

Tema 3

Plataformas, sensores y canales

Se entiende por **plataforma** los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (**sensores**).

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina **canal** o **banda**.

Por ejemplo, landsat es una plataforma que contiene dos sensores landsat-TM y landsat-MSS, el primero de los cuales permite captar radiación en 7 bandas (azul, verde, rojo, 3 en el infrarrojo cercano y 1 en el infrarrojo térmico y el segundo en 4 bandas (verde, rojo y 2 en el infrarrojo cercano).

3.1 Sensores

Una primera clasificación de los sensores sería entre **sensores activos** (generan su propia radiación y la reciben rebotada) y **sensores pasivos** (reciben radiación emitida o reflejada por la Tierra). Dentro de los sensores pasivos están los sensores fotográficos, óptico-electrónicos que combinan una óptica similar a la fotográfica y un sistema de detección electrónica (detectores de barrido y empuje), espectrómetros de imagen, y de antena (radiómetros de microondas). Por lo que se refiere a los sensores activos, actualmente se dispone del radar y el lidar (basado en tecnología laser).

En un sistema **óptico-electrónico** la radiancia recibida por los componentes ópticos se descompone en varias longitudes de onda, cada una de ellas se envía a un conjunto de detectores sensibles a esa región del espectro que la amplifican y la convierten en señal eléctrica y finalmente en un valor numérico conocido como **Nivel Digital (ND)**. Estos valores numéricos pueden convertirse otra vez a valores de radiancia conociendo los coeficientes de calibrado. Existen dos grandes tipos de sistemas óptico-electrónicos: los radiómetros de barrido y los radiómetros de empuje (figura 3.1)

Los **radiómetros de barrido** son los más habituales en teledetección. Disponen de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria permitiendo explorar una franja de terreno a

ambos lados de esta. Cada movimiento del espejo supone que se envíe información de una franja distinta al conjunto de sensores.

Los **radiómetros de empuje** eliminan el espejo oscilante al disponer de una cadena con un gran número de detectores de manera que se cubre todo el campo visual del sensor. Ello permite aumentar la resolución espacial y reducir los errores geométricos ya que se ha eliminado la parte móvil, y poco robusta, de los detectores de barrido. Como contrapartida resulta bastante compleja la calibración de todos los sensores al mismo tiempo para que se comporten de forma homogénea. Estos problemas son especialmente graves en el infrarrojo. En el futuro se dispondrá de sensores capaces de captar toda la imagen, como una matriz bidimensional, al mismo tiempo; de esta forma se reducirán los problemas de tipo geométrico.

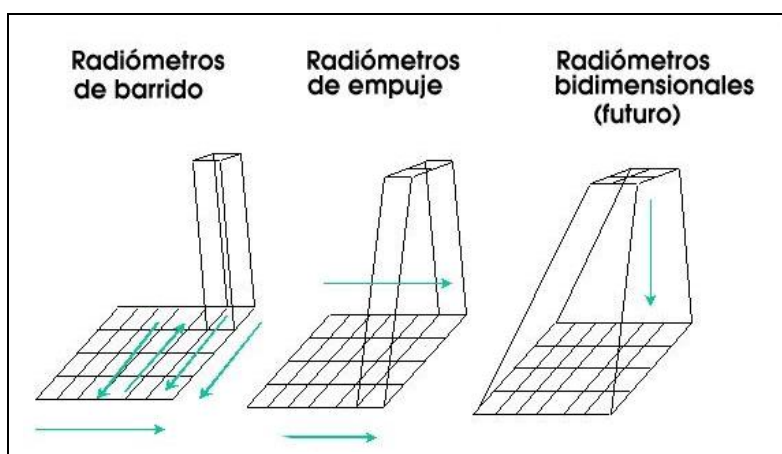


Figura 3.1: Tipos de radiómetros multispectrales

Los **espectrómetros de imagen** constituyen una nueva generación de instrumentos cuya misión es obtener imágenes en un gran número de bandas espectrales (entre 64 y 200 bandas a intervalos de 10-20 nm) obteniendo un espectro casi continuo de radiación. Existen radiómetros de barrido y empuje. Para obtener imágenes de alta resolución espacial se utilizan espectrómetros aerotransportados como el sensor AVIRIS (Airbone Visible/Infra-Red Imaging Spectrometer) con 210 bandas entre 0.4 y 2.4 μ y 20 metros de resolución espacial.

Los **radiómetros de microondas** están compuestos por una antena que actúa como elemento receptor y amplificador de la señal de microondas (que es muy débil) y un detector. En este tipo de sistemas, la resolución espacial es inversamente proporcional al diámetro de la antena y directamente proporcional a la longitud de onda. Además se necesitan tamaños de pixel lo suficientemente grandes para recoger una señal de radiación lo suficientemente amplia. Por tanto la resolución espacial es pequeña y sólo pueden aplicarse en estudios globales.

El **radar** trabaja en una banda comprendida entre 1 mm y 1 m. Se basan en el principio de que las microondas artificiales enviadas en una dirección determinada chocan con los objetos y son dispersadas. La energía dispersada se recibe, se amplifica y se analiza para determinar la localización y las propiedades

de los objetos. Puesto que puede medirse también el tiempo que tarda un pulso de radiación en ir y volver, puede conocerse la distancia recorrida y generar así modelos digitales de elevaciones (aunque con problemas ya que quedan zonas de sombra en áreas abruptas). Debido a su capacidad para trabajar sean cuales sean las condiciones atmosféricas su uso se ha extendido considerablemente, especialmente en zonas con cobertura nubosa persistente.

En función de la orientación con la que el sensor capta las imágenes se distingue entre sensores de (figura 3.1):

- **Orientación vertical**, habitual en satélites de resolución espacial baja (meteosat) o media (Landsat)
- **Orientación oblicua**, típica del radar
- **Orientación modificable**, aparece en los sensores de alta resolución a partir del SPOT-IHV. Permite mantener una elevada resolución espacial y tener una resolución temporal (tiempo de revisita) también elevada. Ya no se toman imágenes de toda la superficie terrestre de forma sistemática sino que el sensor es orientado por encargo. El inconveniente es que es difícil encontrar imágenes a posteriori, ya que sólo se toman aquellas imágenes que se han encargado previamente.

