

2. PERCEPCIÓN REMOTA.

2.1 DEFINICIÓN:

La percepción remota de la Tierra se define como el uso de la radiación electromagnética para adquirir información sobre el océano, tierra y atmósfera sin estar en contacto físico con el objeto, superficie o fenómeno en estudio. Las medidas obtenidas por percepción remota son indirectas y de áreas amplias. (Martin, 2006)

La fotografía aérea es la forma original de percepción remota, jugó un importante papel en el descubrimiento de depósitos minerales y petróleo alrededor del mundo. Estos éxitos usando la región del visible del espectro electromagnético sugirieron la posibilidad de obtener buenos resultados usando otras longitudes de onda incluyendo el infrarrojo térmico y microondas. El desarrollo y despliegue de satélites artificiales para el estudio de la superficie del Tierra, comenzó en 1960 y proporcionó un lugar ventajoso para la adquisición de imágenes de la superficie de la Tierra (Sabins, 1987).

Los procesos generalizados y elementos que se involucran en la percepción remota electromagnética de recursos de la Tierra son (ver Figura 2.1):

- a) Propagación de la energía a través de la atmósfera
- b) Interacciones de energía con las características de la superficie de la Tierra.
- c) Retransmisión de la energía a través de la atmósfera
- d) Sensores aéreos y espaciales
- e) Datos de sensor en forma digital e impresa
- f) Uso de sensores para registrar variaciones de la forma en que las características superficiales de la Tierra reflejan y emiten energía electromagnética.
- g) Procesamiento de datos que incluye la examinación de datos usando dispositivos de interpretación de los datos obtenidos de los sensores.
- h) Compilación e integración de datos en sistemas de información geográfica.
- i) Toma de decisiones por parte de usuarios finales.

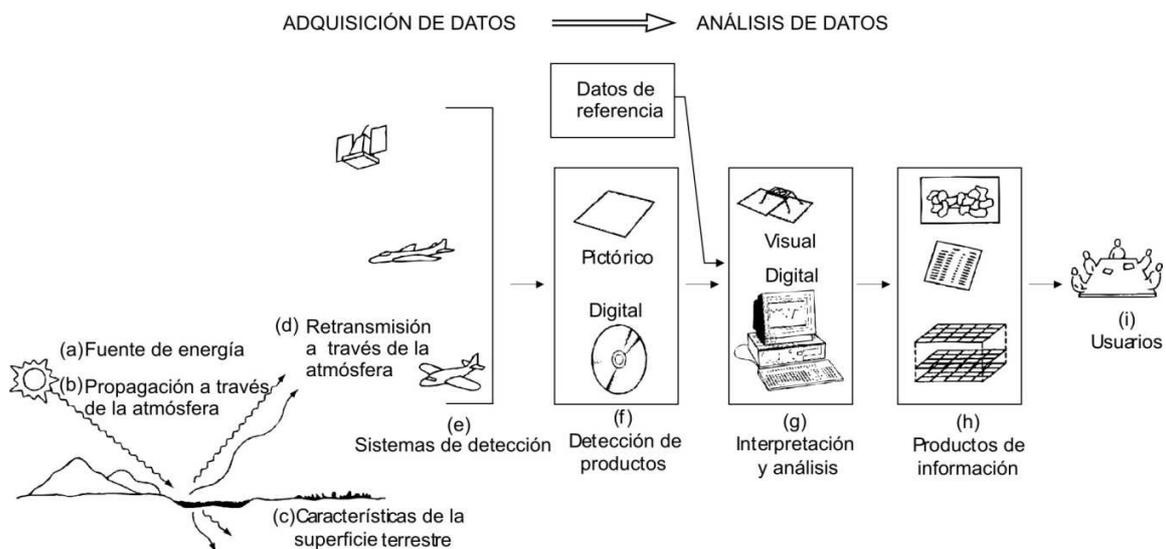


Figura 2.1. Percepción remota electromagnética de recursos de la Tierra (Modificada de Lillesand et al., 2008).

2.2 FUENTES DE ENERGÍA Y PRINCIPIOS DE RADIACIÓN.

El sol es la fuente de radiación electromagnética para la percepción remota. Todos los objetos continuamente emiten radiación electromagnética excepto los objetos en cero absoluto. Los objetos también reflejan radiación que ha sido emitida por otros objetos. Las cantidades geofísicas de interés obtenidas de los sensores remotos son inferidas de las propiedades de radiación electromagnética reflejada o emitida, a partir de la distribución de intensidad y frecuencia de esta radiación captada en un sensor. Esta radiación tiene 3 principales fuentes: radiación de cuerpo negro emitida desde la superficie, radiación solar reflejada y la energía retrodispersa de energía de pulsos dirigida transmitida por radares satelitales (Martin, 2006).

2.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La radiación electromagnética consiste en un campo eléctrico (E) que varía en magnitud en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Además un campo magnético (H) orientado perpendicularmente al campo eléctrico se propaga en fase con el campo eléctrico.

La energía electromagnética (ver Figura 2.2) muestra tres propiedades:

- *Longitud de onda* (λ) es la distancia de una cresta de onda a la siguiente, puede ser medida en cualquier unidad de longitud.

- La *frecuencia* es medida como el número de crestas que pasan por un punto fijo en un periodo dado de tiempo. Es a menudo medida en Hertz, unidad que equivale a un ciclo por segundo
- *Amplitud* es equivalente a la altura de cada pico y se mide comúnmente como niveles de energía expresada como Watt por metro cuadrado por micrómetro

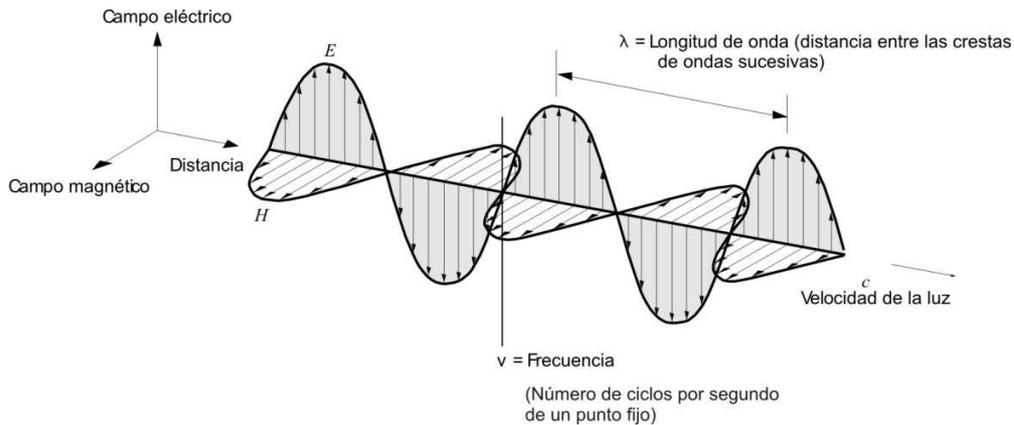


Figura 2.2 Componente eléctrica (E) y magnética (H) de la radiación electromagnética. Las componentes eléctrica y magnética están orientadas en ángulo recto una con respecto de otra y varía a lo largo de un eje perpendicular al eje de propagación (Tomada de Campbell, 2002).

