

# SENSORES REMOTOS 2013

**Dr. Raúl Rivas**

Comisión de Investigaciones Científicas  
Instituto de Hidrología de Llanuras

Curso de Sensores Remotos facultad de Ciencias Exactas de la UNCPBA

[http://cursosihlla.bdh.org.ar/SR\\_Exactas/](http://cursosihlla.bdh.org.ar/SR_Exactas/)

# Definición de teledetección

Es el conjunto de conocimientos y técnicas utilizadas para determinar las características físicas y biológicas de los objetos a partir de mediciones realizadas a distancia, sin contacto con el objeto. Pueden ser detectadas por un avión o un satélite.



Al mirar por la ventana del aula usted puede detectar a distancia las condiciones climáticas y puede decidir cómo debe salir. En la vida cotidiana cada persona está involucrada en eventos que representan a la teledetección. Utilizó sus ojos para adquirir datos y su sistema cognitivo visual para procesar los datos, y emitir una decisión de leer y / o volver a esto más adelante en el día.

# Definición desde el punto de vista físico

Es el medio de conocer un objeto, o conjunto de objetos distribuidos espacialmente en función de:

- i) un conjunto de señales electromagnéticas en distintas bandas de diferentes longitudes de onda
- ii) la evolución de la señal electromagnética en el tiempo (día, estación, año...)
- iii) la repartición de los objetos en el espacio geográfico
- iv) la relación temporal de los objetos con otros de diferente naturaleza

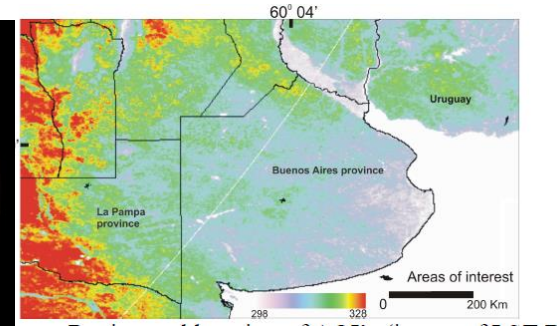


Amsterdam, Netherlands, sensor ASTER, misión TERRA.

Fuente: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/targetFamily/Earth>

# Sensores remotos

- Para la mayoría de la gente los sensores remotos son una forma diferente de ver el mundo. Las imágenes captadas permiten ver el mundo y un detalle de éste. Se pueden ver los bosques y también los árboles que lo componen. Esto nos facilita ver diferentes escalas y buscar en las imágenes diferentes patrones espaciales, procesos y cambios. La información que brindan las imágenes es amplia si se considera todo el espectro electromagnético.



Temperatura de la superficie (sensor MODIS)



Plantación en el sudoeste de Tandil, Argentina (sensor AVHR )

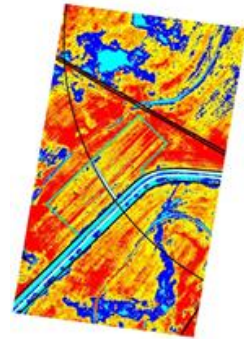
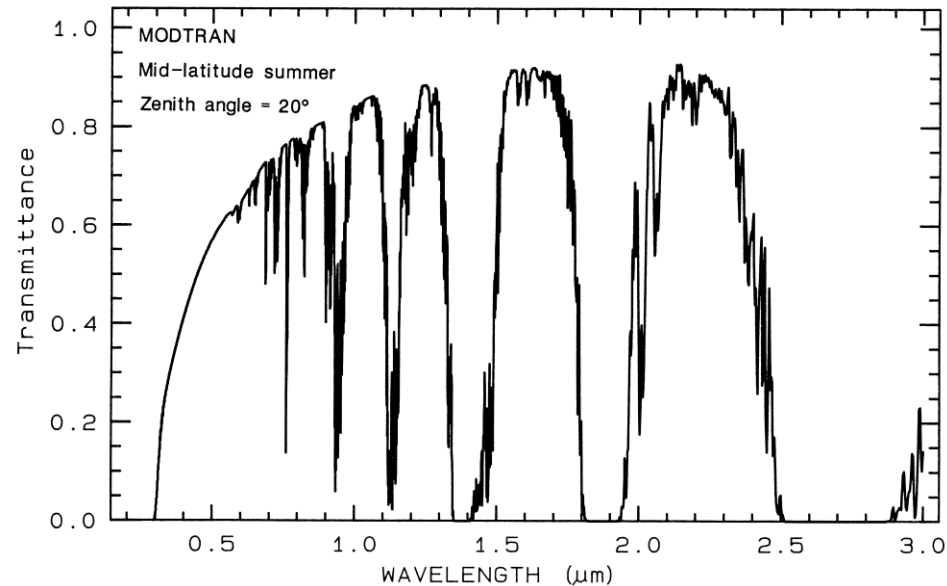


Imagen de NDVI obtenida con cámara sobre UAV, Uruguay (Tetracam )

