

CAPÍTULO 8

Nociones generales de geomática

Mariano H. Barragán, Leandro V. Soto y Héctor A. Salgado

Geomática es un término científico moderno (derivado del francés science geomatique), referido a la aproximación integrada de la medición, análisis, manejo, almacenamiento y visualización de datos terrestres, frecuentemente denominados datos o variables espaciales.

En los casos donde se formulan las preguntas ¿Qué es?, ¿Dónde está? y ¿Cuánto hay?, la Geomática provee la respuesta. Todas las decisiones llevadas a cabo por los planificadores, ingenieros y, en general, los responsables de las mismas, relativas a la Tierra, su entorno y recursos, requieren estudios y análisis de modelos de la Tierra en forma de mapas, planos, imágenes terrestres e información digital.

En la geomática se integran ciencias, disciplinas y tecnologías innovadoras como la teledetección, la cartografía, la topografía y geodesia, la modelización, el análisis espacial, los sistemas de información geográfica, los sistemas de posicionamiento y las comunicaciones. En todas sus facetas, la geomática se halla en una etapa de fuerte desarrollo y expansión.

El campo de aplicaciones de la información georreferenciada es muy amplio y diverso, tanto en procesos de investigación, planificación, gestión, como en la toma de decisiones sobre medio ambiente y desarrollo sostenible, sector agropecuario, recursos naturales, procesos de planificación y ordenamiento territorial, comercio, catastro urbano y rural, entre otros.

En el ámbito agropecuario el rango de aplicaciones se muestra tanto a escala regional como a escala de cuencas hídricas, e inclusive de propiedad individual. Hay desarrollos para el monitoreo hidrológico de cuencas hídricas, relevamiento de recursos, manejo de sistemas de riego y drenaje, administración forestal, agricultura de precisión (manejo sitio-específico de insumos y productos), planificación y administración de fincas, etc.

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

En las últimas cuatro décadas se han desarrollado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una respuesta al requerimiento de una solución para el almacenamiento, análisis y manejo de datos ambientales georreferenciados.

Los **SIG** (*Geographic Information Systems* **GIS** en lengua inglesa) son un conjunto de herramientas informáticas para capturar, almacenar, buscar, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para unos determinados objetivos (Burrough, 1986)

Conceptos básicos

Se puede desglosar la sigla SIG en sus componentes para lograr una mejor comprensión de su significado:

Sistema: se refiere a la integración de usuario y ordenador (computadora) para proveer información para apoyar operaciones, manejo, análisis y toma de decisiones en una organización. Por ejemplo, un mapa de suelos describe entidades espaciales complejas, y es un documento, pero no un sistema. El sistema incluye el proceso digital de imágenes, herramientas de análisis geostatístico, bases de datos y su manejo, y tablas con posibilidades de cálculo, como las de una planilla de cálculo. Sin estas capacidades, el sistema sería muy limitado en sus aplicaciones.

Información: son los datos, con información adicional, producto del proceso de los mismos.

Geográfica: se refiere a que son datos espaciales, con una referencia geográfica determinada, y que pueden ser desplegados en forma de mapa o carta.

Un SIG es un sistema integrado de equipamiento informático (*hardware*), programas de computación (*software*) y datos para manejar, analizar y presentar la información de acuerdo a su posición espacial, de tal manera que la exploración e investigación de los mismos, transforma los datos en información efectiva.

Mediante los SIG se gestionan grandes cantidades de datos, tanto gráficos como alfanuméricos. La capacidad de manejar ambos tipos de datos a la vez proporciona la gran ventaja de poder trabajar con información descriptiva de objetos o fenómenos y conocer dónde se ubica dicha información, su posición sobre un mapa y a que objetos del mapa se refiere. Esta propiedad hace que, con el uso de SIG, se puedan resolver problemas territoriales muy difíciles de una manera sencilla y, por este motivo, sean la herramienta actual más potente en la gestión y análisis territorial.

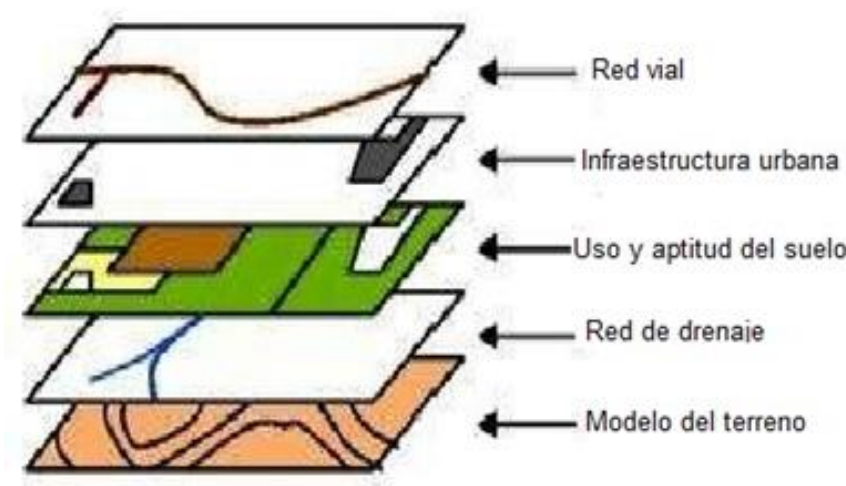
Las funciones básicas de un SIG son:

- adquisición de datos y su preproceso.
- manejo, almacenamiento y recuperación de datos.
- manipulación y análisis.
- generación de productos.

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital (ID). De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es el análisis y la gestión información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas (Figura 8.1), con una misma referencia geográfica, y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, efectuando cálculos y operaciones aritméticas y lógicas, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos y la referencia geográfica, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Figura 8.1: Capas temáticas de un SIG



SIG IGN

El Instituto Geográfico Nacional IGN (anteriormente Instituto Geográfico Militar IGM), confeccionó un SIG, accesible también a través de Internet (<http://www.sig.igm.gov.ar>), el cual presenta las siguientes particularidades:

- Es el único de cobertura continua nacional.
- La escala de captura es 1:250.000; su origen fue la Carta Topográfica (227 hojas).
- La información almacenada está en coordenadas geográficas en el Sistema WGS 84, Marco de Referencia POSGAR 94.
- Cada objeto posee un identificador único, lo cual permite una actualización personalizada.

La actualización de la información se realiza periódicamente mediante la recepción de datos provenientes, entre otras fuentes, de los trabajos de campo de la División Geodesia del IGM (levantamientos GPS y actualización de datos in situ), y/o mediante los datos procedentes de organismos e instituciones con los cuales el IGM tiene convenios de cooperación.

La información contenida en el SIG-IGM se encuentra distribuida en múltiples capas temáticas, entre las cuales figuran:

- Hidrografía
- Vías de comunicación
- Actividades humanas.
- Accidentes geográficos.
- Límites catastrales y fronteras.
- Hidrografía.
- Usos del suelo.
- Altimetría (Curvas de nivel y MDT).
- Infraestructura urbana.
- Imagen satelital.
- Redes Geodésicas.

Como ejemplo, para un sector del centro de la Provincia de Buenos Aires, se muestra en la Figura 8.2, la capa hidrográfica, que presenta los cuerpos de agua superficiales (lagos, lagunas, bañados, etc.), ríos y arroyos permanentes e intermitentes, de los cuales puede consultarse la tabla de información asociada (nombre, etc.). En la parte central pueden verse un conjunto de ríos y arroyos, con dirección SW-NE (entre ellos, el Arroyo de Los Huesos), que se originan en las Sierras del Tandil y desembocan finalmente en la Bahía de Samborombón. En la Figura 8.3 se anexó la capa de información catastral y correspondiente a la infraestructura vial (caminos rurales, rutas nacionales, vías férreas, puentes, etc.).

Figura 8.2: Capa hidrográfica del SIG IGN

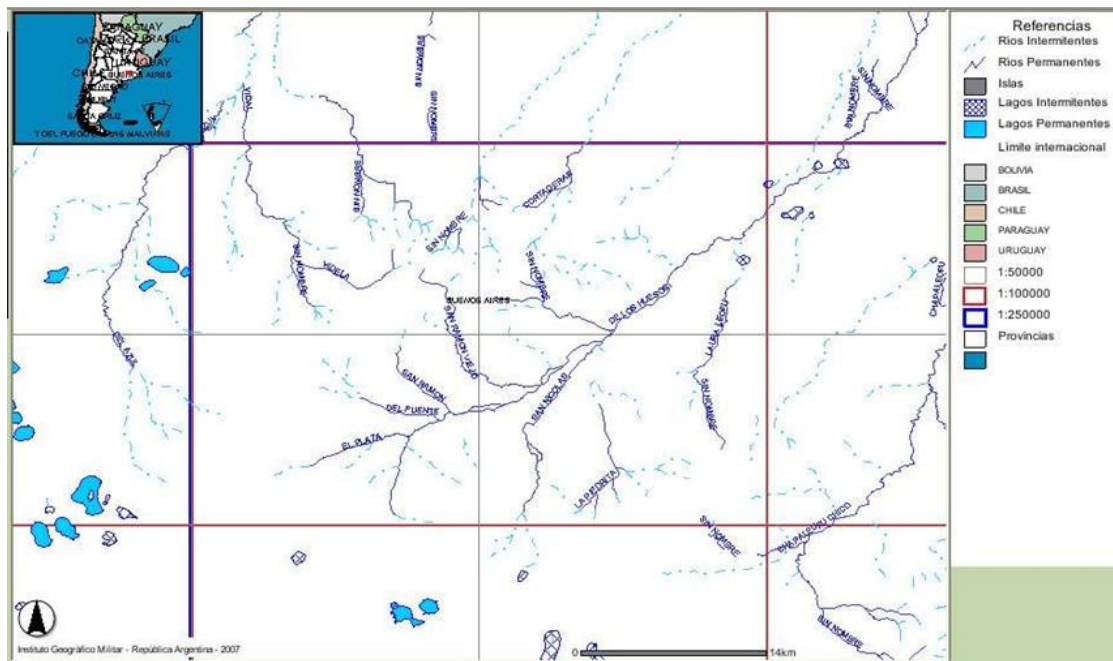
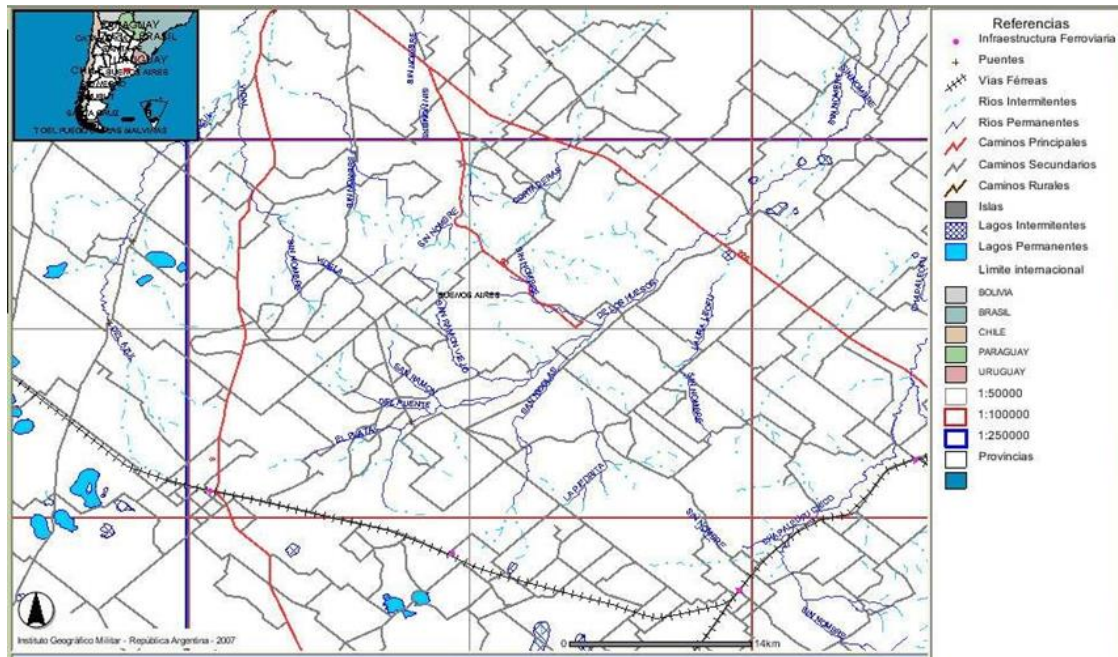


Figura 8.3: Ídem anterior, con el agregado de capa vial y catastral

Asimismo, organismos públicos y algunas empresas privadas ofrecen información en la Web, que puede ser consultada a través de SIG por intermedio de algunos de programas de procesamiento (ej: QGis, ArcGis, etc.) Un ejemplo de estas ofertas son las cartas de suelos, mapas de cultivos, etc. ofrecidos por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA (a través de su plataforma GEOINTA (<http://www.geointa.inta.gob.ar/>)).

Geoposicionamiento satelital

Desde hace 3 décadas aproximadamente se vienen desarrollando sistemas que permiten obtener la posición geográfica (latitud, longitud y altitud) a partir de datos proporcionados por satélites, que orbitan la Tierra. Actualmente están el GALILEO (de Europa), el GLONASS (de Rusia) y el GPS (de EEUU), que en conjunto conforman el Sistema Satelital de Navegación Global (Global Navigation Satellite System GNSS). Dado que hay similitud en lo conceptual y que el GPS es el más difundido en Argentina, a continuación se desarrolla este último.

Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

GPS es la sigla de “*Global Positioning System*”, o sea “Sistema de Posicionamiento Global”. Fue desarrollado por el Departamento de Defensa estadounidense con el fin de ubicar precisamente el emplazamiento de objetivos militares.

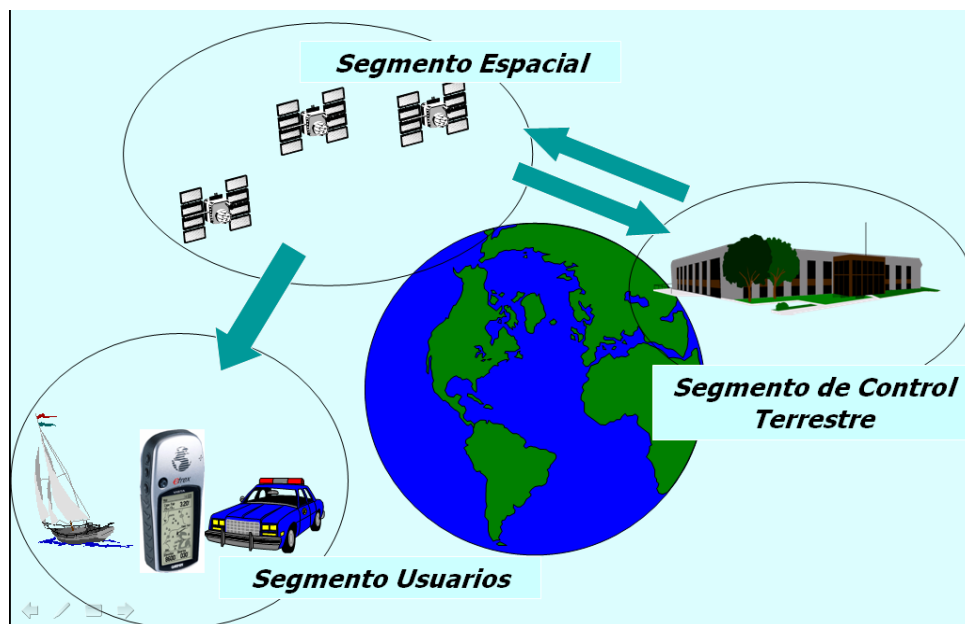
“Posicionamiento” se refiere a la ubicación en el espacio (3 dimensiones) de un objeto determinado mediante sus coordenadas (latitud, longitud y altitud), o bien a la posición exacta de un punto en cualquier parte del globo terráqueo o del espacio circundante.