La velocidad de la energía electromagnética (c) es constante a 299,893 Km/s. La longitud de onda y frecuencia (ν) están relacionadas:

$$c = \lambda \nu \dots 1$$

Por tanto las características de la energía electromagnética pueden ser especificadas usando tanto la frecuencia como la longitud de onda (Campbell, 2002). En percepción remota es común clasificar las ondas electromagnéticas por su ubicación en función de su longitud de onda dentro del espectro electromagnético (Figura 2.3). La unidad más usada para medir la longitud de onda a lo largo del espectro es el micrómetro (μm) (Sabins, 1987).

Aunque generalmente se asignan nombres a las regiones del espectro electromagnético por conveniencia, en realidad no hay una clara línea que divida entre una región y la otra. Esta división se ha creado a partir de varios métodos para detectar cada tipo de radiación más que de las diferencias inherentes a las características de energía de las diferentes longitudes de onda. El espectro óptico de 0.30 a 15 μm definen las longitudes de onda que pueden ser reflejadas y refractadas con lentes y espejos. El espectro de reflexión que se extiende desde 0.38 a 3.0μm,

definen la porción del espectro solar usado directamente por percepción remota. (Campbell, 2002)

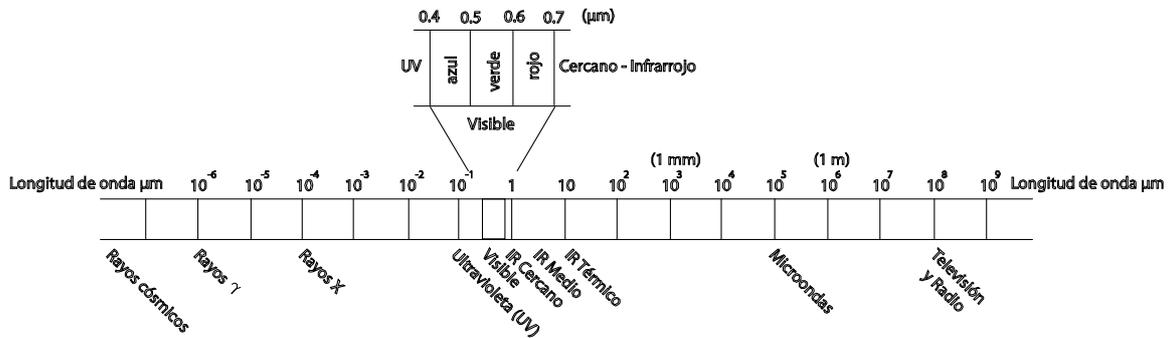


Figura 2.3. Espectro electromagnético (Tomada de Lillesand, & Kiefer, 2008,).

La porción del espectro visible es muy pequeña ya que la sensibilidad del ojo humano se extiende solo desde alrededor de $0.4 \mu\text{m}$ hasta aproximadamente $0.7 \mu\text{m}$. Consta de los segmentos primario aditivo comprendido entre $0.4-0.5\mu\text{m}$ (azul), $0.5 - 0.6\mu\text{m}$ (verde) y $0.6-0.7 \mu\text{m}$ (rojo). Los colores primarios están definidos de tal manera que ningún color primario puede formarse de la mezcla de otros dos y todos los demás colores pueden ser formados mezclando los tres primarios en proporciones adecuadas. Igual proporción de los primarios aditivos combinados forman la luz blanca.

El color de un objeto está definido por el color de la luz que refleja, La combinación de los tres primarios sustractivos definen los colores de los pigmentos y colorantes; cada uno de los tres sustractivos primarios absorben un tercero del espectro visible, el amarillo absorbe la luz azul y refleja el rojo y verde; el cian absorbe la luz roja y refleja la luz azul y verde; y magenta absorbe la luz verde y refleja la luz roja y azul. Una mezcla en iguales proporciones de pigmentos de los tres primarios sustractivos proporciona el negro. La energía ultravioleta (UV) colinda con el azul de la porción del visible del espectro electromagnético. Contiguo al final del rojo de la región del visible están tres diferentes categorías de ondas del infrarrojo (IR): IR cercano ($0.7-1.3\mu\text{m}$), IR medio ($1.3-3\mu\text{m}$) e IR térmico (más allá de $3.0-14 \mu\text{m}$) y con longitud de onda de $1\text{mm}-1\text{m}$ se encuentra la porción de microondas del espectro electromagnético.

Aunque varias características de la radiación electromagnética son más fáciles de describir con la teoría ondulatoria, otras teorías ofrecen una mejor comprensión de cómo interactúa la energía

electromagnética con la materia. La teoría de la partícula que sugiere que la radiación electromagnética está compuesta de muchas unidades discretas llamadas fotones o cuantos.

2.4 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

LEYES DE LA RADIACIÓN

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas. Las leyes de interés del presente estudio se enlistan a continuación.

Planck descubre que la energía electromagnética es absorbida y emitida en unidades discretas llamadas fotones. Planck define una constante h para relacionar la frecuencia (ν) con la energía radiante (Q):

$$Q = h\nu \quad \dots 2$$

Este modelo explica el *efecto fotoeléctrico*, la generación de corrientes eléctricas por exposición de ciertas sustancias a la luz, como el efecto del impacto de unidades discretas de energía sobre superficies de ciertos metales, causando la emisión de fotones. La cantidad de energía y la longitud de onda que un cuerpo emite dependen de la temperatura de este.

La *ley de Kirchhoff*, establece que la relación entre la radiación emitida y el flujo de radiación absorbido es el mismo para todos los cuerpos negros a la misma temperatura. Un cuerpo que absorbe intensamente radiación en una longitud de onda emite intensamente en esa misma longitud de onda.

Ley de Stefan-Boltzmann define la relación entre la radiación total emitida W y la temperatura T (temperatura absoluta en K)

$$W = \sigma T^4 \quad \dots 3$$

donde $\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Establece que un cuerpo negro caliente emite más energía por unidad de área que un cuerpo frío.

Ley de desplazamiento de Wien especifica la relación entre la longitud de onda de la radiación emitida y la temperatura de un cuerpo negro.

$$\lambda = 2897.8/T \quad \dots 4$$

Donde λ es la longitud de onda de la radiación máxima y T es la temperatura absoluta (K). Para cuerpos negros calientes, la emisión de radiación máxima ocurre en longitud de onda corta.