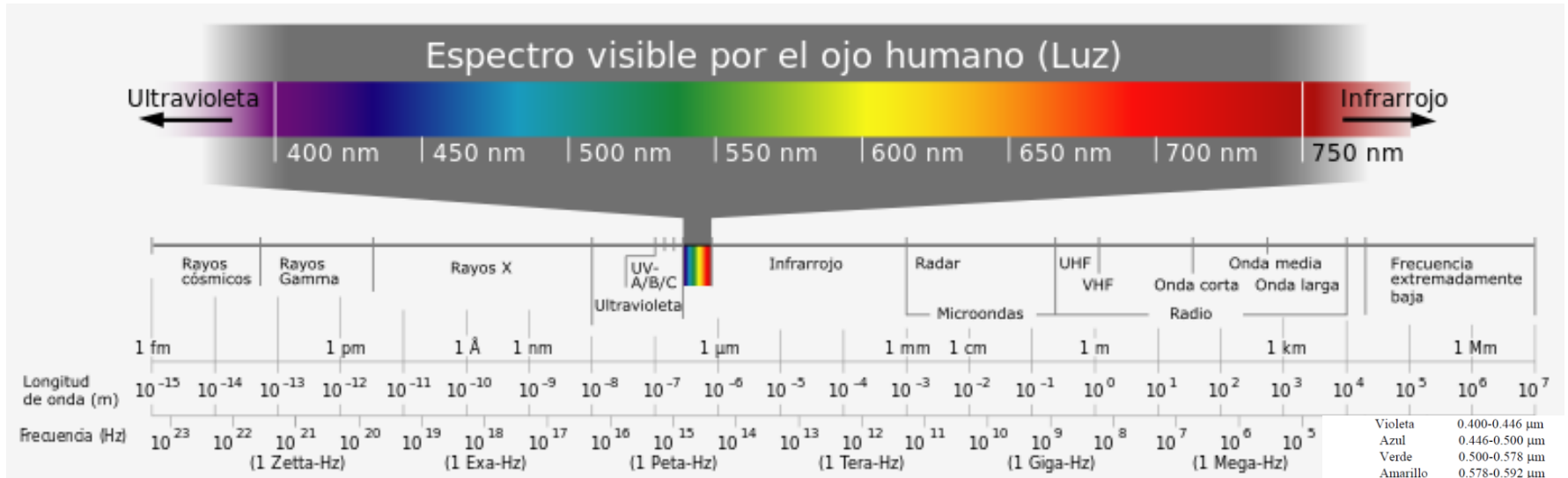
# Transmisión de la atmósfera

Si nos limitamos a la teleobservación de la radiación electromagnética [como veremos en este curso 2013] en todo el sector del espectro, incluso el que no ven nuestros ojos, se puede lograr información mucha información. La teleobservación se logra gracias a ventanas atmosféricas donde la atmósfera es transparente (ver figura de la derecha). Los sensores a bordo de los satélites miden en los sectores en que la transmisión es máxima. Las bandas de los sensores multispectrales se ubican en las ventanas de transmisión.



Tomado del programa Modtran (para una atmósfera de latitud media de verano).

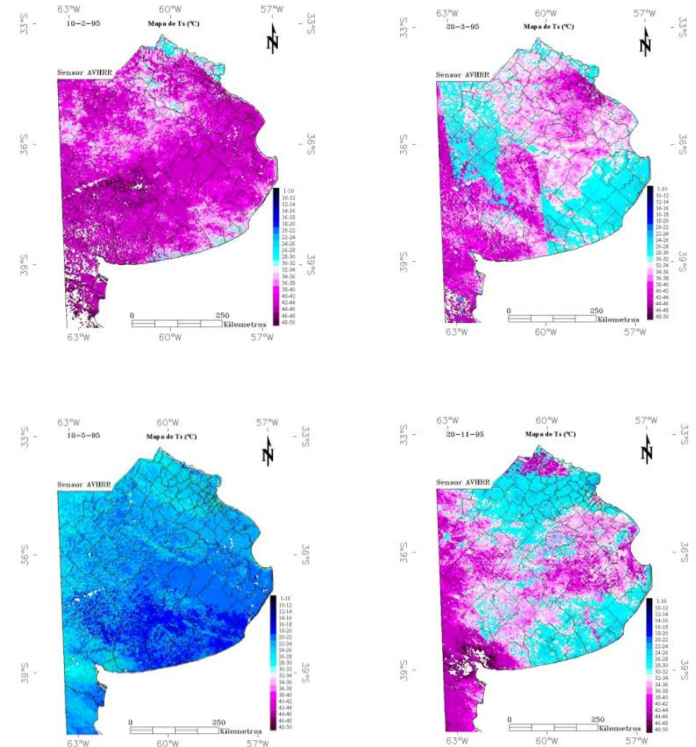
# Espectro electromagnético





# Uso de las ventanas atmosféricas

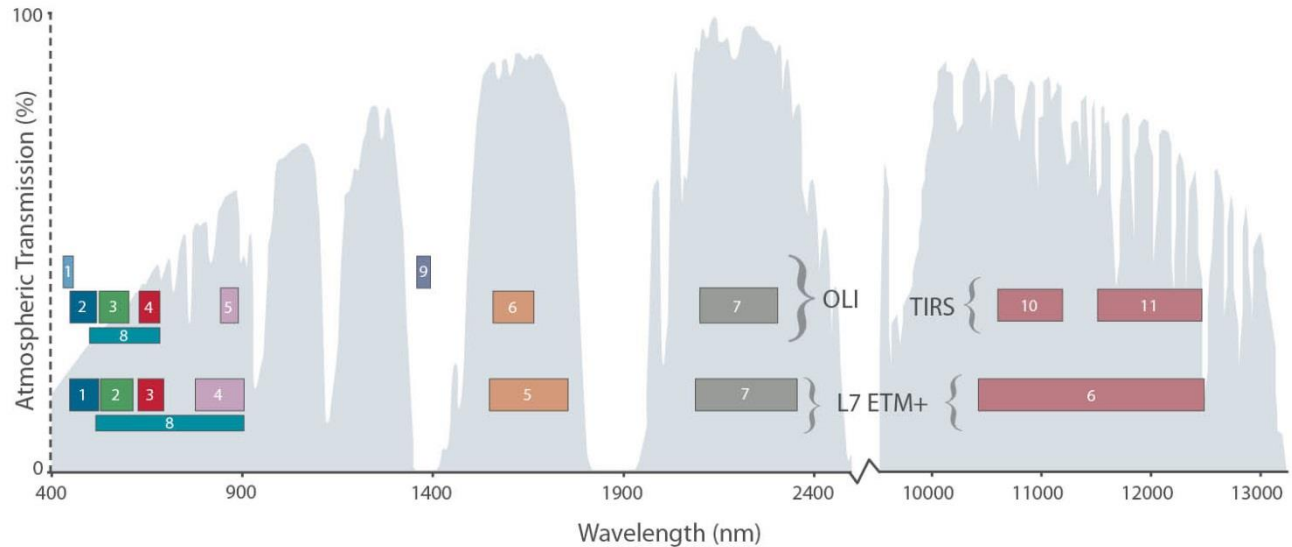
El uso de ventanas atmosféricas en el espectro solar y térmico permite observar el estrés de la vegetación, la temperatura, el contenido de agua de la atmósfera y otros parámetros que nuestro sistema visual no podría ver. Entonces, los sensores a bordo de los satélites permiten tener una perspectiva general de grandes áreas y su seguimiento en el tiempo (actualmente se dispone de series de tiempo desde la década de 1970 a la actualidad).



Temperatura de la superficie en la provincia de Buenos Aires.