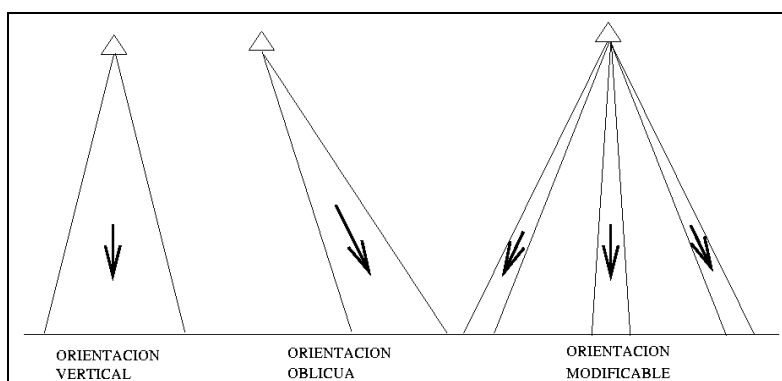


Figura 3.2: Tipos de sensores en función de su orientación

3.2 Resolución de imágenes de satélite

La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizándolo. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

- **Resolución espacial** (tamaño de pixel)
- **Resolución espectral** (indica el número y anchura de las regiones del espectro para las cuales capta datos el sensor)
- **Resolución radiométrica** (número de intervalos de intensidad que pueden captarse)
- **Resolución temporal**, tiempo que transcurre entre dos imágenes

La **resolución espacial** es el tamaño del pixel, en algunos casos se emplea el concepto de *IFOV* (campo instantáneo de visión) que se define como la sección angular (en radianes) observada en un momento determinado. La relación entre *IFOV* y tamaño de pixel (*d*) puede verse en la ecuación 3.1 y en la figura 3.2

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

donde *d* es el tamaño de pixel y *H* la distancia del sensor a la superficie terrestre.

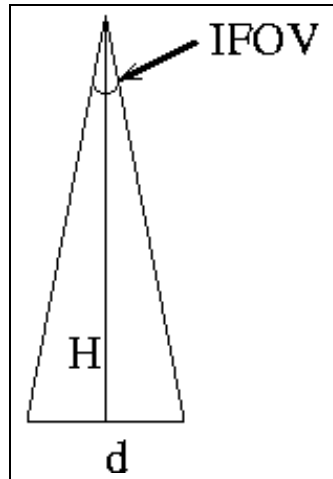


Figura 3.3: Relación IFOV-tamaño de pixel

Existe un amplio rango de resoluciones espaciales en los satélites hoy día disponibles. Meteosat y los satélites geostacionarios ofrecen una resolución espacial de 5000 m debido a su cobertura global de la superficie terrestre, los satélites de la serie NOAA-AVHRR tienen resoluciones que van entre 500 y 1100 m, landsat-TM tiene 30 m y el sensor Ikonos-1 1 metro.

Es imprescindible una buena equivalencia entre la resolución espacial y la escala espacial a la que ocurren los fenómenos que se quieren observar.

La **resolución espectral** indica el número y anchura de las bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio cuanto más bandas incluya un sensor mejor, ya que cada banda

constituye una variable para caracterizar la superficie captada. Por otro lado es preferible que estas bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente. Si las bandas son muy anchas van a recoger valores promediados que ocultarán elementos de diferenciación. Por ejemplo resulta mucho más informativo contar con 3 bandas (rojo, verde azul) en el visible que con una sola banda (fotografía en blanco y negro).

El número de bandas y su localización en el espectro va a depender de los objetivos que se pretendan cubrir con la puesta en funcionamiento del sensor. En la figura 3.2 aparece la localización y anchura de las 6 bandas de landsat-TM (1,2,3,4,5,7) situadas en el visible e infrarrojo reflejado, existe otra banda (la número 6) en el infrarrojo térmico. Puesto que la curva situada de fondo es el espectro de emisión del sol, el tamaño de cada una de las barras indica la cantidad de energía que llega a la Tierra en cada una de las bandas.

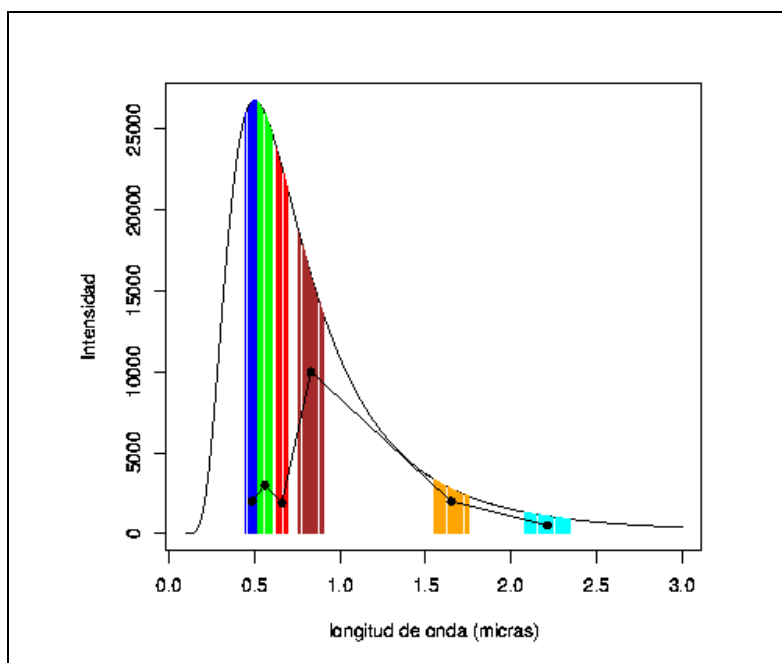


Figura 3.4: Resolución espectral del satélite landsat en el visible e infrarrojo reflejado

La **resolución radiométrica** indica la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada pixel. Por ejemplo Landsat-TM utiliza 8 bits lo que da $2^8 = 256$ niveles de energía (**Niveles Digitales, ND**) que pueden ser captados. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica mayor número de detalles podrán captarse en la imagen.

La **resolución temporal** indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por la plataforma (la que queramos en el caso de los aviones) cada media hora en el caso de los satélites geosíncronos y variable en el caso de los satélites heliosíncronos. Recientemente se han desarrollado satélites de muy

alta resolución espacial con sensores orientables, de manera que la zona de la que captan imágenes es relativamente independiente de la posición que ocupe el satélite con lo que la resolución temporal pasa a ser algo más flexible.

Generalmente, a mayor resolución espacial disminuye la temporal y también la espectral. El problema es que cada aumento de resolución multiplica el volumen de datos que el sensor debe preprocesar y enviar a las estaciones de Tierra. Sin embargo la aparición de sensores de orientación modificable ha permitido compatibilizar alta resolución espacial y alta resolución temporal a costa de una toma de imágenes no sistemática.

El diseño de los sensores de un satélite se hace teniendo en cuenta todas las consideraciones hechas hasta ahora. Salvo excepciones, se va a trabajar con ventanas atmosféricas y se va a seleccionar aquella combinación de regiones del espectro que mayor información van a proporcionar acerca de los fenómenos que se quieren estudiar.

En muchas ocasiones se relaciona resolución espacial con *calidad* de las imágenes. EN realidad no tiene sentido tal relación ya que cada sensor tiene la resolución óptima para los objetivos que se pretenden cubrir. Los satélites meteorológicos como Meteosat, puesto que se utilizan para analizar fenómenos muy dinámicos, necesitan una gran resolución temporal (30 minutos) y una imagen de gran tamaño (todo el planeta) por lo que resultaría muy problemático multiplicar su resolución espacial.

3.3 Satélites

Existen dos tipos fundamentales de satélites, los **geosíncronos** o geoestacionarios y los **heliosíncronos**. Los primeros se sitúan sobre el Ecuador en una órbita a 36000 Km de la Tierra. Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación. Es el caso de Meteosat, situado sobre la perpendicular entre el meridiano 0° y el Ecuador, desde el que se obtienen imágenes de la parte de la Tierra visible desde el punto en que se encuentra.

