



Libertad y Orden

**INTRODUCCION A LA PERCEPCION REMOTA
Y SUS APLICACIONES GEOLOGICAS
(Guías para los asistentes)**

Por:

**HENRY VILLEGAS VEGA
(Subdirección Geología Básica - INGEOMINAS)**

Bogotá, julio de 2008

**República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA**



“Cualquier usuario novicio de la teledetección debería tener presente que es una técnica con limitaciones, válida para resolver un determinado número de problemas. No es, como se ha concebido en algunos ambientes, una panacea que solucione todas las necesidades de información sobre el medio ambiente que requiere el hombre de hoy. Falsas expectativas pueden conducir a falsas conclusiones, arribando al polo opuesto; esto es, a concebir la teledetección espacial como una técnica más vistosa que eficaz. Para evitar uno y otro extremo, cualquier proyecto de aplicación debería comenzar cuestionándose si esta técnica puede solventar el objetivo marcado, y si la información que ésta ofrece no es obtenible por otros medios más rápidos o económicos.”

EMILIO CHUVIECO
Fundamentos de Teledetección Espacial

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
1.1.¿QUÉ ES LA PERCEPCIÓN REMOTA?.....	1
1.2 LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	5
1.3 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	7
1.4 INTERACCIONES DE LA ATMÓSFERA CON LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA .	8
1.5 LA MATERIA Y LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	9
1.6 FIRMAS ESPECTRALES	12
1.7 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA VEGETACIÓN ..	13
2.ºSISTEMAS SENSORES	15
2.1 TIPOS DE INFORMACIÓN DIGITAL.....	15
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES REMOTOS.....	16
2.3 SATÉLITES	16
2.3.1 Sistemas de barrido linear.....	17
2.3.2 Landsat TM	19
2.4 RESOLUCIÓN DE LAS IMÁGENES DE PERCEPCIÓN REMOTA	19
2.5 CARACTERÍSTICAS DEL LANDSAT TM.....	21
2.6. OTROS SISTEMAS MULTIESPECTRALES DE TELE-OBSERVACIÓN	22
3.PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	25
3.1 LA MATRIZ DE DATOS EN UNA IMAGEN DIGITAL	25
3.2 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	26
3.3 HISTOGRAMAS Y ESTADÍSTICAS DE LAS IMÁGENES	27
3.4 EXPANSIÓN DE CONTRASTE	28
3.5 FILTRADO ESPACIAL	31
3.6 GEO-REFERENCIACIÓN	33
3.7 TRANSFORMACIÓN MEDIANTE PUNTOS DE CONTROL EN EL TERRENO	34
3.8 REMUESTREO POR INTERPOLACIÓN	36
3.9 CORRELACIÓN ENTRE BANDAS.....	37
3.10 COMBINACIONES ENTRE BANDAS.....	38
3.11 LA TEORÍA BÁSICA DE LOS COLORES: EL ESPACIO RGB	38
3.12 COMPOSICIONES EN FALSO COLOR.....	39
3.13 OPERACIONES ENTRE BANDAS.....	40
3.13.1 División entre bandas	40
3.13.2 Diferencia normalizada entre bandas	41
3.14 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	41
5. RADAR	42
5.1 LA REGIÓN DE LAS MICROONDAS	42
5.2 BANDAS	44
5.3 VENTAJAS.....	45
5.4 POLARIZACIÓN	45
5.5 RADARES DE RASTREAMIENTO.....	46
5.6 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA	49
5.6 RESOLUCIÓN ESPACIAL.....	49



5.7 GEOMETRÍA DE IMAGEAMIENTO	52
5.8 DISTORSION TOPOGRÁFICA	53
5.9 GEOMETRÍA DE LAS IMÁGENES.....	53
5.10 EL RADAR Y LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES QUE CONSTITUYEN LA SUPERFICIE TERRESTRE	58
5.11 CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN, EL SUELO Y EL AGUA EN LA REGIÓN DE LAS MICROONDAS	58
5.12 SATÉLITES DE RADAR	59
6.REFERENCIAS CONSULTADAS	59

INTRODUCCION A LA PERCEPCION REMOTA Y SUS APLICACIONES GEOLOGICAS (Guías para los asistentes)

Por **HENRY VILLEGAS VEGA** (Subdirección Geología Básica - INGEOMINAS)

Julio 2 al 4 del 2008

1. INTRODUCCION

La percepción visual de los seres humanos presenta grandes limitaciones. Por un lado, es restringida por la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, que sólo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado por esta razón espectro visible. Otras formas energéticas como el calor, no nos son directamente perceptibles, razón por la cual parece conveniente contar con unos “ojos artificiales” que amplíen nuestras propias posibilidades.

Otra restricción de la visión humana hace referencia a la perspectiva de observación. El campo de visión del hombre está limitado a su propia estatura, o a la que puede adquirir desde observatorios naturales (montañas) o artificiales (edificios, puentes). En cualquier caso, se trata de una perspectiva oblicua y de pequeño radio de acción, que nos dificulta observar fenómenos que pueden llegar a ser muy extendidos, tales como erupciones volcánicas, inundaciones o incendios, o rasgos geológicos de escala regional como fallas, lineamientos o contactos geológicos, que no podemos estimar adecuadamente con nuestras observaciones directas en el campo, independientemente de los precisas que sean.

Para superar tales limitaciones, el hombre ha desarrollado sensores artificiales, montados sobre plataformas situadas a diferentes altitudes (aviones, satélites). Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no detectables por el ojo humano (ultravioleta, infra-rojo, micro-ondas), y además desde una nueva perspectiva, vertical y panorámica. Esta nueva información expande notablemente nuestro conocimiento del medio que nos rodea, facilitando nuestra interpretación de múltiples procesos (naturales y generados por el hombre), que afectan el planeta en que vivimos.

La tecnología que engloba los procesos que permiten obtener una imagen de la superficie de la tierra desde el aire o el espacio, y su posterior tratamiento en el contexto de una determinada aplicación, se denomina percepción remota, teledetección o tele-observación; dichos vocablos son la traducción latina del término inglés *remote sensing*.

1.1; QUÉ ES LA PERCEPCIÓN REMOTA?

En principio, podemos definir percepción remota como la tecnología que permite la adquisición de informaciones sobre objetos, sin estar en contacto físico con ellos. Este concepto es muy amplio, porque de acuerdo con él, podríamos considerar el telescopio como un instrumento sensor, y remontar el origen de la teledetección a la edad media.

Los sensores son los equipos capaces de coleccionar energía proveniente de los objetos, convertirla en una señal posible de ser registrada, para presentarla en una forma adecuada, que permita extraerle informaciones. De acuerdo con esto, un telescopio no podría ser considerado un instrumento sensor, porque su función es apenas la de mejorar el alcance de la visión del observador, mediante lentes y espejos.

La transferencia de datos del objeto al sensor, siempre es hecha a través de energía. Esto hace necesario especificar mejor la definición de percepción remota, en cuanto al tipo de energía utilizada en la transmisión de información; esta puede ser acústica (sonares, sismógrafos, sismómetros, etc), gravitacional (gravímetros) o electromagnética (radiómetros).

Teniendo en cuenta que este último tipo de energía se propaga en el vacío con una velocidad de 3×10^8 m/s, ella se constituye en el campo de fuerza más útil para las actividades de teledetección, constituyendo un medio de traspaso de información de alta velocidad, entre las sustancias y objetos de interés y el equipo sensor.

Como existen numerosas fuentes de energía electromagnética en el universo, la teledetección limita su campo de estudio a las interacciones que acontecen en la superficie terrestre. La utilización de sensores orientados a observar e interpretar la radiación recibida de las partes componentes del universo, es objeto de estudio de la astronomía. Tales equipos, aunque operan con energía electromagnética, no serán incluidos dentro de la teledetección.

Así percepción remota es la ciencia de adquirir información sobre objetos lejanos sin hacer contacto físico con ellos, restringida a medidas de radiación electromagnética, incluyendo luz visible e infrarroja, al igual que ondas de radio y calor. Tal definición implica que entre la superficie de la tierra y el sensor debe existir una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una aplicación determinada.

En esta disciplina no se incluyen métodos geofísicos como gravimetría o magnetometría, muestreo químico de vapores o técnicas de sonar. La teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación.

De acuerdo con esto, la teledetección cobijaría todos los tipos de fotografía, incluida la aérea, que por ser un tópico especializado suele tratarse aparte. Esto no implica de ninguna manera, un menosprecio hacia la fotografía aérea, que sigue siendo la técnica de percepción remota más empleada aún en la actualidad, constituyéndose en la mayoría de los casos en un auxiliar imprescindible para las imágenes de satélite.

Un sistema de tele-observación espacial, incluye los siguientes elementos (**Figura. 1**):

- **Una fuente de energía**, que se constituye en el origen del flujo energético que debe ser detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al mismo, en cuyo caso

se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (teledetección activa). La fuente de energía más importante, obviamente, es la energía solar.

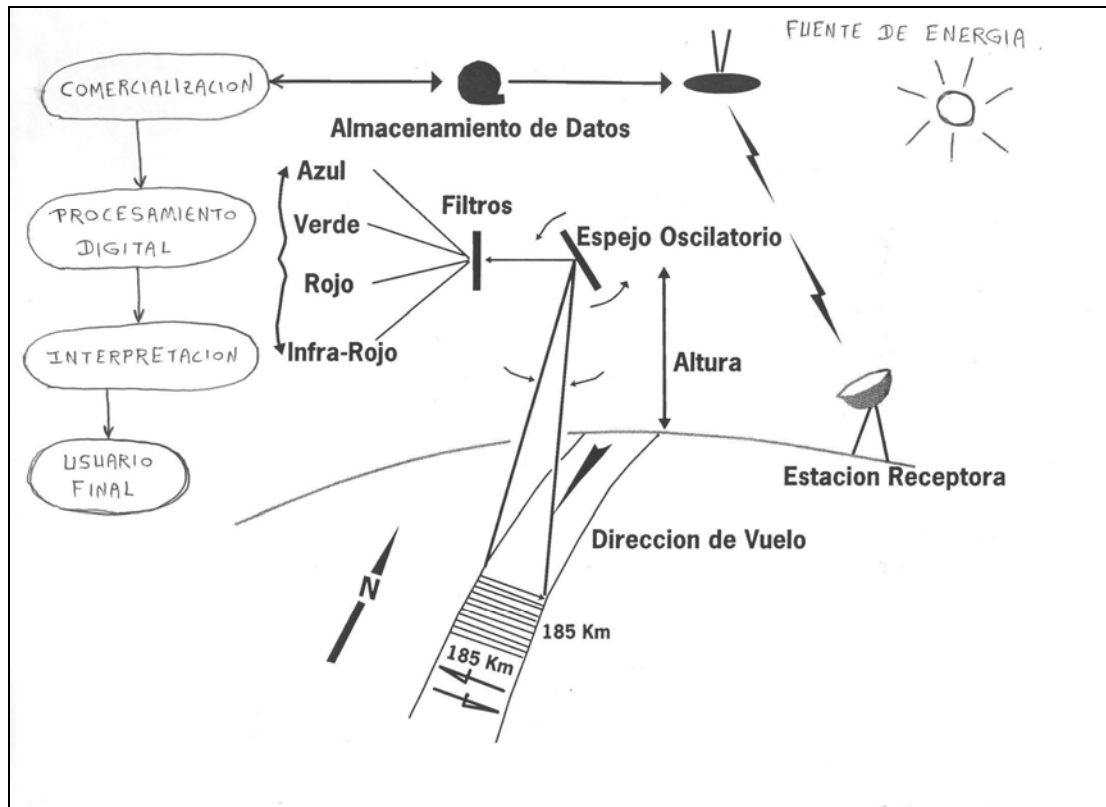


Figura 1. Componentes de un sistema de Teledetección

- **La superficie terrestre**, que se constituye en el blanco de observación de los sistemas de percepción remota. Está formada por rocas, sedimentos, suelos, distintas masas de vegetación, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente del sol o el sensor, y la reflejan o emiten de acuerdo con sus características físicas.
- **Un sistema sensor**, compuesto por el sensor propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta (avión, satélite). Tiene como función la de captar la energía procedente de los diversos materiales que constituyen la superficie terrestre, codificarla y grabarla, o enviarla directamente a un sistema de recepción terrestre.
- **Un sistema de recepción-comercialización**, en donde se reciben los datos transmitidos desde la plataforma, se les realizan ciertas correcciones, y se graban en un formato y en un medio apropiados, para hacerlos accesibles a sus usuarios potenciales.

- **Un procesador** que manipula esta información en formato digital, para generar imágenes analógicas o digitales, que se constituyen en claves temáticas o cuantitativas, orientadas a facilitar la evaluación del problema en estudio. En condiciones ideales, el procesamiento digital de las imágenes de tele-observación, tiene que realizarse con la asistencia del profesional temático que va a interpretarlas.
- **Un intérprete** que analiza los productos generados por el procesador, para generar un mapa temático que puede ser resultado del proceso de foto-interpretar las imágenes de percepción remota, o de la conjunción de dicho proceso con trabajo de campo. Es posible que el procesamiento digital e interpretación visual de los productos de tele-observación sean realizados por una misma persona.
- **Un usuario final**, encargado de analizar el producto temático fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

La tele-observación no puede ser considerada como una panacea, en la detección de cualquier rasgo o fenómeno que afecte al medio ambiente. Los datos generados por esta disciplina son complementarios con los de otras técnicas convencionales, tales como la fotografía aérea, y no invalidan la importancia del trabajo de campo. En otras palabras, es una técnica auxiliar más, idónea en múltiples contextos y discreta en otros, donde su aplicación resulta un ensayo experimental. Esta técnica aporta en relación con la fotografía aérea las siguientes ventajas:

- **Cobertura global y periódica de la superficie terrestre.** De acuerdo con las características orbitales de los satélites, podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la tierra para intervalos de tiempo determinados, incluso de áreas que suelen ser de muy difícil acceso por otros medios (zonas polares, desiertos, bosques de lluvia tropicales, páramos, por ejemplo).
- **Visión panorámica.** La altura orbital de los satélites permite detectar grandes áreas, proporcionando una visión amplia de los rasgos de la superficie terrestre. Una fotografía aérea, escala 1:18000 capta en una sola imagen una superficie aproximada de 16 Km², que asciende a unos 49 Km² en el caso de fotografías tomadas a mayor altitud, o sea a una escala menor (1:30000). Una escena Landsat nos permite contemplar 34000 Km² en una sola adquisición, dicha área aumenta hasta 9 millones de Km² para el caso de las escenas del satélite meteorológico NOAA.
- **Homogeneidad en la toma de datos.** Superficies muy grandes son detectadas por el mismo sensor, en una fracción muy pequeña de tiempo, asegurando la coherencia de los datos sobre áreas extensas.
- **Información sobre regiones no visibles del espectro.** Los sensores óptico-electrónicos generan imágenes sobre áreas no accesibles para la fotografía convencional, tales como el infra-rojo medio y térmico y las micro-ondas. Estas bandas del espectro electromagnético proporcionan una valiosa información, dado que registran cambios y diferencias que son imperceptibles al ojo humano.

- **Formato digital.** Este formato agiliza la manipulación y tratamiento de los datos de tele-observación, reduciendo costos en el proceso de integración de los mismos con la cartografía convencional.

1.2 LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para que la observación remota sea posible, es necesario que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que este les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esta señal no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. Es por esto que no seríamos capaces de percibir dicho árbol en plena oscuridad.

Para la teledetección, el flujo energético que se establece entre el objeto (en este caso los materiales que constituyen la superficie terrestre) y el sensor, se constituye en la forma de radiación electromagnética que más interesa a esta disciplina. La imposibilidad física de separar esta radiación de la materia y otras formas de energía, inevitablemente significa que cuando la radiación electromagnética y la materia interactúan, ambas son modificadas de alguna manera. La energía pura y la materia pura son conceptos totalmente abstractos; la masa y la energía son inseparables, y pueden relacionarse una con respecto de la otra, mediante la famosa ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

Donde **E** es energía. **m** es masa y **c** es la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío. Esta ecuación no nos es útil para caracterizar la radiación electromagnética (E), porque nos exige conocer la masa de los materiales de la superficie terrestre.

Históricamente las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que la concibe como un **haz ondulatorio (Huygens, Maxwell)**, y aquella otra que la considera como una **sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein)**. Actualmente, parece que ambas teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo con ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electro-magnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz, y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: el eléctrico y el magnético. La mayoría de las ondas, tales como las sonoras o las ondulaciones del agua, son propagadas por este movimiento de partículas de materia. Aquellas relacionadas con radiación electromagnética son las ondas transversales, e involucran vibraciones en ángulo recto con relación a su dirección de propagación. Sin embargo, la radiación electromagnética puede viajar a través del vacío, y puede afectar las partículas en un medio físico, cambiando sus propiedades rotacionales, vibratorias y electrónicas.

Las partículas de energía tienen campos eléctricos y magnéticos asociados, que están en ángulo recto uno con relación al otro, y también con respecto a la dirección de propagación

(Figura. 2). Estos campos oscilan de forma regular, que puede describirse como de onda sinusoidal. En estas ondas la distancia entre dos crestas o dos valles es la longitud de onda (λ), y el número de vibraciones pasando en un punto dado por unidad de tiempo es la frecuencia (f). Conociendo una es posible calcular la otra mediante la ecuación:

$$c = \lambda f$$

Donde c es la velocidad de la radiación electromagnética en el vacío, λ es la longitud de onda y f es la frecuencia. En definitiva, a mayor longitud de onda menor frecuencia y viceversa, por lo cual basta con indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

Gracias a la teoría cuántica, podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón. La frecuencia y la longitud de onda de la radiación electromagnética, son función de la energía de los “quanta”. Planck formuló esta relación como:

$$E = fh = ch/\lambda$$

Donde h es la constante de Planck (6.62×10^{-34} joules.seg). Así para menor longitud de onda o mayor frecuencia en la radiación electromagnética, se tendrá mayor energía para cada “quantum”. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran más sofisticados medios de detección.

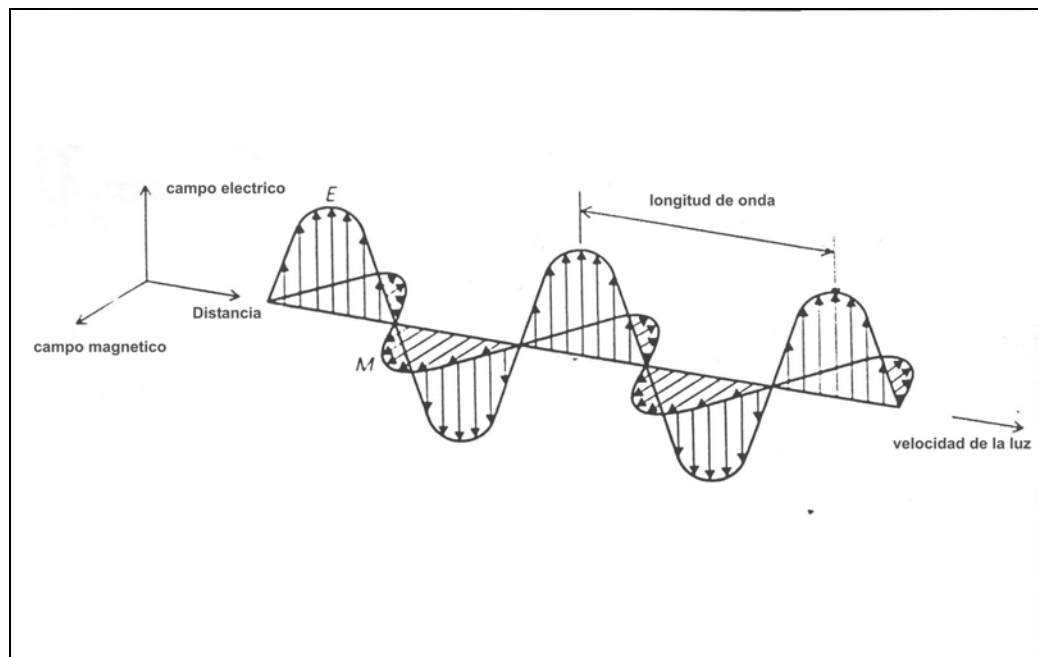


Figura 2. Los materiales y la radiación electromagnética

La última propiedad básica de la radiación electromagnética es su intensidad, equivalente al brillo de la luz visible. Esta puede expresarse como el número de “quanta”, o las amplitudes de los campos eléctricos y magnéticos. A mayor quanta en una longitud de onda determinada, mayor será la energía que es transmitida. Esta en un solo “quantum” de longitud de onda larga, es menor que en uno de λ corta. Consecuentemente, más quanta de λ larga que de λ corta deben llegar a un detector, para producir la misma respuesta medible.

Por lo tanto en general, sistemas sensores diseñados para percibir radiación electromagnética de longitud de onda larga, necesitan coleccionar radiación de un área blanco más grande, o durante un periodo de tiempo mayor que el requerido para longitudes de onda más cortas. Esto tiene consecuencias importantes para la resolución espectral y espacial de los sistemas sensores, y su habilidad para discriminar objetos reales.

1.3 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Mediante las fórmulas anteriores, es posible describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas o rangos entre valores específicos de longitudes de onda o frecuencias, se denomina espectro electromagnético. Comprende en un continuo, desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micras ($\mu\text{m} = 10^{-6}$ metros), mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a estas últimas (denominadas micro-ondas) se les designa también por valores de frecuencia (en gigahercios, $\text{GHz} = 10^8$ Hz).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Se denominación y amplitud varían según distintos autores, aunque la terminología más común es la siguiente (**Figura 3**):

La región del espectro electromagnético que interesa a la mayoría de los sistemas de teledetección, se conoce como espectro óptico, y está comprendida entre 0.3 y 15.0 μm . La porción entre 0.38 y 3.0 μm es llamada la parte reflejada del espectro, porque la señal que los sensores detectan en esta región, es básicamente originada de la reflexión de energía solar por parte de los objetos de la superficie. Esta porción reflejada se divide en tres sub-regiones: visible, infrarrojo próximo e infrarrojo medio.