# Bandas en ventanas de transmisión

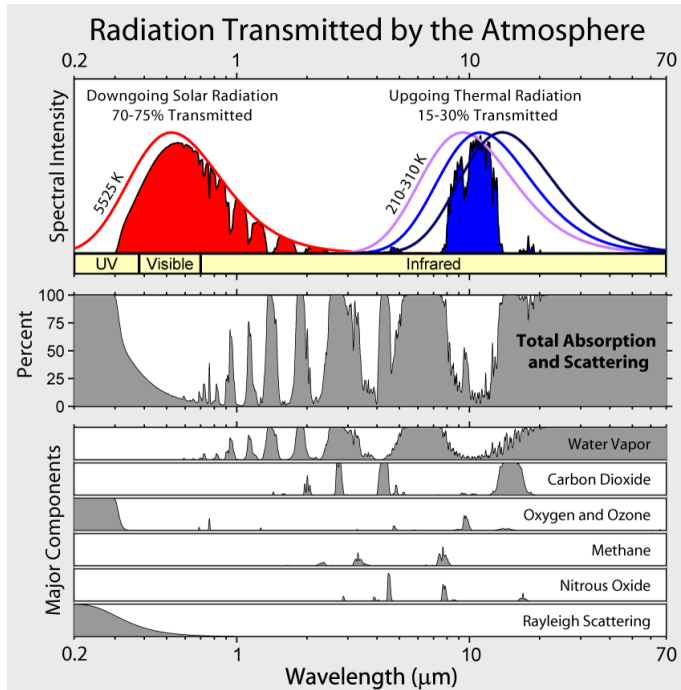
La tecnología actual permite construir sensores que captan información (con diferente resolución radiométrica) de superficie en bandas ubicadas en las diferentes ventanas de transmisión.



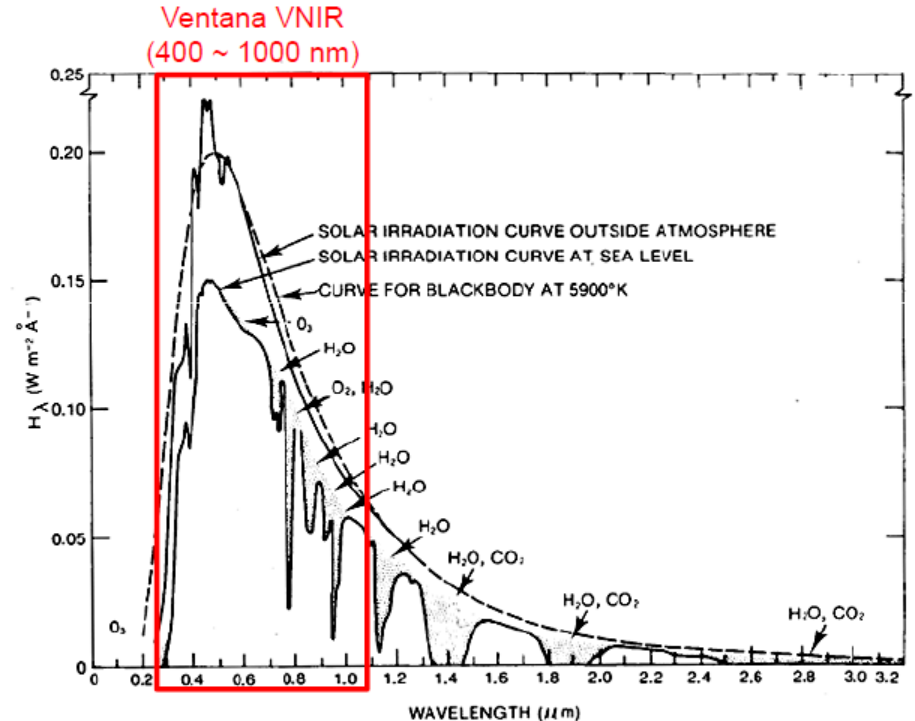
Bandas de LANDSAT 7 y 8\* (LDCM) sensores (ETM+, OLI/TIRS). \*Lanzado en febrero de 2013.



# Transmisión en el espectro solar y térmico



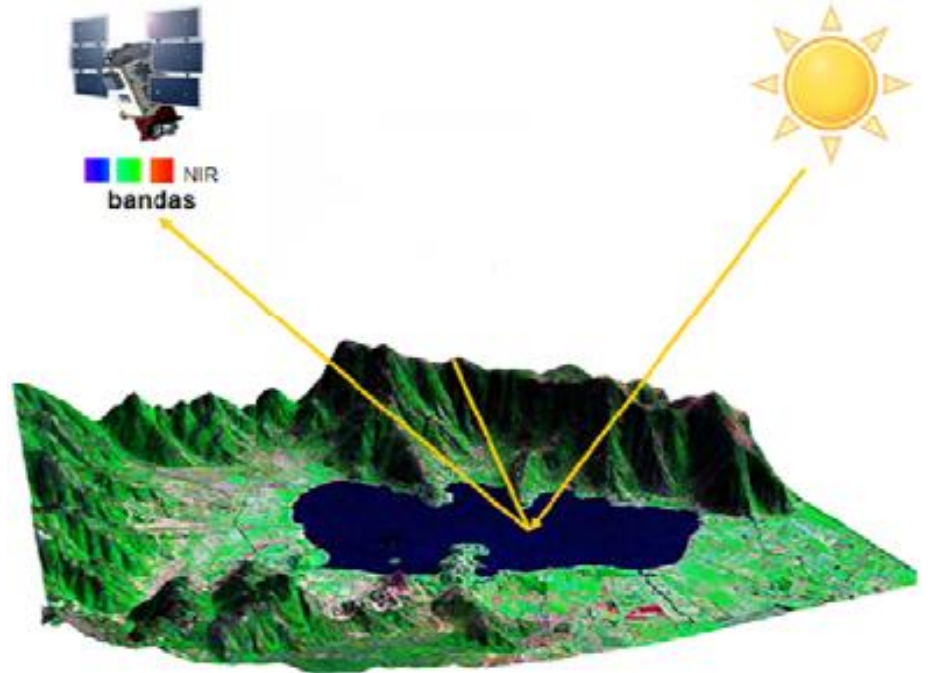
Efectos de los principales componentes de la atmósfera.



Transferencia radiativa al tope de la atmósfera, a nivel del mar y cuerpo negro (5900 K).

