



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA SUPERFICIAL  
DEL EMBALSE DE LA PRESA VILLA VICTORIA, ESTADO DE  
MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A:**

**MOISÉS CRUZ VÁZQUEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
MTRO. EN ING. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA  
HIROSE**

**MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2015**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Señor  
MOISÉS CRUZ VÁZQUEZ  
Presente

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/012/15

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

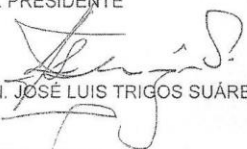
**"ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA SUPERFICIAL DEL EMBALSE DE LA PRESA VILLA VICTORIA, ESTADO DE MÉXICO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA
- III. FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA
- IV. SITIO DE ESTUDIO
- V. METODOLOGÍA
- VI. RESULTADOS
- VII. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

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 11 de marzo del 2015.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH\*gar.

## Agradecimientos

A Dios.

Al M en I Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por ser el tutor correcto para mí, no es fácil tener la paciencia de esperar más de tres años y seguir con el apoyo del primer día, un gran profesor y una persona admirable.

A mis sinodales, Ing. Hugo Sergio Haaz Mora, Ing. Héctor Javier Guzmán Olguín, Ing. Agustín Demenegui Colina e Ing. René Ernesto Mendoza Sánchez, por su tiempo invertido no solo en este proyecto sino a sus horas de clase que reforzaron la importancia de ser un ingeniero civil involucrado con la sociedad y su mejora.

A mi madre, mi heroína y apoyo eterno, mi padre por facilitar mi educación, mis hermanos (Martín y Juan Carlos) por ser mis compañeros de vida y a mi familia cercana.

A Karen, por ser la mejor de todo.

Y a las siguientes personas, sin ellas esto no sería posible.

Abigail de la Torre, Aldo Gil, Alicia Gómez, Anahí Ortega, Bernardo Ortiz, Bianca Obregón, Celina Ávila, Cintia Altieri, Crystal De Julián, Daniel Vázquez, Cesar Martínez, Enrique Sosa, Gabriel Hurtado, Gustavo Rojas, Héctor Luna, Higinio Ángeles, Hugo Olvera, Imelda Cruz, Isela Sánchez, Isis Morales, Israel Rivera, Itzel López, Janeth Saldívar, Juan Hinojosa, Juan Peralta, Katy Bautista, Leidy Quintanar, Luis Palomino, Maricela Cano, Maricela Fuentes, Marisela González, Marlen Hernández, Miguel Ríos, Nallely Martínez, Naydee Sotelo, Nidia Correa, Oscar Pacheco, Perla Cruz, Rosa Magallanes, Sagrario Mora, Silvia Mata, Salvador Cantú y Ulises Onofre.

## Contenido

Introducción .....	4
Objetivo general .....	6
Objetivos específicos.....	6
Capítulo 1. Antecedentes históricos .....	7
Capítulo 2. Fundamentos teóricos de la radiación electromagnética .....	13
2.1 Fuente de radiación electromagnética .....	13
2.2 Radiación y medio de transmisión (atmósfera).....	18
2.3 Interacción con el objeto.....	20
Capítulo 3. Fundamentos de la percepción remota.....	24
3.1 Detección en el sensor .....	25
3.2 Transmisión, recepción y procesamiento .....	32
3.3 Aplicaciones de la PR.....	46
Capítulo 4. Sitio de estudio.....	54
Capítulo 5. Metodología.....	60
5.1 Recopilación y revisión de la información documental sobre el tema .....	60
5.2 Plataforma satelital seleccionada .....	60
5.3 Selección de imágenes satelitales.....	64
5.4 Preprocesamiento y análisis digital.....	67
Capítulo 6. Resultados.....	81
Capítulo 7. Conclusiones .....	87
Bibliografía .....	88

## Introducción

El agua es posiblemente el recurso natural más importante para el ser humano, no hay sociedad que pueda vivir sin ella, desde la antigüedad las primeras poblaciones se fundaron cerca de los cuerpos de agua.

El crecimiento poblacional desmedido tiene consecuencias graves en los servicios públicos, las grandes ciudades sufren en algún aspecto, en el caso de la Ciudad de México existe una cantidad de problemas que necesitan solución, el gobierno busca soluciones a las necesidades en proyectos de corto plazo, estas acciones no siempre son las correctas o las más sostenibles con el pasar de los años. El agua se encuentra entre estas problemáticas.

La Ciudad de México se fundó en una zona de lagos, desde la época colonial estos fueron secados de manera consiente, el agua aunque no estuviera de forma visible seguía en la región por medio de mantos acuíferos y algunos ríos. El descontrol poblacional provoco dos fenómenos que son problema actual, el primero es la contaminación del agua, el no tener una línea de acción con nuestros residuos provoca que sean puestos a disposición sin pensar en consecuencias, el resultado de esto es la contaminación de nuestras pocas fuentes de abastecimiento. El segundo fenómeno es la sobreexplotación de los mantos acuíferos, la misma solución de un problema de abastecimiento esta causando desafortunadas consecuencias como los hundimientos en la parte centro y oriente de la ciudad además de inundaciones y afectaciones en las zonas más vulnerables.

Al tener nuestras fuentes de abastecimiento contaminadas y cada día menores se empezaron a buscar soluciones, una de ellas fue y sigue siendo el traer agua de otros lugares. El sistema Cutzamala (ubicado en Michoacán y Estado de México) tiene sus orígenes desde los años 30 pero no es hasta 1976 donde los influentes de la zona alta del río Cutzamala son utilizados, antes de su modificación el para abastecimiento de agua estas corrientes servían para riego y generación de electricidad por medio de presas.

Villa Victoria es una de las presas que abastece al sistema Cutzamala, se construyeron canales y se colocó tubería metálica para llevar agua desde la presa hasta el túnel Analco-San José, esta inversión resuelve el suministro de agua a la Ciudad de México aunque con un costo, para mover el agua desde el nivel de la presa a un tanque de oscilación se necesito la construcción de una planta de bombeo. La población no está consiente de los altos costos que conlleva traer el vital líquido de zonas lejanas a la ciudad, el agua se encuentra subsidiada en su mayoría por parte del gobierno, entonces invertir en su mantenimiento es cada vez más difícil. El proyecto de traer agua de las lejanías tiende a encarecerse.

La presa Villa Victoria también es utilizada para la recreación y actividades económicas como la pesca y la agricultura, su importancia en la zona es igual o mayor que para la Ciudad de México. Conociendo su valor es difícil asimilar los faltantes de información que se tienen. No se conoce con

detalle el estado de la presa, no es suficiente conocer su NAME, una inversión tan grande merece conocer todo lo asociado a ella.

El proyecto de tesis que se realiza a continuación busca explicar el fenómeno dinámico de la presa conforme al tiempo, la técnica utilizada para este fin es la percepción remota.

En el capítulo 1 se mencionan los antecedentes más sobresalientes de los primeros estudios de la luz, la invención de la cámara fotográfica y sus avances hasta llegar a las principales plataformas satelitales con el objetivo de estudiar el planeta Tierra. En el capítulo 2 se explican las teorías más importantes en el tema de la energía electromagnética, la radiación de los cuerpos y la interacción del Sol con los cuerpos terrestres y la atmósfera. En el capítulo 3 se comentan los fundamentos de la Percepción Remota y las principales fases de su técnica, se incluyen los principales satélites y sus sensores. En el 4° se conoce con detalle la presa Villa Victoria y su entorno. En el 5° se explica la metodología para la realización del caso estudio y se finaliza con los resultados del proyecto y las conclusiones del mismo.

## Objetivo general

Analizar la dinámica superficial del embalse Villa Victoria con la técnica de Percepción Remota (PR).

## Objetivos específicos

1. Establecer una metodología que al cumplir ciertos parámetros pueda ser utilizada en distintos cuerpos de agua.
2. Desarrollar antecedentes que sean aplicados a un estudio de campo y sigan una línea de ahorro de recursos (tiempo, material, dinero, etc.)
3. Conocer el alcance que la percepción remota puede tener en casos estudios semejantes al descrito en este proyecto.

## Capítulo 1. Antecedentes históricos

El humano siempre ha tenido la necesidad de explicar los eventos que ocurren frente a él, aprovechando todos los recursos disponibles que tiene en ese momento, una importante fuente de información es percibida por la vista.

El **ojo humano** (figura 1.1) es nuestro sensor remoto, de él podemos analizar las propiedades físicas de los objetos y recabar información. El ojo necesita de la luz, sin ella somos incapaces de ver, la luz penetra nuestros ojos para que el cerebro forme la imagen.



Figura 1.1 Ojo humano (tomada de [www.taringa.net](http://www.taringa.net))

Isaac Newton fue el primer en utilizar la palabra *espectro* (del latín apariencia) al describir sus experimentos en la óptica, Newton observó que un estrecho haz de luz que incide en un prisma de vidrio triangular se descompone en dos trayectos, el primero se refleja y el segundo pasa el vidrio mostrándonos diferentes bandas de colores (Figura 1.2). La hipótesis de Newton era que la luz está compuesta de partículas de distintos colores y la diferencia en los colores es por la velocidad de cada uno.



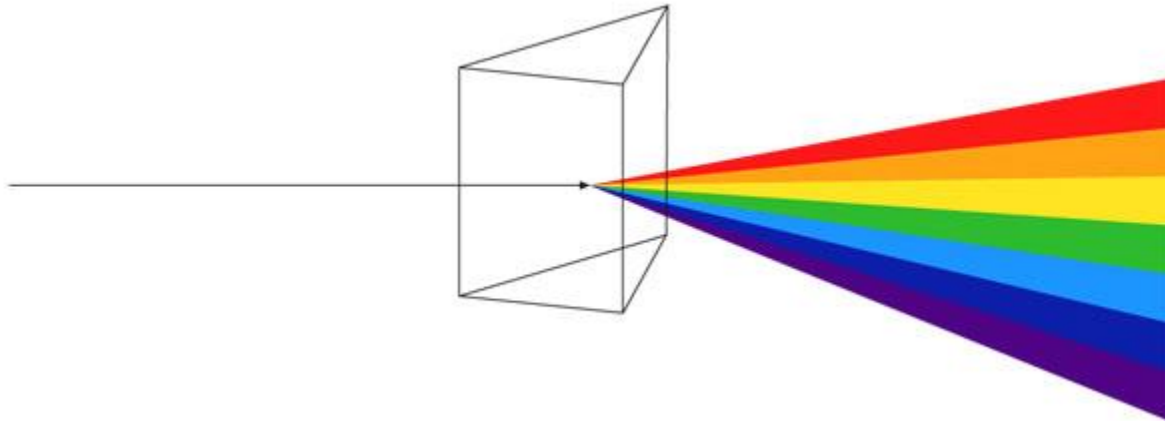


Figura 1.2 Experimento de Newton para identificar los componentes de la luz (tomada de [www.proyectacolor.cl](http://www.proyectacolor.cl))

Michael Faraday descubrió en 1845 de forma experimental la existencia de una relación entre la luz y el magnetismo, sus experimentos son la base de la teoría electromagnética desarrollada por James Clark Maxwell. Las ecuaciones de Maxwell demuestran que los campos eléctricos y magnéticos son manifestaciones de un solo campo electromagnético.

Siendo contemporáneos de Faraday, Joseph Nicéphore Niépce y Louis Daguerre desarrollan en conjunto el primer procedimiento fotográfico, aún cuando ya existía la fotografía nunca se había logrado tomar una fotografía con personas vivas (Figura 1.3), el aporte de ambos revolucionó la fotografía y esto sería aprovechado para distintos fines. Al igual que el ojo humano, la cámara fotográfica necesita de la luz.



Figura 1.3 Se puede observar a un joven que limpia los zapatos de un hombre (tomada de [www.cnnmexico.com](http://www.cnnmexico.com))

Por sus características la fotografía empieza a ser empleada para fines topográficos. A finales del siglo XIX las cámaras fotográficas pueden llegar a alturas de cientos de metros para tener una mayor área de observación. Esto es posible gracias al uso de palomas, globos aerostáticos y papalotes.

Se tiene un avance significativo con la llegada de las imágenes fotográficas tomadas desde los aviones, con esta invención se permite adquirir datos en zonas específicas de forma controlada. George Eastman lanza la cámara Kodak, primera que utiliza un carrete de película fotográfica, esto provoca que se dejen las placas de vidrio.

La fotografía a color empezó en 1930, al mismo tiempo se empezaron a trabajar con películas que eran sensibles a la radiación del infrarrojo cercano. Su aplicación principal en esta etapa histórica era tomar fotos que penetraran la neblina.

La guerra también ha contribuido de forma directa a la evolución de la fotografía, en los años de la Segunda Guerra Mundial se estudió la relación de la reflexión espectral sobre el terreno natural, todo esto para encontrar técnicas para la detección de camuflaje.

La Segunda Guerra Mundial dio un gran avance sobre el uso de las fotografías tomadas desde un avión pero el gran salto en avances tecnológicos se dio en los años sesenta con la aparición de plataformas satelitales y sus sensores multispectrales acoplados a las computadoras.

En 1960 se pone en órbita el TIROS I (Television InfraRed Observation Satellite), el primer satélite meteorológico, el cual contenía una cámara de televisión de baja resolución, este satélite permitió discriminar objetos distintos, como nubes, agua, nieve. Aun cuando el periodo que estuvo trabajando fue corto (78 días) probó que la información obtenida por estos dispositivos era de gran ayuda para los estudios de fenómenos ambientales terrestres. En 1970 cambio su denominación a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), el lanzamiento más reciente del programa es el NOAA-N' (NOAA-N Prime) o NOAA 19 en 2009.

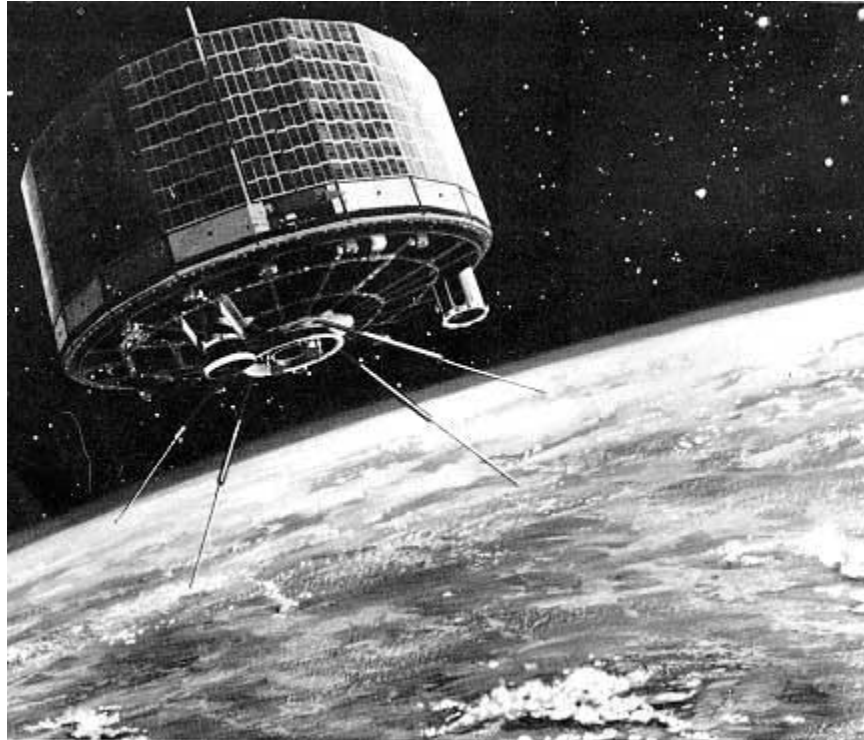


Figura 1.4 TIROS I (tomada de [www.osd.noaa.gov](http://www.osd.noaa.gov))

Años después la NASA patrocina varios estudios sobre la aplicación de la fotografía en color de infrarrojos y multiespectrales, ejemplos de estos proyectos son las misiones Gemini, Apolo y Mercury. Con este avance se produce la puesta en marcha de generadores de imágenes multiespectrales.

El Apolo 9 tiene la característica de ser la primera en tomar imágenes de fotografía orbital multiespectral, para el estudio de recursos terrestres, fue lanzado en 1969 y gracias a esta experiencia es continuada por demás misiones (Skylab, Apolo, Soyuz, etc.).

Debido a los excelentes resultados de las imágenes satelitales obtenidas en los años 60 la NASA inicia un proyecto para la evaluación de recursos naturales. En 1972 se logra el primer lanzamiento de una plataforma satelital para este uso, la serie fue llamada ERTS (Earth Resources Technology Satellites), pero desde 1975 lleva el nombre de LANDSAT (Land Satellite). Este primer satélite utilizaba dos sensores, el RBV (Return Beam Vidicon) y el MSS (Multi Spectral Scanner).

El segundo lanzamiento de la serie fue en el año de 1975 y los tres siguientes fueron en el periodo de 1978-1984, LANDSAT 4 y 5 incluyen un nuevo sensor, el TM (Thematic Mapper). Todos ellos han construido un proyecto con resultados tangibles en el tema de la percepción remota. La alta calidad en la resolución de los sensores, el carácter global y periódico de sus observaciones y su comercialización han hecho de esta plataforma satelital un gran apoyo en diversas áreas del conocimiento.

Aunque es el programa sin fin militar más importante también ha sufrido fracasos, en 1993 el LANDSAT 6 no logró ponerse en órbita ya que su cohete propulsor tuvo una falla mecánica. Este satélite llevaba consigo un nuevo sensor, el ETM (Enhanced Thematic Mapper).

El LANDSAT 7 fue lanzado en 1999 con el nuevo sensor llamado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), una imagen de este satélite con el mencionado sensor está compuesta de 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas para obtener resultados variados de color u opciones de procesamiento.

En 2013 fue lanzado el LANDSAT 8, el satélite más reciente del programa, originalmente llamado LANDSAT Data Continuity Mission (LDCM), este nuevo satélite utiliza dos sensores nuevos, el OLI (Operational Land Imager) y el TIRS (Thermal InfraRed Sensor).

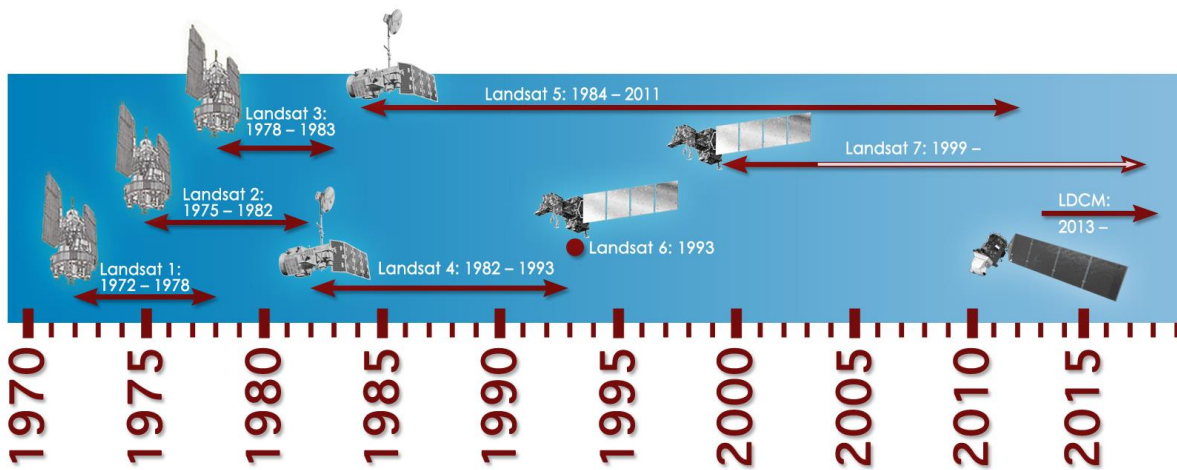


Figura 1.5 Lanzamientos del programa LANDSAT (tomado de danielmarin.naukas.com)

El programa SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) es el sistema de observación terrestre diseñado en Francia bajo la supervisión del CNES (Centre National D'Etudes Spatiales) con la participación de Suecia y Bélgica. Fue aprobado en 1978 aunque hasta 1986 logró poner su primer satélite en órbita, el SPOT 1

El SPOT 1, 2 y 3 manejaban el sensor ARV (Alta Resolución Visible), el periodo de lanzamiento de los tres satélites fue de 1986 a 1993. El SPOT 4 cambió de sensor, el HRVIR (Alta Resolución Visible e Infrarrojo), su lanzamiento fue en 1998.

El SPOT 5 es lanzado en 2002 con dos nuevos sensores, el HRG (Haute Resolution Geometrique) y el HRS (Haute Resolution Stereoscopique), este último con la característica de ofrecernos imágenes tridimensionales. Pasaron más de 10 años para un nuevo lanzamiento del programa, en el lapso de 2012 a 2014 se colocaron en órbita el SPOT 6 y el 7.

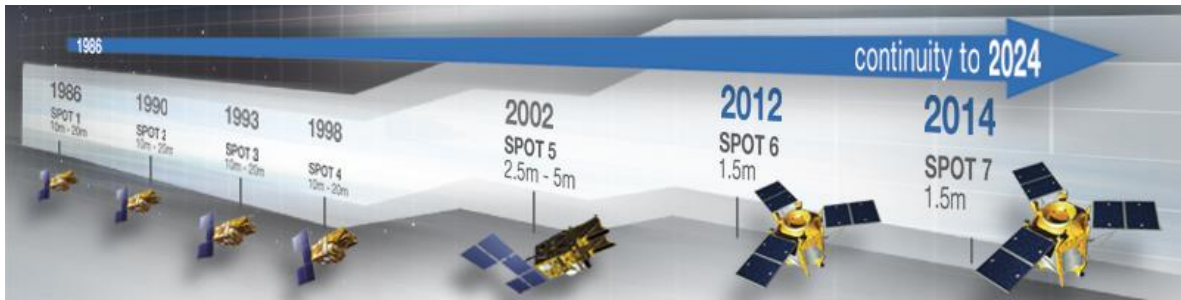


Figura 1.6 Lanzamientos del programa SPOT (tomada de [www.geo-airbusds.com](http://www.geo-airbusds.com))

Actualmente existen además de los programas mencionados una gran cantidad de satélites para el monitoreo del planeta, como por ejemplo el OCEANSAT de la India, el ERS 2 de la comunidad europea, el IKONOS, QUICKBIRD y GEOEYE de los Estados Unidos.

## Capítulo 2. Fundamentos teóricos de la radiación electromagnética

### 2.1 Fuente de radiación electromagnética

La energía electromagnética es el transmisor de la información entre el objeto de estudio y el sensor seleccionado en la PR, esta información puede ser procesada por el contenido de la frecuencia, intensidad o polarización de la onda electromagnética.

La radiación electromagnética se propaga a la velocidad de la luz de la fuente directamente a través del espacio que se encuentra libre o indirectamente por la reflexión o dispersión al sensor.

Se consideran dos modelos para explicar las propiedades de la radiación electromagnética: el modelo de onda y el de partícula.

En el modelo de onda la radiación es una combinación de campos eléctricos (E) y magnéticos (B) oscilantes, que se propagan de forma perpendicular a través del espacio (Figura 2.1). Estos campos producen ondas definidas por una longitud ( $\lambda$ ) y una frecuencia ( $\nu$ ).

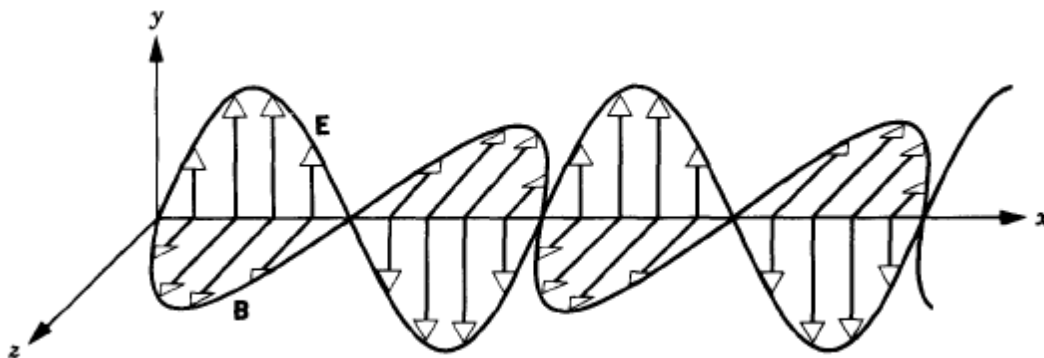
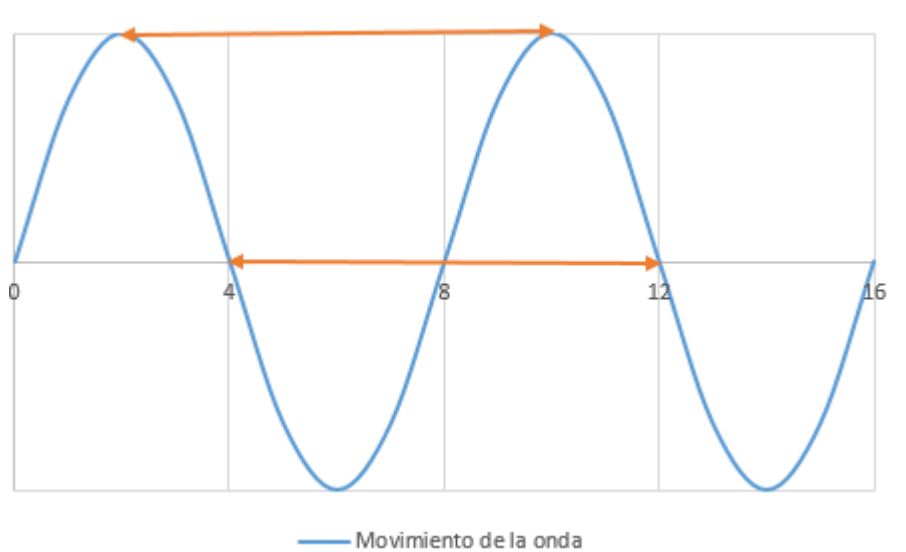


Figura 2.1 Modelo de onda (tomada de (Resnick, Halliday, & Krane, 1999))

1. Longitud de onda ( $\lambda$ ): Distancia que recorre una onda en determinado intervalo de tiempo. (Figura 2.2). Este intervalo es el transcurrido entre dos máximos consecutivos en alguna propiedad de la onda, por ejemplo dos crestas del campo eléctrico. La unidad de medición de la longitud de onda es el metro (m).
2. Frecuencia de oscilación ( $\nu$ ): Magnitud que refiere al número de ciclos que pasan por determinado punto en una unidad de tiempo. La unidad de medición de la frecuencia son los Hertz (Hz o 1/s).



**Figura 2.2 Longitud de onda (elaboración propia)**

La longitud de onda y la frecuencia de oscilación están relacionadas por la velocidad de la luz en el medio ( $c$ ) (Ecuación 2.1).

$$c = \lambda * v \text{ (2.1)}$$

Donde  $c$  es la magnitud de la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ),  $\lambda$  es la longitud de onda (m) y  $v$  es la frecuencia de oscilación (1/s).

Se le llama espectro electromagnético a la secuencia de todas las ondas electromagnéticas conocidas, ordenadas según su longitud de onda o su frecuencia (Figura 2.3). El espectro electromagnético se extiende desde los rayos cósmicos a las radiofrecuencias bajas con longitudes de onda larga.