Entre 0.38 y 0.72 μm , el espectro recibe el nombre de visible, porque corresponde con la región en que el ojo humano es capaz de percibir la radiación electromagnética. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0.38 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.72 μm), debido a los colores elementales asociados con tales porciones de longitudes de onda. El rango entre 0.72 y 1.3 μm es conocido como infrarrojo próximo, y aquel comprendido entre 1.3 y 3.0 μm como infrarrojo medio. Los sensores termales operan entre 7 y 15 μm , que es una región también conocida como infrarrojo distante o lejano, que contiene la porción emisiva de los materiales que constituyen la superficie de la tierra

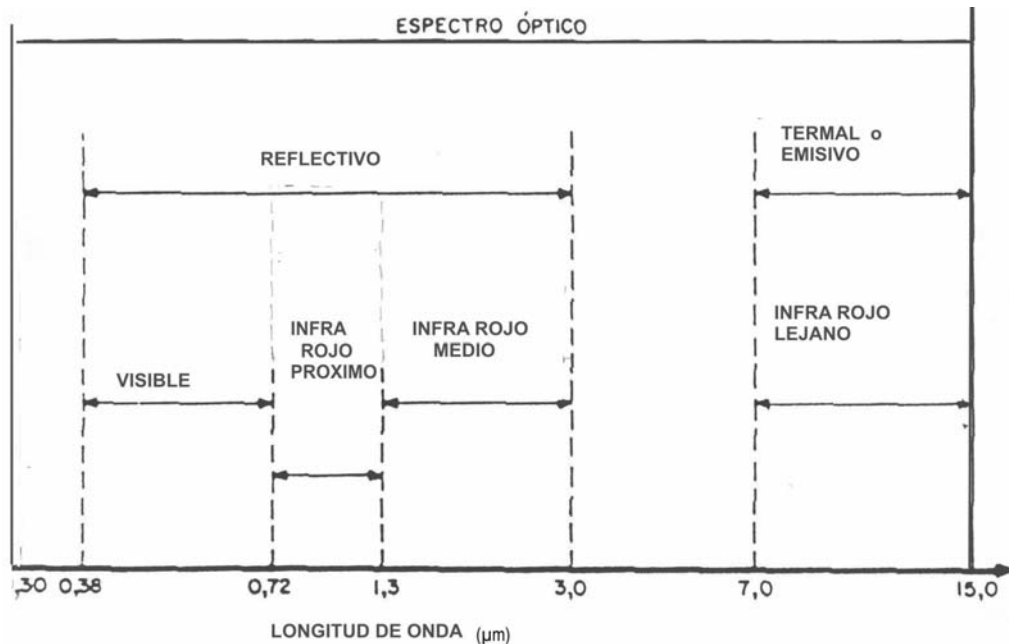


Figura 3.Regiones del espectro Óptico

1.4 INTERACCIONES DE LA ATMÓSFERA CON LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para que la tele-observación sea posible, es necesario que entre la superficie terrestre y el sensor haya una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial emitido por el sensor, o por emisión energética propia por parte de los materiales que constituyen la superficie de la tierra.

La energía detectada por los sistemas de teledetección, es por lo tanto una función de la manera como esta se reporte en su fuente, y los materiales con los que interactúa en su camino hacia el detector. La energía de cualquier radiación de longitud de onda específica, puede ser transmitida a través del material, absorbida dentro de él, reflejada por su superficie, dispersada por sus partículas constituyentes, o re-radiada en otra longitud de onda después de la absorción. En la naturaleza todas las posibilidades se combinan en mayor o menor medida.

Cualquier material por lo tanto, tiene su espectro característico, dependiendo de su composición química y molecular. Sin embargo, dado que la superficie terrestre está constituida por muchísimas combinaciones diferentes entre compuestos orgánicos e inorgánicos, el espectro observado tiene su correspondiente gran rango de componentes.

Después de su recepción por un sensor pasivo, montado en un satélite que usa radiación solar reflejada, ésta debe pasar a través de la atmósfera y después retornar al sensor. Para un sistema de teledetección que mide radiación reflejada y emitida por la tierra, aunque la ruta es simple, hay muchos efectos a tener en cuenta. Además de oxígeno y nitrógeno, la atmósfera

contiene cantidades significativas de vapor de agua, ozono y dióxido de carbono. Todos estos interactúan con la radiación electromagnética mediante transiciones vibracionales y rotacionales, generando un efecto de red que consiste en la absorción de energía en rangos específicos de longitud de onda, que hemos denominado como bandas.

Para las longitudes de onda mas cortas, estas bandas son estrechas, con incremento de su amplitud en las regiones del infrarrojo y las micro-ondas. La **Figura 4** muestra la variación de la irradiancia, o total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo, en relación con longitudes de onda de las porciones ultravioleta, visible e infra-rojas del espectro electromagnético; la curva continua es la irradiación solar al nivel del mar, mientras las curva punteada es la curva de irradiación solar fuera de la atmósfera terrestre. Esta figura muestra que aproximadamente el 50% del espectro electromagnético es inutilizable, simplemente porque casi nada de la energía solar incidente sobre el planeta, puede penetrar la atmósfera para llegar hasta la superficie terrestre.

El análisis de la **Figura 4**, permite hacer algunas consideraciones sobre la energía solar disponible en la superficie terrestre para los fines de la percepción remota. En primer lugar, podemos observar que el máximo de energía disponible se encuentra en la faja de 0.4 a 0.7 μ m, que es conocida como la región visible del espectro electromagnético. Otro hecho importante a ser destacado, es que existen regiones del espectro para las cuales la atmósfera es opaca, o sea que no permite el paso de la radiación electromagnética; estas regiones definen las “bandas de absorción de la atmósfera”. Las porciones del espectro electromagnético donde la atmósfera es transparente a la radiación solar, son conocidas como “ventanas atmosféricas”.

Todo esto implica que las imágenes de la tierra obtenidas mediante tele-observación, son degradadas de manera inevitable en varias formas por la atmósfera. Esto significa que solo algunas bandas quedan disponibles para la percepción remota (ventanas atmosféricas), limitando los diferentes arreglos para el diseño de los sistemas de teledetección.

Otra limitante natural en el diseño de los sensores, es la interacción entre la radiación electromagnética y los sólidos y líquidos que constituyen la superficie de la tierra. Básicamente hay solo tres componentes principales: agua, vegetación y los sólidos inorgánicos que conforman los suelos y las rocas. Para el geólogo, las interacciones entre la radiación electromagnética con los suelos y las rocas son las más importantes. Sin embargo, como estos materiales pueden contener agua o estar cubiertos de vegetación, es necesario considerar la influencia de estas dos variables en ellos.

1.5 LA MATERIA Y LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El sol es la principal fuente de energía electromagnética disponible para la tele-observación de la superficie terrestre. Toda la materia en el universo, incluso aquella que está en el vacío perfecto en medio de las galaxias, tiene una temperatura por encima del cero absoluto ($^{\circ}$ k ó -273,15 $^{\circ}$ c), y emite alguna forma de radiación. Las cantidades emitidas y el rango de sus longitudes de onda, son una función compleja de su temperatura y la naturaleza misma del cuerpo. La materia capaz de absorber y re-emitir toda la energía electromagnética que recibe,

se conoce como un “cuerpo negro”. Por supuesto, los objetos naturales no son cuerpos negros perfectos.

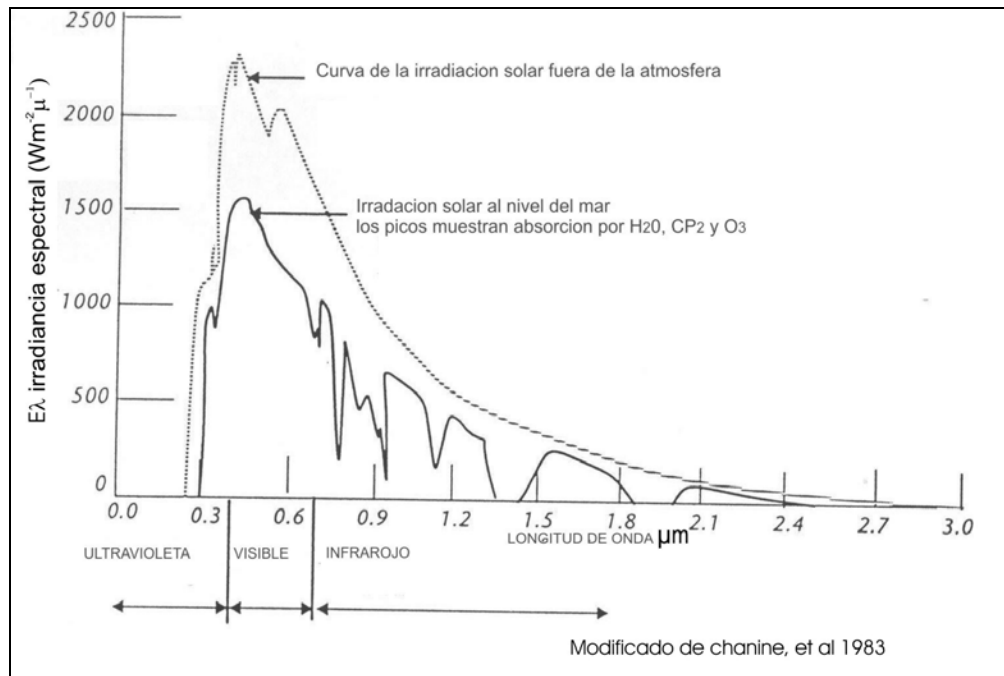


Figura 4. Irradiancia espectral de la iluminación del sol en la superficie de la tierra

A una temperatura determinada, un cuerpo negro emite radiación electromagnética dentro de un rango de longitudes de onda. Sin embargo, su temperatura absoluta determina cual longitud de onda transmite la máxima cantidad de energía. Esta longitud de onda dominante (λ_m en micrómetros) está dada por la “ley de desplazamiento de Wien”:

$$\lambda_m = 2898/T$$

Donde T es la temperatura. Así, cuando la temperatura aumenta, la energía total emitida se incrementa rápidamente, y la longitud de onda que transporta la mayor cantidad de energía se hace mas corta. A partir de esta fórmula puede calcularse la longitud de onda a la que un cuerpo produce la máxima emitancia, siempre y cuando se conozca su temperatura. Así la “ley de desplazamiento de Wien tiene también una gran importancia para seleccionar la banda más conveniente para detectar un determinado fenómeno, siempre que se conozca su temperatura. Por ejemplo, en el caso de los incendios forestales, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre 275° y 420 °C, la ley de Wien nos permite situar entre 5.28 y 4.30 μm (infrarrojo medio) la banda espectral más adecuada para su detección.

La forma de la curva que relaciona energía radiante emitida (total de energía emitida sobre una unidad de área y por unidad de tiempo), con la longitud de onda aparece en la Fig. 5. Así para cualquier temperatura, hay una longitud de onda mínima para la radiación, una longitud de onda aproximada de emitancia máxima, y una cola larga hacia las longitudes de onda

mayores. En definitiva, cuanto más caliente esté el objeto emisor, radiará energía en longitudes de onda más cortas.

La teledetección está relacionada con dos categorías de radiación en la superficie de la tierra: aquella que incide en ella y es absorbida y reflejada, y aquella que es emitida por la superficie misma. La radiación reflejada se deriva principalmente del sol, y los sistemas sensores que la detectan se llaman pasivos, dado que no requieren de energía inducida artificialmente. **La magnitud que miden estos sensores pasivos es la radiancia espectral, que indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda, por unidad de área y por ángulo sólido de medida.** Un sistema activo involucra iluminación artificial, tal como una fotografía con flash. En teledetección, el sistema activo más ampliamente utilizado emplea transmisiones y detecciones de energía en la porción de las microondas (radar), reflejada hacia el sensor por la superficie de la tierra.

Como la temperatura ambiente de la tierra es en promedio 300°k (27°C), la ley de desplazamiento de Wien implica que la superficie del planeta tiene una emitancia máxima en los 9.7µm, mas exactamente en el infrarrojo medio (infrarrojo termal). La energía involucrada en la producción de esta radiación emitida, se deriva de tres fuentes: el flujo de calor radiogénico desde el interior de la tierra, el calentamiento de la superficie por causa de la radiación solar, y las actividades humanas. El infrarrojo de onda larga no es la única radiación emitida por la tierra.

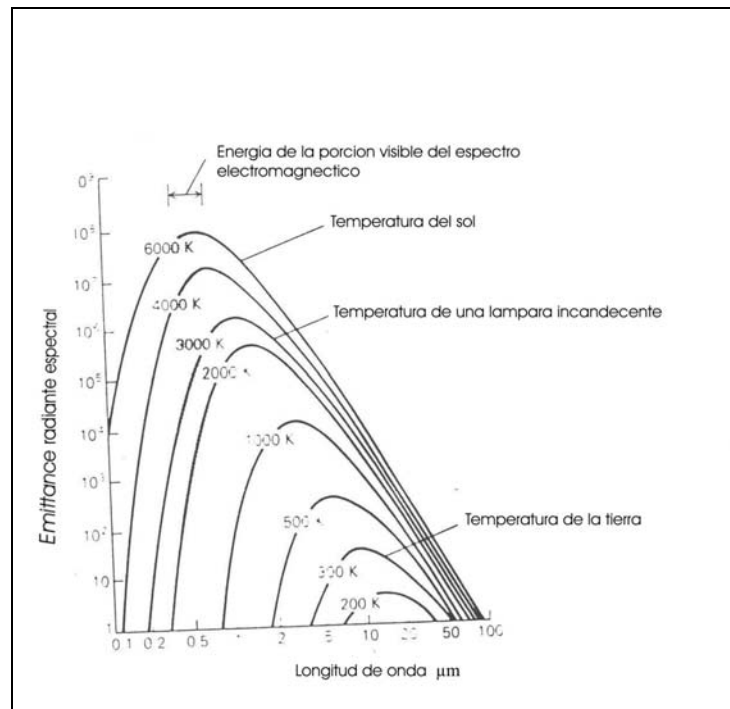


Figura 5. Variaciones entre longitud de onda, emitancia máxima y temperatura absoluta

1.6 FIRMAS ESPECTRALES

La proporción del flujo de energía incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características del material que se observa. Dado que esa proporción varía en distintas bandas del espectro electromagnético, es muy interesante conocer el comportamiento de dichos materiales en diversas longitudes de onda. Una discriminación más acertada entre los mismos, sólo será posible cuando presenten divergencias espectrales. En el caso del espectro visible, el comportamiento disimilar de los objetos que constituyen la superficie terrestre, para diferentes longitudes de onda, se manifiesta en lo que se denomina color: un objeto es azul, si refleja intensamente la energía en ese rango de longitudes de onda del espectro y poco en el resto.

Las firmas espectrales representan el modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. Son curvas específicas que suelen obtenerse en el laboratorio, para los principales materiales que constituyen la superficie de la tierra. En dichas curvas el eje de las “X” representa las longitudes de onda, mientras el de las “Y” muestra la reflectividad espectral o reflectancia, que se define como la relación entre el flujo energético incidente y el reflejado por una superficie. Algunas de estas curvas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo.

El comportamiento de un material o una mezcla de materiales en el espectro electromagnético, está influido no sólo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican lo que se podría denominar su comportamiento espectral teórico. Algunos de estos factores son:

- **El ángulo de iluminación solar**, muy dependiente de la fecha del año y del momento de paso del satélite.
- **Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación** (pendiente u orientación de las laderas).
- **Influencia de la atmósfera**, especialmente en lo que se refiere a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda.
- **Variaciones medio ambientales en la cubierta**: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta, estado fenológico, etc.
- **Angulo de observación**, relacionado con la órbita del satélite y con las características del sensor.

Así las diversas materiales que constituyen la superficie terrestre no tienen un comportamiento espectral único y permanente, que coincide con sus curvas de reflectividad espectral y permita reconocerlas sin confusión frente a otras superficies. Por el contrario, en torno a un comportamiento tipo, que se denomina firma o signatura espectral, cada material presenta una cierta variabilidad espectral, debida a los factores anteriormente mencionados, que dificulta su discriminación de otros materiales.

Pese a estas salvedades, no cabe duda que las curvas de reflectividad son muy útiles para interpretar más fielmente una imagen de tele-observación, por cuanto relacionan los valores adquiridos por el sensor con las medidas del laboratorio. Igualmente estas gráficas permiten seleccionar las bandas más convenientes, para la detección de los materiales de la superficie terrestre considerados por cualquier estudio.

1.7 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA VEGETACIÓN

En la mayoría de los estudios geológicos, la vegetación es considerada un estorbo. Sin embargo, dos tercios del área continental del planeta son moderada a altamente vegetados. La mayor parte de la producción mineral del mundo, proviene de áreas con cubierta vegetal baja a moderada; mientras zonas con mucha vegetación como el cinturón de bosques tropicales, probablemente contienen las mayores reservas de yacimientos minerales aún no descubiertos. Pese a su gran importancia, la caracterización espectral de las masas vegetales aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serían los derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de la plantación, etc.

Dependiendo del clima, y de si los suelos fueron derivados directamente de la roca subyacente o han sido transportados, la vegetación puede mostrar variaciones que se relacionan con la geología. Las plantas usan la energía solar para convertir el agua y el dióxido de carbono en carbohidratos y oxígeno, mediante el proceso de la fotosíntesis. La manera como ellas llevan esto a cabo, tiene una fuerte influencia en su interacción con la radiación electromagnética. Por ser organismos vivos, su metabolismo es muy dependiente de estructuras celulares y sistemas vasculares basados en agua. La abundancia de esta en su estructura, consecuentemente controla también estas interacciones.

La **Figura 6** muestra el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa. El catalizador para el proceso de la fotosíntesis es el pigmento llamado clorofila, un complejo de compuestos orgánicos que contiene hierro. Su función es la de absorber la radiación solar, para generar tal proceso. Esto se consigue mediante bandas de absorción cercanas a 0.45 y 0.68 μm (**Figura. 6**), en las partes azul y roja del espectro visible respectivamente; esta es la razón por la cual las hojas saludables son de color verde. Sin embargo, la clorofila es inestable por encima de cierta temperatura; para protegerla del daño termal, las plantas han desarrollado métodos para balancear la energía. Esto se consigue mediante fuerte reflexión de la radiación en el infrarrojo cercano (Fig. 6), que se logra mediante el recubrimiento brillante que suelen tener las hojas en la parte que exponen al sol, pero también mediante la disposición interna de sus células. Una hoja sana suele ofrecer una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.3 μm), en claro contraste con la baja reflectividad que muestra en el espectro visible, especialmente en la banda roja. Puesto que la estructura de la

hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.

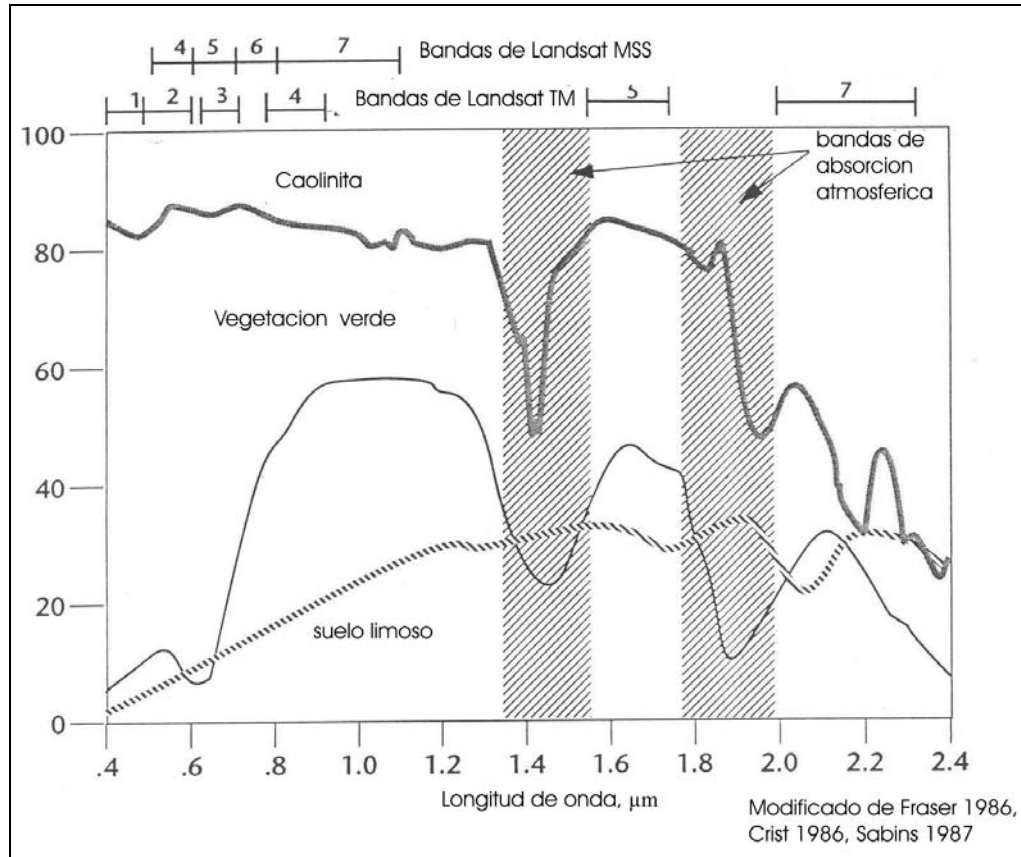


Figura 5. Curvas de reflectancia espectral de la caolinita, la vegetación y el suelo

A partir de 1.4 μm el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. El agua en las células absorbe alguna energía, y esta característica se muestra alrededor de 1.4 y 1.9 μm (Fig. 6), como dos bandas de absorción que dependen de la proporción de agua en las células. Entre estas bandas donde la absorción del agua es más clara, queda patente que la observación del espectro es de gran interés para conocer el estado de vigor de las hojas, en función de su contenido de humedad.

Sin embargo, las plantas ante los sistemas de teledetección se presentan como hojas de diferentes formas y tamaños, espacios entre las mismas, tallos y a veces ramas, además de muchas otras variaciones. Todas las interacciones individuales en estas estructuras complejas, pueden interferir y posteriormente ampliar el rango de las respuestas, porque el sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de las mismas que constituyen masas de vegetación, razón por la cual intervienen otros elementos adicionales que complican su detección, tales como el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras

que detecta el sensor; las características del suelo que sustenta la vegetación; la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, etc.

Es evidente que el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (en torno a 0.645 μm), y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm). De ahí que se pueda enunciar como principio genérico, que cuanto mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta. Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrará como un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto. La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y en consecuencia, a ofrecer una menor absorptividad en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas, elimina el máximo relativo antes situado en el verde, razón por la cual la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja.

