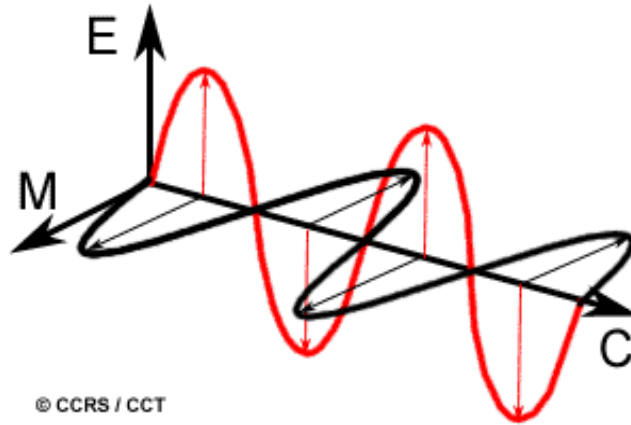


Figura.2 Comportamiento de radiación electromagnética

“Entender como la radiación electromagnética es creada, como se propaga a través del espacio, y como interactúa con otras materias, es útil para describir los procesos usando dos diferentes modelos: el modelo de onda y el modelo de partícula” (Englert et al., 1994).

Las dos propiedades principales de la radiación electromagnética son una longitud de onda λ y una frecuencia ν (Fig. 3).

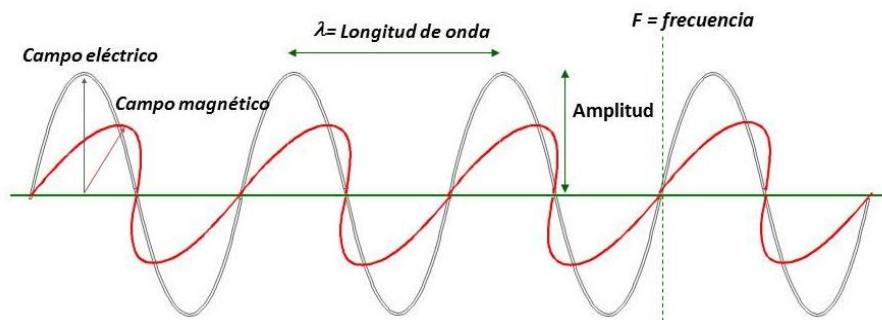


Figura 3. Propiedades de la radiación electromagnética (Chuvieco 2008)

De acuerdo con Rott (2000), la relación entre la longitud de onda y la frecuencia de la radiación electromagnética está basada en la siguiente fórmula, donde c es la velocidad de la luz:

$$c = \lambda v$$

La longitud de onda (λ) es la distancia de la separación existente entre dos máximos (crestas) adyacentes de una onda, por lo general en percepción remota se expresan en micrómetros (Cuadro 1). Una cresta es la máxima amplitud de una onda.

| Unidad | Distancia | |
|---------------------------------------|------------|----------------|
| Kilometro (km) | 1000 m | |
| Metro (m) | 1.0 m | |
| Centímetro | 0.01 m | = 10^{-2} m |
| Milímetro (mm) | 0.001 m | = 10^{-3} m |
| Micrómetro (μm) | 0.000001 m | = 10^{-6} m |
| Nanómetro (nm) | | = 10^{-9} m |
| Angstrom (A) | | = 10^{-10} m |

Cuadro 1. Unidades de longitudes de onda utilizadas en percepción remota (Jensen, 2007)

La frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda que pasan por un punto fijo por unidad de tiempo, se miden en Hertz y cada una unidad equivale a un ciclo por segundo (Cuadro 2).

| Unidad | Frecuencia (ciclos por segundo) |
|------------------------|---------------------------------|
| Hertz (Hz) | 1 |
| Kilohertz (kHz) | 10^3 (= 1,000) |
| Megahertz (MHz) | 10^6 (= 1,000,000) |
| Gigahertz (GHz) | 10^9 (= 1,000,000,000) |

Cuadro 2. Unidades de frecuencia utilizadas en percepción remota (Jensen, 2007)

La frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda. Correspondiendo a las longitudes de onda más cortas, las más altas frecuencias y viceversa.

Es conveniente estudiar algunas de las leyes de la radiación electromagnética. De acuerdo con Chuvieco (2008), en su libro "Teledetección Ambiental" se mencionan las principales leyes de radiación electromagnética, útiles para caracterizar espectralmente los tipos de objetos en la superficie terrestre, a continuación se muestra una breve síntesis de la ley de Planck y la ley de desplazamiento de Wien.

La energía registrada por un sensor depende de factores intermedios, uno de los más importantes y de los cuales se han establecido distintas fórmulas es la temperatura de los objetos en la superficie terrestre. Para la realización de cálculos la percepción remota considera el cuerpo negro como un sistema de medición que permite encontrar el comportamiento de los cuerpos reales. Un cuerpo negro es un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe, es decir un emisor perfecto.

La ley de Planck establece que cualquier objeto por encima del cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) radia energía, y que esta aumenta conforme a la temperatura. A partir de lo anterior, se han construido curvas de emitancia de cuerpos negros a distintas temperaturas que nos permiten identificar el comportamiento de un objeto en función de su temperatura. Por ejemplo, si tomamos la temperatura promedio de la tierra en $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ la gráfica nos muestra la curva de radiancia espectral de un cuerpo negro a la temperatura de la tierra en 300 K, permitiendo establecer en que longitudes de onda se encuentra más próximo (Fig. 4).

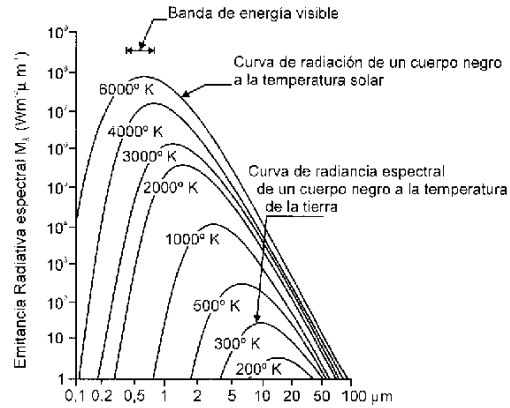


Figura 4. Emisión de energía de un cuerpo negro a distintas temperaturas (Chuvienco 2008)

La Ley de Desplazamiento de Wien nos permite calcular la longitud de onda en donde un cuerpo negro emite su máxima energía en función de su temperatura y queda establecida de la siguiente manera:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \mu m K}{T}$$

Donde T es la temperatura en grados Kelvin y

λ_{max} es la longitud de onda del pico de emisión en micrómetros.

La importancia de esta ley es que permite seleccionar la banda más conveniente para detectar un objeto o fenómeno a determinada temperatura, lo cual ayuda a identificar cubiertas terrestres.

1.2 El espectro electromagnético en percepción remota

La radiación electromagnética de cada uno de los objetos en la superficie terrestre proporciona información en función de su longitud de onda. Debido a la variabilidad de estas longitudes de onda, la percepción remota organiza esta energía en función de su longitud de onda y frecuencia; donde se establecen una serie de regiones o bandas las cuales se les denomina espectro electromagnético.

Las regiones del espectro para fines de percepción remota, de acuerdo a los sensores y el tipo de radiación son los siguientes:

Región óptica reflectiva.- comprende las longitudes de onda entre 0.2 a 2.3 μm que corresponden a aquellas zonas que dependen de energía solar, desde el violeta al infrarrojo medio.

Región emisiva o termal.- comprende las longitudes de onda entre 8 a 14 μm donde se manifiesta con mayor intensidad la emisión de los cuerpos de la tierra que se caracterizan por una temperatura absoluta alrededor de 300 K.

Región de radiación reflejada en microondas.- comprende las longitudes entre 0.1 cm a 1 m.

Además, es importante describir una serie de bandas espectrales que son las más frecuentemente empleadas con los sensores actuales². El espectro electromagnético se divide en cuatro regiones principalmente: ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas (Fig. 5).

² Como base para acotar las bandas espectrales, se consideró la terminología más común encontrada en el libro "Teledetección Ambiental" (Chuvienco, 2008, pág. 46).

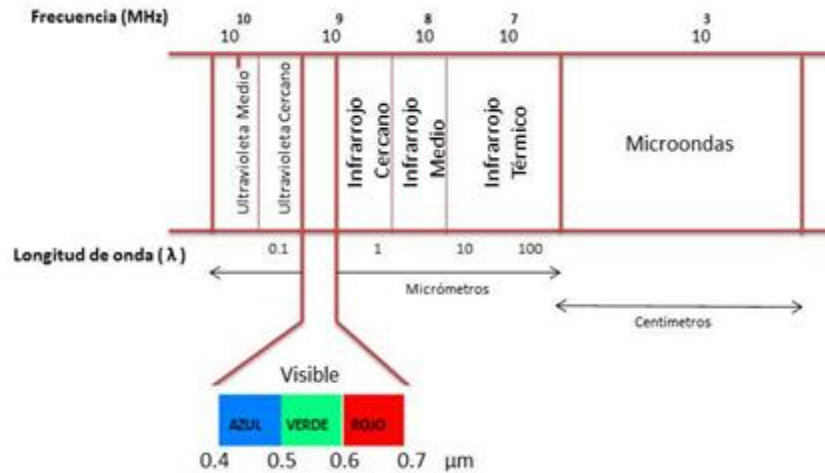


Figura 5. Espectro electromagnético (Chuvieco 2008)

La región ultravioleta se divide en: ultravioleta medio y ultravioleta cercano; la región visible en tres canales (azul, verde y rojo); y la región infrarroja en: infrarrojo cercano, medio y lejano o térmico (Cuadro 3).

| Región | | Longitud de onda |
|--------------|-----------------------------|------------------|
| Ultravioleta | Ultravioleta Medio | 0.2 - 0.3 μm |
| | Ultravioleta Cercano | 0.3 - 0.4 μm |
| Visible | | 0.4 - 0.7 μm |
| Infrarrojo | Infrarrojo cercano | 0.7 - 1.3 μm |
| | Infrarrojo medio | 1.3 - 8.0 μm |
| | Infrarrojo lejano o térmico | 8 - 14.0 μm |
| Microondas | | 1.0 mm - 1.0 m |

Cuadro 3. Regiones del espectro electromagnético en percepción remota

(Fuente: elaboración propia)

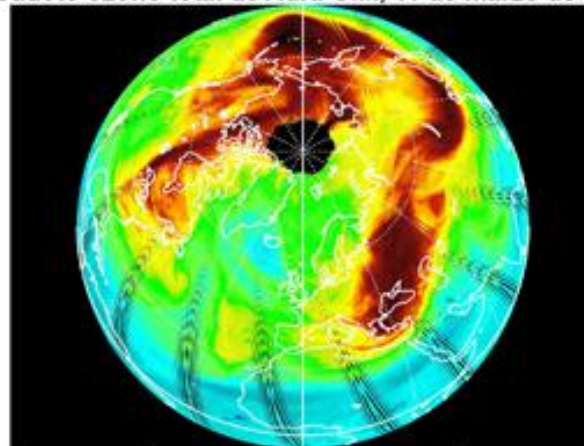
1.2.1 Aplicaciones en región ultravioleta

Ultravioleta significa “más allá del violeta” e indica el intervalo que se encuentra a las afueras de la región violeta. Abarca aproximadamente de 0.001 a 0.4 μm , en percepción remota las longitudes de onda utilizadas son pequeñas y se destacan dos principales: ultravioleta medio (0.2 a 0.3 μm) y cercano (0.3 a 0.4 μm).

La región ultravioleta cercana es la más importante en percepción remota, ya que al emitir este tipo de radiación en la superficie terrestre materiales como rocas y minerales se pueden identificar. Las aplicaciones en esta región no solo se remiten a la interacción con la tierra sino también con la atmósfera, algunos de sus estudios se involucran en temas de calentamiento global y ozono.

Un ejemplo es AURA (*Association of Universities for Research in Astronomy*), investigación científica llevada a cabo para monitorear la capa de ozono, la calidad del aire y el clima. Uno de los sensores remotos manejados por esta misión es OMI (*Ozone Monitoring Instrument*), el cual registra la dispersión solar en la región del ultravioleta mediante dos bandas UV-1 (0.27 - 0.14 μm) y UV-2 (0.306 – 0.38 μm). A través de estos datos se generan mapas de alta resolución de cantidades de ozono (Fig. 6).

Producto ozono total de Aura OMI, 11 de marzo de 2005



<100 180 260 340 420 >500
Ozono (unidades Dobson)

Cortesía NASA/JPL Caltech

Figura 6. Cantidades de ozono registradas por el sensor OMI en Marzo de 2005

1.2.2 Aplicaciones en región Visible

Es la única radiación electromagnética que perciben nuestros ojos y de las más utilizadas en percepción remota. Esta región se divide en tres bandas elementales, azul (A: 0.4 – 0.5 μm), verde (V: 0.5 – 0.6 μm) y rojo (R: 0.6 – 0.7 μm), a partir de dichas bandas se puede generar el resto de los colores (Fig. 7)

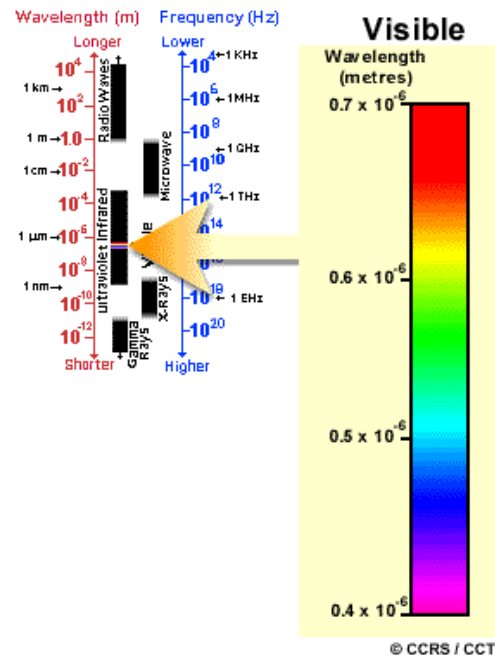


Figura 7 .Región del Visible en el espectro electromagnético

Una de las aplicaciones en la región del visible, es la identificación de salud en las hojas de las plantas de acuerdo con el contenido de clorofila. Las hojas son identificadas por el color verde debido a que la clorofila en las hojas absorbe energía en las longitudes de onda del visible y el color verde es reflejado. Las diferencias de color en las hojas, clasifica a las plantas sanas de las que no lo están.

Existen sensores que hacen estimaciones de la productividad de un océano con respecto a la concentración de clorofila. SeaWiFS (*Sea viewing Wide Field of view Sensor*) es un sensor diseñado para estimar la concentración de plantas marinas microscópicas llamado fitoplancton, opera en el rango visible del espectro electromagnético. Esto es debido al

hecho de que el color en la mayoría de los océanos del mundo en la región de la luz visible (0.4 – 0.7 μm) varía con la concentración de clorofila y otros pigmentos vegetales presentes en el agua, es decir, el fitoplancton más presente, mayor será la concentración de pigmentos de las plantas y el verde del agua. Esta información y algunos mapas de distribución de clorofila (Fig. 8) son mostrados a través del portal OceanColor Web. (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/> ultima entrada 04-09-2013).

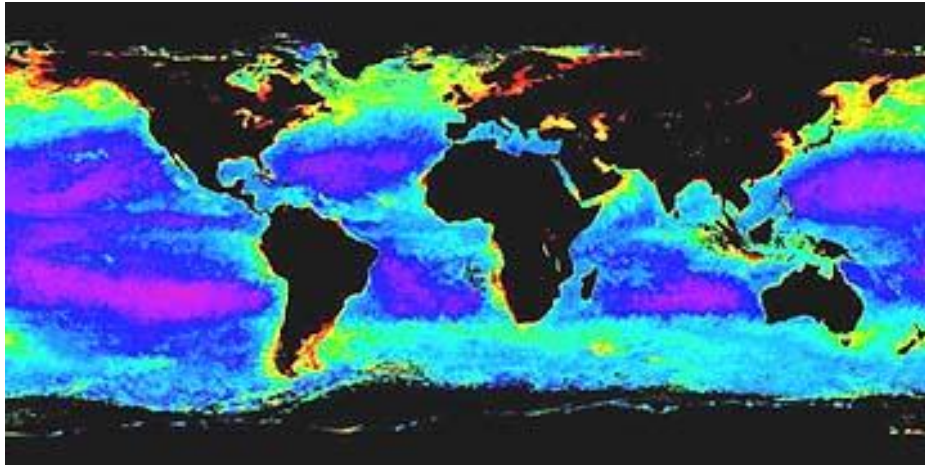


Figura 8. Estimación de clorofila derivada de imágenes SeaWiFS, Setiembre de 1997 (Fuente: NASA/ORBIMAGE)

1.2.3 Aplicaciones en región Infrarroja

Es muy similar a la radiación proveniente de la región del visible. Abarca aproximadamente de 0.7 – 8.0 μm , Debido a su extensión se divide en tres subregiones, cada una con distintas aplicaciones: infrarrojo cercano, medio y lejano (Fig. 9).

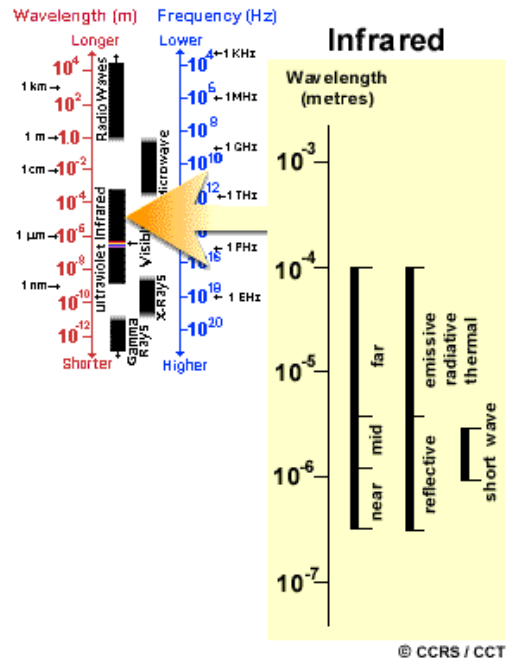


Figura 9. Región Infrarroja del espectro electromagnético

Infrarrojo cercano (IRC: 0.7 – 1.3 μm).- Sus principales aplicaciones se basan en la discriminación de cubiertas vegetales y concentraciones de humedad.

En esta región, se puede mencionar el empleo de índices de vegetación (IV) para estimar, evaluar y discriminar el estado de salud de la vegetación. El más utilizado es el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) propuesto por Rouse *et al* (1974). Este índice opera algebraicamente con las bandas del rojo (visible) y el IRC y como resultado obtiene valores de entre 1 y -1, donde valores negativos indican superficies sin vegetación (agua, nubes) y la vegetación se encuentra dentro del rango de 0.2 a 0.8 (Fig. 10).



Figura 10. Promedio Agosto Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) 1981 – 2000
(Fuente: NASA/Goddard Space Flight Center)

Infrarrojo medio (IRM 1.3 – 8 μm).- En esta región se entremezclan procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. A su vez, existen dos bandas que subdividen esta región y son: infrarrojo de onda corta SWIR (*Short Wave Infrared*) situado entre 1.3 y 2.5 μm y el también llamado infrarrojo medio (IRM) comprendido entre 3 y 5 μm .

El SWIR resulta idóneo para estimar el contenido de humedad en la vegetación mientras que el IRM permite detectar focos de alta temperatura, tales como incendios.

A la zona del infrarrojo medio se denomina hídrica (Guyot 1980) ya que en ella las propiedades ópticas de las hojas vienen determinadas por su contenido de agua. Como aplicaciones, se puede mencionar los estudios de estrés hídrico, los cuales permiten generar sistemas de producción utilizados en agricultura de precisión (AP). Mediante análisis en la región del infrarrojo, se puede hacer monitoreo de déficit hídrico, basado en información del suelo e índices. (Fig. 11)

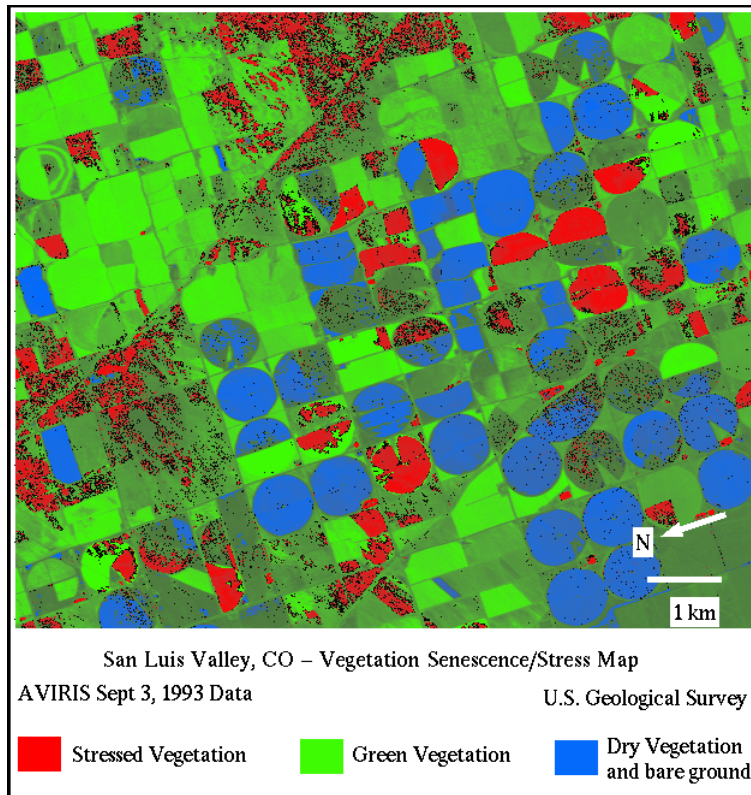


Figura 11. Mapa de estrés de vegetación, Valle de San Luis, Colorado (Clarke *et al.* 1995)

Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 - 14 μ m).- La energía radiada en esta región trata de lo que emite la superficie de la tierra en forma de calor. “La percepción remota se ha convertido en una herramienta imprescindible para el análisis y la evaluación de los riesgos naturales” (Chuvieco & Cocero 2004) y una de las aplicaciones de la región térmica es la de registrar la medida de las temperaturas (por medio de sensores remotos) en áreas tales como volcanes (Fig. 12), presentándose de esta forma una alternativa o complemento de los métodos tradicionales.

Un ejemplo de aplicación en la región térmica es el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) encargado de adquirir información de la superficie terrestre a través de 36 bandas espectrales. Su objetivo, va encaminado al entendimiento de procesos dinámicos globales en la tierra como lo es la temperatura. Por lo antes mencionado, cuenta

con dos bandas termales (4 y 11 μm) con una saturación de 450 y 400 $^{\circ}\text{K}$ para la identificación de cubiertas terrestres.