# El Espectro Electromagnético

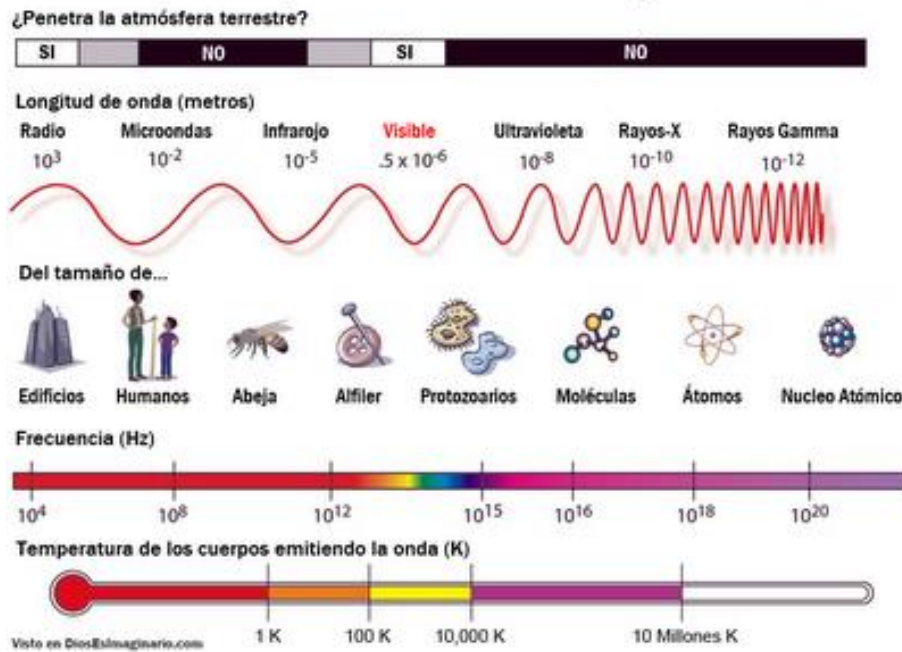


Figura 2.3 Espectro electromagnético (tomado de [www.datuopinion.com](http://www.datuopinion.com))

No todas las regiones son utilizadas por la PR, la Figura 2.3 en su parte superior nos muestra cuáles son los tipos de radiación que penetran la atmósfera terrestre, algo necesario para que el sensor pueda recibir información de la superficie terrestre. Las regiones aprovechadas por la PR son:

**Visible (VIS):** La región más familiar para el ser humano, es la única que puede percibir con sus ojos, las longitudes de onda van desde  $0.4 \mu\text{m}$  a los  $0.7 \mu\text{m}$ , los pigmentos de las plantas y los sólidos suspendidos en el agua afectan de gran manera a los sensores que captan en este ámbito. Se divide en tres grupos que son Rojo (R), Verde (G) y Azul (B).

**Infrarrojo (IR):** Se emite comúnmente por átomos o moléculas cuando cambian su movimiento rotatorio o vibratorio, este cambio es a menudo una transferencia de calor y a veces llamada radiación térmica, las longitudes de onda en esta región van desde  $0.7 \mu\text{m}$  a los  $100 \mu\text{m}$ . Se divide en tres grupos, Infrarrojo cercano (detecta a partir de filmes dotados de emulsiones especiales), Infrarrojo medio (los procesos de emisión solar y de la superficie terrestre se entremezclan) e Infrarrojo lejano o térmico (incluye parte de las emisiones del espectro terrestre).

**Microondas:** Pueden considerarse como ondas cortas de radio, comúnmente se producen por osciladores electromagnéticos en circuitos eléctricos, un ejemplo son los hornos de microondas, las longitudes de onda van desde  $100 \mu\text{m}$  a  $1 \text{ m}$ .

Si se toma desde el punto de vista fundamental, la radiación electromagnética solo difiere en la longitud de onda o frecuencia. Los nombres asignados a las diversas regiones del espectro electromagnético tienen que ver exclusivamente con la manera que se crean u observan los tipos de onda y no tienen relación con las propiedades fundamentales de las ondas.



A parte de las diferencias de longitud de onda, no existe una forma experimental que pueda ayudar a distinguir una onda de la región del infrarrojo de otra que se encuentre en el visible, las ondas tienen forma idéntica.

En realidad no existe una división exacta entre las regiones del espectro electromagnético, el estudio de cada región da una idea de estos. Aun así, las regiones son de gran apoyo para comprender y manipular la información de manera correcta.

En el modelo de partícula la radiación electromagnética no se considera una serie de ondas sino un haz o un flujo de partículas llamado fotón. Cada fotón tiene energía (E) que es directamente proporcional a la frecuencia de oscilación dada por la relación de Planck (Ecuación 2.2), esta energía depende del objeto que trasmite la radiación.

$$E = h * \nu \quad (2.2)$$

Donde E es la energía del fotón (J), h es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  J\*s) y  $\nu$  es la frecuencia de oscilación (1/s).

Despejando  $\nu$  de las ecuaciones 3.1 y 3.2 se pueden relacionar los dos modelos (Ecuación 2.3).

$$E = \frac{h * c}{\lambda} \quad (2.3)$$

La nueva ecuación nos expresa que a mayor longitud de onda menor cantidad de energía, demostrando porque es más fácil detectar ondas de microondas (hasta 1 m de longitud de onda) que los rayos ultravioleta ( $1 \times 10^{-9}$  m de longitud de onda).

El sol es la fuente más importante de radiación electromagnética para la percepción remota, sin embargo los cuerpos que tengan una temperatura mayor a los 0° K emiten radiación. Esta razón hace considerar a todos los cuerpos como fuentes de radiación electromagnética, pero cada una con características distintas.

Si el sol lograra ser un emisor perfecto de radiación electromagnética sería denominado cuerpo negro. Un cuerpo negro es un ideal teórico que transforma la energía calorífica en energía radiante según las leyes de la termodinámica. Esta emitancia es dada por la Ley de Planck para la longitud de onda ( $\lambda$ ) (Ecuación 2.4) y es una forma de conocer la cantidad máxima de energía emitida por un objeto.

$$M(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 * (e^{C_2/\lambda * T} - 1)} \quad (2.4)$$

Donde M ( $\lambda$ ) es la emitancia radiante espectral ( $J s^{-1} m^{-2} \mu^{-1}$ ), T es la temperatura (°K),  $C_1$  es una constante ( $3.74 \times 10^8 J s^{-1} m^{-2} \mu^{-4}$ ),  $C_2$  es una constante ( $1.44 \times 10^4 \mu K$ ) y  $\lambda$  es la longitud de onda (m).

Si se grafica la Ecuación 2.4 puede observarse que cada temperatura tiene su propia longitud de onda donde existe la máxima emitancia radiante espectral (Figura 2.4).

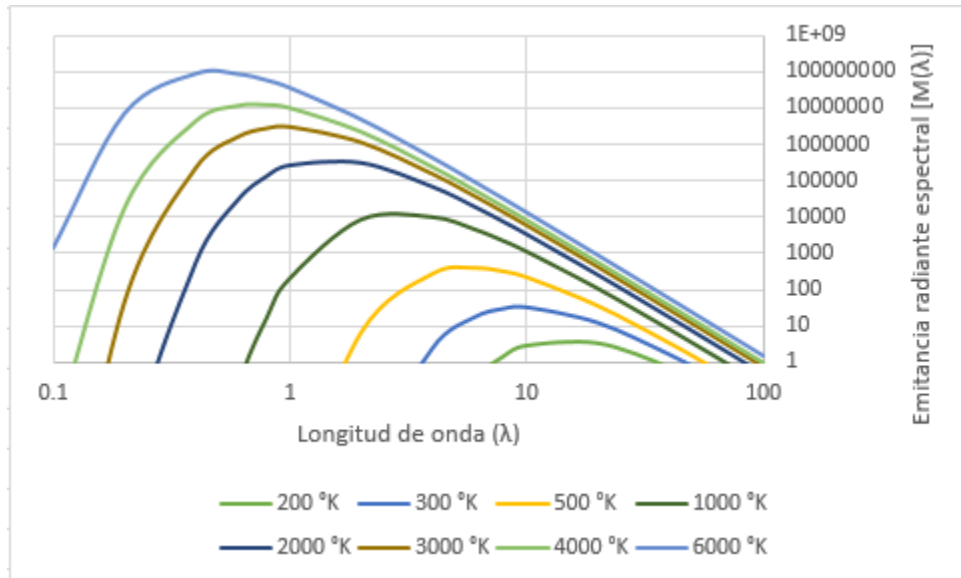


Figura 2.4 Emitancia radiante espectral a diferentes temperaturas (elaboración propia)

En el caso del Sol (una temperatura de 6000 °K aprox.) la máxima emitancia se encuentra en la longitud de onda con valor 0.48 μm (región del visible) y la superficie terrestre (una temperatura de 300 °K) tiene su máxima emitancia en 9.66 μm (región del infrarrojo térmico).

De la Ley de Planck se derivan la Ley de Desplazamiento de Wien y La Ley de Stefan-Boltzman.

La Ley de Desplazamiento de Wien permite conocer la longitud de onda que permite la máxima emitancia para una temperatura dada (Ecuación 2.5). Recordemos que a mayor longitud de onda es menor es la temperatura.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{a}{T} \quad (2.5)$$

Donde  $\lambda_{m\acute{a}x}$  es la longitud de onda máxima, a es una constante (2898 μmK) y T es la temperatura (°K)

La longitud máxima también se le conoce como predominante y nos ayuda en la elección de las bandas del sensor cuando conocemos la temperatura del objeto que estudiamos.

La energía total emitida por un cuerpo en espectro completo es proporcionada por la Ley de Stefan-Boltzman, la cual es la integración de la Ley de Planck sobre todas las longitudes de onda (Ecuación 2.6)

$$M = \sigma * T^4 \quad (2.6)$$

Donde M es la emitancia radiante de un objeto (Wm<sup>-2</sup>), σ es la constante de Stefan-Boltzman (5.6697x10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>) y T es la temperatura (°K)

Entonces un cuerpo al ganar temperatura emite más radiación. Esto tiene su importancia en el diseño de los sensores, ya que objetos con baja temperatura necesitarán mayores tiempos de exposición o menores resoluciones espaciales para trabajar de forma correcta.

## 2.2 Radiación y medio de transmisión (atmósfera)

La atmósfera terrestre es la parte gaseosa del planeta, esto la hace la sección menos densa y más externa, la composición de la atmósfera es causada por la manera que nuestro planeta se formó hace 4,600 millones de años, aunque los procesos de su formación no son totalmente entendidos se ha determinado que la atmósfera evolucionó de una forma primaria, compuesta en su mayoría de gases nobles, para después la condensación de estos y escape del planeta. Sin estos gases se formó una atmósfera secundaria con los gases que salían del interior del planeta, pasando así de una atmósfera sin oxígeno a una ya con este elemento (Ortega Martínez, 2009).

La atmósfera está compuesta por tres tipos de constituyentes gaseosos.

1. Gases permanentes: nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.9%) y gases nobles (0.9%).
2. Gases variables: todos los gases presentes en la atmósfera sin contar a los permanentes, algunos de ellos son, vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ozono ( $O_3$ ), gas metano ( $CH_4$ ).
3. Constituyentes no gaseosos: formados por aerosoles, como por ejemplo partículas volcánicas, polvos, humos.

En la PR un factor que interviene entre los flujos de radiación del Sol con la superficie terrestre y la misma superficie con los sensores es la atmósfera. En el espacio exterior no existe ninguna interferencia, sólo atenuación debida al recorrido del flujo de radiación. Ya dentro de la atmósfera terrestre los gases y aerosoles que la componen pueden absorber, dispersar o emitir la radiación.

Los gases que componen la atmósfera del planeta tienen la posibilidad de absorber radiación en diferentes longitudes de onda. El ozono ( $O_3$ ) absorbe radiación ultravioleta, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se encarga de absorber radiación del IR térmico (13  $\mu m$  al 17  $\mu m$ ) y el vapor de agua ( $H_2O$ ) absorbe radiación de la región VIS (0.6  $\mu m$  al 0.7  $\mu m$ ).

En la figura 2.5 se observa la transmisión atmosférica en función de su longitud de onda, en algunas regiones es totalmente opaca por la absorción, las regiones no afectadas por la absorción se les denomina **ventanas atmosféricas**, la PR sólo puede captar en estas ventanas.

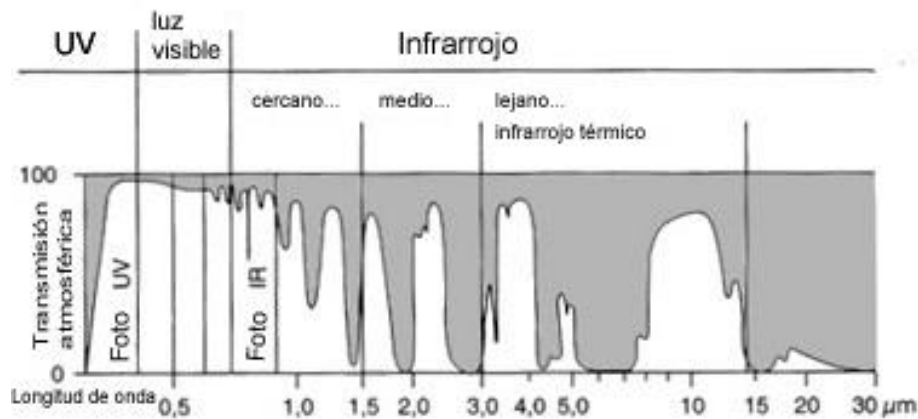


Figura 2.5 Transmisión atmosférica de la radiación solar en función de su longitud de onda (tomada de [www.academiatesto.com.ar](http://www.academiatesto.com.ar))

Un problema distinto es la aparición de partículas líquidas (nubes) o sólidas (polvo) que reflejan gran parte de la radiación solar que reciben, por ejemplo, las nubes al encontrarse en una posición superior ocultan la superficie terrestre y sus valores de radiación.

Otro detalle a considerar es que aún en las ventanas atmosféricas la transmisión nunca llegará a los valores de 100%, por esta razón la radiación que un sensor obtendrá siempre será un poco menor a la que sale del planeta.

La dispersión es el mecanismo por el cual la radiación es reflejada o refractada por gases u otros materiales que se encuentren en la atmósfera. La radiación directa (que no se dispersa) disminuye y la radiación difusa (que se dispersa por gases o aerosoles) aumenta. Existen tres tipos fundamentales de dispersión.

1. Dispersión de Rayleigh. Se presenta cuando la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de los objetos responsables de la dispersión, tiene afectaciones por tanto en las longitudes de onda más cortas y causa el color azul del cielo.
2. Dispersión de Mie. Cuando la longitud de onda es del mismo tamaño que los objetos dispersores se presenta este fenómeno, afecta todas las longitudes de onda del visible.
3. Dispersión no selectiva. Cuando la longitud de onda es mucho mayor que los objetos, es producido por las gotas de agua en la niebla o las nubes y les da su característico color blanco ya que dispersa toda la luz visible.

Cuando se trabaja con el IR térmico el objetivo es conocer la temperatura de la superficie terrestre, el problema es que no solo se reciben emisiones por parte del objeto, también se detecta información emitida por la atmósfera, es difícil de distinguir una de emisión de la otra pero con el avance tecnológico se pueden corregir estos errores.

### 2.3 Interacción con el objeto

La radiación electromagnética después de penetrar la atmósfera tiene contacto con la superficie terrestre, al incidir con los objetos la energía ( $E_i$ ) puede tomar tres posibles caminos, absorción ( $E_A$ ), reflexión ( $E_R$ ) o transmisión ( $E_T$ ) (Ecuación 2.7).

$$E_i = E_A + E_R + E_T \quad (2.7)$$

Entonces la energía recibida por un cuerpo puede ser devuelta a la atmósfera (reflexión), incrementar su propia energía (absorción) o pasarla a otro cuerpo (transmisión), logrando hacer las tres al mismo tiempo, esto depende del objeto en el que la energía incida.

La interacción de la radiación con la superficie terrestre dependerá de la longitud de onda y las características del cuerpo en estudio, en los cuerpos de agua la reflexión será muy baja en todas las longitudes de onda y en el suelo terrestre la transmisión será cercana a cero.

La reflexión dependerá de la superficie con la que tenga interacción, en la reflexión especular la energía incidente tendrá un ángulo igual al que refleje la superficie y en la reflexión difusa (o lambertiana) la energía incidente reflejará en todas las direcciones (Figura 2.6).

En realidad la mayoría de los cuerpos tienden a comportarse de manera intermedia en esta clasificación, aunque se asume que el comportamiento es difuso. En la región visible el único caso que puede manejarse como superficie especular es el agua en total calma.

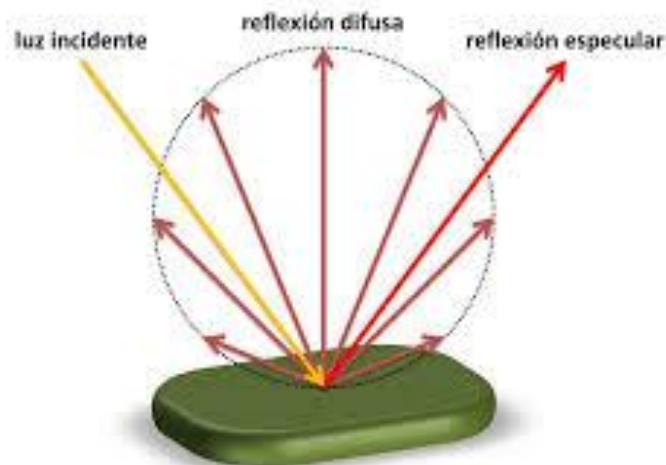


Figura 2.6 Reflexión especular y difusa (tomada de [guillermoabramson.blogspot.com](http://guillermoabramson.blogspot.com))

La dispersión atmosférica junto con el comportamiento difuso de la superficie tiene el efecto de producir una imagen borrosa de la superficie terrestre.

Cada material que se encuentre en la superficie terrestre reflejará la radiación que reciba de forma diferente, lo que nos permite diferenciarlo de los demás elementos. A partir de este fenómeno se han realizado pruebas de laboratorio para conocer la reflexión de distintas cubiertas en las diferentes longitudes de onda que manejan los sensores.

La PR se basa en la interacción que tiene el espectro electromagnético y la superficie terrestre, si se realiza una gráfica relacionando la cantidad de radiación reflejada por la superficie contra la longitud de onda se obtiene la **firma espectral** (Figura 2.7) de la superficie.

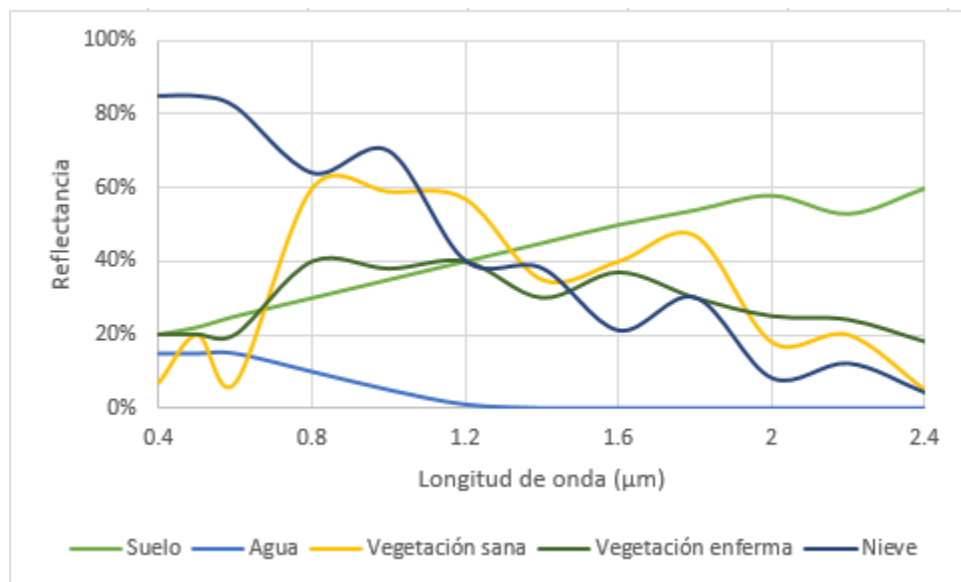


Figura 2.7 Firma espectral (basado de (Sepúlveda Hirose, 2011))

Al tener conocimiento de la firma espectral del objeto en estudio se puede clasificar de manera más sencilla los píxeles que corresponden a dicha superficie. Un ejemplo clásico de firma espectral es la vegetación, ésta tiene un pico de reflexión en el infrarrojo cercano, lo que permite diferenciarla de otras superficies.

También tenemos que reconocer que las diferentes superficies no presentan un comportamiento único y permanente que coincida de forma continua con una firma espectral y se puedan reconocer fácilmente. Cada superficie tiene factores que alteran su reflexión (ángulo de iluminación solar, topografía, ángulo de observación, atmósfera, etc.) que dificultan su discriminación.

El agua limpia tiene unas excelentes propiedades en cuanto a la transmisión de la radiación electromagnética es la región visible y absorción en el infrarrojo. Su reflexión tiene un pico en el

verde que se reduce al avanzar al infrarrojo. Ese detalle en el infrarrojo nos permite distinguir áreas de tierra y agua, aun cuando los cuerpos de agua sean pequeños, por ejemplo un río.

La profundidad a la que la luz penetra depende de su longitud de onda. En el agua limpia la longitud de onda de 0.5  $\mu\text{m}$  a 0.6  $\mu\text{m}$  puede penetrar hasta 10 m y solo 10 cm en una longitud de onda de 0.8  $\mu\text{m}$  a 1.1  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, al tener una mayor profundidad en el agua la longitud de onda desciende.

Si el agua contiene turbidez sus consecuencias sobre su respuesta espectral dependerán del tipo de turbidez. Si es fitoplancton el espectro visible tiende a cambiar (el verde aumenta y el azul disminuye). Si se trata de sedimentos inorgánicos la reflexión aumenta, en el rojo especialmente.

En la nieve la reflexión es totalmente distinta a la del agua, es alta en todas las longitudes de onda, en especial la nieve fresca. Es posible confundir la nieve con las nubes altas (entendiendo que las nubes altas están compuestas por partículas de hielo) con la diferencia que la nieve tiende a cero para longitudes de onda mayores de 2.4  $\mu\text{m}$  mientras que las nubes siguen siendo altas.

La vegetación sana tiene una baja reflexión en el espectro visible aunque un pico en el verde debido a la clorofila. En el infrarrojo cercano la reflexión es muy alta debido a la escasa absorción de energía por parte de la vegetación en esta banda. En el infrarrojo medio la curva disminuye en aquellas longitudes de onda donde la vegetación contiene agua y ésta absorbe la energía.

En el caso de la vegetación enferma disminuye en el infrarrojo y aumenta en el azul y el rojo. Se observa que el contenido de agua de la planta afecta en la reflexión, aumentando la absorción de radiación en el infrarrojo cercano por parte del agua contenida en la vegetación.

Las propiedades espectrales del suelo son más simples que los casos anteriores, la transmisión es nula, por tanto toda la energía se refleja o se absorbe. Es relativamente baja la reflexión para todas las bandas aunque tiende a aumentar hacia el infrarrojo. También tiene incidencia el contenido de agua como en la vegetación.

Uno de los factores que afectan la respuesta espectral en el suelo es la textura que tiene, ya que obtiene mayor reflexión si aumenta el tamaño de las partículas que lo conforman. Los suelos arenosos tienen mayor reflexión que los suelos arcillosos. La condición problemática de esto es que la textura también cambia el contenido de humedad y no resulta fácil diferenciar estos dos fenómenos en las imágenes satelitales. Los minerales que no contienen arcillas tienen una caída en su reflexión cerca del 2.2  $\mu\text{m}$  en comparación de las que si tienen.

El contenido de materia orgánica también afecta la reflexión, en mayor cantidad y menor nivel de descomposición el suelo refleja menor cantidad de radiación. Su composición química y mineralógica afecta igualmente, un ejemplo son los óxidos de hierro, que incrementan la reflexión en el rojo.

Al conocer lo variado que puede ser suelo se nos imposibilita su precisión de la respuesta espectral del suelo, para obtener conclusiones claras se recurre al suelo desnudo, en una imagen de él tiene una pauta similar y reconocible. En el infrarrojo cercano y en el rojo al unirse sobre el suelo desnudo se forma una línea que se conoce como línea del suelo.



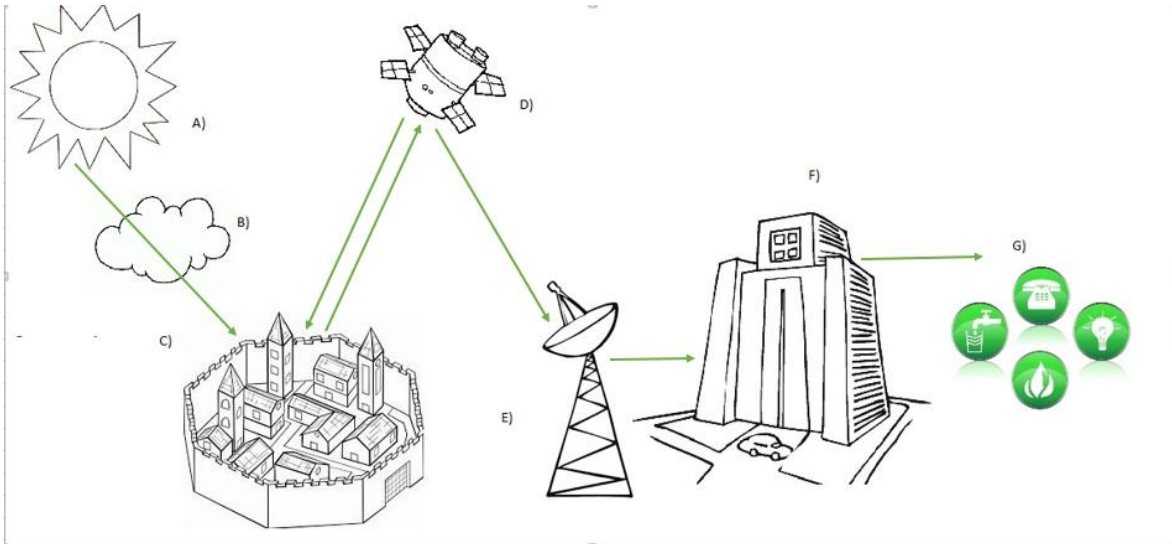
### Capítulo 3. Fundamentos de la percepción remota

La Percepción Remota (PR) o Teledetección puede definirse como la ciencia o arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto (Comisión Nacional del Agua, 2005).

La PR permite elaborar altos contenidos de información de la cubierta terrestre que sirven de apoyo a distintas áreas de la ciencia con conocimientos más avanzados.

El proceso de la PR es una interacción entre la radiación electromagnética y los objetos de interés. Los elementos que intervienen (Figura 3.1) son:

- A. Fuente de radiación electromagnética: La energía electromagnética es el transmisor de la información entre el objeto de estudio y el sensor seleccionado. El Sol es la principal fuente de energía en la PR.
- B. Radiación y medio de transmisión (atmósfera): En la PR un factor que interviene entre los flujos de radiación del Sol con la superficie terrestre y la misma superficie con los sensores es la atmósfera.
- C. Interacción con el objeto: La radiación electromagnética después de penetrar la atmósfera tiene contacto con la superficie terrestre, al incidir con los objetos la energía puede tomar tres posibles caminos, absorción, reflexión o transmisión.
- D. Detección en el sensor: La radiación reflejada o emitida por el objeto tiene que ser captada por un instrumento, este será el sensor.
- E. Transmisión, recepción y procesamiento: Los datos obtenidos por el sensor son enviados a una estación de recepción y procesamiento, donde la información se convierte en imágenes digitales. Es usual que las imágenes reciban un procesamiento.
- F. Interpretación y análisis: La interpretación de las imágenes es el interés del trabajo, cuando se trabaja en forma digital existe la posibilidad infinita de procesamientos en la imagen.
- G. Aplicación: Los sensores son fabricados con un objetivo determinado, cada plataforma satelital tiene una búsqueda de información distinta.