La tendencia natural de la vegetación es la de reaccionar ante su ambiente físico. Generalmente la química y propiedades físicas del suelo, están íntimamente relacionadas con la roca de la cual se originó, razón por la cual mediante el uso de la percepción remota, es posible hacer discriminación litológica en terrenos totalmente vegetados. La cubierta vegetal, cuando ha tenido un patrón de crecimiento natural, responde a cambios litológicos que por lo general involucran las correspondientes variaciones del suelo y humedad en el mismo, que si son lo suficientemente grandes, pueden ser detectadas en las imágenes de satélite.

La mayor limitación de la percepción remota en la cartografía geológica de terrenos totalmente vegetados, es la cubierta de nubes y la presencia de cultivos, que alteran los patrones naturales de crecimiento de la vegetación.

2.º SISTEMAS SENSORES

2.1 TIPOS DE INFORMACIÓN DIGITAL

En el sentido más amplio, el término digitalizar (digitizing) se refiere a cualquier proceso que convierte datos no digitales (análogos) en números. Cualquier imagen que no esté en este formato, debe digitalizarse para que pueda ser leída por un computador, y sea incorporada en una base de datos. La mayoría de los datos satelitales son comercializados en modo digital; sin embargo suelen tenerse mapas, fotografías u otros datos análogos que contienen información que desea incorporarse en un estudio. Las informaciones digitales tienen dos principales formatos de presentación: vector y raster.

VECTOR: son los datos representados por coordenadas, y constituidos por puntos, líneas y polígonos. Un punto es mostrado por un par de coordenadas simples x,y ; coincide con rasgos geográficos que no tienen área, tales como el pico de una montaña, una estación de muestreo geoquímico, etc. Una línea es una sucesión de puntos, que representa rasgos lineares como ríos, carreteras, etc; tienen longitud pero carecen de área, Un polígono es una línea cerrada

que define un área homogénea; tiene área y perímetro, y puede representar unidades geológicas, tipos de suelo, cuerpos de agua, etc.

RASTER: es un arreglo de elementos en forma de malla o red, donde cada celda de esta última tiene su localización definida en un sistema de coordenadas tipo línea (row) y columna (column), representadas por “x” y “y” respectivamente. Por convención, el origen de la malla está siempre en la esquina superior izquierda; el nombre dado a las celdas es “pixel”, derivado del inglés “picture element”. Estas tienen un atributo numérico “z”, que indican su nivel de gris, el cual va a variar de negro a blanco; dicho nivel de gris es conocido en inglés como DN, que viene de “digital number”, o sea el número digital o nivel digital, que de ahora en adelante se denotará como **ND**.

En las imágenes de satélite, el ND de una celda representa la intensidad de la energía electromagnética reflejada o emitida, por los materiales de la superficie terrestre y medida por el sensor, para el área correspondiente con el tamaño de pixel.

Los programas de percepción remota, siempre tienen la habilidad de trabajar con datos vector o raster.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES REMOTOS

Los sistemas sensores pueden ser clasificados de diferentes maneras. Tomando como criterio la fuente de energía, pueden dividirse en pasivos y activos. Los primeros detectan la radiación solar reflejada o emitida por los objetos de la superficie. Dependen por lo tanto de una fuente de radiación externa, para que puedan operar; los mecanismos fotográficos son un buen ejemplo de este tipo de sensores. Los activos son aquellos que producen su propia radiación; el radar es un ejemplo de estos sistemas, dado que produce la energía que interactúa con los objetos de la superficie.

Los sensores remotos pueden clasificarse en función de la región del espectro en que operan. Así podemos tener sensores que trabajan en la porción óptica del espectro (0.35 - 15.0um), y que se caracteriza por la utilización de componentes ópticos en su construcción, tales como espejos, prismas y lentes. Los sensores de microondas, se diferencian de los anteriores, por operar en una región del espectro caracterizada por ondas de longitud entre 1mm y 1m.

Los sistemas sensores también pueden ser clasificados, en función del tipo de transformación sufrida por la radiación detectada; así tenemos sistemas imageadores y no imageadores. Los primeros producen una imagen de la superficie observada, o sea que generan informaciones sobre la variación espacial de la respuesta espectral del terreno observado. Los segundos no crean una imagen de la superficie captada.

2.3 SATÉLITES

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento, dado que en ella se conjugan aspectos muy variados como la óptica y los detectores de un sensor determinado, el vehículo que lo sustenta, sus sistemas de transmisión de los datos que obtiene, los equipos para el tratamiento de los

mismos, etc. Así las formas de tele-observación han variado ostensiblemente durante la historia.

Las primeras experiencias de percepción remota se remontan a 1859, cuando Gaspar Felix de Tournachon obtiene las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo. En 1909 Wilbur Wright, uno de los inventores del avión, adquiere la primera fotografía aérea abriendo el camino a una larga historia de observación desde plataformas remotas. Será no obstante durante la segunda guerra mundial, cuando se produzca un notable desarrollo de las técnicas de tele-observación aérea. El progreso se orienta a mejorar la óptica de las cámaras de reconocimiento, así como las emulsiones utilizadas. De esta época proceden las primeras películas en infrarrojo y nuevos sensores como el radar, así como el desarrollo de sistemas de comunicación más sofisticados. Por otro lado, la aeronáutica prospera notablemente, aportándole mayor estabilidad a las plataformas de observación.

A finales de los años 50, el desarrollo de los sistemas de navegación permite concebir los primeros ingenios espaciales. La denominada “guerra fría” tiene en el espacio uno de sus objetivos preferentes, alentándose desde uno y otro bando, una intensa investigación en estos temas. Al lanzamiento del satélite soviético Sputnik, en 1957, le siguen una larga serie de misiones civiles y militares, que han permitido no sólo la exploración de nuestro planeta, sino también de la luna y los planetas vecinos.

Hasta hace relativamente poco tiempo, la mayoría de las imágenes de teledetección usadas por los geólogos, eran adquiridas por técnicas fotográficas convencionales. Los nuevos métodos de recolección de datos, se han desarrollado rápidamente por dos razones principales. Primero, el énfasis creciente de monitoreo del planeta por parte de satélites no tripulados, demostró que era casi imposible recuperar las películas fotográficas, excepto mediante muy costosas maniobras de retorno y re-entrada.

La percepción remota desde el espacio, por lo tanto requirió sistemas que pudieran transmitir los datos mediante telemetría de micro-ondas. Además de esto, las necesidades de información en las partes del espectro electromagnético donde las películas fotográficas no responden, necesitaron el desarrollo de nuevos tipos de instrumentos basados en sistemas electrónicos. Todas estas experiencias, junto al bagaje aportado por los satélites meteorológicos, hacen concebir a la NASA proyectos dedicados exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos naturales.

El 23 de julio de 1972 supone la culminación de esta tendencia, con el feliz lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Este proyecto, denominado posteriormente Landsat con la puesta en órbita del segundo satélite en 1975, resulta el más fructífero hasta el momento para aplicaciones civiles de la teledetección. A partir de la serie Landsat, el interés de la comunidad científica internacional por esta técnica ha crecido exponencialmente, contándose por miles los estudios desarrollados en muy variados países del mundo, sobre las imágenes proporcionadas por estos satélites.

2.3.1 Sistemas de barrido linear

Las características técnicas de los sensores fotográficos, sean estos satelitales o montados sobre un avión, impiden que desde ellos se realice una cobertura sistemática de la superficie terrestre, dado que no facilitan una transmisión a distancia de las imágenes captadas. Por esta razón se han diseñado otro tipo de sensores, denominados genéricamente óptico-electrónicos, ya que combinan una captación de la realidad más o menos similar a la obtenible mediante fotografía, con un sistema de detección electrónica, que evita el depender de una película fotográfica.

Entre estos sensores, los más habituales en tele-observación espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (scanners). En muchos equipos de exploración por barrido, la señal recibida se descompone a bordo en varios rangos de longitud de onda, cada uno de los cuales se envía a un tipo especial de detectores, sensibles a ese tipo de energía. En ese caso, se habla de exploradores de barrido multi-espectral, pues detectan la misma superficie del terreno en distintas bandas del espectro. La generación de imágenes por barrido lineal, es esencialmente una extensión de los métodos de fotografía secuencial. El movimiento de la plataforma hacia delante, permite monitorear sucesivos elementos del terreno; la diferencia es que en vez de tener la radiación colectada por los lentes y dirigida hacia una película, un espejo es utilizado junto con unos detectores fotoeléctricos. Un motor rota dicho espejo 360°, ó en un ciclo repetido de ángulos pequeños hacia delante y hacia atrás.

En la mayoría de los sistemas el barrido es perpendicular a la dirección de movimiento de la plataforma, y toma datos en sentido vertical a la superficie, y hacia los lados del rumbo de vuelo del satélite. Una imagen de barrido lineal, es conformada por líneas rectas o fajas orientadas a lo largo de la línea de vuelo. La radiación colectada por el espejo es dirigida hacia unos detectores, algunas veces utilizando fibras ópticas. Estos detectores registran todas las bandas simultáneamente, en un arreglo donde la respuesta de cada uno, corresponde exactamente con la misma porción del terreno percibida al tiempo con los otros. Dichos detectores amplifican la señal recibida convirtiéndola en una señal eléctrica, que a su vez se transforma a un valor numérico, que puede almacenarse a bordo del satélite, o puede transmitirse a una red de antenas receptoras. La información recibida por éstas se graba en cintas compatibles con computador (CCT – Computer Compatible Tape). Satélites como SPOT y Landsat TM captan información de la superficie de la tierra mediante barrido lineal.

En suma, el sensor convierte una señal analógica, la radiancia recibida, en un valor digital, razón por la cual no puede hablarse propiamente de fotografías, aunque en ocasiones sea posible presentar las imágenes de tele-observación espacial en formato fotográfico, sino de imágenes digitales, en razón de su estructura interna. Estos valores numéricos pueden expresarse como niveles de radiancia, conociendo los coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisición. Igualmente es posible realizar la conversión contraria, digital-analógica, para obtener los valores de radiancia originalmente detectados por el sensor, lo cual implica que este tipo de sensores no sólo facilitan una imagen, sino también una medición de la superficie que observan.

Las ventajas más claras de los equipos de barrido multi-espectral, en relación con los sensores fotográficos, pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- Permiten ampliar la banda del espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible. Las emulsiones fotográficas están limitadas al rango 0.4 a 0.9 μm , visible e infrarrojo reflejado, mientras los equipos de barrido lineal pueden abarcar de 0.4 a 12.6 μm , incluyendo los infrarrojos medio y térmico.
- Mayor facilidad en la calibración y en la corrección radiométrica de los datos.
- Posibilidad de realizar coberturas sistemáticas, y de grandes extensiones de la superficie terrestre, gracias a su capacidad de transmitir datos en tiempo real.
- Grabación digital de la información, que asegura su fiabilidad, no deterioro con el paso del tiempo, y permite su tratamiento asistido por computador, al igual que su inclusión en cualquier sistema de información geo-referenciada.

2.3.2 Landsat TM

El programa Landsat empezó en Julio de 1972, y se compone hasta el momento de una serie de satélites, lanzados en intervalos promedio de 3 a 4 años. Este sistema fue desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), y recibió inicialmente el nombre de Earth Resources Technology Satellite - 1 (ERST -1), pasando a ser llamado Landsat en enero de 1975. Para el funcionamiento de estos satélites, algunas premisas básicas fueron definidas:

1. La órbita debería ser circular, para garantizar que las imágenes tomadas en diferentes regiones de la tierra, tuviesen la misma resolución y escala.
2. La órbita debería permitir el imageamiento cíclico de la superficie, para garantizar la observación periódica y repetitiva de los mismos lugares.
3. La órbita debería ser sincrónica con el sol, para que las condiciones de iluminación de la superficie terrestre se mantuviesen constantes.
4. El horario de pasada del satélite debería atender las solicitudes de las diferentes áreas de aplicación. Fue inicialmente seleccionado en torno de las 9:30 de la mañana, para satisfacer las aplicaciones que necesitaran del efecto del sombreado (geología, geomorfología) y otras que precisaran de la iluminación total de la escena (agricultura). El periodo matutino también fue seleccionado, porque se consideró que había mayor probabilidad de ocurrencia de cobertura de nubes, durante la tarde en gran parte de la superficie de la tierra.

2.4 RESOLUCIÓN DE LAS IMÁGENES DE PERCEPCIÓN REMOTA

Es posible definir la resolución de un sistema sensor, como su habilidad para registrar, discriminándola, información de detalle. Los términos “discriminando” e “información de detalle” son relativos al propósito y al entorno geográfico del proyecto que se esté abordando. La separabilidad entre objetos está en íntima relación con la escala de trabajo y con la complejidad del paisaje. Por ejemplo, pueden detectarse algunos rasgos geográficos como

ríos o carreteras, de anchura inferior a la resolución espacial del sensor, siempre y cuando exista suficiente contraste radiométrico entre la señal proveniente de estos rasgos y la de cubiertas vecinas. Así cuanto mayor sea el contraste entre cubiertas terrestres, más fácil será su diferenciación.

En cuanto al significado de “información de detalle”, vale la pena anotar que se refiere no sólo al detalle espacial que proporciona el sensor, sino también al número y anchura de las bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal, y a su capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta. En teledetección, el término resolución se desdobra en cuatro parámetros diferentes e independientes: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

RESOLUCION ESPACIAL: es el concepto que designa el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, por lo tanto es definida como la capacidad del sistema sensor para captar objetos de la superficie terrestre; cuanto menor es el objeto posible de ser visto, mayor es la resolución espacial. La manera más común de determinar esta resolución, es mediante su "campo instantáneo de observación" (Instant Field of View - IFOV). Este campo está determinado por las propiedades geométricas del sistema sensor, y define el área de terreno captado, que es vista por el instrumento de teledetección a una altitud y un momento dados.

Debe mencionarse que el campo instantáneo de observación (IFOV), es consecuentemente la resolución espacial, siendo un concepto teórico, dado que existen variaciones de la órbita de los satélites que lo hacen variar. El tamaño de píxel que le representa es fijo, y está determinado por el intervalo de muestreo de la señal recibida por el sensor.

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de una imagen, por cuanto marca de alguna forma el nivel de detalle que ésta ofrece. En términos generales puede afirmarse, que sólo serán distinguibles sobre una imagen elementos de tamaño superior, como mínimo, al del píxel. En consecuencia, la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad obtenible de una interpretación. Cuanto menor sea el tamaño del píxel, menor también la probabilidad de que éste sea un compuesto de dos o más cubiertas adyacentes. Un píxel mixto, viene definido por una señal que es mezcla de las señales de los diversos elementos que le componen. En consecuencia, puede no asemejarse a ninguno de ellos, dificultando notablemente su correcta identificación.

RESOLUCION ESPECTRAL: está definida por el número de bandas espectrales de un sistema sensor, y por el ancho del intervalo de longitud de onda cubierto por cada una. Generalmente cuando se tienen muchas bandas, estas corresponden con intervalos de ancho menor, y dan al sensor una resolución espectral mayor. Este tipo de resolución puede mostrarse con el caso de dos fotografías hechas del mismo objeto: una en blanco y negro y otra en colores. La primera lo presenta en una sola banda espectral, mientras la segunda lo muestra en tres bandas, roja, verde y azul, que cuando se combinan por superposición muestran el objeto en tres colores.

En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de los diferentes materiales que constituyen la superficie terrestre. A la vez, conviene que las bandas sean suficientemente

estrechas, para recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro electromagnético. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre materiales de interés.

La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye cualquier sensor, está estrechamente relacionada con los objetivos de su diseño. Para un sistema de tele-observación dedicado a fines meteorológicos, basta situar una sola banda en el visible, puesto que no existen diferencias cromáticas en las nubes. Por el contrario, será conveniente que incluya una o dos bandas en el infrarrojo térmico, que le permitan conocer la temperatura de dichas nubes, y otra en el infrarrojo medio, en donde pueda observarse el contenido de humedad en la atmósfera.

RESOLUCION RADIOMETRICA: Hace mención a la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Consiste en el número de niveles digitales, representando tonos de gris, usados para expresar los datos colectados por el sistema de tele-observación. Cuanto mayor es el número de niveles, mayor es la resolución radiométrica. Para entender mejor este concepto, pensemos en una imagen con apenas dos niveles (blanco y negro), y comparémosla con otra de 32 tonos de gris; obviamente la cantidad de detalles perceptibles en la segunda será mayor que en la primera, y por lo tanto la segunda imagen tendrá una mejor resolución radiométrica.

Al igual que en los otros tipos de resolución, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen. El número de niveles más adecuado depende del método que se siga en la interpretación. Si ésta es visual, conviene considerar que el ojo humano difícilmente percibe más de 64 niveles de gris, y no más de 200000 tonalidades. Algunos autores estiman que basta con 16 niveles por color para garantizar un análisis visual adecuado, por lo que parece superfluo contar con 256 niveles digitales por banda (16 millones en una combinación coloreada de 3 bandas).

RESOLUCION TEMPORAL: Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura.

La cadencia temporal de los sistemas espaciales varía de acuerdo con los objetivos fijados para el sensor. Los satélites meteorológicos están obligados a facilitar una información muy frecuente, ya que se dedican a observar un fenómeno de gran dinamismo. Por el contrario, los satélites de recursos naturales ofrecen una cadencia mucho menor: entre los 16 días del Landsat y los 26 del SPOT.

2.5 CARACTERÍSTICAS DEL LANDSAT TM

El landsat TM mide radiación electromagnética en un total de siete (7) bandas: tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo lejano y una en el infrarrojo termal. El **canal 1 (0.45 a 0.52 μm – visible, azul)** es útil para cartografía de costas, diferenciación entre suelo y vegetación, y entre vegetación estacional y coníferas; el **canal 2 (0.52 a 0.60**

μm – visible, verde) muestra muy bien la reflectividad de la vegetación verde saludable; el canal 3 (0.63 a 0.69 μm – visible, rojo) coincide con un pico de absorción de la clorofila; el canal 4 (0.76 a 0.90 μm – infrarrojo cercano) es útil para diferenciar cuerpos de agua, muestra alta reflectividad de la vegetación verde uniforme, y es sensible a la morfología del terreno, lo cual le permite obtener datos sobre geomorfología, suelos y geología; el canal 5 (1.55 a 1.75 μm – infrarrojo lejano), permite diferenciar nieve de nubes, y posibilita realizar medidas de humedad en la vegetación; el canal 6 (10.4 a 12.5 μm – infrarrojo termal) es sensible a los fenómenos de contrastes térmicos, principalmente a aquellos relacionados con la emisión de calor, por parte de los materiales que constituyen la superficie del planeta tierra; por último, el canal 7 (2.08 a 2.35 μm – infrarrojo lejano) es sensible a la morfología del terreno, lo cual también le permite obtener informaciones sobre geomorfología, suelos y geología, y realizar cartografía hidrotermal en terrenos áridos a semi-áridos. Con excepción del canal 6, el sensor Landsat TM presenta un campo instantáneo de observación de 30m x 30m en el terreno; la banda 6 tiene una resolución espacial del 120m x 120m. Todos los canales o bandas poseen una resolución espectral de 256 niveles de gris, donde "0" corresponde con el color negro y "255" con el blanco.

Algunos parámetros orbitales del satélite Landsat 5, donde está montado el sensor TM que hasta el año pasado aun estaba produciendo información satelitaria, son los siguientes:

Altitud (Km): 705

Inclinación (grados): 98,20

Periodo (minutos): 98,20

Horario de pasada por el Ecuador: 9:45 A.M.

Duración del ciclo de cobertura (días): 16

Los sensores a bordo del Landsat 5 colectan datos de una faja de 185 Km de longitud, que determinan igual ancho para las escenas Landsat TM. Este satélite tiene órbita aproximadamente polar y sincrónica con el sol; esto significa que observa la tierra mas o menos en sentido norte sur cuando registra su parte iluminada, y sur a norte en la oscura, cruzando el Ecuador a mas o menos la misma hora cada órbita.

Dado que las órbitas son sincrónicas con el sol (sol-sincrónicas), en un mapamundi con proyección transversa de Mercator, estas se dibujan como curvas sinusoidales (**Figura. 7**). El ciclo de cobertura, es el número de días que el satélite tarda en completar el cubrimiento total del planeta.