Elementos fundamentales del GPS

Posee tres elementos básicos:

- **Módulos en el espacio:** compuestos por 24 satélites, en 6 órbitas circulares, con 4 satélites por órbita. Hay 4 a 10 satélites visibles en todo momento en cualquier parte de la Tierra. El período orbital es de aproximadamente 12 hs (11 hs 58 ') lo que se llama Día Sidéreo. Estos módulos se encuentran a una altitud de aproximadamente 20.200 Km. y transmiten las 24 hs del día.
- **Módulos de control en Tierra:** Son las estaciones terrestres que monitorean la posición de todos los satélites GPS y transmiten distintos datos, tales como efemérides actualizadas, error de reloj, correcciones, estado de los satélites, etc.
- **Módulo de usuarios:** Son los receptores. Estos deben ser capaces como mínimo de recibir las señales radiales necesarias, calcular su posición y presentar la información obtenida.

Figura 8.4: Componentes del sistema GPS



Principios elementales

Intersección: Es el fundamento del sistema. La posición se determina a partir de las distancias desde los satélites a puntos sobre la superficie de la Tierra. De manera muy simplificada, los satélites son puntos de coordenadas conocidas en el espacio. Para determinar esta intersección, los receptores miden las distancias al satélite usando el tiempo que tarda en llegar un mensaje de radio enviado por el satélite.

Error de reloj: El sistema requiere para determinar el desplazamiento de la onda de radio de relojes de alta precisión, atómicos en los satélites y de moderada precisión en los receptores (por

su costo). El asincronismo entre estos dos tipos de relojes es lo que se llama “Error de reloj”, del cual se tratará más adelante.

Efemérides del satélite: Es la posición del satélite para el momento en que se produce la medición de la distancia al satélite.

Error ionosférico: Es el error que se produce en la determinación de la distancia al satélite por el paso de la onda de radio a través de la ionósfera y atmósfera, que retardan dicha señal.

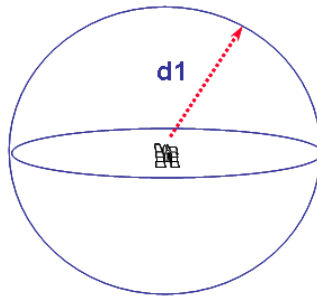
Bases para la determinación de posición (*ranging*)

- La posición es calculada mediante la medición de distancia a los satélites.
- Matemáticamente, se requieren 4 mediciones para determinar la posición exacta.
- Serían suficientes tres mediciones, si se tuviera un método para eliminar la respuesta absurda; pero en realidad, por razones técnicas se requieren otras mediciones.

Explicación

Si se conoce una sola distancia (d_1), sólo se sabe que la posición corresponde a una esfera cuyo centro es el satélite y el radio es la distancia al mismo.

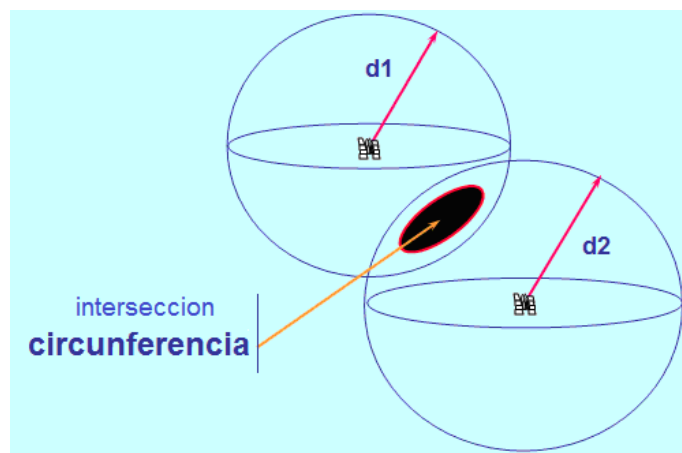
Figura 8.5: Esfera con puntos equidistantes de 1 satélite



Todos los puntos de esta esfera cumplen con la condición de estar a una distancia d_1 del satélite.

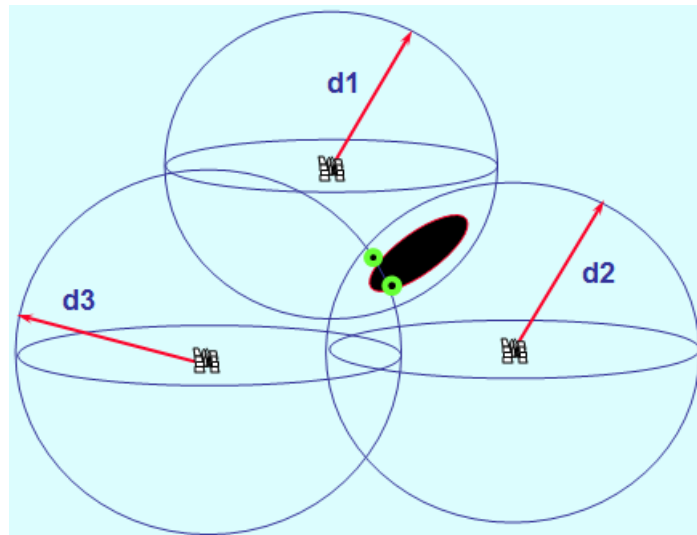
Si son conocidas las distancias a 2 satélites (d_1 y d_2), la posición sería la circunferencia generada por la intersección de las dos superficies esféricas generadas por los 2 satélites.

Figura 8.6: Circunferencia con puntos equidistantes a 2 satélites



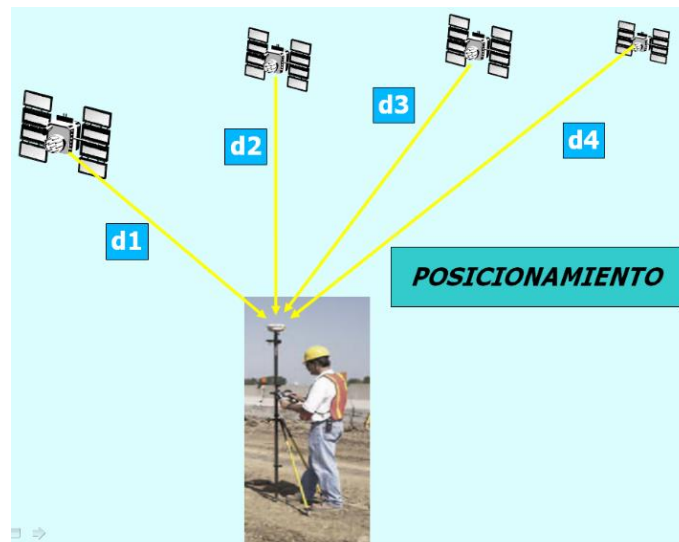
Conociendo la distancia a 3 satélites (d_1 , d_2 y d_3) ya se logra una ubicación puntual, dado que habría sólo dos puntos posibles en el espacio, que son los que están determinados por la intersección de las tres superficies esféricas generadas por el radio medio de cada uno de esos satélites.

Figura 8.7: Dos puntos equidistantes desde 3 satélites



Tal ambigüedad puede resolverse mediante una cuarta medida de distancia (d_4), dado que una de las mediciones es absurda (por ej. radio fuera de la superficie terrestre).

Figura 8.8: Intersección de solo 1 punto a partir de contar con más de 3 satélites



Medición de la distancia a un satélite

La medición de la distancia se basa en la medida del tiempo, que tarda una onda electromagnética (a la velocidad de la luz 300.000 km/s) en ir del satélite al receptor GPS.

Debe conocerse con precisión el momento exacto en que se emite esta onda y en qué momento se recibe, y se aplica la fórmula:

$$\text{Distancia} = \text{velocidad} \times \text{tiempo}$$

Se puede determinar la distancia del receptor al satélite. La medición del tiempo se hace con relojes de alta precisión, con resolución del nanosegundo ($1 \text{ nanosegundo} = 10^{-9} \text{ segundo}$).

Se **sincronizan** todos los satélites y receptores de tal forma que generen el mismo código en el momento exacto. Se cotejan los códigos recibidos de un satélite y se comparan con los del receptor. La diferencia entre uno y otro es el tiempo en que la onda recorrió la distancia. La ventaja de usar un juego de códigos es que se puede efectuar la medición de desfase en el momento que se desee y cuantas veces se quiera, para poder hacer un promedio.

Tanto los satélites como los receptores generan un juego de códigos digitales llamados “pseudo-aleatorios” que pueden ser fácilmente comparados y se repiten en el orden de los milisegundos.

Los satélites van provistos de **relojes atómicos** muy precisos y costosos, en número de 4 por cada satélite para asegurarse que siempre se encuentre uno en funcionamiento. Estos utilizan como generador patrón de reloj a las oscilaciones de un átomo en particular, de ahí su denominación de atómico.

Los receptores pueden utilizar relojes de moderada precisión. Para obviar la imperfección de sincronismo que se pueda presentar, se utiliza una medición de rango a un satélite adicional y así minimizar el desvío de sincronismo de reloj receptor.

Los receptores se encuentran programados de tal manera de autodetectar que algo funciona mal, si no hay respuesta única, y asume que el problema se halla en la sincronización del reloj interno.

Señales de los satélites

Expresado muy resumidamente, los satélites envían dos tipos de frecuencias portadoras: L1 = 1,5 Ghz y la L2 = 1,2 Ghz. Se utilizan dos frecuencias para eliminar el error ionosférico. Estas señales son las que se modulan con nuestro código pseudo-aleatorio con información de navegación y tiempo.

Así existen dos códigos: C/A y P

Con la portadora se puede medir la distancia entre la antena del receptor y el satélite. Esta es la medición de fase.

Observables: Son cada una de las señales que permiten determinar medición al satélite.

En función de los observables y la precisión, los receptores GPS se clasifican en:

- **Navegadores:** miden pseudodistancias sobre código C/A y precisiones por debajo de los 100 m.
- **Topográficos:** Disponen de gran memoria para almacenar las observaciones de código C/A o directamente posiciones para luego procesar diferencialmente las mismas con respecto a otro receptor fijo para obtener mediciones métricas o submétricas.
- **Geodésicos:** consiguen precisiones de 1 o 2 cm.

Debe señalarse que, por razones de seguridad nacional, el Departamento de Defensa de los EEUU puede distorsionar adrede la transmisión de las señales satelitales, lo que se denomina **Disponibilidad selectiva**, lo cual produce cambios de hasta +/- 90 m en el posicionamiento, no aceptables en la agricultura.

La **corrección diferencial** puede eliminar gran parte del error potencial y permiten aproximaciones de hasta 0,9 m. Tales correcciones son calculadas en Estaciones Base Diferenciales, que tienen las siguientes características: se les conoce las coordenadas X, Y y Z; constan de un receptor GPS, una computadora equipada con el Sistema de Información Geográfica (GIS) y un transmisor de radio.

Por lo tanto, para obtener precisión en GPS, es indispensable utilizar un receptor de corrección diferencial (**DGPS**) formado por un receptor GPS y un receptor de AM o FM que recibe los datos de información diferencial. Cabe aclarar que esta información no es gratuita.

Métodos de levantamiento por GPS

GPS estático: Si se usan las lecturas independientes se logra una precisión de una o varias decenas de metros, lo cual puede ser aceptable para muchas aplicaciones (como la localización de un árbol) pero no es aceptable en trabajos topográficos. Para éstos se describen los métodos siguientes.

GPS diferencial cinemático: Se usa una estación fija (base) y otras móviles. Se hacen muchas observaciones desde la fija para determinar muy bien su ubicación. Luego se hacen lecturas más o menos rápidas desde las móviles, a las que se le hacen las mismas correcciones que se determinaron para la base, basados en la gran distancia a la cual se encuentran los satélites. Las correcciones son las mismas para la base que para las móviles dentro de una misma área. Se logra gran precisión si las correcciones para la estación fija se determinan en base a las coordenadas de un punto de control con coordenadas conocidas. Programas complejos (software) calculan las correcciones que deben afectar las lecturas GPS.

GPS cinemático en tiempo real: Si las estaciones móviles se conectan por radio con la estación base, se pueden hacer en tiempo real los ajustes a las lecturas GPS en las estaciones móviles, pues por estos enlaces de radio se envían las correcciones necesarias.

Sistema de coordenadas

Las relaciones de espacios entre los satélites y los puntos terrestres donde se estacionan los receptores GPS se especifican en un sistema tridimensional de coordenadas rectangulares que tiene como origen un foco de la órbita del satélite (el cual coincide con el centro de gravedad de la Tierra, G). Como eje de las X se toma la línea recta que une los dos focos. El eje de las Y está en el plano de órbita y el eje de las Z es perpendicular a dicho plano (el satélite tiene ligeras desviaciones de su órbita en dirección Z).

Estas coordenadas se transforman luego a coordenadas geodésicas o rectangulares geocéntricas. Las geodésicas (longitud, latitud y altura) consideran a la Tierra como un elipsoide de revolución, que es la figura geométrica simple que mejor se ajusta al "geoide". El elipsoide más

conocido es el del sistema geodésico mundial de 1984 (WGS 84), que es del mismo Datum norteamericano de 1983 (NAD 83). También se puede considerar la Tierra como geoide, que idealiza la superficie terrestre como la "continuación de la superficie del mar bajo los continentes".

A partir de las coordenadas geodésicas se pueden calcular las coordenadas rectangulares para cada región específica de la superficie terrestre. Los programas de computación (software) especializados se encargan de estos cálculos para datos obtenidos por GPS.

Aplicaciones en el ámbito agropecuario

El GPS tiene muchas aplicaciones, ya que permite georreferenciar sitios de interés (ubicación de mejoras, muestreos de suelos, zonas con diferentes tipos de relieve, potreros con distintos tipos de cultivos, etc.). Esta información es muy valiosa pues posibilita organizar la información a la hora de planificar las actividades en un establecimiento agropecuario, de manera de considerar la variabilidad intraparcularia, denominada "sitio-específica".