**Figura 3.1 Elementos que intervienen en la percepción remota (basado en (Arbelo, 2015))**

Los elementos mencionados nos dan razones de la complejidad de la percepción remota ya que tienden por modificar las características de los diferentes tipos de cobertura.

La gran ventaja de usar la percepción remota es el uso de las computadoras, con ellas se logran tratamientos digitales que logran imágenes con información muy estrecha con la realidad.

### 3.1 Detección en el sensor

La radiación reflejada o emitida por el objeto tiene que ser captada por un instrumento, éste será el sensor.

Los sensores remotos nos permiten obtener información de los objetos estudiados sin tener contacto físico, los datos obtenidos tienen una exactitud muy cercana a la realidad, por esta razón su aplicación en la observación de los recursos naturales es de gran apoyo. El costo razonable de algunos programas y una alta precisión favorecen su uso.

Se puede obtener información de las diferentes regiones del espectro electromagnético donde exista una ventana atmosférica, a cada región se le denomina banda o canal del sensor.

Los sensores se pueden dividir en activos y pasivos.

Los sensores activos generan una señal, que refleja con el objeto y se miden las características de la señal rebotada. Un ejemplo de este tipo es el Radar.

Los sensores activos deben ser capaces de iluminar los objetos con su propia fuente de radiación, con esta iluminación se logra que ese objeto emita radiación o refleje la radiación inducida por el sensor. Son utilizados frecuentemente cuando la radiación natural en una banda del sensor no es

suficiente para iluminar el objeto, esto es, la radiación natural ilumina por debajo del umbral de la señal del ruido.

El radar funciona en una banda que se encuentra entre 1mm y 1m. Su principio se basa en que las microondas artificiales enviadas en una dirección chocan con los objetos y son dispersadas. La energía dispersada se recibe, amplifica y se analiza para conocer la ubicación y propiedades del objeto. Debido a su capacidad para trabajar en cualquier condición atmosférica su uso se ha extendido bastante, especialmente en zonas con cubierta nubosa persistente.

Los sensores pasivos tienen mayor valor en las aplicaciones de la PR en el estudio de recursos naturales. Estos trabajan con las señales emitidas de forma natural y que se reflejan en los objetos, así que la radiación solar ayuda a obtener información muy valiosa de los objetos percibidos.

Dentro de esta clasificación se encuentran los sensores fotográficos, los óptico-electrónicos que son una combinación de una óptica similar a la fotográfica y un sistema de detección electrónica (detectores de barrido y empuje), espectrómetros de imagen y de antena (radiómetros de microondas).

En sistemas óptico-electrónicos la radiación recibida por los instrumentos ópticos se descompone en varias longitudes de onda, se envía sensores sensibles en cada región del espectro que amplifican y convierten en señales electrónicas y para terminar en valor numérico conocido como **Nivel Digital** (ND). Estos valores son reconvertidos a niveles de radiación conociendo los coeficientes de calibrado. Los sistemas óptico-electrónicos pueden dividirse en dos grupos: los radiómetros de barrido y los radiómetros de empuje.

Los radiómetros de barrido son los más comunes en la percepción remota. Disponen de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria explorando una franja de terreno a ambos lados de ésta. Cada movimiento del espejo supone que se envíe información de una franja distinta al conjunto de sensores.

Los radiómetros de empuje ya no trabajan con espejo oscilante, en vez de esto disponen de una cadena con un gran número de detectores de manera que cubre todo el campo visual del sensor. Ello permite que aumente la resolución espacial y minimiza los errores geométricos porque ya no hay parte móvil del detector de barrido. Como desventaja del radiómetro de empuje se puede mencionar la compleja calibración de todos los sensores en el mismo momento para que trabajen de una forma similar.

Los espectrómetros de imagen son una nueva generación de instrumentos cuyo objetivo es obtener imágenes en un gran número de bandas espectrales (de 64 y 200 bandas a intervalos de 10-20 mm) obteniendo un espectro casi continuo de radiación.

Los radiómetros de microondas contienen una antena que actúa como elemento receptor y amplificador de las señales de microondas que son muy débiles y un detector. En sistemas como este la resolución espacial es inversamente proporcional al diámetro de la antena y directamente proporcional a la longitud de onda.

Los sensores necesitan un dispositivo donde sustentar físicamente su equipo de trabajo, a este dispositivo se le conoce como plataforma, por ejemplo, el sensor ETM+ se encuentra en la plataforma del LANDSAT 7, sensor y plataforma no es lo mismo pero trabajan en conjunto.

Las plataformas tienen clasificaciones, la altura con respecto a la superficie terrestre o la trayectoria en el espacio. De acuerdo a la distancia entre la superficie y el satélite las órbitas se dividen en cuatro grupos (Figura 3.2), órbitas bajas (LEO), órbitas medias (MEO) órbitas elípticas (HEO) y órbitas geoestacionarias (GEO).

Las órbitas LEO tienen una altura aproximada de 800 Km pero pueden llegar hasta los 1,500 Km, su velocidad les permite dar una vuelta completa al planeta en 90 minutos, su mayor uso se encuentra en la telefonía por satélite. En esta clasificación se encuentran los satélites LANDSAT, SPOT, IKONOS entre otros.

Las órbitas MEO se encuentran entre los 12,000 y los 15,000 Km de altura aproximadamente, los satélites de esta clasificación son utilizados para la geolocalización de objetos, la televisión y la telefonía.

Las órbitas HEO no manejan una trayectoria polar como las LEO y MEO, la trayectoria es elíptica, así que su distancia con respecto al planeta cambia con su desplazamiento, una de las utilidades de los satélites con una órbita HEO es la cartografía.

Las órbitas GEO son las más alejadas del planeta, la distancia mínima entre la superficie y el satélite es de 36,000 Km, tienen una velocidad de traslación igual a la velocidad de rotación del planeta, esta característica nos hace ver al satélite GEO siempre en el mismo lugar. La meteorología es uno de sus principales usos, ejemplos de satélites GEO son el METEOSAT y el GOES.

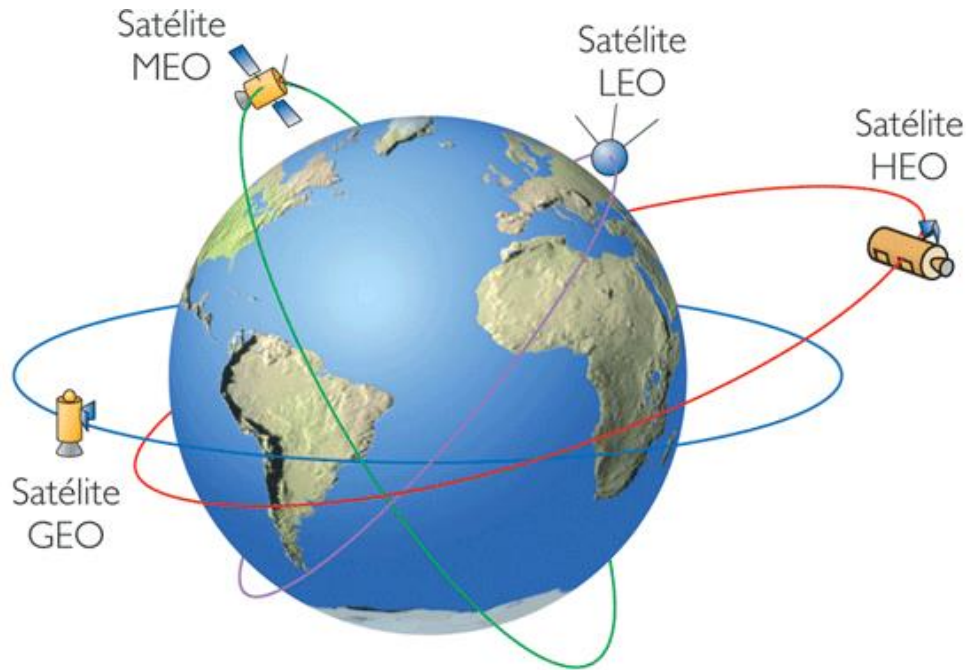


Figura 3.2 Clasificación por altura de los satélites (tomado de [elfisicoloco.blogspot.com](http://elfisicoloco.blogspot.com))

La aplicación de las plataformas también puede ser clasificada, los satélites pueden ser para exploración, comunicaciones, navegación, observación, etc.

Dos grandes aplicaciones en la observación son los recursos naturales y la meteorología. En los recursos naturales existen satélites como LANDSAT, SPOT, IKONOS e QUICKBIRD, para fines meteorológicos se encuentran disponibles los satélites METEOSAT, ERS y NOAA (Tabla 3.1).

Satélite	Sensores	Órbita	Aplicación
<b>LANDSAT 8</b>	OLI y TIRS	LEO	Recursos Naturales
<b>LANDSAT 7</b>	ETM+	LEO	Recursos Naturales
<b>SPOT 7</b>	NAOMI	LEO	Recursos Naturales
<b>SPOT 5</b>	HRG y HRS	LEO	Recursos Naturales
<b>IKONOS 2</b>	IKONOS	LEO	Recursos Naturales
<b>OCEANSAT 2</b>	OCM, SCAT, ROSA	LEO	Recursos Naturales
<b>QUICKBIRD 2</b>	QUICKBIRD	LEO	Recursos Naturales
<b>GEOEYE 1</b>	GEOEYE	LEO	Recursos Naturales
<b>NOAA 19</b>	AVHRR/3, HIRS/4	LEO	Meteorología
<b>NOAA 15</b>	AVHRR, HIRS	LEO	Meteorología
<b>METEOSAT 10</b>	SEVIRI	GEO	Meteorología
<b>ERS 2</b>	SAR, ATRS, GOME	LEO	Meteorología

Tabla 3.1 Información de los satélites

Los sensores se encuentran con un fenómeno continuo de cuatro dimensiones: espacio, tiempo, longitud de onda y radiación. La resolución de un sensor se define en la habilidad de discretizar la información.

Existen cuatro tipos de resolución que utiliza un sensor: espacial (tamaño de pixel), espectral (numero y anchura de las regiones en el espectro electromagnético), radiométrica (número de intervalos de intensidad que pueden captarse), temporal (tiempo que transcurre entre dos imágenes del mismo objeto)

La **resolución espacial** se refiere al mínimo objeto que puede ser diferenciado sobre la imagen del satélite, se mide en unidades de longitud, depende de la altura del sensor sobre la superficie y de la longitud focal del sensor.

Esta mínima distancia que mencionamos en una imagen satelital es atribuida a un píxel, en la resolución espacial es la medida generalizada.

En algunos casos se emplea el concepto de IFOV (Campo instantáneo de visión) que se define como la sección angular (en radianes) observada en un momento determinado. La relación entre pixel e IFOV se maneja con la Ecuación 3.1.

$$d = 2H * \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) \quad (3.1)$$

Al día de hoy existe un amplio rango de resoluciones espaciales en los satélites disponibles. METEOSAT tiene una resolución de 5,000 metros debido a que tiene cobertura global de la superficie terrestre, los satélites NOAA tienen una resolución de 500 a 1,100 metros, el programa LANDSAT tiene resoluciones de 30 metros y el sensor IKONOS 1.1 metros.

La **resolución espectral** nos indica el número y anchura de las bandas espectrales con que puede discretizar un sensor, en los sensores espaciales el que tiene una menor resolución espectral es un sistema fotográfico o el mismo radar, por el contrario se cuenta con mayor resolución en un sistema óptico - electrónico.

En un inicio cuantas más bandas incluya un sensor es mejor, las bandas constituye una variable para caracterizar la superficie captada. También se aconseja que las bandas tengan el menor ancho para tener un mayor poder discriminante, si no son tan estrechas los valores captados por la banda pueden ser promediados y no será fácil la diferencia en la imagen.

La decisión de usar un número, localización y su ancho de banda depende de qué tipo de estudio se realice. El LANDSAT 7 tiene 8 bandas mientras el SPOT 5 maneja 5 bandas, aun cuando ambos observan los recursos naturales tienen diferentes aplicación.

Banda	Rango espectral (μm)	Resolución (m)	Características y aplicaciones
TM1	0.45-0.52 Visible azul	30	Batimetría de aguas de menor turbidez, diferencia suelo y vegetación, diferencia de árboles caducifolios y coníferas, tipos de suelos.
TM2	0.52-0.60 Visible verde	30	Indicador de tasa de crecimiento y vigor de vegetación, estimación de la concentración de sedimentación, batimetría de agua turbia.
TM3	0.63-0.69 Visible rojo	30	Absorción de clorofila y diferenciación de especies, clasificación de copas, cobertura de vegetación y densidad y aplicaciones geológicas.
TM4	0.76-0.90 Infrarrojo solar cercano	30	Delineación de cuerpos de agua, variaciones de biomasa y estrés.
TM5	1.55-1.75 Infrarrojo solar medio	30	Humedad, estrés de vegetación y minerales.
TM6	10.40-12.50 Infrarrojo térmico emitido	120	Temperatura de superficie aparente, separación urbana y uso de suelo, distinción de áreas quemadas con respecto a los cuerpos de agua.
TM7	2.08-2.35 Infrarrojo solar	30	Zonas hidrotérmicamente alteradas, exploración minera, discriminación de tipos de suelo.
TM8	0.50-0.90 Pancromático	15	Catastro rural, ubicación de centros poblados.

Tabla 3.2 Bandas y aplicaciones del LANDSAT 7 (ETM+)

Banda	Rango espectral (μm)	Resolución (m)	Características y aplicaciones
B1	0.58-0.68 Visible	1,100	Nubes diurnas, cartografía de la superficie
B2	0.72-1.00 Rojo e Infrarrojo cercano	1,100	Delimitación de la superficie de las aguas superficiales, hielos y fusión de nieve.
B3	3.55-3.93 Infrarrojo medio	1,100	Temperatura de la superficie del mar, cartografía de las nubes por la noche.
B4	10.30-11.30 Infrarrojo medio	1,100	Temperatura de la superficie del mar, cartografía de las nubes por la noche.
B5	11.50-12.50 Infrarrojo medio	1,100	Temperatura de la superficie del mar, cartografía de las nubes por la noche.

Tabla 3.3 Bandas y aplicaciones del NOAA 15 (AVHRR)

La **resolución radiométrica** es la capacidad de detectar variaciones de radiación que recibe el sensor, en sistemas óptico-electrónicos, la imagen se encuentra en un formato digital, así que se relaciona esta resolución con el número máximo de niveles digitales de la imagen.

El LANDSAT 7 tiene 8 bits de almacenamiento para cada pixel, lo que nos da  $2^8 = 256$  niveles de energía (ND) que pueden ser captados. El último lanzamiento del programa, el LANDSAT 8 tiene 16 bits, eso nos entrega  $2^{16} = 65,536$  ND, 256 veces más que su antecesor. Cuanto mayor sea la resolución radiométrica mayor número de detalles podrán notarse en la imagen satelital.

La **resolución temporal** indica el tiempo que transcurre ente cada imagen del satélite del mismo punto de la superficie terrestre.

Los satélites geoestacionarios tienen resolución temporal muy corta (cerca al cero) mientras tanto los satélites que manejan otro tipo de órbita tienen diferentes resoluciones temporales.

Este segundo tipo de satélites se desplazan en órbitas circulares y polares (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que aprovechan el movimiento de rotación del planeta. La importancia de estos satélites en la PR es pasar por la misma hora local en cada punto de la Tierra. Las órbitas de este satélite solo son posibles en alturas que comprenden desde 300 a 1,500 Km (órbitas LEO).

Satélite	Sensores	Espacial (m)	Espectral (bandas)	Radiométrica (bits)	Temporal (días)
<b>LANDSAT 8</b>	OLI y TIRS	15.0, 30.0, 100.0	11	16	16.0
<b>LANDSAT 7</b>	ETM+	15.0, 30.0, 60.0	8	8	16.0
<b>SPOT 7</b>	NAOMI	2.2, 8.8	5	12	1.0-5.0
<b>SPOT 5</b>	HRG y HRS	5.0, 10.0, 20.0	5	8	2.0-26.0
<b>IKONOS 2</b>	IKONOS	1.0, 4.0	5	11	3.0-5.0
<b>OCEANSAT 2</b>	OCM, SCAT, ROSA	360.0	8	12	2.0
<b>QUICKBIRD 2</b>	QUICKBIRD	0.6, 2.4	5	11	1.0-5.0
<b>GEOEYE 1</b>	GEOEYE	0.41, 1.65	5	11	2.1-8.5
<b>NOAA 19</b>	AVHRR/3, HIRS/4	1100.0	5	10	0.5
<b>NOAA 15</b>	AVHRR, HIRS	1100.0	5	10	0.5
<b>METEOSAT 10</b>	SEVIRI	2,500.0 5,000.0	3	8	0.1
<b>ERS 2</b>	SAR, ATRS, GOME	25.0, 320.0, 1000.0	9	16	3.0-35.0

Tabla 3.4 Satélites y resoluciones



Usualmente a mayor resolución espacial disminuye la temporal y la espectral. El problema es que cada aumento de resolución causa un mayor número de información que el sensor debe procesar y enviar.

El diseño de sensores se hace teniendo en cuenta estas consideraciones, se trabajará en ventanas atmosféricas y se combinarán aquellas regiones del espectro electromagnético que den la información necesaria de cada estudio por realizar.

### 3.2 Transmisión, recepción y procesamiento

Una imagen satelital es una matriz digital de puntos que es captada por un sensor que se encuentra montado en una plataforma satelital. A medida que el satélite se mueve en su órbita, el sensor barre la superficie captando la energía reflejada.

El número de bandas, las regiones del espectro electromagnético, la resolución espacial y el tamaño de la imagen hacen muy variados los resultados que da cada satélite.

Una imagen satelital se encuentra en un formato raster, el cual es una matriz de miles de píxeles donde cada píxel tiene un valor Nivel Digital (ND). La información de cada píxel está en formato digital, regularmente 8 bits ( $2^8=256$ ) que se encuentra en escala de grises, siendo 0 el color negro y 255 el color blanco (Figura 3.3).

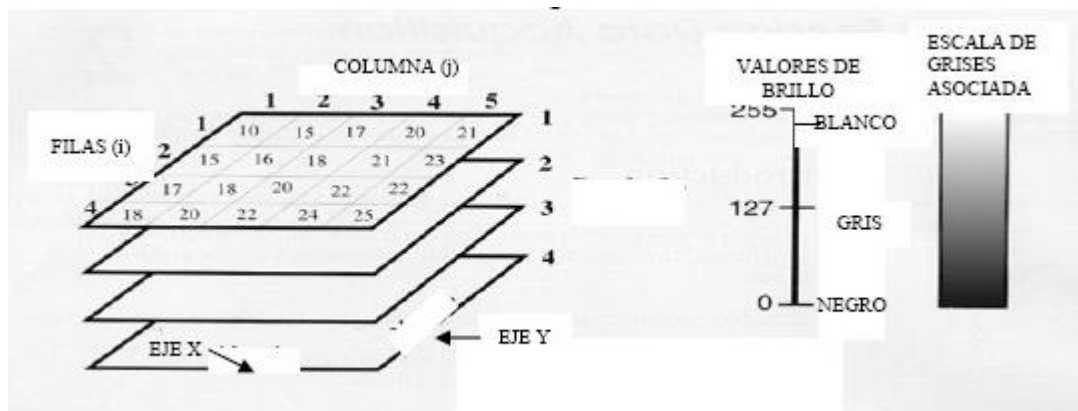


Figura 3.3 Nivel Digital (ND)

Las imágenes se pueden clasificar en pancromáticas y multiespectrales.

Una imagen pancromática es captada por un sensor digital que ofrece la medición de la reflexión de energía en una amplia región del espectro electromagnético (las porciones de este espectro son llamadas bandas). Los sensores pancromáticos más sofisticados de esta única banda pueden abarcar la parte visible y el infrarrojo cercano.

Las imágenes multispectrales se generan mediante un sensor que mide con muchas bandas la reflexión de energía de la superficie terrestre, así grupo de detectores puede medir el infrarrojo cercano mientras otro grupo hace lo mismo en el visible.

Se ha dividido el análisis de imágenes satelitales en dos etapas, un análisis visual y un análisis digital. El primero es similar a la fotointerpretación clásica, con la ventaja que en digital se pueden retocar y realzar las imágenes.

En el análisis visual se necesita tener el conocimiento del área que se pretende estudiar, la información previa está guiada por el tipo de análisis que se desee realizar, ya que un análisis del uso del suelo no se trabajará igual a uno correspondiente a la caracterización geológica del lugar de estudio.

El conocimiento previo del área de estudio puede ser realizado en una visita de campo, que es la forma correcta de obtener los datos necesarios, aunque hay que decir también que existen otras maneras de obtener datos del lugar como el GPS (Sistema de Posición Global), cartografía del sitio de estudio o la fotografía aérea.

El análisis visual es una actividad muy compleja, por lo mismo se aconseja dividirla en fases, estas pueden ser: 1) detección, reconocimiento e identificación, 2) análisis, 3) clasificación, 4) deducción.

Detección, reconocimiento e identificación: El inicio del proceso consiste en detectar que existe un objeto para estudiar, se reconoce este objeto según su forma, color o alguna otra característica y se le identifica con algo conocido por un nombre o término.

Análisis: El análisis debe ser realizado con un fin de estudio (cobertura vegetal, formas del relieve, crecimiento poblacional). Una parte del análisis consiste en dividir la imagen en unidades, separando cada unidad por contornos de manera sistemática.

Clasificación: Comparamos las unidades entre sí para clasificarlas, se asignará un nombre a cada grupo de unidades que sean semejantes. Si los objetos de estudio no son visibles se deberá realizar trabajo de campo adicional.

Deducción: En esta fase debemos relacionar las observaciones de las imágenes con la información previa obtenida por otras fuentes, esta relación nos hará tener nuestras conclusiones sobre la imagen y la información que queremos obtener.

Para obtener resultados correctos se debe utilizar un método sistemático, existen al menos cuatro reglas que pueden ser utilizadas para el procedimiento general.

1. El análisis debe trabajarse en forma metódica, con procesos sucesivos que dependerán del tema de estudio.

2. La interpretación debe ser de lo general a lo específico, los datos generales siempre van primero que los detalles de la imagen (existen algunos casos que debe trabajarse al revés)
3. Se debe ir de los datos conocidos a lo desconocido, siguiendo las fases del apartado anterior.
4. La imagen que se estudia debe ser analizada por sus propias cualidades, esto aplica a las primeras dos fases del apartado anterior, sin embargo para una clasificación final no se puede seguir esta regla ya que necesitamos información que no se encuentra en la imagen de estudio.

Las técnicas de análisis visual que se explicarán en este subcapítulo sólo cambian la paleta de color sin afectar las matrices de datos.

El análisis digital también se puede hacer en etapas: Preprocesamiento, mejora y transformación de la imagen, clasificación y postclasificación.

#### Preprocesamiento

Una imagen de satélite se encuentra afectada por una serie de interferencias que nos hace obtener información con errores, el preprocesamiento resuelve las siguientes acciones.

1. Fallos en los sensores que generan píxeles incorrectos (corrección radiométrica)
2. Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación de los sensores, esto genera distorsiones en la imagen global (corrección geométrica)
3. Interferencia de la atmósfera donde se altera de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica)

La **corrección radiométrica** puede ser la corrección más sencilla. Algunas estaciones receptoras llevan algún tipo de corrección en el momento de recibir la imagen. La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por la otra corrección del bandeo de la imagen.

Píxeles o líneas perdidas: Si se ha perdido el valor de algún píxel se soluciona simplemente estimándolo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anteriores y posteriores, no se hace con los píxeles contiguos de la misma línea porque fueron captados por el mismo detector que presenta el fallo (Ecuación 3.2).

$$ND_{i,j} = \text{round} \left( \frac{ND_{i-1,j} + ND_{i+1,j}}{2} \right) \quad (3.2)$$

Donde round indica cuál es el redondeo al número entero más cercano.

No se debe olvidar que las diferentes bandas de una imagen tienen una correlación en demasía y los detectores de las bandas no son los mismos. Esta razón hace que se utilice el valor del pixel faltante en una banda diferente para mejorar la estimación (Ecuación 3.3).

$$ND_{i,j,k} = \text{round} \left( \left( \frac{sk}{sr} \right) (ND_{i,j,r} - \frac{ND_{i+1,j,r} - ND_{i-1,j,k}}{2} + \frac{ND_{i-1,j,r} + ND_{i+1,j,k}}{2}) \right) \quad (3.3)$$

Si la imagen abarca un territorio amplio y con cambios se recomienda calcular los coeficientes de correlación y las desviaciones estándar  $sk$  y  $sr$  en el entorno cercano al pixel.

Si el caso es detectar líneas perdidas se compara la media de los ND de una línea con las medias de las líneas anterior y posterior, para encontrar pixeles perdidos se compara el valor de éste con sus 8 pixeles vecinos mediante un procedimiento de filtrado.

**Bandeado:** El fenómeno del bandeo se produce por la mala calibración de los detectores, resulta muy obvio en las zonas de baja radiación. El resultado del fenómeno es la aparición cíclica de una banda más clara u oscura que las demás.

Para corregir el bandeo se idealiza que los histogramas obtenidos por cada detector serán similares entre sí y el histograma global es una referencia.

Se inicia calculando los coeficientes  $bk$  (Ecuación 3.4) y  $ak$  (Ecuación 3.5) para una corrección lineal de cada detector.

$$bk = \frac{s}{sk} \quad (3.4)$$

$$ak = m - bk * mk \quad (3.5)$$

Donde  $m$  y  $s$  son la media y la desviación típica del conjunto de pixeles y  $mk$  y  $sk$  la media y la desviación típica de los pixeles obtenidos por el detector  $k$ .

Ahora los ND de la imagen se vuelven a calcular (Ecuación 3.6).

$$ND'_{i,j} = ak + bk * ND_{i,j} \quad (3.6)$$

Suponiendo que la línea  $i$  ha sido captada por el detector  $k$ .

Una imagen satelital no ofrece información georreferenciada, cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario que son de tipo fila-columna.

La **corrección geométrica** es aquel que a cada pixel se le relaciona con un sistema de coordenadas estándar (UTM, coordenadas geográficas, etc.) para poder combinar la imagen con otro tipo de

capas en el entorno SIG. Después de este procedimiento tenemos una nueva capa donde cada columna corresponde a un valor en longitud y cada fila un valor de latitud.

Las correcciones que se realizan para transformar cada punto de la imagen de coordenadas arbitrarias en coordenadas reales se explican con un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel para (f,c) un par (X,Y) (Ecuaciones 3.7 y 3.8).

$$X = f_1(f, c)(3.7)$$

$$Y = f_2(f, c)(3.8)$$

Existen dos métodos para realizar la corrección. El primero es la corrección orbital, se modelan las fuentes de error y su influencia, lo que hace necesario tener el mayor conocimiento de las características de la órbita del satélite y del sensor. El segundo se denomina puntos de control, en este método se hace un modelo con las distribuciones de los errores en las imágenes.

La corrección orbital es automática si se conoce la información necesaria y las ecuaciones de transformación, aunque si llegan a aparecer errores aleatorios el método falla. Los puntos de control es un método más simple y corrige los errores aleatorios pero es mayor trabajo realizarlo y no deja de ser un procedimiento de regresión.