2.6. OTROS SISTEMAS MULTIESPECTRALES DE TELE-OBSERVACIÓN

IKONOS: en operación desde 1999, es comercializado por sus fabricantes como el satélite que ve la tierra a 680 Km de distancia, tan claramente como se observa desde un avión a 3000 m de altura. Moviéndose a 26000 Km/hr, IKONOS resuelve la superficie terrestre a un metro, algunas de las características de este sistema de tele-observación son las siguientes:

Resolución espacial: 1 m blanco y negro, 4 m multi-espectral

Tamaño de la escena: área de interés especificada por el usuario

Banda pancromática: 0.45 a 0.90 μm (visible – infrarrojo cercano)

Bandas multi-espectrales: Canal 1, 0.45 a 0.53 μm (visible – azul)

Canal 2, 0.52 a 0.61 μm (visible – verde)
Canal 3, 0.64 a 0.72 μm (visible – rojo)
Canal 4, 0.77 a 0.88 μm (infrarrojo cercano)

Resolución temporal: 1 – 3 días

Resolución radiométrica: 2048 niveles de gris

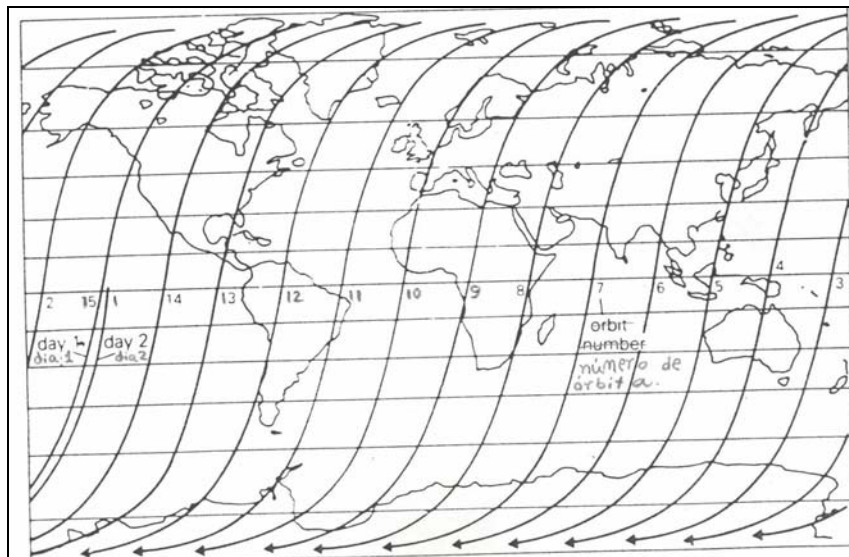
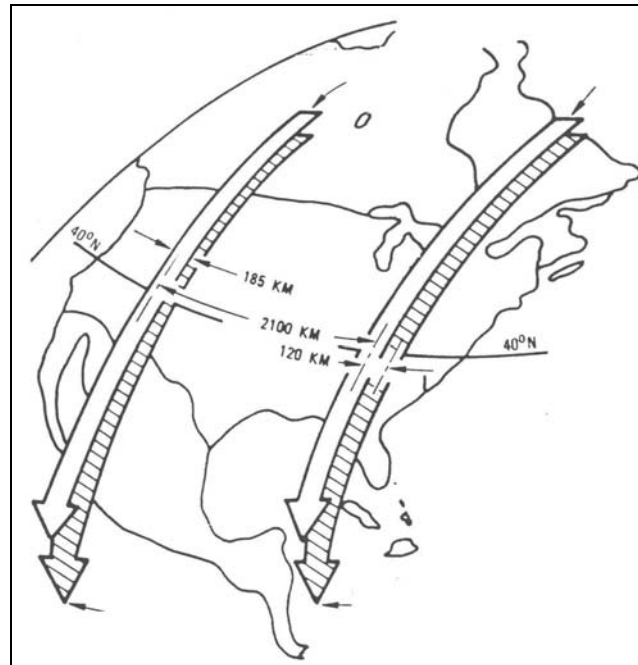


Figura 7.Orbitas Landsat sobre los EE.UU en días sucesivos

QUICKBIRD: es un satélite propiedad de DigitalGlobe, que colecta imágenes hasta de 0.61 m de resolución espacial. Fue lanzado el 18 de octubre de 2001, sus principales características son las siguientes:

Altitud de órbita: 450 m
Tiempo de re-visita: 1 – 3.5 días dependiente de la latitud (30° fuera de nadir)
Swath: 16.5 Km x 16.5 Km en posición nadir
Resolución radiométrica: 2048 niveles de gris

Banda Pancromática
0.45 – 0.90 μm (visible – infrarrojo cercano)
Resolución espacial: 61 cm (nadir) a 72 cm (25° fuera de nadir)

Bandas multiespectrales
0.45 – 0.52 μm (visible – azul)
0.52 – 0.60 μm (visible – verde)
0.63 – 0.69 μm (visible – rojo)
0.76 – 0.90 μm (infrarrojo cercano)
Resolución espacial: 2.44 (nadir) a 2.88 (25° fuera de nadir)

SPOT: es uno de los proyectos de teledetección espacial mas novedosos, en comparación con los parámetros marcados por el programa Landsat. El Systeme Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT), desarrollado por el CNES francés, en colaboración con Bélgica y Suecia, lanzó su primer satélite en 1986. Sus características principales son las siguientes:

Banda 1	0.50 a 0.59 μm (visible – verde)
Banda 2	0.61 a 0.68 μm (visible – rojo)
Banda 3	0.79 a 0.89 μm (infrarrojo cercano)
Banda Pancromática	0.51 a 0.73 μm (visible e infrarrojo cercano)
Resolución Espacial:	20 m en modo multi-espectral y 10 m en modo pancromático
Resolución temporal:	26 días
Resolución radiométrica:	256 niveles de gris

NOAA – AVHRR: el National Oceanographic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer, pertenece a una familia de satélites que constituye uno de los múltiples programas diseñados para enviar información meteorológica a la superficie terrestre. Algunas de sus características son las siguientes:

Banda 1	0.580 – 0.680 μm
Banda 2	0.735 – 1.100 μm
Banda 3	3.550 – 3.930 μm
Banda 4	10.30 – 11.30 μm
Banda 5	11.50 – 12.50 μm
Resolución radiométrica:	1024 niveles de gris
Resolución espacial:	1.1 Km
Resolución temporal:	1 – 2 días
Swath:	1100 Km (escenas de 1100 x 1100 Km)

ASTER: el Advanced Spaceborne Emission and Reflection radiometer (ASTER) es un sensor remoto multiespectral avanzado, que vuela a 705 Km de altura, tiene un período de revisita de 16 días, y fue puesto en el espacio en diciembre de 1999. ASTER cubre una región espectral amplia con catorce (14) bandas, que van desde el visible hasta el infrarrojo termal, con resoluciones espacial, espectral y radiométrica altas. Cada escena ASTER cubre un área de 60 x 60 Km, y cuenta con una banda adicional del infrarrojo cercano con mirada hacia atrás, que aporta cobertura estereoscópica. Las resoluciones espacial y radiométrica varían con la longitud de onda así:

SUBSISTEMA RADIOMETRO DEL VISIBLE Y EL INFRARROJO CERCANO (VNIR)

Banda 1	0.52 – 0.60 μm (visible – verde)
Banda 2	0.63 – 0.69 μm (visible – rojo)
Banda 3 N (nadir)	0.78 – 0.86 μm (infrarrojo cercano)
Banda 3 B (vista atrás)	0.78 – 0.86 μm (infrarrojo cercano)
Resolución espacial: 15 m	
Resolución radiométrica: 256 niveles de gris	

SUBSISTEMA RADIOMETRO DEL INFRARROJO DE ONDA CORTA (SWIR)

Banda 4	1.600 – 1.700 μm
Banda 5	2.145 – 2.185 μm
Banda 6	2.185 – 2.225 μm
Banda 7	2.235 – 2.285 μm
Banda 8	2.295 – 2.365 μm
Banda 9	2.360 – 2.430 μm
Resolución espacial: 30 m	
Resolución radiométrica: 256 niveles de gris	

SUBSISTEMA RADIOMETRO DEL INFRARROJO TERMAL (TIR)

Banda 10	8.125 – 8.475 μm
Banda 11	8.475 – 8.825 μm
Banda 12	8.925 – 9.275 μm
Banda 13	10.25 – 10.95 μm
Banda 14	10.95 – 11.65 μm
Resolución espacial: 90 m	
Resolución radiométrica: 4096 niveles de gris	

3.PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

3.1 LA MATRIZ DE DATOS EN UNA IMAGEN DIGITAL

Como ya se había anotado anteriormente, los sistemas de tele-observación constan de sensores que exploran secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo a intervalos regulares la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados. El sensor detecta la radiancia media de una parcela o área determinada del terreno, equivalente al tamaño del

píxel, unidad visual más pequeña que aparece en la imagen. Este valor medio es traducido por el sensor a un valor numérico; en consecuencia, cada píxel de la imagen viene definido por un número entero, que es proporcional a la radiancia recibida por el sistema de percepción remota para una determinada parcela de la superficie terrestre, y en una banda específica del espectro electromagnético.

Este valor numérico se denomina nivel digital (ND). El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que puede fácilmente traducirse a una intensidad visual o si se prefiere, a un nivel de gris mediante cualquier convertidor digital-analógico. El ND se ha conocido con distintos nombres en los libros de percepción remota: número digital (digital number), valor de píxel (píxel value), valor de brillo (brightness value) o nivel de gris (grey level). El término nivel digital define un valor (digital) con un claro contenido pictórico (nivel de gris). En resumen, la unidad mínima de información en una imagen de percepción remota se denomina píxel, definido por un número entero, ND, que puede convertirse en una intensidad luminosa o nivel de gris.

Teniendo presente estas ideas, la organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse en la **Figura 8**. Como vemos se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden con las coordenadas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. La orientación aproximada Norte-Sur se expresa a través de las filas de la matriz (rows), que también pueden ser denominadas como líneas (lines), mientras que las columnas (columns) indican la disposición Oeste-Este. En esta matriz, el origen de coordenadas se sitúa en la esquina superior-izquierda (línea 1, columna 1), en lugar de ubicarse en el borde inferior-izquierdo, como ocurre en cualquier eje cartesiano. Esto es debido a la secuencia de adquisición de imágenes, de Norte a Sur, de acuerdo con la traza del satélite. Por lo tanto las coordenadas anteriormente mencionadas no tienen ningún contenido geográfico, porque están relacionadas solamente con la organización de la matriz de píxeles que genera una imagen. La tercera dimensión corresponde con la resolución espectral del sensor; en consecuencia, habrá tantos planos en la imagen como bandas originalmente detectadas.

3.2 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Entendiendo el carácter matricial de cualquier imagen numérica, son más fácilmente comprensibles las posteriores transformaciones aplicadas sobre ella. Estas son, en muchos casos, operaciones estadísticas comunes a otras matrices numéricas. Por ejemplo, en una imagen digital podemos calcular medidas de tendencia central y dispersión (media y desviación típica en cada una de las bandas), cambiar su orientación geométrica (rotación de la matriz), realizar combinaciones aritméticas entre bandas (cocientes), sintetizar varias bandas reduciendo la información redundante (componentes principales), o discriminar grupos de ND homogéneos dentro de la matriz (clasificación).

Así el tratamiento digital de las imágenes de tele-observación, consiste en la manipulación digital de los datos satelitales, con el fin de facilitar la identificación y extracción de las informaciones contenidas en las ellas. Para las actividades interactivas de análisis y procesamiento de los datos de percepción remota, es necesario utilizar hardware y un

software especializados. El resultado de este proceso es la producción de otras imágenes, que contienen informaciones específicas, extraídas y realizadas a partir de los datos brutos.

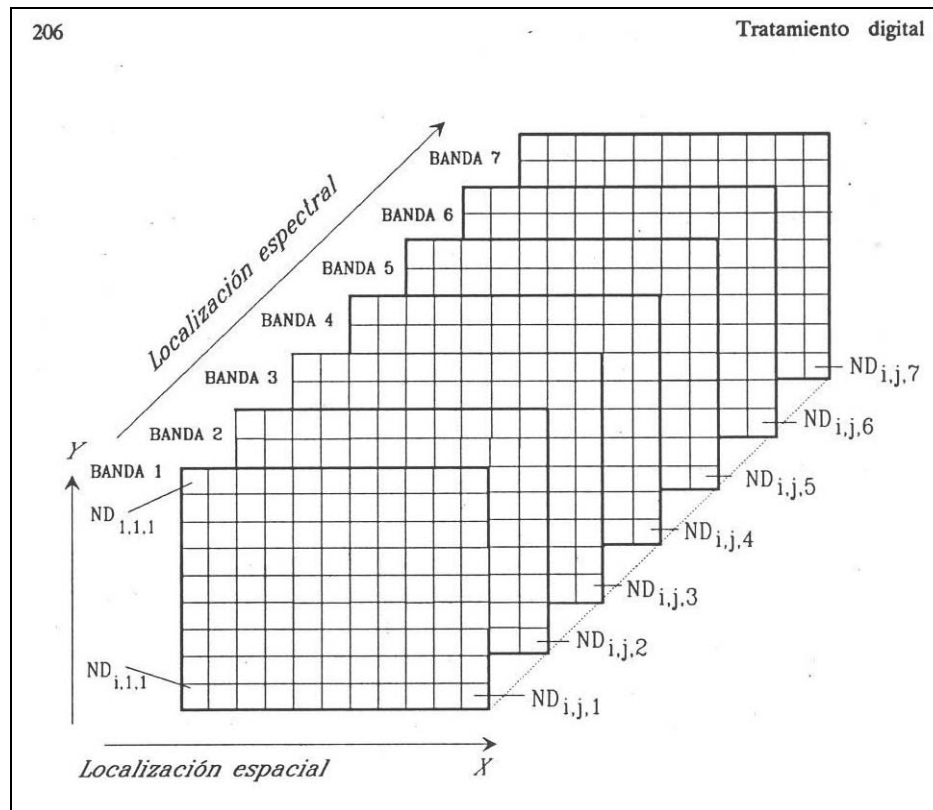


Figura 8. Organización de una imagen digital

3.3 HISTOGRAMAS Y ESTADÍSTICAS DE LAS IMÁGENES

Para entender los procesos involucrados en el realce digital de las imágenes, es necesario considerar la estructura de los datos dentro de las mismas. Esto no es fácil, porque en la mayoría de los casos se cuenta con varias bandas. Una primera aproximación muy útil, consiste en estudiar la distribución de las informaciones en una sola banda, lo cual puede hacerse mejor gráficamente mediante un histograma de números digitales. Este muestra la distribución estadística de los valores de los datos, dibujando porcentajes de frecuencia (eje vertical) contra valores de números digitales (eje horizontal, 0 - 255). Los porcentajes de frecuencia o frecuencias relativas de un determinado nivel digital, se definen como la proporción del número total de píxeles de la imagen que tienen dicho valor.

Es claro que el histograma de una imagen entera será diferente del de una porción de esta, dado que las propiedades estadísticas de la información satelital no son estáticas. Al observar el histograma de la banda de una escena multispectral, inmediatamente se tiene una noción sobre las características de la misma. Su forma aporta informaciones de gran importancia,

tales como la intensidad media y la dispersión de los valores de números digitales, lo cual a su vez da una medida del contraste de una imagen: a mayor dispersión a lo largo del eje de los números digitales, mayor contraste presentará la imagen.

Es importante anotar que el histograma de una imagen, no contiene ninguna información espacial sobre ella. Los datos satelitales de una escena homogénea, tal como un monocultivo en un terreno plano, van a generar un histograma con un solo pico prominente (Fig. 9), correspondiente con una distribución normal o gaussiana. Una imagen de satélite que contiene áreas con agua y otras cubiertas por suelo, tal como una región costera, va a presentar un histograma típicamente bimodal. La correlación espacial de los píxeles, hace que aquellos correspondientes con el agua, generalmente más oscuros, aparezcan agrupados cerca del origen, mientras los demás se dispersen en forma mas o menos pronunciada, por el resto del intervalo de los números digitales (**Figura 9**).

Así, las imágenes que contienen diferentes tipos de cobertura superficial, mostrarán picos múltiples, y si estas tuvieran diferencias significativas en sus valores medios de respuesta espectral, serán claramente separadas en el histograma. De esta manera, al observar la forma del mismo, se tiene una especie de aproximación sobre las características espectrales del área registrada por el sensor. Del histograma de una banda, también pueden extraerse características estadísticas de la distribución de intensidades, tales como la media, la moda, la desviación standard y otras.

3.4 EXPANSIÓN DE CONTRASTE

La mayoría de las imágenes de percepción remota, son adquiridas por los sensores en una resolución radiométrica de 256 tonos de gris, entre el negro y el blanco. A pesar de esto, difícilmente los datos contenidos en una escena satelital, se distribuyen por todo el intervalo posible de niveles de gris, siendo lo más común la concentración en una faja pequeña. La idea de contraste digital puede ilustrarse con un símil fotográfico: una fotografía aparece con poco contraste, desvaída, cuando no existe una gran diferencia entre sus tonos más claros y sus tonos más oscuros. De la misma forma, podemos definir digitalmente el contraste en relación con los ND máximo y mínimo de una imagen.

Ese rango máximo de 256 niveles de gris debe aplicarse al conjunto de paisajes que puede detectar un sensor, desde los de muy baja reflectividad como las zonas marinas, hasta los de muy alta reflectividad como el desierto o las zonas nevadas. Lógicamente, en una sola escena casi nunca se alberga tal variedad de paisajes, por lo que el rango final de la imagen no coincide con el número de niveles digitales disponibles. Esto supone que la imagen aparezca poco contrastada, ya que una buena parte de los niveles de gris permitidos por el equipo de visualización queda inactiva.

Dado que el sistema visual humano solo logra discriminar cerca de treinta (30) tonos de gris, una imagen de satélite vista de la forma como es adquirida por el sensor, aparece visualmente con bajo contraste. Para que las informaciones en ella contenidas puedan ser extraídas por un analista humano, su histograma comprimido tiene que ser expandido para ocupar todo el intervalo disponible. Este concepto es la base de la expansión o aumento de contraste.

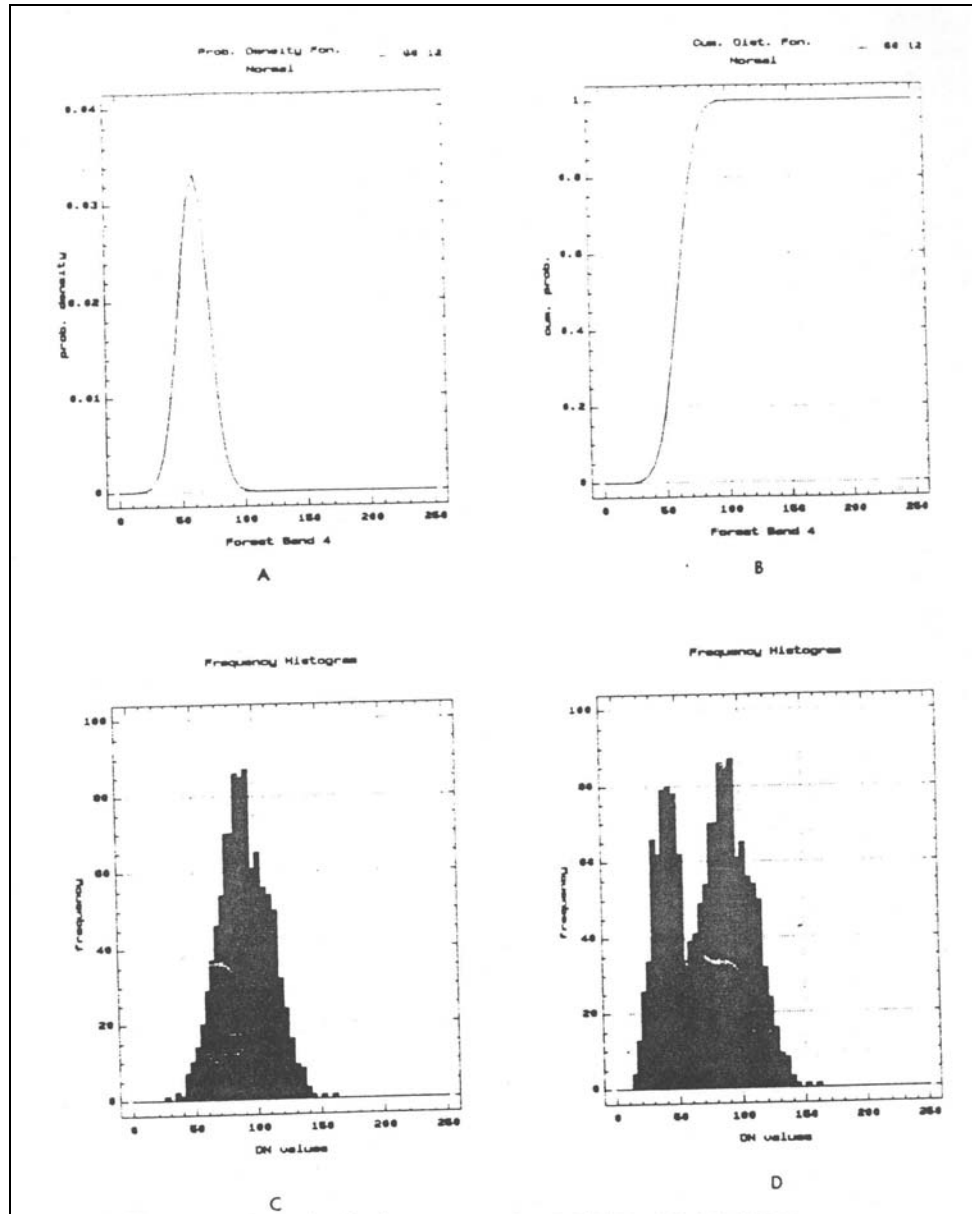


Figura 9. Ejemplos de histogramas de numero digital ND

La expansión de contraste (contrast stretch), es probablemente una de las técnicas más poderosas, importantes y sin duda mas utilizadas en el procesamiento digital de las imágenes satelitales. A pesar de esto, debe enfatizarse que su aplicación nunca revelará información nueva, o sea que no estuviera ya contenida en la imagen original. Su función es la de presentar la información contenida en los datos brutos, de una forma mas claramente visible para el intérprete.

El contraste de una imagen es una medida de la dispersión de los niveles de intensidad que en ella aparecen. A mayor dispersión mayor contraste y viceversa (Fig. 10). Hay muchos métodos de expansión de contraste, pero los más utilizados son el lineal simple y la equalización o igualación de histogramas.

EXPANSION DE CONTRASTE LINEAR SIMPLE: es el método más simple e igualmente el más utilizado. Incrementa el contraste preservando las relaciones originales de radiancia entre los píxeles, genera una imagen de salida en la cual los niveles digitales mínimo y máximo son 0 y 255 respectivamente. Se expresa matemáticamente como:

$$ND_o = (ND_i - MIN) \times 255 / (MAX - MIN)$$

Donde ND_o = número digital del píxel de salida

ND_i = número digital del píxel de entrada

MAX = número digital máximo (según usuario)

MIN = número digital mínimo (según usuario)

El usuario o el sistema establecen dos umbrales mínimo y máximo respectivamente, que suele ser la media de los niveles de gris de la imagen, más y menos dos desviaciones típicas (Standard). A todos los píxeles con un valor de número digital menor o igual que el mínimo, se les asigna un ND igual a "0" (negro), y todos los iguales o mayores que el valor máximo, son llevados a un ND de 255 (blanco), y los demás valores se re-distribuyen entre estos dos umbrales. Esto tiene el efecto de truncar las colas del histograma de frecuencia, porque se pierden todos los ND menores y mayores que los números mínimo y máximo seleccionados.

ECUALIZACION DE HISTOGRAMA: la expansión lineal del contraste no tiene en cuenta las características del histograma de la imagen, sino sus extremos. La equalización del histograma es una expansión de contraste, en donde no hay una relación lineal entre los valores ND de entrada y salida. La transformación es generalmente una función determinada por el computador, que relaciona la organización de frecuencia de los datos de entrada, con una curva específica de distribución. Según este criterio, el valor de ND del píxel de salida, está en proporción no sólo con su valor de entrada, sino también con su frecuencia. En la equalización de histograma los valores ND originales son redistribuidos con base en su frecuencia de ocurrencia, con la mayor expansión de contraste dándose dentro de la parte más poblada del rango de números digitales. Esto se expresa en la correspondiente compresión de los datos en las colas de la distribución.