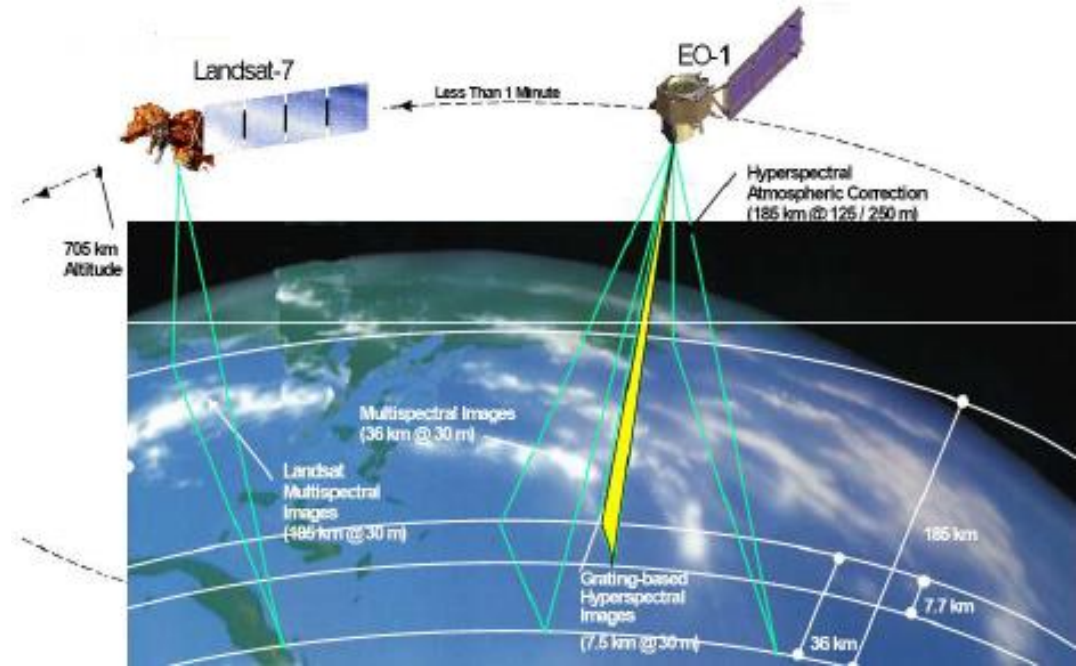
# Captura de una imagen

Diferentes satélites que operan en el espectro solar y térmico. Landsat 7 es un satélite 8 bandas del espectro y EO1 opera en múltiples bandas. Ver videos MODIS.



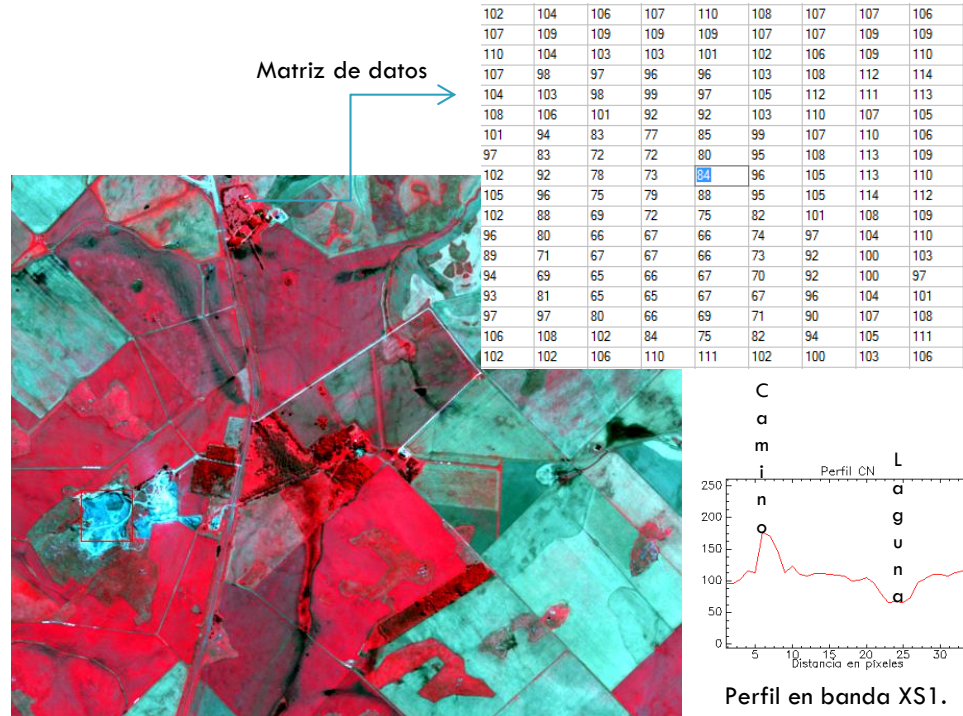
# Captura de una imagen

Diferentes satélites que operan en el espectro solar y térmico. Landsat 7 es un satélite 8 bandas del espectro y EO1 opera en múltiples bandas. Ver videos MODIS.



# Campo espectral de trabajo

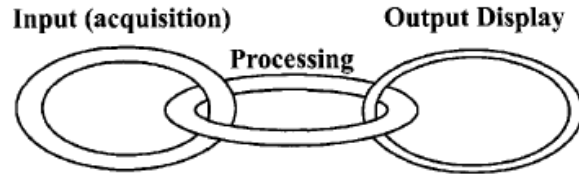
El curso se restringe al uso de sensores pasivos a bordo de diferentes misiones de satélite actuales y pasadas. La región espectral en la que se trabajará esta comprendida entre  $0,4$  y  $15\mu\text{m}$ . Dentro de este ámbito, vamos para poner un fuerte énfasis en el análisis cuantitativo de la imagen digital, en particular el procesamiento para la identificación de objetos y análisis radiométrico para la evaluación del estado de los sistemas naturales.



Composición falso color compuesto (XS3, XS2, XS1) SPOT 5 (área de Chillar, provincia de Buenos Aires, setiembre de 2012).

# Esquema de la cadena de Schott

## Simplified Image Chain



Any improvement in the weakest links directly affects the whole chain.

Making a strong link stronger seldom improves the chain.



The chain can be quite complex, and what appears to be a weak link is often just a part of a compound link.

El enfoque del curso será tratar de definir (en la mayoría de los casos cuantitativamente) las conexiones en la cadena de la imagen. Este enfoque sirve para varios propósitos. En primer lugar, y fundamentalmente, al caracterizar completamente la cadena de imágenes de extremo a extremo, aseguramos una comprensión del proceso. El enfoque de cadena de imagen nos permite analizar las cuestiones de proceso y dirección relacionados con lo que tenemos, qué información podemos extraer de los datos y (a menudo como útiles) la información no está disponible a partir de datos sino desde el conocimiento del proceso. A partir de un conjunto de imágenes se puede modelar cuantitativamente.