Para empezar un método se deben elegir las ecuaciones que se utilizarán, en varios casos se trabaja con ecuaciones polinómicas que modifican de forma flexible las coordenadas de la imagen. El orden del polinomio determinará la flexibilidad del ajuste y de la transformación.

Se pueden emplear normalmente transformaciones de los siguientes tipos. Utilizando las Ecuaciones 3.7 y 3.8

Lineal

$$X = Ac + Bf + C \quad (3.9)$$

$$Y = Dc + Ef + F \quad (3.10)$$

Cuadrática

$$X = Ac + Bf + Cc^2 + Df^2 + Ecf + F \quad (3.11)$$

$$Y = Gc + Hf + Ic^2 + Jc^2 + Kcf + L \quad (3.12)$$

Se debe determinar qué tipo de transformación cumple en función del tipo de distorsiones que se presentarán en la imagen y de la cantidad y calidad de los puntos de control. Entre mayor sea el grado del polinomio más sensible será la transformación de errores en la selección de los puntos de control.

Empleando el procedimiento de los mínimos cuadrados se pueden encontrar los valores de los coeficientes en las fórmulas de transformación a partir de las coordenadas de un conjunto de puntos de control.

Los puntos de control son las coordenadas reales de las que tenemos información (fila y columna), una regla general es que los puntos de control conocidos deben ser mayores al número de parámetros que se intentan calcular, 6 en transformación lineal, 12 en la transformación cuadrática y 24 en la transformación cúbica.

La transformación lineal es la más sencilla, aquí se asume que no existe distorsión en la imagen y sólo requiere una traslación (coeficientes A y E), cambio de escala (coeficientes B y H) y rotación de la imagen (coeficientes D y G).

Si el origen de las coordenadas de la imagen original es  $c=0$ ,  $f=0$ , entonces.

- A= valor de X en el punto en el que  $c=0$
- E= valor de Y en el punto en el que  $f=0$

Si no se tiene la necesidad de rotar la imagen original los coeficientes B y H son factores de escala (Ecuación 3.12 y 3.13).

$$B = \frac{(\max(X) - \min(X))}{\max(c) - \min(c)} \quad (3.12)$$

$$H = \frac{(\max(Y) - \min(Y))}{\max(f) - \min(f)} \quad (3.13)$$

Y los coeficientes  $D=0$ ,  $G=0$ .

En el caso donde sí se tenga que rotar la imagen original, los valores de los coeficientes B, H, D y G determinan el tipo de rotación.

La **corrección atmosférica** evalúa y elimina la distorsión que los valores de radiación llegan por la atmósfera al sensor desde la superficie terrestre.

Por esta razón se utilizan métodos más complejos que en los otros tipos de correcciones. El primer punto es convertir los ND que se encuentran en cada sensor a valores de radiación.

Una imagen satelital tiene valores numéricos denominados Niveles Digitales (ND) como ya se ha mencionado anteriormente, el satélite obtiene estos valores mediante una ecuación de orden uno (lineal) para recuperar estos valores de radiación se debe aplicar la inversa de esta ecuación lineal (Ecuación 3.14).

$$L_{sen,k} = a0_k + a1_k ND_k \quad (3.14)$$

El término k son las bandas que tiene el sensor,  $L_{sen,k}$  es la radiación que recibió el sensor y ND es el nivel digital.

Aun así, la radiación que recibe el sensor no toda proviene de la superficie terrestre (Ecuación 4.15). La atmósfera absorbe parte de ella (reducción) pero también se le suma la propia radiación de la atmósfera (incrementa).

$$L_{sen,k} = L_{sue,k\tau k,a} + L_{a,k} \quad (3.15)$$

En otras palabras la radiación que llega al sensor de parte de la superficie terrestre se debe multiplicar por la transmisibilidad de la atmósfera en camino ascendente más la radiación atmosférica.

La corrección atmosférica es necesaria cuando se requiera:

1. Calcular determinados índices entre bandas cuyos ND sean afectados por la atmósfera.
2. Calcular variables deducibles directamente de la radiación mediante modelos de tipo físico.
3. Estudios temporales, ya que la distorsión cambia de un día para otro.

La complejidad de este método proviene en la necesidad de tener datos de la atmósfera el día que es captada la imagen.

El primer paso para esta corrección es encontrar  $L_{a,k}$ . Esta variable decrece al aumentar la longitud de onda. Existen dos métodos relativamente sencillos.

Mínimo del histograma: Se localizan en la imagen las áreas donde la reflexión tiende a ser cero en el infrarrojo, como lo son las superficies de agua limpia y profunda. Si se representa el histograma perteneciente a esta banda, los valores mínimos aparecerán próximos a 0, este límite aumentará mientras la longitud de onda decrece.

Estos valores mínimos para las diferentes bandas (k) tienen una aproximación bastante buena para encontrar los valores de  $L_{a,k}$  y por lo mismo se restan a los valores iniciales para obtener una mejor estimación de  $L_{senk}$ .

Regresión: Se hace un análisis de regresión de  $TM_1$ ,  $TM_2$ ,  $TM_3$  respecto a  $TM_4$  para la obtención de los parámetros buscados (Ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18).

$$TM_1 = a_1 TM_4 + b_1 \quad (3.16)$$

$$TM_2 = a_2 TM_4 + b_2 \quad (3.17)$$

$$TM_3 = a_3 TM_4 + b_3 \quad (3.18)$$

Y utilizando  $b_k$  como la estimación de  $L_{a,k}$ .

Ahora, los valores de transmisibilidad se obtienen de la siguiente Ecuación (3.19).

$$\tau_{k,a} = e^{-\frac{\tau_k}{\cos\theta_0}} \quad (3.19)$$

Donde  $\theta_0$  es el ángulo de observación y  $\tau_k$  son valores de cada banda del sensor.

### Mejoras y transformación de la imagen

Las mejoras se aplican para optimizar el análisis digital, además de proporcionar herramientas que tienen el fin de resaltar aspectos importantes que no podemos ver a simple vista, generalmente mediante realces y filtros.

Los sensores de las plataformas satelitales son calibrados para recibir grandes cantidades de radiación sin saturarse, por lo mismo los valores de radiación que reciben están muy por debajo de los máximos posibles. La consecuencia son valores de ND muy bajos y las imágenes tienden a ser muy oscuras. Una solución a este problema es **ajustar el contraste** con diversas técnicas, con todas se obtiene un Nivel de Gris (NG) que se mostrará en la pantalla en función del ND representado.

Expansión lineal: Consiste en el ajuste de los ND, al ND mínimo se le otorgara el valor 0 mientras que al ND máximo el valor de 255, con esto los pixeles estarán distribuidos en toda la paleta de grises (Ecuación 3.20).

$$NG = 255 * \frac{ND - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \quad (3.20)$$

Expansión lineal restringida: Los ND máximos y mínimos los decide la persona que realiza el ajuste en vez lugar de ser los valores reales de la imagen. Por lo que tendremos tres criterios.

1. si  $ND_{max} > ND > ND_{min}$ ;  $NG = 255 * \frac{ND - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}}$
2. si  $ND_{max} < ND$ ;  $NG = 255$
3. si  $ND_{min} > ND$ ;  $NG = 0$

Ecuación del histograma: En esta técnica además de tomar en cuenta los valores de ND también su frecuencia, de modo que los valores de ND más frecuentes resultarán más ajustados que los menos frecuentes. Así que debe calcularse para cada nivel de gris i el valor (Ecuación 3.21).



$$C_i = \frac{256 * \sum_{j=0}^i n_j}{N} \quad (3.21)$$

Donde  $n_j$  es el número de píxeles con valor  $j$  y  $N$  el número total de píxeles.

En las imágenes de satélite cuando se usa una sola banda, regularmente se visualiza con niveles de gris, el ojo humano tiene mayor dificultad de percibir los niveles de gris que otros colores, por ello se pueden asignar a cada ND tres valores de intensidad en el rojo, verde y azul en lugar de los niveles de gris, esto es, **utilizar un pseudocolor**.

En una imagen de satélite se dispone de varias bandas que corresponden a cada región del espectro electromagnético que se discrimina en la plataforma. En la mayoría de los casos algunas de estas bandas pertenecen a subgrupos de la región del visible, el azul, verde y rojo.

Por otra parte los monitores y tarjetas de video disponen de tres canales para representar el mismo número de colores básicos: rojo (R), verde (G), azul (B).

Por tanto puede manejarse cada canal para representar el ND de una banda y obtener así una **composición de color**, lo más obvio sería simular el color real. Pero si se dispone de más bandas nada impide generar visualizaciones en falso color.

Estas composiciones sirven para resaltar los elementos que mayor reflexión presentan en las bandas utilizadas además de visualizaciones con buena estética.

Un ejemplo se encuentra en el satélite LANDSAT 7, si se pasa la banda 4 (con alta reflexión por parte de la vegetación) por el canal verde, la vegetación se verá con mayor claridad que si sólo se utiliza la banda 2 (verde).

Se trata de aprovechar que pueden visualizarse tres canales a la vez para introducir las tres bandas que apoyan a discriminar visualmente los elementos que nos interesan. Puede obtenerse un índice del grado de información (OIF) que presenta una composición en color en comparación con otras (Ecuación 3.22).

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^3 S_k}{\sum_{j=1}^3 |r_j|} \quad (3.22)$$

Donde  $S_k$  es la desviación estándar de cada una de las 3 bandas que intervienen en la composición y  $r_j$  el coeficiente de correlación de cada uno de los tres pares de bandas. Cuanto más alto sea este índice de correlación mayor será el contenido informativo de la composición.

Las técnicas de filtrado son métodos para resaltar o suprimir información contenida en una imagen a diferentes escalas espaciales, así se destaca algunos elementos de la imagen pero también oculta valores anómalos.

El proceso de filtrado consiste en la aplicación a cada uno de los pixeles de la imagen de una matriz de filtrado de tamaño  $N \times N$ , que está compuesta por números enteros y genera un nuevo valor mediante una función de los valores original y los pixeles circundantes. El resultado obtenido se divide entre un escalar, la suma de los coeficientes de ponderación.

Regularmente la matriz de filtrado es de tamaño  $3 \times 3$ , aunque puede ser mayor. Los filtros se pueden expresar mediante una Ecuación (3.24).

$$ND'_{ij} = \frac{(ND_{i-1,j-1} + ND_{i,j-1} + ND_{i+1,j-1} + ND_{i-1,j} + ND_{i,j} + ND_{i+1,j} + ND_{i-1,j+1} + ND_{i,j+1} + ND_{i+1,j+1})}{9} \quad (3.24)$$

Donde  $i$  y  $j$  representan la fila y la columna de cada pixel,  $ND_{ij}$  su Nivel Digital y  $ND'_{ij}$  el Nivel Digital después de hacer el filtrado. También se pueden expresar con el uso de matrices (Figura 3.4).

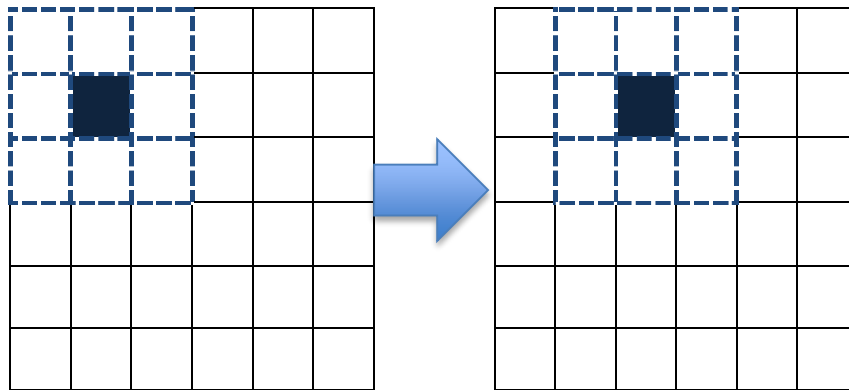


Figura 3.4 Desplazamiento de matriz  $3 \times 3$  (basado de (Ramos Franco, 2013))

Mediante combinaciones distintas de parámetros asignados a diferentes pixeles circundantes se pueden conseguir diferentes efectos. Se busca relacionar el aspecto borroso que pueden tener las imágenes de satélite debido a la dispersión atmosférica y la reflexión difusa.

Uno de los detalles a tomar en cuenta es que los bordes de la imagen no podrán ser procesados, ya que la ventana de filtrado saldría de los bordes de la imagen (Figura 3.5). Por este inconveniente se pierden  $N-2$  filas y  $N-2$  columnas para cada lado de la imagen.

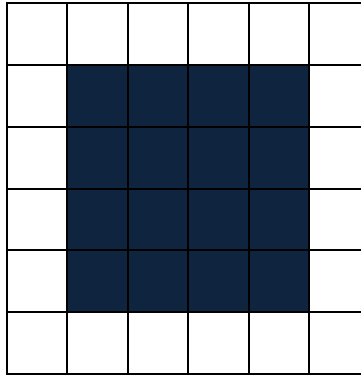


Figura 3.5 Imagen con realce obtenida con una matriz 3x3 (basado de (Ramos Franco, 2013))

Una de las diferencias de las técnicas de visualización y las técnicas de filtrado es que el filtro necesariamente modifica la imagen al pretender la extracción de información cuantitativa que debe almacenarse como una nueva capa en lugar de una paleta de colores.

Los filtros que tienen un mayor uso para la PR son: de paso bajo (suavizan la imagen), de paso alto (aumentan el contraste), direccionales (detectan en la imagen estructuras que tienden a una dirección), de detección de bordes (permiten identificar y aislar objetos con propiedades homogéneas dentro de la imagen).

Filtros de paso bajo: El objetivo de este filtro es suavizar la imagen, son de gran utilidad cuando la imagen tiene una gran cantidad de ruido y se quiere suprimir. Otro uso es para resaltar la información que corresponde a una determinada escala (tamaño de la matriz de filtrado). El filtro de paso se subdivide en varias posibilidades.

Filtro de la media: Asigna al pixel central la media de todos los pixeles que se encuentran en la ventana, la matriz de filtrado estaría compuesta por unos y el divisor sería el número de elementos de la matriz.

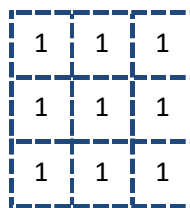


Figura 3.6 Filtro de la media (basado de (Universidad de Murcia, 2012))

Filtro de la media ponderada: No todos los elementos de matriz de filtrado son 1, sino que se le da más valor a uno de ellos, regularmente el central para buscar un resultado más cercano a la realidad y evitar que salga borrosa.

1	1	1
1	2	1
1	1	1

Figura 3.7 Filtro de la media ponderada (basado de (Universidad de Murcia, 2012))

Filtro de la mediana: La ventaja de este filtro es que el valor final es el valor real presente en la imagen y no un promedio, así se reduce el efecto borroso que ocasionan los filtros de media. También el filtro de la mediana es menos sensible a valores extremos. El inconveniente es que resulta más complejo de calcular por que se deben ordenar los diferentes valores que aparecen los pixeles incluidos en la ventana.

Filtros adaptativos: Son demasiado complejos estos filtros, ya que los coeficientes de ponderación se recalculan para cada uno de los pixeles en función del histograma de los ND que aparecen en la ventana. Su éxito para eliminar interferencia de las imágenes de radar es interesante y también que con un solo filtro se pueden detectar diferentes elementos.

Filtros de paso alto: La razón de esta clasificación de filtros es resaltar las zonas de mayor variabilidad suprimiendo la componente media, exactamente la que detectan los filtros de paso bajo. La respuesta de cada pixel está contaminada por los vecinos, al considerar que la superficie es difusa y la radiación reflejada en cada pixel se reparte hacia pixeles vecinos, los filtros de paso alto eliminan cierta parte de esta contaminación. Existen diversos métodos.

Sustracción de la media: Si consideramos que un filtro de paso bajo resalta componentes eliminando la variabilidad local entonces podemos hacer lo contrario para ahora resaltar la variabilidad local. La matriz de filtrado de este filtro menos media puede calcularse directamente restando la matriz de filtrado identidad.

-1	-1	-1
-1	-8	-1
-1	-1	-1

Figura 3.8 Filtro menos la media (basado de (Universidad de Murcia, 2012))

Filtros basados en las derivadas. La derivada de una función  $y = f(x)$  es el incremento de  $y$  para cada incremento infinitesimal de  $x$ . Para la percepción remota la derivada es la pendiente y la segunda derivada son da información acerca de la forma del terreno, que puede ser valle, cresta o ladera recta como ejemplo. En el caso de las imágenes satelitales ubicaremos estos cambios que se producen en pixeles contiguos.

Filtros direccionales: Se utilizan para detectar formas que siguen una dirección determinada en el espacio resaltando el contraste entre los pixeles situados a los lados de dicha forma.

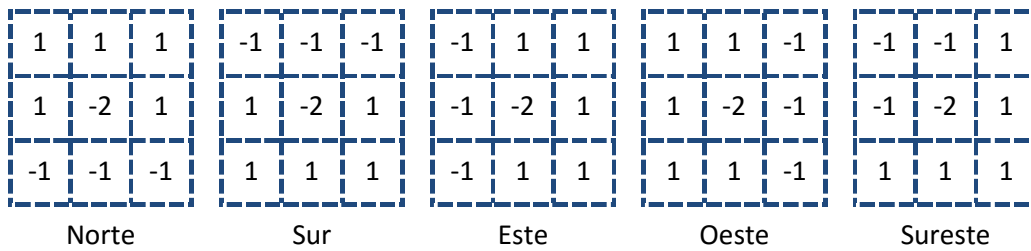


Figura 3.9 Filtros direccionales (basado de (Ramos Franco, 2013))

Filtro para detección de bordes: Más complejo que los anteriores, uno de los más utilizados es el operador de Sobel que realiza la variación entre filas y columnas. El filtro Sobel hace uso de dos filtros de paso alto, una en dirección vertical y otro en dirección horizontal, haciendo énfasis en los pixeles centrales (Figura 3.10).

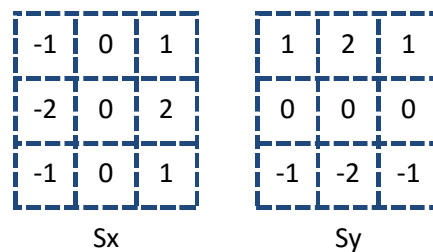


Figura 3.10 Filtro Sobel (basado de (Ramos Franco, 2013))

Una vez aplicados los filtros del operador Sobel, se obtiene la magnitud con la Ecuación 3.25.

$$|R| = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (3.25)$$

### Clasificación

La clasificación es un procedimiento donde a los pixeles se les asignan clases espectrales (clasificación no supervisada) o a clases informativas (clasificación supervisada). Se elabora una clasificación del área de estudio en una serie de clases relativas a algunos tipos como lo son la litología, tipos de vegetación, usos de suelo, etc. La PR tiene esto como objetivo fundamental.

El problema de clasificar a los pixeles se resuelve en tres fases.

1. Se determina el número y propiedades de las clases en relación a K variables (fase de entrenamiento).

2. Se asigna a cada uno de los N individuos en las M clases utilizando una regla de decisión basada en las características de los individuos (fase de asignación).
3. Ya agrupados los individuos en las clases se debe verificar si nuestras clasificaciones son correctas (fase de comprobación)

En la PR las variables están compuestas por la reflexión de cada una de las bandas que contiene el sensor. Sin embargo, además de tener esta información espectral también podemos obtener una información textual e información contextual.

La información textual se refiere a las características en la vecindad del pixel (reflexión media, varianza, auto correlación, etc.) La información contextual explica la referencia en cuanto a la clasificación de pixeles vecinos.

El problema de la incorporación de la información textual y contextual tiene como inconveniente de introducir variables que no suelen seguir la distribución gaussiana, lo que produce con algunos métodos de clasificación no funcionen correctamente.

**Fase de entrenamiento:** La clasificación comienza con la definición de clases que utilizaremos en el estudio, se trata de una clasificación basada en valores numéricos, por lo que se trata de obtener un rango para nuestros ND que identifica a cada clase en todas las bandas que intervienen.

Clasificación no supervisada: En esta clasificación se utilizan algoritmos de clasificación automática multivariante donde los individuos más próximos se van agrupando y formando clases. En la PR uno de los más habituales es el clustering jerárquico, que consta de N pasos siendo N el número total de individuos a clasificar.

En cada paso se identifican los individuos más similares y próximos, se hace una nueva clase con ellos y se sustituyen por el centroide que forman. Así, cada paso analiza un individuo menos que en el anterior y se van integrando a cada clase resultante. El proceso acaba en el momento que se ha alcanzado un número de clases igual al que se había establecido desde un inicio o cuando se ha alcanzado el umbral de distancia por encima del cual no debe continuarse.

Si la clasificación jerárquica se utiliza en la PR no se utilizan todos los pixeles debido a su elevado número, sino que se elige una muestra para clasificarla. El tamaño muestral es demasiado grande para que la salida nos resulte un dendrograma, por lo que la salida es un conjunto de clases (el número de clases que elegimos desde un principio) con sus firmas espectrales.

Se recomienda desde un inicio buscar con la clasificación más clases que las pensadas que luego se puedan agrupar sin dificultad.

Clasificación supervisada: Las clases se determinan de una muestra de píxeles conocidos, la identificación de estos píxeles se basa en el conocimiento previo de la zona que muestra la imagen, con esto se pretende que las clases tengan una perfecta clasificación.

Se denominan clases informativas en contraposición a las clases espectrales que genera la clasificación no supervisada. Las áreas de información deben tener una gran homogeneidad y se debe poseer información de lo que había el día que se tomó la imagen.

Los valores estadísticos más relevantes en esta clasificación son la media, desviación típica, máxima y mínima.

**Fase de asignación:** Desde un punto de vista estadístico, todos los algoritmos definen un área de dominio de cada clase. Cada píxel será colocado en una de las clases elegidas en la fase de entrenamiento si sus características están en el rango que permite estar en el grupo. Existen varios criterios para clasificar los píxeles en las clases.

Clasificador de la mínima distancia: Se asigna a todas las clases un punto canónico que será el centroide de cada clase. Cuanto más cerca esté el individuo de este centroide más probable será que pertenezca a esta clase, lo que requiere conocer una medida de distancia que será una medida de semejanza o diferencia entre los individuos (Ecuación 3.26). Dos individuos semejantes pertenecerán con toda seguridad a la misma clase y al revés si son muy distintos.

$$d_{a,b} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{i,a} - X_{i,b})^2} \quad (3.26)$$

Clasificación de los paralelepípedos: se fija un área de dominio para cada clase teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Cada píxel será asignado a una clase si su ND esta dentro del dominio.

**Fase de comprobación:** Consiste en determinar si las clases seleccionadas son confiables, existen tres formas de comprobación, el primero nos solicita comparar el inventario de la clasificación con otros métodos, el segundo es validar las áreas de entrenamiento y la tercera comprobación es revisar las clasificaciones con las áreas de información que tenemos disponibles.

### 3.3 Aplicaciones de la PR

Los sensores son fabricados con un objetivo determinado, cada plataforma satelital tiene una búsqueda de información distinta, LANDSAT tiene la necesidad de obtener datos de los recursos naturales que se encuentran en el planeta y METEOSAT toma registros de eventos climatológicos,

aun cuando son dos plataformas satelitales importantes en el mundo de la PR no poseen el mismo objetivo.

También ya se mencionaron las distintas resoluciones que posee un sensor, la aplicación de cada una de ellas depende del objeto de estudio.

Todas las bandas pueden discretizar cuerpos, solo que algunas lo hacen mejor que otras en ciertos objetos, para delimitar cuerpos de agua se puede utilizar la región visible y la región del infrarrojo, aunque en ambas se puede trabajar es más sencillo hacerlo en el infrarrojo cercano, en esta parte de la región la absorción de la luz contrasta con los demás objetos (suelo, vegetación, urbanización) y su observación es muy sencilla.

La resolución espacial más detallada es necesaria en información cartográfica, ya que se requiere una resolución más fina para obtener datos de la región que se estudia sin perder información del terreno.

En algunas ocasiones los desastres naturales como los derrames de petróleo o deshielo de los polos nos dan la necesidad de obtener información de una zona en un tiempo relativamente corto, es aquí donde la resolución temporal toma un papel muy importante.

También existen casos donde es el ambiente el que perjudica en la obtención de los datos que necesitamos. En los trópicos el clima es propenso a tener una gran cantidad de nubes que afectan de gran manera a los sensores, los radares tienen su propia iluminación y permite atravesar las nubes por sus longitudes de ondas largas.

A menudo se tiene la necesidad de utilizar más de un sensor para obtener adecuadamente todos los requisitos de la aplicación. El uso combinado de múltiples fuentes de información se llama integración. Los datos adicionales que pueden ayudar en el análisis o la interpretación de los datos se llaman auxiliares.

Se mencionarán ciertas aplicaciones de la percepción remota, es importante aclarar que sólo se desarrollarán los casos más comunes.

### Agricultura

La agricultura tiene un papel muy destacado en la economía de los países, ya sea una carta para la negociación de una economía fuerte o también una respuesta a la necesidad de alimento para una gran población. La producción de alimento es importante para todos, lo que hace necesario que los agricultores tengan la información siempre a su alcance.

Un agricultor tiene que poseer información para lograr ser eficiente, así que es necesario obtener datos para tener una estrategia viable. La PR ayuda con sus análisis a entender la salud de las



cosechas, su nivel de infestación, estrés del daño o las condiciones del suelo. Además de los agricultores pueden existir otros observadores del crecimiento de un cultivo, ya sean compradores, inversionistas o el mismo gobierno, ellos buscan la calidad de los productos que se están preparando en las granjas.

Las imágenes satelitales son utilizadas para clasificar cultivos, examinar su salud y viabilidad de tener éxito, conocer sus prácticas agrícolas, entre varias aplicaciones.

Usuarios de la percepción remota en la agricultura.

1. Comerciantes de productos agrícolas
2. Intermediarios
3. Productores agrícolas
4. Compañías de alimentos y agro negocios
5. Agencias de gobierno (federal/estadal/local)
6. Agencias internacionales de desarrollo

Aplicaciones de la percepción remota en la agricultura.

1. Clasificación de tipos de cultivos
2. Evaluación del estado de los cultivos
3. Estimación del rendimiento de cultivos
4. Mapeo de las características del suelo
5. Mapeo de las prácticas de manejo del suelo
6. Vigilancia del cumplimiento de las prácticas agrícolas

Forestal

Los bosques tienen una gran importancia para el humano, proporciona materia prima para poder desarrollarse como cultura, como alimento y refugio. Los bosques son parte del intercambio de dióxido de carbono por oxígeno para lograr un equilibrio y exista la vida en el planeta.

Las selvas tropicales son el lugar donde varias especies que habitan en el planeta tienen su hogar, por su capacidad de adaptación y desarrollo de la vida.

Las principales cuestiones que se plantean en el tema forestal son su destrucción por situaciones naturales (incendios o plagas) o por situaciones de las actividades humanas (tala o cambio del uso del suelo).

El hombre toma varios recursos de los bosques que provocan un cambio muy significativo en el paisaje, su explotación para obtener productos como papel y productos medicinales nos hacen tener un control sobre la destrucción de los bosques.

Se tiene que asegurar una regeneración de árboles para ser una idea viable y seguir aprovechando los recursos forestales.

Usuarios de la percepción remota en el tema forestal.

1. Agencias de Gobierno
2. Firmas consultoras ambientales
3. Ingenieros

Aplicaciones de la percepción remota en el tema forestal

1. Reconocimiento de la cartografía
2. Silvicultura comercial
3. Monitoreo ambiental

Geología

La geología nos ofrece el conocimiento para la exploración y explotación de los recursos minerales e hidrocarburos, estos recursos son necesarios para mejorar la calidad de vida de nuestra sociedad. Del petróleo se obtienen productos para el movimiento de los vehículos como la gasolina y el diesel, de las canteras se extrae piedras calizas que son un material necesario para la fabricación de concreto, lo mismo pasa con los metales preciosos y demás minerales que son base de productos terminados.