La distribución de frecuencia resultante es amplia y aplanada, con caídas rápidas a cada lado; para generarla es necesario asignarle valores máximos y mínimos. Se ha encontrado útil su aplicación en algunos problemas geológicos; es una expansión muy fuerte, que genera imágenes muy contrastadas, que algunos autores consideran sin ventajas aparentes para interpretación.

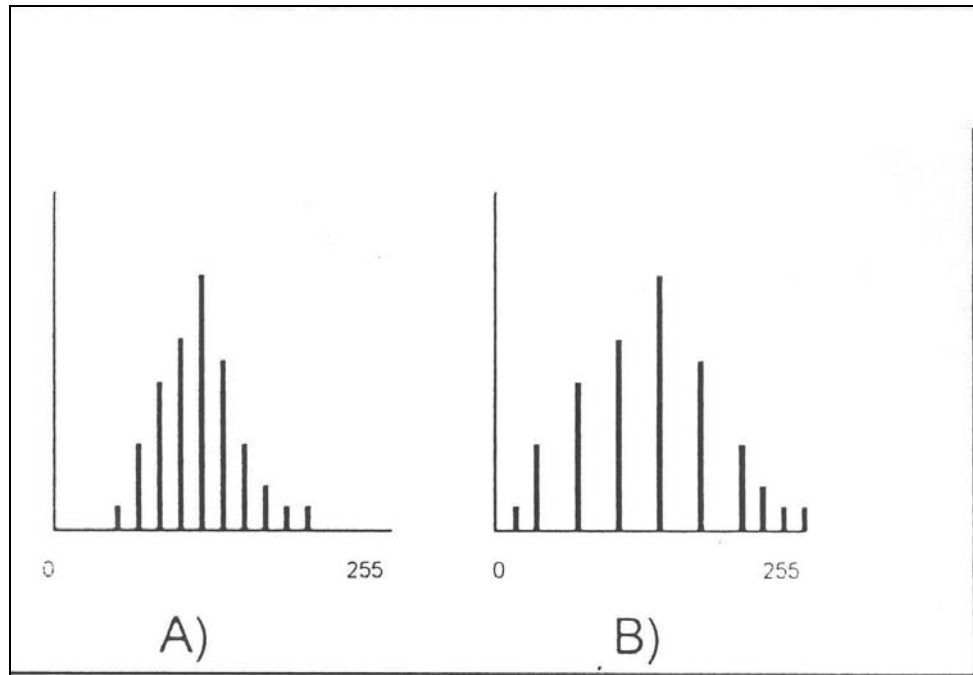


Figura 10. La imagen cuyo histograma está representada en A . posee menos contraste que la imagen del histograma B puesto que la dispersión de este último es mayor que en el primero.

3.5 FILTRADO ESPACIAL

Dentro de una imagen, las variaciones en el brillo (ND) muestran una distribución de frecuencia espacial compleja, que puede representarse como series de ondas sinusoidales, si se dibuja la línea de una imagen en el eje "X" y las intensidades (ND) en el "Y". Tal como se muestra en este análisis, las variaciones de brillo corresponden tanto a cambios súbitos (alta frecuencia) como graduales (baja frecuencia).

Dentro de una imagen los rasgos de alta frecuencia, generalmente coinciden con atributos lineares o curvilíneos tales como carreteras, límites entre cultivos, contactos litológicos, fallas y bandeamiento composicional; tales rasgos también son llamados "bordes". Así, un borde puede ser un límite separando dos áreas con características diferentes (contacto geológico), o una línea que difiere de las características de las áreas a sus dos lados. Los cambios de baja frecuencia tienden a ser de forma más irregular, y pueden corresponder con pliegues mayores o intrusiones.

La frecuencia espacial de un rasgo no es un atributo absoluto, depende de la escala de la imagen y su resolución, habiendo una transición completa entre rasgos de alta y baja frecuencia. A medida que la resolución se hace más gruesa (aumento de escala), los rasgos de frecuencia más alta desaparecen completamente. A escalas más pequeñas (regionales), hasta las características geológicas regionales pueden aparecer como rasgos de alta frecuencia (por ejemplo, lineamientos), mientras que a escalas más grandes no podrían ser reconocidos.

Las técnicas de análisis de imágenes que realzan frecuencias espaciales específicas, son conocidas como filtrado espacial. Al igual que en las técnicas fotográficas convencionales, un filtro se aplica en análisis digital para aislar componentes de interés. Así los filtros aplicados sobre una imagen, pretenden reforzar o suavizar los contrastes espaciales presentes en los ND que la componen; en otras palabras, se trata de transformar los ND originales, de tal forma que se asemejen o diferencien más de los correspondientes con píxeles vecinos. Los filtros que realzan las frecuencias altas son conocidos como de paso alto, y aquellos que destacan frecuencias bajas son los de paso bajo. El proceso de filtrado llevado a cabo en una imagen raster se llama convolución, y se consigue aplicando una caja, caja de filtro o kernel.

Un filtro bidimensional consiste en un arreglo, donde a cada posición de celda se le asigna un peso, que puede ser positivo o negativo. La forma concreta de efectuar este proceso, es aplicar sobre los ND originales una matriz móvil de coeficientes de filtraje; dicha matriz puede tener un tamaño variable, en función del número de píxeles vecinos que se quieran implicar en el proceso. El filtrado espacial es una transformación pixel a pixel, que modifica los valores de los mismos en una imagen, de acuerdo con los ND de sus vecinos. Es por lo tanto una operación dependiente del contexto. Conceptualmente, la convolución implica el paso de la matriz móvil o kernel con sus factores multiplicadores pixel por pixel, a lo largo de la totalidad de la imagen. En cada posición, los ND de los píxeles que quedan bajo la caja de filtro son multiplicados por el factor correspondiente; el resultado es promediado para la caja, y se utiliza para reemplazar el valor del pixel central en la imagen original. El kernel se mueve entonces hacia la siguiente posición, y se repite el proceso sucesivamente.

Para que la caja contenga una posición de pixel central, deben utilizarse números impares en el diseño de su dimensión, por ejemplo 3x3, 5x5, 9x9, etc. Los píxeles de los bordes de una imagen no se afectan por el proceso de filtrado, porque no tienen la totalidad de los vecinos necesarios para realizar el cálculo; así en una matriz de filtraje de 3 X 3 se pierden la primera y última fila y columna; si empleamos matrices de mayor tamaño, la merma será más significativa: con 5 X 5, se perderían las dos primeras y últimas; con 7 x 7 las tres, etc.

Los **filtros de paso bajo** tienden a aislar el componente de homogeneidad en la imagen, seleccionando áreas donde la frecuencia de cambio es baja. Tienen por objetivo el de suavizar los contrastes espaciales presentes en la escena; tratan de asemejar el ND de cada píxel al de los píxeles vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de la imagen. Esto supone que la escena filtrada ofrece perfiles menos nítidos, más difuminados. Tienen kernels con todos los factores multiplicadores positivos. El más simple sería aquel donde cada celda de la caja tiene el valor "1":

$$\begin{array}{cccc} 1/9 & \times & 1 & 1 & 1 \\ & & & 1 & 1 & 1 \\ & & & & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Aquí el valor promedio que coincide con el kernel en movimiento para cada posición, es asignado al píxel central produciendo una imagen suavizada. Este tipo de filtraje se utiliza para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen, fruto de un defecto en la adquisición o recepción de los datos.

Los **filtros de paso alto** pretenden aislar los componentes de alta frecuencia en una imagen. En términos espaciales, esto supone remarcar digitalmente los contrastes espaciales entre los

píxeles vecinos, enfatizando los rasgos lineales presentes en la imagen, tales como carreteras, parcelas o accidentes geológicos. En definitiva, intentan reforzar los contornos entre áreas homogéneas, evidenciando cualquier discontinuidad. Tienen un valor positivo en la celda central, y pesos negativos en las restantes. Cuando la suma de los pesos de la caja es cero, el valor de pixel debajo de la celda central, es reemplazado por la diferencia numérica de la caja de la matriz. La imagen de salida puede mostrar un histograma muy estrecho centrado en cero, que debe redistribuirse para despliegue. Esto puede lograrse sumándole un valor constante (127) a cada ND convoluído y expandiendo el rango de 0 a 255. El más común es el de detección de bordes:

```
-1 -1 -1
-1  8 -1
-1 -1 -1
```

Los **filtros direccionales**, son aquellos que dependen de la distribución asimétrica de pesos positivos y negativos en un kernel, a lo largo de una dirección particular que se quiere realzar en la imagen. En oposición a los filtros normales de detección de bordes, los direccionales poseen sus pesos distribuidos alrededor de un eje hipotético, con las direcciones a ser realizadas paralelas al mismo.

El problema con este tipo de filtros, es que suelen generar bordes artificiales, también llamados "artefactos", que pueden confundir al intérprete, haciéndole pensar que se trata de un rasgo verdadero. Algunos ejemplos de filtros direccionales son:

N-S	NE-SW	E-W
1 2 1	0 1 2	-1 0 1
0 0 0	-1 0 1	-2 0 2
-1 -2 -1	-2 -1 0	-1 0 1

3.6 GEO-REFERENCIACIÓN

Las imágenes generadas por percepción remota, están sujetas a una serie de distorsiones espaciales, que les llevan a carecer de precisión cartográfica en cuanto a la ubicación de los objetos, superficies o fenómenos en ellas representados. Además de esto, la información extraída de las mismas, necesita muchas veces ser integrada con otros tipos de datos, representados como mapas. Este requerimiento es muy común cuando se trabaja con sistemas de información geográfica, en los cuales las escenas de teledetección son una de las principales fuentes de datos. En otras ocasiones, las informaciones contenidas en una imagen de satélite, necesitan ser presentadas al usuario como un "mapa-imagen", con una red geográfica de referencia superpuesta a la misma.

Un mapa puede definirse como "una representación gráfica, en una superficie plana, de la superficie de la tierra o de parte de ella, mostrando sus rasgos geográficos superficiales. Estos son ubicados de acuerdo con controles geodésicos, mallas geográficas, proyecciones y escalas previamente definidas". Una proyección cartográfica es una manera de representar la superficie curva de la tierra, sobre una de naturaleza plana. Muchos tipos de proyecciones son utilizadas para lograrlo; en Colombia la mas usada es la Universal Transversa de Mercator,

que consiste en una superficie de proyección definida por un cilindro tangente a un meridiano determinado.

Para introducir precisión cartográfica en las imágenes de teledetección, es necesario corregirlas de acuerdo con algún sistema de coordenadas. Se llama geo-referenciación, corrección geométrica o registro, la transformación de una imagen para que esta asuma las propiedades de escala y proyección de un mapa. Este concepto incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen, aquí no se pretende modificar los ND de los mismos, sino sólo su posición, sus coordenadas. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen.

Las imágenes de percepción remota, al igual que las fotografías aéreas pancromáticas convencionales, tienen gran variedad de distorsiones, generadas por el sistema óptico y por el movimiento de la plataforma. Mientras en las fotografías las distorsiones ópticas aumentan radialmente desde el centro, en las imágenes de barrido lineal este incremento es hacia los lados, porque el espejo cambia el ángulo de visión sobre la superficie continuamente. Tanto la escala y la geometría varían, a medida que uno se va alejando de la línea que define la mitad de la imagen. Se tiene una disminución lateral de la escala, que deforma la apariencia de los objetos en la imagen. Cuando aumenta la separación entre el sensor y el terreno a lo largo de la línea de barrido, la resolución se torna gruesa hacia los bordes de la imagen. Estas distorsiones pueden disminuirse, aumentando la altura de la plataforma y disminuyendo el ángulo de barrido.

En las imágenes de teledetección, también están presentes todas las distorsiones debidas al movimiento de la plataforma, tal y como se presentan en las fotografías aéreas. En el caso de los satélites, la tierra rota bajo ellos mientras se realiza el barrido de la imagen, de modo que se obtiene una escena en forma de paralelogramo, y no rectangular como suele pensarse. La geo-referenciación suele realizarse mediante la definición de puntos de control en el terreno.

3.7 TRANSFORMACIÓN MEDIANTE PUNTOS DE CONTROL EN EL TERRENO

Para aplicar esta transformación, es necesaria la existencia de una imagen que se considera como referencia, o de un mapa planimétrico o planialtimétrico confiable, en una escala adecuada para el área considerada, dado que tanto en la imagen como en el mapa, será necesario identificar puntos de control. En ambos casos, la corrección se realiza en tres fases: localización de puntos comunes a la imagen y al mapa (o a otra imagen de referencia), cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa, y transferencia de los ND originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

Las funciones que permiten transformar coordenadas de la imagen al mapa, precisan localizar una serie de puntos de control entre la imagen y el mapa. A partir de las coordenadas de estos puntos, puede estimarse una función que relacione ambos documentos. Dado que las funciones se estiman a partir de esa muestra de coordenadas, la calidad de ajuste dependerá de la precisión con que se localicen esos puntos. De lo contrario, la estimación resultará

sesgada. En definitiva, el establecimiento de puntos de control resulta la fase más crucial del proceso de corrección geométrica, y la que demanda mayor dedicación humana.

Los puntos de control son rasgos bien definidos, generalmente de gran contraste espectral en relación con sus alrededores, fácilmente reconocibles, que pueden ser ubicados con exactitud tanto en el mapa como en la imagen, y que en lo posible, tengan poca variabilidad en el tiempo. Así el propósito de esta transformación, es la de establecer las diferencias de posicionamiento de algunos puntos en la imagen y en el mapa, para a partir de ellas estimar la naturaleza de la distorsión presente en la primera, para poder estimar la transformación razonable a ser calculada para corregirla.

Ejemplos de puntos de control en el terreno (Ground Control Points) son intersecciones de carreteras, límites de rasgos agrícolas, creces de drenajes, pistas de aeropuertos, municipios, etc. Tales puntos identificados y ubicados en la imagen, como coordenadas de línea (row) y columna (column), utilizando un programa de procesamiento digital de imágenes. Las coordenadas geográficas de los mismos son obtenidas a partir de mapas, utilizando la mesa digitalizadora o midiéndolos con escala, para introducirlos en la escena multispectral.

El número de puntos de control depende del tamaño y la complejidad geométrica de la imagen. Si las deformaciones que presenta son importantes, conviene aplicar funciones de transformación complejas, como polinomios de segundo o tercer grado. Cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, se precisa también un mayor número de puntos de control. Matemáticamente sólo son necesarios tres (3) puntos para una función de ajuste de primer grado, seis (6) para una de segundo grado y diez (10) para una de tercer grado. Es necesario superar estos requerimientos mínimos, para garantizar una buena conformidad entre la imagen y el mapa.

Se recomienda que los puntos de control sean claramente identificables en la imagen y en el mapa, que sean rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismo temporal: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. No conviene señalar puntos en la línea de costa, pues el efecto de la marea puede modificar la localización exacta de un accidente geográfico. La misma idea puede aplicarse a los cursos de agua o embalses, que sufren alteraciones estacionales, en ocasiones de gran importancia. Algún elemento destacado de la vegetación podría utilizarse como punto de control, siempre que se disponga de la cartografía temática apropiada, y no se hayan producido cambios entre la fecha de la imagen y la del mapa. Respecto a la distribución, conviene que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre todo el terreno abarcado en la imagen. Esto evitará errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio. La norma es especialmente importante cuando la zona presenta contrastes topográficos.

El procedimiento usualmente adoptado, involucra la identificación de un mínimo de 6 a 10 puntos de control en una imagen de 1000 x 1000 píxeles. La transformación de coordenadas es entonces modelada, utilizando un polinomio lineal de bajo orden (generalmente de primer grado), obtenido a través del ajuste por el método de los mínimos cuadrados, en relación con los puntos de control del terreno (**Figura. 11**). Esta transformación corregirá cualquier distorsión presente en la imagen, produciendo una nueva escena, corregida según la

proyección cartográfica del mapa utilizado en la identificación de los puntos, usando un proceso de remuestreo por interpolación.

Nuestra propia experiencia indica que la selección de puntos de control es una tarea bastante laboriosa. Para el caso de Colombia, en muchas regiones no será fácil encontrar muchos rasgos humanos del paisaje no sujetos al dinamismo temporal, razón por la cual será necesario utilizar muchos cruces de drenajes para geo-referenciar las imágenes.

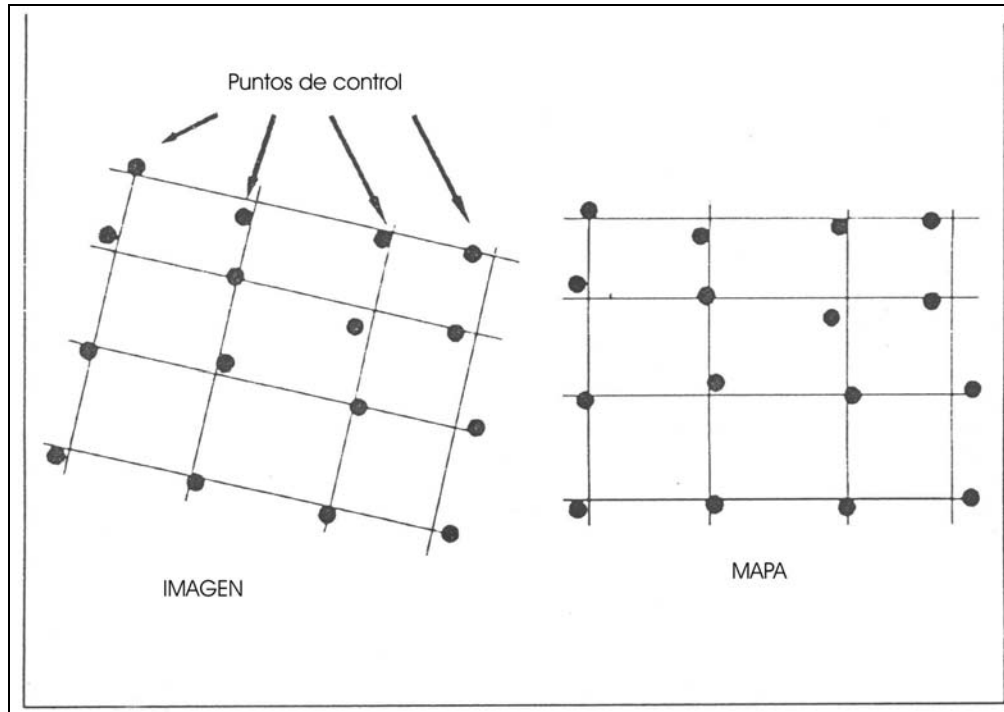


Figura 11. Modelo de distorsión usando puntos de control en el terreno, Este ejemplo representa una aproximación usando el método de los mínimos cuadrados y un polinomio lineal

3.8 REMUESTREO POR INTERPOLACIÓN

Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que una función lineal basta para aplicar unas transformaciones elementales de la imagen, como cambiar su escala y origen, inclinarla, modificar la relación entre sus ejes y rotarla. Estas alteraciones serán, de modo habitual, suficientes para corregir imágenes pequeñas, siempre que no se presenten contrastes altimétricos importantes. En caso de precisar una modificación más rigurosa, puede acudirse a funciones de segundo o tercer grado, en donde se abordan alteraciones geométricas no lineales.

La calidad de la corrección geométrica puede valorarse comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales. El indicador más utilizado

con este objetivo es el error medio cuadrático (RMS – Root Mean Square). Un alto RMS indica que este punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen/mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si este valor no es satisfactorio, puede optarse por eliminar aquellos puntos con un alto RMS, ya que se asume que no se localizaron correctamente. Al eliminarse algún punto de control, se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto. El proceso se interrumpe cuando todos los puntos seleccionados presentan un RMS por debajo de un cierto umbral, previamente fijado. El error medio debe estar, en ese momento dentro de unos márgenes tolerables, de acuerdo a la escala y a la precisión con que se pretenda obtener los resultados.

Los píxeles de una nueva imagen corregida, producida a partir de los datos originales, no corresponden espacialmente con los de la imagen original; esto implica la necesidad de atribuirle nuevos números digitales a las celdas de salida. Para determinar los valores de los píxeles en la malla corregida, la nueva imagen es remuestreada totalmente, determinando los nuevos ND, con base en la interpolación de los valores de nivel digital, en los píxeles más próximos de la escena original. El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada píxel de la imagen corregida debería corresponderse a un solo píxel de la original. Lo normal es que no sea así, sino que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original, ya que este proceso supone una alteración considerable de la geometría inicial de la escena. Por otra parte, puede variarse también el tamaño del píxel en la imagen corregida, haciendo aún más complejo encontrar el ND que mejor exprese el valor radiométrico originalmente detectado por el sensor.

Existen varios métodos de interpolación con diferentes presiciones, los mas comunes son vecino próximo, bilinear y convolución cúbica.

3.9 CORRELACIÓN ENTRE BANDAS

Las imágenes producidas por sensores remotos, sufren intrínsecamente de una deficiencia, que consiste en una gran repetición de información espectral de una banda hacia otra, porque los intervalos de longitud de onda son contiguos. Una sombra topográfica creada por la proyección oblicua de los rayos solares sobre el terreno imageado, siempre aparecerá oscura en una escena satelital, independientemente de la banda considerada; por lo tanto, todos los píxeles relativos a esas zonas sombreadas tendrán un ND bajo en todas las bandas, estando correlacionados desde el punto de vista espectral.

Se dice que dos bandas están correlacionadas, cuando tomando la intensidad de un píxel determinado en una de ellas, se puede deducir con razonable aproximación la intensidad del píxel correspondiente en la otra. Si las dos bandas son absolutamente idénticas, se dice que son 100% correlacionadas. Si una de ellas es el negativo de la otra, en este caso son -100% correlacionadas.

Un parámetro estadístico para expresar el grado de similitud, es el índice de correlación, cuyo valor máximo es igual a 1 y equivale al 100% de correlación anterior. En términos generales, valores mayores de 0.8 implican una correlación alta, y valores negativos corresponden con una correlación nula.

Para hacer composiciones en falso color y operaciones entre bandas, es necesario tener en cuenta este parámetro, porque la duplicidad de información genera composiciones, donde nunca se obtiene una buena distribución de los colores.