2.4.1 INTERACCION DE LA RADIACIÓN CON LA ATMÓSFERA

Toda radiación útil en la percepción remota pasa a través de la atmósfera terrestre y está sujeta a varias modificaciones debido a procesos físicos como:

Dispersión: es el cambio de dirección de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera o por moléculas largas de gases atmosféricos. La cantidad de dispersión depende del tamaño de las partículas, de su abundancia, de la longitud de onda de esta radiación y de la profundidad de la atmósfera que atraviesa. El comportamiento del fenómeno de dispersión se ilustra en la Figura 2.4

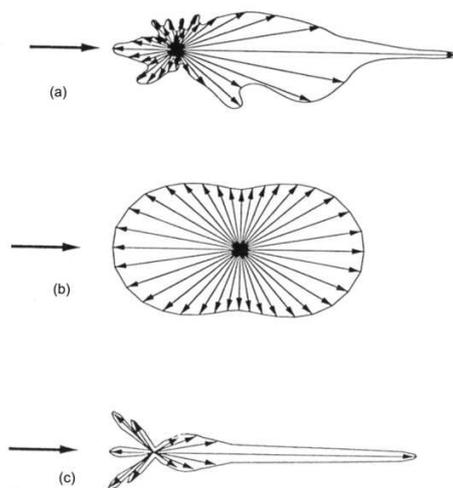


Figura 2.4. Comportamiento de la dispersión en tres clases de partículas atmosféricas. a) partículas atmosféricas de polvo y humo de forma irregular que crean un pico con gran dispersión hacia adelante. b) Moléculas atmosféricas muestran cierta simetría. c) Grandes gotas de agua crean un gran pico de dispersión hacia adelante (Tomado de Campbell, 2002)

Rayleigh demuestra que una atmósfera limpia está compuesta de gases atmosféricos que a su vez provocan la dispersión de la luz de una manera tal que la cantidad aumenta cuando la longitud de onda es más corta. La dispersión de Rayleigh ocurre cuando las partículas atmosféricas tienen diámetros pequeños con relación a la longitud de onda de la radiación, como pequeñas

partículas de polvo tales como nitrógeno N_2 (1.4\AA) y oxígeno O_2 . Estas partículas tienen diámetros más pequeños que la longitud de onda del visible y el infrarrojo cercano. Pero la dispersión de Rayleigh puede ocurrir en ausencia de impurezas atmosféricas esto es, a veces referida como dispersión de atmósfera limpia. Este es el proceso dominante en la parte alta de la atmósfera 9-10 Km. La ley de Rayleigh establece que esta dispersión está en función de:

$$\frac{1}{\lambda^4} \quad \dots 5$$

Dispersión Mie: causada por partículas atmosféricas mas grandes incluyendo polvo, polen, humo y gotas de agua. Es dominante en la atmósfera de 0 - 5 Km donde las partículas de gran tamaño abundan.

Dispersión no selectiva es causada por partículas mucho mayores que las λ de la radiación dispersada. No depende de las longitudes de onda. Todas las longitudes del visible son dispersadas por igual (haz blanquecino o gris). Los sensores excluyen las longitudes de onda corta.

Refracción: es la flexión del rayo de luz en el área de contacto entre dos medios con diferentes índices de refracción.

$$n = \frac{c}{c_n} \quad \dots 6$$

n es el índice de refracción

c es la velocidad de la luz en el vacío

c_n es la velocidad de la luz en el medio.

Asumiendo un medio uniforme (aire), la luz que pasa por un medio más denso (por ejemplo: vidrio) es desviada hacia la normal de la superficie. El ángulo que forma el rayo de luz que entra al medio más denso, con respecto a la normal de la superficie es llamado ángulo θ . El ángulo θ' que define la trayectoria del rayo refractado esta dado por la *ley de Snell*, que se enuncia como sigue:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \dots 7$$

Absorción: La absorción de radiación ocurre cuando la atmósfera impide o atenúa fuertemente la transmisión de la radiación a través de la atmósfera. Tres gases son responsables de la mayor absorción de radiación solar: ozono, dióxido de carbono y vapor de agua (Campbell, 2002).

2.4.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE

Reflexión: Ocurre cuando un rayo de luz es redireccionado al golpear en una superficie no transparente. Depende del tamaño de las irregularidades de la superficie.

Reflexión especular: redirecciona todo, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Reflexión difusa ocurre cuando una superficie irregular o rugosa dispersa en todas direcciones (Campbell, 2002).

Algunos mecanismos de interacción de la radiación con la superficie de un cuerpo se muestran en la Figura 2.5.

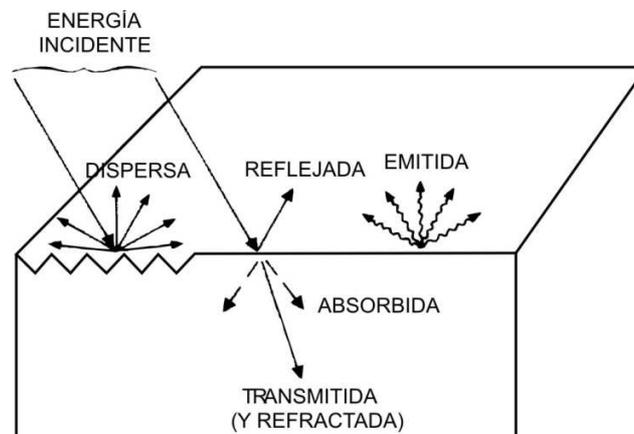


Figura 2.5. Mecanismos de interacción entre la energía electromagnética y la materia. (Modificado de Sabins, 1987)

2.4.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA VEGETACIÓN

Dependiendo del clima y si los suelos proceden directamente del sustrato subyacente o si han sido transportados, la vegetación puede mostrar variaciones con relación a la geología. Las plantas usan energía solar para convertir el agua y dióxido de carbono en carbohidratos y oxígeno a través del proceso de fotosíntesis. La interacción de la radiación con la clorofila se da como una consecuencia de que ésta última está incluida en organismos vivos por lo cual su metabolismo es fuertemente dependiente de los sistemas vasculares basados en el agua y estructuras celulares. La abundancia de agua en su estructura por lo tanto también controla estas interacciones.

El catalizador de la fotosíntesis es el pigmento de clorofila, una compleja proteína que contiene hierro. La clorofila absorbe la radiación solar para aumentar el nivel de energía de los electrones e impulsar el bombeo de protones a través de las membranas celulares de la planta que es la base

para su metabolismo. Esto se logra por las bandas de absorción cerca de 0.45 y 0.68 μm , en la parte azul y roja del espectro visible como se muestra en la Figura 2.6 (Drury, 2001). Es por eso que las hojas más sanas aparecen color verde.