Otra parte de los estudios de la geología son los peligros naturales que pueden suceder, ya sean terremotos o deslizamiento de placas, todo esto tiene que ser analizado para tener seguridad en las construcciones que hace el ser humano para su beneficio.

La PR es utilizada en esta área para extraer información de las rocas y suelos que pueden ser explotados, pero también puede ser utilizada en la logística de la explotación de una mina por ejemplo sus rutas de acceso.

Usuarios de la percepción remota en la geología.

1. Consultores independientes en geología
2. Compañías de exploración y producción petrolera
3. Compañías de servicios geofísicos y geoquímicos
4. Compañías/operadores de explotaciones mineras

Aplicaciones geológicas de la percepción remota son los siguientes

1. Evaluación de activos/gestión de tierras y propiedades
2. Evaluación/cartografía de cuencas
3. Planificación de corredores/vigilancia
4. Estudios ambientales/desastres naturales
5. Planificación/gestión logística
6. Pronósticos de combustibles y otros minerales (metales, arcillas, petróleo, etc.)

## Hidrología

La hidrología es el estudio del agua que se encuentra en la superficie terrestre, ya sea que fluya, se encuentre congelada o sea retenida por el suelo. La hidrología está muy relacionada con otras aplicaciones como la agricultura y la forestal, ya que el agua es vital para el funcionamiento de estos temas.

La mayoría de los fenómenos hidrológicos son dinámicos, no solo entre años cambian las condiciones, también entre los meses del mismo, por esta razón se tienen que realizar varias observaciones para entender el fenómeno.

La PR nos ofrece una visión sobre la distribución espacial y dinámica de los procesos hidrológicos, que regularmente no pueden ser estudiados en trabajo de campo.

Usuarios de la percepción remota en la hidrología.

1. Agencias de gobierno
2. Firms consultoras ambientales
3. Compañías/oficinas de provisión de agua por redes
4. Departamentos y oficinas de administración de agua y recursos hídricos

Ejemplos de aplicaciones hidrológicas

1. Mapeo y monitoreo de humedales
2. Estimación del suelo y la humedad
3. Medición del espesor de nieve
4. Cartografía de las inundaciones y supervisión
5. Detección de cambios en ríos y deltas
6. Drenaje de la cuenca de mapeo y modelado de cuencas hidrográficas
7. Canal de riego de detección de fugas
8. Programación del riego

## Cobertura y uso del suelo

Aunque la cobertura del suelo y el uso del mismo se utilizan indistintamente se debe explicar que no tienen el mismo significado, mientras la cobertura del suelo se refiere a la cubierta del suelo, ya sea vegetación, agua, infraestructura de una ciudad, etc. el uso del suelo es la finalidad que se quiere trabajar en el suelo, como puede ser agricultura, recreación, nuevas áreas de vivienda, etc.

Es importante conocer estas diferencias para nuestro estudio del suelo, los sensores remotos obtienen resultados para de la cobertura mientras que el uso del suelo se puede deducir con estos mismos resultados y datos auxiliares.

Las aplicaciones de la PR en este tema son muy extensas, puede ser utilizado por empresas que explotan los recursos naturales como el gobierno en planes para la mejora en la calidad de vida.

Usuarios de la percepción remota en la cobertura del suelo y uso del suelo.

1. Investigadores del monitoreo ambiental
2. Dependencias de gobierno (municipal y federal)
3. Consultorías de medio ambiente
4. Contratistas

Las aplicaciones en este tema son las siguientes.

1. Gestión de recursos naturales
2. La protección del hábitat de la fauna
3. Expansión urbana/invasión
4. Encaminamiento y planificación logística para las actividades de extracción de sísmica / exploración/recursos
5. Daños provocados por desastres naturales ( tornados, inundaciones , volcánica , sísmica)
6. Límites legales
7. Para la evaluación de impuestos y la propiedad

## Mapeo

El mapeo constituye una parte importante en el tema de la gestión de recursos naturales y la información obtenida es producto de un análisis de la PR, desde las redes de transporte hasta límites poblacionales el mapeo nos ofrece los resultados que pueden ser referidos a coordenadas sistemáticas.

Los mapas topográficos son útiles e importantes para planificación, evaluación y monitoreo, más aun si esta información puede encontrarse de manera digital para su manejo

Usuarios de la percepción remota en el mapeo

1. Compañías de ferrocarriles
2. Compañías de transporte carretero
3. Dependencias de gobierno
4. Proyectistas inmobiliarios
5. Empresas de recursos naturales
6. Proyectos militares

Algunas de las aplicaciones de la percepción remota en el tema del mapeo son las siguientes.

1. Planimetría
2. Modelos Digitales de Elevación (DEM)
3. La cartografía de referencia temática/cartografía topográfica

Océanos y costas

Los océanos son de vital importancia para la vida del hombre, además de proveer alimento al ser humano también es ruta de transporte, eslabón del ciclo hidrológico del planeta y fuente de recursos biofísicos. Entender el océano nos permite anticiparnos a desastres naturales como los huracanes o evaluar los recursos pesqueros de una zona determinada.

Las costas por su parte son la unión del suelo continental con los océanos, así que son muy sensibles al cambio de alguna de las partes involucradas como puede ser el crecimiento económico y urbanización del área estudiada. Con más del 60% de la población mundial asentada en las costas los gobiernos deben obtener información para no perjudicar a la naturaleza.

Usuarios de la percepción remota en los océanos y costas

1. Compañías de transporte marítimo
2. Empresas dedicadas a la explotación marina
3. Turismo
4. Gobierno

Las aplicaciones más comunes de la percepción remota en los océanos y las costas pueden ser

1. Identificación de patrones al mar
2. Batimetría
3. Previsión de tormentas
4. Monitorización de la temperatura del agua
5. Calidad del agua

6. Apoyo estratégico para las decisiones de respuesta a emergencias de derrames de hidrocarburos
7. Rutas de navegación
8. Delineación de la interfaz tierra/agua

## Capítulo 4. Sitio de estudio

La cuenca hidrológica Villa Victoria – San José del Rincón (Figura 4.1), se localiza en la frontera del Estado de México y Michoacán, abarca una superficie aproximada de 62,000 Ha, se conforma con los municipios de Angangueo, Ocampo y Zitácuaro en Michoacán y Almoloya, Ixtlahuaca, San Felipe de Progreso, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria en el Estado de México.

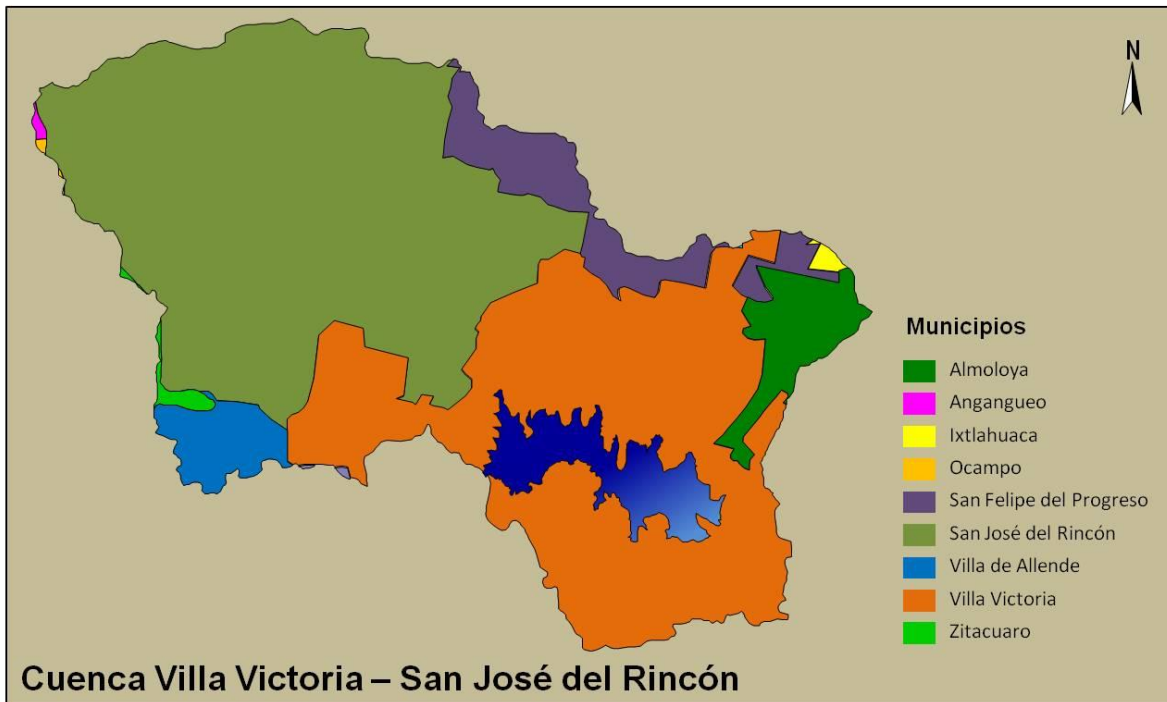


Figura 4.1 Cuenca Villa Victoria - San José del Rincón (tomada de cuencavalledemexico.com)

La **presa Villa Victoria** se encuentra en el municipio del mismo nombre, para este caso estudio solamente se utilizará información del municipio Villa Victoria.

**Localización:** La cabecera municipal de Villa Victoria se localiza a 46 kilómetros al noreste de la capital del Estado de México y a 111 kilómetros del Distrito Federal. Las coordenadas geográficas y altitud de la cabecera municipal son: latitud norte 19°26', longitud oeste 100°00' con una altitud de 2,570 msnm.

Limita al norte con los municipios de San Felipe del Progreso y San José del Rincón; al sur con el municipio de Amanalco de Becerra; al oriente con el municipio de Almoloya de Juárez; al poniente con el municipio de Villa de Allende.

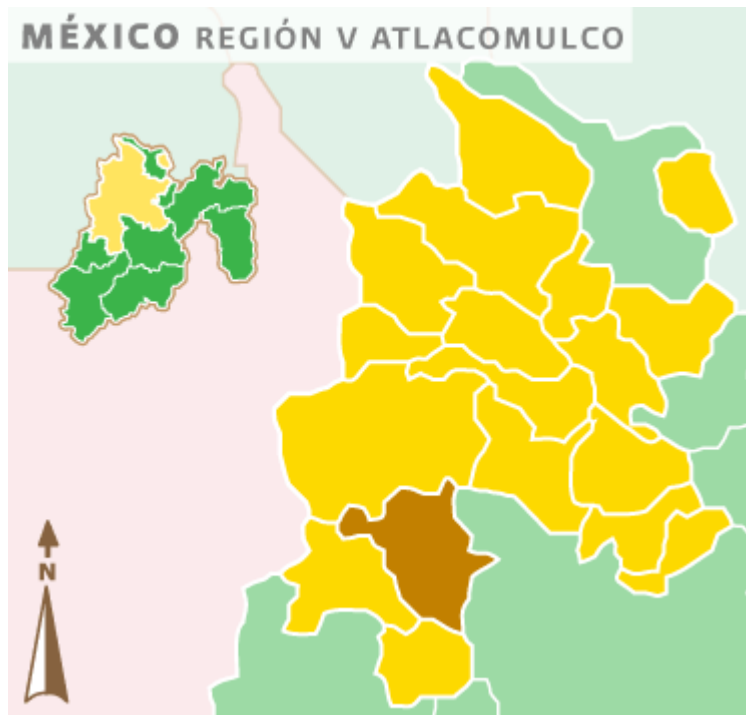


Figura 4.2 Localización del municipio Villa Victoria (tomada de [www.inafed.gob.mx](http://www.inafed.gob.mx))

**Extensión:** Tiene la municipalidad una extensión superficial de 424.03 km<sup>2</sup> (42,402.09 Ha), la cual representa el 1.89% del territorio del Estado de México y ocupa el décimo lugar en cuanto a la extensión territorial.

La configuración superficial del terreno de la municipalidad es anfractuosa, pues cuenta con planicies, elevaciones orográficas, lagos y bordos, así como valles y tierras de cultivo, está enclavado dentro de la provincia geológica del Eje Volcánico, que se caracteriza por el predominio de rocas volcánicas cenozoicas que datan del terciario y cuaternario.

**Orografía:** Las elevaciones principales son las siguientes: hacia el norte el cerro de Suchitepec con una altura aproximada de 2,850 msnm; hacia el sur el cerro de San Agustín con una altura aproximada de 3,110 msnm; hacia el oriente el cerro de la Venta de Jesús María y el cerro de los Madroños y hacia el poniente, la cadena de montículos que integran lo que se denomina cerro Colorado, con una altitud aproximada de 2,869 msnm.

**Hidrografía:** El río más importante es el de La Compañía, otros menos caudalosos son: el río Prieto, el río de los Coyotes, de la Parada de San José y el de San Marcos. Los mantos acuíferos y manantiales de agua potable son abundantes; entre los más importantes son dos ríos, los dos arroyos de Palizada, el de San José, de Dolores y de Santa Teresa.

La presa Villa Victoria alimenta al sistema hidráulico Miguel Alemán e Ixtapantongo, así como el sistema Cutzamala. Existen además dos lagos e innumerables bordos.



Los mantos acuíferos y manantiales de agua potable con mayor importancia son: El Ojo de Agua de la cabecera municipal, el cual abastece a Las Peñas, Jesús María y San Agustín Berros, y otro denominado Ojo de Agua que abastece a Palizada y algunos de sus barrios.

El manantial “Dos Ríos” además de abastecer de agua potable a ciertas comunidades también es un atractivo turístico.

Los aprovechamientos que tiene el agua en el municipio son: 30% para el uso agropecuario, 50% para uso doméstico y 20% para la actividad comercial y servicios de mediana y pequeña producción. También se tienen localizadas 15 fuentes de abastecimiento para el futuro, 5 en aguas superficiales y 10 en aguas subterráneas.

Se tienen contabilizados 368 bordos, 29 tanques de almacenamiento, 55 motobombas y 8 Km de canales revestidos.

**Clima:** Villa Victoria pertenece al subgrupo de climas templados, este subgrupo es mesotérmico, es decir estable, por consiguiente el clima que predomina es el subhúmedo con lluvias durante el verano. La temperatura media anual es de 12.5°C, la máxima de 28°C, correspondiente al clima templado subhúmedo, con lluvias en verano.

Un porcentaje de lluvia invernal menor de 5 y la precipitación media anual es mayor de 800 milímetros. La máxima incidencia de lluvia se presenta en los meses de julio y agosto. La tabla 4.1 es el resumen por mes de lluvias en el Estado de México.

Mes	Precipitación (mm)
Enero	3.1
Febrero	2.9
Marzo	6.1
Abril	17.9
Mayo	111.2
Junio	183.5
Julio	142.5
Agosto	134.1
Septiembre	148.2
Octubre	104.1
Noviembre	11.1
Diciembre	20.1

Tabla 4.1 Lluvia por mes en el Estado de México (basado de (Comisión Nacional del Agua, 2015))

La frecuencia de heladas en el municipio se registra en un período de más de 120 días al año y un rango de granizadas de más de 18 días.

Los vientos predominantes se presentan durante los meses de febrero y marzo predominando los del sur. Durante la primavera se presentan vientos y con el ambiente seco por la falta de lluvias abundan las tolvaneras.

**Población:** Villa Victoria cuenta con una población de 94,369 habitantes (INEGI, 2009); en el año de 2005 la población era de 77,819 habitantes, la diferencia entre ambos periodos es de 16,550 habitantes, con esto el incremento fue de 21.26%, alto en comparación a otros periodos.

Las localidades con mayor población en el municipio son Villa Victoria, San Marcos de la Loma, Sitio Ejido (Lomas de Guadalupe), La Puerta del Pilar, San Diego del Cerrito Primera Sección y Santiago del Monte.

El crecimiento económico de Villa Victoria no tiene grandes avances, destacando la migración del lugar, el municipio no es un lugar llamativo en ofertas de calidad de vida, la mayoría de los habitantes nacieron en el municipio. La población de hombres es de 46,657 habitantes y la de mujeres es de 47,712 habitantes. El porcentaje de población en el rango de 14 a 28 años es de 29%.

En el año 2010 se tienen contabilizadas 18,724 viviendas, con un promedio de 5 personas habitando cada una, los servicios de agua en la red pública se encuentran en 9,361 viviendas (50% del total) y servicios de drenaje en 8,462 (45% del total)

La población en general en el municipio de Villa Victoria es dispersa con marginación en varias localidades, los servicios de agua potable y drenaje no cumplen con los requisitos para considerarse urbana. Este problema tiene consecuencias al no poder tener un registro de consumo y sí las descargas que realizan contaminan el subsuelo o los cuerpos de agua.

**Uso del suelo:** Se define como usos del suelo a aquellas actividades socio-económicas que se desarrollan sobre un territorio, es decir, el propósito específico que se da a la ocupación o empleo de un terreno.

Para el caso de Villa Victoria se han identificado los siguientes: Agrícola, forestal, pecuario, urbano, cuerpos de agua y otros usos, dentro de los cuales se ubican las zonas erosionadas y el uso industrial.

De acuerdo al uso del suelo, la superficie total con que cuenta, es de 42,402.9 Ha., de las cuales 23,102.4 son agrícolas; de esta 21,587.0 son de temporal y solo 1,515.4 son de riego; la superficie destinada a las explotaciones pecuarias es de 6,103.0 Ha., los cuerpos de agua ocupan un total de

3,617.3, en materia forestal se ocupan 2,763.2 Ha.; la zona urbana y otros usos ocupan un total de 910.2 Ha. y las áreas erosionadas un total de 1,689.72 Ha.

Existe una alta degradación de suelos causado por la erosión y contaminación que provoca la improductividad de las tierras. Las principales razones por las cuales se tienen problemas en el aspecto agrícola en el municipio son la falta de subsidios, los costos de fertilizantes, asesoría técnica y falta de tecnología dentro del proceso agrícola.

Se ha propuesto la diversificación de cultivos para mejorar la productividad, sin embargo por la experiencia coloca a la papa como el cultivo más viable, seguido de la zanahoria, canola, tomate y avena.

**Actividades económicas:** En lo que respecta a las actividades económicas predominantes en el municipio, son el comercio, la agricultura y la ganadería, dadas las características de su territorio y población, sin embargo, la actividad comercial está experimentando un desarrollo relevante y a su vez está retomando mayor importancia en la vida económica del municipio como consecuencia de dos aspectos principalmente: la existencia de la presa de Villa Victoria que atrae visitantes a la Cabecera Municipal y Las Peñas. La carretera de acceso a Villa Victoria es también vía de paso a los municipios Valle de Bravo, Zitácuaro y Villa de Allende, por tal motivo se han conformado asentamientos humanos y comercios a lo largo de ella (Carretera Federal).

La **presa Villa Victoria** es el cuerpo de estudio, la información recabada es la siguiente.

La presa Villa Victoria pertenece al Sistema Cutzamala, que es el conjunto de obras de infraestructura hidráulica para abastecer de agua potable a la Ciudad de México y Toluca. También se encuentra dentro del Sistema Hidroeléctrico “Miguel Alemán” e “Ixtapantongo”.



Figura 4.3 Presa Villa Victoria (tomada de (Comisión Nacional del Agua, 2015))

Se localiza a 6.5 Km de la cabecera municipal, se ubica a 2,605 msnm y sus coordenadas geográficas son latitud norte 19° 27' y longitud oeste 100° 03'.

La presa fue construida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en los años de 1942 a 1944, en la zona de confluencia de los ríos El Ramal, La Compañía, El Molino y San Diego, dando origen al Río San José Malacatepec, con el objeto de aprovechar el embalsamiento de los escurrimientos generando energía eléctrica con las plantas Ing. Héctor Martínez D´Meza y Agustín Millán que contaban con 44,000 KW instalados. El control de la presa fue transferido a la Comisión Nacional del Agua en mayo de 1982.

Actualmente el uso de la presa es para el almacenamiento y abastecimiento de agua potable dentro del Sistema Cutzamala, no existen trenes de tratamiento del agua en las corrientes que llegan a la presa.

Tiene entre 18 y 19 m de altura, una corona con longitud de 251 m y ancho de 4 m. La captación original de la presa era de 217 millones de m<sup>3</sup> y al día de hoy es de 185.7 millones de m<sup>3</sup> aproximadamente, esto al ser la agricultura el uso de suelo predominante de la zona genera sedimentos que se van a depositar en la presa y acelera su azolvamiento. Tiene un largo de 10.7 Km y 3.4 Km de ancho, el espejo de agua llega a cubrir una superficie aproximada de 2,558.4 Ha (25.6 Km<sup>2</sup>).

Las corrientes de agua que llegan a la presa son en su mayoría arroyos intermitentes con excepción del Río San José Malacatepec, en la Figura 4.4 se localizan los principales arroyos y ríos que llegan a la presa.



**Figura 4.4 A) Río San José Malacatepec, B) Arroyos importantes, C) Descarga de agua del municipio D) Cortina de la presa (tomada de <http://gaia.inegi.org.mx/>)**

## Capítulo 5. Metodología

### 5.1 Recopilación y revisión de la información documental sobre el tema

La importancia del sistema Cutzamala para la Ciudad de México obliga a recabar información de sus fuentes de abastecimiento, existen investigaciones previas de las presas del sistema utilizando la PR, en Valle de Bravo se realizaron diseños de modelos de agua mediante la PR (Sepúlveda Hirose, 2011) mientras que en Villa Victoria se realizó un estudio de calidad del agua (Ramos Franco, 2013). Ambos trabajos dan pauta a seguir investigando de forma constante los fenómenos que ocurren en esta parte de la nación.

Para un estudio multitemporal de un cuerpo en constante movimiento como lo es una presa es necesario conocer su entorno natural. El clima, el uso de suelo, la hidrografía y las actividades económicas de la población afectan directamente el ciclo de presa.

### 5.2 Plataforma satelital seleccionada

Utilizando información del capítulo 3 “Fundamentos de la percepción remota” se elige la plataforma satelital apropiada para el caso estudio.

La investigación esta enfocada al estudio de recursos naturales, así que se utiliza la Tabla 5.1, en ella se localizan las plataformas satelitales que tienen los recursos naturales como aplicación, el tipo de órbita no afecta este primer filtro de selección.

Satélite	Sensores	Órbita	Aplicación	Seleccionada
<b>LANDSAT 8</b>	OLI y TIRS	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>LANDSAT 7</b>	ETM+	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>SPOT 7</b>	NAOMI	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>SPOT 5</b>	HRG y HRS	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>IKONOS 2</b>	IKONOS	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>OCEANSAT 2</b>	OCM, SCAT, ROSA	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>QUICKBIRD 2</b>	QUICKBIRD	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>GEOEYE 1</b>	GEOEYE	LEO	Recursos Naturales	SÍ
<b>NOAA 19</b>	AVHRR/3, HIRS/4	LEO	Meteorología	NO
<b>NOAA 15</b>	AVHRR, HIRS	LEO	Meteorología	NO
<b>METEOSAT 10</b>	SEVIRI	GEO	Meteorología	NO
<b>ERS 2</b>	SAR, ATRS, GOME	GEO	Meteorología	NO

Tabla 5.1 Aplicación de las plataformas satelitales

El primer filtro de selección deja al programa LANDSAT (7 y 8), el programa SPOT (5 y 7) y las plataformas satelitales IKONOS 2, OCEANSAT 2, QUICKBIRD 2 y GEOEYE 1 como satélites posibles de utilización.

El espejo de agua en la presa Villa Victoria es de 25.6 Km<sup>2</sup> (25.6 millones de m<sup>2</sup>), esta cantidad ofrece un concepto de que resolución espacial es necesaria sin saturar de datos. La Tabla 5.2 tiene la información necesaria para el segundo filtro de selección.

Satélite	Sensores	Espacial (m)	Pixeles	Seleccionada
<b>LANDSAT 8</b>	OLI y TIRS	15.0, 30.0, 100.0	28,444 (30 m)	SÍ
<b>LANDSAT 7</b>	ETM+	15.0, 30.0, 60.0	28,444 (30 m)	SÍ
<b>SPOT 7</b>	NAOMI	2.2, 8.8	330,579 (8.8 m)	SÍ
<b>SPOT 5</b>	HRG y HRS	5.0, 10.0, 20.0	256,000 (10 m)	SÍ
<b>IKONOS 2</b>	IKONOS	1.0, 4.0	1,600,000 (4 m)	SÍ
<b>OCEANSAT 2</b>	OCM, SCAT, ROSA	360.0	198	NO
<b>QUICKBIRD 2</b>	QUICKBIRD	0.6, 2.4	4,444,444 (2.4 m)	NO
<b>GEOEYE 1</b>	GEOEYE	0.41, 1.65	9,403,122 (1.65 m)	NO

**Tabla 5.2 Resolución espacial de las plataformas satelitales**

La cantidad de pixeles de OCEANSAT 2 es baja, mientras que en el QUICKBIRD 2 y GEOEYE 1 es bastante alta, estas tres plataformas no serán consideradas para los siguientes filtros de selección.

Un tercer filtro de selección es la resolución espectral, en este filtro la ventaja es para el programa LANDSAT, sus 11 (LANDSAT 8) y 8 (LANDSAT 7) bandas superan con bastante al programa SPOT y a la plataforma IKONOS. Con respecto a la resolución temporal es todo lo contrario, LANDSAT tarda en pasar por el mismo punto 16 días exactos mientras que los SPOT e IKONOS por la movilidad de su sensor pueden hacerlo en menos tiempo.

Si mencionamos la resolución radiométrica la ventaja es para la versión mas reciente de LANDSAT, que con sus 16 bits supera al SPOT 7 (12 bits) y al IKONOS 2 (11 bits). En este filtro de selección quedamos con la misma cantidad de plataformas.

El último filtro de selección es el costo de cada imagen, el programa LANDSAT ofrece la posibilidad de descargar imágenes del programa sin costo, para adquirir las imágenes se ingresa en la pagina del United States Geological Survey (USGS) <http://glovis.usgs.gov/>.

Las imágenes del programa SPOT pueden ser descargadas desde la página <https://apollomapping.com/> con un costo de US\$5.15/Km<sup>2</sup> con un pedido mínimo de 100 Km<sup>2</sup> (US\$515 de costo mínimo). En esta misma pagina de internet se pueden descargar las imágenes de

la plataforma IKONOS, el costo por kilometro cuadrado es de US\$10.00 con un pedido mínimo de 25 Km<sup>2</sup> (US\$250 de costo mínimo).

El costo de las imágenes del programa SPOT y de la plataforma IKONOS los hacen inviables para el caso estudio. El programa LANDSAT es el seleccionado para realizar el trabajo, se puede elegir entre las dos plataformas satelitales más recientes, las ventajas del LANDSAT 8 sobre el LANDSAT 7 son:

1. Más resolución espectral (11 bandas contra 8)
2. Más resolución radiométrica (16 bits contra 8)
3. En 2003 la banda del sensor SLC (LANDSAT 7) tuvo una descompostura, lo que arroja un bandeado en la imagen que resta información.

La ventaja más importante del LANDSAT 7 contra el LANDSAT 8 es el tiempo de operación, LANDSAT 7 tiene imágenes desde 1999 mientras LANDSAT 8 desde 2013, para un caso estudio multitemporal esta ventaja puede ser significativa.

**LANDSAT 8** es nuestra elección por las mencionadas todas las ventajas sobre otras plataformas, lo que hace necesario conocer con puntualidad esta plataforma satelital.