Los satélites heliosíncronos se desplazan en órbitas generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que, aprovechando el movimiento de rotación terrestre, puede captar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de la órbita. Estas órbitas sólo son posibles entre 300 y 1500 Km de altura. La órbita se diseña de forma que el satélite pasa siempre sobre el mismo punto a la misma hora local (figura 3.3).

3.3.1 Satélites meteorológicos

Durante los años 60 y 70 se fue desarrollando una red mundial de satélites meteorológicos geoestacionarios que proporcionaban cobertura global y continua (cada media hora) del planeta en una franja que va de $70^\circ N$ a $70^\circ S$. Se trata de 5 satélites en órbita ecuatorial que cubren, con una resolución adecuada, una extensión de 70° en longitud cada uno ($70 \times 5 = 350$). De ellos, **Meteosat** cubre Europa, Africa y el Atlántico oriental; fue lanzado por primera vez en 1977 y en 1997 se lanzó el Meteosat-7. El responsable

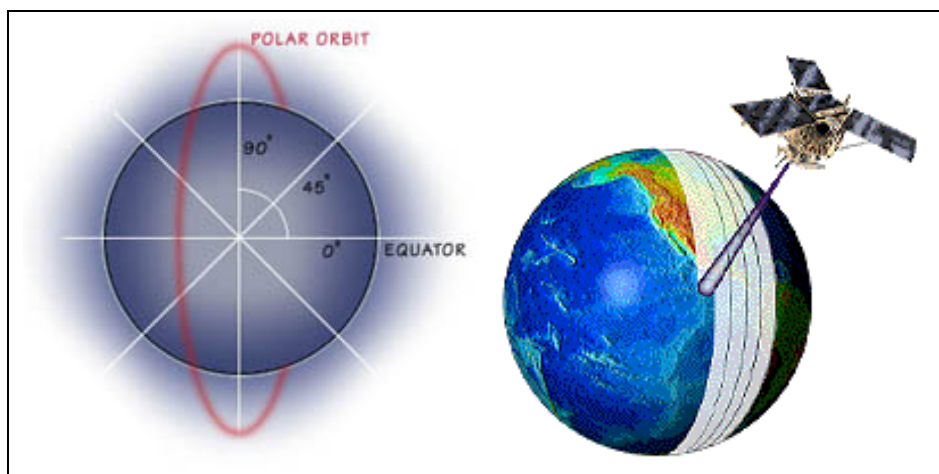


Figura 3.5: Satélites de órbita polar

Nombre	λ	Resolución	Utilización
visible	0.50 - 0.90 μ	2500 m	Cálculo de reflectividad y detección de nubes
vapor de agua	5.70 - 7.10 μ	5000 m	Espesor y vapor de agua contenido en las nubes
infrarrojo térmico	10.50 - 12.50 μ	5000 m	Temperatura superficial y de las nubes

Tabla 3.1: Canales de Meteosat

de este satélite es la organización intergubernamental EUMETSAT (European Organisation for Meteorological Satellites). Cuentan con el sensor de barrido MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imagery) con 3 canales (tabla 3.1).

El futuro del programa Meteosat pasa por la introducción de un nuevo sensor, el SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) que proporcionara imágenes en 12 canales cada 15 minutos. La resolución espacial pasará de 5 a 3 Km en el infrarrojo y será de 1 km en una de las bandas del visible. Se espera que resulte de gran utilidad para el seguimiento y alerta temprana de acontecimientos meteorológicos extremos.

Anterior en el tiempo al programa Meteosat es el programa **TIROS-NOAA**. Cuenta con dos satélites en órbita polar complementaria de manera que, al pasar cada uno por la vertical de un mismo punto una vez al día, obtienen una imagen cada 12 horas. El más utilizado de los sensores que llevan es el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) con una anchura de visión de 3000 Km y una resolución de 1.1 Km en el nadir que alcanza 2.5 x 7 Km en los extremos de la imagen debido al ángulo de observación y a la curvatura terrestre. Las características de las bandas del sensor AVHRR aparecen en la tabla 3.2

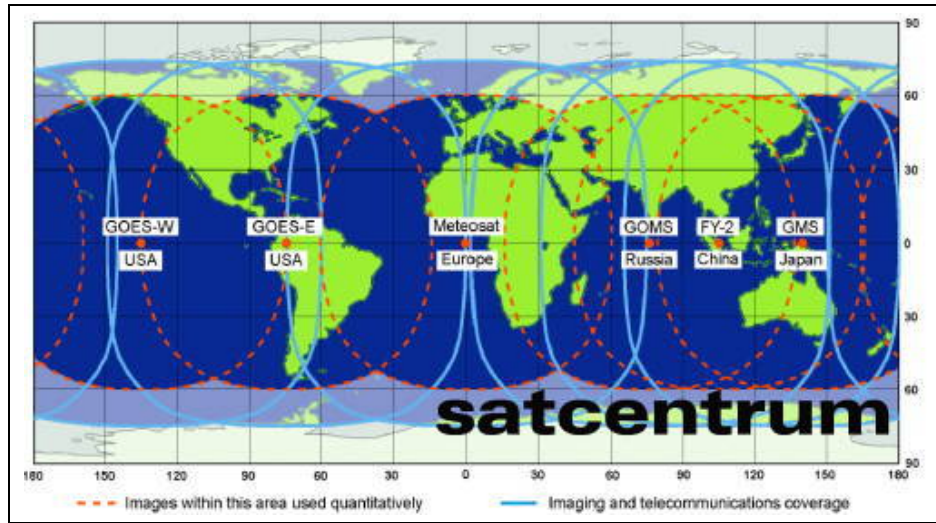


Figura 3.6: Satélites meteorológicos en órbita geosíncrona

Nombre	λ	Resolución	Utilización
1	0.58 - 0.68 μ	1100 m	Seguimiento de nubes, nieve y hielo
2	0.72 - 1.1 μ	1100 m	Discriminación de las superficies de agua y vegetación
3	3.55 - 3.93 μ	1100 m	Temperatura superficial del mar, volcanes e incendios
4	10.3 - 11.3 μ	1100 m	Temperatura superficial del mar, humedad del suelo
5	11.5 - 12.5 μ	1100 m	Temperatura superficial del mar, humedad del suelo

Tabla 3.2: Canales de NOAA

3.3.2 Satélites de recursos naturales

Son satélites de órbita polar, con mayor resolución espacial y que fueron diseñados para la observación de la Tierra y la evaluación de sus recursos naturales. El más conocido de ellos es el programa **Landsat** que se inició en 1972 con el lanzamiento del Landsat-1, en 1999 se lanzó Landsat-7.

Landsat-5 fue lanzado en 1984 el que más tiempo lleva en órbita y significativo, junto con Landsat-4 que apenas estuvo operativo, un salto cualitativo de gran importancia. Combina el sensor MSS (Multispectral Scanner) de los satélites más antiguos con un nuevo sensor el TM (Thematic Mapper) con capacidades ampliadas. La tabla 3.3 muestra las características principales de ambos. El sensor TM tiene además mayor resolución radiométrica (8 bits) que el MSS (6 bits).