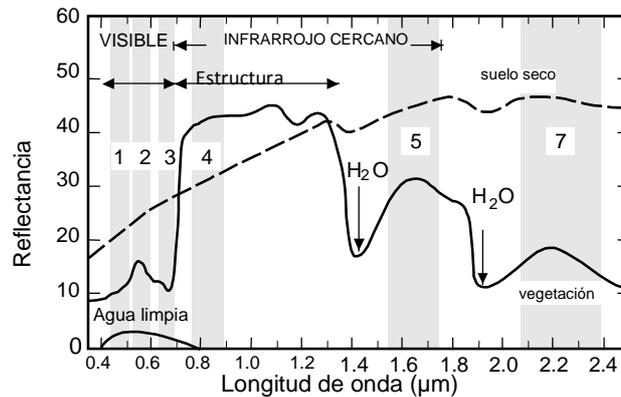


Figura 2.6. Típica curva de reflectancia espectral de una hoja, muestra el fuerte efecto de absorción por clorofila en la parte del visible del espectro, la eficiencia de reflexión de la longitud de onda del infrarrojo cercano (IRC) por sus células y la distintiva característica de absorción de contenido de agua en su estructura. Se muestra para comparación el espectro típico del suelo y agua limpia.

Además de las características de absorción, la clorofila puede estar hecha para emitir luz, o fluorescencia en dos estrechas bandas cercanas a 0.69 y 0.74 μm si se iluminara con un haz fuerte de luz tal como un láser. La estructura de las células vegetales es tal que más del 50% de incidencia de la radiación del infrarrojo cercano se refleja internamente para emitirse nuevamente. El resto se transmite directamente a través de las hojas. El agua en las células absorbe algo de energía en sus características celulares alrededor de 1.4 y 1.9 μm . La absorbancia está en función de la proporción del agua celular. Más allá de las 2.0 μm las hojas absorben radiación del infrarrojo cercano, ver la Figura 2.6.

Las diferentes estructuras celulares, la proporción de clorofila y otros pigmentos, contenido de agua y morfología de la superficie de las diferentes plantas tiene un marcado efecto en sus propiedades espectrales desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano (VIS-IRC). La reflectancia espectral de la vegetación crece muy rápidamente a medida que aumenta la longitud de onda más allá de 0.7 μm y 0.75 μm . Este cambio brusco en la reflectancia espectral es también

conocido como el límite rojo o meseta del infrarrojo. La altura de la meseta del Infrarrojo cercano depende de la especie de planta responsable, pero la posición exacta de la meseta del IR puede variar también de acuerdo al tipo de planta. Figura 2.7. Estos dos factores pueden fluctuar dentro de una especie individual si las plantas están bajo estrés como resultado de escasez de agua o nutrientes o de una situación por exceso de elementos traza tóxicos tales como el cromo. Sin embargo las plantas son conjuntos de hojas, espacio y ramas con diferentes tamaños y formas de hojas. Todas las interacciones individuales en la estructura de tales compuestos pueden interferir y ampliar el rango de la respuesta espectral. Esto facilita la discriminación entre especies, salud y miembros enfermos de la misma especie.

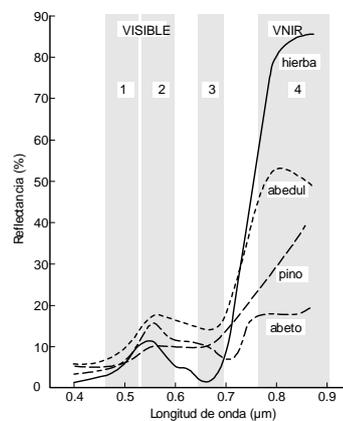


Figura 2.7 Rasgos espectrales de 4 tipos de vegetación con características similares en el visible pero fácilmente distinguibles en el infrarrojo cercano (VNIR por sus siglas en inglés). (Modificado de Drury, 2001)

Las plantas tienen ciclos de vida de duración variable, por lo tanto, sus propiedades espectrales no son fijas. Por ejemplo, una hoja caducifolia madura antes de caer, tiene un bajo contenido de clorofila lo que elimina la fuerte absorción roja, tal como se observa en la Figura 2.8. Durante estas variaciones en los ciclos de vida de las plantas, las células se encogen y secan, por lo que llegan a ser poco eficientes en la reflexión de radiación del infrarrojo cercano (IRC).

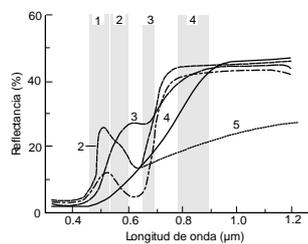


Figura 2.8. Los espectros 1 a 5 muestran las etapas progresivas del cambio de color de las hojas precedentes al Otoño, desde el verde-amarillo (2), rojo-naranja (3), marrón (4) y hojas secas (5). (Modificado de Drury, 2001)

2.4.4 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON EL AGUA.

Los cuerpos de agua tienen una respuesta diferente a la radiación que la del agua ligada a las moléculas de los minerales. Estos no muestran las bandas de transición vibracionales discretas tan características del agua molecular. En lugar de las curvas de respuesta espectral muestran características generales. En el rango del visible las interacciones dependen de una variedad de factores. Solo considerando propiedades de reflectancia, la cantidad reflejada de luz visible de una superficie de agua depende del ángulo de iluminación y de la presencia y naturaleza de las ondas, las aguas tranquilas pueden mostrar destellos solares mientras que las aguas rizadas lo hacen con menos frecuencia. En general, menos del 5% de radiación visible incidente es reflejada por el agua.

El agua tiene una alta transmitancia para todas las longitudes de onda del visible pero aumenta a medida que la longitud de onda disminuye, como resultado, solo la luz azul penetra más allá de una cierta profundidad, las grandes longitudes de onda se han absorbido en niveles menos profundos. En agua limpia por lo tanto es posible estimar la profundidad de la intensidad de la radiación visible reflejada del fondo, particularmente de la luz azul. Para profundidades mayores que 40 m sin embargo toda la radiación visible es absorbida y los cuerpos de agua aparecen oscuros.

También hay una cierta cantidad de dispersión de luz en el agua, la cual es responsable del color azul del agua incluso si es demasiado profunda para ver el fondo. Hay dos factores que contribuyen a este efecto: La dispersión de Rayleigh asegura que las longitudes de onda corta se dispersan más que las más largas y la disminución en la transmitancia con el aumento de la longitud de onda asegura que la dispersión de la luz azul es improbable que se absorba antes de que escape a la superficie.

Sedimentos suspendidos, plancton y pigmentos naturales, todos aumentan la reflectancia de la luz visible del agua, por lo que es posible estimar la cantidad de material suspendido en el agua con datos de percepción remota.