LANDSAT 8 es lanzado el 11 de febrero de 2013, es un trabajo en conjunto de la NASA y la USGS, el lanzamiento es realizado en la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg. LANDSAT 8 tiene tres objetivos clave:

1. Recopilar y almacenar datos de las bandas multispectrales y térmicas de toda la superficie terrestre y funcionamiento de al menos 5 años.
2. Asegurar que la nueva información obtenida sea lo suficientemente consistente con las anteriores misiones del programa, todo esto en términos de geometría de adquisición, calibración, características de cobertura, características espectrales, calidad en el producto de salida y disponibilidad de datos para estudios de cobertura terrestre y uso del suelo a través del tiempo.
3. Distribuir información al público en general, sin discriminar y sin costo para el usuario.

Los dos sensores a bordo del LANDSAT 8 son Operational Land Imager (OLI) y el Sensor Térmico Infrarrojo (TIRS).

El sensor OLI fue diseñado para tener una vida útil de cinco años y detectará las mismas bandas que sus antecesores (ETM+ y TM) con excepción de la banda del infrarrojo térmico, además de las 7 bandas del sensor ETM+/LANDSAT 7 (seis de las cuales fueron refinadas) se incluyen dos nuevas, una aerosol costera (B1) y otra en el infrarrojo cercano "cirrus" (B9). Estas nuevas bandas ayudaran a medir la calidad del agua y facilitaran la detección de nubes altas que en los anteriores sensores eran difíciles de percibir.

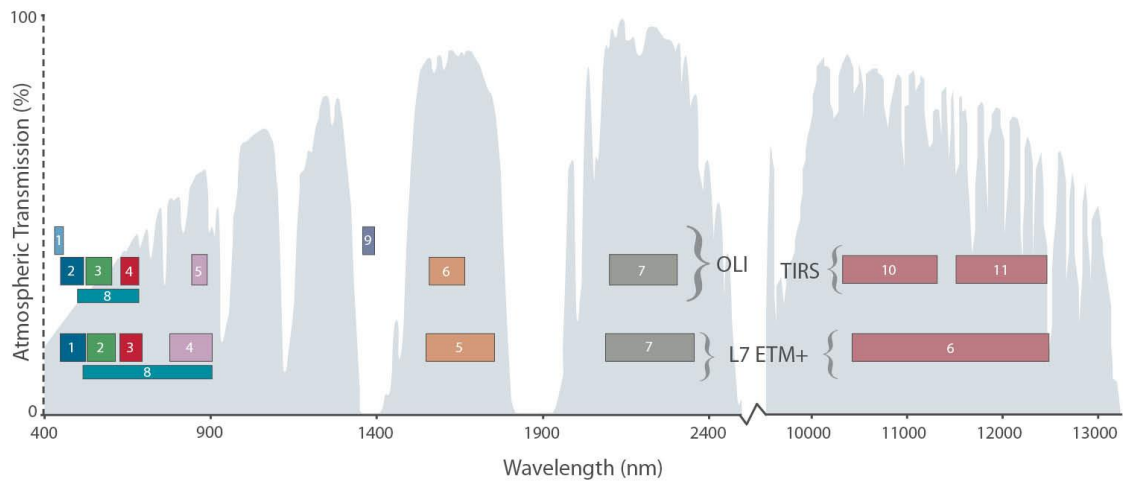


Figura 6.1 Bandas espectrales en LANDSAT 8 (OLI/TIRS) y LANDSAT 7 (ETM+) (tomada de (Aliza, 2013))

Como ya lo mencionamos, todo cuerpo en la tierra emite radiación infrarroja térmica, conocida comúnmente como calor, la cantidad de radiación emitida es proporcional a la temperatura del cuerpo. El sensor TIRS fue añadido cuando se hizo evidente que en la gestión de los recursos hídricos se basan en la alta precisión de energía térmica. La resolución espacial es de 100 m y son dos bandas (B10 y B11) que en el pasado se trabajaban en una sola.

Las Tablas 5.3 y 5.4 nos muestran la información principal del LANDSAT 8.

<b>Sensor</b>	Operational Land Imager (OLI) Sensor Térmico Infrarrojo (TIRS)
<b>Órbita</b>	705 Km sincronización solar
<b>Inclinación de la órbita</b>	98.2°
<b>Tiempo de órbita alrededor del planeta</b>	98.9 minutos
<b>Altitud</b>	705 Km
<b>Tamaño de escena</b>	170 Km x 185 Km
<b>Tiempo de cruce en el Ecuador</b>	10:00 am +/- 15 min
<b>Tiempo de regreso (Resolución temporal)</b>	16 días (233 órbitas)
<b>Resolución radiométrica</b>	16 bits

Tabla 5.3 Información del LANDSAT 8



Banda	Descripción	Rango espectral (μm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol costero	0.433-0.453	30
2	Azul	0.450-0.515	30
3	Verde	0.525-0.600	30
4	Rojo	0.630-0.680	30
5	Infrarrojo cercano	0.845-0.885	30
6	Infrarrojo medio 1	1.560-1.660	30
7	Infrarrojo medio 2	2.100-2.300	30
8	Pancromático	0.500-0.680	15
9	Cirrus	1.360-1.390	30
10	Infrarrojo térmico 1	10.300-11.300	100
11	Infrarrojo térmico 2	11.500-12.500	100

**Tabla 5.4 Resolución espectral y espacial del LANDSAT 8**

### 5.3 Selección de imágenes satelitales

El caso estudio utilizó las imágenes del LANDSAT 8, estas fueron del año 2014 (de enero a diciembre) y una adicional del mes de enero del 2015, la resolución temporal de la plataforma es de 16 días, lo que nos hace obtener aproximadamente 23 imágenes cada año (Ecuación 5.1), lo siguiente fue ingresar a la pagina de la USGS y ver el calendario de imágenes del año seleccionado (Tabla 5.5).

$$Total\ imagenes = \frac{días\ del\ año}{resolución\ temporal} = \frac{365}{16} \approx 23 \quad (5.1)$$

Fecha de la imagen	Visibilidad	Descargable	Seleccionada
06-Ene-14	Baja	Sí	
22-Ene-14	Alta	Sí	Sí
07-Feb-14	Alta	Sí	
23-Feb-14	Nula	Sí	
11-Mar-14	Alta	Sí	Sí
27-Mar-14	Alta	Sí	
12-Abr-14	Alta	Sí	
28-Abr-14	Alta	Sí	Sí
14-May-14	Baja	Sí	
30-May-14	Nula	Sí	
15-Jun-14	Alta	Sí	Sí
01-Jul-14	Nula	Sí	
17-Jul-14	Nula	Sí	
02-Ago-14	Baja	Sí	Sí
18-Ago-14	Nula	Sí	
03-Sep-14	Nula	Sí	
19-Sep-14	Alta	Sí	Sí
5-Oct-14	Nula	Sí	
21-Oct-14	Baja	Sí	
06-Nov-14	Alta	Sí	Sí
22-Nov-14	Nula	Sí	
08-Dic-14	Alta	Sí	Sí
24-Dic-14	Nula	Sí	
09-Ene-14	Alta	Sí	Sí

**Tabla 5.5 Días seleccionados para descargar imágenes del LANDSAT 8**

La elección de las imágenes tienen las siguientes observaciones.

1. Los intervalos entre imágenes seleccionadas no debe ser mayor a 48 días (3 veces la resolución temporal)
2. La visibilidad de la imagen debe ser alta, solo se puede utilizar una imagen de baja visibilidad si no se cumplen los intervalos seleccionados en el punto anterior.
3. Las imágenes de alta visibilidad siempre son descargables, aun así se debe investigar si no existe algún problema.

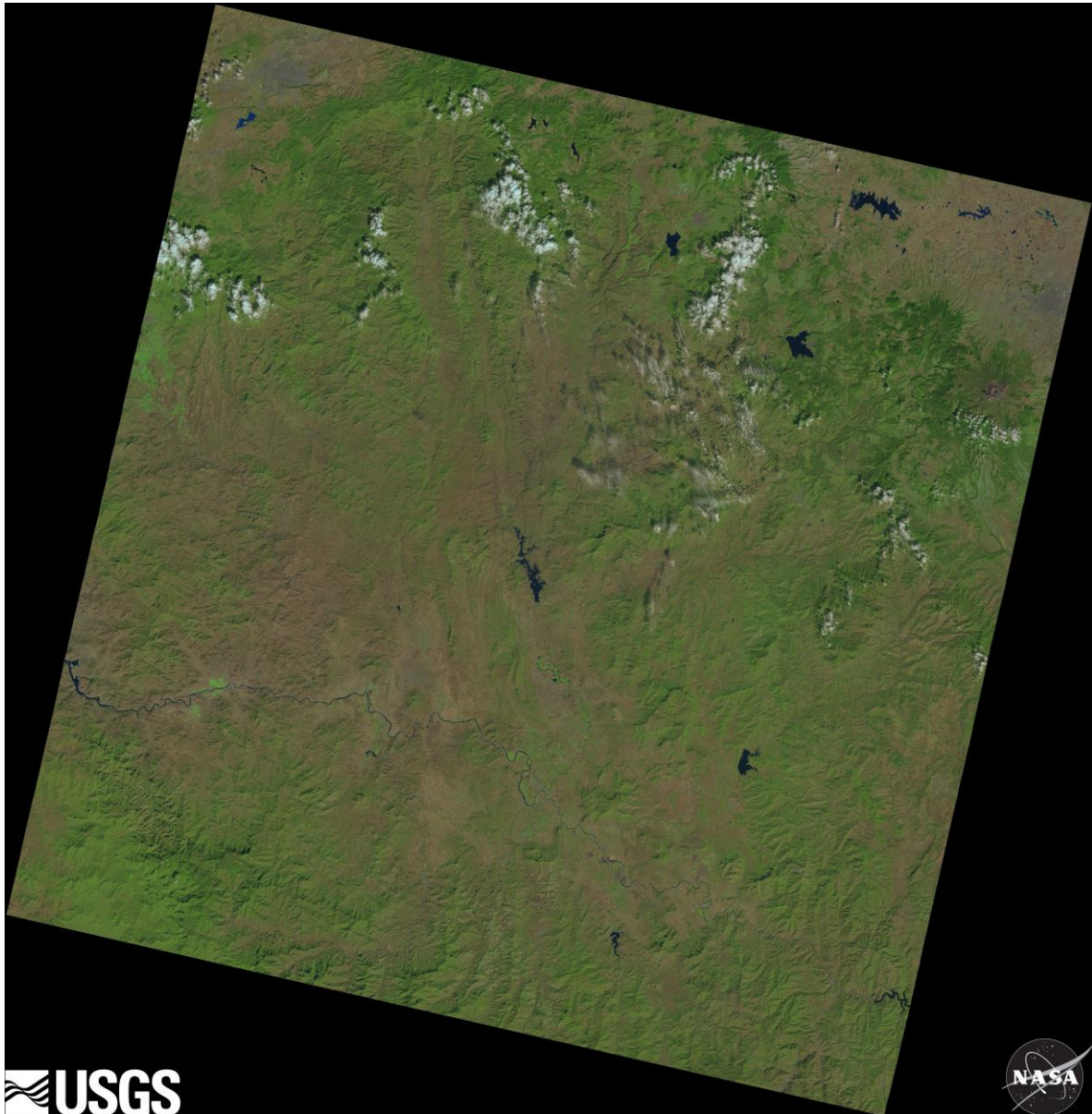


Figura 5.2 Imagen satelital del día 8 de diciembre de 2014, cumple con todos los puntos de selección

Se ingresó a la página de la USGS (<http://glovis.usgs.gov/>) y se seleccionó los días que pertenecen al caso estudio, existen cinco tipos de productos que podemos descargar. Todos los formatos de salida son en Geographical Tagged Image File Format (GeoTIFF).

1. Productos de nivel 0 (L0): Son imágenes digitales con todas las transmisiones de datos y objetos sin formatos. Estos productos están al mismo tiempo ordenados de manera proporcional, espacial y secuencialmente por bandas espectrales.
2. Productos de nivel 1 Radiometric (L1R): Son datos de imágenes corregidas radiométricamente, Estos datos son derivados de los productos L0 y son escalados en relación de los valores de reflexión.

3. Productos de nivel 1 Systematic (L1G): Consisten en productos con datos L1R con correcciones geométricas aplicadas y muestreos para el registro de una proyección cartográfica.
4. Productos de Nivel 1 Gt (L1Gt): Consisten en datos del tipo L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas y muestreos para el registro a una proyección cartográfica referenciada. Los datos (L1Gt) utilizan la información de posición a bordo o efemérides definitivas, así como el uso de los datos controlados de elevación para corregir los errores de paralaje.
5. Productos de Nivel 1 Terrain (L1T): Son productos de datos L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica. Adicionalmente los datos también contienen una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve.

Los productos L1Gt y L1T fueron los utilizados en el caso estudio. Posteriormente de la selección y descarga de los productos se reciben 12 imágenes del día seleccionado (11 pertenecientes a cada una de las bandas espectrales y uno correspondiente a la banda de calidad).

#### 5.4 Preprocesamiento y análisis digital

Para este subcapítulo fue necesario utilizar un programa computacional con aplicación en la percepción remota, al día de hoy existen varios softwares de los cuales elegir, por ejemplo: ERDAS Imagine, ArcGIS, IDRISI, PCI Geomatica, etc.

La elección es el software IDRISI de la empresa Clark Labs, entre sus ventajas se encuentra su amplio tiempo entre los mejores softwares del ramo (la primera versión del programa fue en 1987), sus 300 módulos para el análisis y procesamiento de imágenes y es compatible con las imágenes de las plataformas satelitales LANDSAT, SPOT, IKONOS, etc.



Figura 5.3 IDRISI Selva (tomada de [www.software-shop.com](http://www.software-shop.com))

El primer paso fue importar las imágenes descargadas de la USGS hacia el programa IDRISI, las Figuras 5.4 y 5.5 son imágenes de dos bandas espectrales de la misma escena (14 de enero de 2014).

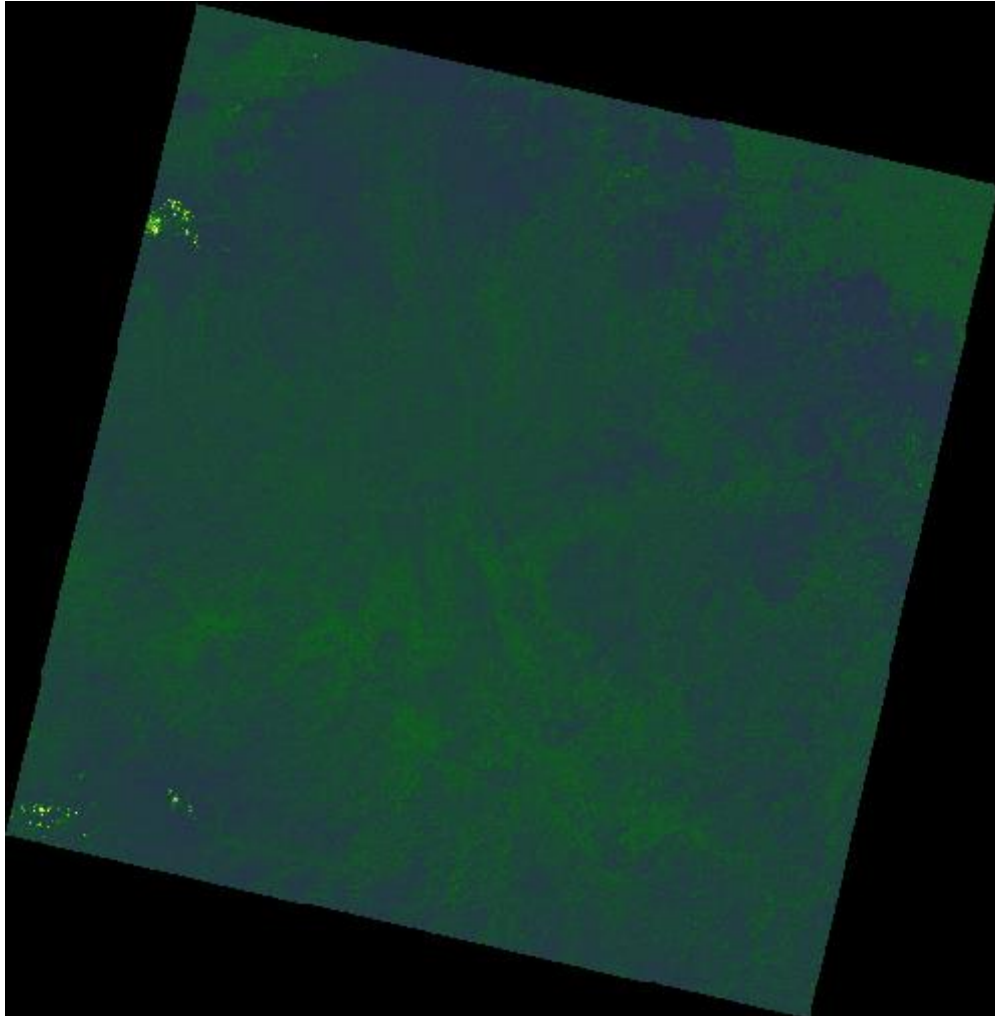
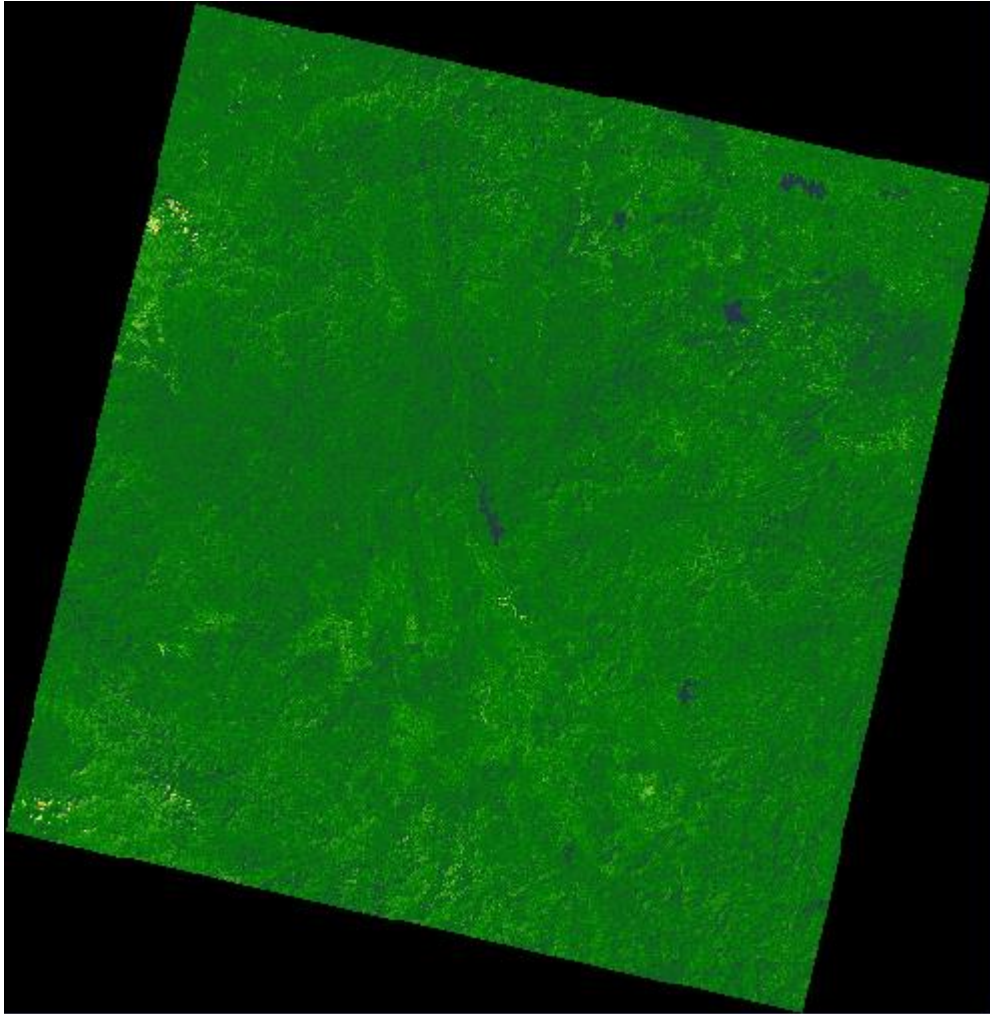


Figura 5.4 Banda espectral 4 (Rojo)



**Figura 5.5 Banda espectral 5 (IR Cercano)**

Como se puede observar, la escena (170 Km x 185 Km) es bastante grande en comparación a la presa Villa Victoria (10.7 Km x 3.4 Km), IDRISI permite recortar la imagen para solo utilizar el tramo que sea de interés (comando WINDOW) (Figura 5.6).

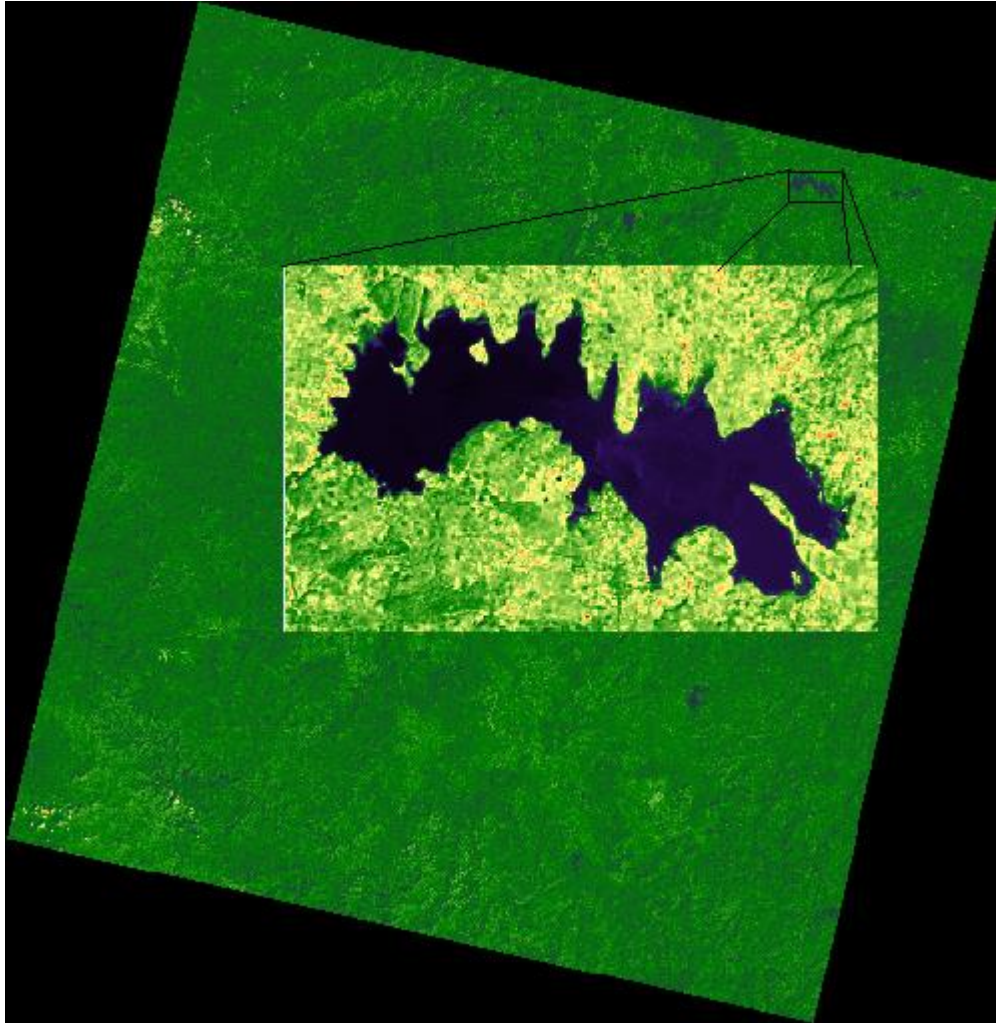


Figura 5.6 Comando WINDOW

Con la selección del tramo donde se encuentra la presa Villa Victoria el siguiente paso fue delimitar el cuerpo de agua, es necesario este paso para evitar información innecesaria, facilitar la clasificación no supervisada y agilizar el procesamiento de la imagen, se puede utilizar cualquier imagen para realizar esta acción, todas las bandas tienen la figura de la presa pero como se menciona con anterioridad en algunas bandas es más fácil reconocer los cuerpos de agua.

Existen dos soluciones que pueden ser satisfactorias al problema. La primera es utilizar la imagen que pertenezca a una banda espectral donde se delimite el cuerpo de agua y la cubierta terrestre de forma sencilla para la elección de píxeles. La segunda es crear la imagen real del cuerpo de agua y de ahí delimitar sus fronteras con la cubierta terrestre.

Para la segunda opción es necesario trabajar con las bandas espectrales que corresponden a la región del visible (azul, verde y rojo), IDRISI como el ojo humano necesita de las tres bandas para poder crear el color real de un objeto, al elegir el comando COMPOSITE se tendrá como resultado la imagen real de la presa Villa Victoria.

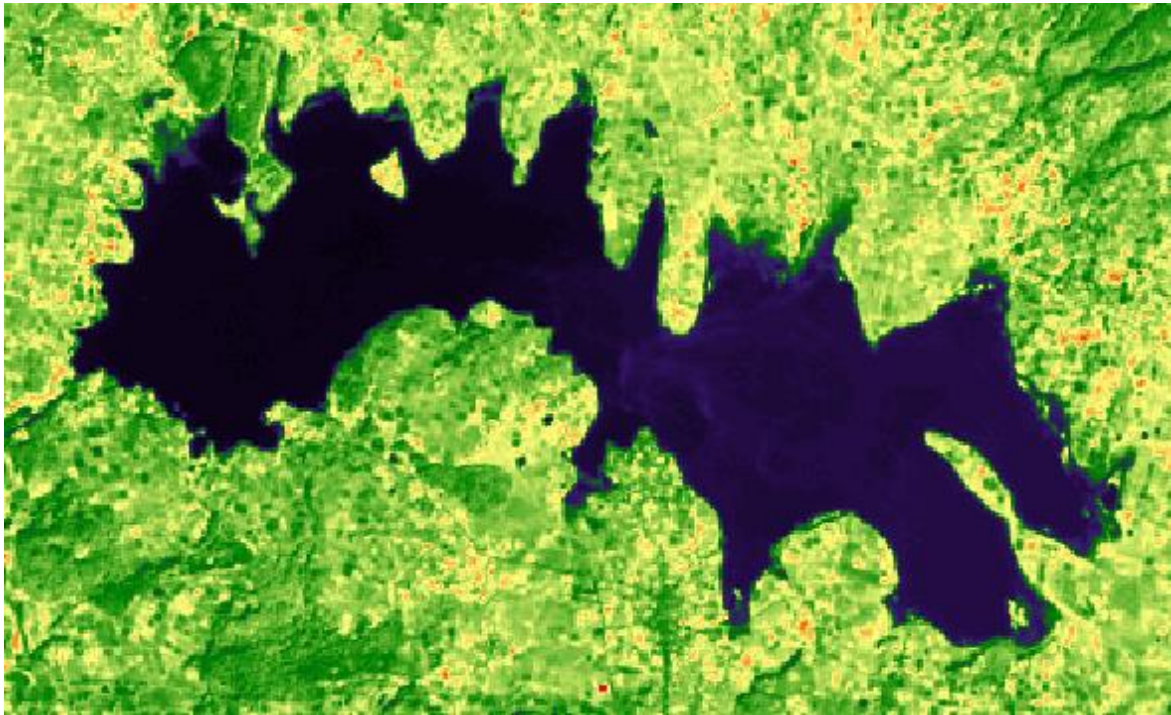


Figura 5.7 Comando COMPOSITE

La Figura 5.7 muestra el embalse como fue captado por el LANDSAT 8, se debe considerar que en algunas partes de la presa la profundidad del agua no supera los 1.5 m, si se analizan estas zonas puede que los datos obtenidos no sean del agua si no del lecho inferior.