El satélite landsat-7 incorpora el sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper) que añade a las bandas ya disponibles en el TM un canal pancromático (0.5 – 0.9 μ) con resolución espacial de 15 metros.

Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud, pasa por los mismos lugares cada 16 días, sobre nuestra latitud

Sensor	Banda	Nombre	λ
MSS	4	0.5 - 0.6 μ	82 m
MSS	5	0.6 - 0.7 μ	82 m
MSS	6	0.7 - 0.8 μ	82 m
MSS	7	0.8 - 1.1 μ	82 m
TM	1	0.45 - 0.52 μ	30 m
TM	2	0.52 - 0.6 μ	30 m
TM	3	0.63 - 0.69 μ	30 m
TM	4	0.76 - 0.9 μ	30 m
TM	5	1.55 - 1.75 μ	30 m
TM	6	10.4 - 12.5 μ	120 m
TM	7	2.08 - 2.35 μ	30 m

Tabla 3.3: Canales de los sensores MSS y TM de landsat-5

Banda	Nombre	λ
P	0.51 - 0.73 μ	10 m
XS1	0.5 - 0.59 μ	20 m
XS2	0.61 - 0.68 μ	20 m
XS3	0.79 - 0.89 μ	20 m

Tabla 3.4: Canales del sensor Spot-HRV

pasa a las 9.45 a.m hora solar.

Los satélites landsat disponen de dos sensores, MSS (*Multispectral scanner*) y TM (*Thematic mapper*) con mayor resolución espacial, espectral y radiométrica (79 m, 4 bandas y 6 bits en MSS y 30 m, 7 bandas y 8 bits en TM).

El proyecto **Spot** se inicia en 1986 y hasta la actualidad se han lanzado 4 satélites (Spot-4 fue lanzado en 1998). Los satélites se sitúan en órbita heliosíncrona casi polar cruzando el Ecuador a las 10:30 am y repitiendo órbita cada 26 días. Los satélites 1, 2 y 3 estaban dotados del sensor HRV (High Resolution Visible) que proporcionaba imágenes en el visible e infrarrojo cercano. Su principal ventaja respecto a landsat es su mayor resolución espacial al introducir por primera vez un radiómetro de empuje. Son imágenes de 60 Km de ancho y 10-20 m de resolución.

Otra de las ventajas del HRV es su capacidad para reorientar su campo de observación desde la Tierra como lo que la resolución temporal pasa de 26 días a 2 o 3 dependiendo de la latitud. Esta flexibilidad hace además que las imágenes deben encargarse por adelantado.

En el satélite spot-4 se modificaron los sensores introduciéndose el HRVIR que añade a las canales del HRV un infrarrojo (1.58–1.78) eliminando el pancromático¹. Se añade también el sensor VEGETATION

¹Banda que integra todo el visible, el resultado es una fotografía en blanco y negro

Banda	Nombre	λ
B0	0.43 - 0.47 μ	1000 m
B1	0.61 - 0.68 μ	1000 m
B2	0.78 - 0.89 μ	1000 m
B3	1.58 - 1.75 μ	1000 m

Tabla 3.5: Canales del sensor VEGETATION

Sensor	Bandas	Resolución	Anchura de imagen	Reorientación	Período
IRS-1	4	5.8 m	70 Km	+ - 26°	5 días
Ikonos-1	4	1 m - 4 m	11 Km	+ - 30°	1-3 días
QuickBird	4	1 m - 4 m	27 Km	+ - 30°	1-3 días

Tabla 3.6: Características de los principales sensores de alta resolución espacial

orientado al seguimiento diario de la cobertura vegetal a escala regional o planetaria (la anchura de imagen es de 2250 Km y la resolución espacial de 1 Km).

3.3.3 Sensores de alta resolución espacial

Entre los desarrollos más recientes en teledetección están los sensores de alta resolución espacial, los de alta resolución espectral y finalmente la utilización del Radar de Apertura Sintética (SAR).

Como límite arbitrario de lo que es un sensor de alta resolución espacial suele establecerse un tamaño de pixel de 5 metros. Hasta principios de los 90 esta tecnología era dominio exclusivamente militar, existiendo ya desde los años 60 sensores de este tipo.

Ikonos, con una resolución espacial de 1 metro fue el primero de los satélites de estas características que fue lanzado. La alta resolución espacial requiere satélites y tecnologías completamente diferentes, incluyendo telescopios y sistemas de reorientación del ángulo de observación, como en Spot. El problema es que por una parte se pierde sistematicidad y por otra se pierde resolución espectral. El problema se solventa teniendo un canal pancromático de alta resolución espacial y otros en porciones concretas del visible (azul, rojo, verde) con tamaños de pixel mayores.

3.3.4 Sensores de alta resolución espectral

Los espectrómetros de imagen captan un elevado número de canales (más de 40) estrechos, contiguos y sin solapamiento. La demanda de este tipo de imágenes obtenidas mediante sensores aerotransportados ha sido importante desde diversos campos de estudio relacionados con la Geofísica.

El objetivo de la espectroscopía de imagen es medir de forma cuantitativa los componentes del sistema Tierra-Atmósfera (radiancia, emisividad, temperatura, reflectancia, concentración de diferentes compo-

mentos atmosféricos y sus variaciones espacio-temporales, tasas de fotosíntesis, concentraciones de componentes del suelo, calidad del agua, etc.)

El elevado número de canales permite, no sólo tener una representación mucho más completa de las firmas espectrales de los objetos observados, sino también conseguir correcciones atmosféricas mucho mejores, con lo que las estimaciones de las variables derivadas son mucho más precisas.

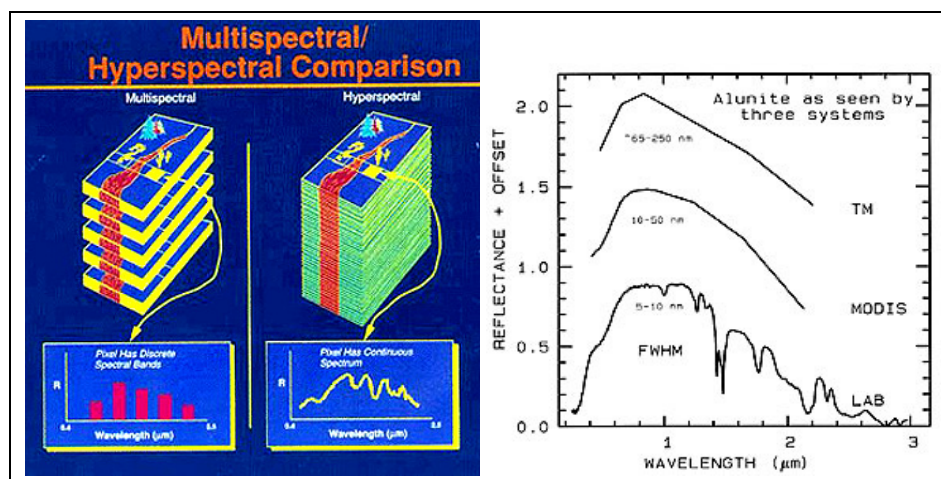


Figura 3.7: Sensores multiespectrales

3.3.5 radar

El uso de longitudes de onda mayores, que no se encuentran en los espectros solar o terrestre, implica la necesidad de utilizar sensores activos, es decir aquellos que generan su propio flujo de radiación. Su mayor ventaja es que debido a su elevada longitud de onda (muy superior al tamaño de las gotas de agua en la atmósfera) no resulta absorbida por esta, además al ser un haz artificial puede manipularse la forma en que se emite para, así, obtener el máximo de información.