En la región del infrarrojo cercano el agua actúa casi como un cuerpo negro perfecto y absorbe virtualmente toda la energía incidente. Este es el único material natural con esta propiedad y así los cuerpos de agua pueden ser fácilmente distinguibles de otras superficies características en esta parte del IR del espectro electromagnético. Incluso si son someros o contienen mucho material suspendido. Siendo una buena aproximación de un cuerpo negro, el agua es un emisor casi perfecto de radiación infrarroja así como es un buen absorbente Figura 2.9. Esto significa que las

medidas de radiación infrarroja emitida en la región de 8-14 μm pueden ser usadas para calcular la temperatura de la superficie de cuerpo de agua exactamente.

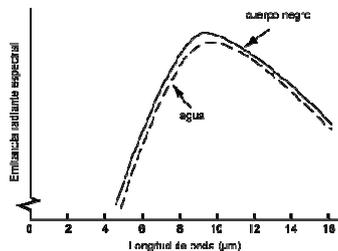


Figura 2.9. Medidas experimentales de la emisión radiante del agua revelan que es un cuerpo negro casi perfecto.

Una combinación de las propiedades del agua en masa y las de agua molecular controla la interacción de la energía radiante del agua retenida en los espacios de los poros de los suelos y rocas. El agua de los poros aumenta la absorbancia de la roca y suelos por lo que aparecen más oscuros que cuando están secos.

2.5. SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

De acuerdo a Sabins F. (1987), existen dos categorías principales de sistemas de percepción remota:

- *Sistema de marco*

Estos sistemas adquieren una imagen de un área o estructura en el terreno. Las cámaras vidicon son ejemplos comunes de tales sistemas. El ojo humano es considerado un sistema de estructura. Una cámara emplea un lente para formar una imagen de la escena en el plano focal, que es el plano en el que la imagen está bien definida. Un obturador se abre a intervalos seleccionados para permitir que la luz entre a la cámara, donde la imagen es registrada en una película fotográfica. Un vidicon es un tipo de cámara de televisión que registra la imagen en una superficie fotosensible cargada electrónicamente.

- *Sistema de barrido o escaneado*

El sistema de escaneado emplea un detector único con campos estrechos de visión que barre a través del terreno para producir una imagen. Cuando fotones de energía electromagnética radiada o reflejada desde el terreno son encontrados por el detector una señal eléctrica que se produce varía en proporción al número de fotones. La señal eléctrica es amplificada, registrada en una cinta magnética y reproducida posteriormente para producir una imagen. Todos los sistemas

de escaneo barren el campo visual del detector a través del terreno en una serie de líneas de escaneo paralelas. Los cuatro modos de escaneo más comunes son:

1. Sistema de barrido de trayectoria horizontal: Es el sistema más utilizado, emplea un espejo biselado que es rotado por motor eléctrico con un eje horizontal de rotación alineada paralelo con la dirección del vuelo. El espejo barre a través del terreno en un patrón de escaneo de líneas paralelas orientadas perpendicularmente a la dirección de vuelo, ver Figura 2.10. La energía radiada o reflejada desde el suelo es enfocada sobre el detector por espejos secundarios.

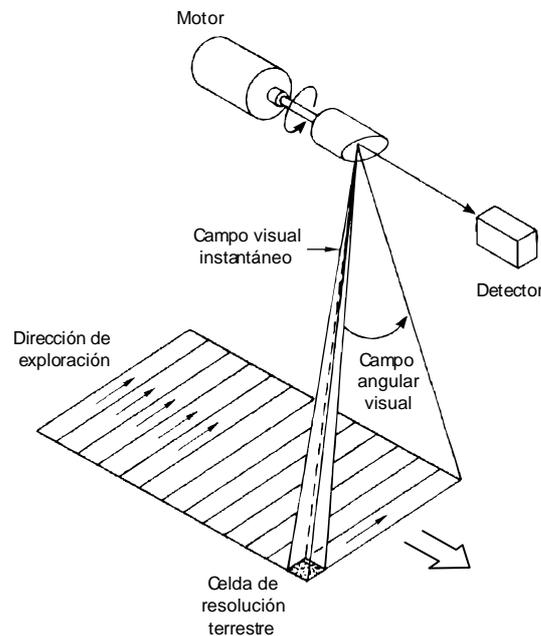


Figura 2.10 Sistema de barrido de trayectoria horizontal

2. Sistema de barrido circular, en este tipo de sistema el motor de escaneo y el espejo son montados con un eje vertical de rotación que barre en trayectoria circular el terreno como se observa en la Figura 2.11. Solo la parte delantera del barrido se registra para obtener imágenes. Una ventaja de este sistema es que la distancia entre escáner y terreno es constante y todas las celdas de resolución de suelo tienen la misma dimensión. La principal desventaja es que la mayoría de las imágenes y sistemas de despliegue son diseñados para datos de escaneo lineal por lo que los datos de escaneo circular deben ser reformateados antes del procesamiento. Los sistemas de escaneo

circular se usan para reconocimiento de propósitos en helicópteros y aeronaves de bajo vuelo.

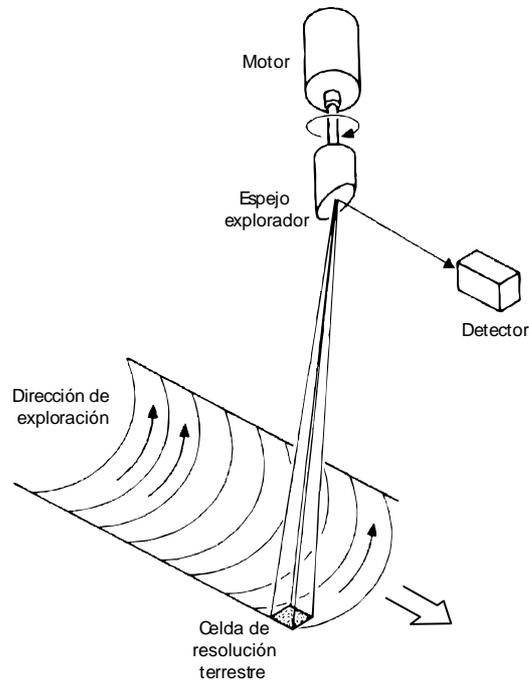


Figura 2.11 Sistema de barrido circular

3. Sistemas de barrido a lo largo de la trayectoria: Con este sistema se logra una alta resolución espacial y espectral. El eje se ubica a lo largo de un arreglo lineal orientado en forma normal a la trayectoria del vuelo y el IFOV (instantaneous fields of view)¹ Ver Figura 2.12

¹ IFOV es el ángulo sólido a través del cual un detector es sensitivo a la radiación.