La maquinaria agrícola actual cuenta con sistemas GPS para agilizar y hacer más precisas las labores culturales, movimientos de tierra, siembra, cosecha, pulverizaciones, fertilización, entre otras. Los pilotos automáticos, monitores de rendimientos, mapas de suelos que permiten realizar delimitaciones de ambientes de acuerdo a su potencial productivo, la dosificación variable en las pulverizaciones y en la siembra, etc. Todas estas herramientas se engloban en lo que actualmente se conoce como **Agricultura de Precisión**² y es un área en constante crecimiento y desarrollo en cuanto a las tecnologías utilizadas en el agro.

Teledetección

La teledetección es el conjunto de técnicas y conocimientos que permiten obtener información de un objeto sin estar en contacto con él. Aunque por su etimología, la teledetección abarca toda la percepción a distancia, en la actualidad el término quedó restringido a aquella que utiliza la energía electromagnética. Aquí se trata solamente la detección desde el espacio (espacial) y la aérea.

Bases físicas

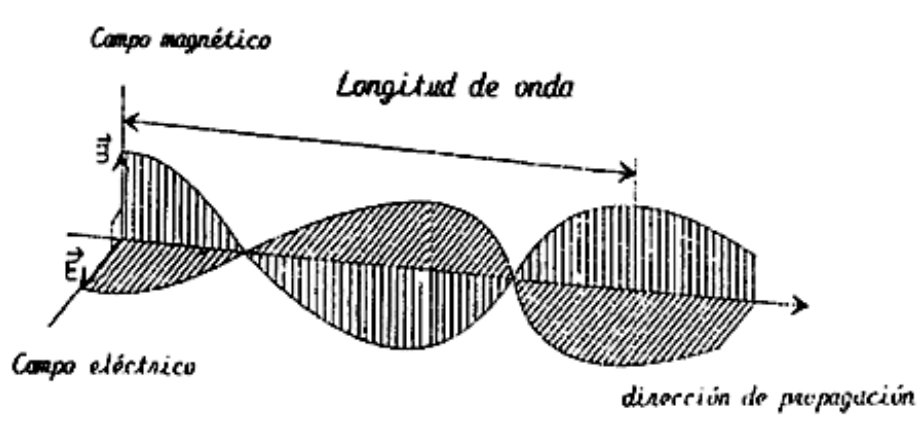
La energía electromagnética es el medio que permite transmitir la información del objeto a distancia. La misma se define como un conjunto de ondas que tienen ciertas longitudes y frecuencias características.

Ondas electromagnéticas

²Más información se puede obtener en la página oficial del Proyecto de Agricultura de Precisión del INTA Mandredi (<https://www.argentina.gob.ar/inta>).

Una onda electromagnética es un conjunto de dos vectores ortogonales indisociables (campo eléctrico y campo magnético) que se propagan en el espacio y cuya amplitud varía periódicamente en forma sinusoidal (Figura 8.9).

Figura 8.9: Onda electromagnética



Los parámetros más importantes de una onda son:

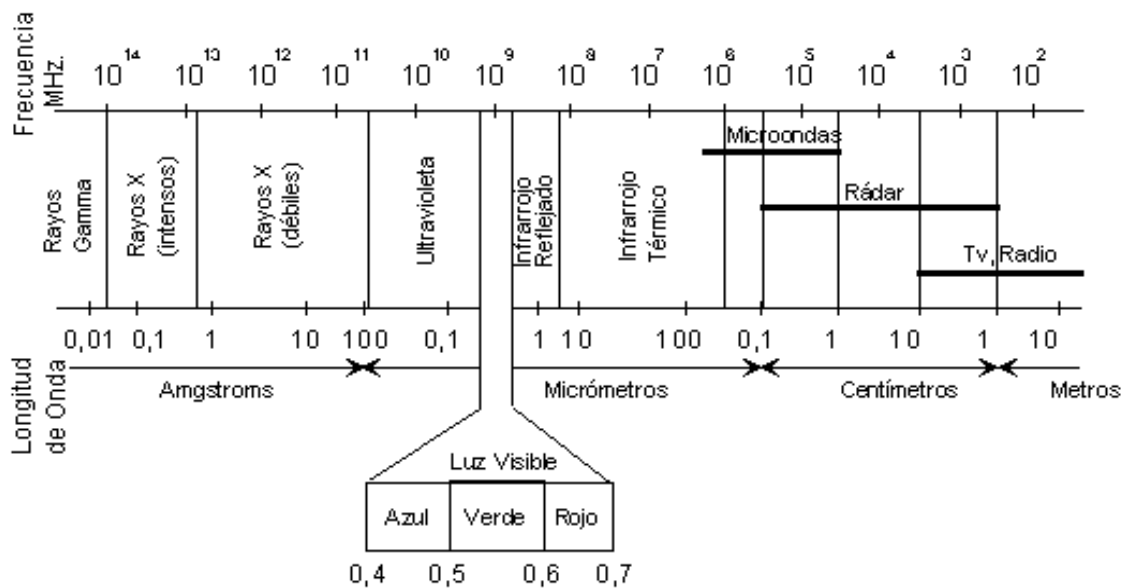
- su **velocidad** de propagación en el vacío (c), todas las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz (300.000 km/s).
- la **longitud de onda** (λ) es la distancia mínima entre dos puntos en el espacio alcanzado por la onda. Existen ondas electromagnéticas de todas las longitudes, desde muy cortas como los rayos cósmicos hasta muy largas como las ondas de radio. La longitud de onda con que emiten los objetos depende de su temperatura. Cuanto mayor es la temperatura, más rápido vibran los electrones y las longitudes de onda de la radiación emitida son más cortas (Ley de Wien).

De las características anteriores se deduce la **frecuencia** (f). Al ser la velocidad de propagación de la energía electromagnética (c) constante (300.000 km/s), se observa una relación inversa entre longitud de onda (λ) y frecuencia " f ".

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{en Hz o s}^{-1})$$

Espectro electromagnético

Existen ondas electromagnéticas visibles por el ojo humano, otras requieren de sensores especiales que permiten registrar y medir la energía. Aunque la sucesión de valores de λ es continua, suele establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética tiene un comportamiento similar. La organización de estas bandas se denomina espectro electromagnético (Figura 8.10). Las más utilizadas por la tecnología actual son:

Figura 8.10: Espectro electromagnético (adaptado de Chuvieco, 1995)

Visible (0.4-0.7 μm): Es la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano. Coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar. Se pueden localizar los colores primarios en las longitudes:

Azul: 0.4 - 0.5 μm Verde: 0.5 - 0.6 μm Rojo: 0.6 - 0.7 μm

Infrarrojo reflejado o cercano (0.7-1.3 μm): Es una banda importante para diferenciar vegetación y contenido hídrico.

Infrarrojo medio (1.3-8 μm): En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico (8-14 μm): Es la región del espectro en la que emiten energía los cuerpos de la superficie terrestre.

Microondas (desde 1 μm): Tiene la característica de ser transparente a la nubosidad, pero lleva asociada muy poca energía.

Influencia de la atmósfera

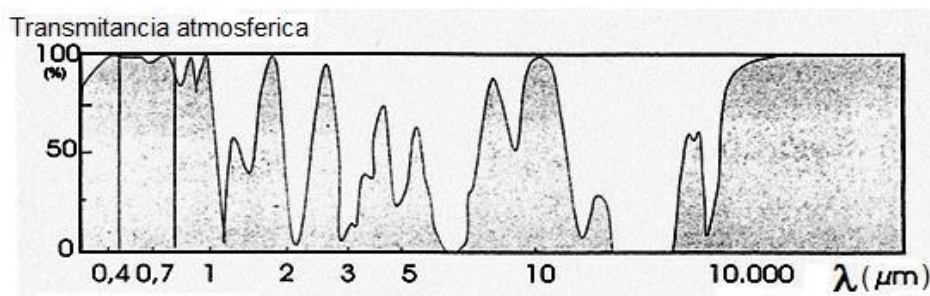
La energía proveniente del Sol atraviesa la atmósfera antes de alcanzar la superficie de la Tierra. La atmósfera tiene un comportamiento selectivo, lo cual significa que absorbe y emite radiación en ciertas longitudes de onda y es transparente en otras. Los procesos que afectan a la energía electromagnética al atravesar la atmósfera son: absorción, dispersión, emisión, reflexión.

La **absorción**: el oxígeno (O_2) y el ozono (O_3) son los gases más importantes en la absorción de la radiación de onda corta en la parte superior de la atmósfera. Mientras que el vapor de agua y el dióxido de carbono (CO_2) son los principales absorbentes de la radiación de onda larga. Los cuatro gases mencionados anteriormente constituyen las llamadas “**Bandas de Absorción**”.

Las zonas del espectro, donde la absorción es mínima, se llaman **Ventanas Atmosféricas** (Figura 8.11). Los sensores se diseñan para que trabajen en esas regiones. Las ventanas empleadas en el rango visible e IR son:

1. 0,3 μm a 1,3 μm
2. 1,5 μm a 1,8 μm
3. 2,0 μm a 2,6 μm
4. 3,0 μm a 3,6 μm
5. 4,2 μm a 5,0 μm
6. 7,0 μm a 15,0 μm

Figura 8.11: Ventanas atmosféricas



La **dispersión** (*scattering* en lengua inglesa) es la combinación de reflexión y refracción de la energía por partículas y moléculas (aerosoles, polvo muy fino, moléculas de agua, contaminantes) independientemente de la fuente de energía (Sol o Tierra). La radiación dispersada es desviada dependiendo de la relación de dimensiones entre la λ de la energía y el tamaño de las partículas.

Se distinguen tres tipos de dispersión:

- **Dispersión Rayleigh:** cuando la λ es superior al diámetro de las partículas dispersadas. Esta dispersión es la causa de que el cielo se vea azul, dado que las partículas que la producen son las moléculas de los gases que componen la atmósfera y las radiaciones más dispersadas son las de menor longitud de onda (azul).
- **Dispersión no selectiva:** cuando la partícula es mucho mayor que la λ de la energía.
- **Dispersión Mie:** cuando la λ y el diámetro son del mismo orden de magnitud.

Como consecuencia de los diversos tipos de dispersión de la energía proveniente del Sol, parte es retrodispersada, alejándose de la Tierra, llamada "Luz del Aire", otra parte sufre múltiples choques y desvíos, pudiendo o no llegar a la superficie terrestre, llamándose "Luz difusa o Luz del cielo", y la última parte llega directamente a la superficie.

La **emisión** por parte de la atmósfera se explica porque al tener una temperatura mayor que 0°K, emite energía (Ley de Planck). Dado que está en equilibrio térmico con su medio, irradia una energía igual a la absorbida.

La **reflexión** es el principal fenómeno de interacción para materiales de la superficie terrestre en el espectro visible. Se mide a través de la **Reflectancia**.

Características espectrales de las cubiertas terrestres

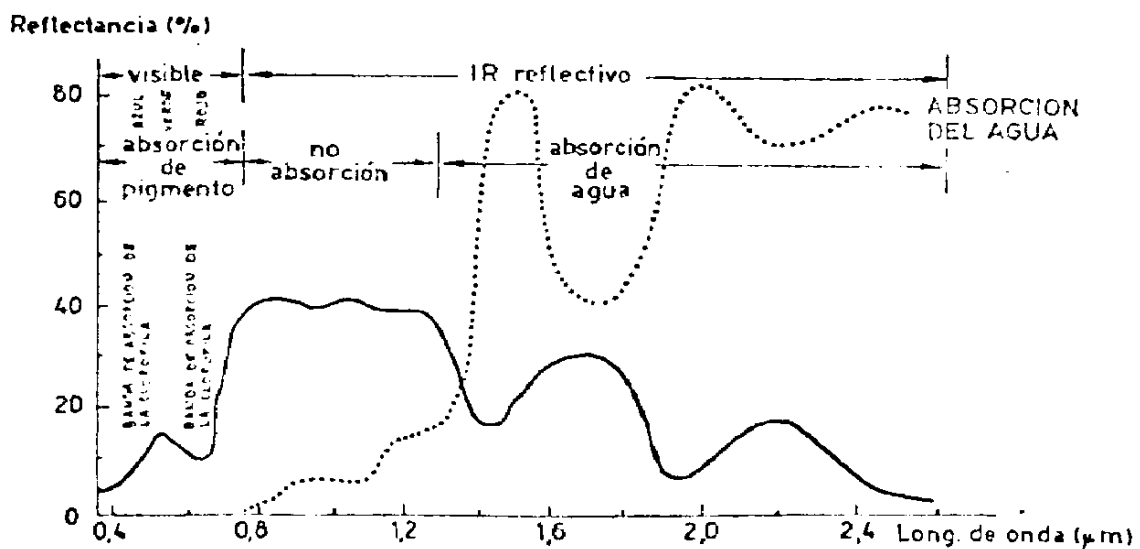
La energía captada por el sensor corresponde a la proveniente del píxel. Por lo tanto es la integración de las respuestas de todos los objetos que lo componen (vegetación herbácea, forestal, suelos, caminos, pueblos, lagunas, etc.). Teniendo presentes estas consideraciones, se presenta la respuesta espectral de 3 elementos: vegetación, suelos y agua.

Vegetación

La firma espectral típica de la vegetación vigorosa sana se manifiesta a través de su respuesta espectral, que abarca la porción del espectro que va desde los 0,4 μm hasta 2,5 μm . En la curva (Figura 8.12) se distinguen tres zonas:

- **0,5 μm a 0,75 μm** , es la zona donde predomina la **influencia de la pigmentación**. Aquí la clorofila absorbe la mayor cantidad de energía, teniendo una mayor reflexión en la zona del verde (0,55 μm).
- **0,75 μm a 1,35 μm** , zona afectada considerablemente por la **estructura interna de la hoja**, se caracteriza por una alta reflectancia y una baja absorción.
- **1,35 μm a 2,5 μm** , la respuesta es función del **contenido de agua en la hoja**, que a su vez está relacionado con el espesor de la hoja. A medida que las hojas envejecen, decrece el contenido de humedad provocando aumentos en la reflectancia en estas bandas.

Figura 8.12: Firma espectral de vegetación sana



En síntesis, las variaciones en la pigmentación, características histológicas y contenido de humedad del follaje, dan origen a diferentes gráficas de reflectancia espectral. Se debe aclarar que las diferentes especies vegetales pueden tener características espectrales similares en una

etapa de crecimiento dada, por lo tanto, es importante estudiar la variación temporal de las distintas especies. Cuando estas propiedades cambian, la respuesta espectral también, permitiendo así el reconocimiento de distintos estados fisiológicos de la vegetación.