3.10 COMBINACIONES ENTRE BANDAS

La capacidad del sistema visual humano para diferenciar tonalidades de gris, no va más allá de treinta tonos diferentes. Cuando se trata de discernir colores, ese número aumenta fácilmente hasta algunas decenas de miles, que en teoría no sobrepasan los siete millones. Puede entonces decirse que para nuestro sistema visual, las diferencias de color son más perceptibles que las variaciones en tonos de gris.

Las imágenes de percepción remota, por ser de naturaleza multiespectral, están compuestas de diferentes bandas; por esto las composiciones en color de conjuntos de tres canales (tripletas), se constituyen en un método poderoso para sintetizar una cantidad de información muy grande, en una sola imagen que representa los datos satelitales con diferentes colores, lo cual facilita mucho su interpretación.

De este modo, los atributos de textura son fácilmente interpretados tanto en las imágenes monocromáticas como en las coloreadas. Por otro lado, es necesario tener cuidado con la manipulación de los colores en las imágenes de teledetección, pues una exageración de los mismos, puede introducir confusión visual en el intérprete, y consecuentemente perjudicar la percepción de los contrastes texturales, que muchas veces contienen precisamente la información deseada.

La reflexión que debe hacerse antes de realizar una composición en color, tiene que ser la siguiente: la información que se pretende extraer queda mejor expresada en colores, o sería visible en una imagen monocromática simple? Dado que las composiciones en color, son uno de los productos más comunes en procesamiento digital de imágenes de satélite, es necesario entender un poco los fundamentos básicos de la teoría de los colores.

3.11 LA TEORÍA BÁSICA DE LOS COLORES: EL ESPACIO RGB

Thomas Young (1773-1829) develó los principios de la teoría básica de los colores. El descubrió que proyectando la luz a través de filtros rojo, verde y azul, producía luz blanca si los tres círculos coincidían. Donde se encontraban dos de estos tres colores, nuevos colores se generaban: rojo y azul producen magenta, rojo y verde crean amarillo, y amarillo con verde da cyan. Igualmente se descubrió que variando la cantidad relativa de rojo, verde y azul en el área de sobreposición, era posible producir una enorme gama de colores, incluyendo diversos tonos para cada uno. Otra observación de Young fue que cualquiera de los tres colores iniciales, rojo, verde o azul, no podían ser producidos con la mezcla de dos de los otros, razón por la cual les denominó colores primarios aditivos.

Los monitores de los sistemas de procesamiento digital de imágenes, son en muchos casos capaces de representar cada uno de los colores básicos con 256 tonalidades diferentes; esto genera un total de más de 16 millones de mezclas posibles. Como se anotó anteriormente, el

sistema visual no consigue distinguir más de 7 millones; esto crea la necesidad de hacerse varias preguntas: ¿cuanto necesita cambiar un color para que el intérprete note el cambio? ¿Existen colores que son más visibles que otros?

A partir de experimentos de percepción de color con seres humanos, se ha observado que nuestros ojos diferencian con precisión cambios de tonos azules, detectan con menos exactitud las variaciones en tonalidades rojas y amarillas, y son mucho más limitados en la percepción de tonos azul-rojizos o azul-verdosos. La experiencia demuestra que el ojo humano es más sensible a variaciones de intensidad que de color.

3.12 COMPOSICIONES EN FALSO COLOR

Varios autores han puesto en evidencia que el ojo humano es más capaz de distinguir tonos de color que intensidades de brillo; por lo tanto el empleo del color puede facilitar notablemente el análisis visual de los datos de tele-observación. La generación de composiciones en falso color es la forma más tradicional de combinar tres bandas espectrales de una imagen satelital; es sin lugar a dudas, la técnica más utilizada en el procesamiento digital de los datos multiespectrales.

A partir de la información multiespectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Basta para ello aplicar cada uno de los tres colores primarios (azul, verde y rojo) a una banda distinta de la imagen, seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno. El proceso permite visualizar simultáneamente imágenes de distintas regiones del espectro, lo cual facilita la delimitación visual de los materiales que constituyen la superficie terrestre.

En el trabajo práctico, se puede utilizar cualquier trío de bandas para generar una composición en falso color. A pesar de esto, es necesaria una cuidadosa selección de las mismas, para que la imagen resultante contenga la información espectral que se quería resaltar. Esto obviamente se complica a medida que aumenta el número de bandas, lo cual es una tendencia creciente en el diseño de los sistemas de percepción remota.

Aunque la información contenida en una determinada tripleta de bandas es siempre la misma, independientemente de los colores básicos que se le asignen a cada una, las diferencias de percepción de nuestro sistema visual, hacen que distintas combinaciones posibles entre un juego de tres bandas, en la práctica parezcan tener diferentes informaciones. Por esto, la selección de los canales para generar una imagen en color, así como la asignación de colores para cada uno, no son asuntos triviales y merecen su debida atención, dado que de ellos depende el aprovechamiento máximo de la información.

Nunca se deben aceptar recetas de composiciones en falso color de determinadas bandas en determinados colores, porque cada escena multiespectral posee características propias, al igual que la información que se desea resaltar. Por esto la metodología para generar la mejor imagen en color, consiste en seleccionar cuidadosamente las bandas, con base en las características espectrales de los materiales de la corteza tema del estudio, para ensayar diversas combinaciones de colores, hasta encontrar la que más satisfaga la vista.

3.13 OPERACIONES ENTRE BANDAS

Muchas veces, es deseable que la información espectral contenida en una imagen de satélite, sea comprimida en un número menor de bandas, que en una situación ideal se espera sea igual a tres, para permitir combinarlas utilizando los colores básicos (rojo, verde y azul). Esto puede lograrse, mediante operaciones entre los diferentes rangos de longitud de onda contenidos en la imagen, dado que el resultado de la operación aritmética entre dos bandas, en teoría contiene la información presente en las mismas. En el trabajo práctico, las operaciones más utilizadas son la división y la diferencia normalizada.

3.13.1 División entre bandas

Dado que los datos de las imágenes multispectrales se presentan como números digitales discretos, estos pueden transformarse matemáticamente o combinarse en muchas formas diferentes, mediante el uso del computador. Una de estas transformaciones es la división de bandas individuales, que consiste en dividir cada número digital de los píxeles de una banda, por el ND de los píxeles correspondientes en otro canal. En una imagen esto puede tener el efecto de resaltar diferencias espectrales sutiles, entre materiales de la superficie, que pueden ser difíciles de detectar en combinaciones entre bandas.

Una propiedad de las imágenes generadas por división, es la de tender a perder los efectos topográficos, lo cual las hace difíciles de relacionar visualmente con mapas u otras imágenes. Por esto se recomienda, que cuando se utilicen en la generación de composiciones en color, se combinen con bandas simples que contengan información topográfica.

En teoría, los resultados de dividir dos números positivos serían valores que oscilan de cero a infinito. En la práctica, debido al rango tan restringido de valores de brillo registrado (0-255), y a la naturaleza correlacionada de los datos, los resultados de la división generalmente caen en el rango de 0.25 a 4.0. Antes de desplegar estos valores de salida, es necesario redistribuirlos de 0 a 255 mediante un algoritmo $ax + b$, donde "x" es el valor de entrada, "a" es un factor multiplicador y "b" es una constante.

Dado el problema de correlación de información entre las bandas, para obtener buenos resultados mediante el cociente entre las mismas, es necesario utilizar rangos de longitud de onda poco correlacionados. De lo contrario, el resultado de dividir dos canales sensiblemente similares, será aproximadamente igual a 1. Debe recordarse, que el recíproco de una división, contiene la misma información que el cociente original. Así $TM4/TM3=TM3/TM4$. Como su nombre lo indica, un cociente implica efectuar una división, píxel a píxel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Su empleo se justifica en dos situaciones: para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación, y para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de estas cubiertas. Como se recordará, la firma espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas visibles y las comprendidas en el infrarrojo cercano. Mientras en la región visible los pigmentos de la hoja

absorben la mayor parte de la luz que reciben para realizar su función clorofílica, en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano. El contraste con la vegetación enferma, y sobre todo con los suelos, es bastante evidente en estas dos bandas. En definitiva, se puede enunciar como principio general, que cuanto mayor sea el contraste en los ND entre las bandas infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño.

En este principio se apoya la mayor parte de los denominados índices de vegetación, en los que se combinan la banda roja (3 para Landsat TM) y la infrarroja cercana (4 para Landsat TM) del espectro, siendo el cociente $TM4/TM3$ el más conocido. La división de la banda 4 entre la banda 3, es directamente proporcional a la densidad de la vegetación: las áreas que tienen vegetación más densa, aparecerán en tonos claros, mientras que las áreas con poca cubierta vegetal, se verán en tonos más oscuros. Junto al índice de vegetación, se han propuesto otros cocientes de bandas para enfatizar distintos tipos de cubierta, especialmente en trabajos para exploración minera. Este tipo de estudios sólo parecen viables en áreas de vegetación escasa, donde están encaminados a obviar el efecto pantalla de la cubierta vegetal.

3.13.2 Diferencia normalizada entre bandas

Consiste en dividir la diferencia de dos bandas entre su adición. La más conocida es el índice normalizado de diferencia de vegetación, que para Landsat TM consiste en la operación $TM4-TM3/TM4+TM3$. Este índice puede tener alguna aplicabilidad geológica, dado que algunos autores han puesto en entredicho su validez, al comprobarse que está notablemente influido por el tipo de suelo que subyace a la vegetación.

Ya se anotó que la cubierta vegetal se caracteriza por una intensa absorción debida a la clorofila en la región del rojo (TM3), y por una intensa reflexión en el infrarrojo próximo (TM4). Cuando se hace una composición en falso color utilizando estas bandas, la presencia de población vegetal aparece obvia, pero las variaciones sutiles de intensidad, la discriminación entre tipos de vegetación y otras características, no son fáciles de identificar, simplemente porque el ojo humano posee un intervalo limitado de percepción.

Pequeñas variaciones en dichos parámetros, poseen un efecto desproporcionadamente alto en esta diferencia normalizada, razón por la cual se utiliza para destacarlas. El resultado de esta operación también debe redistribuirse entre 0 y 255, mediante el siguiente algoritmo:

$$(TM4-TM3/TM4+TM3)*127 + 128$$

3.14 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales es una técnica bastante empleada en ciencias sociales y naturales. Su objetivo es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto, más pequeño, sin perder una parte significativa de la información original. Es un método para minimizar la correlación entre las bandas, y concentrar la información útil en un menor número de canales. Una manera de mejorar la dispersión de los datos, consiste en

redistribuirlos con respecto a otro juego de ejes, en un espacio multidimensional que maximice las diferencias sutiles entre las bandas.

Como es bien sabido, el sentido y la fuerza de la correlación lineal entre dos variables, puede representarse gráficamente mediante un eje divariado. El dicho contexto, la nube de puntos indica la localización de los ND en las dos bandas consideradas. La elipse que limita estos puntos, expresa gráficamente la fuerza de la correlación entre las dos bandas, que será mayor tanto más se aproxime a una recta, o dicho de otro modo, cuanto mayor sea el contraste entre los dos ejes de dicha elipse (**Figura. 12**). La varianza de los valores de un rango de longitud de onda, expresan su dispersión con relación a la media, o valor promedio aritmético para la distribución. Una medida de la variación conjunta de dos bandas es la covarianza: cuando esta es positiva, los datos están directamente correlacionados; cuando es negativa, presentan una relación inversa; cuando es igual a cero, los dos canales de datos son totalmente independientes.

El primer paso en una transformación de componentes principales, consiste en hacer los valores de las medias iguales a cero (Fig. 12), migrando los ejes. Posteriormente los ejes pueden rotarse, de modo que uno de ellos coincida con la línea a lo largo de la cual, los datos tienen su mayor dispersión. Este nuevo eje rotado es el primer componente principal, el otro que forma ángulo recto con el primero, define una línea a lo largo de la cual se expresa toda la variación restante; este es el segundo componente principal. En un espacio con más de dos dimensiones, esta operación continúa definiendo ejes ortogonales, que progresivamente van consumiendo toda la variación que no cae en los componentes principales (CP) de bajo grado, generando tantos CP como canales había en los datos originales.

Lógicamente, la deducción de los nuevos ejes para 4 ó 7 variables no puede realizarse gráficamente, sino que es preciso aplicar una transformación matemática compleja, que encuentre los nuevos ejes de variación que contengan la mayor parte de la información original de la imagen. Los CP de menor orden son los más informativos, y contienen la información espectral más decorrelacionada, proveniente de todas las bandas.

Pese al interés de este tipo de estudios, el análisis de componentes principales no resulta popular entre los científicos estudiosos del medio ambiente, debido al tiempo de computador que requiere, y a la destrucción de las relaciones entre los valores de radiancia del objeto y el valor digital.

5. RADAR

5.1 LA REGIÓN DE LAS MICROONDAS

La banda del espectro que se inicia en las longitudes de onda milimétricas se denomina región de microondas. Se trata de las longitudes mayores, utilizadas tanto en teledetección como en otras aplicaciones civiles y militares.

La observación en esta banda del espectro es complementaria y más compleja que la realizada en las bandas ópticas, por lo que el rango de aplicaciones es todavía muy inferior al registrado en éstas. No obstante, el interés por la tele-observación a partir de microondas ha crecido notablemente en los últimos años, gracias a que la atmósfera es prácticamente

transparente para estas longitudes de onda. Por tal razón, esta región resulta idónea para cartografiar áreas tropicales, muy frecuentemente cubiertas por las nubes.

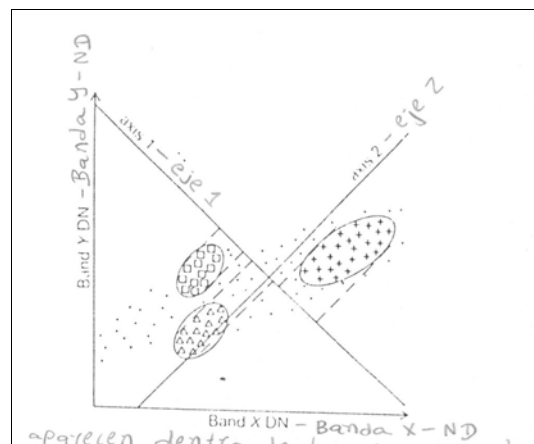
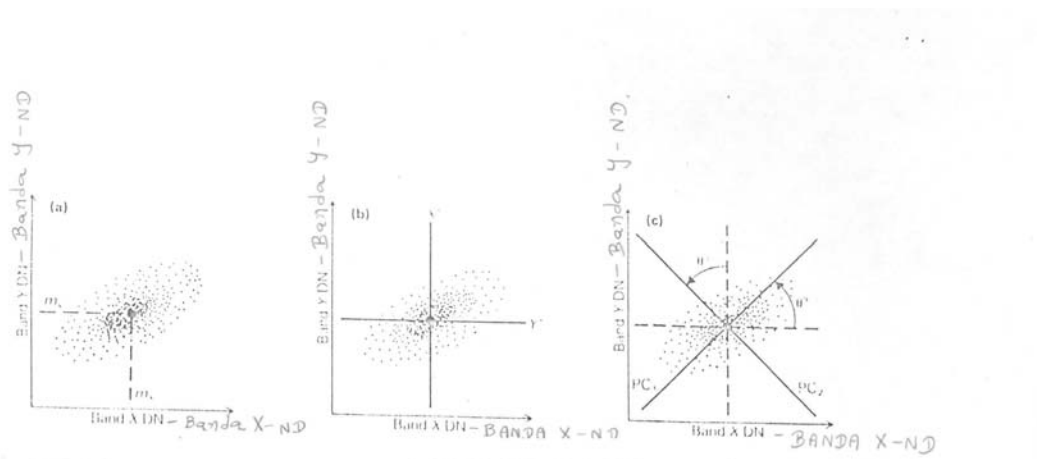
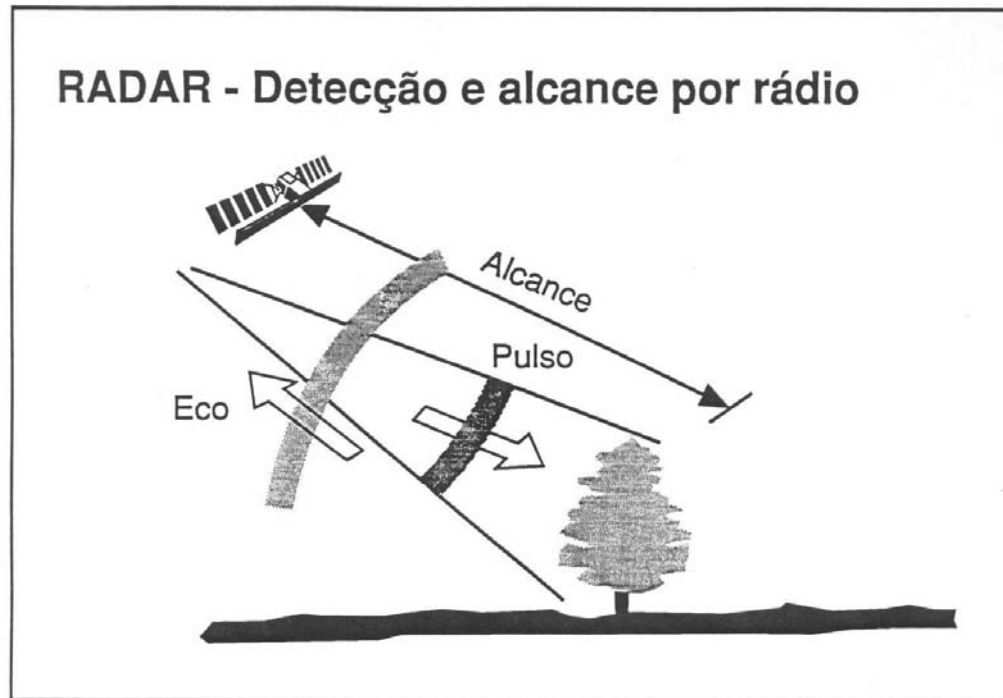


Figura 12. Análisis de componentes principales

A diferencia de los sensores pasivos, que miden radiación electromagnética natural reflejada o emitida, el radar es un sistema activo que utiliza energía artificialmente generada, para iluminar la superficie del terreno de la que recoge sus señales de retorno. La palabra **RADAR** es la sigla de **RA**dio **D**etección **A**nd **R**anging, que significa detección y alcance por radio, dado que este sistema de percepción remota determina distancias mediante cálculo de intensidades de la señal de retorno (detección), y los tiempos que tardan estas en regresar (alcance – range), en las porciones del radio y las micro-ondas del espectro electromagnético, que están aproximadamente entre 0.5 y 75cms (**Figura. 13**).



Fonte da figura:
R.K. Raney / CCRS

Figura 13. Principio básico de operación del RADAR

5.2 BANDAS

En contraste con los sensores pasivos, donde los rangos de longitud de onda se han designado por números, el radar tiene bandas denominadas por letras. Las más utilizadas son las siguientes:

Banda X: comprende una faja de longitud de onda entre 2.4 y 3.8cm (12.5 a 8Ghz). Es normalmente la frecuencia mas alta (longitud de onda menor) utilizada por radares de apertura sintética aerotransportados. En este rango de longitud de onda, aunque los rasgos geomorfológicos son aun visibles, la mayoría de las superficies aparecen uniformemente rugosas, razón por la cual no es posible la discriminación mediante contrastes de rugosidad. Como los satélites tienen una capacidad limitada de energía, esta es insuficiente para generar y transmitir radiación en el rango X, sobre una franja de terreno lo suficientemente ancha, razón por la cual esta banda aun no esta disponible en los radares satelitales.

Banda C: 3.8 a 7.5cm (8 a 4Ghz). Es empleada por muchos satélites orbitales como ERS-1 y RADARSAT. Por ser la banda intermedia entre X y S, tiene propiedades de las dos.

Banda S: 7.5 a 15.0cms (4 a 2Ghz).

Banda L: 15 a 30cms (2 a 1Ghz). Es empleada por el satélite JERS-1 y el SEASAT. Por corresponder con longitudes de onda largas, tiene la capacidad de penetrar algunos materiales superficiales, siempre y cuando estén secos e inconsolidados, razón por la cual se espera sea muy útil cuando se utiliza en áreas desérticas. Esta banda ha demostrado ser útil para propósitos geológicos, a pesar de mostrar una fuerte dispersión en terrenos altamente vegetados.

Banda P: 75 a 133cms (225 a 400Mhz). Tiene propiedades similares a las de la banda L, pero aun no ha sido probada con propósitos geológicos.