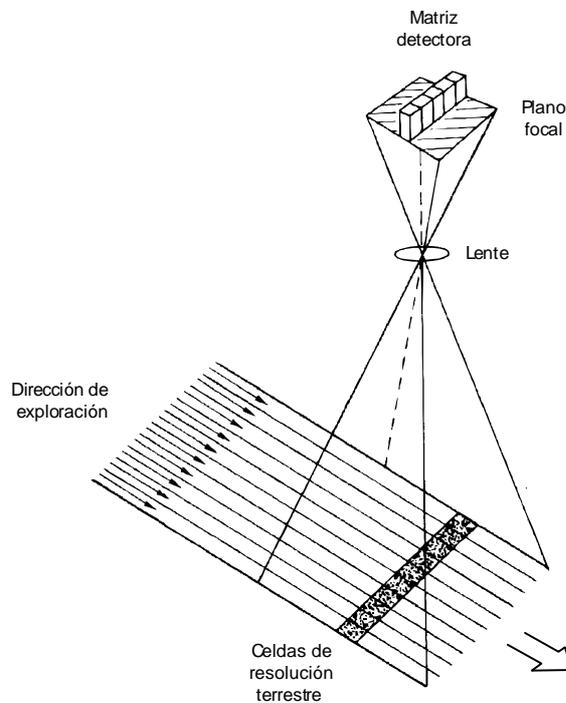


Figura 2.12 Sistemas de barrido a lo largo de la trayectoria

2.6. ADQUISICIÓN DE DATOS

Los sistemas de percepción remota colectan datos análogos (fotos aéreas) y/o digitales (matriz de valores de brillo, obtenida a partir del uso de escáner)

Una imagen puede estar representada por pequeños cuadros de igual tamaño y forma: pixel (picture element). El brillo de cada pixel está representado por un valor numérico DN.

Los datos de percepción remota están colectados usando sistemas de percepción remota pasivos o activos. Se requiere de dispositivos que registren la energía electromagnética. Existen dos tipos de sensores. Los sensores pasivos (fuente de radiación externa) o activos (generan fuente de radiación), instalados en plataformas colocadas a cierta distancia del objeto de estudio. Estas plataformas pueden estar situadas en un avión o en el exterior de la atmósfera terrestre como en un satélite.

2.7. ÓRBITAS DE LOS SATÉLITES

Los principales tipos de orbitas de observación de la Tierra:

- Geoestacionaria: es aquella en la que el satélite siempre está en la misma posición con respecto a la Tierra
- Orbitas sincronizadas con el sol
- Orbitas inclinadas: Tienen una inclinación entre 0° y 90° estos satélites no están sincronizados con el sol y, por tanto, ven cada lugar de la tierra a diferentes horas

2.8. VARIABLES DETECTADAS POR LA PERCEPCIÓN REMOTA

Variables que se pueden medir directamente, lo que significa que los datos obtenidos pueden proveer información fundamental biológica y/o física, sin necesidad de contar con datos *in situ*. (Por ejemplo, mapeo de temperaturas)

Variables híbridas creadas analizando sistemáticamente más de una variable biofísica. (Modelo para detectar daños en la vegetación a partir de contenido de clorofila, temperatura, contenido de humedad)

2.9. RESOLUCIÓN DE INSTRUMENTOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La resolución es la medida de la capacidad de un sistema óptico para distinguir entre señales que están espacialmente cerca o espectralmente similar. Se enlistan a continuación los diferentes tipos de resolución:

- Resolución espectral. Número y ancho de los intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético para el cual el sensor es sensible.
- Resolución espacial: Medida de menor separación angular o lineal entre dos objetos que pueden ser resueltas por el sensor
- Resolución temporal: Es la frecuencia de obtención de imágenes
- Resolución radiométrica: Numero de niveles digitales para expresar los datos recogidos

2.10 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES:

El Pre-procesamiento se refiere a las operaciones que son preliminares para el análisis principal, esto es, la restauración de la imagen, que involucra la corrección de distorsión, degradación y ruido introducido durante el proceso de imagen. La restauración de la imagen produce una imagen corregida tan cercana como es posible, tanto geométrica como radiométricamente, a las características de la energía radiante de la escena original. Para corregir los datos de percepción remota se deben determinar errores internos y externos. Los errores internos son creados por el mismo sensor, mientras que los errores externos son debidos a las perturbaciones de la plataforma y la modulación de la atmósfera y las características de la escena que son variables en la naturaleza (Jensen, 1996).

2.10.1 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA:

Las señales de radiación electromagnética colectadas por satélites están modificadas por dispersión y absorción por gases y aerosoles mientras viajan a través de la atmósfera de la superficie de la Tierra al sensor. La absorción gaseosa así como la dispersión gaseosa o dispersión de Rayleigh pueden ser caracterizadas mientras que la absorción por aerosoles dificulta la caracterización debido a su variación en tiempo y espacio, estos son causa de grandes limitaciones para la normalización radiométrica de datos satelitales (Song, *et al.*, 2001).

Las primeras operaciones que se realizan son los procedimientos basados en esfuerzos para modelar el comportamiento físico de la radiación a medida que pasa por la atmósfera. La aplicación de estos modelos permite observar reflectancias para aproximarse a los valores verdaderos que puedan ser observados bajo una atmósfera limpia, mejorando así la calidad de la imagen y el análisis de la precisión.

Los modelos físicos tienen ventajas importantes con respecto a la precisión y aplicabilidad para una gran variedad de circunstancias. Pero esto también tiene significativas desventajas. A menudo esto es muy complejo, usualmente requiere de programas de cómputo complicados. Una limitación más importante es el requerimiento de información meteorológica detallada correspondiente a la humedad atmosférica y las concentraciones de partículas atmosféricas. Tales datos pueden ser difíciles de obtener con el detalle necesario y puede aplicarse a pocos puntos dentro de la escena Landsat. También las condiciones atmosféricas varían con la altitud y los datos de radiosondeo que representan cambios con la altitud son rutinariamente colectados solo en

pocas localizaciones, aunque la disponibilidad de la colección de datos por satélites meteorológicos ofrece la posibilidad para aumentar el uso de tales métodos (Campbell, 2002)

El pre-procesamiento radiométrico influye en los valores de brillo de una imagen para corregir por malfuncionamiento del sensor o para ajustar los valores para compensar por degradación atmosférica. Cualquier sensor que observe la superficie de la tierra que use visible o visible cercano puede registrar una mezcla de dos tipos de brillo. Un brillo es debido a la reflectancia de la superficie de la tierra, (brillo que es de interés para la percepción remota, sin embargo también observa los brillos de la atmósfera), y el otro brillo que es debido a los efectos de dispersión. Por lo tanto, un valor digital observado de brillo puede ser en parte el resultado de la reflectancia de la superficie y en parte el resultado de la dispersión de la atmósfera. Nosotros no podemos distinguir inmediatamente entre los dos brillos pero un objetivo de la corrección atmosférica está enfocado en identificar y separar estas dos componentes. Idealmente la corrección atmosférica podría encontrar una corrección separada para cada píxel en cada escena; en la práctica, podemos aplicar la misma corrección para una banda entera o aplicar un factor individual para una región local dentro de la imagen. (Campbell, 2002)