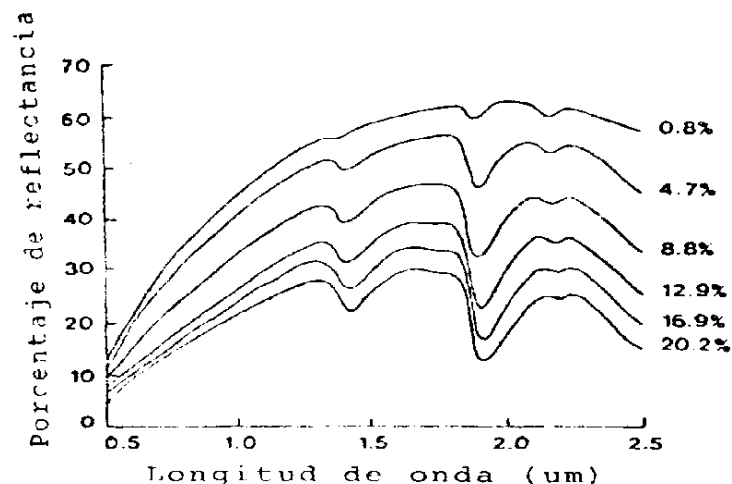
Suelos

Los suelos tienen una curva de respuesta menos compleja que la vegetación, el rango va desde los 0,4 μm a 2 μm . Las propiedades físicas del suelo están ligadas a la **textura** y a la estructura. La textura es una de las características más permanentes, mientras que la estructura varía con la actividad agrícola, como el laboreo y con los factores ambientales. La reflectancia dependerá de la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica, óxidos de hierro y de otras variables como humedad, temperatura, salinidad, etc.

Los suelos de **textura** muy fina, como los arcillosos, tienen alta capacidad de retención de humedad y en ellos las bandas de absorción del agua están bien diferenciadas. En la Figura 8.13 se observa que con altos contenidos de **humedad** las bandas son notables (escotaduras), y su influencia es menor cuando tiene muy baja humedad.

Las condiciones de manejo de los suelos afectarán la respuesta espectral, ya que influyen sobre el contenido de humedad, la rugosidad superficial, el contenido de materia orgánica, etc. Como ejemplo, un suelo arado presenta una menor respuesta en comparación con un suelo no laboreado; a medida que el contenido de materia orgánica disminuye, la reflectancia será mayor.

Figura 8.13: Reflectancia de suelo arcilloso con distintos grados de humedad (Swain and Davis, 1978)



La relación entre porcentaje de **materia orgánica** (MO) y reflectancia no es constante y depende de las condiciones de drenaje, de la región climática e incluso del grado de descomposición de la MO.

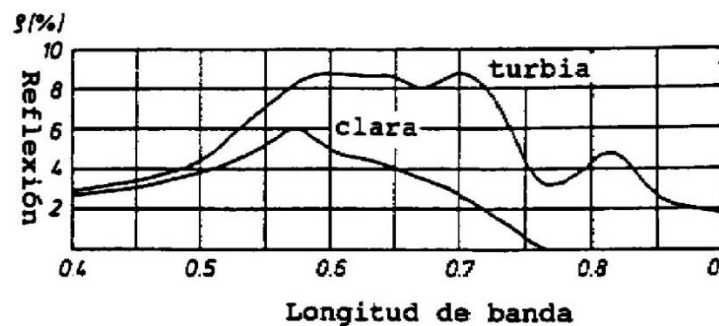
La **temperatura** ($T^{\circ}\text{C}$) del suelo es detectable en la región del IR térmico. Está relacionada con pérdidas de humedad por evapotranspiración, la actividad microbiológica, la descomposición de la MO, la germinación de las semillas, y el crecimiento de los cultivos.

En síntesis, el aumento de reflectancia está altamente correlacionado con una disminución del contenido de humedad, de rugosidad, tamaño de las partículas, contenido de materia orgánica y cantidad de óxido de hierro presente en el suelo. Las zonas del espectro correspondientes al reflectivo y térmico proveen información útil para delinear características de los suelos y así interpretar sus variaciones.

Agua

El agua en estado líquido se caracteriza por su baja respuesta espectral. En la Figura 8.14 se presenta la reflectancia de cuerpos de agua pura (limpia, traslúcida) y turbia.

Figura 8.14: Reflectancia de agua pura y turbia



En general, cuando el agua está limpia y poco profunda, la energía registrada por el sensor es función de la arena, roca o cualquier tipo de sedimento que se encuentre en el fondo. Asimismo, la turbidez causada por sedimentos en suspensión afecta la respuesta. En la Figura 8.14 se observa que el agua turbia tiene mayor reflectancia que el agua pura y su máximo está desplazado hacia longitudes de onda mayores. La máxima diferencia entre las respuestas espectrales del agua turbia y agua clara se observan en el rango 0,6 μm –0,9 μm .

Los contaminantes afectan el color, la turbidez o la temperatura del agua a ser detectada por los sensores remotos. Los cuerpos de agua contienen materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión y en el fondo. Estos materiales producen dispersión y absorción de la energía incidente y provocan variaciones significativas en la energía transmitida a través del agua.

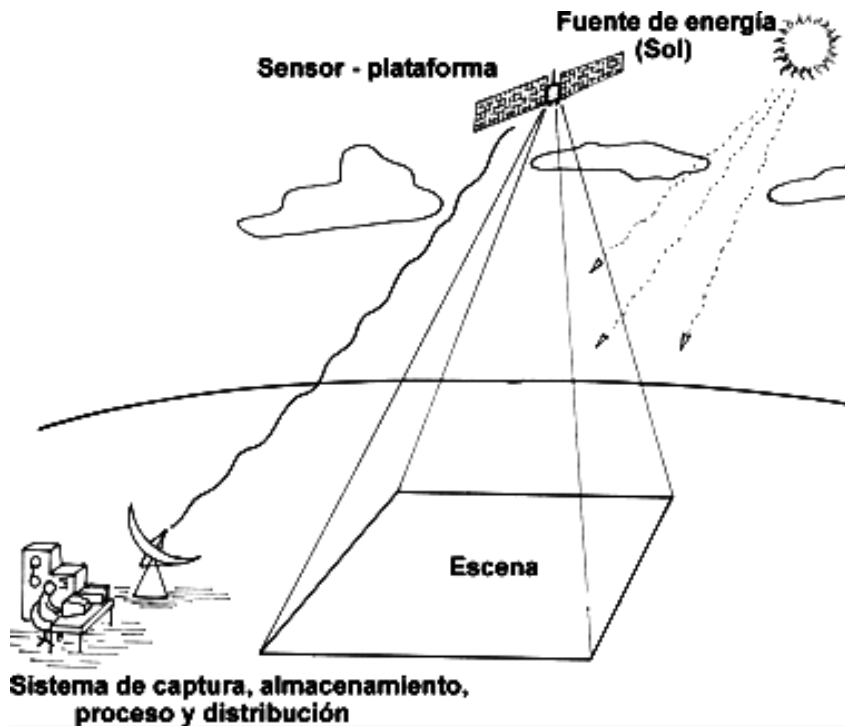
Sistema de teledetección

Un sistema de teledetección genérico (Figura 8.15) requiere la existencia de:

- **Sistema sensor:** sensor y plataforma, incluyendo el vector que lo transporta hasta su órbita de operación.
- **Escena:** área barrida en cierto tiempo por el sensor.

- **Fuente de energía:** el Sol (para los sensores pasivos) o propia del sensor (para los sensores activos)
- **Sistema de proceso:** incluye las estaciones terrestres capaces de recibir la información del sensor, interpretarla y distribuirla. Las **estaciones de recepción y procesamiento** de las imágenes se encuentran localizadas por todo el mundo.

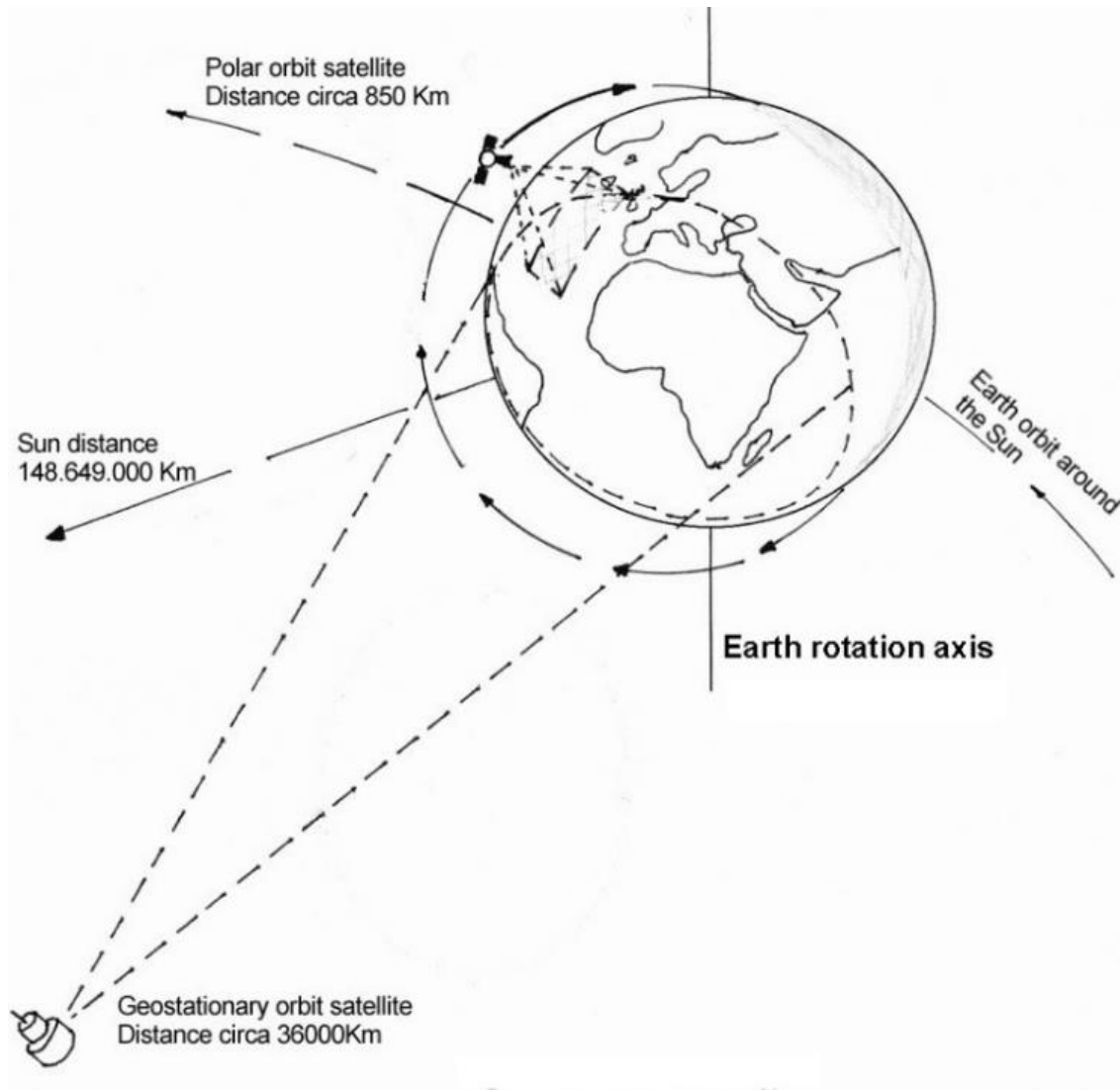
Figura 8.15: Sistema de teledetección



Clasificación de los satélites

Según el **tipo de órbita** los satélites (Figura 8.16) se pueden clasificar en:

- **De órbita geoestacionaria ecuatorial:** el satélite está a 36000 km de distancia y se encuentra fijo sobre un punto en el Ecuador. Sólo ve una cara de la Tierra de manera permanente. Por ejemplo, los satélites meteorológicos METEOSAT, GOES.
- **De órbita cuasipolar heliosincrónica:** el satélite utiliza orbitas mucho más bajas, entre los 500 a 1200 km, y siempre vuelve a pasar por la vertical de un lugar a la misma hora solar (heliosincronismo). El satélite se desplaza pasando cerca de los polos. Por ejemplo, los satélites SPOT, LANDSAT, NOAA, RADARSAT, SENTINEL, COSMO, SAO-COM, etc.

Figura 8.16: Distintos tipos de órbitas

De acuerdo a su **finalidad** los satélites se pueden clasificar en:

- **Meteorológicos:** están destinados a la observación y predicción meteorológica, su órbita es geoestacionaria, y capturan imágenes de la Tierra cada 30 minutos. Los satélites METEOSAT, NOAA, GOES, METEOR y el GMS, integran el sistema de observación meteorológica mundial.
- **De recursos naturales:** su objetivo es recoger información medioambiental, su órbita es heliosincrónica. Dentro de este tipo de satélites se encuentran el LANDSAT, EO-1, SPOT, IRS, IKONOS, RADARSAT, ERS, SENTINEL, COSMO, SAOCOM, etc.

Sensores

Pueden clasificarse de acuerdo a diversos criterios. En función de la fuente de energía empleada se dividen en:

- **Pasivos:** La fuente de energía es el Sol. Son instrumentos que recogen la energía radiante proveniente de la escena enfocada.

- **Activos:** La fuente de energía es el mismo sensor. Esto permite obtener imágenes en cualquier condición meteorológica y lumínica independientemente del Sol.

Sensores pasivos

Sistemas fotográficos

Basan su funcionamiento en la impresión de la escena sobre películas fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de la exposición. Los cuatro componentes más importantes de este tipo de sensores son:

- **Tipo de película:** el más empleado es el film pancromático, en el cual se recoge todo el espectro visible sobre una sola emulsión. Con el film infrarrojo (IR) se recogen en tonos de gris la radiación correspondiente al infrarrojo cercano.
- **Número de objetivos:** la observación múltiple puede realizarse incorporando varios objetivos –cada uno de ellos con un filtro apropiado– en una sola cámara, lo que permite impresionar la misma imagen en diversas bandas del espectro; o bien ensamblando varias cámaras sobre un mismo soporte, cada una de ellas con filtros y films apropiados.
- **Angulo de observación:** en la fotografía vertical (la más empleada), las imágenes son captadas perpendicularmente al terreno (permitiéndose 5° de desviación) y en la fotografía oblicua con un ángulo de visión inferior a 90° (en estudios del relieve y asentamientos humanos entre otros usos).
- **Altura de observación:** con la cámara métrica RMK 20/30 se obtuvieron unas fotografías estereoscópicas sobre varias regiones del mundo a una escala de 1: 820000 a 250 km de altura, con una resolución aproximada de 20 a 30 m, utilizándose principalmente con fines cartográficos (Chuvieco, 1995).

Exploradores de barrido (*scanners*)

Sensores óptico-electrónicos, que combinan una óptica semejante a la de la fotografía, con un sistema de detección electrónica que evita la dependencia de una superficie sólida.

Entre estos sensores, los más comunes son los exploradores de barrido (*scanners*), que cuentan con un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria. Esto les permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida de este componente óptico se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y convierten a una señal eléctrica, que a su vez se transforma en un valor numérico que puede almacenarse a bordo o transmitirse a la red de antenas receptoras. La información recibida se graba para su posterior proceso.