Figura 12. Imagen MODIS en color real de volcán Plosky Tolbachik, Rusia, 27 de Noviembre de 2012 (Fuente: NASA/MODIS)

1.2.4 Aplicaciones en región Microondas

Esta región abarca las longitudes de onda más largas (1mm – 1m) comparadas con las regiones del visible e infrarrojo. La radiación de las microondas (Fig. 13) tiene menos dificultades al atravesar la atmósfera y puede penetrar a través de distintas cubiertas tales como nubes, neblina, vegetación y polvo. Debido a que las microondas trabajan en longitudes de onda superiores al tamaño estándar de las gotas de agua, se recomienda utilizar en zonas lluviosas.

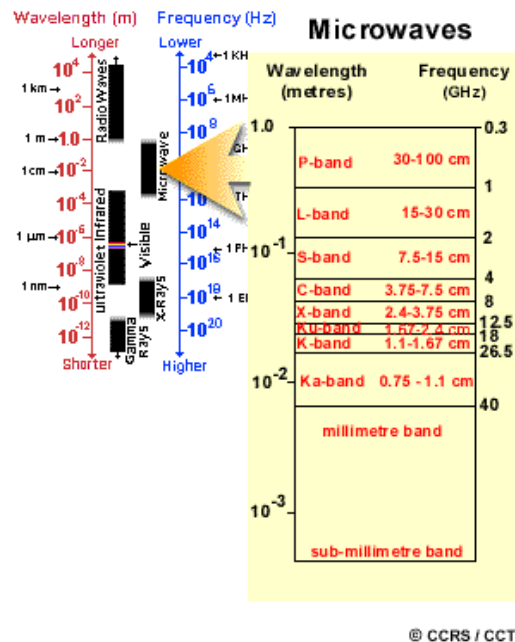


Fig 13. Región de las microondas en el espectro electromagnético

Uno de los satélites que opera en la región de las microondas es RADARSAT, primer satélite canadiense de observación de la tierra para el monitoreo del medio ambiente y de recursos naturales del mundo. Las imágenes de radar son representaciones de la tierra en una sola frecuencia, que destacan cambios en la rugosidad del terreno, relieves y niveles de humedad.

Además, una de las aplicaciones de RADARSAT es el monitoreo del litoral canadiense (Fig. 14), caracterizado en invierno por largos periodos de oscuridad y por su poca visibilidad debido a la frecuente presencia de nubes.

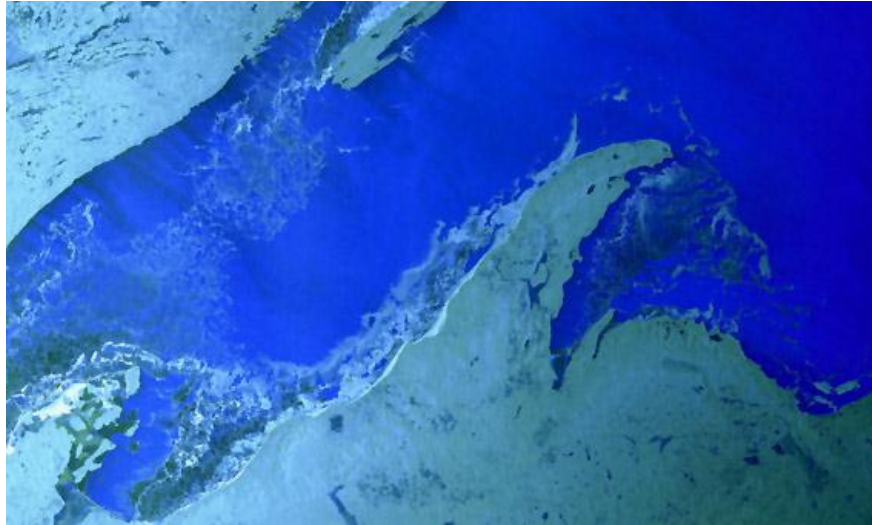


Fig 14. Imagen RADARSAT-2 de Litoral de Ontario, Canadá, 2008 (Fuente: RADARSAT / CSA)

1.3 Medios para obtener respuestas espectrales

1.3.1 Respuestas espectrales

De acuerdo con Sobrino (2000), una respuesta espectral se refiere al comportamiento reflectivo de los tipos de cubiertas terrestres en función de su longitud de onda en las regiones del espectro electromagnético. Para conocer dicho comportamiento, se emplean gráficos de respuestas espectrales promedio obtenidas a partir de espectro – radiómetros donde el eje de las abscisas corresponde a longitudes de onda (μm) y las ordenadas corresponden a reflectividad (%).

Las cubiertas terrestres más estudiadas son: agua, vegetación y suelo (Fig. 15). Dependiendo de las condiciones y variantes de la zona de estudio, la respuesta espectral puede variar pero su comportamiento se aproxima a la respuesta espectral promedio.

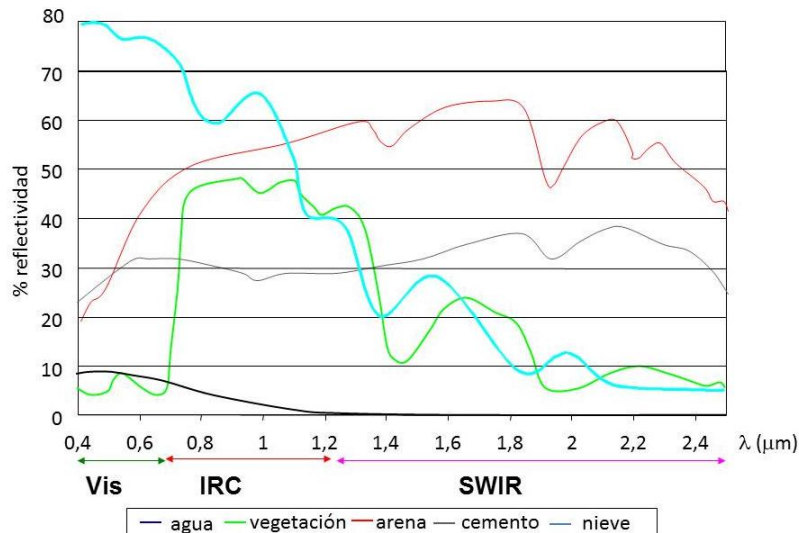


Fig 15. Respuestas espectrales de principales de cubiertas terrestres obtenidas por espectro-radiómetro GER-2600 (Chuvienco 2008)

1.3.1.1 Respuesta espectral de vegetación

Dependiendo del tipo de vegetación, las respuestas espectrales varían de acuerdo con el tipo de pigmento, estructura celular, humedad, etc. En general, la clorofila absorbe la radiación en las longitudes de onda en el azul y rojo, pero refleja en la banda del verde.

“En lo que se refiere a la reflectividad de la hoja podemos basarnos en estudios realizados a partir de espectro-radiómetros en laboratorio” (Colwell, 1974). Como patrones generales se establece baja reflectividad en el visible, alta en el IRC y baja con presencia de algunos máximos relativos, el SWIR (Fig. 16).

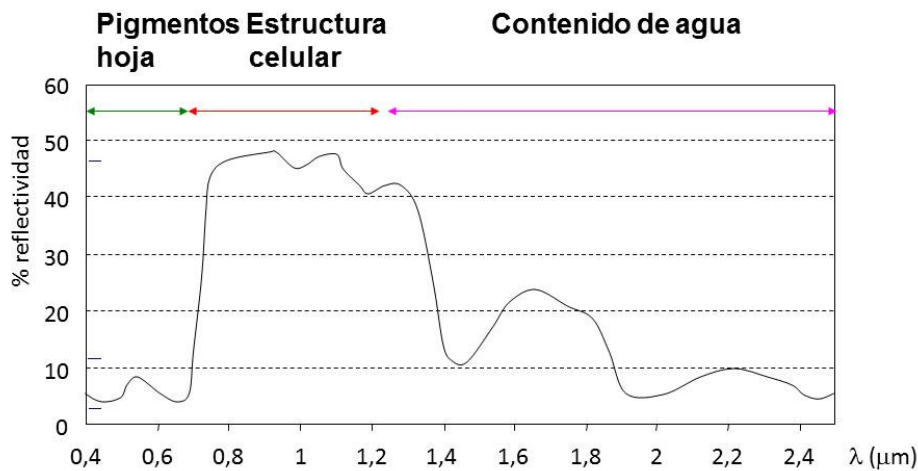


Fig. 16 .Respuesta espectral de la vegetación (Chuvieco 2008)

La baja reflectividad en el visible, se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja alrededor de 0.44 a 0.67 μm. La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano se debe a la baja absorción de la clorofila y a la estructura celular interna de las hojas alrededor de los 0.7 a 1.3 μm refleja la energía incidente, el resto de la energía es transmitida, y la absorción es mínima. Cualquier comportamiento espectral diferente al de la vegetación sana (hojas verdes), indica una fuente de estrés en la vegetación, a causa de una baja actividad clorofílica.

1.3.1.2 Respuesta espectral del suelo

El comportamiento espectral del suelo es más uniforme que el de la vegetación y del agua (Fig. 17), debido a que en los suelos no existe transmisión. “Los suelos están compuestos por estratos denominados horizontes que se distinguen por sus diferencias en color, textura y estructura” (Gandía 1991).

En general, la reflectividad de los suelos aumenta con la longitud de onda. Los suelos desnudos (sin vegetación) muestran una curva casi horizontal pero ascendente desde el visible al infrarrojo próximo. “Los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura, estructura y contenido de humedad” (Labrandero 1978).

El color del suelo, depende de la composición química, por ejemplo los de origen calcáreo son de color blanco (alta reflectividad en el visible) y los suelos arcillosos de color rojo (óxido de hierro). Respecto al contenido de humedad en los suelos, se presenta una alta absorción del agua alrededor de 1.45 a 1.92 μm .

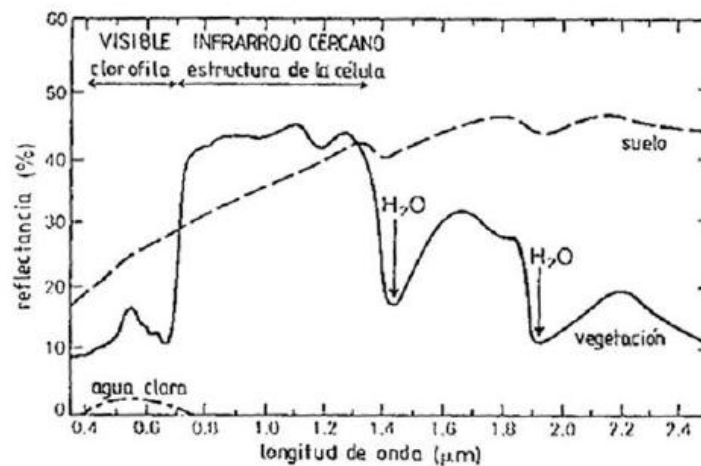


Fig. 17 .Comparativo de respuesta espectral del suelo con respecto a la vegetación y el agua
(Fuente: TeleSAT)

1.3.1.3 Respuesta espectral del agua

De acuerdo con Sobrino (2000), las superficies de agua absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible y prácticamente toda en longitudes de onda superiores a los 0.7 μm . La mayor reflectividad del agua se produce en el azul, reduciéndose hacia el infrarrojo cercano y medio, similar a la del suelo pero de sentido contrario.

La variabilidad de la respuesta espectral del agua depende de la profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, sedimentos y nutrientes), y rugosidad de la superficie. Si el agua presenta demasiada concentración de clorofila, la reflectividad en el azul desciende y aumenta en el verde (Fig. 18).

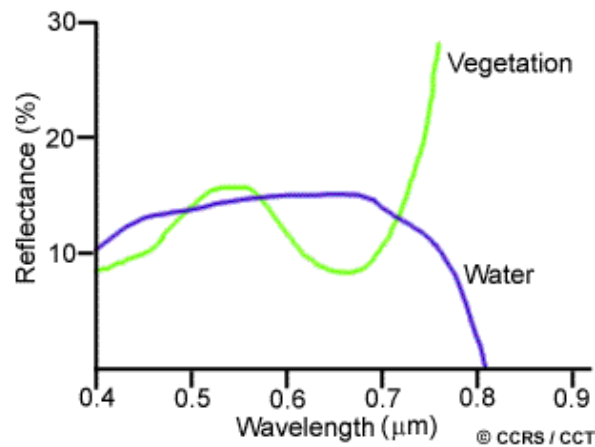


Fig. 18 Comparativo de respuestas espectrales de agua y vegetación

1.3.2 Formas de obtención de respuestas espectrales

De acuerdo con Chuvieco (2008), existen distintas formas de obtener una respuesta espectral. Las principales son las siguientes:

- Medirla a partir de un radiómetro
- Obtenerla a partir de una biblioteca espectral
- Obtenerla a partir de una imagen multi-espectral
- Simularla mediante modelos físicos

1.3.2.1 Respuesta espectral a partir de un radiómetro

La forma más común de obtener una respuesta espectral es por medio de radiómetros, los cuales, son aparatos que se encargan de registrar la radiación electromagnética. Los radiómetros, generan gráficos de respuestas espectrales de acuerdo al objeto de la superficie terrestre.

Una de las ventajas de los radiómetros es que permiten obtener la respuesta espectral directamente en campo (Fig. 19). La estructura de dichos aparatos, se encuentra calibrada para medir distintos rangos espectrales, generalmente desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, dependiendo de la aplicación.



Fig 19. Obtención de respuestas espectrales a partir de un radiómetro de campo ASD Fieldspec 3
(Fuente: INTA)

El analista de la imagen satelital se encuentra con una variedad de elementos de paisaje dentro de su área de estudio y para poder discriminarlos (identificarlos) requiere información de detalle que puede provenir de las mediciones de radiómetros.

El nivel de detalle de la respuesta espectral, se encuentra en función directa con el número y anchura de las bandas espectrales del radiómetro. Un mayor número de bandas con un estrecho rango, supone una mejor caracterización espectral reflejada en una variada discriminación de cubiertas terrestres. Por el contrario, bandas con un rango espectral amplio generan un valor promedio que puede dificultar la diferenciación de cubiertas de interés.

1.3.2.2 Principales bibliotecas espectrales

Las bibliotecas espectrales son colecciones de respuestas espectrales, obtenidas a partir de radiómetros de laboratorio bajo condiciones controladas, que sirven de referencia para conocer el comportamiento tipo de una determinada cubierta.

Estas bibliotecas se utilizan para calibrar valores de reflectividad estimados a partir de una imagen, además, facilita el entrenamiento automático en la interpretación de cubiertas y sirve como entrada para la extracción de modelos de mezclas espectrales.

Existen diversas bibliotecas espectrales que atienden a distintas necesidades de acuerdo a la zona de estudio y a los propósitos de cada investigación. Siendo así, podemos citar en general las principales bibliotecas espectrales más desarrolladas y consultadas.

La biblioteca desarrollada por USGS (*United States Geological Survey*)³ cuenta con una amplia variedad de espectros de minerales, vegetación, compuestos orgánicos y volátiles que cubre aproximadamente el rango de 0.2 a 3.0 μm . Esta biblioteca fue desarrollada por el laboratorio de espectroscopia de la USGS, el cual se encarga del estudio y la aplicación de métodos para identificar y mapear materiales o cubiertas a través de percepción remota.

Otra biblioteca espectral importante es la desarrollada por JPL (*Jet Propulsion Laboratory*)⁴ de ASTER con alrededor de 2400 curvas espectrales entre 0.4 a 2.5 μm que incluye espectros de minerales, rocas, suelos, vegetación, agua, nieve y cubiertas humanas tales como cemento, aluminio, etc.

En cuanto a espectrometría urbana se puede citar la biblioteca espectral desarrollada por UC (*University of California*)⁵ que se enfoca en una gran variedad de diferentes tipos de materiales encontrados en paisajes naturales tales como materiales de techos, tipos de pavimentos, superficies de suelo y agua, y áreas con vegetación.

³ Disponible a través de <http://speclab.cr.usgs.gov/> última entrada 07/03/2013.

⁴ Disponible a través de <http://speclib.jpl.nasa.gov/> última entrada 07/03/2013.

⁵ Disponible a través de http://www.ncgia.ucsb.edu/ncrst/research/pavementhealth/urban/road_spec.htm última entrada 07/03/2013

1.3.2.3 Otras maneras de obtener respuestas espectrales

Existen diversas formas de obtener respuestas espectrales, en esta sección se mencionan dos en particular. La primera se obtiene a partir de una imagen multispectral y la segunda mediante la simulación de modelos físicos.

Una imagen multispectral se conforma de un determinado número de bandas (dependiendo del tipo de sensor), cada una con diferente información en distintas regiones del espectro electromagnético. A partir de una combinación RGB de las mismas, se obtiene una representación de una escena de la superficie terrestre. Cada pixel de la imagen en valores de reflectividad, representa una cubierta terrestre, para la generación de respuestas espectrales se utiliza software de procesamiento digital de imágenes, el cual se encarga de graficar el comportamiento de los pixeles seleccionados (Fig. 20).

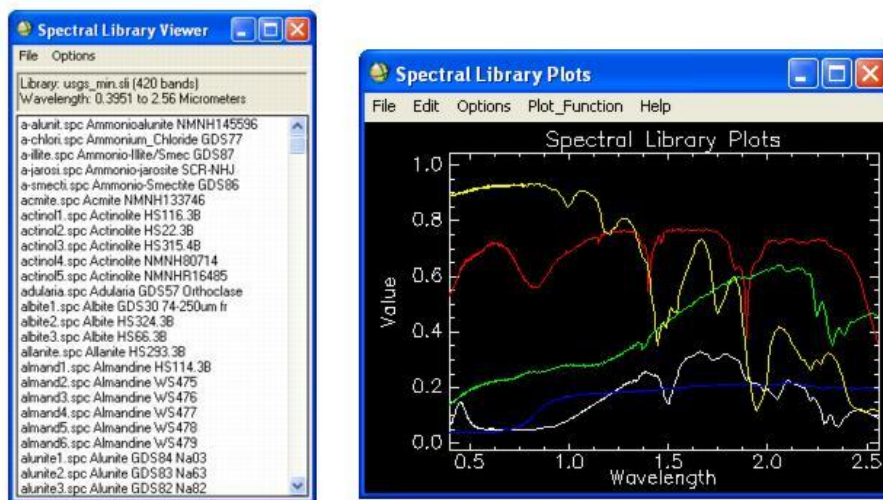


Fig 20. Cuadro de dialogo de Biblioteca Espectral (izquierda), ventana de espectros individuales (derecha), de software ENVI 4.7 (Fuente: ENVI Help)

Mediante la simulación de modelos físicos también se puede obtener respuestas espectrales. Dichos modelos, se encargan de estimar la reflectividad de variables de interés a partir de distintos parámetros de entrada establecidos por el analista de la imagen, en función del tipo de ambiente. Por ejemplo, para la estimación de contenido de agua en las plantas, los parámetros de entrada se encuentran en función de factores tales como tipo de suelo, composición de plantas, ángulos de observación e iluminación, etc.

Dentro de los modelos de simulación, se pueden diferenciar dos tipos de modalidades de acuerdo al modo, ya sea directo o inverso. En modo directo se estima la reflectividad variando los parámetros de entrada del modelo físico, mientras que en el modo inverso se estiman los parámetros a partir de la reflectividad medida por el sensor.

La obtención de respuestas espectrales se encuentra en función directa con el número de bandas del sensor utilizado y del ancho de longitud de onda de las bandas espectrales.

PERCEPCIÓN REMOTA Y AMBIENTES TERRESTRES

En este capítulo se hace una revisión del papel de la percepción remota como herramienta de investigación y de observación de diferentes ambientes terrestres en función del paisaje, a través del análisis de imágenes satelitales. Dichos análisis, estudian las componentes naturales de un ambiente terrestre, en función de los tres estados físicos de la materia líquido, sólido y gaseoso representados por: hidrósfera, litósfera y atmósfera; que en su conjunto forman la biosfera.

Las aplicaciones en percepción remota trabajan con la litósfera, la hidrósfera y la atmosfera, con la intervención de algunos procesos de todas o alguna de ellas. A partir de la información espectral y contextual extraída de imágenes satelitales, se puede clasificar a nivel de paisaje. El paisaje se considera como parte de un ambiente terrestre y se divide en natural y antrópico.

Una vez estudiados los componentes naturales de un ambiente terrestre y a partir de los criterios establecidos por fisiografía (principalmente litósfera y relieve), se dividen los ambientes en tres tipos: zonas de ambiente montañoso, planicies y zonas de transición.

Dependiendo del tipo de ambiente terrestre las aplicaciones de percepción remota varían. Por ejemplo, para el ambiente montañoso y su representación, se utilizan MDE (Modelos Digitales de Elevación) derivados de información de sensores remotos. En ambiente de planicies, se puede obtener cartografía de áreas inundables. Por último, en zonas de transición se puede generar cartografía de cambios de usos de suelo, tales como ciudades.

2.1 Ambientes terrestres y paisaje fisiográfico

Ambiente terrestre es un término ampliamente usado para describir los elementos presentes en un área en particular de la superficie terrestre. Para poder entender estos elementos, es necesario dividirlos y se puede recurrir a distintas ciencias, entre ellas la fisiografía. Para los propósitos de este capítulo, la definición más adecuada se describe a continuación:

“La fisiografía está definida como la descripción de la naturaleza a partir del estudio del relieve y la litosfera, en conjunto con el estudio de la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera” (Villota 1989).

La fisiografía, es de utilidad porque permite llevar a cabo análisis de información de zonas de interés, para entender los elementos que lo constituyen y cómo interactúan entre sí.

Un ambiente terrestre, se puede describir con la ayuda de fisiografía, sin embargo también se puede definir en términos de paisaje:

“Los ambientes terrestres corresponden a los paisajes naturales y antrópicos, sobre los cuales se precisan las relaciones entre los aspectos sociales y económicos, y son producto de la dinámica e interacción de los procesos físicos, químicos y biológicos” (Tricat & Killian 1979).

Lo anterior implica describir a un ambiente terrestre tanto de forma natural como después de la intervención humana. El paisaje fisiográfico queda definido por un paisaje natural y un paisaje antrópico, donde se registran los cambios realizados por el hombre.

Para describir los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en un ambiente terrestre, se utiliza la fisiografía con el auxilio de algunas ciencias de la tierra, que más adelante se describen.

2.1.1 Paisaje Natural y Paisaje Cultural

Trabajar con un ambiente terrestre implica una aproximación a nivel de paisaje, el cual puede ser entendido en paisaje natural y antrópico, por lo anterior, es de importancia establecer los conceptos que permitan su adecuado entendimiento.