Las principales propiedades objeto de manipulación son:

- **Angulo de depresión**, es el ángulo que forma la dirección de observación con la horizontal. Los valores varían en función de los objetivos, en estudios oceánicos y glaciológicos es menor que en trabajos sobre la superficie continental.
- **Angulo de incidencia**, es el ángulo que forma la dirección de observación con la perpendicular al objetivo, varía dentro de una misma imagen
- **Polarización** u orientación (horizontal o vertical) de la onda emitida por el sensor; la onda de vuelta también puede recibirse con polarización horizontal o vertical. De este modo aparecen cuatro

posibles combinaciones (HH, HV, VH, VV) que pueden utilizarse como si fueran cuatro bandas ya que contienen diferente tipo de información.

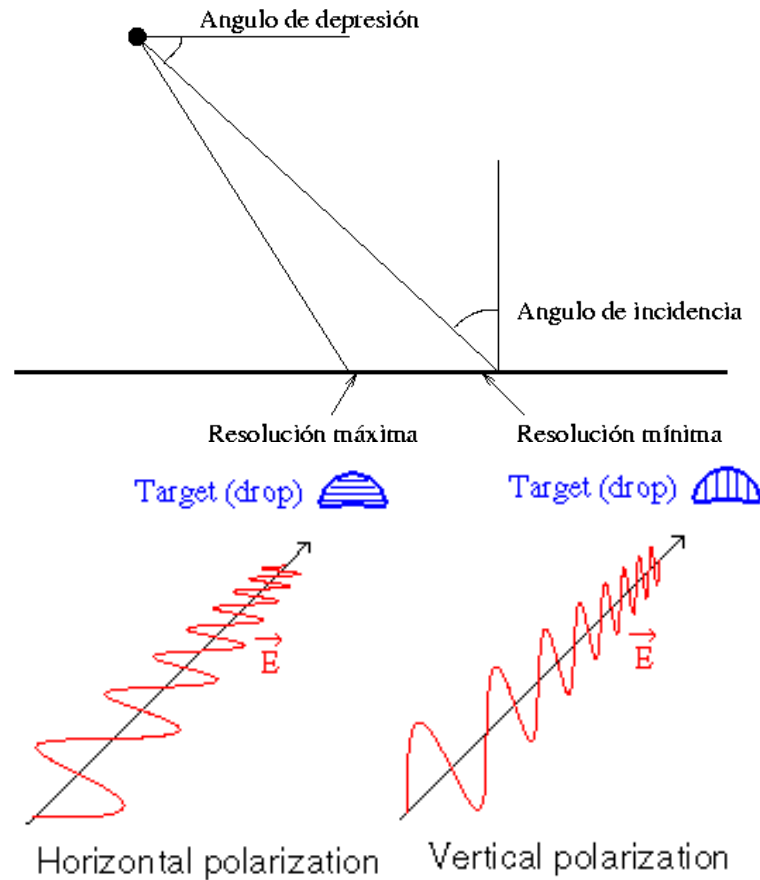


Figura 3.8: Principales propiedades de la observación con radar

El principal problema del radar fue en principio su baja resolución espacial que puede calcularse como:

$$R_s = \frac{\lambda H}{\phi} \quad (3.2)$$

donde R_s es la resolución, λ la longitud de onda, H la altura de observación y ϕ el diámetro de la antena. Si el radar se coloca sobre un avión, la altura es reducida y se obtienen resoluciones adecuadas, todo lo contrario ocurre en el caso de utilizar un satélite para transportarlo.

Este problema se ha solventado con el uso del **Radar de Apertura Sintética (SAR)** que se basa en el efecto Doppler que aparece en la observación cuando se produce un movimiento relativo entre objeto y

Clave	Longitud de onda (cm)
P	30-100
L	15-30
S	7.5-15
C	3.75-7.5
X	2.5-3.75
K_u	1.67-2.5
K	1.111-1.667
K_a	0.75-1.111

Tabla 3.7: Subdivisión de las longitudes de onda del radar

sensor. La resolución que se obtiene es equivalente a la que se obtendría con una antena de tamaño igual a la distancia entre ambas observaciones. Sin embargo existen más dificultades:

- Los radares observan la superficie lateralmente (perspectiva oblicua) lo que implica notables deformaciones geométricas;
- La señal de retorno no solo depende del objeto detectado sino también de la distancia al sensor;
- La interacción de las microondas con la superficie terrestre genera un fenómeno denominado **speckle** debido a la integración de respuestas de diferentes objetivos en un único pixel. El *speckle* se manifiesta como puntos blancos aleatoriamente dispersos por la imagen;
- La resolución no es igual en la dirección paralela a la trayectoria que en la perpendicular a la misma. En esta última, el tamaño del pixel aumenta conforme el ángulo de incidencia es mayor.
- La presencia de relieves modifica el ángulo local de incidencia de la señal de radar, transforma la superficie real en superficie proyectada modificando las distancias y además supone la presencia de sombras.

La región del espectro utilizada por el radar se divide en una serie de subregiones codificadas con letras (tabla 3.3.5).

El sensor **ERS-SAR** fue el primer satélite europeo de teledetección. Opera en la banda C con polarización VV. Produce imágenes de 100 Km de ancho con una resolución de 25 metros. Esta resolución se obtiene integrando los pixeles más pequeños que se obtienen en las imágenes en bruto para disminuir el **speckle**. El ángulo de incidencia varía entre 20 y 26 grados lo que permite captar la rugosidad del terreno. Se utilizó en diferentes proyectos en oceanografía (estimación de oleaje), glaciología (detección de grietas), usos del suelo (discriminación de cultivos) y geomorfología.

RADARSAT es un satélite de la NASA con órbita heliosíncrona, opera en la banda C con polarización HH. La anchura de las imágenes varía entre 35 y 500 Km, así como la resolución que oscila entre 10 y 100 m.

El sensor **SIR-C/X-SAR** utiliza 3 bandas (L, C, X) y 4 polarizaciones (HH, HV, VH y VV) con lo que se obtiene el equivalente a 12 canales de información. La resolución espacial es también variable. El ángulo de depresión varía entre 73 y 27 grados con lo que también son muy variables los ángulos de incidencia.

3.4 Errores en la captación de imágenes

El proceso de captación de radiación procedente de la superficie terrestre por parte de un sensor situado en un satélite no es perfecto. Existen diversos factores que van a introducir diversos tipos de error. Estos se pueden clasificar en cinco tipos básicos en función de cual de los elementos que intervienen en el proceso sea el responsable.