La señal enviada por el equipo óptico a estos detectores se muestrea a intervalos regulares, de tal forma que únicamente se graba un valor numérico cada cierta distancia. Ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, que se denomina **píxel (PICTure ELeMent)**. La señal detectada por cada píxel está en íntima relación con el tipo de cubierta observada. Si la señal proviene de una superficie homogénea, el valor del píxel

definirá correctamente a dicha cubierta; en el caso de ser una superficie heterogénea, el resultado será un promedio de las características espectrales de todas ellas.

En muchos equipos de exploración por barrido, la señal recibida se descompone a bordo en varias longitudes de onda, enviándose cada una a un tipo especial de detectores, sensibles a este tipo de energía, denominándose exploradores de barrido **multiespectral**, pues detectan la misma superficie del terreno en distintas bandas del espectro. El número y el ancho de estas bandas (resolución espectral) están en función del diseño del propio sensor, del número de detectores con que cuente, de su óptica, etc.

Las diferencias entre los equipos de barrido multiespectral y los sensores fotográficos son:

- Permiten ampliar la banda del espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible. Las emulsiones están limitadas al rango 0,4 a 0,9 μm , mientras que los equipos de barrido pueden abarcar de 0,4 a 12,6 μm , incluyendo el infrarrojo medio y el térmico.
- Mayor facilidad en la calibración y en la corrección radiométrica de datos.
- Posibilidad de realizar coberturas sistemáticas y de grandes espacios gracias a su capacidad de transmitir datos en tiempo real.
- Grabación digital de la información, que asegura su fiabilidad y permite su tratamiento asistido por computadora.

Como desventajas se citan su menor resolución espacial y la exigencia de contar con equipos especiales de tratamiento de imágenes.

Ejemplo de este sistema es el Barredor Multiespectral de los satélites LANDSAT.

Exploradores de empuje (CCD)

En esta tecnología se elimina el espejo oscilante, gracias a que dispone de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor. Estos detectores se van excitando con el movimiento orbital del satélite, explorando en cada momento una línea completa, desplazándose ésta simultáneamente con la plataforma. Los detectores sólidos que forman un explorador por empuje se denominan dispositivos de acoplamiento por carga (*Charge Couple Devices CCD*). Al eliminar la parte móvil, se aumenta la resolución espacial del sistema respecto a los barredores convencionales. Además, no se requiere que los sensores sean interrogados una vez por píxel, sino sólo una vez por línea, lo que agiliza la detección y emisión de datos.

Ejemplos de este sistema son el Alta Resolución Visible (*High Resolution Visible HRV*) del satélite francés SPOT, y los sensores del hindú IRS-1 y del japonés MOS-1.

Tubos de Vidicon

Se trata de un sistema análogo a la cámara de televisión, que puede trabajar en el rango pancromático o multibanda. La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, construyéndose una réplica electrónica de la imagen original, que se mantiene en esa superficie hasta que el haz de electrones la barre de nuevo, restaurando así su equilibrio. Ejemplo en el LANDSAT-1.

Mapeador Temático (Thematic Mapper TM)

Es un sensor de los satélites LANDSAT, diseñado directamente para la cartografía temática, como su nombre lo indica. Al igual que el antecesor MSS, es un sensor multispectral (7 bandas, una en el IR térmico 10,4 a 12,5 μ m). Las diferencias con el MSS antecesor, es que aumenta el número de detectores de 24 a 100, reduce el IFOV, aumentan los niveles de codificación y realiza el barrido en las 2 direcciones. Con esto se logra mejorar la resolución espacial, pasando de 80 m a 30 m, la espectral de 4 a 7 bandas, y la radiométrica de 6 a 8 bits.

Sensores activos

Radar

Es un radiómetro activo de microondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0,1 cm y 1m. El RADAR (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging, o sea radioteledetección y telemetría) permite obtener información sobre la escena referente a su topografía, rugosidad, cobertura y humedad. Capta la radiación que él mismo genera. Esta característica le permite ver a través de las nubes, la neblina, la lluvia y durante la noche. Debido a su flexibilidad al poder trabajar en cualquier condición atmosférica es cada vez más utilizado.

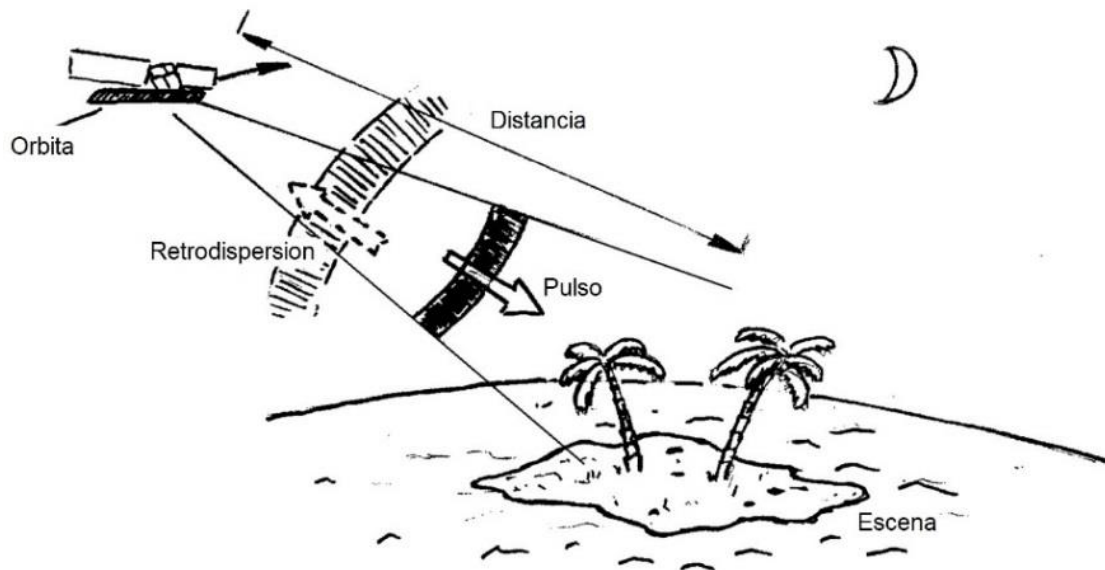
En general, cuanto más larga es la longitud de onda (λ) del radar, mayor será la penetración de la energía dentro del material. La señal de los radares que operan en $\lambda > 2$ cm casi no se deteriora por la presencia de nubes, mientras que la lluvia representa un factor importante para $\lambda < 4$ cm.

Otras diferencias con respecto a los sensores pasivos responden a la inclinación con la que el radar transmite la señal. Al ser la superficie de la Tierra iluminada en forma oblicua, las imágenes permiten identificar mejor las características asociadas a la rugosidad del terreno, además las “sombras” generadas posibilitan distinguir vegetación con distintas alturas o características estructurales, el hielo, los edificios y las estructuras geológicas. Por otro lado la λ del radar permite registrar mejor la humedad del suelo. Son justamente estas diferencias las que permiten potenciar la información proveniente de los sensores remotos, mediante la combinación de imágenes ópticas con imágenes radar (Salgado, 2012).

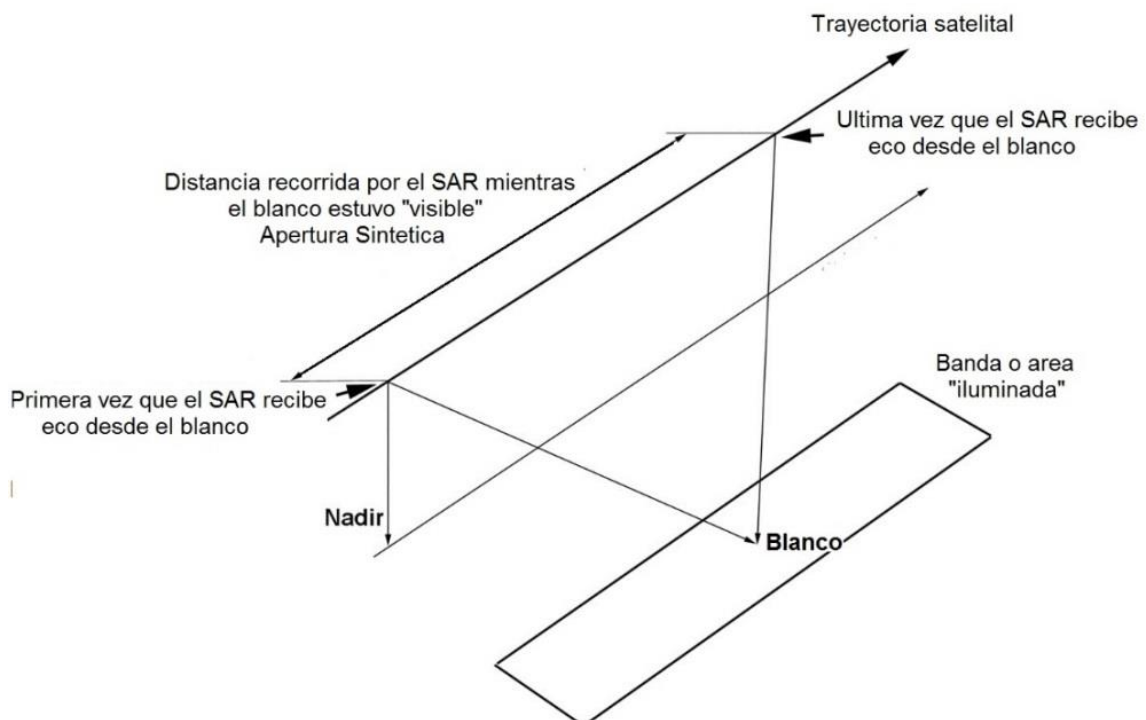
La utilización civil del radar comenzó en la década del 70', tuvo amplio desarrollo en los 90' (con ERS y RADARSAT), y actualmente se agregaron los sistemas COSMO y SAOCOM.

Un sistema de radar se basa en tres acciones (Figura 8.17):

- **Transmite** señales de microondas (radio) hacia una escena
- **Recibe** la porción de la energía transmitida, que es reflejada desde la escena iluminada
- **Mide** la potencia de la señal reflejada (intensidad) y el tiempo necesario para que la señal regrese al sensor (tiempo transcurrido entre emisión y recepción).

Figura 8.17: RADAR

El tipo de radar más utilizado es el **radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* SAR)**. Su principio se basa en el efecto *Doppler*, que afecta la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre objeto y sensor, registrándose los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, de manera que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos (Figura 8.18).

Figura 8.18: Concepto de abertura sintética

Espectro Electromagnético del radar

Los radares trabajan en la porción del espectro electromagnético de las microondas, que tienen frecuencias entre 0,3 y 300 GHz y λ entre 1m - 1mm. La mayoría de los radares de percepción remota operan con señales de λ entre 0,5 cm y 75 cm. La frecuencia de las microondas se clasifica de manera arbitraria en bandas identificadas por letras. Las que se emplean más comúnmente en los radares son:

Banda- X: de 2,4 cm a 3,75 cm (12,5 a 8 GHz), se utiliza en el **COSMO-Skymed**.

Banda- C: de 3,75 a 7,5 cm (14 a 8 GHz), se utiliza en **RADARSAT** y **Sentinel**.

Banda- S: de 7,5 a 15 cm (4 a 2 GHz), utilizada en el **Almaz**.

Banda- L: de 15 a 30 cm (2 a 1 GHz), se utiliza en el **SAOCOM**

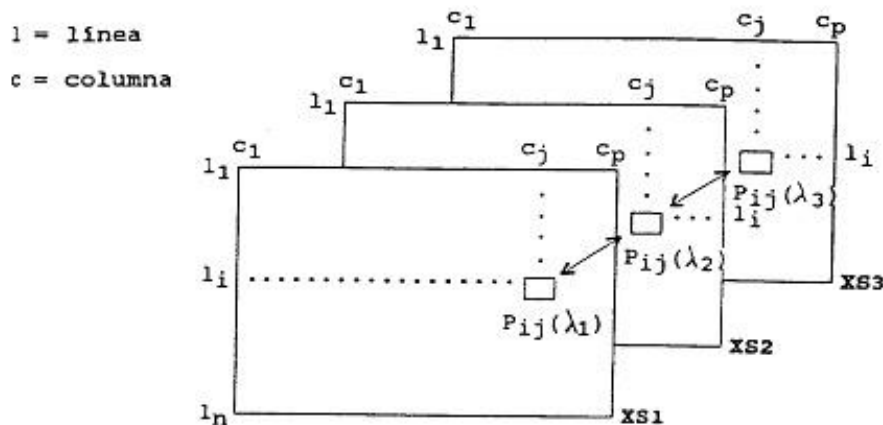
Banda- P: de 30 a 100 cm (1 a 0,3 GHz), utilizada en el **AIRSAR**.

Imagen satelital

Los datos de la escena, captados por los sensores, se ordenan formando una imagen. La imagen digital es una **matriz** (que se almacena en el disco de la computadora) conformada por unidades llamadas **píxeles** que están alineadas en filas y columnas. En un píxel P_{ij} se asocian tres valores:

- su coordenada en línea **i**
- su coordenada en columna **j**
- la medición física realizada por el receptor en ese píxel en un sector de λ dado: **L_{ij}** .

Los sensores que registran esta medición física en varias bandas espectrales son llamados **multiespectrales**. Una imagen multiespectral está constituida de k matrices llamadas **canales o bandas**. Es decir, el eje z contiene la cantidad de bandas y la profundidad de la imagen dependerá de estas bandas. Por ejemplo, una imagen SPOT multiespectral (o en modo XS) posee tres canales llamados XS_k , donde $k = 1,2,3$ (Figura 8.19). El píxel P_{ij} tiene como coordenadas i y j y tres mediciones físicas asociadas XS_{1ij} , XS_{2ij} , XS_{3ij} , llamadas intensidades o valores radiométricos.

Figura 8.19: Imagen multibanda

Las intensidades radiométricas de un canal en bruto son recuentos numéricos que pueden alcanzar valores comprendidos entre dos límites extremos que son en general 0 y 255, permitiendo entonces hasta 256 valores posibles, estos valores están codificados en octetos u 8 bits.

Formato de la imagen

El formato de la imagen se refiere a un conjunto de especificaciones que permiten restituir la imagen. Cada imagen tiene un archivo de cabecera con los datos de la fecha, hora de obtención, sensor, número de píxeles, de líneas, de bit/píxel y de bandas que puede ser vista en el monitor cuando la imagen lleva una cabecera o cuando el archivo con la información numérica lleva asociado otro que contiene la información.

Resolución de una imagen

La resolución se puede definir como la habilidad del sistema sensor para discriminar detalles de un objeto, la resolución la da el conjunto y no cada parte. Se puede hablar de resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral.

La **resolución espacial** se vincula al tamaño del objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen, dado por la dimensión del píxel.