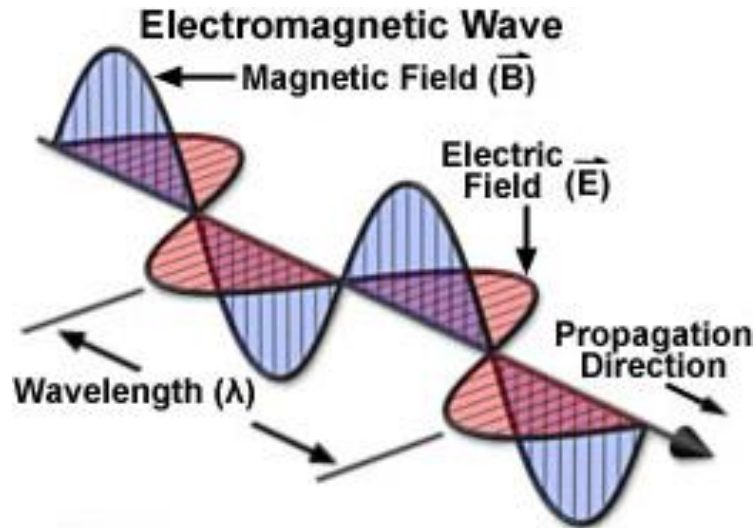
## Onda electromagnética

Conceptos físicos básicos de interés en teledetección



# Onda electromagnética

Los dos parámetros relevantes son la velocidad de propagación y la longitud de onda.



Toda onda electromagnética de un cierto ancho de longitud de onda (policromática) puede descomponerse en una superposición de ondas monocromáticas de diferentes frecuencias.

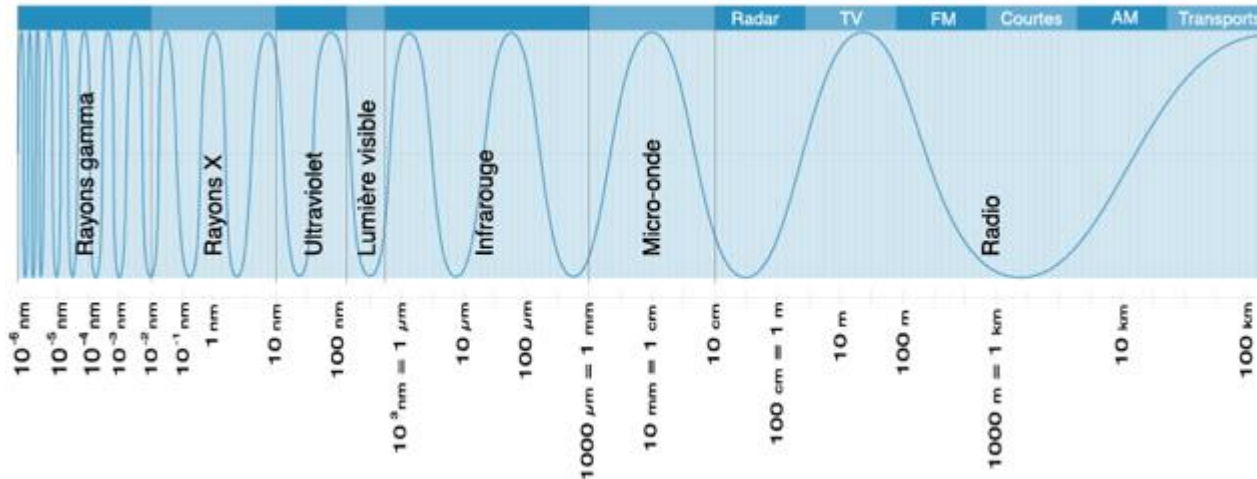
- Una onda electromagnética es un ensamble de dos vectores ortogonales indisolubles que se propagan en el espacio y que la amplitud varía periódicamente (sinusoidal) con el tiempo:
- Campo eléctrico  $\vec{E}$
- Campo magnético  $\vec{B}$
- Las vibraciones del campo eléctrico y del campo magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.



# Onda electromagnética

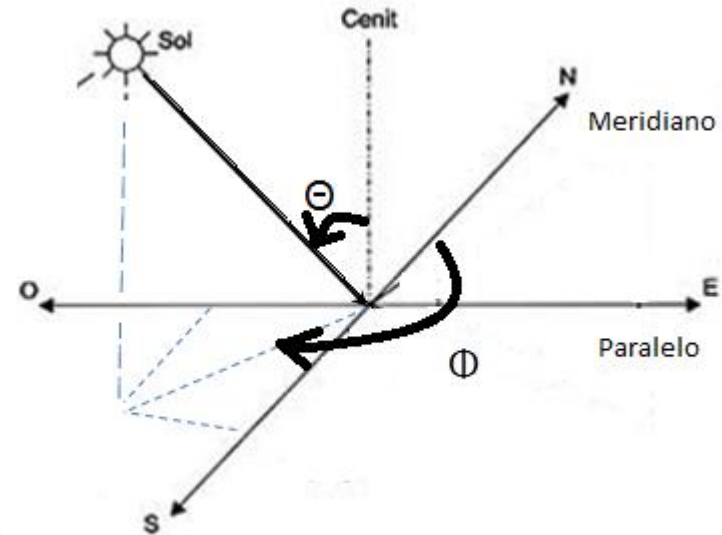
## Recordatorio

- Una onda que vibra en una sola frecuencia (oscilaciones en una única longitud de onda) es una onda denominada **monocromática**.
- Las fuentes naturales emiten en una amplia gama de **longitudes de onda**, así tiene espectros amplios y son constituidos de una superposición de ondas monocromáticas.
- En función de la longitud de onda las ondas electromagnéticas tienen nombres diferentes.



# Definiciones radiométricas de interés

- Los ángulos cenital y azimutal permiten definir la posición del sol y del satélite. El ángulo cenital ( $\Theta$ ) queda definido entre el cenit y la dirección de observación y el ángulo azimutal ( $\Phi$ ) entre la dirección del norte y la proyección de la dirección observada a la superficie de la tierra.
- $\Theta$  varía entre 0 y 90 grados ( $0-\pi/2$ )
- $\Phi$  varía entre 0 y 360 grados ( $0-2\pi$ )