- Distorsiones originadas por la plataforma. Un satélite, al igual que un avión aunque en menor medida, está sujeto a oscilaciones aleatorias de su altitud, velocidad y orientación de sus tres ejes. Estas oscilaciones alteran de un modo impredecible la relación que se establece entre posiciones en la superficie terrestre y posiciones en la matriz de datos.
- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre. Debido a la altitud a la que se encuentran los satélites y a que la toma de una imagen completa requiere cierto tiempo, la superficie terrestre se habrá desplazado desde el inicio de la toma de la imagen hasta el final.
- Distorsiones geométricas provocadas por el sensor. La complejidad del proceso de captación de la imagen puede introducir pequeños errores que, en general suponen que los píxeles de la imagen no tengan todos la misma resolución.
- Distorsiones radiométricas provocadas por el sensor. Puesto que cada sensor tiene varios detectores por banda, puede producirse una cierta descalibración de alguno de ellos con lo que aparecerán efectos de bandeo en la imagen. En el caso extremo pueden perderse algunos píxeles o incluso líneas enteras.
- Distorsiones provocadas por la atmósfera, debidas a la interacción de la radiación con la atmósfera.

La corrección de los tres primeros tipos de errores se conoce como **corrección geométrica** y se lleva a cabo al **georreferenciar** la imagen. La corrección del cuarto se conoce como **corrección radiométrica** y la del quinto como **corrección atmosférica**. Estos tres tipos de corrección se verán en cada uno de los tres temas siguientes.

3.5 Ejemplos de aplicaciones de diversos tipos de sensores en teledetección

Durante este curso se tratará fundamentalmente de imágenes obtenidas en aquellas regiones del visible e infrarrojo reflejado en las que existen ventanas atmosféricas. Se trata del tipo de aplicación más frecuente

y más interesante desde el punto de vista de la ordenación del territorio, estudio de riesgos naturales, y otras ramas aplicadas de la Geografía.

En esta sección se van a repasar otro tipo de aplicaciones de la teledetección basadas en regiones del espectro, en las que el comportamiento conjunto del sistema Sol-Atmósfera-Tierra es diferente, dando especial relevancia al radar ya que su uso se extiende cada vez más.

3.5.1 Utilización de regiones del espectro electromagnético en las que los distintos componentes de la atmósfera absorben la radiación

El sensor **TOMS** (Sensor para la Medición del Ozono Total) en el satélite Nimbus-7 y la serie UARS (Satélite de Investigación de la Alta Atmósfera) capta radiación en 6 longitudes de onda dentro del ultravioleta. Se trata de radiación solar reflejada o absorbida y reemitida por la atmósfera. Puesto que el principal causante de estos procesos es la capa de ozono estratosférica, a mayor radiación recibida mayor es la cantidad de ozono presente (figura 3.5.1).

Los problemas que deben solventarse es la presencia de otros componentes en la atmósfera que también afectan al ciclo del ozono (por ello se utilizan 6 bandas) y la falta de radiación solar durante los inviernos polares.

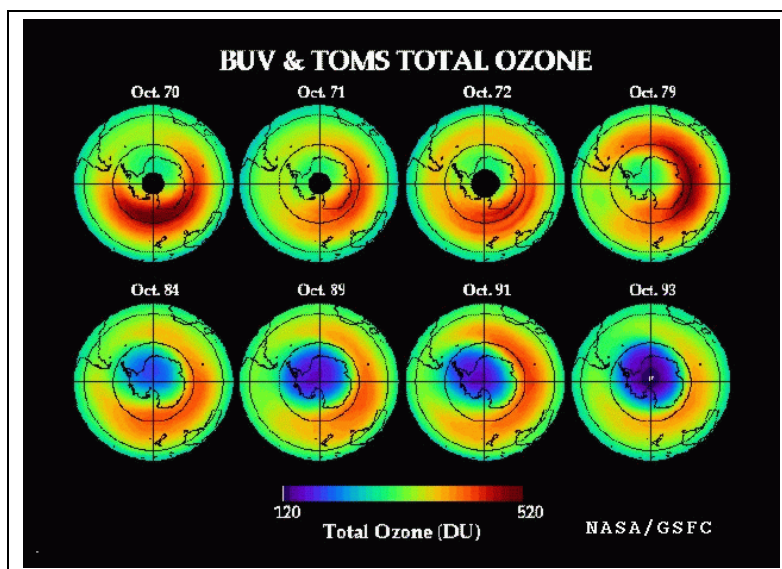


Figura 3.9: Imágenes captadas por el sensor TOMS

Bandas de absorción de agua. Meteosat

Las bandas de Meteosat (figura 3.10) son un ejemplo de cada una de estas posibilidades. La imagen visible capta radiación solar reflejada integrando todas las longitudes de onda del visible y parte del infrarrojo reflejado ($0.5 - 0.9 \mu$), cuanto mayor sea el valor recibido por el sensor mayor es el albedo (colores claros). La imagen del infrarrojo térmico capta radiación emitida por la Tierra ($5.7 - 7.1 \mu$) que, por tanto, depende de su temperatura, a mayor temperatura mayor energía recibida (colores oscuros).

La imagen del vapor de agua ($10.5 - 12.5 \mu$) capta energía en la longitud de onda en que mayor es la absorción del vapor de agua; por tanto cuanto mayor sea la cantidad de vapor de agua presente en la columna atmosférica menor es la cantidad de energía que capta el sensor (colores claros). La combinación de estas tres bandas permite distinguir:

- Tierra de oceano, por su diferente albedo y temperatura
- Temperatura de la superficie terrestre sin cubierta nubosa
- Nubes bajas (albedo muy alto, temperatura moderada, contenido en vapor de agua moderado)
- Nubes altas (albedo muy alto, temperatura muy baja, contenido en vapor de agua moderado)
- Nubes de desarrollo vertical (albedo muy alto, temperatura muy baja, contenido en vapor de agua elevado)