Para definir el concepto de paisaje se debe revisar los orígenes del término, el cual comenzó a utilizarse en geografía a comienzos del siglo XIX. La definición que se presenta a continuación es antigua, pero su validez radica en considerar al paisaje como parte integral de un ambiente terrestre:

“Un paisaje es el conjunto de formas que caracterizan un sector determinado de la superficie terrestre” (Hommeyer 1805).

Una definición complementaria, se presentó casi 100 años después, publicado en el libro “Los Fundamentos de la Ciencia del Paisaje” que establece:

“Un paisaje es un conjunto complejo formado por clima, agua, tierra, plantas y fenómenos culturales” (Passarge 1920).

La anterior definición, describe al paisaje como un área en particular donde existen factores que forman y condicionan las circunstancias de cada lugar. Además, al mencionar fenómenos culturales se toma en cuenta los paisajes que son intervenidos por el hombre, algo que la primera definición no establece y de esta forma se ve enriquecido.

Con el surgimiento del paisaje integrado, el término comienza a ser más amplio y agrega elementos biológicos y antrópicos. De acuerdo a la división de la geografía, en las áreas de geografía física y humana, el paisaje se puede resumir en dos principales: paisaje natural y paisaje cultural, en este último se incluye el paisaje antrópico.

El paisaje natural está formado por todos aquellos elementos físicos que componen un determinado lugar de obra exclusiva de la naturaleza. Este tipo de paisaje no se encuentra alterado por la intervención humana, como ejemplo se puede mencionar el Cañón del Sumidero en Chiapas (Fig. 21).



Figura.21 Cañón del Sumidero, Chiapas. Ejemplo de paisaje natural (Fuente: Gobierno del estado de Chiapas).

El paisaje cultural es un espacio en el cual existe intervención humana (antrópico), se modifica el paisaje natural y se transforma de forma irreversible, donde se crea infraestructura tales como ciudades, viviendas, edificios, carreteras, uso de bosque, agricultura, etc. En México, Ciudad Universitaria es un ejemplo de paisaje cultural (Fig. 22).



Figura.22 Ciudad Universitaria, México. Ejemplo de paisaje cultural (Fuente: UNAM)

“Los cambios en el paisaje pueden ser causados por procesos naturales o por la intervención humana. Los producidos por la intervención humana pueden ser planificados o no, y la urbanización, la deforestación, el desarrollo de la agricultura, la desertificación y la reforestación son considerados como sus principales causas” (Forman 1995; Forman & Collinge 1997).

2.1.2 Componentes naturales de un ambiente terrestre

De acuerdo a Strahler (2004), para poder describir y entender un ambiente es necesario estudiar la superficie terrestre en sus tres estados físicos: sólido representado por la litósfera, líquido representando por la hidrósfera, y gaseoso representado por la atmósfera (Fig. 23). Las componentes naturales⁶ atmósfera, hidrósfera y litósfera en su conjunto forman la biosfera.



Figura.23 Componentes de un ambiente terrestre (Fuente: elaboración propia)

La fisiografía o geografía física, se encarga de estudiar distintos ambientes terrestres desde una escala local a una global. La descripción de un ambiente es extensa, por lo anterior, se necesita dividir en componentes naturales y analizar sus interacciones debido a que condicionan las características de cada lugar y repercuten en la forma en que se desarrolla la vida humana.

⁶ Lo que se menciona aquí como “componentes naturales”, en términos de geografía física se conoce como los cuatro reinos o esferas de la tierra.

Para la descripción de la atmósfera, hidrósfera y litósfera se consideraron las definiciones contenidas en el libro *“Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment”*.

La atmósfera terrestre es una capa de gases unidos por atracción gravitacional que envuelve el planeta tierra y se compone de 78% de nitrógeno, 20.9% de oxígeno y el resto de dióxido de carbono, argón hidrógeno, vapor de agua y partículas de polvo. Esta capa se encarga de recibir el calor y humedad de la superficie y la redistribuye para regular la temperatura ambiente.

A partir de su estudio, la atmósfera se ha dividido en distintas capas que son: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera (Fig. 24). Es en la troposfera donde se encuentran los distintos ambientes terrestres condicionados por factores como fenómenos naturales y meteorológicos. El clima, por ejemplo se influencia por elementos como temperatura del aire, humedad, formación de nubes, entre otros.

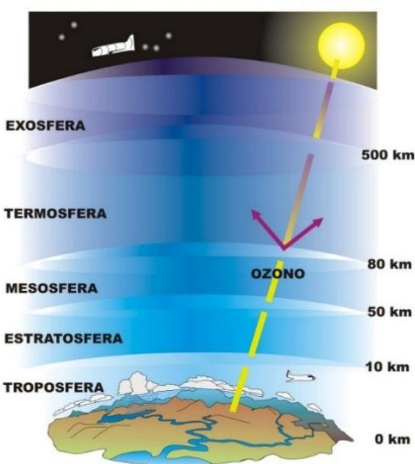


Figura.24 Capas de la atmósfera terrestre

El agua en todas sus formas constituye la hidrósfera (Fig. 25) Esta capa describe el agua que se encuentra debajo y sobre la superficie terrestre, e incluye sus tres estados físicos. La masa principal de la hidrósfera se encuentra en los océanos del mundo, pero el agua

también se produce en la atmósfera en forma de vapor gaseoso, y en la litósfera en forma de cristales de hielo sólido.

El agua es indispensable para el desarrollo de la vida humana, y su abundancia o ausencia condicionan el clima de un ambiente terrestre, de aquí su importancia.



Figura.25 Cobertura de agua presente en la superficie terrestre (Fuente: NASA)

La litósfera, representa el estado sólido de la superficie terrestre y se trata de una capa rígida constituida de rocas que forma parte de la corteza terrestre y parte del manto superior. La roca sólida tiene una capa superficial de suelo en el que los nutrientes están disponibles para los organismos. La vida en la litosfera, tanto en su interior como exterior, se hace posible debido a diferentes condiciones tales como temperatura, humedad y existencia de sustancias orgánicas.

La litósfera se encuentra formada por diferentes accidentes geográficos que dan lugar a formas terrestres, entre las que se puede mencionar montañas, colinas y planicies que ofrecen variados hábitats para plantas animales y seres humanos. Esta capa, se encuentra fragmentada en grandes bloques conocidos como placas tectónicas y a partir de su interacción se puede observar distintas formas terrestres que se conocen como relieve.

Los dos principales criterios aplicados por la fisiografía para describir y clasificar un ambiente terrestre son la litósfera y el relieve.

De acuerdo a CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) la biosfera⁷ se puede definir como la capa de la tierra donde se desarrolla la vida debido a distintos factores que lo propician. Su composición física, comprende la litósfera (5000 m altitud), la hidrósfera (200 m de profundidad en océanos) y la atmósfera (únicamente la troposfera).

Los organismos vivos de la tierra utilizan los gases de la atmósfera, el agua de la hidrósfera y los nutrientes de la litósfera para su supervivencia. Para su existencia, la biosfera depende de los anteriores componentes naturales.

2.1.3 Principales formas de relieve

Las formas del relieve se entienden como un sistema complejo de relaciones entre la superficie terrestre y sus componentes naturales: litósfera, hidrósfera y atmósfera. El relieve es el resultado de la interacción de procesos internos y externos que ocurren en las distintas capas del planeta y también puede verse como un sustrato del paisaje fisiográfico que influye en el clima, en los suelos y en la vegetación.

Debido a que el relieve terrestre⁸ no presenta una altitud uniforme se pueden reconocer en la superficie terrestre tres principales formas de relieve: llanuras, mesetas (planicies) y montañas. A continuación se describen estas formaciones de paisaje:

Llanuras o planicies.- son regiones planas del relieve a baja altitud, menor de 500 msnm, formadas por la acumulación de diversos materiales depositados por los ríos a través de su

⁷ Se consideró como base la definición descrita por CONABIO y se incluyeron algunos datos complementarios de las distintas capas de la tierra.

⁸ Se hizo un resumen de las principales formas de relieve terrestre para los fines de este capítulo, véase Fernando Carreto et al, *Geografía general*, pg. 95-97 México.

curso o en su desembocadura. Por lo general, se localizan en las costas y en las cuencas de los grandes ríos. Un ejemplo de planicie, es la depresión del Balsas en México (Fig.26).



Figura.26 Depresión del Río Balsas, ejemplo de planicie en México

Las llanuras de acuerdo a su origen se pueden dividir en: sedimentarias, fluvial o aluvial, glaciar, de tundra, penillanuras, lacustres, de clima seco, calizas, de magma y de levantamiento (zonas costeras).

Debido a sus condiciones, este tipo de relieve terrestre propicia la agricultura y los asentamientos humanos.

Mesetas.- son regiones planas del relieve terrestre que se encuentran a una altitud mayor de 500 msnm, también llamadas altiplanicies. Estas superficies planas están situadas sobre una elevación y pueden estar cercanas o entre montañas. Como ejemplo, encontramos la Meseta de Anáhuac o también conocida como Meseta Central de México (Fig.27).

De acuerdo a su origen las mesetas se pueden dividir en: interiores, exteriores, denudación, piedemonte y de magma. Al igual que en las planicies, este tipo de paisaje propicia actividades antrópicas, tales como agricultura y asentamientos humanos.



Figura.27 El Bajío, San Miguel Allende parte de la Meseta Central de México

Montañas.- son terrenos elevados y de gran pendiente contemplando alturas de más de 500 msnm hasta los 8,848 (Everest, Himalaya), por lo general se agrupan y establecen sierras, sistemas y cordilleras, su formación se debe a movimientos entre placas tectónicas que provocan el plegamiento entre rocas. Un ejemplo de relieve montañoso es el cerro de la silla en Monterrey, con una altura 1820 msnm (Fig. 28).



Figura.28 El cerro de la silla, Monterrey, ejemplo de relieve montañoso. (Fuente: Gobierno del estado de Nuevo León).

Una cordillera es una sucesión de montañas enlazadas entre sí, que constituyen zonas plegadas o en fases de plegamiento. Las sierras son montañas de menor altitud que las cordilleras, que por acción de distintos agentes externos su pendientes es suave.

2.2 La percepción remota en diferentes ambientes terrestres

A lo largo de la historia, el hombre ha estudiado la superficie terrestre para tener un mejor entendimiento del medio que lo rodea. Actualmente, una herramienta poderosa que permite hacer monitoreo terrestre es la percepción remota a través del análisis de imágenes satelitales.

La percepción remota se presenta como una manera de analizar, describir, estudiar y monitorear un ambiente terrestre por medio de la obtención de información de utilidad con relación al paisaje de la zona de estudio. Esta información, presenta ventajas debido a la visión global que provee, ya que facilita el estudio de grandes extensiones de área.

La representación de un ambiente terrestre es compleja debido a las componentes naturales que intervienen. Sin embargo, a través del proceso de percepción remota (descrito en el capítulo anterior) se pueden generar representaciones de la superficie terrestre con la introducción de algunos conceptos nuevos que se mencionan a continuación. De acuerdo con Lira (1995) los elementos básicos de la percepción remota⁹ son: una fuente de iluminación, el paisaje, la escena, el sensor remoto, y la plataforma (Fig. 29).

⁹ Se decidió tomar como base estos elementos básicos de percepción remota porque se incluye el paisaje y se entiende como la variedad de objetos o elementos presentes en la superficie terrestre.

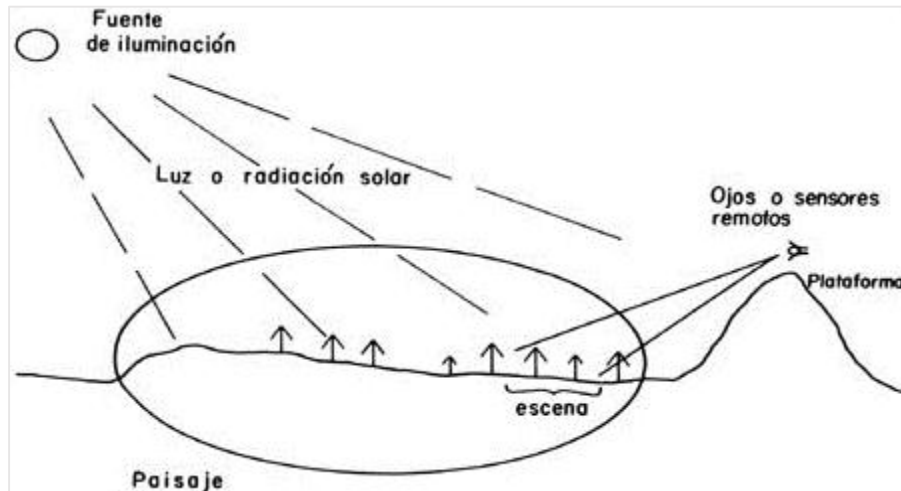


Figura.29 Elementos básicos de percepción remota (Lira 1995)

El proceso comienza con una fuente de iluminación (en este caso radiación solar), un sensor remoto encargado de capturar la luz proveniente de la escena y una plataforma, que es el lugar donde se coloca el sensor remoto. El paisaje se encuentra formado por todos los objetos presentes en la superficie terrestre y la escena hace referencia a una representación bidimensional de una sección del paisaje de interés.

La principal labor de la percepción remota es el estudio del paisaje, este último considerado como un sistema complejo que se ve influido por distintos factores. A partir del análisis de imágenes satelitales se generan estimaciones de la complejidad del paisaje a través de características espectrales y su contexto.

Cada paisaje forma parte de un ambiente terrestre que cuenta con distintas características topográficas, climáticas y de relieve que condicionan las técnicas aplicadas por percepción remota. Para fines prácticos y atendiendo principalmente a la relación percepción remota - ambientes terrestres se propone la división en tres principales áreas que son: zonas de ambiente montañoso, planicies y zonas de transición.

2.2.1 Percepción remota en ambiente montañoso

En el ambiente montañoso, se estudian principalmente procesos que ocurren en la litósfera. Dadas sus condiciones físicas este ambiente es uno de los más difíciles de representar, debido a su difícil acceso, ya sea por razones políticas o físicas. Una de las principales razones físicas es la variabilidad en las alturas del terreno (topografía), las cuales hacen difícil y peligroso trabajar directamente en campo. Una forma de evitar estos inconvenientes es hacerlo de forma indirecta, y es aquí donde aparecen las técnicas de percepción remota.

A través de Modelos Digitales de Elevación (MDE), la percepción remota contribuye al mapeo, monitoreo y modelado de relieves muy versátiles que permiten conocer la morfología del terreno y algunos elementos de origen antrópico.

Desde un punto de vista topográfico los MDE son representaciones visuales y matemáticas de datos altimétricos con respecto al nivel medio del mar, que permiten caracterizar las formas del relieve y los objetos presentes en la superficie terrestre. Estos modelos son generados a partir de mediciones tomadas por altímetros a bordo de plataformas aéreas en sensores remotos.

“Los estereos satélites utilizan sensores tales como ASTER o SPOT5 que proporcionan MDE con una resolución espacial del orden de algunas decenas de metros, y con una precisión vertical en el orden de algunos metros a algunas decenas de metros” (Kaab 2005). Los MDE InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) tienen resoluciones y precisiones similares, pero no están limitados por cobertura de nubes en el momento de adquisición de datos (Toutin & Gray 2000).

In SAR genera MDE a partir de dos imágenes de una región en particular y procesa la información para convertirlas en imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*), con base en sus diferencias se obtienen datos de la altura y/o movimiento de la superficie terrestre (Fig. 30).

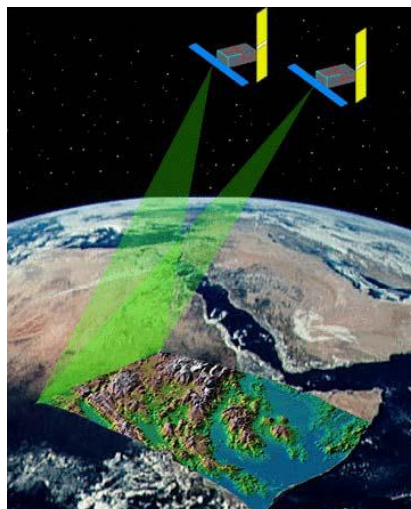


Figura.30 Modelos Digitales de Elevación a partir de técnicas de interferometría InSAR (Fuente: Universidad de Stanford)

Otra opción es el modelo ASTER GDEM (*ASTER Global Digital Elevation Model*) que tiene una cobertura entre los 83° N y los 83° S de un conjunto único de datos globales de elevaciones medidas a cada 30 metros, disponibles en su sitio web de manera gratuita (Fig. 31).

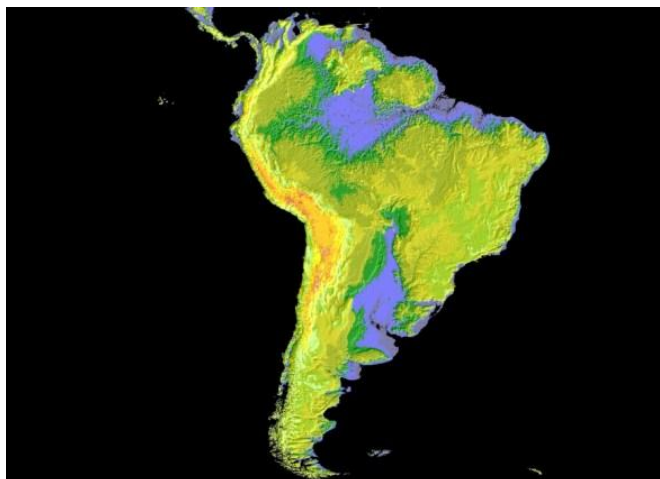


Figura.31 Representación de Sudamérica a partir de valores altimétricos obtenidos del modelo ASTER (Fuente: ASTER GDEM)

“El MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) tiene una resolución espacial de alrededor de 90 m y una precisión vertical en el orden de metros a unas decenas de metros” (Kaab 2005). Dicho modelo, abarca entre 60 ° N y 54 ° S y se encuentra disponible de forma gratuita en su página web.

El modelo SRTM se puede representar fusionándolo con una imagen satelital que corresponda a zona de estudio (Fig. 32).

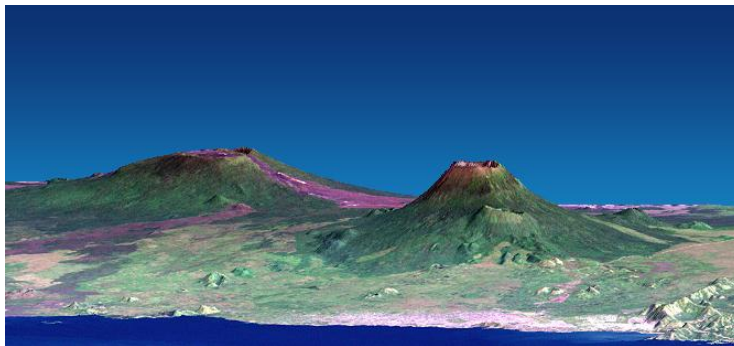


Figura.32 Imagen Landsat fusionada con un MDE SRTM de los volcanes Nyamuragira (izquierda) y Nyiragongo (derecha). El Congo (Fuente: NASA/JPL/NIMA)

La última forma de obtener un MDE es a partir de la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging), la cual obtiene coordenadas tridimensionales de puntos del terreno mediante un láser montado en un avión (Fig.33). El conjunto de datos colectado por esta tecnología se le conoce como nube de puntos LIDAR, que a partir de ellos se pueden elaborar modelos digitales de elevación sub-métricos de alta resolución.

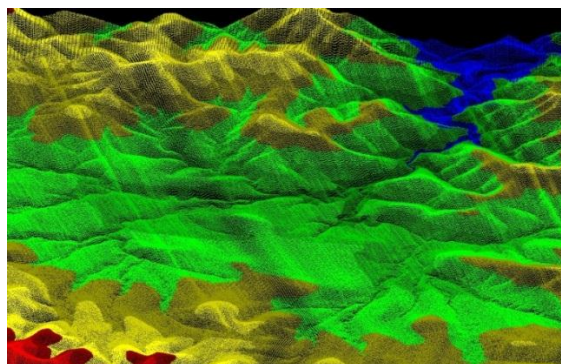


Figura.33 Nube de puntos LiDAR ajustada al terreno vista con un software de datos en 3D de Nuevo León (Fuente: INEGI)

La Percepción Remota también permite representar y detectar movimientos de masas o deslizamientos de tierras, a través de análisis multi-temporales de imágenes satelitales donde se muestren los cambios del paisaje montañoso a lo largo del tiempo. Lo anterior, implica obtener información útil para la planeación de territorios (Fig. 34).

Estos deslizamientos se deben a procesos gravitacionales que marcan la dinámica de la superficie terrestre, en particular en la litósfera. Por lo general, ocurren en zonas montañosas con pendientes fuertes, o en lugares que sufren de lluvias intensas. Algunas acciones antrópicas provocan estos deslizamientos tales como movimientos de tierra, excavaciones, actividades extractivas (minas a cielo abierto), edificaciones, etc.

En resumen, “la Teledetección espacial ha demostrado su capacidad para la detección de los deslizamientos de ladera mediante el análisis multi-temporal de los ecosistemas a través de imágenes de satélite” (Paolini *et al.*, 2002), su impacto sobre los bosques y su relación con el proceso del cambio climático, especialmente con el incremento de las precipitaciones registradas.



Figura.34 Huella de un deslizamiento de ladera en Chongqing, China. En el centro norte de la imagen se observan los efectos del deslizamiento sobre el paisaje, con una forma alargada, de color beige que contrasta con la zona forestal. (Fuente: NASA EO-1)

Las aplicaciones de movimientos de masas también se pueden realizar en otro tipo de ambientes, tales como glaciares, donde se pueden indicar cambios verticales, horizontales e incluso pérdida de masa (Fig. 35). Lo anterior, a partir de la combinación de imágenes satelitales con modelos digitales de elevación.



Figura.35 Vista del Glaciar de San Quintín, Chile. Se evidencia la pérdida de masa en el periodo 1994 – 2002 (Fuente: NASA / JSC)

“Los cambios verticales, por ejemplo, cambios en los glaciares de espesor o diferentes tipos de acumulación / erosión, a menudo puede ser derivados de las diferencias entre repeticiones de MDE” (Kaab 2004). “Los movimientos horizontales de glaciares, bajo ciertas circunstancias pueden ser medidos a partir de la repetición de imágenes de satélite, a una precisión horizontal en el orden de diez metros” (Kaab 2002).

Por último, a partir de puntos terrestres colocados en sitios clave y con la ayuda de la multi-temporalidad de las imágenes se puede determinar los lugares exactos donde ocurren los movimientos de masas.

Debido a las características atmosféricas presentes en cada uno de los ambientes terrestres, es necesario realizar una serie de correcciones que permiten minimizar estas distorsiones. Las correcciones atmosféricas evitan la pérdida de información espectral en la imagen satelital a partir de modelos representativos de atmosferas estándar, que se encargan de eliminar el efecto de dispersión atmosférica permitiendo obtener una imagen más nítida.