Tabla 8.1: Resolución espacial

Sensor	Pixel
MSS LANDSAT	80 m
TM LANDSAT	30 m
XS HRV SPOT	20 m
PAN HRV SPOT	10 m

La **resolución temporal** hace referencia a la periodicidad, con que el sensor puede adquirir una nueva imagen del mismo punto de la Tierra.

Tabla 8.2: Resolución temporal

SATELITE	METEOSAT	LANDSAT	SPOT
FRECUENCIA	30 minutos	16 días	26 días

Los satélites geoestacionarios meteorológicos tienen una resolución temporal mayor (30 minutos) que los de recursos naturales, pero su resolución espacial es menor. Ganar en una resolución implica perder en otra.

Resolución radiométrica se refiere a la capacidad para discriminar niveles o intensidades de radiancia. Es el rango dinámico, o número de posibles valores que puede tomar cada dato. El ojo humano puede distinguir unos 64 niveles de grises ($6 \text{ bits} = 2^6$); para la interpretación visual alcanza con esa resolución. Por ejemplo, con 8 bits, el rango de valores va de 0 a 255 (o sea, 2^8).

Resolución espectral es la habilidad del sensor de discriminar distintas λ del espectro electromagnético. Por ej., la banda 1 del TM LANDSAT capta la energía reflejada entre 0.45 y 0.52 μm (color azul). Resulta una resolución espectral más fina que la de la banda pancromática del SPOT, cuyo rango va entre 0.51 y 0.73 μm (en espectro visible, desde el azul al rojo). El radar es el que tiene menor resolución espectral, dado que trabaja en 1 sola banda.

Interpretación de imágenes

Se refiere al conjunto de técnicas destinadas a diferenciar, reconocer e identificar objetos o fenómenos en una imagen e interpretar su significado.

En primer lugar, se debe considerar el **objetivo** del trabajo, a los fines de definir parámetros y métodos a emplear. Como ejemplo de posibles objetivos, se pueden nombrar el mapeo de la cobertura del suelo, red de drenaje, identificación de áreas bajo riego, temperatura y composición de cuerpos de agua, mapeo de humedad del suelo, inventario forestal, etc.

La **escala (E)** es uno de primeros parámetros a definir, y está vinculado al objetivo mencionado. Es la relación entre las dimensiones lineales en la imagen y en el terreno.

$$E = \text{Imagen} / \text{Terreno}$$

La **escala (E)** condiciona la unidad mínima de información que debe considerarse en el mapa, denominada **Mínima Unidad Cartografiable (MIC)**. Se recomienda que la MIC no sea inferior a 4 mm² medidos a escala del mapa. De aquí que la escala de trabajo se conecte directamente con el tipo de sensor más idóneo para abordar el mismo. De acuerdo con la Asociación Cartográfica Internacional son:

Tabla 8.3: Escalas límite más idóneas para los distintos sensores

NOAA	AVHRR	1 : 2.000.000
LANDSAT	MSS	1 : 200.000
LANDSAT	TM	1 : 100.000
SPOT	HRV	1 : 50.000

Los **elementos visuales** en los que se basa la interpretación de una imagen son los siguientes:

- **Tono:** se refiere a las diferencias de color o brillo que presentan los objetos. El tono está relacionado con la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. El tono se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, para la banda particular del espectro sobre la que se trabaje.
- **Textura:** se refiere al patrón de variaciones espaciales del tono, depende de la uniformidad espacial de los objetivos de la escena, puede clasificarse en textura fina, media y gruesa. Un objetivo espacialmente uniforme, como un cultivo, tendrá una textura más fina; por el contrario un objetivo espacialmente no uniforme como un bosque, tendrá una textura más gruesa. La textura es uno de los principales elementos en la interpretación de las imágenes radar, en este caso la textura de la escena se multiplica por el moteado o *speckle* (fluctuación estadística asociada con la brillantez de cada píxel en una escena).
- **Color:** se debe a la reflectividad selectiva de los objetos para distintas λ . Aquellas superficies con alta reflectividad en λ cortas, y baja en el resto, aparecen con color azul. A su vez, presentan color rojo si absorben las λ cortas y reflejan las largas. Si el sensor recoge información en las bandas del espectro azul, verde y rojo, puede obtenerse una composición en color natural.
- **Tamaño:** el tamaño absoluto de los objetos es función de la escala de la imagen, sin embargo, el tamaño relativo puede brindar información útil para la interpretación.
- **Forma:** los objetos pueden aparecer como puntos, líneas, polígonos o áreas.
- **Sombras:** las sombras pueden constituir una ayuda o un inconveniente en la interpretación, pueden dar ideas de las diferencias de altura entre los objetos.
- **Contraste:** Es la relación entre áreas claras y oscuras, o bien la relación de tono entre un objeto y los objetos circundantes.
- **Asociación:** la asociación entre los diferentes objetos puede ayudar a la interpretación de la imagen. Finalmente, la interpretación visual se lleva a cabo evaluando todos los parámetros nombrados y comparando las características de los objetos de la escena con **patrones reconocidos** (por ej. de suelos, drenaje, infraestructura, etc.). Es muy importante el **Patrón de drenaje**, que es la forma en que se distribuyen los cauces en una cuenca hidrográfica. Es característico el patrón dendrítico para zonas de relieve quebrado (laderas de montañas, sierras), y el meandroso o meándrico para zonas llanas, planas, con ríos zigzagueantes.

En el siguiente ejemplo se visualiza un sector de una imagen Landsat 8, de diciembre de 2020, que abarca a la zona cercana a la ciudad de Salto, Provincia de Buenos Aires. Se presentan combinaciones de bandas RGB (Red, Green, Blue), utilizadas en función del objetivo del análisis.

Usos agrícolas: combinación de bandas 6, 5, 2. Los campos dedicados a la agricultura se visualizan en una tonalidad verde brillante. Nótese círculos al E de Salto, que corresponden a equipos de riego con pivote central, y un cuerpo de agua superficial (negro), correspondiente a una laguna, al W (Figura 8.20).

Vegetación: combinación de bandas 5, 6, 4 para la detección de vegetación vigorosa o en buen estado de salud, sana, en polígonos (lotes) y círculos (áreas regadas con pivote central), con tonalidades rojas (Figura 8.21).

Zonas urbanas: combinación de bandas 7, 6, 4. Infraestructura urbana en tonos magenta y gris, mientras que las praderas o pastos se representan en tonos verdes claros. Además, se ve en verde oliva a verde brillante las áreas forestales. en general los bosques de coníferas son más oscuros que los de caducifolias (Figura 8.22).

Figura 8.20: Combinación de bandas 6,5,2 para usos agrícolas



Figura 8.21: Combinación de bandas 5,6,4 para vegetación



Figura 8.22: Combinación de bandas 7,6,4 para zonas urbanas

Modelización 3D de la superficie topográfica

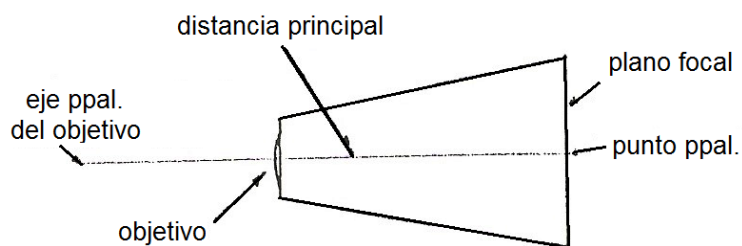
La obtención de la altimetría de la superficie terrestre a partir de información aérea y satelital se ha extendido de manera amplia últimamente, acompañada por el desarrollo científico-tecnológico en el campo espacial, de las comunicaciones, la robótica y la electrónica.

Puede clasificarse la modelización 3D en función de la fuente de datos, a partir de:

- Aerofotogramas.
- Datos satelitales.

Modelización a partir de Aerofotogramas

Son fotografías aéreas tomadas de manera automática por una **cámara métrica**, colocada en la parte ventral del fuselaje de un avión. Esto le confiere características particulares, que las diferencian de otras fotografías tomadas mediante cámaras fotográficas comunes: los fotogramas son imágenes perspectivas, de las cuales se conocen los **parámetros de orientación interna: distancia principal (o focal) y punto principal** (Figura 8.23.).

Figura 8.23: Cámara métrica

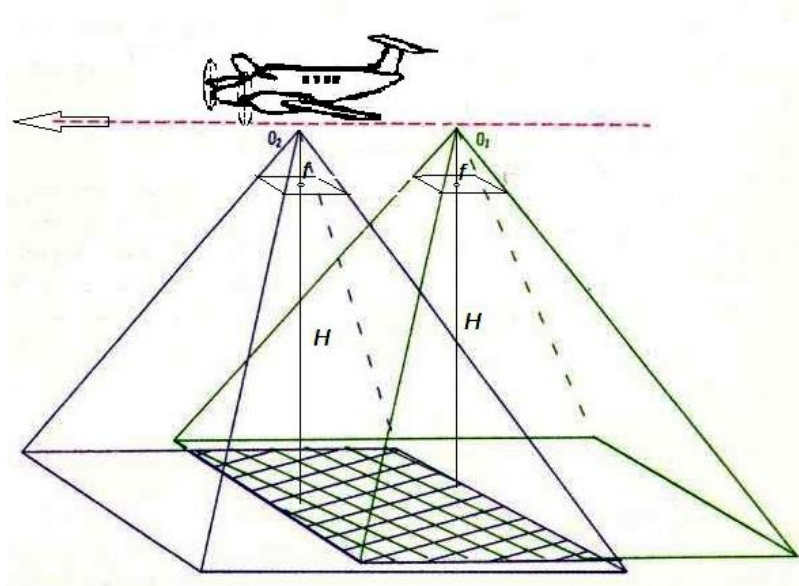
La distancia focal es la distancia entre el plano de la lente objetivo y el plano focal. El punto principal se obtiene en la intersección de las rectas que pasan por las marcas marginales. La distancia principal depende del tipo de cámara, pudiendo clasificarse en base al ángulo de su campo visual (Tabla 8.4)

Tabla 8.4: Tipos de cámaras métricas

ANGULO (°)	FORMATO (cm)	FOCAL (mm)
Normal 70	18 x 18	200
	14 x 14	170
Gran Angular 90	18 x 18	120
	23 x 23	150
Super Gran Angular 120	18 x 18	75
	23 x 23	95

Los fotogramas se obtienen durante el **vuelo fotogramétrico** (Figura 8.24), el cual es previamente planificado a los fines de obtener un recubrimiento total del área, de la manera más eficiente, con la luz (ángulo de altura solar) y la escala apropiadas.

Figura 8.24: Vuelo fotogramétrico

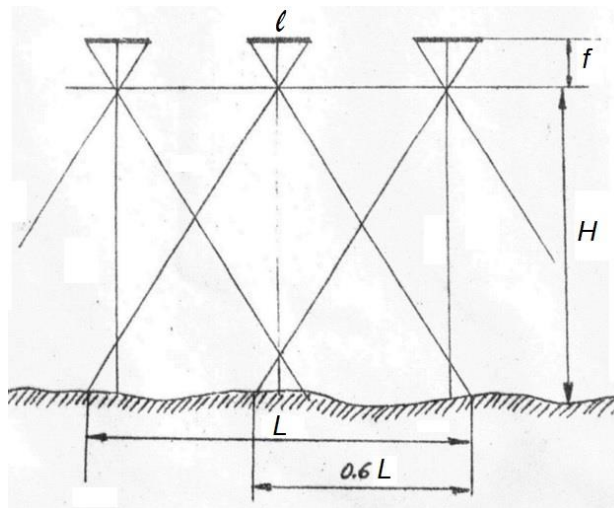


Se calibra el tiempo de toma, de modo que entre fotogramas contiguos exista una superposición longitudinal de aproximadamente 60% (Figura 8.25). También se procura un solapamiento lateral, que oscila entre 15 y 30% entre corridas. La Escala queda definida por la relación entre la distancia focal de la cámara métrica (f) y la altura de vuelo (H).

$$E = \frac{f}{H}$$

El fin de la superposición es lograr una zona en común, donde se puede lograr estereoscopia, lo cual permite tener la sensación visual del relieve.

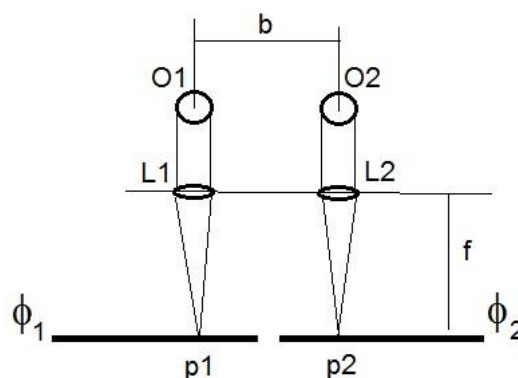
Figura 8.25; Superposicion longitudinal



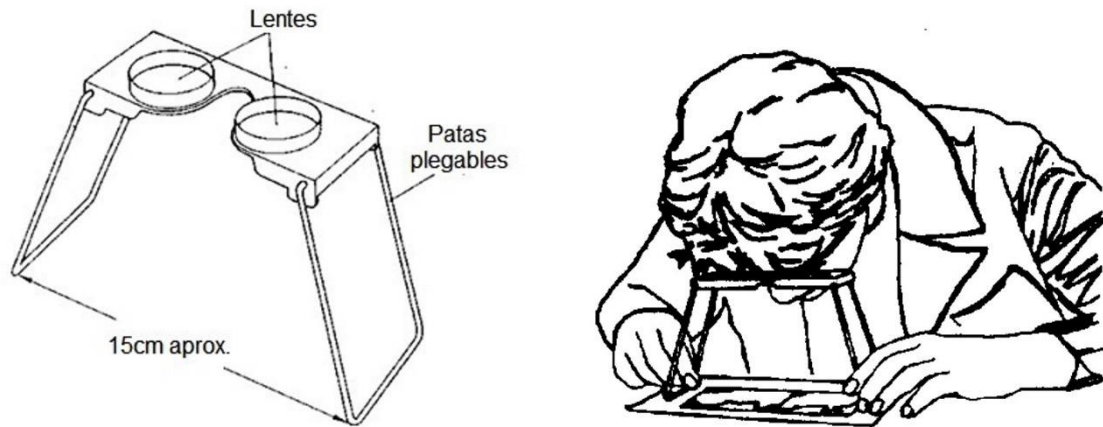
Vision binocular

Se utiliza un estereoscopio simple (de bolsillo) o de *Brewster*, consistente en un par de lupas o lentes (L1 y L2), separadas a la distancia interpupilar (b) de 6,5cm aproximadamente, entre los ojos (O1 y O2) y los fotogramas, ubicados en el plano focal de las lentes, a la distancia "f" (Figura 8.26).