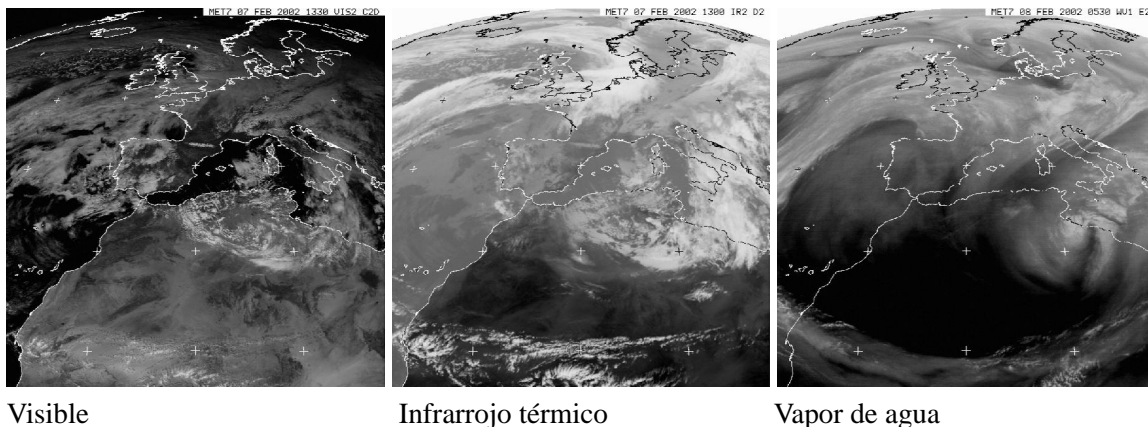


Figura 3.10: Imágenes de cada uno de los canales del satélite Meteosat

3.5.2 Emisividad y temperatura en el infrarrojo térmico

Además de obtener información sobre un objeto a partir de la radiación solar reflejada por el mismo, podemos captar e interpretar la radiación emitida por el objeto. A partir de la ecuación de Planck (ecuación 1.5), y teniendo en cuenta la emisividad, se obtiene:

$$M_\lambda = \epsilon_\lambda \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (3.3)$$

Asumiendo que la superficie es lambertiana y que no existen interferencias por parte de la atmósfera se tiene también que:

$$M_\lambda = \pi L_\lambda \quad (3.4)$$

Puesto que L_λ es la radiación recogida por el sensor, a partir de ella podemos:

- Calcular la temperatura conociendo la emisividad

$$T = \frac{c_2}{\lambda (\ln[(\epsilon_\lambda c_1 \lambda^{-5} / M_\lambda) + 1])} \quad (3.5)$$

- Calcular la emisividad conociendo la temperatura

$$\epsilon_\lambda = \frac{M_\lambda \lambda^5 (exp[c_2 / \lambda T] - 1)}{c_1} \quad (3.6)$$

Existen diversos sensores preparados para captar radiación en el infrarrojo térmico. El del satélite Meteosat permite llevar a cabo estimaciones de la temperatura media espacial sobre áreas de gran tamaño (la resolución de Meteosat en el térmico es de 5 Km) con propósitos meteorológicos, figura 3.10. El satélite NOAA capta también radiación en el infrarrojo térmico pero ahora su menor resolución espacial 1.1 Km permite incluso detectar incendios forestales (figura 3.5.2).

3.5.3 Sensores pasivos de microondas

La emitancia de la superficie terrestre en esta región del espectro es mínima por lo que apenas se han utilizado sensores pasivos para su detección. Una excepción importante es su utilización para detectar la presencia de hielo marino sobre la superficie marina.

Aunque hielo y agua serían muy fácilmente diferenciables utilizando la luz visible, en la práctica la casi constante cubierta nubosa o de niebla y la falta de luz solar directa en buena parte del año en las latitudes altas, imposibilita su uso.

Por tanto se van a utilizar radiómetros pasivos de microondas para recoger la escasa radiación de microondas emitida desde la superficie terrestre. La clave para su utilización está en la diferente emisividad del hielo ($\epsilon_{15.5mm} = 0.8 - 0.97$) y del agua ($\epsilon_{15.5mm} = 0.44$) que, junto a la presencia de límites claros entre ambos estados, permite distinguirlos claramente.

Existen diversos tipos de interferencias, en primer lugar el ruido introducido por la atmósfera con carácter aleatorio tanto en el espacio como en el tiempo. Este puede eliminarse calculando medias mensuales

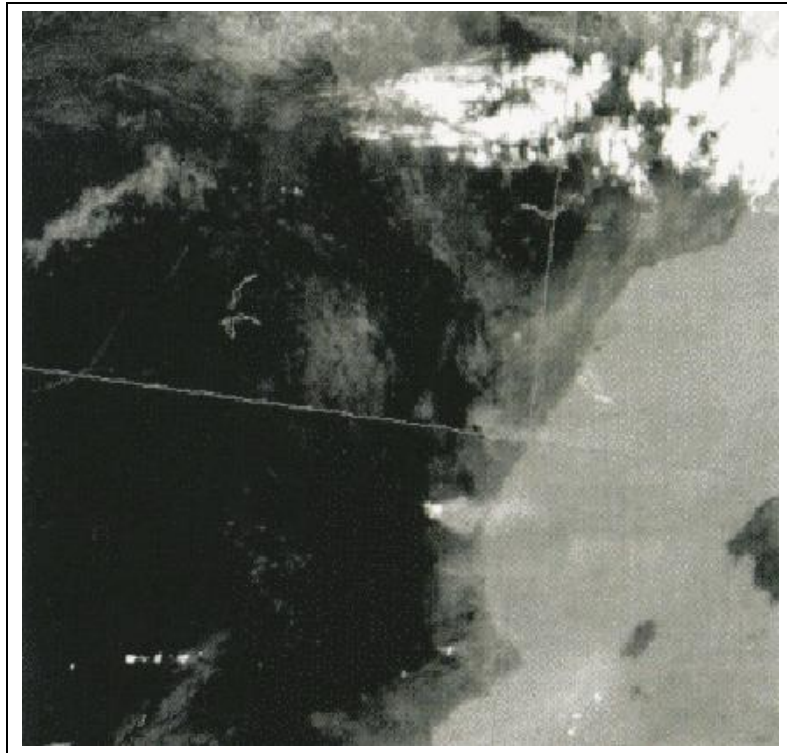


Figura 3.11: Incendio captado por el satélite NOAA cerca de Valencia

para obtener datos de concentración de hielo más que de presencia-ausencia de hielo (figura 3.5.3). En segundo lugar, los píxeles cercanos a Tierra pueden sufrir una **contaminación continental** ya que la superficie terrestre tiene una alta emisividad en la región de microondas y aparecer como zonas de hielo, la solución sería cruzar el mapa resultante con un mapa de temperatura marina.

La radiación de microondas emitida por la superficie terrestre se ha utilizado también para obtener mapas de espesor de la cubierta de nieve (figura 3.5.3). La superficie terrestre tiene una gran emisividad, pero el flujo de radiación es dispersado por la nieve, a mayor espesor de nieve mayor dispersión y menos radiación llegará al sensor.

La presencia de objetos por encima de la cubierta nubosa puede complicar notablemente los resultados por lo que se debe utilizar información complementaria de otras bandas. No da buenos resultados en áreas con una cubierta de nieve o hielo importante (Islandia o Groenlandia) ya que la dispersión es total con unos pocos metros de espesor de nieve.

Los satélites Nimbus-5 y Nimbus-7, así como otros satélites meteorológicos posteriores están dotados de sensores pasivos de microondas.