$\Theta$  en el plano vertical  
 $\Phi$  en el plano horizontal

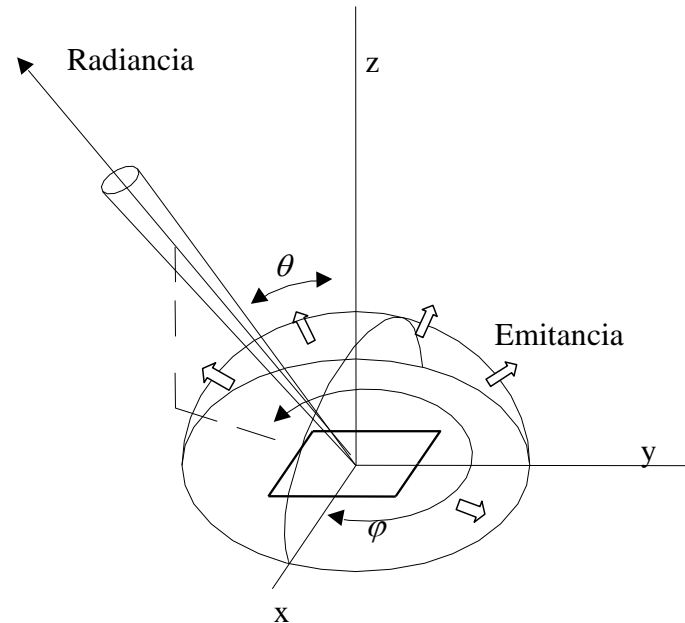
# Conceptos físicos de interés

- Energía radiante (Q): energía transmitida en forma de REM (Joule, J)
- Flujo radiante ( $\phi$ ): energía radiante transmitida por unidad de tiempo:

$$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \text{ (watt, W)}$$

- Densidad de flujo radiante: flujo radiante por unidad de superficie; al flujo emitido se le llama **EMITANCIA** o **EXCITANCIA (M)**, y al incidente **IRRADIANCIA (E)**

$$E = M = \frac{\partial \phi}{\partial A} \text{ (W/m}^2\text{)}$$



# Conceptos de interés

Dado el **carácter direccional** de los procesos radiativos, se introducen nuevas magnitudes:

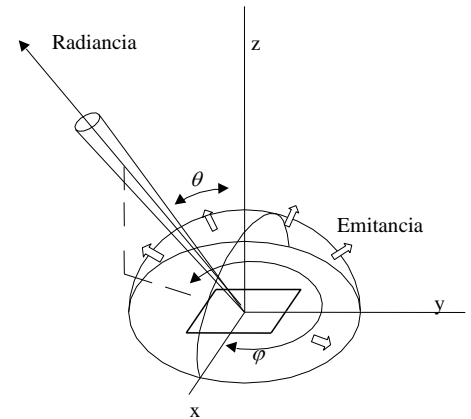
- Intensidad (I): flujo emitido por unidad de ángulo sólido (**FUENTES PUNTUALES**)

$$I = \frac{\partial \phi}{\partial \Omega} \text{ (W/sr)}$$

- Radiancia (L): flujo radiativo procedente de una superficie elemental,  $dA$ , en una dirección dada, por unidad de ángulo sólido y por unidad de superficie normalmente situada a la dirección de propagación (**FUENTES EXTENSAS**)

$$L = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \Omega \partial A \cos \theta} \text{ (W/m}^2\text{sr)}$$

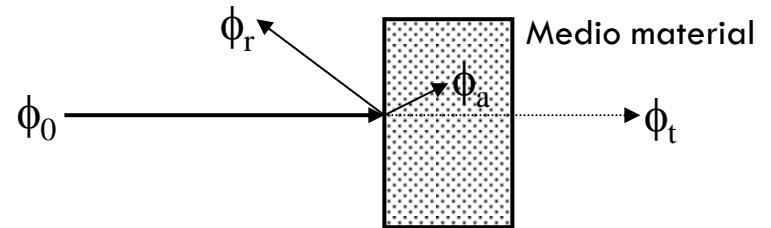
- La relación entre emitancia y radiancia es:  $M = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi$



# Interacción materia radiación

- ABSORTIVIDAD ( $\alpha$ ): relación energía absorbida-energía incidente
- TRANSMISIVIDAD ( $\tau$ ): relación energía transmitida-energía incidente
- REFLECTIVIDAD ( $\rho$ ): relación energía reflejada-energía incidente

$$\phi_0 = \phi_r + \phi_a + \phi_t \Rightarrow \underbrace{\frac{\phi_r}{\phi_0}}_{\rho} + \underbrace{\frac{\phi_a}{\phi_0}}_{\alpha} + \underbrace{\frac{\phi_t}{\phi_0}}_{\tau} = 1$$

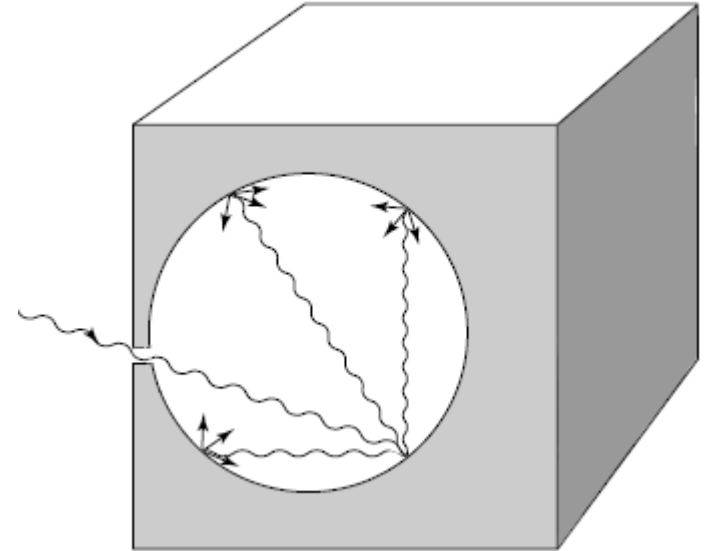


$$\alpha + \rho + \tau = 1 \text{ (MEDIOTRASLÚCIDO)}$$

$$\alpha + \rho = 1 \text{ (MEDIOOPACO)}$$

# Leyes de la radiación

- ❑ Todo cuerpo con temperatura ( $T$ ) por encima del cero absoluto emite radiación.
- ❑ **CUERPO NEGRO:** es un cuerpo ideal, que corresponde a la energía emitida por una cavidad en equilibrio térmico (**EMISOR PERFECTO**)
- La radiación sólo está determinada por  $T$
- Emite el máximo de radiación a una  $T$  dada  $\forall \lambda$
- Radiación isótropa
- Absorbente perfecto  $\forall \lambda$