Debido a las características climáticas (formación de nubes, lluvias) y altitudinales (topografía del terreno) del relieve montañoso, en las imágenes satelitales se presentan diferencias de iluminación y sombreado topográfico, por lo anterior es necesaria la aplicación de corrección atmosférica.

Las aplicaciones de percepción remota antes descritas y las que se mencionarán a continuación requieren de corrección atmosférica.

2.2.2 Percepción remota en planicies

Las planicies son un ambiente terrestre, en donde el componente natural principal es la litósfera con la intervención de algunos procesos de hidrósfera. Dadas sus condiciones atmosféricas, para la percepción remota este ambiente es sencillo y fácil de representar.

Las llanuras, debido a las características atmosféricas y fisiográficas son susceptibles a inundaciones y se pueden estudiar a partir de imágenes satelitales que permitan precisar posibles afectaciones o daños a través de cartografía de áreas inundables (Fig. 36).



Figura.36 Imagen de inundación provocada por el Río Danubio que afecta parcelas agrícolas. Budapest, 2002 (Fuente: NASA/EEI)

“Una llanura de inundación se define como una franja de tierra relativamente plana, junto a un río y que sufre desborde de las aguas durante las crecidas” (Leopold *et al.*, 1964). Las llanuras de inundación son terrenos planos sujetos a inundaciones recurrentes y que se encuentran ubicados en la cercanía de ríos y cursos de agua. Este tipo de ambiente representa un constante peligro para todo tipo de actividad humana, por ello es de importancia identificar estas áreas.

Debido a la visión global que ofrecen las imágenes satelitales, se pueden estudiar grandes extensiones de llanuras y evaluar peligros hidrológicos que proporcionen información reciente y datos históricos. Por ejemplo, “Los mapas de inundaciones y peligros de

inundación han sido preparados por muchos hidrólogos en todo el mundo con datos de sensores y satélites, principalmente la banda visible e infrarroja” (Deutsch 1974).

A través de diferentes análisis, se pueden establecer metodologías para identificar llanuras de inundación e incluso otras áreas susceptibles a inundación. La combinación de imágenes satelitales con modelos digitales de elevación, permite representar de mejor manera la relación litosfera - hidrosfera en zonas planas. “Los datos digitales Landsat han sido combinados con datos digitales de elevación para desarrollar relaciones etapa-área de áreas inundables” (Struve 1979).

Para la elaboración de mapas de inundación, se utilizan variedades de sensores que se complementan con mapas tradicionales. Algunos de los sensores utilizados son: SPOT, Landsat MSS y Landsat TM. Los datos de Landsat y SPOT proporcionan información actualizada de recursos naturales y uso de tierras, mientras que los datos de Landsat MSS un poco más antiguos, proporcionan registros de llanuras de inundación, cambios de uso de suelo por causa de inundaciones o actividad antrópica (Fig. 37).

Con la información sobre llanuras de inundación, se pueden realizar estudios de planeación que ayuden a reducir los peligros que puedan provocar estas zonas.



Figura.37 Imagen Landsat TM sobre el Lago Balatón y su área de influencia, 2000. Al sur y este del lago se ubica la gran Llanura Centroeuropea (Fuente: NASA / ZULU)

2.2.3 Percepción remota en zonas de transición

En una imagen satelital se registran escenas de la superficie terrestre que pueden ser entendidas como aproximaciones a nivel de paisaje de un determinado ambiente. Dentro del paisaje y en especial en las zonas de transición, existe una importante heterogeneidad espacial que supone una problemática para su representación.

Las zonas de transición se entienden como la intersección de dos componentes naturales de un ambiente terrestre (litósfera, hidrosfera y atmósfera), como por ejemplo litósfera – hidrosfera (Fig. 38). La intersección de dichos componentes influye en la posible información que se puede extraer. Por lo anterior, las componentes naturales no se pueden considerar como entidades independientes sino como entidades interrelacionadas.

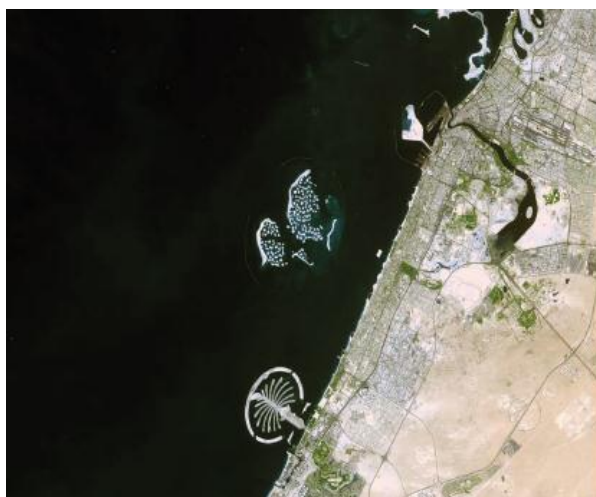


Figura.18 Imagen ASTER de 2008 sobre las Islas de Dubai. Ejemplo de zona de transición litósfera – hidrosfera. (Fuente: NASA / Japan ASTER Science Team)

Las zonas de transición se pueden considerar como un ambiente especial condicionado por factores ambientales que las modifican. Para el estudio de estas zonas, se analizan procesos que suceden en la litósfera combinado con procesos de hidrosfera. Los factores ambientales mencionados anteriormente involucran procesos en la atmósfera, a los cuales se les aplican ciertas correcciones que se mencionaron anteriormente.

A todo lo analizado, surge una pregunta esencial ¿Cómo se puede determinar dónde termina o comienza un área o zona en particular? La respuesta es a través de la identificación de zonas de transición que responde a una gradación de ambientes y aspectos geográficos como se mencionan a continuación: “Los límites entre las diferentes áreas de endemismo¹⁰, en cualquier nivel jerárquico, generalmente se representan como una línea estática dibujada sobre la superficie de un mapa, sin embargo, son zonas donde pueden ocurrir procesos e interacciones que afecten los patrones a escalas grandes” (Ruggiero & Ezcurra 2003).

La importancia de las zonas de transición es que a partir de su identificación, se pueden encontrar medidas de similitud o diferencia que pueden ser obtenidas del análisis de imágenes satelitales. De este mismo análisis, se pueden establecer los bordes que delimiten una zona en particular a partir de la información proporcionada por la imagen satelital, y que en algunas ocasiones se caracteriza por un cambio abrupto de condiciones ambientales, tipo de relieve, superficie topográfica, etc.

En las zonas de transición ocurren innumerables procesos e interacciones que modifican el ambiente, esta información cambiante se registra a lo largo del tiempo con base en las diferencias de características espectrales proporcionados por una imagen satelital. Este tipo de estudios se realizan en aplicaciones de ecología del paisaje y caracterización de áreas biogeográficas.

Por ejemplo en la “La identificación de áreas de endemismo constituye un paso importante en la elaboración de atlas biogeográficos, los cuales permiten documentar de manera eficiente los patrones de la diversidad biológica” (Morrone & Espinosa 1998; Morrone 2000).

El campo de la percepción remota permite generar información cartográfica y con el complemento de información sobre biodiversidad se pueden generar subproductos tales

¹⁰ Se entiende por endemismo una zona de la superficie terrestre que se encuentra limitada en un ambiente reducido por determinados organismos.

como, atlas biogeográficos, mapas de zonas con distintos criterios, mapas de usos de suelo y vegetación.

ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN ESPECTRAL PARA DISTINTOS AMBIENTES

En este capítulo se hace una revisión de las clasificaciones espectrales como técnica de segmentación de imágenes satelitales. El reconocimiento de objetos en una imagen multi-espectral se puede llevar a cabo por una segmentación tipo híbrida, es decir, a partir de sus características morfológicas y espectrales. Para la obtención de estas características se utilizan modelos de tipo contextual, que en la mayoría de los casos utilizan información auxiliar y producen mejores resultados de clasificación.

Un objeto se reconoce primero morfológicamente y después se complementa con información de tipo espectral. A partir de esta información, se han construido algoritmos computacionales, los cuales se encargan de modelar estas características analizando una imagen satelital basado en distintos criterios para el reconocimiento de objetos, los cuales posteriormente dependiendo de los fines de la investigación se convierten en clases temáticas.

El reconocimiento de objetos es la pieza fundamental para interpretar y extraer información, para ello se utilizan algunos elementos de análisis visual. Del conjunto de elementos de análisis visual y de descriptores morfológicos, se obtiene una clasificación de tipo contextual.

Una clasificación espectral se compone de distintos elementos que atienden a un procedimiento, un método y una lógica por aplicar. A partir de dichos elementos podemos construir un cubo, donde cada uno de los ejes represente un método, una lógica y un procedimiento. Con base en distintas combinaciones e información del tipo de ambiente terrestre se puede clasificar a nivel paisaje.

3.1 La clasificación espectral

Una de las formas de analizar y extraer información de una imagen satelital es través de clasificaciones espectrales, uno de los supuestos es que cada objeto de la superficie terrestre se encuentra caracterizado por una respuesta espectral en específico. Para la caracterización espectral de la imagen, se requiere del reconocimiento de patrones.

De acuerdo con Lira (2010) el análisis de imágenes satelitales se encuentra dividido en procesamiento de imágenes satelitales y en reconocimiento de patrones. Este capítulo, solo se centra en el reconocimiento de patrones, y se enfoca en la clasificación espectral como parte de este reconocimiento.

El reconocimiento de patrones se encarga de buscar estructuras que permitan caracterizar un objeto de la superficie terrestre, a través de los pixeles que los representen en la imagen satelital. La identificación de dichos patrones puede ser de forma visual, como por ejemplo su morfología, o de acuerdo a sus características espectrales. A continuación se enlistan los principales elementos de análisis visual junto con algunos descriptores morfológicos de importancia para una clasificación espectral.

3.1.1 Reconocimiento de patrones

Una imagen multiespectral es una distribución espacial de propiedades físicas de objetos observados a distancia de una escena en particular. A partir de la misma, podemos extraer información e identificar objetos, para lograrlo se requiere de una metodología de observación que consiste en un reconocimiento de patrones.

Lira (2010), por ejemplo, define a un patrón como un arreglo de entes de la misma naturaleza y a su vez se divide en dos clases, patrones de orden lógico y de orden físico. Los patrones de orden lógico se refieren a cada uno de los pixeles que conforman la imagen, mientras que los de orden físico hacen referencia a la dimensión (tamaño) del pixel. Cada pixel representa un diferente valor de acuerdo a su respuesta espectral, por lo anterior, al estudiar el valor de un pixel se obtiene además patrones espectrales.

Un pixel puede ser estudiado por sus patrones espectrales o espaciales y a partir de éstas características, podemos analizar una imagen multispectral. Como se mencionó anteriormente, el análisis de una imagen se compone de dos elementos, el procesamiento de imágenes y un reconocimiento de patrones (Fig. 38). En la etapa del procesamiento de imágenes se utilizan diferentes transformaciones matemáticas que realzan patrones espectrales y espaciales de interés que permiten la identificación de objetos.

$$\begin{array}{ccc} \text{Análisis de Imágenes} = & \text{Procesamiento} & + \text{Reconocimiento} \\ & \text{de} & \text{de} \\ & \text{Imágenes} & \text{Patrones} \end{array}$$

Figura.38 Suma simbólica de análisis de imágenes satelitales (Lira, 2010)

Se establece de esta forma, al reconocimiento de patrones como la búsqueda de estructuras (clases) en la imagen a través de las características de sus píxeles.

La complejidad del paisaje en una imagen multispectral es difícil de analizar e interpretar debido a su heterogeneidad, por ello es necesario el reconocimiento de objetos a partir de patrones. Para el reconocimiento de un objeto se debe contar con la siguiente información: sus propiedades fundamentales, un nombre que lo caracterice y algunas veces la identificación de funciones o propósitos, que posteriormente se convierte en clase temática.

3.1.1.1 Elementos visuales de interpretación

La identificación de objetos en una imagen satelital es un elemento clave para poder hacer una interpretación y extraer información de utilidad. Los objetos se pueden caracterizar en función de las longitudes de onda que emiten o reflejan. Como se vio en la sección de reconocimiento de patrones, para establecer las diferencias entre objetos se requiere de una metodología de observación, donde a partir de un análisis visual de comparación entre objetos surgen algunos elementos tales como: color, tono, forma, tamaño, textura, sombras y algunos más complejos como contexto y asociación.

A partir del análisis visual se extrae información de las propiedades fundamentales de los objetos, los cuales permiten interpretar una imagen para posteriormente clasificarla. La interpretación de imágenes es definida como “El examen de las imágenes con el fin de identificar objetos y juzgar su importancia” (Philipson 1997 & McGlone 2004).

Los elementos de análisis visual se pueden clasificar de acuerdo a su grado de complejidad, por ejemplo: el tono y el color atienden principalmente a criterios espectrales; la forma, el tamaño y la textura se refiere a criterios espaciales simples y las sombras, el contexto y la asociación atienden a criterios espaciales complejos (Fig. 39).



Figura.39 Organización jerárquica de los criterios de interpretación visual (Adaptado de Corine, 1998)

Para la descripción de los elementos de análisis visual, se consideró como referencia lo establecido en el libro *“Remote Sensing of the Environment”* y se complementó con información adicional.

El color es el elemento básico en la interpretación visual de imágenes y es producido por la reflectividad de los objetos a distintas longitudes de onda. La composición de imágenes R, G, B (Red, Green, Blue) a través de la combinación de distintas bandas permite apreciar los objetos de diferentes colores (Fig.40).



Figura.40 Color – Elemento de análisis visual

Las tonalidades más habituales corresponden con las siguientes cubiertas (adaptado de Tindal 1978):

Rojo magenta.- Pertenecer principalmente a cubiertas vegetales y dependiendo de la tonalidad indica su crecimiento y vigor, el bosque de caducifolias es un ejemplo.

Rosa.- Indica áreas vegetales menos densas y en temprano crecimiento, como ejemplo podemos mencionar: áreas suburbanas y pequeños jardines.

Blanco.- Indica áreas de nula vegetación en zonas de máxima reflectividad tales como: nubes, suelo desnudo, depósitos salinos y nieve.

Azul.- Indica superficies cubiertas de agua tales como: ríos, canales y lagos.

Marrón, principalmente pertenece a diferentes tipos de vegetación arbustiva.

Gris.- indicando ciudades o áreas pobladas.

El tono se refiere al grado de luminosidad relativa del color de los objetos en una imagen, la diferencia entre tonos es un elemento fundamental para distinguir entre diferentes objetos, dichas variaciones en ocasiones también permiten identificar elementos de forma y textura (Fig. 41).



Figura.41 Tono – Elemento de análisis visual (Jensen 2007)

De acuerdo a la organización jerárquica de criterios, para tratar asuntos espaciales simples en los objetos se estudian tres principales elementos, los cuales son: forma, tamaño y textura.

La forma se refiere a la estructura general de un objeto delimitada por su contorno (Fig. 42) y se divide en regulares e irregulares. Las formas regulares pertenecen a infraestructura generada por el hombre tales como carreteras y centros urbanos. Las formas irregulares por lo general, pertenecen a cuerpos naturales como cuerpos de agua y puede incluir estructuras geológicas bien definidas como volcanes y domos. Los términos más empleados para describir la forma de un objeto son: lineal, curvilínea, circular, elíptica, rectangular, triangular, hexagonal, etc.



Figura.42 Forma – Elemento de análisis visual (Jensen 2007)

El tamaño se refiere a las dimensiones de un objeto y se encuentra en función de la escala (Fig. 43). Una aproximación del tamaño permite una interpretación adecuada e inmediata de un objeto en particular, que se complementa con la forma. El empleo de este patrón, viene condicionado por la resolución espacial de las imágenes, en algunas se pueden identificar objetos como edificios en particular, mientras en las de menor detalle solo pueden señalarse rasgos de tamaño como en áreas inundadas.



Figura.43 Tamaño – Elemento de análisis visual (Jensen 2007)

La textura se refiere a la heterogeneidad espacial de una determinada cubierta u objeto, y corresponde al contraste espacial de los elementos de una escena (Fig. 44). Se manifiesta como la rugosidad o suavidad de los niveles de grises, dependiendo de factores tales como resolución del sensor, condiciones de iluminación, longitudes de onda, etc.



Figura.44 Textura – Elemento de análisis visual (Jensen 2007)

En las texturas ásperas los niveles de grises cambian bruscamente en pequeñas áreas, mientras que las texturas lisas presentan poca variación tonal. Las texturas lisas son más uniformes y representan superficies tales como campos, asfaltos y pastizales; mientras que las superficies rugosas presentan estructuras irregulares, por ejemplo la cubierta forestal.

Complementado los anteriores elementos visuales y atendiendo a criterios espaciales más complejos, donde los elementos no son inmediatos y requieren de mayor atención encontramos: las sombras, el contexto y la asociación, los últimos dos de gran importancia para producir mejores clasificaciones.

Las sombras son producidas por la iluminación que reciben algunos objetos en particular y que debido a su altura proyectan variaciones de reflectividad sobre otros objetos (Fig. 45). Un correcto entendimiento de las sombras proporciona una idea de la altura y profundidad en los objetos, principalmente se utiliza en la interpretación de rasgos geomorfológicos en zonas forestales y en cálculo de altura de edificios.



Figura.45 Sombras – Elemento de análisis visual (Fuente: GeoEye Inc)

El contexto espacial se refiere a la localización de objetos o cubiertas de interés en relación con elementos vecinos de la imagen. La relación con elementos vecinos, se hace a partir del estudio de píxeles con cierta proximidad considerando el entorno geográfico. A partir de la interpretación visual, el criterio del contexto espacial ayuda a eliminar la confusión de clases en cartografía temática complementando una clasificación digital.

La asociación se trata de la identificación de un objeto a través de determinadas características que se les pueden asociar a otros que se encuentran próximos (Fig. 46). Lo anterior proporciona información de utilidad. Por ejemplo las propiedades comerciales pueden estar asociadas con rutas principales de tráfico regularmente en grandes avenidas, zonas residenciales con escuelas, entre otras.

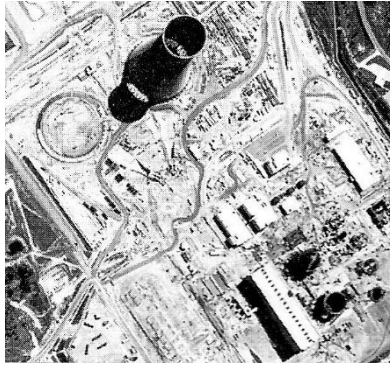


Figura.46 Contexto y Asociación – Elemento de análisis visual (Fuente: GeoEye Inc)

3.1.1.2 Descriptores morfológicos

“Los atributos espaciales son las variables que miden y se relacionan con la forma, la geometría, el tamaño y la relación que puede existir entre ellas, concernidas directamente con el objeto a estudiar” (Santos 2007) y a partir de las propiedades de los elementos visuales de interpretación tamaño, forma y textura podemos obtener algunos descriptores morfológicos tales como: área, perímetro, compacidad o compactación, rugosidad del perímetro y excentricidad.

Los descriptores morfológicos más empleados por el analista de imágenes satelitales son: el área y el perímetro, debido a que proporcionan características métricas asociadas al tamaño de gran importancia en el monitoreo de cubiertas terrestres. El área es el número de píxeles que conforman un objeto y el perímetro es el número de píxeles que tienen los bordes de un objeto, ambos considerando la escala de observación.

En ocasiones, por ejemplo se necesita obtener más información acerca de la forma de un objeto con respecto a otro, es por eso que existe un descriptor llamado compacidad o compactación que mide que tanto la forma de un objeto se aproxima a la de un círculo a partir del perímetro y del área.

La rugosidad del perímetro, se encarga de medir la distribución de las curvaturas (desviaciones angulares) de los bordes o fronteras de un objeto. Finalmente, la excentricidad es una medida de elongación que mide cuanto se aparta la forma de un objeto con respecto a la de un círculo. La excentricidad de un círculo es igual a uno.

A partir de una imagen satelital, se puede identificar un objeto a partir de su contexto y características espectrales, en ocasiones solo basta con obtener información en específico de algunos descriptores y no necesariamente de todos.

Una vez conocidas las principales características de un objeto y según los propósitos del analista surge la necesidad de agrupar la información, para ello se necesita dividir la imagen, a este proceso se le conoce como segmentación. La segmentación es la partición de una imagen en regiones que pueden o no tener un significado relativo a la escena respectiva y se hace a través de la agrupación de píxeles en áreas homogéneas.

“La partición de la imagen se puede ver de una manera amplia y general. Este proceso puede llevarse a cabo con base en una serie de modelos y criterios: por regiones, por bordes o líneas, por propiedades espectrales, por propiedades espaciales, o por una combinación de estas dos últimas” (Zhang 1996).

Los criterios de segmentación dependen principalmente de la escena y del objeto a clasificar, por ejemplo un caso ideal sería el caracterizar a un objeto únicamente por la respuesta espectral de sus píxeles, pero en la realidad no siempre sucede así y es necesario combinar información. Por lo anterior, este capítulo propone clasificar una imagen satelital de forma híbrida, es decir segmentar los objetos de una escena a partir de sus características espectrales, morfológicas y de su entorno geográfico, además de considerar el contexto espacial.

3.1.2 Clasificación de imágenes multiespectrales

A partir de una imagen multiespectral se puede obtener información de objetos de interés en las distintas regiones del espectro electromagnético, que permiten identificarlos y agruparlos. No todas las imágenes satelitales tienen las mismas características, por eso es de importancia estudiar algunos factores que intervendrán y condicionarán la información que podamos extraer.

De acuerdo con lo anterior, “es necesario plantear con cierto detalle el concepto de calidad de imagen de tal manera que permita cuantificar el resultado de una transformación aplicada a ésta o a su contenido de información con relación a la escena que representa” (Jensen 2001).

La información que podamos extraer de una imagen multiespectral, depende principalmente del tamaño del pixel y de las características radiométricas del sensor (número de bandas) con el que se capturo la escena, ambos proporcionan el nivel de detalle que podemos determinar, para posteriormente clasificar.

Con la información recabada se puede segmentar una imagen a través de una clasificación espectral, la cual parte del supuesto de que diferentes objetos están caracterizados por respuestas espectrales diferentes que se les puede asociar una clase de objetos con respuestas promedio espectral. En la segmentación, la imagen se divide en regiones que representan una clase espectral formada por objetos de propiedades espectrales similares, como se define a continuación: “La clasificación multiespectral es el proceso donde se lleva a cabo la asignación de los pixeles a un número determinado de clases individuales basado en sus valores de archivo. Se basa en el registro simultáneo del comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro” (Chuvieco 2008).