Figura 8.26: Vision de puntos homologos (p1 y p2) con estereoscopio de bolsillo



Se producen imágenes suficientemente alejadas, como para considerarlas en el infinito. Por lo tanto, los haces inciden casi paralelos sobre los ojos, pudiendose acomodar sin mayor esfuerzo debido a la pequeña convergencia, que muestran los rayos homólogos, y así facilitar la observación estereoscópica de la zona de superposición de ambos fotogramas.

Figura 8.27: Vision binocular con estereoscopio de bolsillo

No obstante, su uso está limitado por la base (b), que no permite explorar totalmente el área superpuesta de los fotogramas comunes (de 18 a 23 cm de lado). Por ello se recurre a los estereoscopios de espejos o de *Helmholtz*, que mediante un juego de espejos posibilitan la ampliación de la base de observación, pudiendo así aumentar la visión a toda la zona de superposición longitudinal.

Paralaje

El ser humano observa el espacio que lo rodea en forma binocular, percibiendo con cada ojo una imagen, que difiere ligeramente con la del otro ojo, puesto que ambos ocupan un distinto lugar en el espacio.

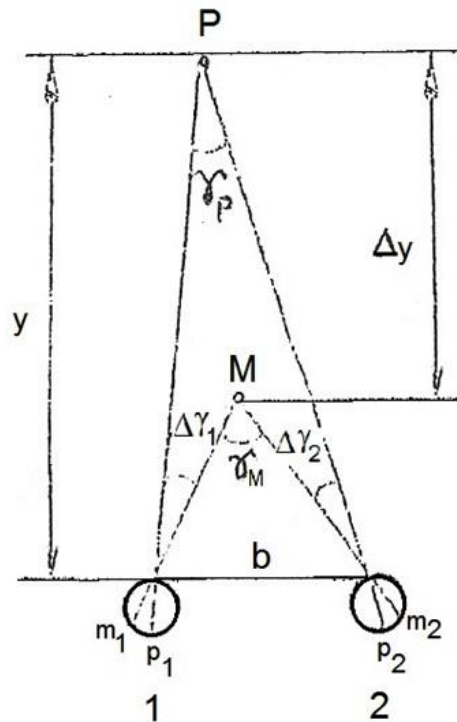
El hombre no tiene conciencia de dos imágenes planas (bidimensionales 2D, por ser obtenidas por un ojo cada una), sino de una sola tridimensional (espacial, 3D). Esto se explica geoméricamente en la Figura 8.28. Sean 2 ojos (1 y 2), separados por la distancia interpupilar "b". el ángulo subtendido desde un punto objeto P hacia ambos ojos se denomina **ángulo paraláctico** γ_P

$$\gamma_P = \frac{b}{y}$$

Diferenciando la expresión anterior.

$$\Delta\gamma = \frac{b}{y^2} \times \Delta y$$

Donde Δy es la diferencia de distancias M-P

Figura 8.28: Angulo paraláctico

Se define **Paralaje angular** de M respecto a P ($\Delta\gamma_{MP}$) como la diferencia entre sus ángulos paralácticos:

$$\Delta\gamma_{MP} = \Delta\gamma_P - \Delta\gamma_M = \Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2$$

Paralaje lineal (p) es la diferencia algebraica entre los arcos MP1 y MP2:

$$p = MP_1 - MP_2$$

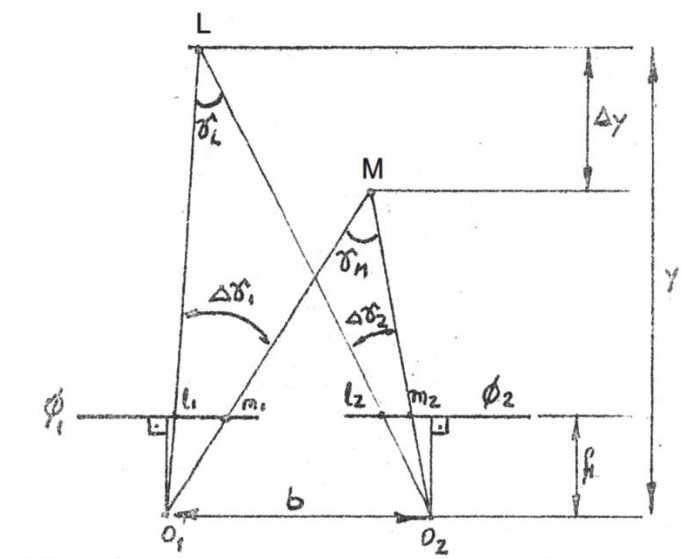
Vision estereoscópica

Se logra cuando los fotogramas cumplen con los requisitos siguientes:

- Reproducir ambos al mismo objeto. Las imágenes de un mismo punto en cada fotograma vecino se llaman puntos homólogos.
- Las perspectivas (fotos) deben obtenerse desde diferentes puntos de vista. Así cada par de puntos homólogos tendrá un determinado valor de paralaje.

Sean 2 puntos L y M (Figura 8.29), con una distancia de fijación “y”. se interponen a una distancia “f” (focal) 2 planos ϕ_1 y ϕ_2 , que representan a los 2 fotogramas. Entre los puntos se produce una **paralaje angular diferencial** $\Delta\gamma$:

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_M - \Delta\gamma_L = \Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2$$

Figura 8.29: Paralaje angular diferencial

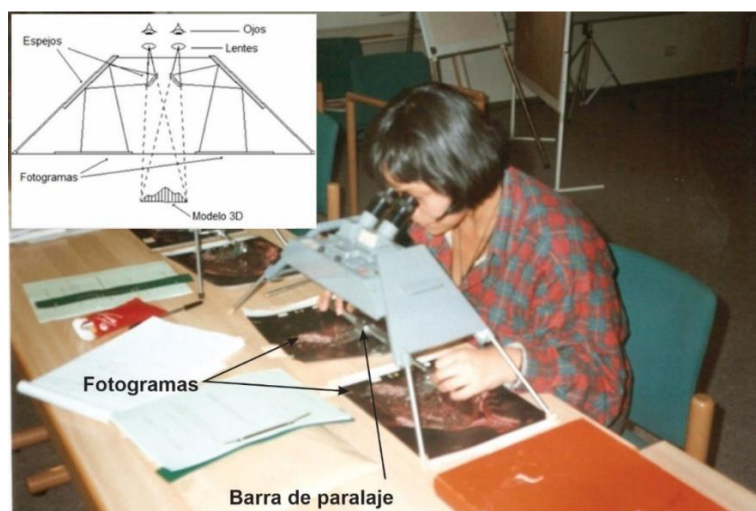
La paralaje $\Delta\gamma$ permite la determinación de la profundidad relativa Δy .

En los planos imagen (fotogramas) ϕ_1 y ϕ_2 se produce una **paralaje lineal diferencial** $\Delta\pi$, dada por los segmentos que en el plano respectivo intersectan $\Delta\gamma_1$ y $\Delta\gamma_2$:

$$\Delta\pi = l_1 m_1 - l_2 m_2$$

$\Delta\pi$ se denomina **paralaje lineal estereoscópica**, y su medición es la base de la determinación de la diferencia de profundidad entre puntos, o sea el relieve.

La paralaje lineal estereoscópica puede medirse con la “**barra de paralaje**”, accesorio del **estereoscopio de espejos** (Figura 8.30).

Figura 8.30: Medición de desnivel con estereoscopio de espejos y barra de paralaje

Modelización del terreno a partir de imágenes

La obtención de altimetría a partir de datos de satélites ha sido un tema en creciente desarrollo en los últimos treinta años desde el lanzamiento del primer satélite civil de teledetección. Se ha generalizado la representación cartográfica del relieve mediante la modelización numérica del mismo (Modelo Numérico del Terreno MNT) y su expresión digital (*Digital Elevation Model DEM*).

Se han desarrollado procedimientos para procesar distintos tipos de datos (fotografías espaciales, sensores VIR, SAR, altímetros), con distintos formatos (analógico, digital) y por distintos métodos (sombras/sombreado; estereoscopia, interferometría, polarimetría) aprovechando las características distintas de los sensores y de las imágenes (geometría, radiometría, fase), aplicando varios tipos de tecnologías (analógica, analítica, digital) y de procesamiento (interactivo, automático).

Los métodos estereoscópicos han sido los más ampliamente difundidos para cartografía, fotogrametría y teledetección. Esto se debió al antecedente de la aerofotogrametría estéreo, tecnología ampliamente desarrollada.

Nuevos procesos de estereoscopia por satélite se han producido a partir de los últimos adelantos en la visión estéreo por computadora, contribuyendo a una mayor automatización del proceso de levantamiento cartográfico.

La estereoscopia a partir de imágenes SAR sufrió un importante impulso en los 80, con el desarrollo de ecuaciones radargramétricas y los primeros resultados interesantes.

Desde el lanzamiento del ERS-1, se extendieron las técnicas interferométricas utilizando modelos paramétricos anteriormente desarrollados. Con la incorporación del RADARSAT-1 en 1995, la radargrametría se consolidó a través de diferentes metodologías de aplicación altimétrica, empleándola sola o complementada con imágenes VIR (Toutin & Gray, 2000).

Métodos estereoscópicos

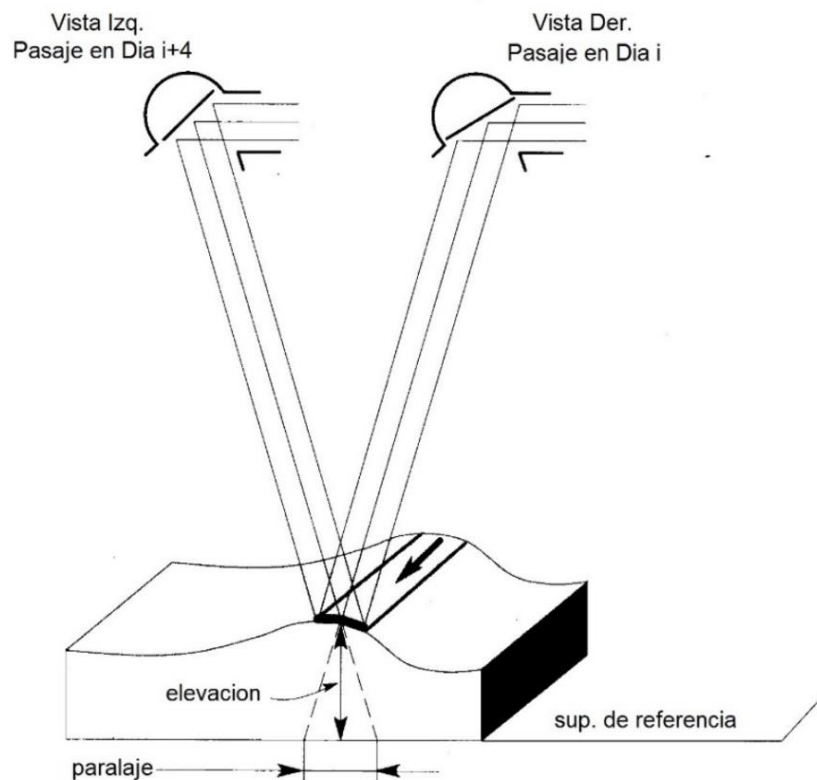
Son procedimientos similares a los usados en aerofotogrametría, en los cuales son utilizadas 2 imágenes para la construcción del modelo tridimensional.

Se utiliza un estereoplotter digital, que permite coleccionar puntos (o curvas de nivel) usando 2 marcas flotantes (una para cada para estereoscopia), las cuales se ven fusionadas para obtener coordenadas cartográficas 3D (Toutin & Gray, 2000).

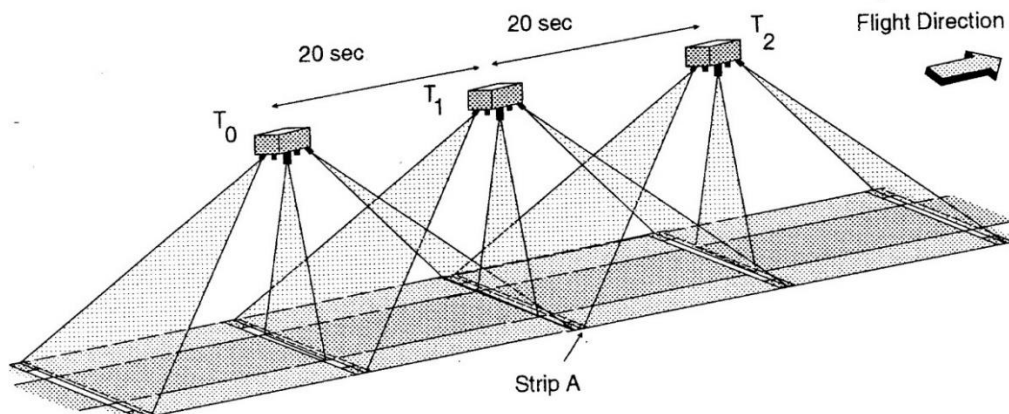
El proceso del par estereoscópico requiere la utilización de restituidores analíticos y software específico. En la actualidad existen equipos compactos, basados en computadoras PC, que permiten la restitución estéreo de diferentes tipos de imágenes digitales (aéreas, espaciales, VIR, SAR).

Existe una variedad de combinaciones para captar las 2 imágenes, las cuales pueden ser obtenidas en pasadas con sentido igual o contrario, diversos ángulos de incidencia, etc.

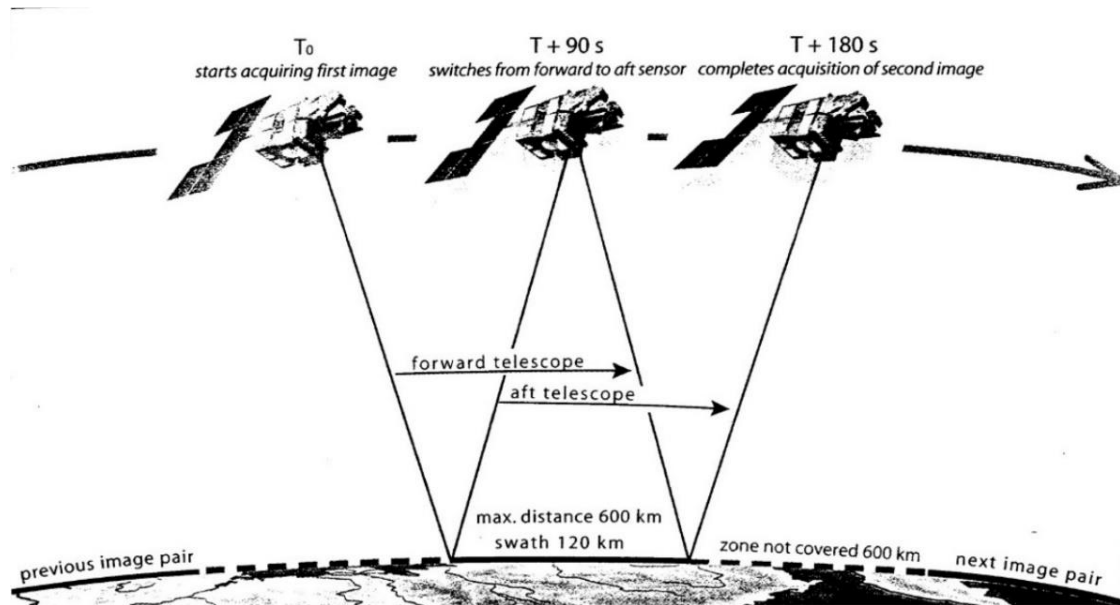
El sistema tradicional HRV-SPOT tiene un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico, que le facilita la observación de la misma zona en pasadas sucesivas (Figura 8.31).