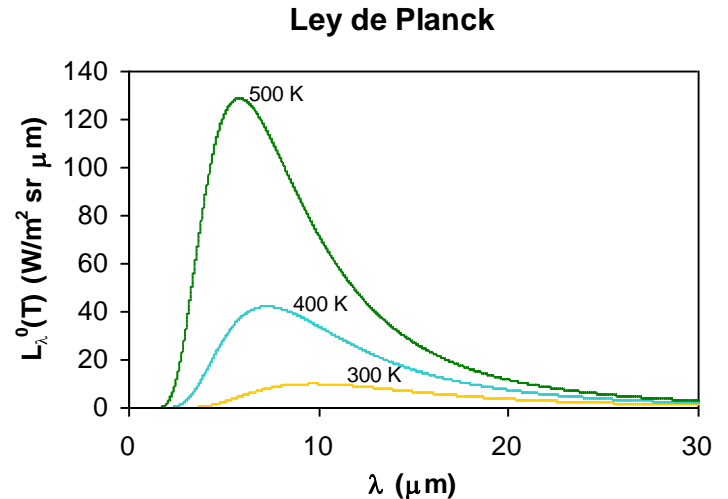


Una cavidad de radiación de CN para mostrar que la absorción es completa (tomado de Liou 2002).

# Ley de Planck

LEY DE PLANCK: describe la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro [CN] a una T dada.

- La potencia emisiva **crece rápidamente con T**
- El **máximo** de emisión se da a  **$\lambda$  más cortas** cuando aumenta T
- La función decrece abruptamente por debajo de  $\lambda_{\max}$  y suavemente por encima



$$L_{\lambda}^{\circ}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{W/m}^2 \text{sr } \mu\text{m})$$



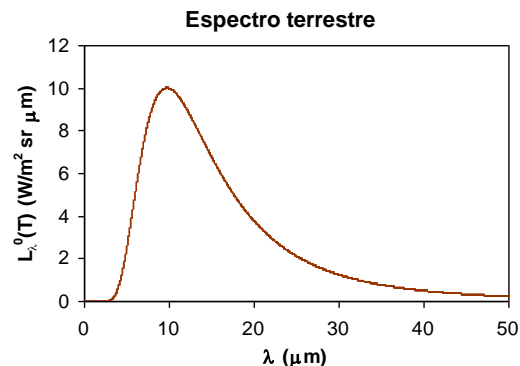
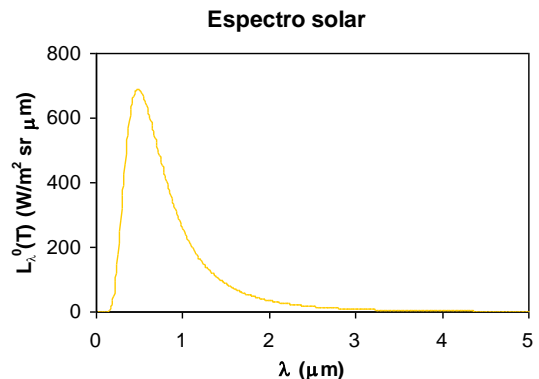
# Ley de Stefan-Boltzmann y Ley de Wien

- **LEY DE STEFAN-BOLTZMANN:** proporciona la emitancia total emitida en todo el espectro

$$M^{\circ}(T) = \sigma T^4$$

- **LEY DEL DESPLAZAMIENTO DE WIEN:** proporciona la longitud de onda de máxima emisión para una T dada

$$\lambda_m T = 2898 \mu\text{m K}$$



# Concepto de emisividad

- Las superficies naturales presentan una emisión y absorción menores que el CN. Para caracterizar su comportamiento se define la EMISIVIDAD como el cociente entre la energía radiante emitida por un cuerpo a una T dada, y la que emitiría un CN a la misma T.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}(T)}{L_{\lambda}^{\circ}(T)}$$

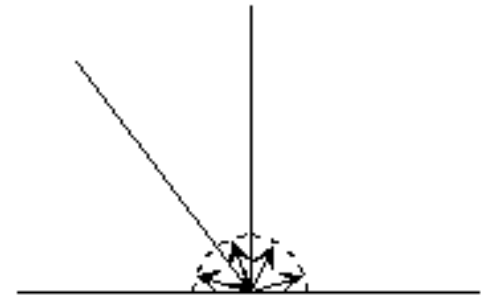
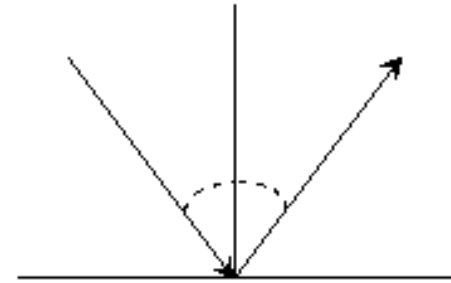
- La emisividad también presenta una dependencia espectral y direccional, admitiendo distintas definiciones según la magnitud con que se use. Aquellos cuerpos cuya emisividad es constante se llaman CUERPOS GRISES.
- LEY DE KIRCHHOFF: todo cuerpo en equilibrio térmico y radiativo tiene una eficiencia emisiva igual a su eficiencia absorbente, es decir:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad \Longrightarrow \quad \varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

# Superficie especular y lambertiana

- ❑ Especular: es la superficie ideal en la que se cumple perfectamente la ley de la reflexión (ángulo incidente = ángulo reflejado).
- ❑ Lambertiana: es la superficie, también ideal, que refleja la radiación incidente de manera uniforme en todas las direcciones.

Nota: las superficies naturales son una mezcla de las dos. Además es función de la longitud de onda. Si ésta es pequeña, las rugosidades tienden a difundir mucho más la energía incidente que si son longitudes de onda mayores, con comportamiento más especular.