“La segmentación se hace usando algoritmos que comparan el valor del pixel con respecto a los valores de los pixeles vecinos. Si los pixeles vecinos son relativamente similares, entonces son agregados a grupos contiguos y si no lo son, entonces otro segmento es

iniciado. Aquellos programas proveen variables que permiten a un analista especificar el tamaño relativo y algunas veces incluso la forma de los segmentos” (Blumberg & Zhu 2007).

3.2 Elementos de clasificación espectral

De acuerdo con Lira (2010), para poder generar una clasificación espectral necesitamos de tres elementos principales para su construcción, los cuales son: procedimiento, método y lógica. A partir de las diferentes combinaciones de los elementos de una clasificación espectral podemos extraer información de una imagen con respecto a determinados fines.

En cuanto al procedimiento, una clasificación se divide en dos grupos: supervisada y no supervisada. En una clasificación supervisada la imagen es segmentada con respecto a pixeles prototipo que definen clases de cobertura pre-establecidas y en una clasificación no supervisada la imagen es dividida y a cada región se le asigna una clase de cobertura pero en una última etapa. La elección entre un procedimiento u otro, depende principalmente del conocimiento, información y recursos que se tenga de la zona.

“En cuanto al método, una clasificación se divide en puntual y contextual” (Lira & Malletti 2002). En el método puntual, un pixel es clasificado en función de sus propiedades espectrales; mientras que en el método contextual, un pixel es clasificado en función de su valor y de la relación espacial de un grupo de pixeles considerados en una proximidad.

“En cuanto a la lógica, una clasificación se divide en booleana y borrosa” (Whitesitt 1995; Tanaka & Niimura 1996). En una clasificación booleana un pixel pertenece a una clase con probabilidad 0 ó 1, y en la lógica borrosa, un pixel puede pertenecer con una cierta probabilidad en un intervalo de valores entre 0 y 1 de acuerdo a una función de pertenencia.

A partir de las anteriores divisiones podemos establecer un cuadro donde se resumen los elementos presentes en una clasificación espectral (Cuadro 4). La elección de opciones por cada elemento es labor del analista de la imagen satelital, en relación directa con la información disponible, conocimiento de la zona y recursos de software. A partir de estas combinaciones, los resultados de clasificación en una misma zona pueden ser diferentes.

| Procedimiento | Clasificación | | | | | | | |
|---------------|---------------|---------|------------|---------|----------------|---------|------------|---------|
| | Supervisada | | | | No supervisada | | | |
| Método | Puntual | | Contextual | | Puntual | | Contextual | |
| Lógica | Booleana | Borrosa | Booleana | Borrosa | Booleana | Borrosa | Booleana | Borrosa |

Cuadro 4. Elementos de clasificación espectral (Lira 2010)

3.2.1 Clasificadores duros y suaves

Para poder dividir una imagen, primeramente se requiere un clasificador, el cual se define como el procedimiento por el cual un pixel es asignado a un conjunto de clases predefinidas. Existen distintos clasificadores espectrales que atienden a diferentes problemáticas con base a la variabilidad espectral presente en la escena de una imagen satelital, por lo anterior, uno de los criterios más aplicados para dividir a los clasificadores se hace de acuerdo a su lógica.

De acuerdo a la lógica que emplean existen dos tipos de clasificadores: duros y suaves. Los clasificadores duros están fundamentados en lógica booleana y los suaves en lógica borrosa.

Los clasificadores tradicionales también son llamados clasificadores duros, por tomar una decisión tajante acerca de la pertenencia de un pixel a una categoría dada.

En este tipo de clasificadores la categorización de los pixeles se presenta de manera automática y no depende de condiciones suministradas por el usuario, ahorrando tiempo y disminuyendo el error que podría causar la subjetividad al momento de suministrar la información de las probabilidades de pertenencia de cada clase, aquí solo se permite entrenar al sistema de modo que un determinado uso o cobertura es exclusivamente de una clase (Gutierrez *et al.*, 2005).

Los clasificadores duros plantean que las fronteras se encuentran bien definidas y que las clases espectrales están caracterizadas por un solo atributo espectral sin variación ni mezcla. Por lo anterior, este tipo de clasificadores son utilizados en áreas homogéneas tales como cultivos, cuerpos de agua, etc. La exactitud del clasificador depende de la escala y de

la variabilidad de las clases, por ejemplo, si llega a utilizar un clasificador duro en áreas heterogéneas, la confusión entre clases será alta que provocaría una baja exactitud.

De los principales clasificadores duros podemos mencionar: ISODATA, Paralelepípedos, K-medias, Máxima Probabilidad y Redes Neuronales.

“Los clasificadores difusos o suaves expresan el grado de pertenencia de un pixel para cada una de las clases consideradas” (Eastman 2003). Este tipo de clasificadores plantea que los objetos espectralmente detectables muestran fronteras o límites que no tienen una definición clara y que existe una región de transición en donde una clase gradualmente se convierte en otra. La estructura de este tipo de clasificadores es flexible y se recomienda su uso en áreas heterogéneas, que presentan pixeles mixtos de información espectral. Algunos de los lugares donde se puede utilizar son: bosques mixtos, áreas residenciales, zonas costeras, etc.

Un pixel mixto, como su nombre lo indica puede representar dos o más objetos espectrales mientras que un pixel homogéneo caracteriza uno solo. “Con base en esta realidad espectral de la zona, se han desarrollado una serie de clasificadores, tanto supervisados como no supervisados fundamentados en la teoría de conjuntos borrosos” (Caillol *et al.*, 1993), los cuales evitan la pérdida de información asignando a cada pixel la probabilidad de pertenencia con respecto a cada clase, evitando su posible confusión y por el grado de detalle proporcionado permite enriquecer en algunos casos el número de clases generando una leyenda más significativa y proporcionando una mejoría notable en la precisión de la clasificación espectral.

Como ejemplos de clasificadores duros, podemos citar: Modelado de Mezcla Lineal, Clasificación Fuzzy, etc.

3.2.2 Clasificación supervisada y no supervisada

La clasificación espectral supone uno de los pasos más importantes en el momento de extraer y categorizar información de una imagen satelital, por lo anterior, es necesario establecer el procedimiento a utilizar. Existen dos procedimientos principales: clasificación supervisada y no supervisada; los cuales se pueden utilizar de manera independiente o mixta, dependiendo de la zona de estudio y de los recursos disponibles. En resumen, “la elección entre uno y otro método dependerá de los datos y medios disponibles y de las preferencias personales” (Townshend & Justice 1981).

Una clasificación espectral requiere de la identificación de patrones visuales de acuerdo a ciertos criterios descritos anteriormente, para la categorización de una imagen multiespectral. El proceso consiste en identificar grupos homogéneos de píxeles los cuales representen coberturas de clase de interés para el analista. “Suelen distinguirse, a este respecto, dos tipos de clases: informacionales y espectrales” (Chuvieco 1986 & Labrandero 1978). Las clases informacionales son las categorías de interés que el analista busca identificar, como cultivos, diferentes tipos de bosques, densidad de áreas urbanas, etc. Las clases espectrales son grupos de píxeles con características uniformes similares en las distintas bandas del espectro. A partir de las clases espectrales se pueden construir clases informacionales considerando el contexto espacial en que aparece cada píxel.

Una vez estudiada la estructura fundamental de una clasificación espectral se requiere describir y repasar los dos tipos de procedimientos existentes.

Una clasificación supervisada requiere de la intervención del analista de la imagen satelital partiendo del conocimiento o experiencia de trabajo que se tenga en el área de estudio (Fig.47). “La clasificación supervisada se fundamenta en el previo conocimiento de las clases y de estadísticos que se relacionan a cada clase espectral de la imagen” (Rojas & Ortiz 2009). El primer paso es el establecimiento de la leyenda de clasificación, donde se define el número de clases informacionales a identificar a través de la selección de muestras de píxeles en las imágenes que representen las diferentes coberturas de suelo pre-establecidas por el analista (áreas de entrenamiento o píxeles prototipo).

El conjunto de clases pre-establecidas por el analista se encuentra en relación directa con la estructura espectral de la imagen, así uno de los retos al clasificar es la representación de la variabilidad espectral de una escena teniendo en cuenta la relación información disponible – propósitos.

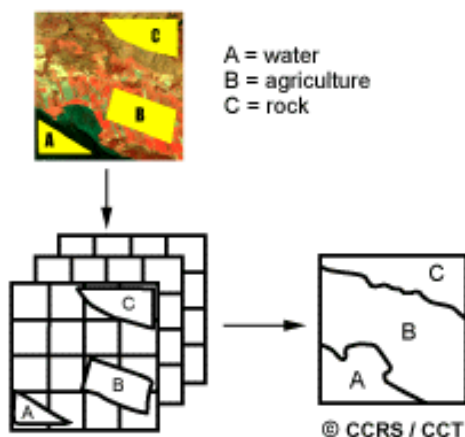


Figura. 47 Procedimiento general de una clasificación supervisada

Ya que se encuentran definidos los píxeles prototipo, se utilizan algoritmos computacionales que se encargan de detectar estos píxeles, a partir de la información en todas las bandas espectrales que componen dichas áreas de entrenamiento. Los algoritmos computacionales tienen diferentes opciones de clasificadores y su elección depende del analista, quien con base al conocimiento de la zona elige un clasificador considerando el procedimiento de clasificación y la lógica a emplear.

De lo anterior, se deduce que el nombre de clasificación supervisada radica en el establecimiento de clases definidas de antemano. Las etapas en general de esta clasificación se pueden resumir como se muestra a continuación:

1. Decidir el conjunto de clases temáticas en las cuales se propone segmentar una imagen.
2. Elección de píxeles prototipo de cada clase.
3. Establecimiento de parámetros del clasificador espectral.

4. Empleo del clasificador.
5. Generación de un mapa temático.

El objetivo de las clasificaciones es la generación de mapas temáticos donde como resultado se obtiene una imagen digital de una sola banda y los pixeles asignados a cada clase tienen un mismo valor y se encuentran relacionados con un color mediante una tabla.

Una clasificación no supervisada es el proceso inverso de una clasificación supervisada y en este solo se requiere la intervención de un analista para la interpretación de resultados. Esta clasificación consiste en la segmentación de una imagen en diferentes clases informacionales establecidas por el analista pero en una última etapa (Fig. 48).

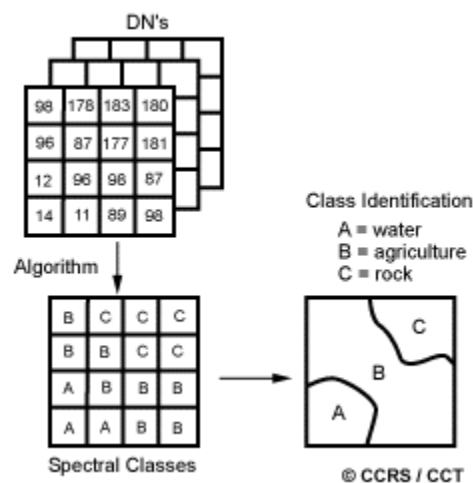


Figura.48 Procedimiento general de una clasificación no supervisada

La leyenda de clasificación se genera a partir de la información de clases espectrales a las cuales se les asocian clases informacionales o también conocidas como clases temáticas. De forma general, los pixeles de la imagen son clasificados por medio de algoritmos computacionales que forman una serie de conglomerados (*clusters*) con un comportamiento espectral similar y a partir de éstos el analista define las clases

informativas de interés, a través de la interpretación del significado de las categorías espectrales.

Los métodos no supervisados de clasificación digital de coberturas de suelo tienen como principal ventaja el reconocimiento de patrones espectrales de manera autónoma e interactiva, sin sujetarse a un estricto conocimiento del sitio de estudio y permitiendo concentrar la tarea humana en la interpretación más que en la consecución de los resultados (Chuvieco 2002).

Se puede resumir a una clasificación no supervisada como un procedimiento que requiere de poca información, ya que no es necesario un conocimiento profundo del área de estudio, sin embargo es tarea del analista la elección del algoritmo clasificador y el llenado de los parámetros del mismo.

Para el llenado de los parámetros del clasificador, es necesario estudiar la forma en cómo se definen las agrupaciones de píxeles. “El método para definir los agrupamientos espectrales es muy similar al empleado en otras técnicas de clasificación de datos” (Hand 1981 & Johnston 1978). Los *clusters* son definidos a partir de medidas de similitud que se encargan de la agrupación de píxeles, la medida más considerada es la distancia, la más empleada es la distancia euclidiana.

3.2.3 Clasificación puntual y contextual

De acuerdo al método una clasificación puede ser puntual o contextual. Los clasificadores puntuales clasifican los píxeles tomando en cuenta únicamente su valor e ignorando el contexto en el que se encuentra. Por sus características, la clasificación puntual se puede ver como un método local que arroja buenos resultados cuando el tamaño del píxel es mayor que el de los diferentes elementos físicos que componen el paisaje.

Al considerar una clasificación puntual únicamente los valores de los píxeles, se le asocian en mayor medida los clasificadores duros que emplean lógica booleana y clasifican a un píxel por su valor de manera individual.

Sin embargo, de acuerdo a los principios de la lógica borrosa, los cuales pretenden simular la variabilidad espectral del paisaje en una escena evitando la pérdida de información, se puede categorizar una imagen de acuerdo al contexto espacial de los píxeles. En una clasificación contextual la clasificación de un píxel se ve influenciada por las clases asignadas a sus vecinos de acuerdo a cierta proximidad. Como se apunta más adelante: “Es una técnica de clasificación de imágenes, que considera conjuntamente las características espectrales y espaciales de la imagen” (González & López 1991).

“Los clasificadores contextuales tienen en cuenta la información de la vecindad, mejorando, suavizando y homogeneizando los resultados de cualquier tipo de clasificación, siendo útil para la clasificación de imágenes de alta resolución” (Lu & Weng 2009; González & López 1991). Dicho lo anterior, se puede considerar una clasificación contextual como un método global (vecindad).

Los clasificadores contextuales se encargan de estimar la probabilidad de pertenencia de los píxeles con respecto a cada clase, asumiendo valores entre 0 y 1. Este tipo de clasificaciones se asocian con clasificadores suaves, los cuales permiten incorporar otras fuentes de información de bandas para la clasificación tales como índices de vegetación, pendientes, altitud, litología, entre otras. Generalmente, la clasificación contextual genera mejores resultados que la clasificación puntual.

3.3 Clasificación espectral y ambientes terrestres

3.3.1 Cubo de clasificaciones espectrales

Los elementos que conforman una clasificación espectral son un procedimiento, un método y una lógica, y en ese orden es su elección. La elección de estos elementos depende principalmente del conocimiento e información que se tenga de la zona, en función del ambiente terrestre.

Para poder representar estas combinaciones podemos construir un cubo donde cada uno de sus ejes represente los elementos de procedimiento, método y lógica. A su vez, este cubo se encuentra inmerso dentro de una esfera, la cual representa el tipo de ambiente terrestre (Fig. 49).

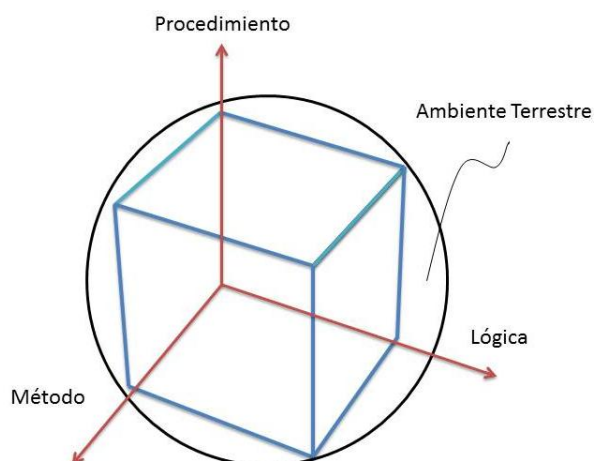


Figura.49 Cubo de elementos de clasificación espectral (Fuente: elaboración propia)

La propuesta del cubo de clasificaciones espectrales, se resume en que a partir de un ambiente terrestre e información auxiliar de la zona de estudio más la elección de los elementos de clasificación se obtiene como producto de salida clases temáticas representativas a nivel espectral y de paisaje (Fig. 50).

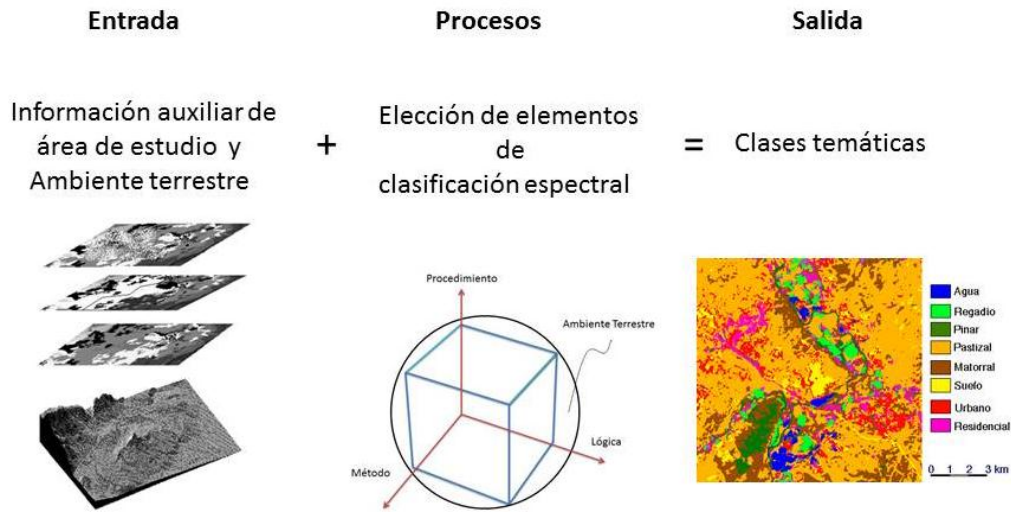


Figura.50 Propuesta del cubo de clasificaciones espectrales

(Fuente: elaboración propia)

La información varía en función de los recursos disponibles y puede ser obtenida a partir de levantamientos de campo, trabajos de investigación previos, bibliotecas de respuestas espectrales, entre otros. La elección de los elementos de clasificación espectral es fundamental para el producto de salida que se pueda obtener y se encuentra en relación directa con el ambiente terrestre. Retomando lo estudiado en el capítulo dos y para fines prácticos, los ambientes terrestres se dividen en: zonas de ambiente montañoso, planicies y zonas de transición.

Atendiendo a los ejes del cubo y considerando el ambiente terrestre, se puede establecer de una forma ordenada un marco de clasificación espectral que favorezca y se adecue a nuestro trabajo de investigación. Iniciando por la elección del tipo de procedimiento a emplear ya sea supervisado o no supervisado, condicionado principalmente por el conocimiento que se tenga de la zona, después la elección del método en puntual o contextual que define en gran medida la elección de la lógica que emplee nuestro clasificador. Los clasificadores duros con lógica booleana adecuados para zonas homogéneas y los clasificadores suaves con lógica borrosa adecuados para regiones de transición.

A partir de la combinación de información de los ejes y de las caras del cubo podemos obtener diferentes resultados en función de los datos de entrada. Las posibles combinaciones de los ejes (trazas) son procedimiento – método, procedimiento – lógica y método – lógica donde la cara del cubo representa el ambiente terrestre por clasificar.

Haciendo referencia al capítulo 2, un ambiente terrestre se encuentra formado en función de 3 elementos que interactúan entre sí, litósfera, hidrósfera y atmósfera (los efectos del último elemento se reducen por medio de correcciones atmosféricas) los cuales a partir de sus distintas combinaciones condicionan las características del tipo de ambiente y la metodología a emplear.

Una vez estudiado la configuración del tipo de ambiente terrestre, podemos establecer la conexión ambiente terrestre – elementos de clasificación espectral, por ello es importante describir algunas de estas combinaciones en función de la metodología a emplear.

3.3.2 Clasificadores espectrales

Existe una gran variedad de clasificadores, cada uno responde a diferentes problemáticas, enfocándose principalmente en la información disponible (bandas espectrales) y las características del área de estudio (ambiente terrestre). En general, la diferencia de los clasificadores responde al tipo de algoritmo empleado ya que éste es el encargado de la forma de asignación de los píxeles de una a otra clase.

En la literatura tradicional, se agrupan los clasificadores en supervisados y no supervisados, dentro de los supervisados se enlistan por paralelepípedos, mínima distancia, máxima probabilidad, etc. Para los fines de este capítulo, se describirá a tres clasificadores (ejemplificando con la estructura del cubo de clasificación espectral) los cuales son: ISODATA, Support Vector Machine (SVM) y Máxima Verosimilitud (Cuadro 5). La elección de los clasificadores se hizo tomando en cuenta los clasificadores más empleados y que bajo ciertas circunstancias producen los mejores resultados, además que ilustran los elementos presentes cuando se lleva a cabo una clasificación espectral.

| Clasificador | Procedimiento | Método | Lógica |
|--------------|------------------------------|------------|----------|
| ISODATA | No Supervisado | Puntual | Booleana |
| SVM | Supervisado | Contextual | Booleana |
| MV | No Supervisado ó Supervisado | Contextual | Borrosa |

Cuadro 5. Ejemplos de clasificadores espectrales

(Fuente: elaboración propia)

3.3.2.1 Ejemplo ISODATA

El clasificador no supervisado más conocido y usado es el ISODATA (*Interactive Self-Organizing Data Analysis Algorithm*). “Utiliza técnicas de análisis *cluster* para crear un número de grupos o clases definidas por el usuario en una imagen que posteriormente deben ser etiquetados para crear un mapa de cobertura terrestre” (Jensen 2005).

Como se mencionó en secciones previas, el procedimiento que utiliza es no supervisado y se considera un clasificador puntual porque su criterio de asignación únicamente toma en cuenta el valor espectral de los píxeles en la imagen para su posterior agrupación. Pertenece a los clasificadores duros y por lo tanto la lógica que emplea es de tipo booleana. Conforme a lo anterior, el algoritmo ISODATA obtiene mejores resultados en áreas homogéneas que no presenten el problema de píxeles mixtos, sin excluirse en áreas de transición.

Para su ejecución, se necesita del llenado de algunos parámetros de importancia los cuales son: números mínimo y máximo de clases espectrales, varianza máxima de una clase, distancia mínima entre clases, número mínimo de puntos en una clase, número máximo de iteraciones etc.

En resumen, el proceso comienza cuando el analista decide el número de clases a identificar, una vez definido llena los parámetros del clasificador y ejecuta el algoritmo por medio de un *software* computacional. Como producto de salida, se obtiene un mapa con el número de clases anteriormente especificadas, cada una con características espectrales similares. A cada clase se le asigna un nombre representativo. En ocasiones no basta con la ejecución de un solo algoritmo, es por esto que se puede ejecutar en varias ocasiones e ir variando el número de clases para posteriormente reclasificar y evitar la confusión de las mismas.