5.3 VENTAJAS

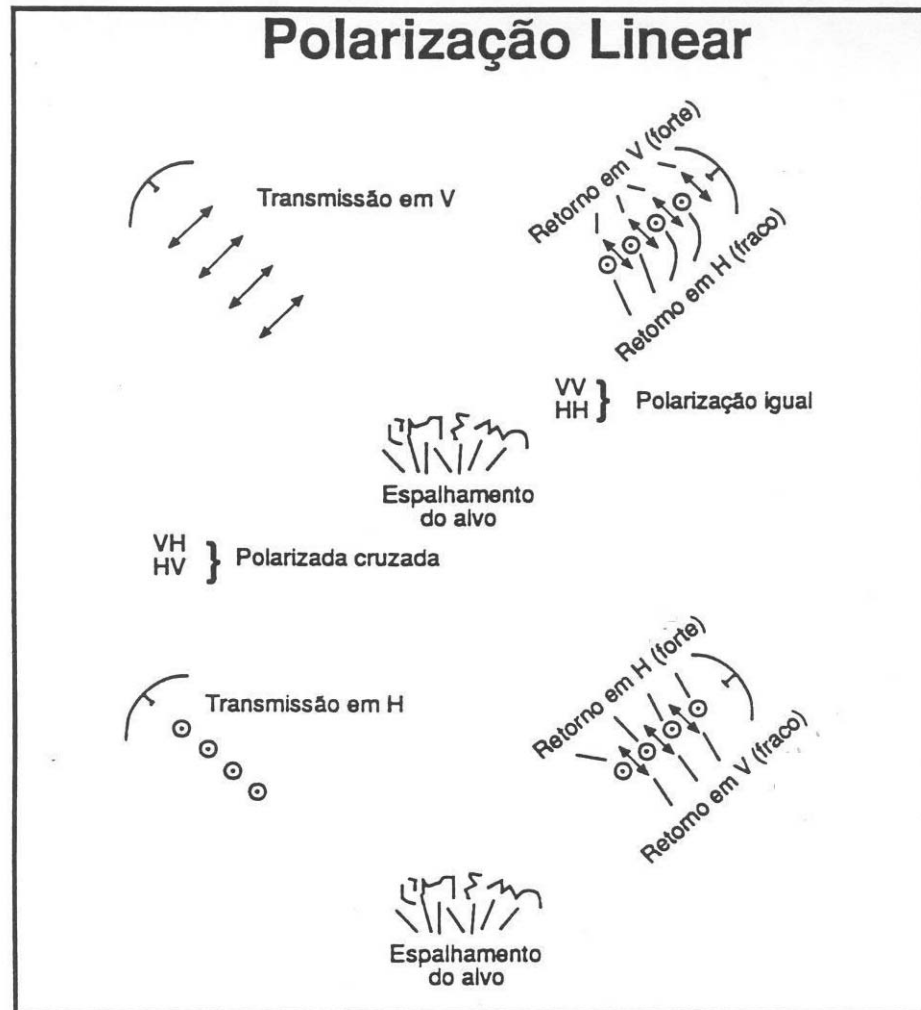
- La energía de las microondas puede atravesar las nubes, y en alto grado la lluvia. Los radares que operan en longitudes de onda superiores a 2cms, no son afectados en forma significativa por la cobertura de nubes; la lluvia representa un factor que interfiere con la calidad de las imágenes, para longitudes de onda inferiores a 4cms. En regiones de condiciones meteorológicas severas, que se tornan problemáticas para la adquisición de imágenes, el radar es un sistema de teledetección altamente benéfico.
- Como el radar es un sensor activo que produce su propia señal, puede operar tanto durante el día como la noche. Esto es especialmente ventajoso en las regiones polares, donde los largos periodos de oscuridad restringen la adquisición de imágenes.
- Las imágenes de radar suelen contener información valiosa, no disponible en las porciones visible e infrarroja del espectro electromagnético. Pueden proveer datos sobre la superficie de la tierra con relación a rugosidad, topografía, condiciones de humedad y vegetación.

5.4 POLARIZACIÓN

Es otra característica de las ondas electromagnéticas, que se refiere a la forma en la cual son transmitidas las señales de radar, o sea a la orientación del campo eléctrico con relación a su dirección de propagación. Una señal polarizada indica que su vibración se restringe a una dirección determinada; los radares de percepción remota generalmente se diseñan para transmitir radiación polarizada vertical u horizontalmente; de igual forma, el sensor puede recibir señales en estas dos direcciones. Los planos de polarización transmitida y recibida son designados por las letras H (horizontal) y V (vertical). Por lo tanto, la polarización de una imagen de radar puede ser HH (transmisión horizontal, recepción horizontal); VV (transmisión vertical, recepción vertical), HV (transmisión horizontal, recepción vertical y viceversa) (**Figura 14.**).

Cuando la polarización de la señal recibida es idéntica a la de la radiación transmitida, se dice que la imagen es igualmente polarizada o de polarización semejante (“like polarized”); cuando la polarización de la señal recibida es opuesta a la de la radiación transmitida, se dice que la imagen es de polarización cruzada (“cross polarized”). Los radares aerotransportados generalmente pueden funcionar en los dos tipos de polarización, porque se ubican relativamente cerca de la superficie a imagear; los radares satelitales utilizan el modo

igualmente polarizado, porque las señales del sistema cruzado son demasiado débiles para generar una buena imagen.



Fonte da figura:
F. Ahern, CCRS

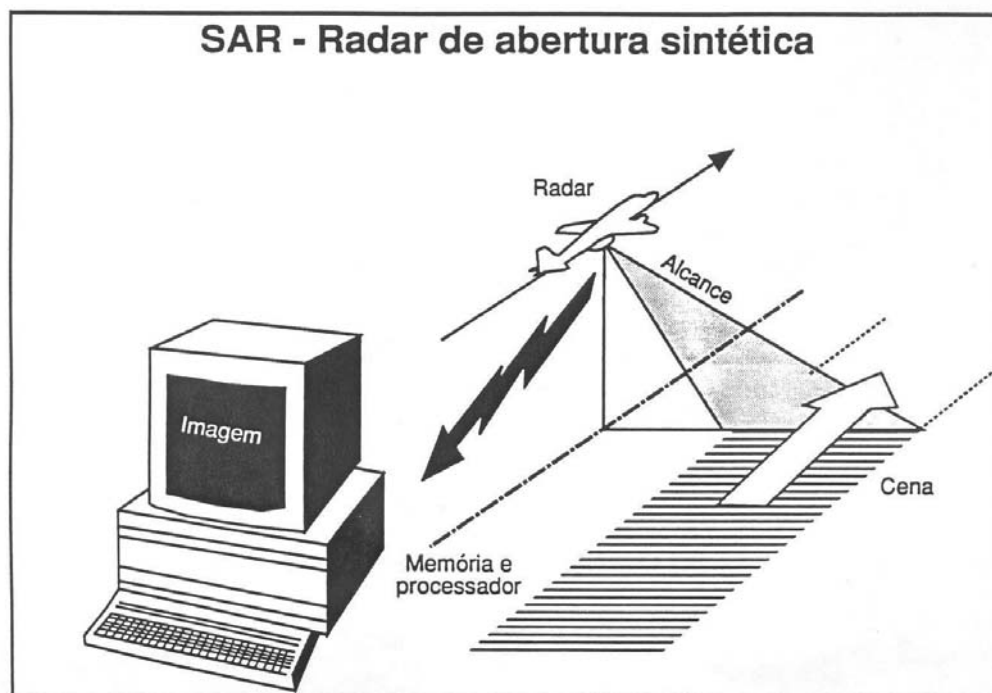
Figura 14. Tipos de polarización en radar

5.5 RADARES DE RASTREAMIENTO

Los primeros sistemas de radar fueron transportados por aviones, barcos o submarinos; barrían los cielos o el mar en movimiento circular, mostrando puntos en una pantalla que también era circular. En esta forma de presentación de las señales, la distancia desde el centro de la pantalla hasta el punto brillante, es proporcional a la distancia entre el avión, barco o submarino, y el objeto que se está percibiendo; esta longitud se denomina alcance (range). La dirección específica del blanco con relación al emisor de la señal de radar, se mide como un ángulo con respecto del Norte y se denomina azimut.

En los radares imageadores de la actualidad, el alcance o range todavía es la distancia con relación al blanco. La segunda dimensión o azimut, coincide con la dirección de desplazamiento del avión o satélite, razón por la cual se tornó más lineal que angular, aunque retiene su denominación original.

La operación de los sistemas de radar imageadores, también llamados de micro-ondas activas, difiere bastante de los sistemas sensores ópticos, y de los radares rastreadores que les precedieron. En estos, la radiación de micro-ondas generada por una antena, se utiliza para “iluminar” la superficie. En la mayoría de los casos, el sensor apunta hacia abajo y hacia el lado de la plataforma; consecuentemente esta técnica suele denominarse radar de visión lateral (Sideways-looking radar); la antena tiene una longitud y dirección fijas, y va iluminando una faja de terreno larga y ancha, en una dirección perpendicular a la del vuelo de la plataforma (**Figura. 15**).

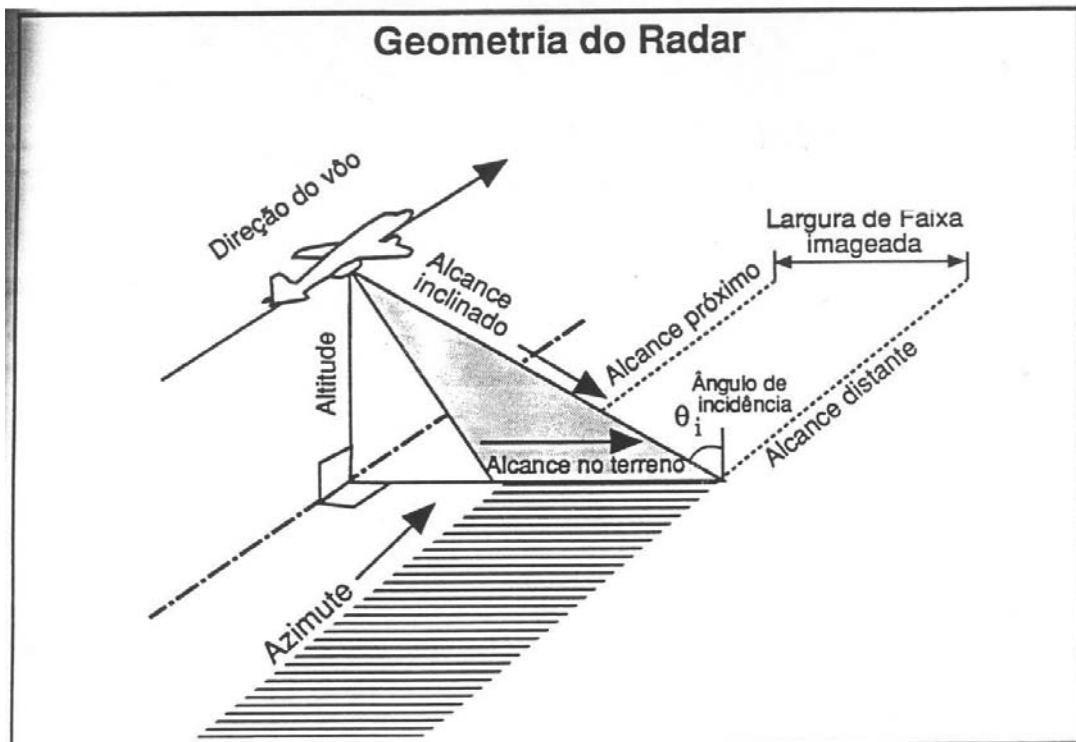


Fonte da figura:
R.K. Raney, CCRS

Figura 15. Funcionamiento de los radares imageadores

En los radares imageadores de la actualidad, el alcance o range todavía es la distancia con relación a la superficie de la tierra. La segunda dimensión o azimut, coincide con la dirección

de desplazamiento del avión o satélite, razón por la cual se tornó más lineal que angular, retiene su denominación original pero también se le denomina dirección de visión (look direction). Estos sensores tienen su terminología propia (**Figura. 16**): la línea vertical que se traza desde el sensor hasta la superficie del terreno, se denomina altitud; el alcance próximo (near range), es la extremidad de la imagen más cercana al sensor; el alcance distante (far range), es el extremo de la imagen más alejado de la señal transmitida por la antena; la faja imageada, es el ancho del área barrida por el radar, siendo la distancia entre el alcance próximo y el alcance distante; el alcance inclinado es la longitud mayor entre el sensor y el blanco, o la línea perpendicular que va desde el radar hasta el alcance distante; el alcance en el terreno, es igual al ancho del área barrida.



Fonte da figura:
R.K. Raney

Figura 16. Geometría del Radar

Para evitar interferencia entre la radiación emitida y la señal que retorna de la superficie, la iluminación se hace mediante pulsos discretos del orden de microsegundos. Dado que toda la radiación que regresa del terreno, debe recibirse antes de que otra sea transmitida, se torna crucial el ordenamiento de estos pulsos en el tiempo. Como a mayor alcance, mas largo es el camino de retorno de la señal hacia la antena, entonces la frecuencia de los pulsos es inversamente proporcional al alcance.

5.6 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

En los radares descritos hasta aquí, el ancho de la señal es controlado por el ancho de su antena, razón por la cual se les denominó radares de apertura real (Real Aperture Radar) o de fuerza bruta; tienen diseños y sistemas de grabación de señal muy simples, y solo pueden operar instalados en aviones. Sistemas más sofisticados utilizan la naturaleza coherente de la energía artificial de las microondas y el efecto doppler, para simular una antena extremadamente larga, con una señal de ancho constante y estrecho.

La teoría de la antena de radar, demuestra que el ancho de la señal es inversamente proporcional a la longitud de la antena. Durante los últimos años se desarrolló una técnica sofisticada, que permite crear una antena virtual, a partir de una serie de señales recibidas por la antena real, durante su trayectoria de vuelo. Esta antena virtual recibe el nombre de “apertura sintética”, siendo la base del radar del mismo nombre (Synthetic Aperture Radar – SAR). En este sistema de tele-observación, se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos.

Se requieren dos procesos para producir una imagen SAR. Primero, el sensor debe volar más allá del área que será imageada, y registrar una serie de señales manteniendo simultáneamente el blanco en el haz de la antena, durante todo el proceso (**Figura. 17**). Segundo, la serie de señales debe ser procesada en el computador, generando una imagen comprensible, de tal forma que los objetos captados sean diferenciables en la misma.

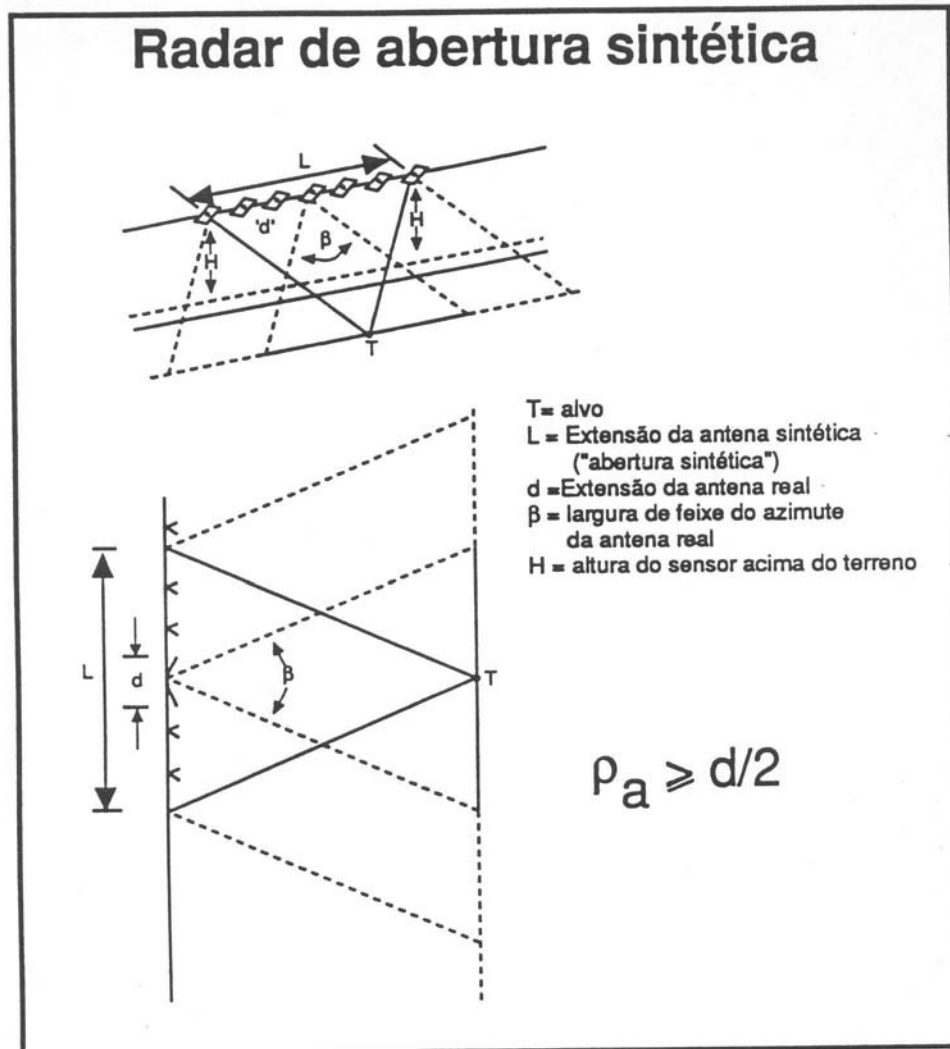
5.6 RESOLUCIÓN ESPACIAL

En el radar como en cualquier sistema de teledetección, la resolución espacial consiste en la capacidad de distinguir objetos en el terreno. A diferencia de los sensores multiespectrales que suelen tener una sola, este sistema activo presenta dos: resolución de alcance (range resolution) y resolución de azimut (azimuth resolution):

Resolución de alcance: depende de la longitud de cada pulso, expresada como tiempo (τ) o distancia ($c \tau$), donde c es la velocidad de la luz, esta longitud controla la resolución en el sentido del alcance.

Para que dos objetos sean diferenciables en el terreno, las señales de retorno de cada uno en un mismo pulso, deben regresar a la antena en tiempos diferentes; cualquier sobreposición entre los dos juegos de señales, implica que los objetos se mezclan como uno solo en la imagen. Como un pulso es una emanación breve de energía electromagnética, la resolución en alcance representa la distancia entre las extremidades delantera y trasera del pulso, que pueden representarse como arcos circulares (Fig. 18). La separación mínima entre dos objetos a lo largo del alcance inclinado, debe ser la mitad de la longitud del pulso ($c\tau/2$) para que sean diferenciables. Esta distancia mínima se denomina resolución de alcance inclinado (slant range resolution), y es independiente de la distancia a la plataforma. Sin embargo, la distancia correspondiente sobre el terreno o resolución de alcance del terreno (ground range

resolution), varía con el ángulo en el que llegan las señales a la superficie de la tierra (Fig. 18), y puede expresarse mediante la fórmula:



Fonte da figura:
R.K. Raney, CCRS

Figura 17. Radar de abertura sintética

Resolución de Alcance de Terreno = $C\tau/2 \cdot \cos\alpha$, donde α es el ángulo de llegada de la radiación al terreno.

Resolución de azimut: el ancho de una señal de radar se expresa como un ángulo (**Figura. 18**), que es directamente proporcional a la longitud de onda de la señal, e inversamente proporcional a la longitud de la antena. El arco correspondiente que es el ancho de la porción de terreno iluminada para cada pulso, depende de la distancia desde la plataforma. Cuando esta aumenta, la señal se dispersa en mayor medida, iluminando arcos que corresponden con longitudes mayores de la superficie, donde no se logran diferenciar objetos de diámetros menores a la distancia imageada. Los radares de apertura sintética tienen la ventaja de hacer la resolución de azimut constante e independiente del alcance (**Figura. 19**), siendo el único sistema de radar posible para operación en plataformas satelitales.

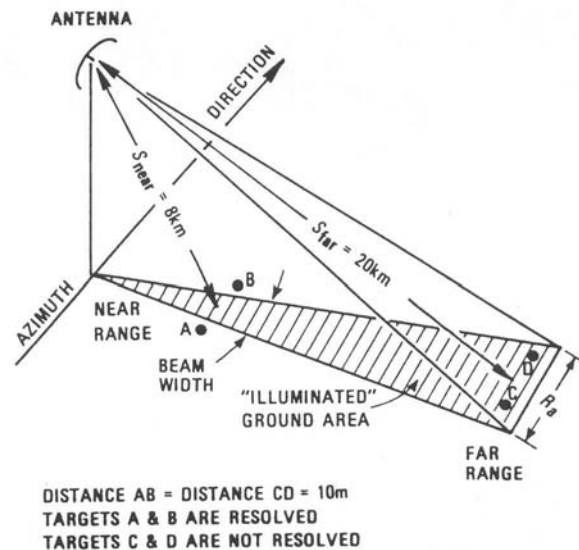
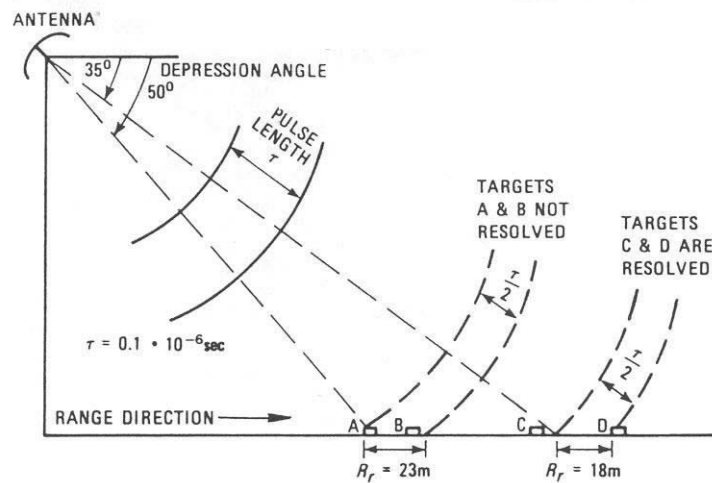
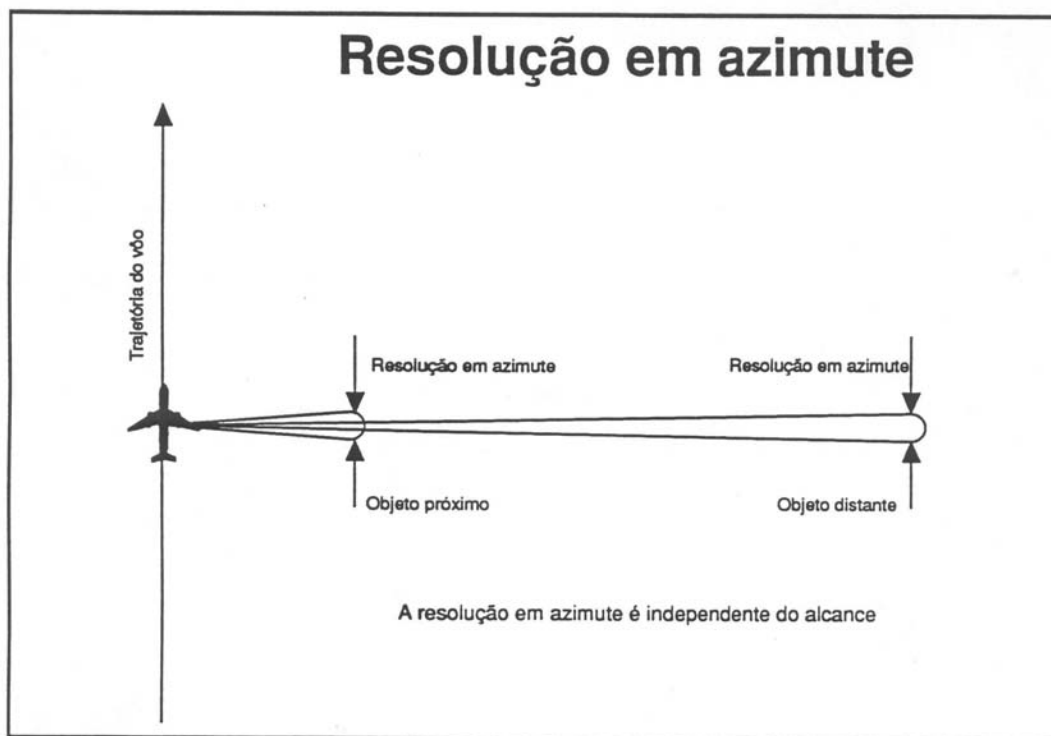


Figura 18. Resolución espacial en radar



Fonte da figura:
F. Ahern, CCRS

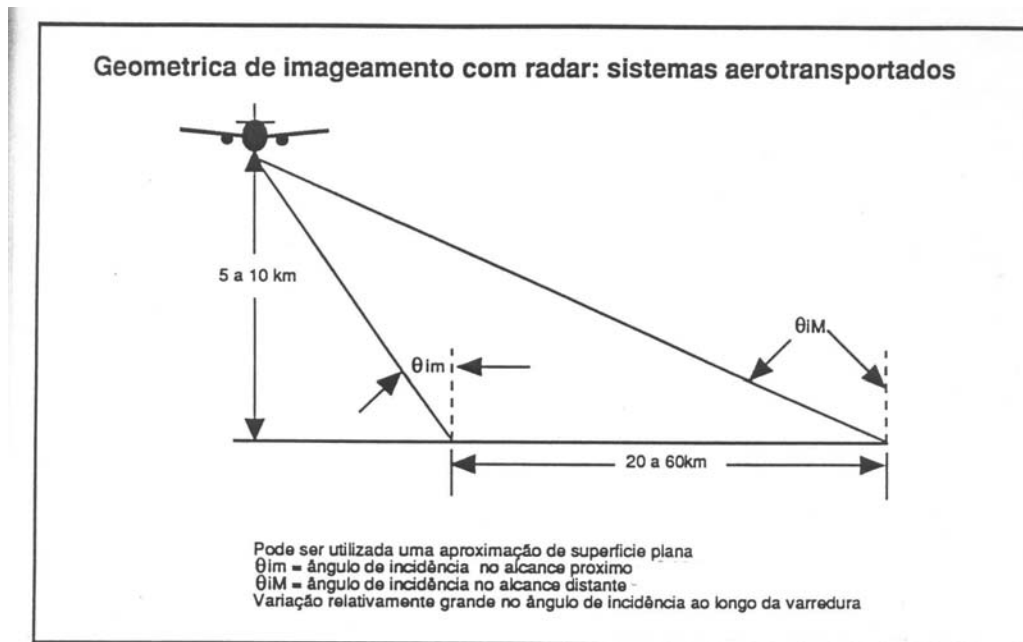
Figura 19. Resolución en azimuth de los radares de apertura sintética

5.7 GEOMETRÍA DE IMAGEAMIENTO

Angulo de incidencia: es el ángulo entre la señal del radar y la superficie terrestre. Dependiendo de la altura del sensor, este ángulo cambiará entre el alcance próximo y el alcance distante, lo cual necesariamente afecta la geometría de visión (**Figura. 20**). Una imagen de radar satelital proporciona un ángulo de incidencia más uniforme, a lo ancho de la faja imageada.