Se realizó la primera opción con la banda espectral 5 (IR cercano), en esta región del espectro electromagnético el agua tiende a perder reflexión y transmisión mientras gana en absorción y esta característica es de utilidad para discretizar cuerpos de agua, la banda detectará donde son las zonas de baja profundidad (Figura 5.8).





**Figura 5.8 Banda espectral 5 (IR cercano)**

Se realizó la técnica de enmascaramiento para eliminar toda la información que no pertenezca a la presa Villa Victoria, utilizando el comando DIGITIZE (Figura 5.9) se discretizo el embalse con valores de 1 (agua) y 0 (todo lo demás), el resultado obtenido es un vector poligonal que se puede convertir a una imagen raster (comando RASTERVECTOR) que se multiplica por todas las bandas espectrales y así invalidar el área exterior del cuerpo de agua.



**Figura 5.9 Comando DIGITIZE**



Figura 5.10 Banda espectral 2 (Azul)



Figura 5.11 Banda espectral 3 (Verde)



Figura 5.12 Banda espectral 4 (Rojo)



Figura 5.13 Banda espectral 5 (IR cercano)



Figura 5.14 Banda espectral 6 (IR medio 1)

El programa IDRISI agrupó en clases a los píxeles de la imagen en una clasificación no supervisada, la información que el software utilizó para este paso es el siguiente.

1. Se utilizaron las bandas espectrales número 2 (Figura 6.10), 3 (Figura 6.11), 4 (Figura 6.12), 5 (Figura 6.13) y 6 (Figura 6.14).
2. El número máximo de familias será de 10.
3. El máximo posible de NG que el software permita.
4. Se realizó una clasificación fina y una gruesa para cada imagen (día seleccionado).



Figura 5.15 Clasificación gruesa (22 de enero de 2014)

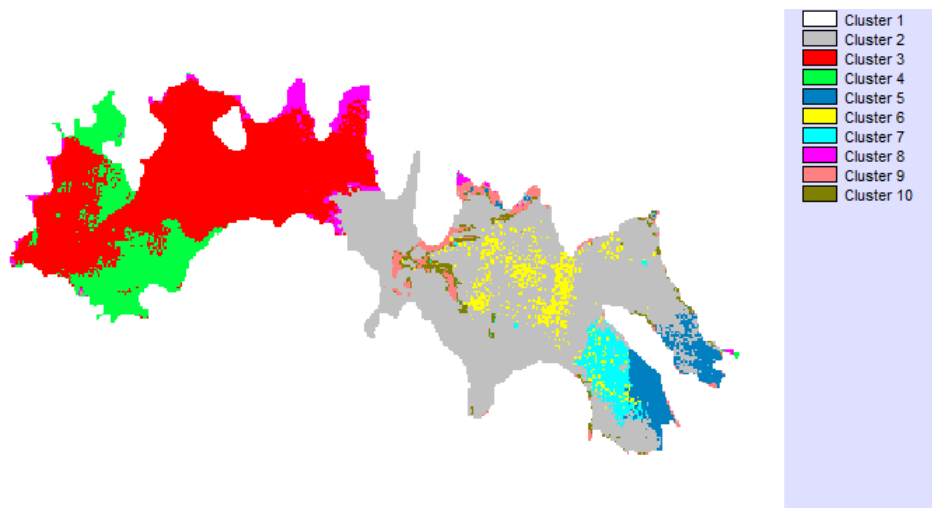


Figura 5.16 Clasificación fina (22 de enero de 2014)

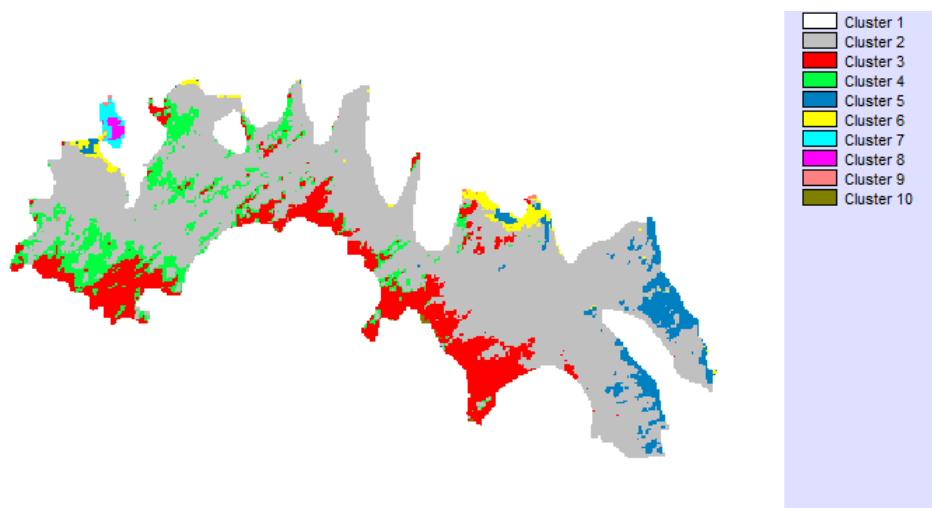


Figura 5.17 Clasificación gruesa (11 de marzo de 2014)

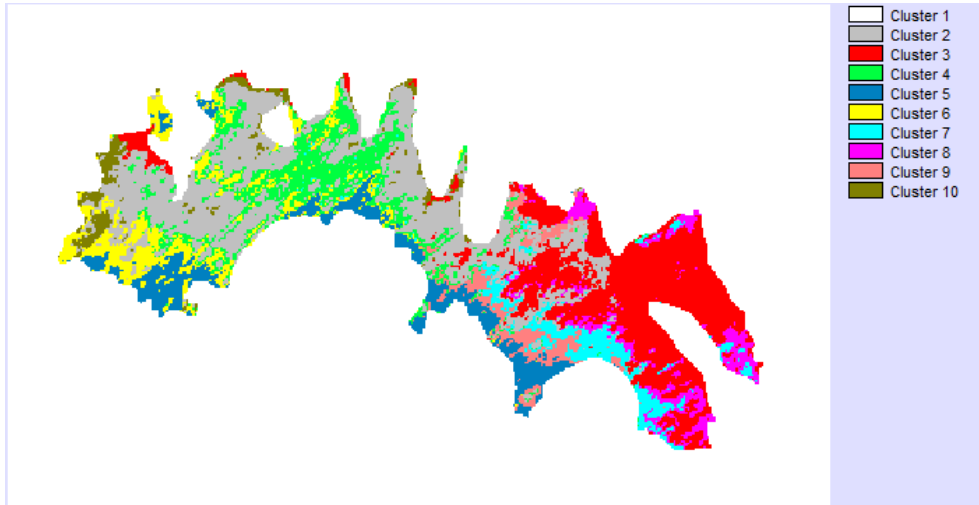


Figura 5.18 Clasificación fina (11 de marzo de 2014)

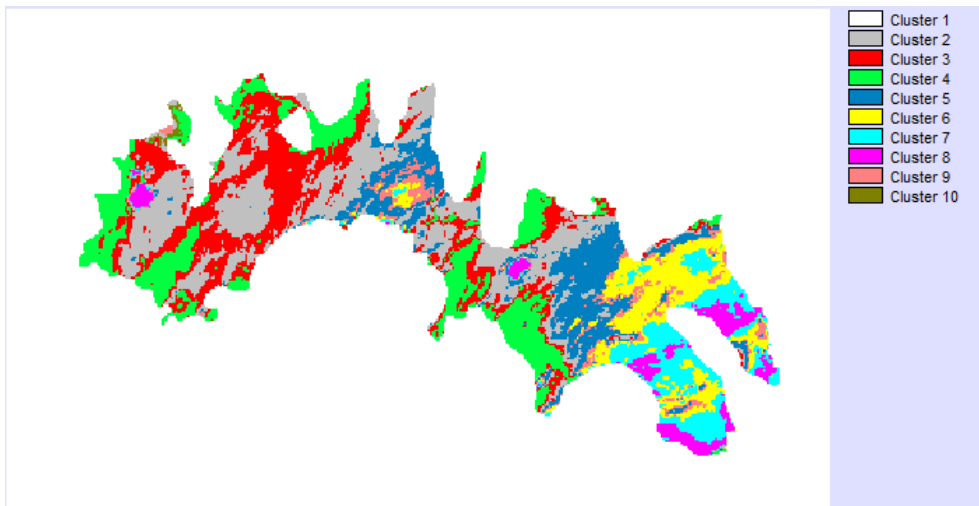


Figura 5.19 Clasificación gruesa (28 de abril de 2014)

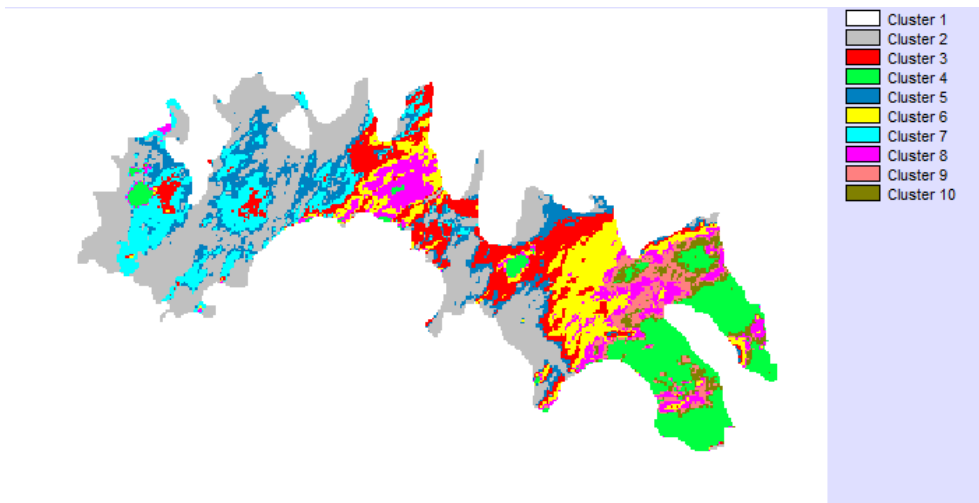


Figura 5.20 Clasificación fina (28 de abril de 2014)

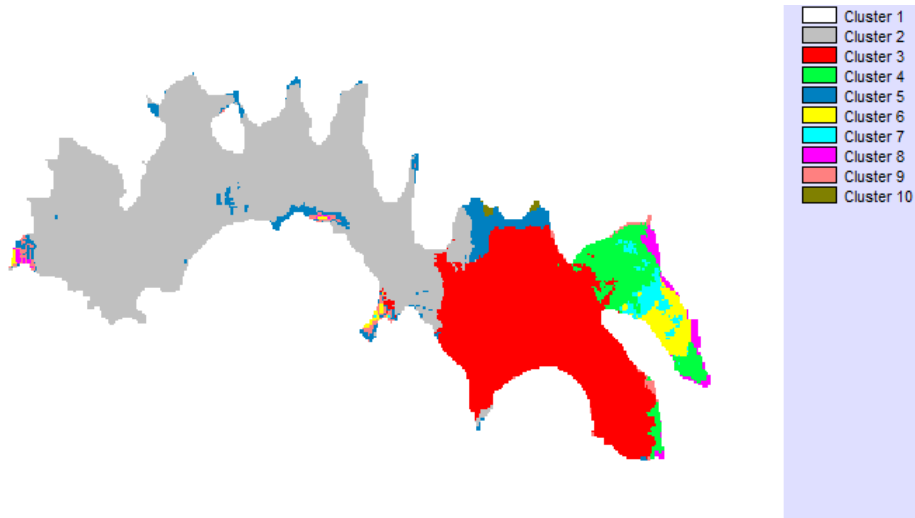


Figura 5.21 Clasificación gruesa (15 de junio de 2014)

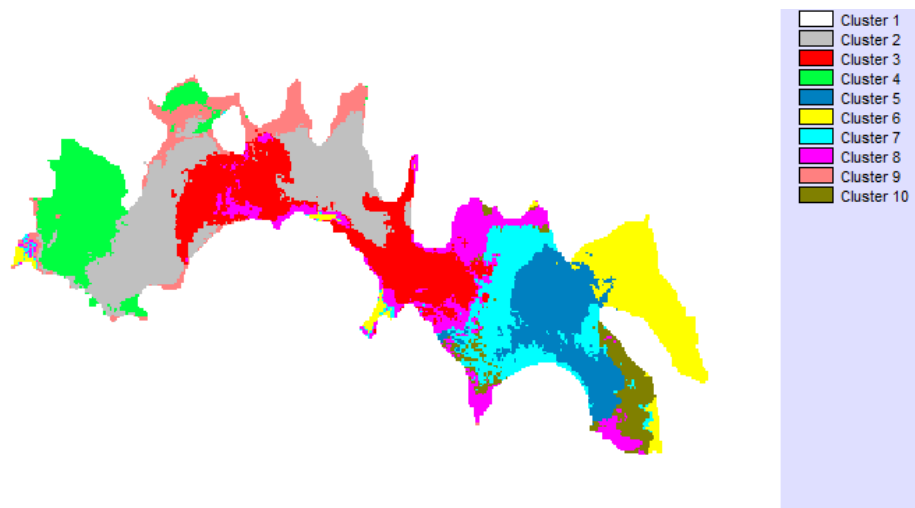


Figura 5.22 Clasificación fina (15 de junio de 2014)

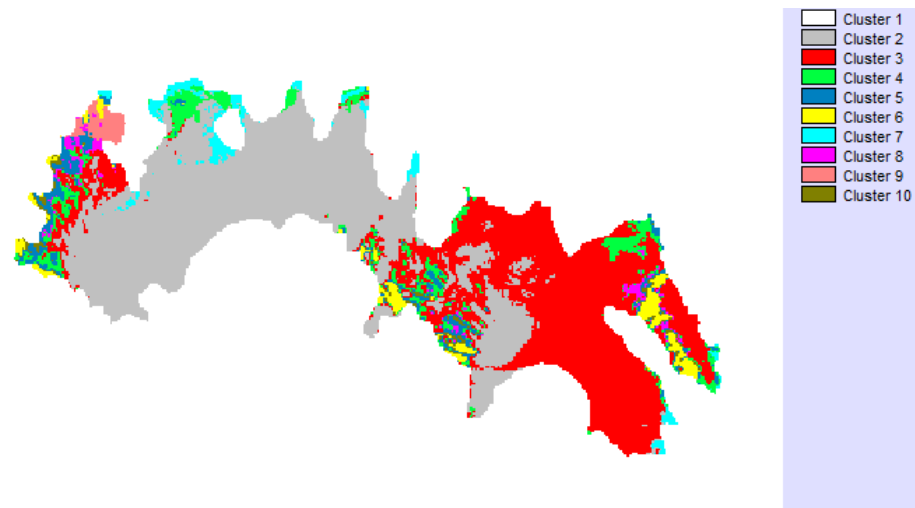


Figura 5.23 Clasificación gruesa (02 de agosto de 2014)

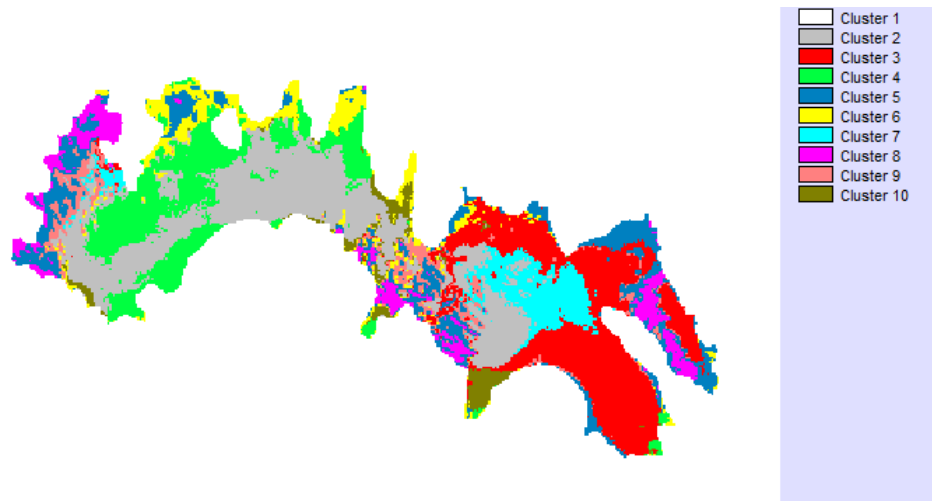


Figura 5.24 Clasificación fina (02 de agosto de 2014)

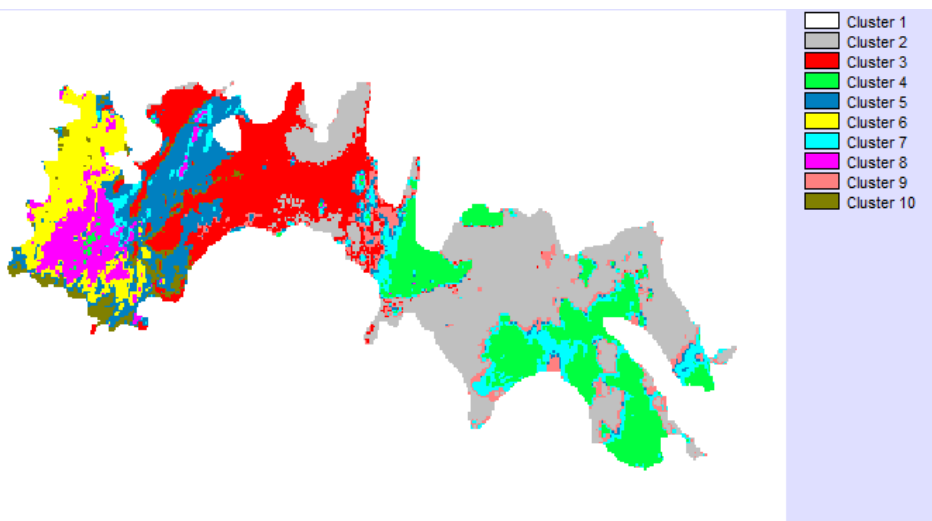


Figura 5.25 Clasificación gruesa (19 de septiembre de 2014)

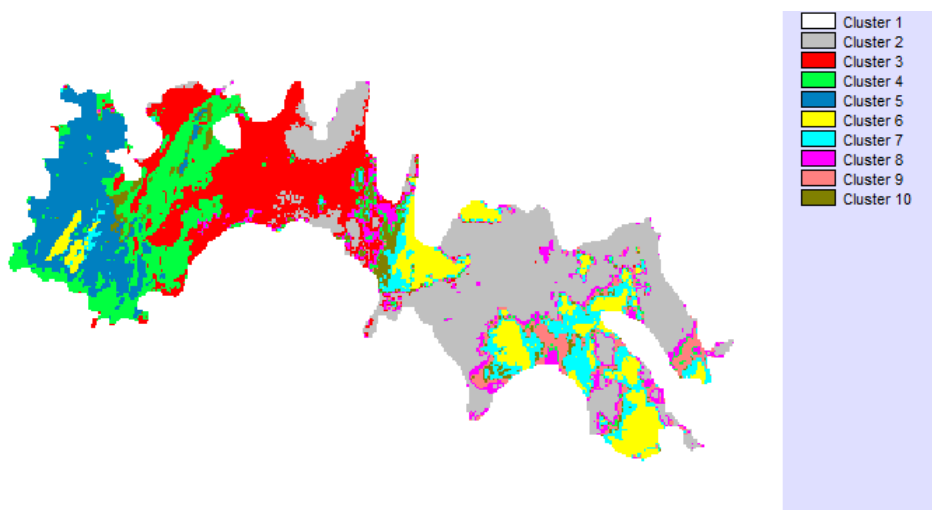


Figura 5.26 Clasificación fina (19 de septiembre de 2014)

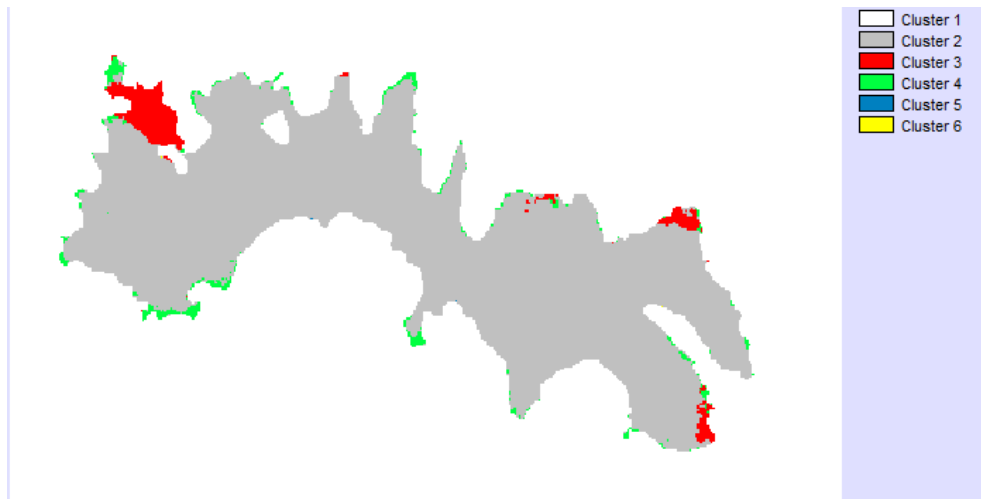


Figura 5.27 Clasificación gruesa (06 de noviembre de 2014)

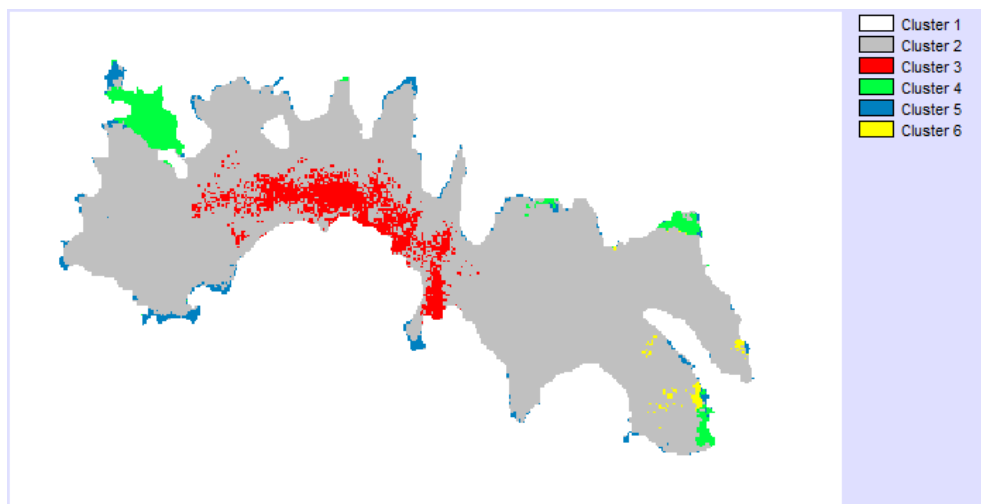


Figura 5.28 Clasificación fina (06 de noviembre de 2014)

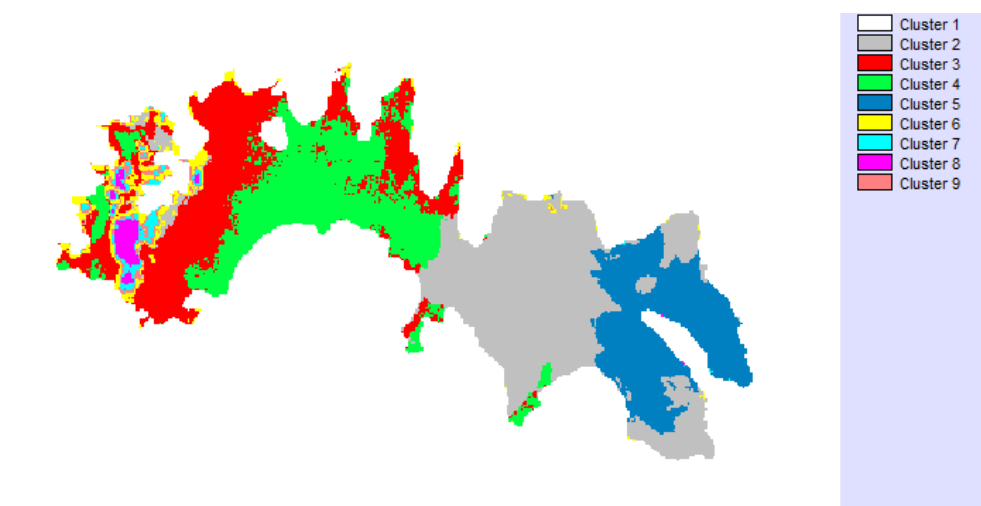


Figura 5.29 Clasificación gruesa (08 de diciembre de 2014)



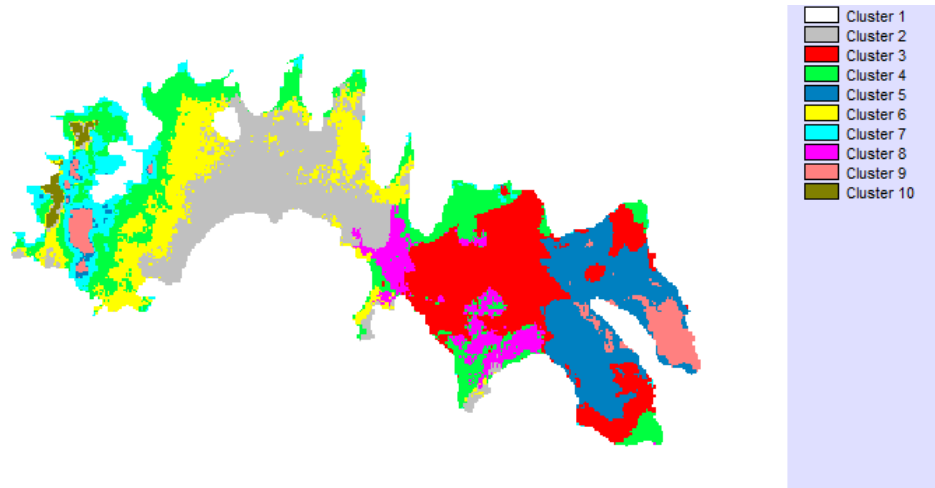


Figura 5.30 Clasificación fina (08 de diciembre de 2014)

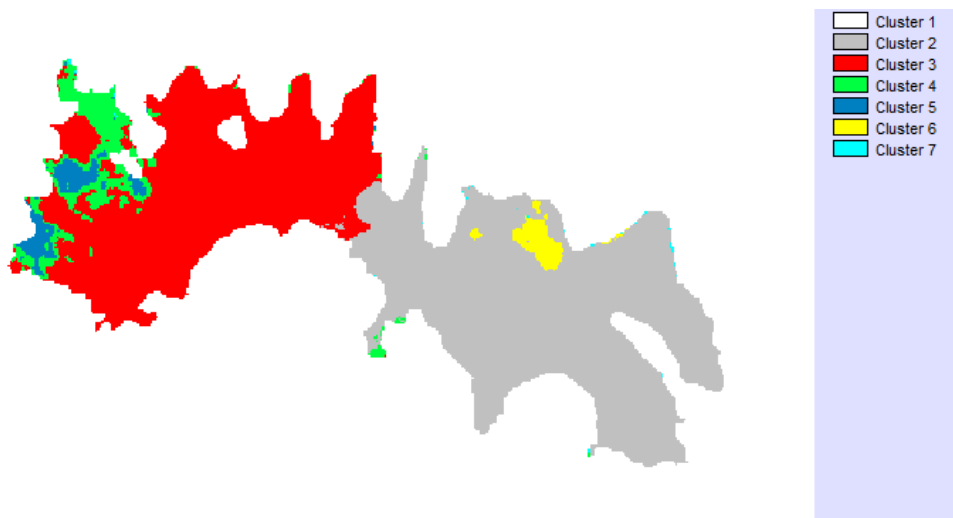


Figura 5.31 Clasificación gruesa (09 de enero de 2015)

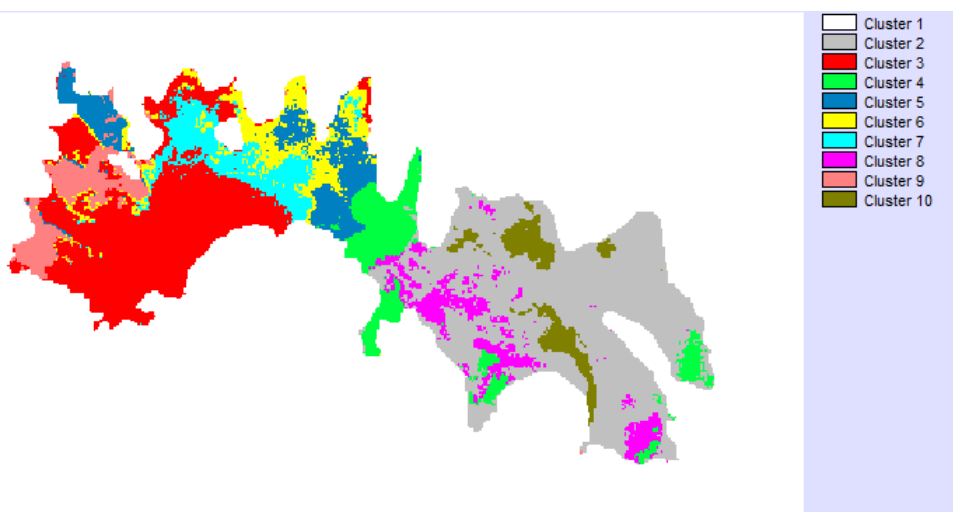


Figura 5.32 Clasificación fina (09 de enero de 2015)

## Capítulo 6. Resultados

La imagen del 28 de abril de 2014 (Figura 6.1) se encuentra en el final de la época del estiaje, se observa que las clases están sobre puestas sin encontrar áreas totalmente definidas, existe la posibilidad que la información recibida no pertenezca propiamente al cuerpo de agua sino al lecho inferior de la presa, en el extremo derecho de la imagen la profundidad del agua tiene un tirante menor a 1.5 m en época de estiaje. También podría suceder que la influencia de los ríos solo afecta su desembocadura, al tener cada corriente sus propias características su contacto con el agua de la presa ofrece distintos parámetros.