2.10.1.1 CORRECCIÓN DEL ERROR DEL SENSOR DEL SISTEMA

En ocasiones el sistema de percepción remota no funciona apropiadamente, resultando en errores radiométricos en los datos. Algunos de los errores radiométricos más comunes son: pérdida de línea, bandeamiento y problemas de inicio de línea. El sistema de escaneo Landsat Thematic Mapper genera un único tipo de ruido de línea de escaneo, el cual puede estar en función de:

Ganancia relativa y/o diferencias de compensación entre los 16 detectores dentro de una banda (causando creación de bandas) y/o Variación entre vecinos hacia adelante (W-E) y a la inversa (E-W) escaneo de los 16 detectores, causando bandeamiento. Existen métodos de filtrado para remoción de ruido de la línea de escaneo de las imágenes Landsat TM. Sin embargo el procedimiento puede no ser adecuado para datos en los que van a ser usados para extraer información biofísica cuantitativa. Eventualmente los sistemas de escaneo fallan para coleccionar datos al inicio de la línea de escaneo. Esto es llamado problema de inicio de línea.

Corrección para el error de la atenuación ambiental.

Cuando los sistemas de percepción remota funcionan adecuadamente, errores radiométricos pueden ser introducidos en los datos del sensor remoto. Las dos fuentes más importantes de atenuación ambiental incluyen:

- Atenuación atmosférica causada por dispersión y absorción en la atmósfera y,
- Atenuación topográfica.

Remoción de los efectos atmosféricos en datos de percepción remota.

La atenuación atmosférica puede ser removida por datos de percepción remota usando una de varias aproximaciones de acuerdo a Jensen (1996) El método de corrección radiométrica está en función de la naturaleza del problema, el tipo de datos disponibles de percepción remota, la cantidad de información de datos atmosféricos históricos *in situ* disponibles y la exactitud de la información biofísica disponible que será extraída de los datos de percepción remota.

Cuando se trata de extraer información biofísica de cuerpos de agua (por ejemplo clorofila a, sedimentos suspendidos o temperatura) o superficies vegetadas, las diferencias sutiles en la reflectancia (o emitancia) entre los constituyentes importantes pueden ser tan pequeños que la atenuación atmosférica la hace inseparable. En estos casos es necesario calibrar los datos de percepción remota con medidas biofísicas hechas *in situ* al mismo tiempo que el sensor remoto recolecta los datos. Sin embargo los coeficientes y constantes obtenidos tanto de las medidas *in situ* como de las medidas de percepción remota usualmente no se extienden geográficamente o a través del tiempo.

Es posible el uso de un modelo atmosférico para corregir los datos de percepción remota. Una atmósfera asumida es calculada usando la época del año, altitud, latitud y longitud del área de estudio. Esta aproximación puede ser exitosa cuando la atenuación atmosférica es relativamente pequeña comparada con la señal del terreno detectada de forma remota. El uso de un modelo atmosférico en conjunto con medidas atmosféricas *in situ* adquiridas en el momento en que se realiza la colección de datos, proporciona mejores resultados. Esto es conocido como corrección radiométrica absoluta. Teóricamente, el método de cancelación de la banda es capaz de proveer buenos resultados ya que utiliza trayectorias idénticas atmosféricas para canales que se están comparando. Esto es llamado corrección radiométrica relativa. (Jensen, 1996)

Es importante hacer notar que aunque ciertos procedimientos son frecuentemente usados no puede haber una lista estandarizada de los procedimientos de pre-procesamiento porque cada proyecto requiere de una atención individual y algunas decisiones de pre-procesamiento pueden ser de preferencia personal. Además la calidad de los datos de la imagen varía en gran medida,

pero algunos datos pueden no requerir el pre-procesamiento que debería ser necesario en otros casos. Jensen (1996) asegura que el pre-procesado en algunos casos puede ser de gran utilidad no obstante en algunos casos los resultados podrían no ser claros para la interpretación.

2.10.1.2 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA ABSOLUTA DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA

La radiación solar no es afectada cuando viaja a través del vacío o el espacio. Cuando esta interactúa con la atmósfera de la Tierra es dispersada y absorbida. La suma de estas dos formas de pérdida de energía es llamada atenuación atmosférica. Este tipo de correcciones están orientadas a la obtención de reflectancia de superficie y requiere de condiciones atmosféricas ópticas como parámetros de entrada. Este tipo de corrección se puede subdividir en:

- Corrección atmosférica basada en la imagen, se aplica principalmente usando información extraída desde la imagen del satélite. Es decir, se usan datos derivados de análisis estadísticos de los datos de píxeles crudos. El más simple método es la sustracción del mínimo Número Digital (DN) en cada banda. Otros métodos se enlistan a continuación
 - Píxel Oscuro o Sustracción del Objeto Oscuro o método del Mínimo DN del Histograma, Densidad Oscura de Vegetación (DDV)
 - Método de Regresión.
- Correcciones que usan datos independientes para las condiciones ópticas incluyendo datos históricos, estándar y meteorológicos así como medidas in situ. Dentro de esta categoría de correcciones se encuentra ATCOR-2, se basa en información meteorológica disponible en el momento en que el satélite recorrió el área de estudio

En un caso ideal la energía radiante registrada por los detectores es una función absoluta de la cantidad del flujo radiante del campo de visión instantáneo (IFOV) de investigación. En la realidad otra energía radiante puede entrar al campo de visión desde diferentes trayectorias. La Figura 2.13 representa varias trayectorias y factores que determinan la radiancia que llega al sensor.

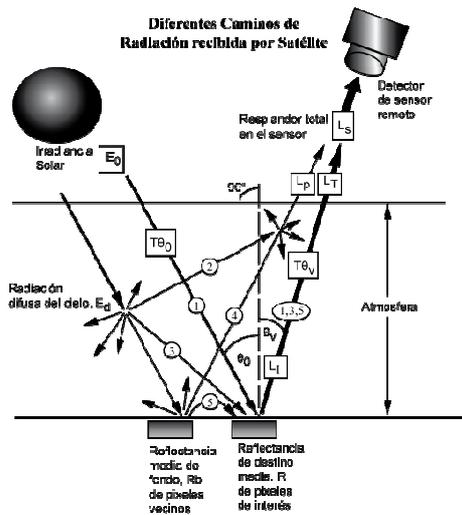


Figura 2.13 Trayectorias y factores que determinan la radiancia que llega al sensor (Jensen, 1996)

La trayectoria 1 contiene la energía electromagnética desde el sol que fue atenuada muy poco antes de iluminar el terreno dentro del IFOV

La trayectoria 2 contiene energía electromagnética que podría no llegar a la superficie de la Tierra, debido a la dispersión en la atmósfera causando la redirección de la trayectoria hacia el campo de visión del sensor.