3.3.2.2 Ejemplo Support Vector Machine (SVM)

Support Vector Machine (SVM) (Boser *et al.*, 1992; Cortes & Vapnik 1995) es un clasificador supervisado reciente derivado de la Teoría de Aprendizaje Estadístico. “Entre los diversos clasificadores de margen amplio, algunos son clasificadores duros que sólo se centran en la estimación de la frontera de decisión. SVM es un ejemplo típico de los clasificadores duros” (Wang *et al.*, 2008).

SVM separa las clases en una superficie de decisión que se encarga de maximizar el margen entre clases. La superficie es denominada *optimal hyperplane* y los puntos de datos más próximos al hiperplano se denominan *support vectors*. Al ser un clasificador supervisado, para su ejecución se necesitan de pixeles prototipo a los cuales se le asocia un parámetro de penalización que determina el grado de error de clasificación (margen), en aquellos pixeles que presentan problemas de separación. Éste clasificador puede trabajar con cuatro tipos de *kernel*: lineal, polinomial, función de base radial (RBF) y sigmoide.

En manera de resumen, SVM es un clasificador supervisado que aplica un método contextual empleando una lógica de tipo booleana y que dependiendo de los parámetros de entrada del algoritmo los resultados producidos por el mismo, tiendan a ser variables. SVM produce mejores resultados en áreas homogéneas, tales como cuerpos de agua, estacionamientos y campos.

Al ser un clasificador relativamente reciente, se han hecho diversos estudios de comparación principalmente con: máxima verosimilitud, redes neuronales y clasificadores de árbol. “El estudio mostró que SVM tenía una más alta precisión que el resto de los clasificadores. También SVM tiene más estabilidad en la precisión global” (Huang *et al.*, 2002).

3.3.2.3 Ejemplo Máxima Verosimilitud

Máxima Verosimilitud o también conocido como de Máxima Probabilidad es un algoritmo de clasificación de tipo estadístico. “Con algoritmos de clasificación estadísticos supervisados, el analista primero debe localizar y definir las muestras de cada clase que se requieren para el mapa final” (Richards & Jia 1986).

El algoritmo de máxima verosimilitud considera los niveles digitales de los puntos de una misma clase presentan una variación conforme a una distribución normal, a partir de su media y de su matriz de varianza – covarianza. La asignación de pixeles con respecto a una clase, se hace calculando las probabilidades que tiene un pixel de aparecer en cada una de las clases (conociendo sus valores en las distintas bandas) y se le asigna a la de mayor probabilidad. En ocasiones, para ser más específico se establece un umbral de probabilidad para cada categoría, si la probabilidad más alta es menor que el umbral el pixel permanece sin clasificar. Este proceso reduce los errores de confusión debido a una mala definición espectral de alguna clase.

Ya resumidas las características del clasificador de Máxima Verosimilitud, podemos establecer su relación con respecto al procedimiento, método y lógica que emplea. Este clasificador al ser más complejo, presenta una particularidad muy importante ya que puede ser utilizado tanto en un procedimiento supervisado como en el complemento de una clasificación no supervisada. Por la forma de asignación de pixeles con respecto a cada una de las clases se considera utiliza un método contextual, ya que en el momento de calcular cada una de las probabilidades se hace una comparación con respecto a su entorno en una proximidad (vecindad). Al considerar probabilidades de pertenencia de pixel, la lógica empleada es de tipo borrosa que permite suavizar los resultados.

Este clasificador se recomienda usar en áreas heterogéneas (de transición), siendo cuidadoso en la elección del umbral del rango de probabilidades por clase, ya que puede provocar una gran cantidad de pixeles sin clasificar.

CLASIFICACIÓN ESPECTRAL EN EL CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO-MÉXICO

En este capítulo, se describen dos propuestas de ejercicios de clasificación espectral en el estado de Chiapas, en el marco de trabajo del Corredor Biológico Mesoamericano-México (CBMM). Los ejercicios de clasificación, se generaron a partir de imágenes multiespectrales del sensor *SPOT 5*, donde para su realización se tomó en consideración los elementos del cubo de clasificación espectral (procedimiento, método y lógica) en conjunto con el tipo de ambiente terrestre.

Previo al proceso de clasificación, se requiere de un pre-procesamiento de imágenes satelitales con el objetivo de obtener imágenes corregidas que permiten eliminar cualquier anomalía. El pre-procesamiento utilizado en los ejercicios de clasificación, incluyo tres tipos de correcciones: radiométrica, geométrica y atmosférica.

La corrección radiométrica se encarga de la conversión de niveles digitales (ND) a valores de radiancia, una vez realizada esta operación se requiere de una corrección geométrica que sitúa cada pixel de la imagen en su posición geográficamente correcta (planimetría), y finalmente la corrección atmosférica que se encarga de minimizar la influencia de la atmósfera en las mediciones de reflectividad de las cubiertas de suelo.

A partir del pre-procesamiento antes descrito, se obtienen imágenes corregidas con las cuales se puede proceder a clasificar. Es en este punto, donde se evalúan las características del área de estudio y se estructuran los elementos del cubo de clasificación espectral.

4.1 Procesamiento de imágenes SPOT 5 para la Coordinación de Corredores y Recursos Biológicos (CCRB)

Para poder comenzar a extraer información de imágenes satelitales, es necesario procesar las imágenes para corregir las distorsiones de los datos. Este procesamiento varía en función del tipo de sensor, para este caso particular se emplearon imágenes SPOT 5 donde se aplicó corrección geométrica, radiométrica y atmosférica para eliminar las variaciones de iluminación en la escena, condiciones atmosféricas y el ruido del sensor.

Las imágenes SPOT (*Systeme Pour la Observation de la Terre*) empleadas para los ejercicios de clasificación fueron procesadas en modo multiespectral con una resolución espacial de 10 m/píxel y una resolución espectral de 4 bandas que abarcan aproximadamente el rango de 0.50 a 1.75 μm enlistadas a continuación:

- Banda 1: Verde (0.50 – 0.59 μm)
- Banda 2: Rojo (0.61 – 0.68 μm)
- Banda 3: Infrarrojo cercano (0.78 – 0.89 μm)
- Banda 4: Infrarrojo medio (IRM) (1.58 – 1.75 μm) a 20 m

4.1.1 Corrección geométrica

Las imágenes satelitales proporcionadas por los sensores de SPOT 5 presentan distorsiones con respecto a la imagen real, lo anterior debido al movimiento del satélite alrededor de la tierra que origina un desplazamiento progresivo en las líneas de barrido. La corrección geométrica minimiza estos errores reubicando a los píxeles en su posición geográfica correcta.

De acuerdo con Chuvieco (2008), para la corrección geométrica existen dos procedimientos, los cuales son: corrección orbital y corrección mediante puntos de control. La primera corrección, con base en modelos matemáticos determina la posición del satélite a partir de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. La segunda corrección, utiliza una serie de puntos con coordenadas conocidas, denominados puntos de control localizados en una imagen de referencia. Dicha corrección, se realiza mediante la

aplicación de funciones que transforman las coordenadas de los puntos de control en coordenadas corregidas del mapa de referencia en una proyección cartográfica.

La corrección geométrica que se empleó en los dos casos de clasificación espectral, fue la Ortorectificación de Imagen mediante Coeficientes de Polinomios Racionales. La ortorectificación permite modelar la naturaleza y la magnitud de las distorsiones geométricas de la imagen, por medio de funciones, que dependiendo del sensor requieren de determinados Coeficientes Polinómicos Racionales (RPCs por sus siglas en inglés). Para este proceso (Fig. 51), se necesitan de los siguientes elementos:

- Imagen a rectificar
- Modelo RPC (no se requiere para los datos SPOT)
- Información de elevación (MDE)
- Altura Geoidal de las coordenadas del centro de la escena
- Información de geolocalización (referencia cartográfica de la imagen)

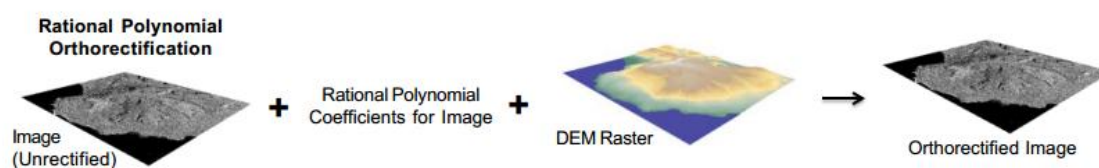


Figura 51. Procedimientos de ortorectificación mediante RPCs (Fuente: ENVI Help)

La imagen a corregir debe estar vinculada a los coeficientes RPC contenidos en un archivo de texto auxiliar. Estos coeficientes son necesarios para convertir las coordenadas en coordenadas de tierra del sensor. Además de realizar un proceso de remuestreo a partir de los métodos existentes: vecino más cercano (*nearest neighbour*), interpolación bilineal (*bilinear interpolation*) y convolución cúbica (*cubic convolution*) (Fig. 52).

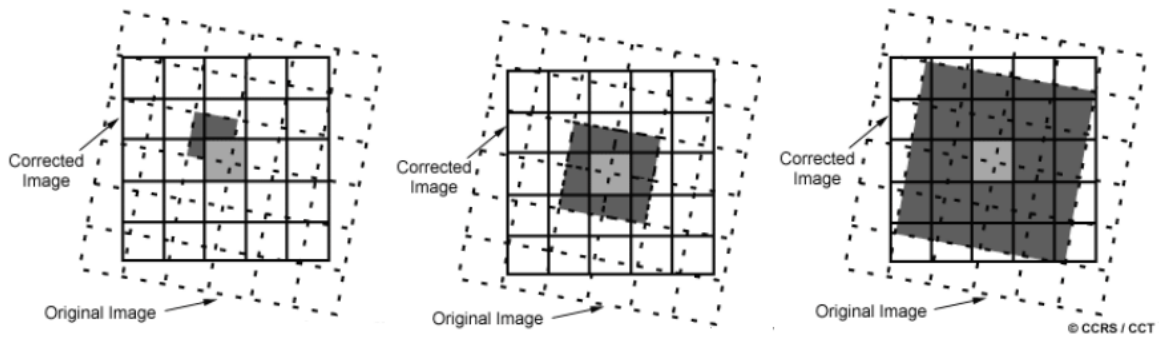


Figura 52. Procedimientos de rectificación diferencial de ND originales a la posición corregida (Vecino más próximo, interpolación bilineal y convolución cúbica)

El método del vecino más cercano, se basa en situar cada celda de la imagen corregida el ND del pixel más cercano en la imagen original. La interpolación bilineal, promedia de forma ponderada (de acuerdo a la distancia del pixel original al corregido) los ND de los cuatro pixeles más cercanos en la imagen original. Finalmente, la convolución cúbica considera los ND de los 16 pixeles más próximos.

La elección del método depende de los propósitos de la investigación y de los recursos disponibles, en este caso como las imágenes corregidas se utilizaron para clasificar imágenes espectrales, se eligió el método del vecino más cercano que conserva los valores originales al no manejar promedios ponderados.

En ocasiones, para reducir el tiempo de pre-procesamiento en las imágenes satelitales y dependiendo del tipo de análisis se recomienda dejar en la fase final del trabajo la corrección geométrica. Para las propuestas de clasificación en este trabajo, dicha corrección se implementó en una fase inicial para obtener resultados cartográficos de precisión que permitieran concentrarnos en la interpretación de los resultados.

4.1.2 Corrección radiométrica

Una vez aplicada la corrección geométrica es necesario realizar una calibración radiométrica¹¹ que consiste principalmente en la conversión de niveles digitales (registrados por el sensor) a valores de radiancia o reflectancia (propiedades físicas). En ocasiones donde el área de estudio se vuelve muy extensa y abarca más de una escena se requiere de un mosaico de imágenes, lo anterior implica normalizar los valores de los píxeles de las imágenes que conformen el mosaico. Esta normalización se logra con la calibración radiométrica, aunque no siempre es una tarea sencilla debido a las variaciones presentes por la fecha de la toma y otros factores.

La radiancia se encarga de medir la energía registrada por el sensor del satélite, mientras que la reflectancia mide la capacidad de una superficie para reflejar energía en un rango de longitud de onda. La elección entre una y otra depende del analista de la imagen y en la mayoría de los casos se utilizan los valores de reflectancia (medida absoluta) por su facilidad en la comparación entre datos.

Para el cálculo de la primera parte de la calibración, se requiere información del metadato de la imagen que proporciona los valores del *Gain* y del *Bias* por cada banda. Esta transformación se basa en una curva de calibración de números digitales a radiancia, que es calculada por los sistemas de operación del satélite (Fig. 53)

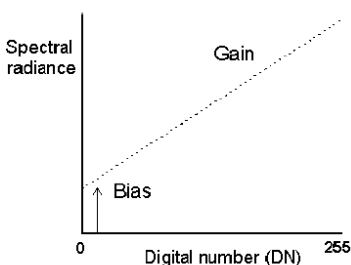


Figura 53. Curva de calibración de números digitales a valores de radiancia

Fuente: Apuntes de Percepción Remota

¹¹ Para la descripción de calibración radiométrica, se consideró como base el método de Reflectividad aparente: modelo simplificado. Véase Chuvieco, *Teledetección Ambiental*, pg 271-274.

Los valores del Gain y del Bias son calculados a partir de los valores L_{\min} y L_{\max} (valores de radiancia de cada una de las bandas) y Q_{calmax} y Q_{calmin} (Niveles digitales en la imagen) proporcionados en el metadato de la imagen. La calibración por banda resulta de la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = (Gain * ND) + Bias$$

La segunda fase consiste en la conversión de valores de radiancia a reflectancia, y se obtiene a partir de la relación de la radiancia medida por el sensor y la irradiancia solar incidente en la atmósfera. La reflectancia planetaria es adimensional y se expresa como fracción decimal entre el intervalo de 0 y 1.

$$p_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \text{sen } \theta_s}$$

Dónde:

p_{λ} = reflectancia planetaria

L_{λ} = radiancia espectral medida por el sensor

d = distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas interpolada a partir del día juliano de la toma de la fecha de escena

$ESUN_{\lambda}$ = promedio de irradiancia solar exoatmosférica para el sensor

θ_s = ángulo de elevación solar

4.1.3 Corrección atmosférica

Debido a la influencia de la atmósfera y al espesor de sus distintas capas, la radiancia que recibe el satélite no es la misma que la que sale del suelo, lo cual implica una dificultad. La corrección atmosférica se encarga de medir la relectividad de la cubierta que no se encuentra influenciada por la atmósfera.

Las correcciones atmosféricas se han abordado siguiendo cuatro procedimientos (King *et al.*, 1999; Robin, 1998; Sobrino 2000):

1. A partir de medidas *in situ*, donde se toman en cuenta consideraciones atmosféricas durante la toma de la imagen.

2. A partir de imágenes de otros sensores que permitan estimar el estado de la atmósfera.
3. A partir de modelos físicos de transferencia radiativa (serie de atmósferas estándar).
4. A partir de datos de la propia imagen.

Para la corrección atmosférica de las imágenes *SPOT 5*, se utilizó un método operativo sencillo que solo requiere de datos de cada una de las bandas espectrales de la imagen, denominado substracción de objetos oscuros.

La propuesta inicial de los métodos basados en el objeto oscuro (*dark object*)¹² fue realizada por Chavez en 1975, con sucesivas mejoras en 1988 y 1996. El punto de partida del método consiste en asumir que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (aguas, zonas en sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy cercana a cero. La aproximación del algoritmo, consiste en identificar el valor mínimo del histograma por cada banda y sustraerlo al resto de los elementos presentes en la imagen. Una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en asumir que la radiancia atmosférica corresponde al valor mínimo del histograma. Este método es válido en datos multiespectrales.

¹² Se hizo un resumen del método de substracción de objetos oscuros, con base a lo establecido en Chuvieco, *Teledetección Ambiental*, pg 278-279.

4.2 Propuesta de ejercicios de clasificación espectral para distintos ambientes terrestres

4.2.1 Casos de estudio en Coordinación de Corredores y Recursos Biológicos (CCRB)

El Corredor Biológico Mesoamericano México (CBMM)¹³ es un proyecto que tiene como objetivo la conservación de la biodiversidad en zonas que constituyen importantes funciones de conectividad entre Áreas Naturales Protegidas en estados del Sureste de México. Chiapas participa en este proyecto y en él se centran los dos casos de estudio de clasificación espectral de este capítulo.

El Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable en los Corredores Biológicos de Chiapas se inició en 2008, en particular en los municipios de Benemérito de las Américas, Ocosingo, Marqués de Comillas y Maravilla Tenejapa. Dicho proyecto, tiene como objetivo lograr un desarrollo regional territorial basado en la reducción de cambios de usos de suelo, el incremento sostenible de la productividad primaria, el uso y manejo de la biodiversidad, la producción de servicios ambientales y el mejoramiento de la gestión comunitaria, que permitan mejorar las condiciones de vida de la población y la conservación de ecosistemas naturales presentes.

Una de las formas de estudiar el territorio, sus procesos de cambio y de fragmentación en los Corredores Biológicos de Chiapas son las clasificaciones espectrales a través de la información de imágenes multiespectrales. El uso de imágenes satelitales, supone un monitoreo constante del área de estudio, en diferentes lapsos de tiempo que permita observar y representar la dinámica territorial en mapas de clases temáticas.

La generación de conocimiento y de información del territorio a partir de mapas, permite generar estrategias de planeación que ayuden a mantener y recuperar la diversidad biológica de los ecosistemas, de aquí su importancia para el CBMM.

En la siguiente sección, se describen dos casos de estudio de clasificación en el CBMM (Chiapas) en los municipios de Marqués de Comillas, Benemérito de las Américas y Maravilla

¹³ La información del CBMM (2013), fue extraída del Sitio Oficial de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Tenejapa. Para su generación, se consideraron los elementos del cubo de clasificaciones espectrales y el tipo de ambiente terrestre.

4.2.2 Caso Marqués de Comillas – Benemérito de las Américas

Con el objetivo de contribuir en la misión del Corredor Biológico Mesoamericano, se propuso la generación de una clasificación espectral contextual en el estado de Chiapas, en particular en los municipios de Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas. Estos municipios ubicados en el sur del Estado y pertenecientes a la región Maya, requieren de atención particular debido a su reciente creación (1999), a su riqueza ambiental y cultural, además de que cobra especial importancia por ser zona fronteriza con Guatemala.

Conforme a los objetivos del CBMM, los municipios antes mencionados, suponen un reto importante de conservación y manejo de los ecosistemas de forma sustentable en colaboración con la población. Debido a la riqueza ambiental del lugar y a las condiciones socioeconómicas de la población (localidades rurales de baja población y dispersas en un área extensa), estos municipios se presentan como zonas de conflicto para los propósitos del CBMM, por la amenaza latente de tala clandestina de árboles y la aparición de nuevos asentamientos que plantean a la ganadería extensiva como su base económica.

El programa de CBMM propone impulsar la sustentabilidad y el desarrollo socioeconómico de la población, mediante el mejoramiento de la gestión comunitaria, en su mayoría de tipo rural. La hipótesis plantea que las condiciones de ruralidad y dispersión (ausencia de localidades urbanas), se asocian con la marginación y la amenaza de cambios de usos de suelo por actividades agrícolas extensivas, dadas por las condiciones sociopolíticas de la zona.¹⁴

¹⁴ Para mayor información, véase Mauricio Ricárdez *et al*, *Transición rural-urbana de los asentamientos humanos en la zona de Marqués de Comillas. De la visión regional a la caracterización social y ambiental del paisaje agrario local*, México.

Para conocer la relación del uso de suelo con los asentamientos y las características tanto sociales como ambientales, se propuso un ejercicio de clasificación con imágenes multiespectrales. Para llevar a cabo esta propuesta de clasificación se consideraron varios factores, el principal, fue la información disponible (datos de entrada) más la elección de los elementos del cubo de clasificación espectral, los cuales son: procedimiento, método y lógica. Como datos de entrada, solamente se contó con imágenes *SPOT 5* e información general de usos de suelo para tener una visión global del área de estudio.

De acuerdo a los datos de entrada y a la información disponible, se procedió a la elección de los elementos de clasificación, el primero fue el tipo de método a emplear, donde se consideró el método contextual como el más adecuada debido a que se toman en cuenta parámetros socioeconómicos, (principalmente el tamaño de la población rural) que influyen en la configuración del territorio.

Al no tener datos directamente de campo y al no contar con una referencia establecida de clases espectrales – clases temáticas, se decidió el tipo procedimiento a través de una clasificación no supervisada que no requiere de un conocimiento experto de la zona. Al ser una clasificación no supervisada, se utilizó uno de los clasificadores más empleados y que en la mayoría de las veces arroja buenos resultados, es el caso de ISODATA que atiende a una lógica de tipo booleana. Si bien este clasificador solo agrupa conforme a las características espectrales, es una clasificación contextual porque se hizo una reclasificación donde como criterio se tomó la relación espacial con respecto a otros píxeles vecinos tales como comunidades rurales.

Como se vio en el capítulo tres, para la elección del tipo de clasificador, se debe de considerar la homogeneidad o heterogeneidad espectral de la zona, en este caso del tipo de ambiente terrestre. Podemos considerar a estos dos municipios, como un área mayoritariamente plana que presenta algunos accidentes topográficos en frontera con el municipio de Ocosingo en la zona de los Montes Azules. Al haberse acotado el área de estudio, para términos prácticos se considera como una planicie (Cuadro 6).

Clasificación Caso Marqués de Comillas – Benemérito de las Américas

| | |
|----------------------------|----------------|
| Procedimiento | No Supervisado |
| Método | Contextual |
| Lógica | Booleana |
| Tipo de Ambiente Terrestre | Planicie |

Cuadro 6. Elementos de clasificación espectral para Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas

(Fuente: elaboración propia)

Considerando las características de la zona y los objetivos de contribución al proyecto CCRB se establecieron 7 clases temáticas, que se describen a continuación:

- Áreas parceladas con fuerte exposición de suelo y caminos que incluyen asentamientos
- Áreas con pasto cultivado que incluyen otros cultivos y asentamientos
- Áreas con pastizal cultivado y con algún tipo de estrato arbustivo
- Áreas de sotobosque y algunas evidencias de arbolado
- Áreas con vegetación acahual o selva
- Cuerpos de Agua
- Nubes

Las 7 clases antes enumeradas, no se pueden distinguir solamente con criterios espectrales, por lo cual, es necesario adentrarse en el paisaje de la zona y considerar el contexto.

4.2.3 Caso Ocosingo – Selva Lacandona

Con el objetivo de contribución de conocimiento e información en el CBMM, se eligió Ocosingo, como el área de estudio del segundo caso de clasificación espectral. Este municipio es el más grande de extensión territorial de Chiapas y es de particular importancia debido a la biodiversidad presente por la Selva Lacandona. En específico, la clasificación se centró en una porción de la selva lacandona ubicada en el noreste de Ocosingo.