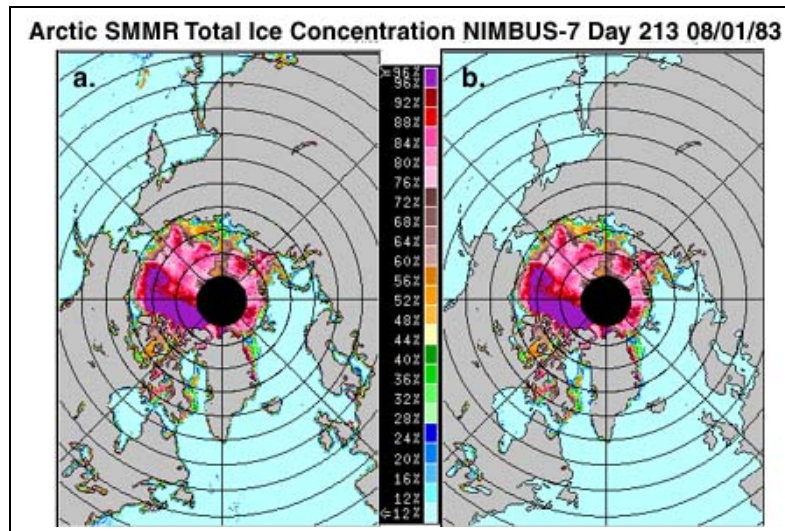


Figura 3.12: Mapas de concentración de hielo en la superficie marina a partir de imágenes del satélite NIMBUS

3.5.4 Sensores activos de microondas. Radar

Pese a sus problemas es una de las técnicas más desarrolladas en las últimas décadas. Especialmente relevante es el desarrollo de técnicas de interferometría que permiten generar modelos digitales de terreno muy precisos.

Una imagen radar puede contener diferentes tipos de información:

- La distribución espacial de la respuesta del terreno a la radiación emitida por el sensor.
- Tiempo de vuelta del pulso de radiación emitido, útil para la elaboración de modelos de elevaciones.
- Retardo entre dos bandas con diferente polarización, útil para la estimación de tipos de suelo.

En cuanto a la información ambiental que puede obtenerse:

- Rugosidad del terreno, con un detalle del orden de magnitud de la longitud de onda empleada
- Conductividad (relacionable con las propiedades del suelo)
- Las longitudes de onda mayores pueden penetrar en algunos tipos de suelo, del grado de penetración pueden deducirse las características de este

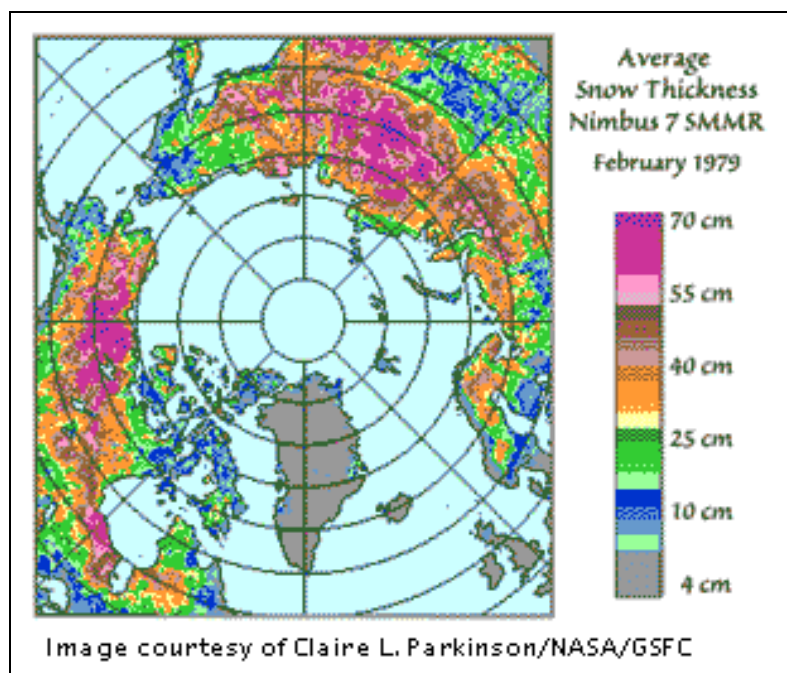


Figura 3.13: Mapas de espesor de la nieve a partir de imágenes del satélite NIMBUS

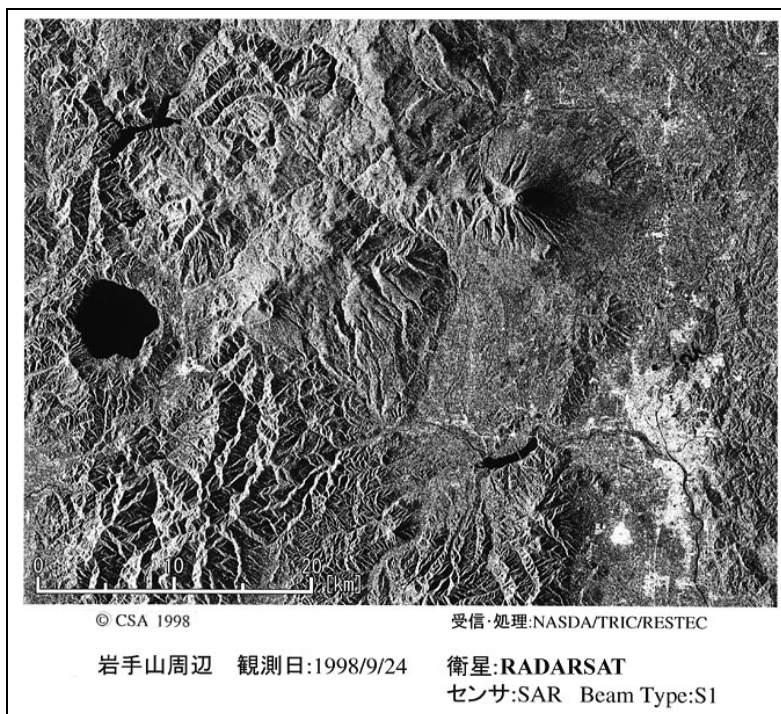


Figura 3.14: Imagen radar (RADARSAT)

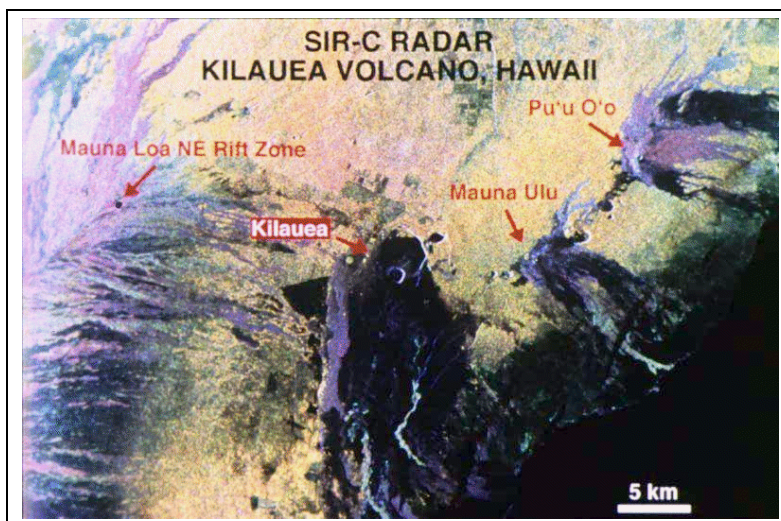


Figura 3.15: Imagen radar. SIR-C