La trayectoria 3 contiene energía desde el sol que pasa por algún tipo de dispersión (Rayleigh, Mie y/o selectiva) y tal vez por alguna absorción y re-emisión antes de iluminar el área de estudio.

La trayectoria 4 contiene radiación que fue reflejada o dispersada cerca del terreno ya sea nieve, concreto, suelo, agua y/o vegetación dentro del IFOV del sensor. La energía no ilumina en realidad el área de estudio.

La trayectoria 5 es la energía que fue reflejada desde la cercanía del terreno en la atmósfera y dispersada o reflejada sobre el área de estudio.

Solo una pequeña cantidad de irradiancia es reflejada realmente por el terreno en la dirección del satélite. Si se asume la superficie de la tierra como un reflector difuso (superficie lambertiana) la cantidad total de flujo radiante ($W m^{-2}$) desde la superficie de la Tierra hasta el sensor es

$$L_T = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RT_{\theta_0} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos\theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \quad (Wm^{-2}sr^{-1}) \quad \dots 7$$

Idealmente la radiancia que registra el sensor L_s sería igual a la radiancia que regresa desde el área de estudio. Sin embargo esto no sucede, La radiancia total (L_T) es diferente a la radiancia registrada por el sensor (L_s), debido a la radiancia agregada desde diferentes trayectorias que entran en el IFOV del sensor. A esto se le llama Trayectoria de radiancia L_p . Por lo tanto la radiancia total registrada por el sensor es la suma de de la trayectoria de radiancia total y la radiancia desde la superficie de la Tierra hasta el sensor.

$$L_S = L_T + L_p (Wm^{-2}sr^{-1}) \quad \dots 8$$

La correccional atmosférica intenta minimizar o remover la contribución de la trayectoria de radiancia L_p (Jensen, 1996)

2.10.1.3 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA RELATIVA DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA

Esta corrección no produce valores de reflectancia de superficie. El propósito es normalizar imágenes multitemporales para que las imágenes corregidas parezcan como si se hubieran obtenido bajo las mismas condiciones atmosféricas y con el mismo sensor como la imagen de referencia. La corrección relativa toma una banda y/o imagen como referencia y transforma las otras bandas y/o imágenes para igualarlas. Por ejemplo:

- Método de Normalización Multitemporal
- Análisis de Cromaticidad.

2.10.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA:

Los datos de percepción remota usualmente contienen tanto errores geométricos sistemáticos como no sistemáticos. Estos errores pueden ser divididos en dos clases:

1. Los que pueden ser corregidos usando efemérides de la plataforma y conocimiento de la distorsión del sensor.
2. Los que no pueden ser corregidos con exactitud sin un número suficiente puntos de control de tierra. Un punto de control en tierra (PCT) es un punto en la superficie de la Tierra donde tanto la imagen coordenada como el mapa coordenado puedan ser identificados. Estas distorsiones geométricas pueden ser corregidas a través del análisis de

las características del sensor y efemérides incluido el escaneo sesgado, distorsión panorámica, velocidad de la aeronave y geometría perspectiva. Estos pueden ser corregidos solo a través del uso de PCT.

Dos procedimientos comunes de corrección geométrica comúnmente utilizados son:

1. Rectificación imagen a mapa es el proceso por el cual la geometría de una imagen es hecha planimetría, este proceso normalmente implica la selección de PCT's.
2. Registro imagen a imagen es el proceso de traslación y alineación por el cual dos imágenes de geometría similar y de la misma área geográfica están posicionados coincidentes respecto a los demás de manera que los elementos de la misma área aparezcan en el mismo lugar que las imágenes registradas. Este tipo de corrección geométrica es usada cuando no es necesario tener cada píxel asignado a una única coordenada x, y en una proyección de mapas. Se realizan cuando se integran los datos a un sistema de integración geográfica (Campbell, 2002).

2.11 DESCRIPCIÓN DE DATOS

- DATOS RASTER

a) Imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7, sensor ETM+

AÑO	PLATAFORMA	SENSOR	MES	DIA	ARCHIVO
2002	Landsat 7	ETM+	Mayo	03	L71029046_04620020503
2002	Landsat 7	ETM+	Noviembre	11	L71029046_04620021111

La plataforma LANDSAT 7 se lanzó en abril de 1999 y continúa en funcionamiento en la actualidad. Sigue una órbita sincronizada con el sol. Está colocada a una altitud de 705 km y cubre el planeta cada 16 días excepto en altas latitudes polares. Tiene una resolución de 30x30 m².

Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus): Cuenta con 8 bandas espectrales incluyendo una banda pancromática y una banda térmica.

Banda 1 Visible 0.45 – 0.52 μm

Banda 2 Visible 0.52 – 0.60 μm

Banda 3 Visible 0.63 – 0.69 μm

Banda 4 Infrarrojo cercano (NIR) 0.76 – 0.90 μm

Banda 5 Infrarrojo cercano 1.55 – 1.75 μm

Banda 6 Térmico 10.40 – 12.50 μm

Banda 7 Infrarrojo medio (MIR) 2.08 – 2.35 μm

Banda 8 Pancromática 0.52 – 0.90 μm^2

En la tabla 2. 1, se enlistan las principales aplicaciones que se les da a las diferentes bandas espectrales del sensor ETM+.

Tabla 2.1. Principales aplicaciones de las bandas del sensor ETM+

BANDA	LONGITUD DE ONDA (μm)	LOCALIZACIÓN ESPECTRAL NOMINAL	APLICACIONES PRINCIPALES
1	0.45 - 0.52	Azul	Diseñado para penetración de cuerpos de agua, útil para el mapeo de aguas costeras. Útil para discriminación de suelo/vegetación, mapeo de tipos de bosques e identificación de características culturales
2	0.52 - 0.60	Verde	Diseñado para medir el pico de reflectancia de vegetación, para la discriminación de vegetación y evaluación del vigor(salud)
3	0.63 - 0.69	Rojo	Diseñado para detectar la absorción de la clorofila, ayuda a la diferenciación de especies de plantas
4	0.76 - 0.90	IR Cercano	Útil para determinar picos tipos de vegetación, salud y contenido de biomasa, para delinear cuerpos de agua y discriminación de suelo húmedo.
5	1.55 - 1.75	IR Medio	Indicativo de contenido de humedad de la vegetación y suelo. Útil para la diferenciación de nieve y nubes.
7	2.08 - 2.35	IR Medio	Útil para la discriminación de tipos de minerales y rocas.

² http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php

- DATOS VECTORIALES

- b) Hidrología superficial Jalisco- Guanajuato

- Proyección cartográfica: UTM

- Datum de referencia: WGS84

- Escala 1:250 000