Uno de los objetivos primordiales definidos por el CBMM, es la generación de información para definir sitios prioritarios de la región noreste de la selva lacandona que permitan mantener la conectividad de los ecosistemas. De esta forma, se pretende generar información a nivel de paisaje que sirva como instrumento de planeación para el diseño de nuevas estrategias de desarrollo que sean compatibles con la conservación de corredores para los jaguares.

La conservación del jaguar en la Selva Lacandona ocupa un papel primordial y es de importancia debido a que actúa como una especie sombrilla. Este tipo de especies, son seleccionadas para tomar decisiones relacionadas con la conservación del hábitat ya que al preservarlas, de forma indirecta muchas otras especies también se conservan, y se logra un equilibrio en el ecosistema. Esta información, se hace con el objetivo de que sirva como una guía para reorientar las políticas públicas para la conservación de los ecosistemas de la región de la Selva Lacandona y del jaguar.¹⁵

Para el análisis del paisaje se realizó una caracterización de los tipos de hábitats en el área de estudio, mediante imágenes multiespectrales del sensor *SPOT 5* correspondientes al año 2012. La clasificación tomo en cuenta los diferentes tipos de vegetación y el uso de suelo, principalmente los tipos de actividades humanas que debido a la dinámica territorial de la zona son variables. Algunos de los criterios que se plantearon fueron los siguientes:

¹⁵ Para mayor información del proyecto, véase Antonio de la Torre, *Organización espacial, uso del hábitat y conservación del jaguar en un paisaje modificado por actividades humanas en la Selva Lacandona, Chiapas*. México.

proximidad a poblados, proximidad a carreteras que se asocian con la preferencia positiva o negativa en la ubicación de los jaguares.

Para la determinación de información de las áreas más usadas por los jaguares, se equipó a un grupo de jaguares con radio collares GPS que permitió capturar los movimientos de la especie dentro de la reserva comunal Sierra La Cojolita y en el Área de Protección de Flora y Fauna Chankin. Después, mediante brigadas de campo se capturaron puntos GPS identificando el uso de suelo. Esta serie de puntos, como se indica más adelante, sirvieron de áreas de entrenamiento para la generación de la clasificación espectral.

Una vez descrito el interés de la zona, se generó un diseño metodológico que permita incluir la mayoría de las características del territorio y que se vean reflejadas en su representación mediante clasificaciones espectrales. Para la elección de los elementos del cubo de clasificaciones espectrales se partió del tipo de ambiente terrestre.

Ocosingo se encuentra en una región de transición entre las regiones fisiográficas de las Montañas del Norte de Chiapas, Meseta Central y Serranías de la Lacandona, aproximadamente a 900 msnm. Por lo anterior, se determinó que el ambiente terrestre es el de un relieve montañoso.

Para la elección del tipo procedimiento, se consideró la información disponible de la zona de estudio. En este segundo caso, se tuvieron datos de campo que fueron colectados mediante puntos GPS divididos en 8 categorías principales: selva, acahual, milpa, potrero, carretera, terracería, cuerpos de agua y bajarías. Debido a la fecha de toma de las escenas, se tuvieron que agregar dos categorías más: nubes y sombras.

Al tener datos de campo (puntos capturados con GPS), se partió de un conocimiento de la zona de estudio, y por lo anterior se consideró utilizar un procedimiento de clasificación supervisada. Las categorías de los puntos, fueron de utilidad para establecer los pixeles prototipo de la clasificación en la imagen satelital.

Se eligió un método contextual debido a que las categorías de las clases suponen una importante complejidad espectral que provoca diversas confusiones. Así, mediante el

contexto se asegura la correcta asignación de los píxeles con las clases temáticas, respecto de sus vecinos.

El clasificador elegido fue Support Vector Machine (SVM) que es un clasificador supervisado que aplica un método contextual y una lógica de tipo booleana que produce buenos resultados en áreas homogéneas. El argumento principal para su elección fue su alta precisión global en comparación con el resto de los clasificadores supervisados.

Una vez definidos los elementos del cubo de clasificación espectral (Cuadro 7), se procedió al diseño metodológico que se describe en las siguientes secciones.

Clasificación Caso Ocosingo - Selva Lacandona

| | |
|----------------------------|-------------------|
| Procedimiento | Supervisado |
| Método | Contextual |
| Lógica | Booleana |
| Tipo de Ambiente Terrestre | Relieve Montañoso |

Cuadro 7. Elementos de clasificación espectral para el caso Ocosingo – Selva Lacandona

Considerando las características de la zona, los propósitos de la clasificación y la información de los puntos GPS, inicialmente se establecieron 10 tipos de clases que se pueden englobar en 5 categorías principales:

- Vegetación: Selva, acahual y bajería.
- Actividades humanas: milpa, potrero.
- Edificaciones: carretera, terracería
- Cuerpos naturales: agua
- Inconvenientes en la imagen: nubes y sombras

Como se presentó demasiada confusión entre las clases de selva, acahual y bajaría, se decidió incluir en una sola clase selva y acahual. Mientras que, la clase de carreteras al abarcar más de este tipo de infraestructura se cambió de nombre a suelo desnudo de acuerdo a lo considerado en la clasificación.

El número final de clases resulto en nueve, y se mencionan a continuación:

- Selva y Acahual
- Bajaría
- Milpa
- Potrero
- Suelo desnudo
- Terracería
- Agua
- Nubes
- Sombras

4.3 Implementación y obtención de resultados

4.3.1 Resultados Caso Marqués de Comillas – Benemérito de las Américas

Una vez identificado el tipo de ambiente terrestre y establecido los elementos de la clasificación, se tiene que pasar a describir el diseño metodológico, estructurado a continuación.

Para abarcar la zona de los municipios Benemérito de las Américas y Marqués de Comillas ($16^{\circ} 10' - 16^{\circ} 40' N$ y $90^{\circ} 34' - 90^{\circ} 44' O$) que ocupa una superficie aproximada de 2012 km^2 (Fig.54) se utilizaron dos imágenes SPOT 5 con k, j 607-317 y 607-318 del año 2009.

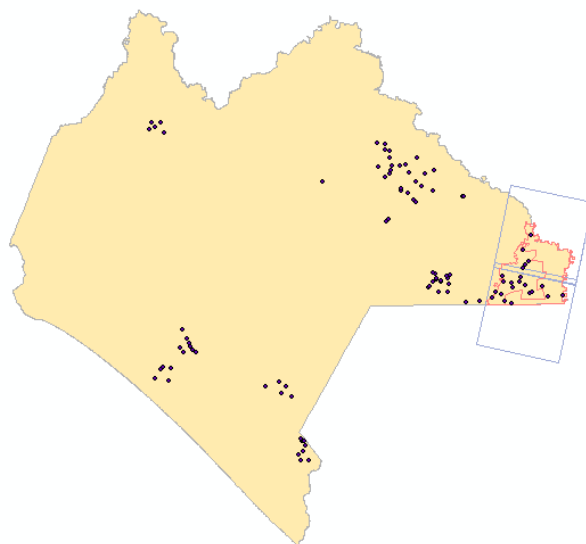


Figura 54. Localización de Benemérito de las Américas y Marqués de Comillas (rojo), cubrimiento de imágenes SPOT 5 (azul) y localidades puntuales en el estado de Chiapas.

(Fuente: elaboración propia)

Las dos imágenes con las siguientes características y referencias cartográficas:

- Proyección Cartográfica: Universal Transversa de Mercator (**UTM**), Zona 15N
- Datum: WGS-84
- Tamaño del Pixel: 10 Metros

Para este primer caso, se pre-procesaron dos imágenes *SPOT* 5, cada una por separado divididas en 4 etapas principales (para su elaboración se requirió del software ENVI v.4.7) que se describen a continuación:

- Corrección Geométrica, interpolación *nearest neighbor*: **Módulo de Orthorectify *SPOT*.**
- Corrección Radiométrica: Método de Reflectividad Aparente. **Módulo de *SPOT* Calibrate.**
- Corrección Atmosférica: Substracción de Objetos Oscuros. **Módulo Dark Subtract.**
- Clasificación No Supervisada: ISODATA. **Módulo ISODATA.**

Como se procesaron dos imágenes *SPOT* 5 del mismo año pero de diferente fecha, las condiciones de iluminación se tornan diferentes lo que provoca una diferencia notable en cuanto a las tonalidades de ambas imágenes (Fig. 55). Lo anterior, representa una fuerte dificultad ya que una misma clase en ambas imágenes puede ser confundida por el clasificador. Para evitar estos inconvenientes y una vez obtenida las imágenes corregidas atmosféricamente en valores de reflectancia, se tuvo que generar un mosaico de las dos imágenes aplicando una correspondencia de histogramas (*Histogram Matching*) para normalizar los tonos de ambas imágenes. Dadas las condiciones atmosféricas de las escenas, se decidió hacer la normalización tomando como base la imagen *SPOT* 607-317 (Imagen superior en Fig. 55) que presenta mejores condiciones de iluminación.

Debido a que el cubrimiento de las imágenes excedía el área de estudio de los municipios, se tuvo que hacer un recorte para acotar la zona de interés y ahorrar trabajo de reclasificación en una fase posterior. El recorte consistió en tomar los bordes que forman los municipios de Marqués y de Benemérito, y a partir de ellos se marcó su área de influencia (*buffer*) a 3 kilómetros (Fig. 56).

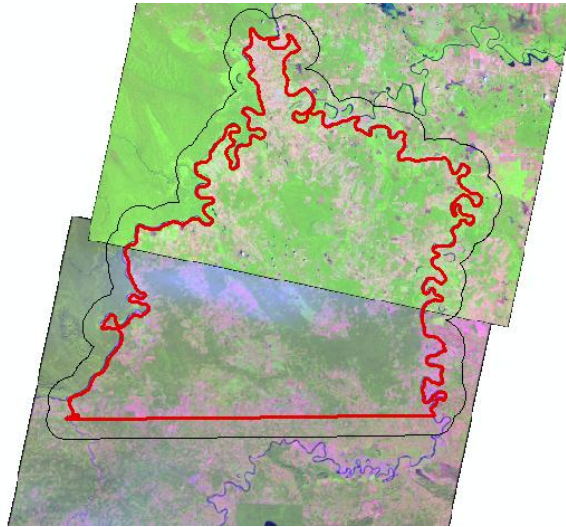


Figura 55. Diferencias de condiciones de iluminación entre escenas SPOT 5 de los municipios de Benemérito de las Américas y Marqués de Comillas (rojo)

(Fuente: elaboración propia)

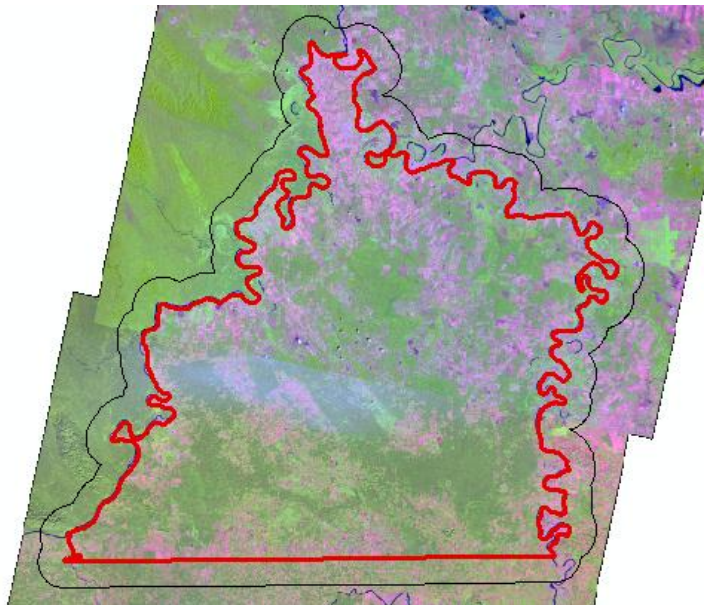


Figura 56. Mosaico de imágenes SPOT 5 (*Histogram Matching*) de los municipios de Benemérito de las Américas y Marqués de Comillas (rojo) y buffer a 3 km (negro)

(Fuente: elaboración propia)

Al clasificador ISODATA se le aplicaron los siguientes parámetros (condiciones):

- Número de clases: Mínimo: 80 Máximo: 81
- Máximo de Iteraciones: 10
- Número mínimo de píxeles por clase: 30 píxeles
- Desviación estándar máxima por clase: 1.00
- Porcentaje de umbral de cambio: 5.00 %
- Máximo número de combinación de pares: 2

Con ayuda del clasificador ISODATA y un proceso de reclasificación se analizó la distribución y dispersión de los asentamientos humanos bajo diferentes condiciones socioeconómicas, donde se consideraron las clases temáticas antes establecidas. Como salida se obtuvo un raster con 80 clases espectrales y a través de un análisis de separabilidad de forma conjunta con una reclasificación se redujo a 7 clases, para evitar la confusión entre las mismas (Fig. 57). La clasificación se transformó a vector para realizar la reclasificación.

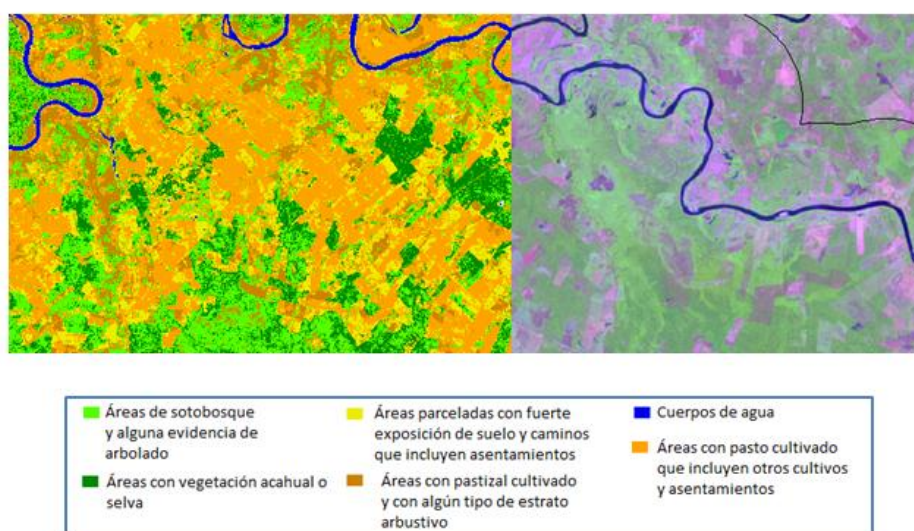


Figura 57. Leyenda de clasificación de usos de suelo en Marques y Benemérito

(Fuente: elaboración propia)

La propuesta de clasificación desarrollada fue a nivel local y se consideraron los principales asentamientos humanos (desde adentro hacia afuera). Las localidades puntuales, sirvieron para la identificación de clases de usos de suelo y es donde aparece la utilidad del contexto visto como una herramienta desde el paisaje, en función de la zona de estudio.

Se puede resumir la metodología que se empleó de la siguiente forma: a partir de dos imágenes *SPOT 5* y su procesamiento digital a través de una Clasificación Contextual No Supervisada se generó una clasificación de los municipios Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas (Chiapas) en el marco de trabajo del Corredor Biológico Mesoamericano México (Fig. 58).

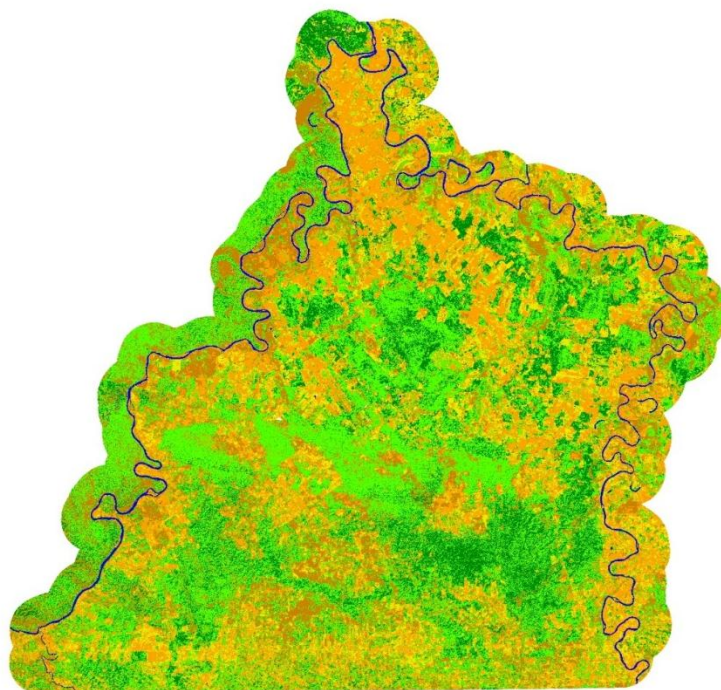
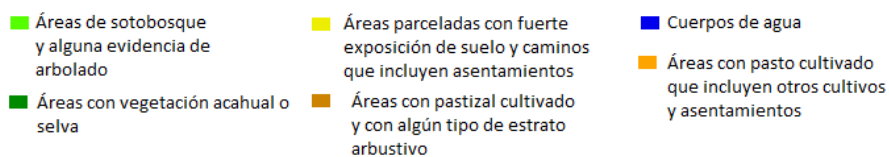


Figura 58. Clasificación contextual no supervisada de Marqués de Comillas y Benemérito de las Américas

(Fuente: elaboración propia)

4.3.2 Resultados Caso Ocosingo – Selva Lacandona

Una vez identificado el tipo de ambiente terrestre y establecido los elementos de la clasificación, se tiene que pasar a describir el diseño metodológico, estructurado a continuación. En el caso Ocosingo – Selva Lacandona la zona de estudio se acoto de diferente forma y se mantuvo en función de los datos de entrada colectados en campo. Para abarcar el área general de la zona de estudio en el municipio de Ocosingo (16° 54' N 92°05' O) se utilizaron dos imágenes SPOT 5 con k, j 606-317 y 606-318 del año 2012 (Fig. 59).

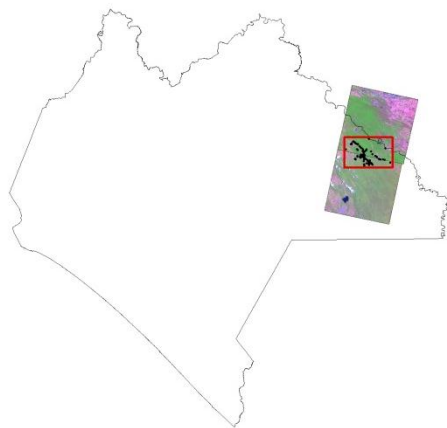


Figura 59. Cubrimiento de imágenes SPOT 5 de la Selva Lacandona y visualización de puntos GPS colectados en campo. Área de estudio marcada en borde rojo.

(Fuente: elaboración propia)

Las dos imágenes con las siguientes características y referencias cartográficas:

- Proyección Cartográfica: Universal Transversa de Mercator (**UTM**), Zona 15N
- Datum: WGS-84
- Tamaño del Pixel: 10 Metros

Las imágenes fueron pre –procesadas de manera independiente dividido en cuatro etapas principales (para su elaboración se requirió del software ENVI v.4.7) que se describen a continuación:

- Corrección Geométrica, interpolación nearest neighbor: **Módulo de Orthorectify SPOT.**
- Corrección Radiométrica: Método de Reflectividad Aparente. **Módulo de SPOT Calibrate.**
- Corrección Atmosférica: Substracción de Objetos Oscuros. **Módulo Dark Subtract.**
- Clasificación Supervisada: SVM. **Módulo Support Vector Machine.**

De las imágenes mencionadas previamente, se realizó un recorte de tal forma que se abarcará el área en donde se capturaron los 195 puntos GPS colectados en campo (Fig. 60). La distribución de los puntos indica los movimientos del jaguar, y ayudan a definir de esta forma el área de estudio con más precisión. Las categorías de los 195 puntos se dividieron en: acahual (31), carretera (21), cuerpos de agua (26), milpa (24), potrero (18), selva (41) y terracería (34).

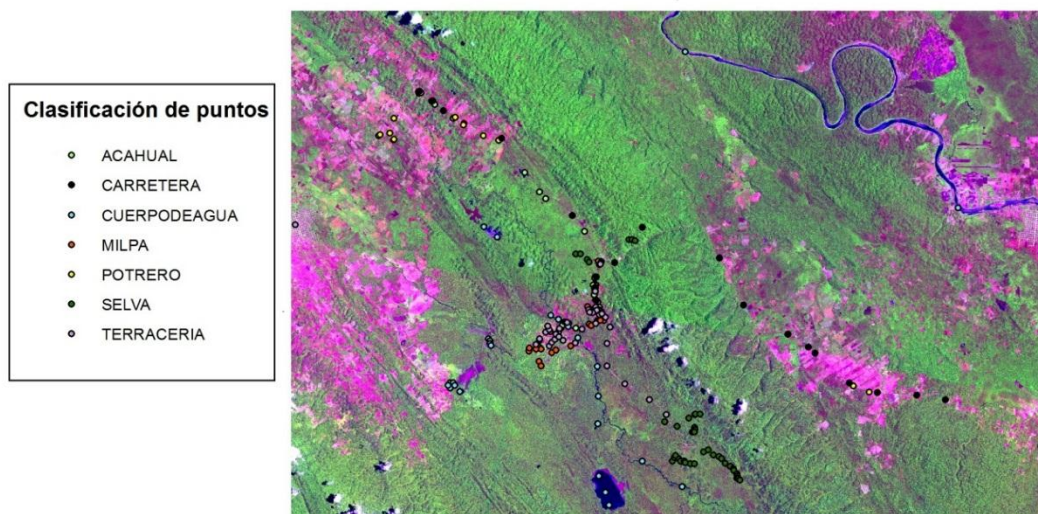


Figura 60. Mosaico de escenas SPOT 5, distribución y clasificación de puntos GPS colectados en campo

(Fuente: elaboración propia)

Los recortes de cada escena se utilizaron para generar un mosaico donde se aplicó una correspondencia de histogramas (*Histogram Matching*) entre las imágenes en reflectancia (corregidas atmosféricamente) para homogeneizar los tonos de las mismas. Para este caso, las condiciones de iluminación de ambas imágenes fueron similares pero aun así se buscó la correspondencia de niveles de tonos.

Posteriormente, se hizo un reconocimiento de la zona en la imagen de forma conjunta con la información de los puntos. Para el comienzo de la clasificación, los puntos se registraron como áreas de entrenamiento (píxeles prototipo) y se marcó una zona de influencia (*buffer*) con un radio de 5 metros. Una vez marcadas las áreas de influencia se eligió aquellas áreas que correspondían a la misma clase, en caso contrario se eliminaban. Por ejemplo, la mayoría de los cuerpos de agua que fueron capturados se marcaron en los bordes de los ríos y en el momento en el que se registraba el *buffer* se consideraban otros píxeles que no pertenecían a la clase, por ello a través de un análisis visual se tuvo particular cuidado con respecto a cada clase para evitar posibles confusiones.