Figura 8.31: Geometría estéreo HRV SPOT

El sistema MOMS-02 permite la captura de imágenes en la misma pasada, mediante cámaras direccionadas hacia delante, hacia atrás y nadirales. Las imágenes consecutivas se toman a intervalos de 20 segundos, desde 3 diferentes puntos de vista (Figura 8.32).

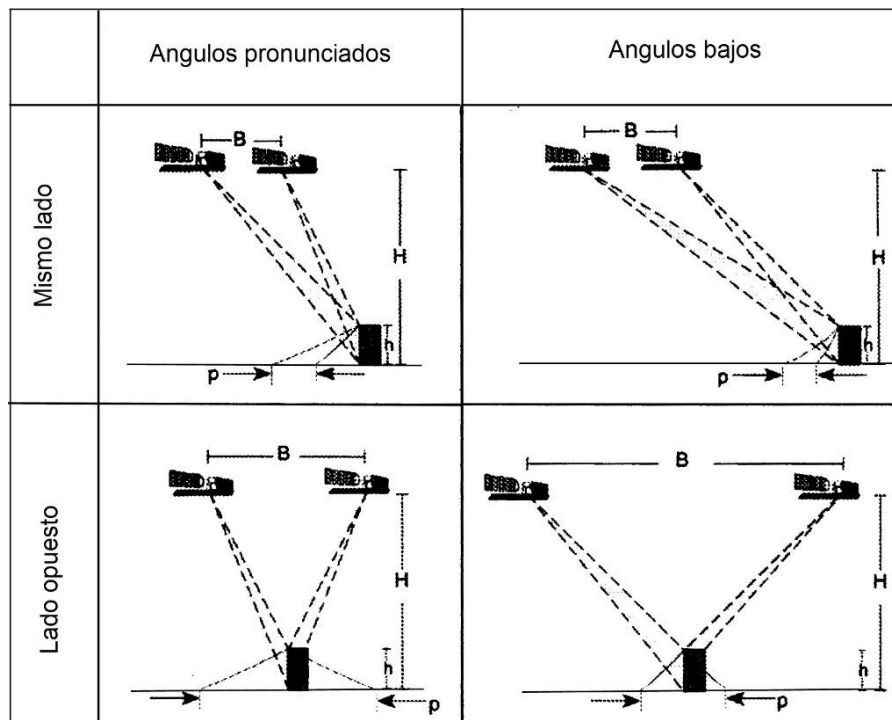
Figura 8.32: Geometría estéreo MOMS-02

Otro ejemplo es el nuevo instrumento HRS (*High Resolution Stereoscopic*) del SPOT-5, que tiene 2 telescopios direccionados hacia delante y hacia atrás en la dirección de la trayectoria orbital. El telescopio apuntado hacia adelante captura imágenes con un ángulo de respecto al nadir. Noventa minutos después, el telescopio direccionado hacia atrás adquiere la misma zona con un ángulo de 20° respecto al nadir (Figura 8.33).

Figura 8.33: Geometría estéreo HRS SPOT-5

Radargrametría

La radargrametría es una técnica análoga a la fotogrametría, que usa imágenes obtenidas a partir de los valores de amplitud de la señal radar. Se emplean un par de imágenes, utilizando la correlación para generar un MNT. Debe notarse que el ángulo de incidencia es complementario del correspondiente a una imagen óptica. La precisión absoluta es del orden del tamaño del pixel. Al igual que en la estereoscopia, existen diversas configuraciones posibles (Figura 8.34).

Figura 8.34: Configuraciones alternativas, en función de los ángulos de incidencia y de la posición relativa de las tomas (Toutin & Gray, 2000).

Interferometría

Con la información de fase de la señal radar, se puede generar un canal de diferencia de fase y un canal de coherencia de fase (desfasaje constante), los cuales sirven para ponderar la información del interferograma.

Se requieren 2 escenas tomadas en 2 pasadas cercanas del satélite, a una distancia llamada “base”. La base debe ser inferior a un valor máximo, dependiente de la frecuencia (de la onda electromagnética) e inferior a 0,5-1 km. Las condiciones ambientales (viento, lluvia, etc.) de la escena deben ser lo más idénticas posible para las 2 oportunidades de captura.

Una de las escenas (primaria) se toma como referencia en los cálculos. La otra (secundaria) se utiliza para calcular, junto con la primaria, un canal de diferencia de fase (llamado interferograma) y uno de coherencia, indicador del grado de confiabilidad de las medidas de fase. Luego deben desarrollarse las fases, adoptando una resolución y transformando las franjas del interferograma en curvas de nivel.

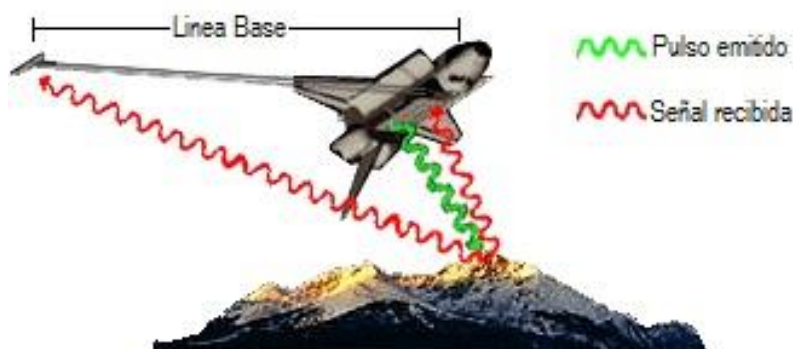
Aun cuando este método puede brindar resultados muy precisos, deben resolverse unos problemas inherentes al mismo:

- La medida es ambigua, dado que se conoce la diferencia de fase con precisión, pero no la cantidad de longitudes de onda completas en la distancia radar-blanco.
- La fase depende de las características radio eléctricas del blanco. Si ellas se modifican entre una escena y la otra no habrá coherencia. Por otro lado, si se pueden construir correctamente las franjas del interferograma significa que el blanco ha permanecido inalterable.

Un ejemplo de uso de esta tecnología ha sido la Misión Topográfica del Taxi o Transbordador Espacial (Shuttle Radar Topography Mission - **SRTM**), mediante la cual se obtuvieron datos topográficos de la Tierra y se contribuyó a la definición del Geoide.

Se requirieron 2 imágenes radar de la misma zona tomadas desde 2 posiciones cercanas en el espacio. El cálculo de la altitud (o el cambio de elevación) de los puntos terrestres es posible gracias a las diferencias entre esas 2 imágenes. Para conseguir las dos imágenes radar tomadas desde posiciones diferentes, el equipamiento SRTM consistió en una antena radar en la bodega del transbordador y una segunda antena radar conectada al extremo de un mástil extendido a 60 metros afuera del transbordador.

Figura 8.35: Geometría de la Interferometría SRTM

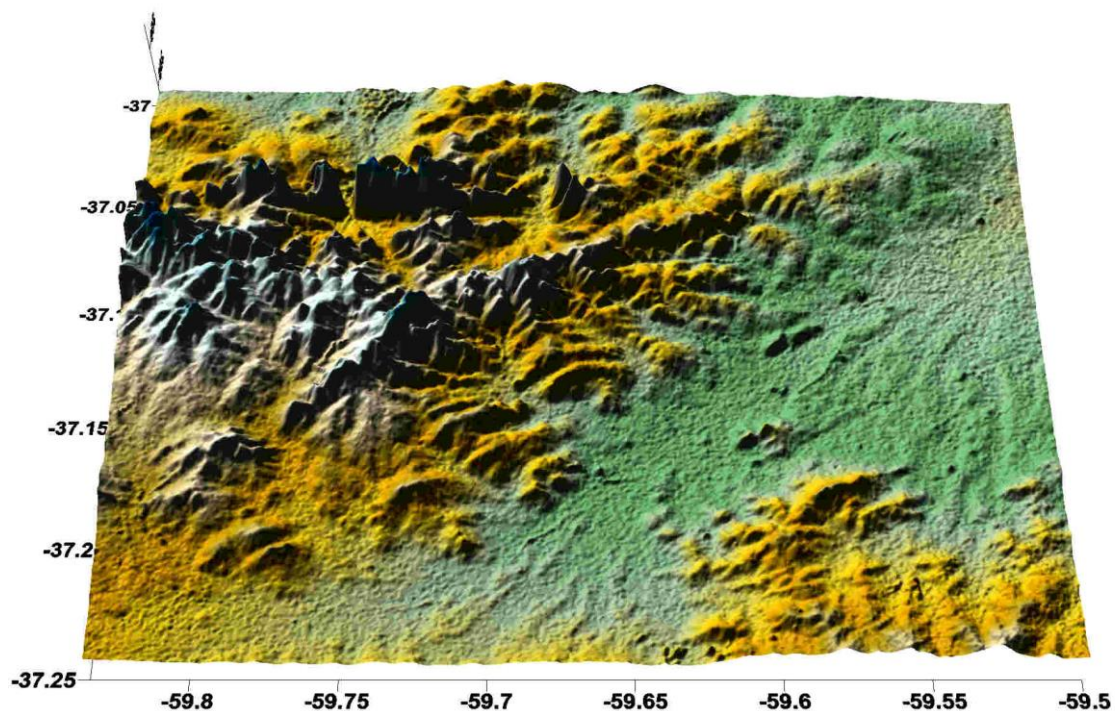


La interferometría se basa en el estudio de los patrones de interferencia originados al combinar dos juegos de señales del radar. Cuando se combinan dos conjuntos de datos radar interferométricos, el producto es un **interferograma** (también llamado mapa de franjas), cuyo aspecto es similar a esas bandas de color que se ven en una película de aceite. En efecto, al ver un charco de agua con una película de aceite en él, probablemente se perciben bandas de color en la superficie. Estas bandas de color son causadas por rayos de luz que rebotan afuera de las superficies lisas del aceite y del agua subyacente, generando patrones de interferencia.

SRTM fue una misión de Interferometría de base fija. Esto significa que dos juegos de datos radar fueron captados al mismo tiempo y que las antenas que coleccionaron los datos estaban separadas por una distancia constante, y que se conoce con precisión. Lo que cambia es la distancia a la superficie de la Tierra desde las dos antenas. Dentro del haz radar reflejado, el punto que representa donde la reflexión ocurrió fue ligeramente diferente entre la antena principal y la externa. Usando la información sobre la distancia entre las dos antenas y las diferencias en las señales de onda de radar reflejadas, puede calcularse la elevación exacta de la superficie de la Tierra.

La SRTM produjo datos topográficos digitales del 80% de la superficie de la Tierra (entre latitudes 60°N y 56°S), con puntos distribuidos en grilla latitud/longitud cada 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros). La precisión vertical absoluta de los datos de cotas es de 16 m (con nivel de confianza del 90%). Los datos están disponibles a través de la Internet. Por ejemplo, puede verse en Figura 8.36 un sector del MNT, correspondiente a una zona serrana del Partido de Azul, Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Figura 8.36: Sierras del Tandil, Provincia de Buenos Aires (Salgado, 2012)



Utilización de documentos cartográficos basados en imágenes

En las últimas décadas se ha investigado y difundido el gran potencial de las imágenes satelitales, tanto en el dominio óptico como de microondas, para la actualización de cartografía. De acuerdo a la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS), los requerimientos para el mapeo a partir de imágenes espaciales, se puede dividir en 3 categorías:

- Precisión planimétrica
- Precisión en la determinación de cota (altitud)
- Detectabilidad (Konecny, 1990).

La **precisión planimétrica** está vinculada con la resolución cartográfica de $\pm 0,2$ mm, lo cual conduce a requerimientos para las escalas (1/D) más frecuentes (Tabla 8.5):

Tabla 8.5: Precisión planimétrica

D	Precisión planimétrica
25.000	± 5 m
50.000	± 10 m
100.000	± 20 m
200.000	± 40 m

El requerimiento de **precisión altimétrica (h)**, considerando que la equidistancia (e) (contour interval) $e = \pm 5$ h, se muestra en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6: Precisión altimétrica (Konecny, 1990)

E	h
20 m	± 4 m
50 m	± 10 m
100 m	± 20 m

La **detectabilidad** se refiere a la posibilidad de detectar objetos a partir de la interpretación digital de las imágenes. Para ello se requiere que el objeto abarque por lo menos 1,5 píxeles, lo cual conduce a las siguientes dimensiones mínimas de objetos (Tabla 8.7).

Tabla 8.7: Detectabilidad (Konecny, 1990)

Objeto	Dimensión
Construcciones urbanas	2 m
Caminos rurales	2 m
Red de drenaje (ríos)	5 m
Red carretera	10 m

Teniendo en consideración los sistemas satelitales comerciales y las escalas cartográficas más comunes, se puede establecer la Tabla 8.8.

Tabla 8.8: Escalas comunes para los distintos sistemas satelitales comerciales

Sensor	Resolución en tierra (ground resolution)	Escala de carta
IKONOS	1 – 4 m	1/5.000 – 1/20.000
SPOT PAN	10 m	1/50.000
Landsat 7 ETM	15 m	1/75.000
SPOT XS	20 m	1/100.000 – 1/50.000
RADARSAT 1 SAR	8 – 30 m	1/50.000 – 1/100.000
ERS SAR	30 m	1/100.000
Landsat TM	30 m	1/100.000
Landsat MSS	80 m	1/250.000

Referencias

- Burrough, P.A. (1986). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Monographs on soils and resources survey. N° 12. Oxford University, New York, USA, 194pp.
- Chuvieco E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Editorial RIALP, Madrid, España, 2° Edición. 453 pp.
- Konecny, G. (1990) Photogrammetric and cartographic aspects of Geographic Information Systems. GIS. Geo-Information-Systeme. 1990, Vol 3, Num 1, pp 1-2, 2 pp.
- Salgado H, (2012). Humedad del suelo en cuencas hídricas. Aplicación de herramientas geomáticas y modelización hidrológica. Editorial Académica Española (EAE), ISBN:978-3-659-04891-3, AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany, 176 pp.
- Swain P.H. & S.M. Davis (1978). Remote sensing: The quantitative approach. Mc Graw-Hill Int. Book Company.
- Toutin, T. & L. Gray, (2000). State of the Art of elevation extraction from satellite SAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 55 (2000), p.13-33.
- Von Martin, A.; Bragachini, M.; Bianchini, A., (2001). Sistemas de posicionamiento. EEA INTA Manfredi, Córdoba.