Angulo de incidencia local: es el ángulo entre la señal del radar y una línea perpendicular a la superficie del terreno (Fig. 21). Este ángulo toma en cuenta el relieve local del área iluminada en cualquier punto dentro de la imagen, y determina en parte su brillo y la tonalidad de cada pixel.

Los ángulos de incidencia entre 30 y 55 grados generan sombreado excesivo en áreas de relieve alto, pero pueden aportar un sombreado óptimo para áreas de relieves bajos. Los ángulos pequeños son buenos para determinar rugosidad de la superficie, dado que la magnitud de la señal de retorno del radar aumenta cuando se disminuye el ángulo de incidencia.



Fonte da figura:
CCRS / TTTDS

Figura 20 Geometria de imageamento con radar

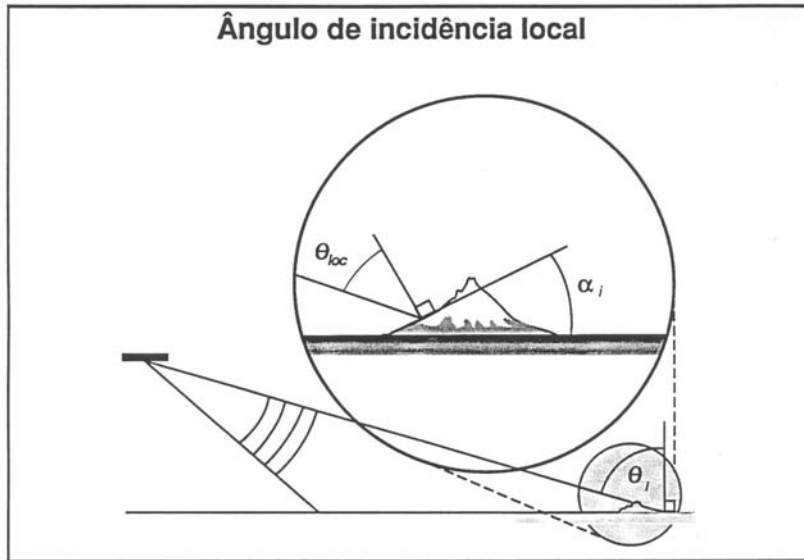
5.8 DISTORSION TOPOGRÁFICA

Los radares imageadores al igual que los sensores ópticos presentan deformación topográfica, que muestra las áreas montañosas distorsionadas en las imágenes. Dichas distorsiones son bastante diferentes en las escenas de radar, donde suelen ser mucho más acentuadas que en las escenas ópticas. En una imagen multispectral, la distorsión aumenta mientras nos alejamos del sensor, y es relativamente pequeña cuando el mismo está casi vertical (nadir). La **Figura 22** muestra como crece la deformación, cuando aumenta el ángulo de incidencia de un sensor óptico que se desplaza hacia los lados.

En una imagen de radar la distorsión crece en el sentido opuesto, o sea a medida que nos acercamos al sensor. Puede tornarse bastante acentuada cuando este estuviese aproximadamente en una dirección vertical con relación al terreno. La **Figura 23** ilustra la manera en que la deformación disminuye al aumentar el ángulo de incidencia en un radar satelital.

5.9 GEOMETRÍA DE LAS IMÁGENES

Es virtualmente imposible representar un área de la superficie de la tierra sin distorsión geométrica. En las imágenes de radar, los objetos mas altos suelen aparecer inclinados en dirección al sensor. Como este mide el tiempo de retraso entre la transmisión y la recepción de cada pulso de energía, pueden darse entonces tres(3) situaciones que afectan la calidad de las imágenes:



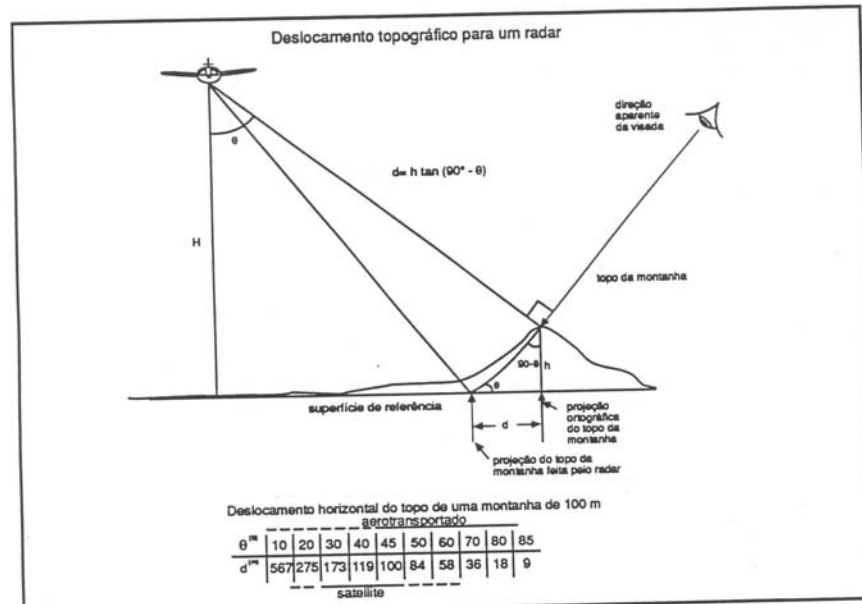
Fonte da figura:
R.K. Raney / CCRS

Figura 21. Angulo de incidencia local



Fonte da figura:
Frank Ahern, CCRS

Figura 22. Distorsión topográfica de un sensor óptico



Fonte da figura:
Frank Ahern, CCRS

Figura 23. Distorsión topográfica en radar

Sombra (shadow): es la situación normal de imageamiento, donde el frente de ondas incidente sobre una superficie inclinada capta primero la base que su tope. Las sombras de los objetos en las imágenes de radar, indican áreas no iluminadas por el sensor; corresponden con señales de retorno no recibidas, razón por la cual aparecen en la imagen como tonalidades muy oscuras (**Figura. 24**).

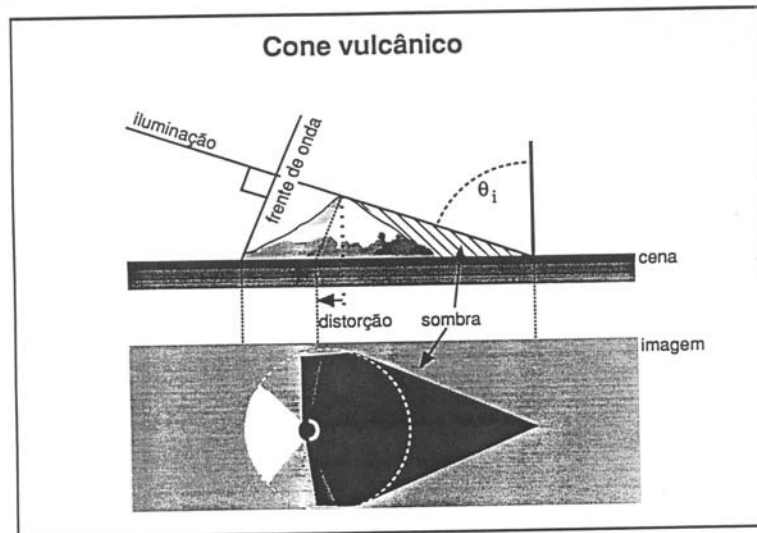
Las pendientes que están de frente a la antena aparecen fuertemente iluminadas, razón por la cual presentan tonos claros y grises, mientras aquellas que están en dirección opuesta aparecen negras. Este efecto de áreas sombreadas que contrastan con las pendientes de iluminación brillante, da a las imágenes de radar apariencia tridimensional, que permite percibir la topografía a simple vista.

Acortamiento (foreshortening): en una imagen de radar, el acortamiento es la apariencia de compresión de las características de la escena satelital, que se inclinan en dirección al sensor. En la medida en que el relieve se va tornando casi ortogonal con respecto a la dirección de iluminación, la señal de retorno del tope de la superficie inclinada, llega con un retardo muy pequeño con respecto a la señal de la base (**Figura. 25**); esto se manifiesta visualmente como una apariencia relativamente brillante en la pendiente iluminada.

El acortamiento llega al máximo, cuando un relieve pronunciado es ortogonal con relación al sentido de llegada de la señal de radar. En este caso, el ángulo de incidencia local es cero, y en consecuencia la base, la pendiente y el tope de la ladera son captados simultáneamente

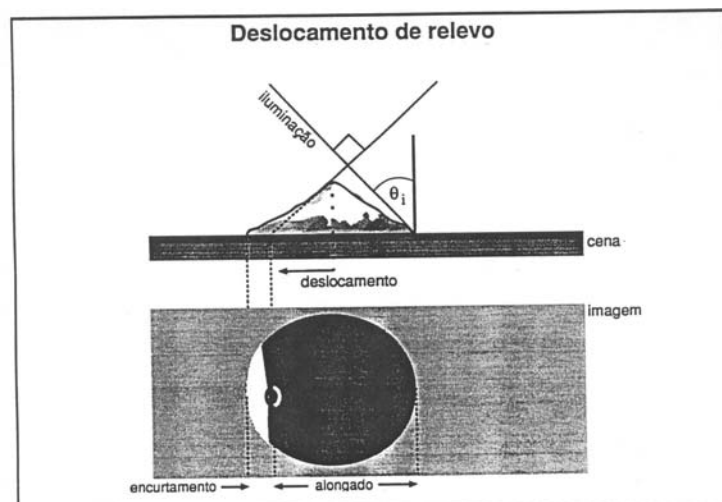
como señales de retorno, y por lo tanto ocupan la misma posición en la imagen, razón por la cual se tornan indiferenciables.

Sobreposición (layover): ocurre cuando la energía reflejada por la parte superior de una estructura, es recibida antes que la señal de retorno de la parte inferior de la misma. En este caso, la cima del relieve será distorsionada o sobrepuesta en relación con su base, generando una visión invertida del terreno (**Figura. 26**).



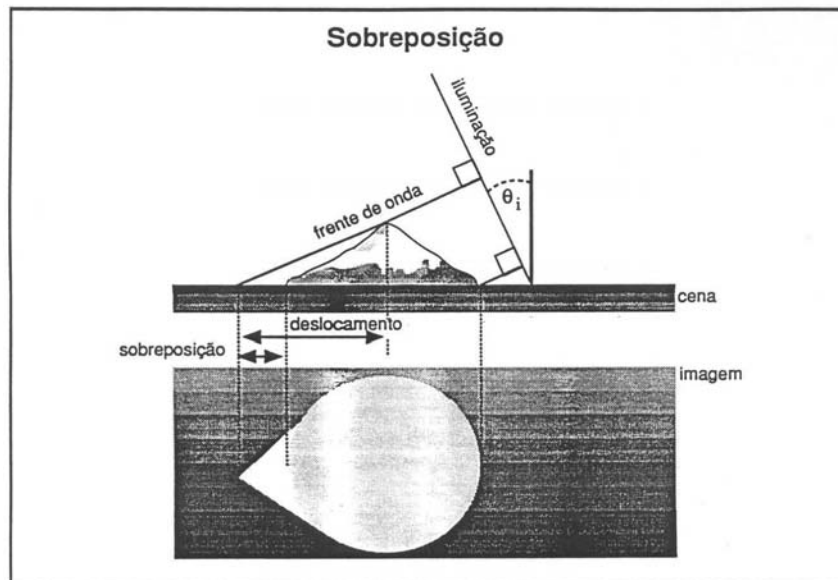
Fonte da figura:
R.K. Raney / CCRS

Figura 24. Sombra en radar



Fonte da figura:
R.K. Raney / CCRS

Figura 25. Acortamiento



Fonte da figura:
R.K. Raney / CCRS

Figura 26. Sobreposicion

En términos generales, el acortamiento y la sobreposición en las escenas de radar se relacionan de la siguiente forma:

- Si el ángulo de inclinación del relieve iluminado es inferior al ángulo de incidencia del haz de radar, habrá acortamiento.
- Si los dos ángulos fueran iguales el acortamiento será máximo, porque el haz de radar será perpendicular a la superficie del terreno, de modo que las señales de retorno del tope y la base, serán percibidas simultáneamente por el sensor.
- Si el ángulo de inclinación del relieve fuera superior al ángulo de incidencia, habrá sobreposición.

Speckle: es un tipo de ruido instrumental de las imágenes de radar. Una imagen SAR está compuesta por señales reflejadas y dispersadas por el terreno; bajo la iluminación coherente aportada por el sensor, la adición de energía retro-dispersada generada en aquellos puntos de la superficie terrestre que no son buenos reflectores, causa un efecto de interferencia aleatoria que es constructiva o destructiva. Estas fluctuaciones al azar crean un patrón textural al azar, de grano fino, y áreas claras y oscuras en la imagen, que se ha denominado speckle.

Esta “textura básica” del radar, es un atributo indeseado del sensor, que puede reducirse mediante la aplicación de filtros especiales.

5.10 EL RADAR Y LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES QUE CONSTITUYEN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Características eléctricas: las características eléctricas de la cubierta juegan un papel tan destacado como la geometría de observación en la señal retornada al sensor de radar. Una de las medidas de este comportamiento es la denominada constante dieléctrica compleja, que intenta medir la conductividad y reflectividad de un tipo de material. En términos generales, los materiales secos ofrecen una constante dieléctrica entre 3 y 8, mientras que el agua ofrece un valor de 80. En consecuencia, la presencia de agua en el suelo o la vegetación puede alterar significativamente el pulso de retorno. Por esta razón, la vegetación que casi siempre está cargada de humedad, tiende a ofrecer un pulso de retorno mayor que los suelos secos. También son buenos conductores las superficies metálicas, que ofrecen valores de retro-difusión bastante elevados.

Rugosidad: en cuanto a la rugosidad, parece comprobado que incide directamente en la intensidad de la señal de retorno. El concepto de rugosidad es muy dependiente de la longitud de onda; en longitudes cortas una superficie relativamente llana puede aparecer como rugosa, mientras se comporta como lisa en longitudes mayores. En pocas palabras, esto indica que a igual rugosidad del terreno, este aparecerá tanto más liso cuando se trabaje a longitudes de onda mayores, y/o con ángulos de incidencia mayores. Esta relación es muy importante, ya que en una imagen cualquier superficie que aparece como rugosa, porque genera dispersión de retorno que se dirige en todas las direcciones, posibilitando que el sensor capte una fuerte señal de retorno. En cambio, si la cubierta aparece lisa, es porque la reflexión tiende a ser especular, haciendo que la señal de regreso pueda llegar a ser prácticamente nula. Este es el caso de las masas de agua, que aparecen con tonos oscuros en una imagen de radar.

5.11 CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN, EL SUELO Y EL AGUA EN LA REGIÓN DE LAS MICROONDAS

Vegetación: en lo que afecta a la vegetación, la rugosidad es un elemento fundamental para la señal de retorno. La rugosidad es muy dependiente del tamaño, forma y número de hojas. Respecto a la conductividad, la constante dieléctrica es bastante alta y uniforme para la mayor parte de las masas vegetales, incrementándose con el mayor contenido de humedad durante la época de crecimiento. Cuando la vegetación pierde vigor o el aporte del suelo es mayor, la constante dieléctrica disminuye drásticamente. De aquí se deduce que es posible obtener información sobre la humedad del sustrato vegetal, siempre y cuando se trabaje a longitudes de onda largas y el ángulo de incidencia sea bajo. La profundidad de penetración en masas vegetales está también relacionada con las condiciones de humedad del suelo y con la polarización. Resulta mayor en suelos secos y con señales de polarización semejante (HH o VV), mientras se reduce en suelos húmedos o con señales de polarización cruzada (HV o VH).

Suelo y agua: de los párrafos anteriores se deduce que los suelos rugosos y secos tendrán un mayor coeficiente de retro-difusión y por lo tanto, aparecerán con tonos claros en las imágenes de radar. Si la señal se reduce, manteniendo otras condiciones constantes, se tratará normalmente de suelos más húmedos. En suelos secos la capacidad de penetración del radar hasta llegar a varios metros si la longitud de onda es lo suficientemente larga. Los

asentamientos humanos, altamente rugosos a longitudes largas, también aparecen con tonos claros, lo que permite discriminarlos frente a los espacios cultivados limítrofes.

En cuanto al agua, la región de las microondas proporciona una cierta capacidad de penetración, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo y se trabaje con longitudes de onda largas. El agua, casi siempre refleja especularmente el pulso recibido, con lo que el retorno es bastante bajo. Ahora bien, si existe cierta rugosidad superficial, por ejemplo oleaje, puede manifestarse en la imagen de radar, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo.

Respecto al hielo y la nieve, el pulso de retorno es muy dependiente de las condiciones del material. La edad, composición y compacidad de la capa de hielo, su rugosidad, geometría interna y temperatura, son factores destacados en el coeficiente de retro-difusión finalmente detectado por el sensor.

5.12 SATÉLITES DE RADAR

Radarsat: el objetivo de este programa es producir datos de valor para investigación, tanto operacional como científica, en relación con hielo, océanos, y recursos naturales renovables y no renovables. Opera en la Banda C (5.3GHz) con polarización horizontal (HH). El sensor tiene la capacidad de configurar y direccionar su señal de radar, en una faja imageada de 500Km de ancho. Los ángulos de incidencia se pueden variar desde menos de 20°, hasta más de 50°.

El Radarsat-1 fue lanzado en 1995 para una misión de cinco(5) años. Tiene un ciclo de repetición de 24 días; gracias a la variabilidad de su ángulo de incidencia, puede proveer cobertura global y de las regiones árticas cada siete(7) días. Opera en una órbita polar sincrónica con el sol, a 792Km de altitud, que provee una resolución espacial que varía de 10 a 55m, por sus numerosas combinaciones opcionales.

J-ERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite): lanzado por el Japón en febrero de 1992, posee un sistema SAR de banda L, con polarización HH y ángulo de incidencia de 38.5°. Recorre una órbita polar sincrónica con el sol a 568Km de altitud, desde la que barre una faja de 75Km de ancho, con resolución espacial de 18m.

ERS 1 y 2 (European Earth Resources Satellite): lanzado desde julio de 1991, posee un sensor SAR de banda C, polarización VV y ángulo de incidencia de 23°. Recorre una órbita aproximadamente polar, sincrónica con el sol, a una altitud de 780Km, barriendo una faja de 80Km de ancho, con una resolución espacial de 30m.

6.REFERENCIAS CONSULTADAS

Chuvieco, E., 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2ª Edición, Ediciones RIALP, S.A., Madrid (España), 459 pp.

Crosta, A.P., 1993. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, S.P.: UNICAMP, 170 pp.

- Drury, S.A., 1989. Image interpretation in geology. London Allen & Unwin, 243 pp.
- Greenbaum, D., 1989. Introduction to geological remote sensing. Course notes for students, British Geological Survey, Keyworth (Nottingham), 101 pp.
- Novo, E.M.L.M., 1989. Sensoriamento remoto, principios e aplicacoes, Editora Edgard Blucher Ltda., Sao Paulo, 308 pp.
- Paradella, W.R., 1996. Imageamento por radar: principios físicos e aplicacoes gerais. Memorias Curso de pos-Graduacao em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 91pp.