Como el número de áreas de entrenamiento no era representativo con respecto a la totalidad del mosaico, se procedió a marcar más áreas de entrenamiento y debido a las características de la imagen se tuvieron que agregar dos nuevas clases: nubes y sombras. El total de píxeles prototipo quedó distribuido de la siguiente forma (Cuadro 8), en el caso del *software* ENVI las regiones de entrenamiento se capturan por número de puntos.

| Clase | Número de puntos |
|------------|------------------|
| Selva | 25,744 |
| Bajería | 76,664 |
| Achual | 49,527 |
| Agua | 10,140 |
| Potrero | 21,345 |
| Milpa | 25,974 |
| Terracería | 8329 |
| Carretera | 9906 |
| Sombras | 7487 |
| Nubes | 15,348 |

Cuadro 8. Muestras de áreas de entrenamiento (Fuente: elaboración propia)

Una vez marcadas las áreas de entrenamiento se utilizó el clasificador Support Vector Machine con los siguientes parámetros:

- Tipo de kernel : Función de base radial
- Gamma en función kernel: 0.200
- Niveles de pirámide: 3
- Umbral de reclasificación de pirámide: 0.90

Como resultado se obtuvo un raster con las 10 clases previamente especificadas y mediante un proceso de reclasificación y un análisis de separabilidad se corrigieron las posibles confusiones (Fig. 61). De igual forma que en el anterior caso, para poder realizar las correcciones pertinentes la clasificación se tuvo que transformar a vector. Una vez realizada dicha conversión a vector, se reclasificó en donde el cambio más importante resultó en la fusión de las clases selva y acahual.

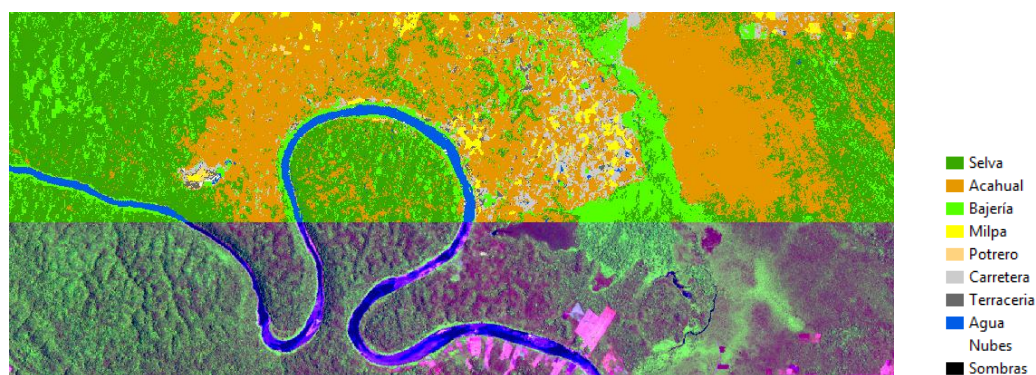


Figura 61. Leyenda de clasificación inicial Ocosingo – Selva Lacandona

(Fuente: elaboración propia)

Esta propuesta de clasificación supone elementos diferentes para su implementación, ya que la especie, el jaguar, se encuentra en función del paisaje. Una vez definida el área de interés y con algunas muestras de regiones de entrenamiento resulta eficiente replicarlo en

la totalidad de la imagen para tener un esquema general a nivel de paisaje que permita ayudar en la toma de decisiones para definición de corredores.

De forma general, el proceso empleado se puede resumir como sigue: a partir de dos imágenes *SPOT 5* y su procesamiento digital a través de una Clasificación Contextual Supervisada se generó una clasificación de una región de la Selva Lacandona, Ocosingo en el marco de trabajo del Corredor Biológico Mesoamericano México (Fig. 62).

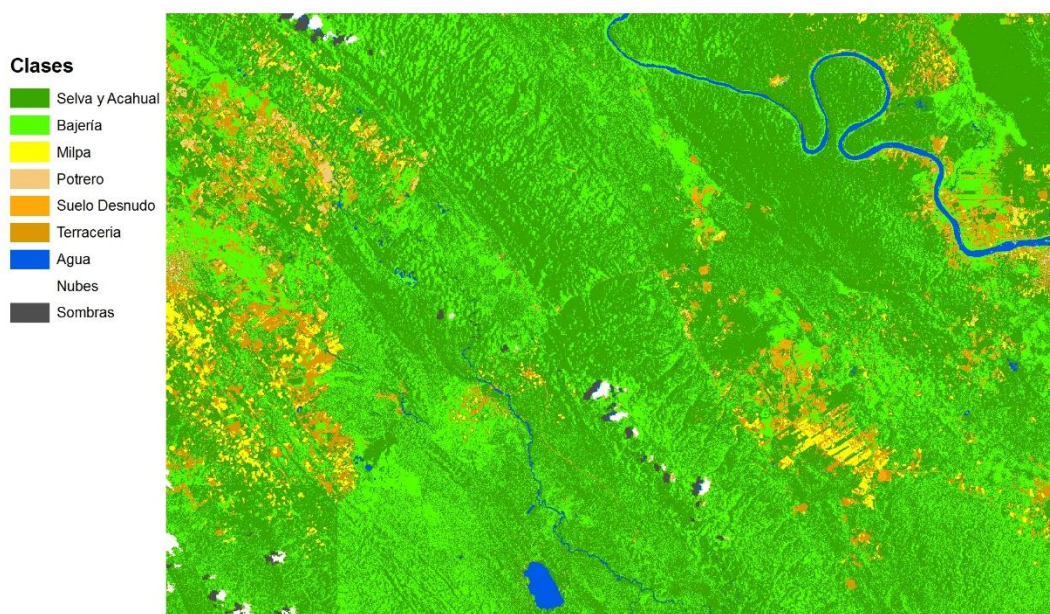


Figura 62. Clasificación contextual supervisada de Selva Lacandona, Ocosingo
(Fuente: elaboración propia)

4.3.3 Evaluación de clasificación caso Marqués de Comillas – Benemérito de las Américas

La evaluación de la clasificación se hizo por medio de una matriz de confusión. Para su implementación, se seleccionaron 73 puntos mediante un muestreo aleatorio simple, con un mínimo de dos puntos por clase. A cada punto, se le asignó una clase de pertenencia de acuerdo a la imagen *SPOT* y a información cartográfica auxiliar de INEGI. Para determinar la cantidad de puntos por clase, se hizo de acuerdo a una aproximación de área por cada clase (Cuadro 9).

| <i>Clase</i> | <i>Área (km²)</i> | <i>Porcentaje</i> | <i>Puntos ajustados</i> |
|---|------------------------------|-------------------|-------------------------|
| <i>Agua</i> | 49.17 | 1.74 | 3 |
| <i>Sotobosque y arbolado</i> | 919.28 | 32.60 | 23 |
| <i>Áreas parceladas</i> | 330.27 | 11.71 | 9 |
| <i>Pasto cultivado y asentamientos</i> | 607.36 | 21.54 | 15 |
| <i>Pastizal cultivado y estrato arbustivo</i> | 520.40 | 18.45 | 12 |
| <i>Vegetación, acahual o selva</i> | 393.25 | 13.94 | 9 |
| <i>Nubes</i> | 0.41 | 0.01 | 2 |
| <i>Total</i> | 2820.15 | 100.00 | 73 |

Cuadro 9. Puntos por clase de acuerdo al área para clasificación no supervisada
(Fuente: elaboración propia)

Se construyó una matriz donde se comparó las clases de referencia y las de la clasificación. Además se obtuvo el porcentaje de exactitud global y por clase (Cuadro 10). En la matriz de confusión, los conceptos de "usuario" y "productor" se refieren al que hará uso del mapa temático en cuestión y al que lo construyó. De acuerdo con Chuvieco (2002), una mayor precisión o exactitud para el usuario corresponde a una menor cantidad de errores de comisión y una mayor precisión o exactitud del productor será equivalente a una menor cantidad de errores de omisión.

| | Referencia | | | | | | | | Exactitud del usuario | Error comisión |
|--------------------------------|------------|--------|------|---------|---------|-----|----|-------|-----------------------|----------------|
| | S y A | VA y S | AP | PC y OA | PC y EA | A | N | Total | | |
| S y A | 21 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 95.5 | 4.5 |
| VA y S | 2 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 80 | 20 |
| AP | 0 | 0 | 8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 80 | 20 |
| PC y OC y A | 0 | 0 | 1 | 13 | 0 | 0 | 1 | 15 | 86.7 | 13.3 |
| PC y EA | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 12 | 100 | 0 |
| A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 | 100 | 0 |
| N | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 100 | 0 |
| TOTAL | 23 | 9 | 9 | 15 | 12 | 3 | 2 | 73 | | |
| <i>Exactitud del productor</i> | 91.3 | 88.9 | 88.9 | 86.7 | 100 | 100 | 50 | | | |
| <i>Error omisión</i> | 8.7 | 11.1 | 11.1 | 13.3 | 0 | 0 | 50 | | | |
| Exactitud de clasificación | 90.40% | | | | | | | | | |

Cuadro 10. Matriz de Confusión de la clasificación no supervisada. (S y A = Sotobosque y Arbolado; VA y S = Vegetación, Acahual y Selva; AP = Áreas parceladas; PC y OA = Pasto Cultivado y Otros Asentamientos; PC y EA = Pastizal Cultivado y Estratos Arbustivos; A = Agua; N = Nubes)
(Fuente: elaboración propia)

De acuerdo con la matriz de confusión, la precisión global de la clasificación resulto en 90 %, un alto porcentaje que indica que la información bajo las clases antes establecidas, es confiable. Sin embargo, en la exactitud del productor, se presentaron problemas de confusión entre tres clases. En la clase nubes, por la poca presencia de este elemento dentro de la escena, resulto difícil lograr que el algoritmo ISODATA pudiera discriminar las diferentes respuestas espectrales. Aun cuando solo se muestrearon dos puntos, fue la clase que mayor conflicto presento en especial con tipos de cultivo.

Las áreas parceladas y los pastos cultivados presentaron una confusión entre ellas, lo cual hizo que se disminuyera la exactitud del productor, respectivamente.

Las clases de agua y pastizal cultivado, no presentaron dificultad, debido a que el algoritmo identifico de forma correcta las respuestas espectrales, de fuerte contraste con el resto de las categorías.

4.3.4 Evaluación de clasificación caso Ocosingo – Selva Lacandona

La evaluación de la clasificación se hizo por medio de una matriz de confusión. Para su implementación, se seleccionaron 73 puntos mediante un muestreo aleatorio simple, con un mínimo de tres puntos por clase. A cada punto, se le asignó una clase de pertenencia de acuerdo a la imagen *SPOT* y a información cartográfica que se levantó directamente de campo. Para determinar la cantidad de puntos por clase, se hizo de acuerdo a una aproximación de área por clase (Cuadro 11).

| <i>Cobertura</i> | <i>Área (km²)</i> | <i>Porcentaje</i> | <i>Puntos</i> |
|-------------------|------------------------------|-------------------|---------------|
| <i>Selva</i> | 680.23 | 60.02 | 26 |
| <i>Bajería</i> | 324.56 | 28.64 | 14 |
| <i>Terracería</i> | 38.84 | 3.43 | 7 |
| <i>Carretera</i> | 31.31 | 2.76 | 6 |
| <i>Milpa</i> | 29.98 | 2.65 | 5 |
| <i>Agua</i> | 14.43 | 1.27 | 4 |
| <i>Potrero</i> | 5.53 | 0.49 | 4 |
| <i>Nubes</i> | 4.43 | 0.39 | 4 |
| <i>Sombra</i> | 4.07 | 0.36 | 3 |
| <i>Total</i> | 1133.39 | 100.00 | 73 |

Cuadro 11. Puntos por clase de acuerdo al área para clasificación supervisada
(Fuente: elaboración propia)

Se construyó una matriz donde se comparó las clases de referencia y las de la clasificación. Además se obtuvo el porcentaje de exactitud global y por clase (Cuadro 12). De acuerdo con la matriz de confusión, la precisión global de la clasificación supervisada resultó en 92 %, ligeramente mayor que la anterior clasificación.

De las nueve categorías definidas, cinco clases presentaron una exactitud del productor del 100%, las cuales son: bajería, milpa, agua, nubes y sombras. La clase de selva obtuvo una exactitud de 92.6 %. El suelo desnudo y los potreros presentan la menor exactitud con 66.7% y 75% respectivamente. Originalmente, la clase de suelos desnudos se había

considerado como carreteras, sin embargo por la complejidad espectral de la zona resulto difícil discriminar.

| | <i>Referencia</i> | | | | | | | | | | <i>Exactitud del usuario</i> | <i>Error comisión</i> | |
|----------------------|--------------------------------|-------|-----|-----|----|------|------|-----|-----|-------|------------------------------|-----------------------|------|
| | S | B | M | P | SD | T | A | N | SO | Total | | | |
| <i>Clasificación</i> | S | 25 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 27 | 92.6 | 7.4 |
| | B | 2 | 14 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 82.4 | 17.6 |
| | M | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 100 | 0 |
| | P | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 100 | 0 |
| | SD | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 100 | 0 |
| | T | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 6 | 83.3 | 16.7 |
| | A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 4 | 100 | 0 |
| | N | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 100 | 0 |
| | SO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 100 | 0 |
| | TOTAL | 27 | 14 | 5 | 4 | 6 | 6 | 4 | 4 | 3 | 73 | | |
| | <i>Exactitud del productor</i> | 92.6 | 100 | 100 | 75 | 66.7 | 83.3 | 100 | 100 | 100 | | | |
| | <i>Error omisión</i> | 7.4 | 0 | 0 | 25 | 33.3 | 16.7 | 0 | 0 | 0 | | | |
| | Exactitud de clasificación | 91.8% | | | | | | | | | | | |

Cuadro 12. Matriz de Confusión de la clasificación supervisada. (S = Selva; B = Bajería; M = Milpa; P = Potrero; SD = Suelo Desnudo; T= Terracería; A = Agua; N = Nubes; SO = Sombras)
(Fuente: elaboración propia)

Las clases de nubes y sombras se agregaron debido a las condiciones atmosféricas de la fecha de toma de las imágenes satelitales. Por lo anterior, en estas categorías no se contó con información directamente de campo.

CONCLUSIONES

Los ejercicios de clasificación espectral desarrollados a lo largo de la tesis, muestran la importancia y el alcance de la percepción remota para generar información basándose en objetivos particulares, los cuales, permiten contribuir en el marco de trabajo del Corredor Biológico Mesoamericano México (CBMM).

La generación de información es uno de los objetivos principales cuando se utilizan técnicas de percepción remota, pero ésta se encuentra influenciada en gran medida por los recursos disponibles y los propósitos de la investigación.

La forma de generar información propuesta en este trabajo de investigación son las clasificaciones espectrales, presentándose como una forma eficiente de obtención de información proveniente de imágenes satelitales. Las imágenes consideradas en este trabajo, son multiespectrales ya que son las más utilizadas y existe una gran variedad de técnicas de extracción de información que parten de las clasificaciones como parte del reconocimiento de patrones.

Para poder establecer un marco de clasificación fue necesario establecer los siguientes aspectos:

- Objetivos de la investigación
- Definición de metodología
- Forma de implementación

Los aspectos antes enlistados, se encuentran influenciados por los insumos disponibles (datos de entrada), en este caso las imágenes multiespectrales que a partir de sus características principales determinaron el nivel de detalle de información como el ancho de bandas espectrales y resolución espacial.

La idea general de la que parten las dos clasificaciones espectrales, surge a partir de un objetivo y su contexto. El contexto, visto como una forma de aproximarse al paisaje que obedece a los elementos del cubo de clasificaciones espectrales y al tipo de ambiente terrestre. En dicho cubo, una vez definidos los elementos de lógica, procedimiento y método, se establece una forma de modelar el paisaje y sus componentes naturales, para generar una salida (mapa temático) acorde a los objetivos de investigación.

Los elementos del cubo, permiten obtener un esquema general que indique cuando es que se debe ocupar un procedimiento, método y lógica de clasificación bajo una situación determinada (insumos y contexto).

Todo trabajo de clasificación se encuentra sujeto a un proceso de evaluación, en el cual se determina que tan precisos fueron los mapas de salida. Para la evaluación, en cada ejercicio se realizó una matriz de confusión, que muestra el porcentaje de confiabilidad general y por clase. Se desarrollaron dos ejercicios de clasificación mediante un procedimiento supervisado y un no supervisado, en ambos se garantizó probabilidades generales arriba del 90% resultado del proceso de refinamiento de los elementos del cubo de clasificación espectral.

Dadas las características de los ejercicios, se esperaba una mayor diferencia de exactitud general de las clasificaciones ya que en el ejercicio supervisado se realizó un trabajo más riguroso que requirió datos de campo mientras que en el no supervisado no hubo datos adicionales. De acuerdo a las matrices de confusión, el ejercicio no supervisado presento una exactitud del 90% mientras que el supervisado de 92%, una diferencia de apenas 2%.

Sin embargo, contrario a lo que se esperaba se encontraron mayores problemas de confusión en la clasificación supervisada (caso Ocosingo-Selva Lacandona), de acuerdo a los bajos porcentajes de confiabilidad evidenciados en las clases de potrero (75%) y suelo desnudo (67%). El resto de las clases, presento un porcentaje de confiabilidad mayor al 90% a excepción de la categoría de terracería con un 83%.

En el caso de la clasificación no supervisada (caso Marqués de Comillas-Benemérito de las Américas), la exactitud por clase fue más constante, oscilando en porcentajes cercanos al 90%, a excepción de la clase de nubes con un porcentaje del 50%.

A pesar de que la clasificación supervisada tuvo una mayor exactitud general, presento mayor confusión interclase, mientras que para el caso de la no supervisada el porcentaje de confiabilidad interclase se encuentra más agrupado. La clasificación no supervisada se vio afectada por el porcentaje de la clase de nubes, el más bajo en ambos ejercicios.

En el desarrollo e implementación de las clasificaciones espectrales antes descritas, se destaca la importancia del trabajo interdisciplinario que nos brinda un espacio más amplio de posibilidades para integrar información de utilidad y enriquecer los resultados de investigación. Para los casos de clasificación de Marqués de Comillas, Benemérito de las Américas y Ocosingo (Selva Lacandona) se trabajó de forma coordinada con investigadores de profundo conocimiento de las zonas de estudio, donde se incluyó un proceso de evaluación con el usuario.

Para el caso de la clasificación de Marqués de Comillas – Benemérito de las Américas se trabajó en coordinación con el Mtro. Mauricio Ricárdez¹⁶, quien se encargó de estudiar la caracterización social y ambiental del paisaje en el municipio de Marqués y orientó en la determinación de clases de acuerdo al contexto.

En el caso de la segunda clasificación Ocosingo – Selva Lacandona se trabajó en coordinación con el Mtro. J. Antonio de la Torre de Lara¹⁷, quien se encargó de coleccionar los puntos GPS que sirvieron como insumos de entrada para la generación de la clasificación espectral. La información de la clasificación se utilizó para la generación de un modelo espacial que permita diseñar los corredores que mantengan la conectividad de los jaguares en la selva Lacandona.

¹⁶ Candidato a Doctor en Urbanismo por la Facultad de Arquitectura UNAM

¹⁷ Candidato a Doctor por el Instituto de Ecología, UNAM

Álvarez, Pedro Karin Serrato. 2009, *Clasificación fisiográfica del terreno a partir de la inclusión de nuevos elementos conceptuales..* 2009. Bogotá, Perspectiva Geográfica, Vol. 14.

Carreto, Fernando y González Pérez, Raúl. 2000. *Geografía General*. Estado de México: UAEM.

CCRS. 2011. *Fundamentals of Remote Sensing*. Canadá : Natural Resources Canada.

Chávez, Jorge Lira. 1995. *La Percepción Remota: Nuestros ojos desde el espacio*. Cuarta reimpresión. México, D.F : Fondo de Cultura Económica.

—. 2010. *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*. Ciudad Universitaria: Instituto de Geofísica, UNAM, 2010.

CONABIO. 2012. *Diseño de corredores para los jaguares (Panthera onca) como herramienta de planeación para mantener la conectividad en el noreste de la Selva Lacandona*. México: Unidad Técnica Nacional.

—. 2010. *Primer Informe del Convenio CBMM*. México.

de la Torre de Lara, J. Antonio, 2012, *Organización espacial, uso del hábitat y conservación del jaguar (Panthera onca) en un paisaje modificado por actividades humanas en la Selva Lacandona, Chiapas, México*, México : GeoWebRum.

García Gil, Gerardo, y otros, *Ambientes Terrestres*. 2010. México: Centro de Investigación Científica de Yucatán.

García Mora, Tzitziki Janik. 2006. *Evaluación de tres clasificadores difusos en el análisis de imágenes satelitales de baja resolución (SPOT Vegetation)*. Morelia: Instituto de Geografía.

Horning, Ned, y otros. 2010. *Remote Sensing for Ecology and Conservation*. Oxford : Oxford University Press, 467.

Jensen, John R. 2007. *Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective*. 2nd ed: Prentice Hall series in geographic information science.

Kääb, Andreas. 2005, *Remote Sensing of Mountain Environments*, Zurich : UNESCO publications, Proceedings Second and Third GLOCHAMORE.

Labrador G., Iván. 2008. *Desarrollo de un clasificador de imágenes satelitales basado en lógica difusa*. Mérida : Universidad de Los Andes Mérida.

Marínez Vega, Javier y Martín Isabel, M. Pilar. 2010. *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid : Red Nacional de Teledetección Ambiental.

Obregon, Claudio Tesser. 2000 *Algunas reflexiones sobre los significados del paisaje para la Geografía*, 27, Revista de Geografía Norte Grande.

Ricárdez, Mauricio. 2012, *Transición rural-urbana de los asentamientos humanos en la zona de Marqués de Comillas. De la visión regional a la caracterización social y ambiental del paisaje agrario local*, México: GeoWebRum.

Rodríguez Vásquez, Andrés Felipe. 2011. *Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de la clasificación orientada a objetos, estudio de caso piedemonte de Villavicencio, Meta*. Bogotá: Facultad de Ingeniería Agronómica.

Salinero, Emilio Chuvieco. 2008. *Teledetección Ambiental*. 3ra. Edición. Madrid: Ariel.

Sobrino, Jose A. 2000. *Teledetección*. Valencia: Servicio de Publicaciones.

States, Organization of American. 1993. *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Washington, D.C: OAS.

Strahler, Alan H. 2004. *Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment*. Third Edition. Boston: WILEY.

Yufeng Liu, Hao Helen Zhang, Yichao Wu. 2005, *Hard or Soft Classification? Large-margin Unified Machines*. North Carolina, Journal of Machine Learning Research.