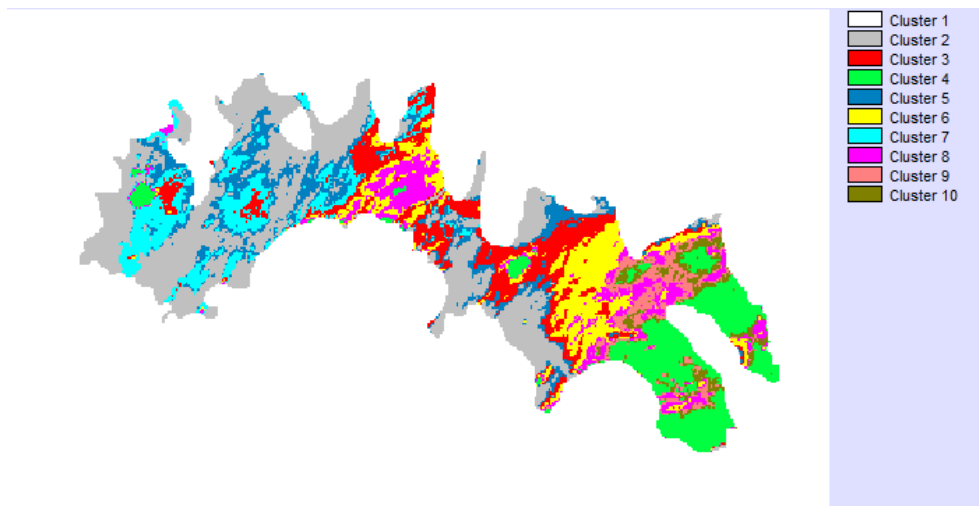


Figura 6.1 Fin de la temporada de estiaje (28 de abril de 2014)

Todo lo contrario con la imagen del 06 de noviembre de 2014 (Figura 6.2), aquí se encuentra el fin de la temporada de lluvias, el cuerpo de agua esta mezclado en su totalidad, al encontrarse cerca de sus niveles máximos de agua se podría suponer que ya no hay posibilidad de recibir información del lecho inferior de la presa.

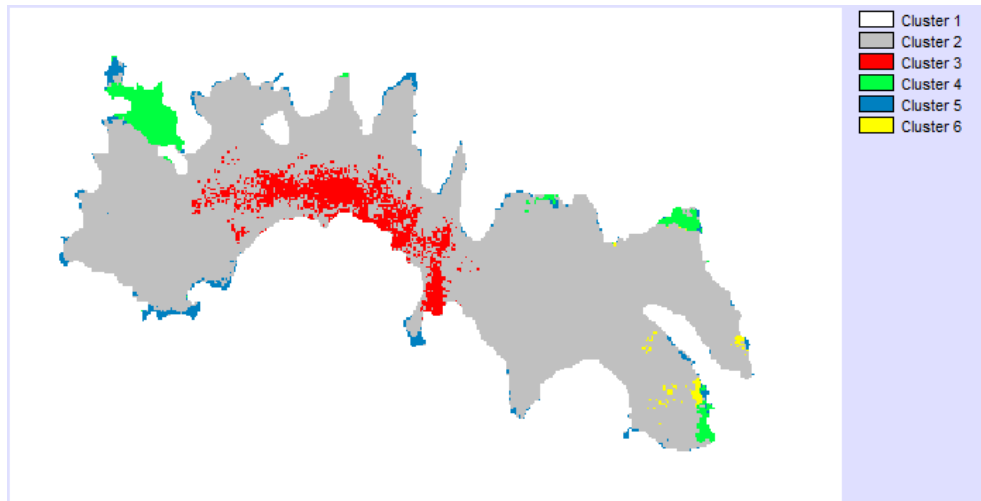


Figura 6.2 Fin de la temporada de lluvias (06 de noviembre de 2014)

Existen áreas de la presa donde estudiar los parámetros del agua sería relevante en otros proyectos de la presa, en la Figura 6.3 se marcan tres zonas que resultan importantes en el caso estudio.



Figura 6.3 Zonas de interés del caso estudio

La zona B se encuentra en la unión de la parte derecha de la presa con la desembocadura del Río San José Malacatepec, se forman tres trayectorias siendo la parte central posiblemente la corriente del agua y las dos laterales agua que se mantiene sin movimiento hacia la cortina de la presa. En las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se observan las regiones mencionadas.

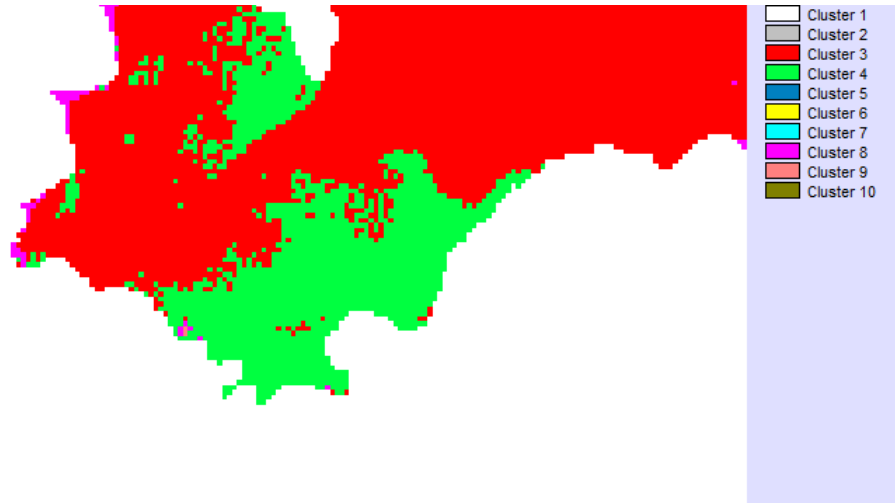


Figura 6.3 Zona B (22 de enero de 2014)

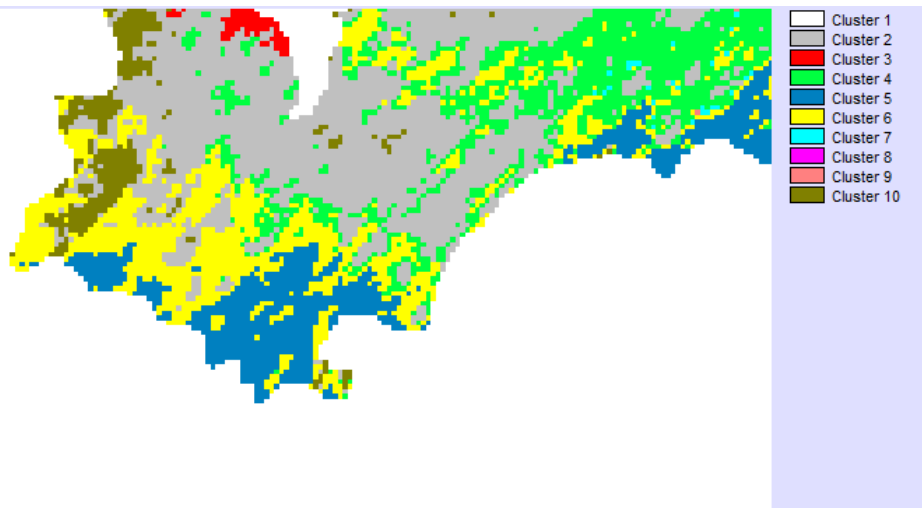


Figura 6.4 Zona B (11 de marzo de 2014)

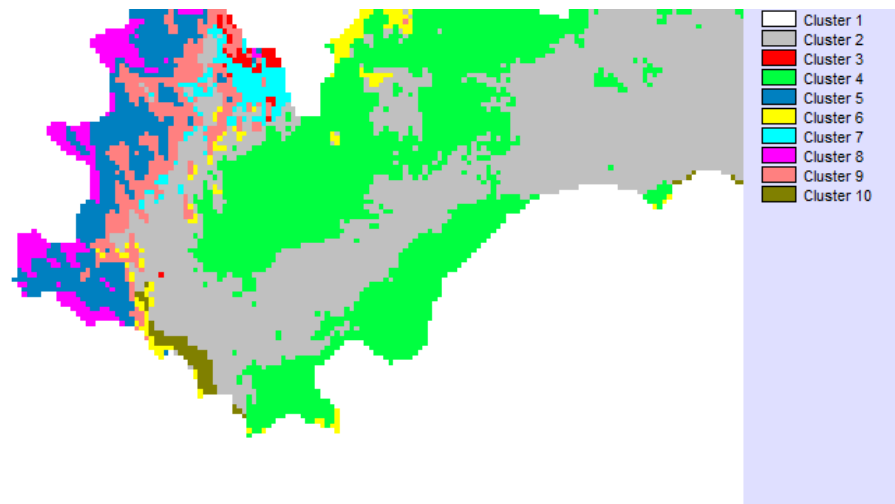


Figura 6.5 Zona B (02 de agosto de 2014)

La zona C se encuentra en el extremo derecho donde existe la salida de dos arroyos importantes que abastecen a la presa, no provienen ambos del mismo sitio y esta razón posiblemente afecta las características particulares de cada influente. Lo que resalta en esta zona es su similitud aún con las diferencias mencionadas, una explicación probable de este fenómeno es la baja profundidad del agua.

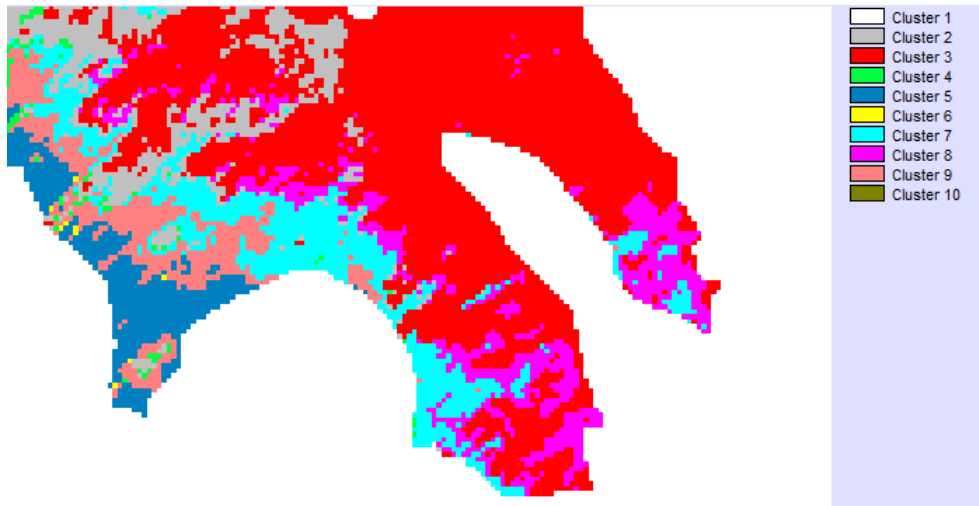


Figura 6.6 Zona C (11 de marzo de 2014)

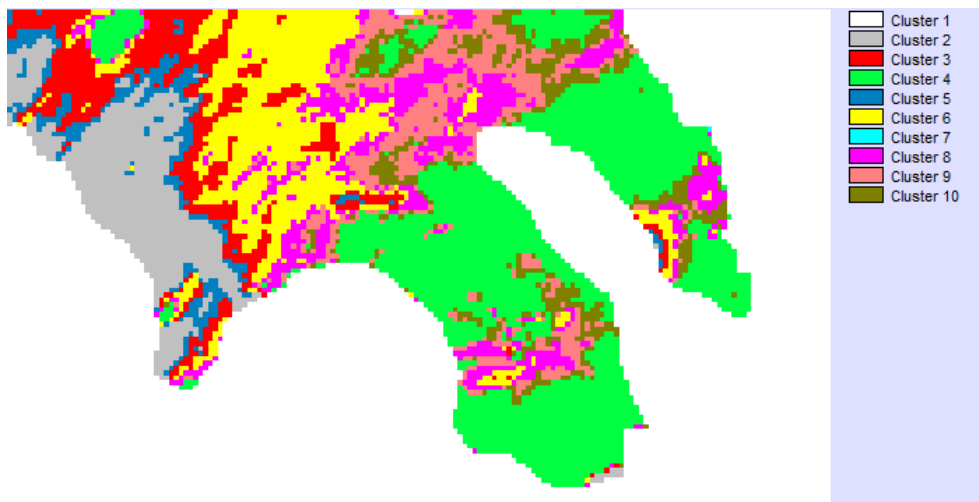


Figura 6.7 Zona C (28 de abril de 2014)

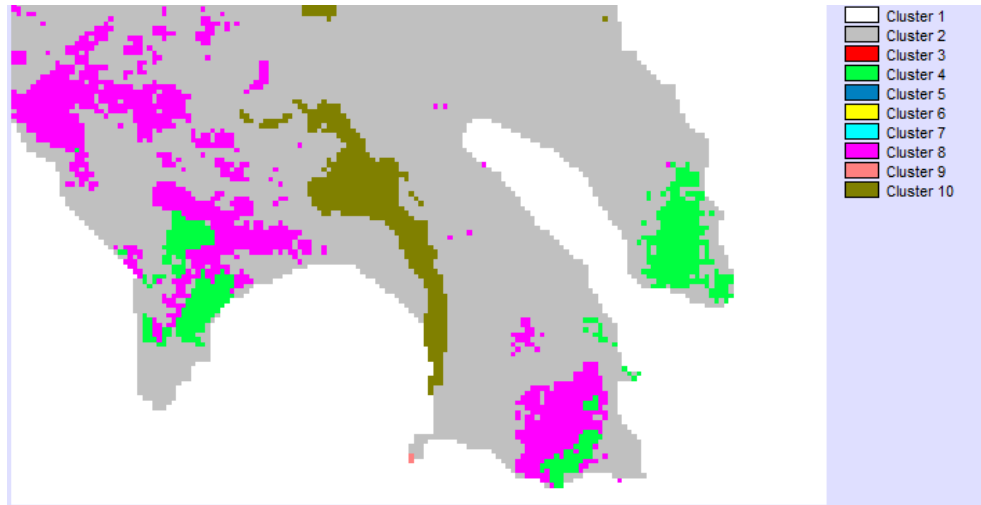


Figura 6.8 Zona C (09 de enero de 2015)

La zona D se localiza en la desembocadura del río San José Malacatepec, en la mayoría de las imágenes procesadas la zona siempre utiliza un color (clasificación) distinto a las demás áreas de la presa, una posibilidad de este fenómeno es su poco contacto con otras corrientes de agua por lo angosto de la zona. También se podría pensar que esta zona como otras tiene una profundidad muy pequeña en algunas épocas del año y lo que visualizamos es el lecho inferior del río.

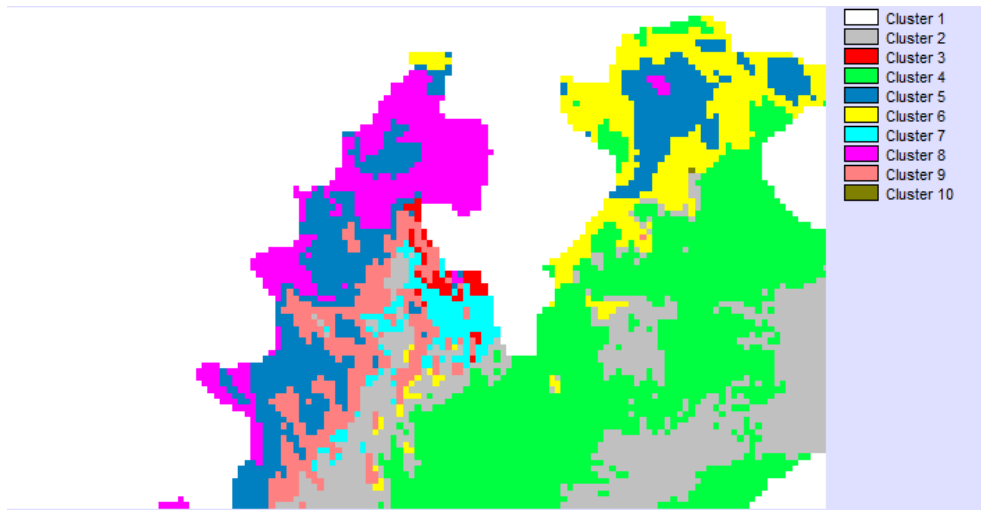


Figura 6.10 Zona C (02 de agosto de 2014)

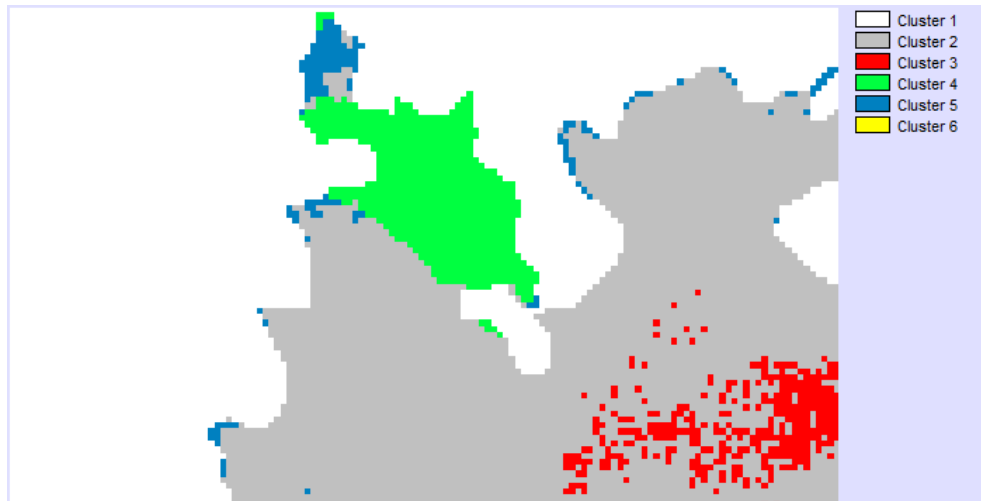


Figura 6.11 Zona C (06 de noviembre de 2014)

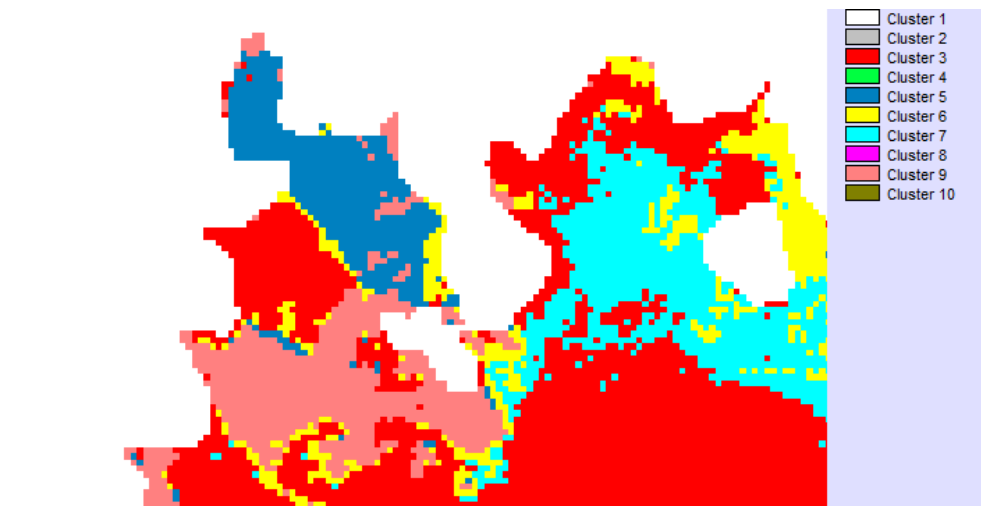


Figura 6.12 Zona C (09 de enero de 2014)

## Capítulo 7. Conclusiones

Se cumplió el objetivo general de este proyecto, a lo largo del trabajo escrito analizamos la dinámica superficial de la presa Villa Victoria con la PR y se obtuvo información sobre su movimiento entre periodos de forma satisfactoria.

De la misma forma se cumplieron los objetivos específicos, se realizó una metodología que puede ser utilizada en otro caso estudio, el proyecto de tesis descrito contiene información que puede servir como antecedente a los trabajos de campo que se realicen en la presa Villa Victoria.

El proyecto no tuvo un costo para la adquisición de las imágenes (mencionado en las ventajas del programa LANDSAT) y cumple con otro objetivo específico.

La sofisticación de la tecnología nos permite avanzar en proyectos que no hace mucho tiempo eran imposibles, la PR es beneficiada de estos avances, en el caso estudio es posible utilizar un conjunto de sensores que comparados con sus antecesores sobrepasan la experiencia de uso. Se resalta que la elección del LANDSAT 8 es ventajosa, además de tener resoluciones que se ajustan al caso estudio de manera correcta también posee la ventaja de su costo gratuito. Tener cerca todo tipo de información sin restrictivas permite la creación de mayores ideas de calidad y con esto solucionar problemas específicos de la sociedad.

Se consideró el análisis dinámico de la presa Villa Victoria como base para proyectos futuros, las imágenes seleccionadas permiten observar el comportamiento del embalse y las áreas que tienen la posibilidad de ser semejantes, los trabajos de campo tendrían una experiencia previa y con esto un ahorro de tiempo, esfuerzo y costo.

La metodología utilizada en el caso estudio puede ser aplicada en otros cuerpos de agua, tomando en cuenta consideraciones propias del entorno, un problema que se presentó es la poca profundidad del agua en la presa, lo que hace dudar si la información recibida pertenece al vital líquido o al lecho inferior del embalse, características como esta deben ser analizadas y discutidas para la definición de los mejores parámetros. La elección de seguir la metodología propuesta es parte del avance informativo que se pretende ofrecer.



## Bibliografía

- Aliza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Bogota.
- Arbelo, M. (14 de Enero de 2015). Obtenido de Teledetección:  
<http://marbelo.webs.ull.es/rs.html>
- Canada Center for Remote Sensing. (s.f.). *Fundamentals of Remote Sensing*.
- Comisión Nacional del Agua. (2005). *Fundamentos de teledetección espacial*. México DF.
- Comisión Nacional del Agua. (02 de Febrero de 2015). *Consejo de Cuenca del Valle de México*. Obtenido de Presa Villa Victoria:  
<http://cuencavalledemexico.com/organos-auxiliares/comision-de-cuenca-villa-victoria-san-jose-del-rincon/presa-villa-victoria/>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Reporte del clima en México Diciembre 2014*. México D.F: SMN.
- Elachi, C., & van Zyl, J. (2006). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- García Varela, A. (s.f.). *LANSDAT*.
- García-Meléndez, E. (2006). *Análisis visual de las imágenes*. León: EOI.
- Gtt NetCorp. (20 de Abril de 2013). Obtenido de Aplicaciones de imágenes de satélite:  
[www.gttnetcorp.com](http://www.gttnetcorp.com)
- H. Ayuntamiento de Villa Victoria. (2009). *Plan de Desarrollo Municipal 2009-2012*.
- H. Ayuntamiento de Villa Victoria. (03 de Febrero de 2015). *Villa Victoria*. Obtenido de  
<http://villavictoria.gob.mx/web/inicio.php>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Villa Victoria, México*.
- Ledezma Hernández, S. (2013). *Diagnostico ambiental de presas mediante el uso de percepción remota*. México D.F: UNAM.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (s.f.). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley & Sons.
- Martínez, R.-O. R. (2009). *Tipos de órbitas. Constelaciones de satélites*. Madrid: UPM.
- Ortega Martínez, I. (2009). *Espectroscopia FTIR de absorción solar y lunar para la determinación en columna de CO en la capa de mezcla de la Ciudad de México*. México D.F: UNAM.
- Perez G, U. (2005). *La percepción remota*. Tolima: UT.
- Ramos Franco, J. (2013). *Obtención de modelos de calidad del agua para el embalse Villa Victoria, Estado de México, aplicando técnicas de percepción remota*. México D.F: UNAM.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. (1999). *Física Vol. 2*. México D.F: Compañía Editorial Continental.
- Reuter, F. (2009). *Plataformas orbitales y sensores*. Santiago de Estero: UNSE.

- Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., & Ratier, A. (2002). An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *American Meteorological Society*, 977-992.
- SEOS. (25 de Febrero de 2015). *Introduction of Remote Sensing*. Obtenido de 3. Resolución: <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c03-p04.html>
- Sepúlveda Hirose, R. T. (2011). *Diseño de modelos de calidad del agua mediante el uso de percepción remota*. México D.F: UNAM.
- Universidad de Murcia. (28 de Enero de 2012). Obtenido de Fotointerpretación y teledetección: <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/>
- USGS. (21 de Enero de 2015). Obtenido de USGS Global Visualization Viewer : <http://glovis.usgs.gov/>