# Tabla de unidades para recordar

Table 1.1  
Symbols, Dimensions, and Units of Various Radiometric Quantities

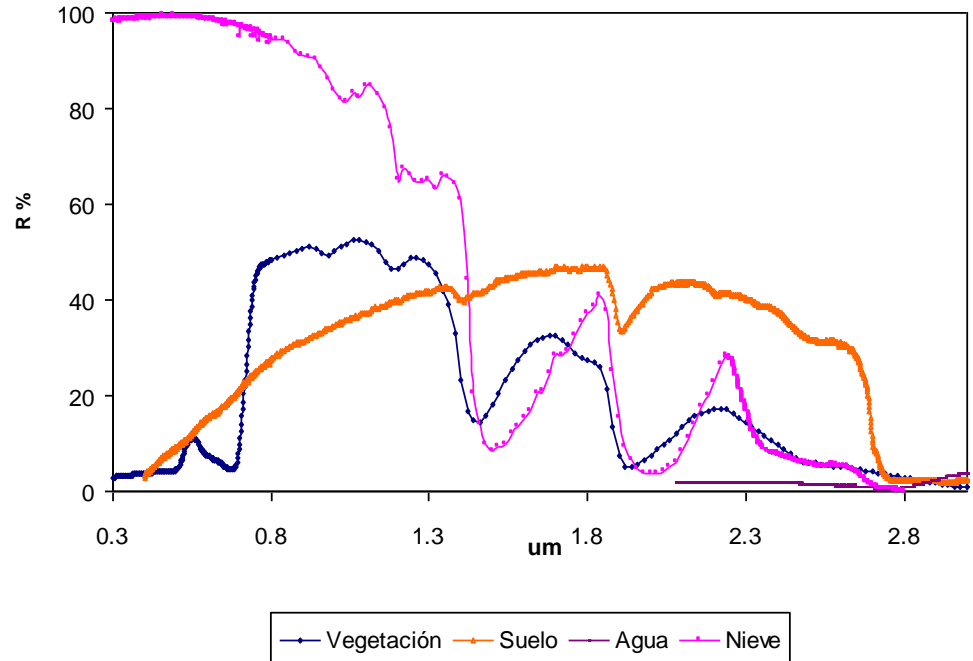
Symbol	Quantity	Dimension <sup>a</sup>	Unit <sup>b</sup>
$E$	Energy	$ML^2T^{-2}$	Joule (J)
$f$	Flux (luminosity)	$ML^2T^{-3}$	Joule per second (J sec <sup>-1</sup> , W)
$F$	Flux density (irradiance) Emittance	$MT^{-3}$	Joule per second per square meter (W m <sup>-2</sup> )
$I$	Intensity (radiance) Brightness (luminance)	$MT^{-3}$	Joule per second per square meter per steradian (W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> )

<sup>a</sup> $M$  is mass,  $L$  is length, and  $T$  is time.

<sup>b</sup>1 watt (W) = 1 J sec<sup>-1</sup>.

# Firmas espectrales de superficies naturales

- Firmas espectrales de vegetación, suelo, agua y nieve obtenidas en laboratorio. Cada superficie natural tiene un comportamiento espectral propio. En el caso de la vegetación es variable, dependiendo principalmente de los factores: estado fenológico, forma y contenido en humedad.



En los próximos capítulos se darán detalles específicos de las diferentes características de las firmas espectrales (medidas en Tandil).

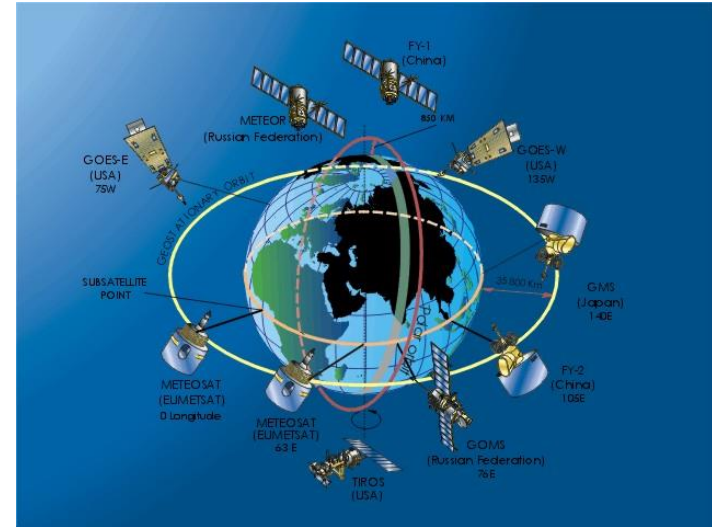


## Órbita de los satélites

Descripción de la órbita de los satélites y de misiones espaciales de uso habitual en la República Argentina

# Órbita de los satélites

Los satélites pueden recorrer diferentes tipos de órbitas y tienen diferentes coberturas de la superficie según el tipo de sensor a bordo de la plataforma satelital. Unas características de los sensores serán más beneficiosas que otras dado que la función de un sensor se planifica antes del lanzamiento. Por ejemplo los satélites con fines meteorológicos no tienen buena resolución espacial, sin embargo se pueden utilizar para el seguimiento multi-temporal de la vegetación.





# Sensores activos y pasivos

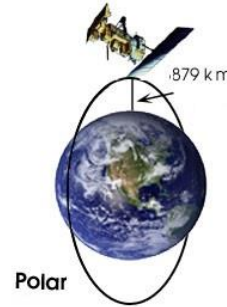
Existen dos tipos de satélites:

Los que portan sensores que miden la energía electro-magnética reflejada (ejemplo espectro visible  $0,4-0,7 \mu\text{m}$ ) por la superficie, principalmente del sol, se los denomina sensores pasivos. Se los nombra como pasivos porque no disponen de una fuente propia sino que funcionan a partir de la energía del sol. La única excepción a éstos, también pasivos, son los que miden la radiación térmica emitida por los cuerpos (la tierra emite en longitudes de onda entre  $8-14 \mu\text{m}$ ).

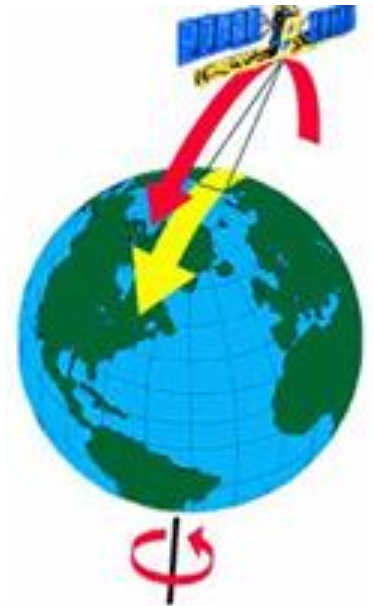
Los satélites que portan sensores capaces de emitir ondas (transmiten una señal, en la parte del espectro de las microondas del orden de los centímetros) se los denomina activos. Miden la intensidad y otras características de la señal de retorno devuelta por la superficie. Se los conoce comúnmente como SAR (radar de apertura sintética). La información SAR difiere, en diferentes aspectos, de la resolución espacial y espectral de las imágenes ópticas. La diferencia principal con los pasivos es que captan información de noche, con nubes-niebla y con bruma.

# Órbita: polar o heliosincrónica

La mayoría de los satélites civiles capturan información de la superficie terrestre en órbitas cuasi-polares moviéndose en sentido nordeste-sudoeste en órbitas descendentes. Orbitan a altitudes y velocidades constantes de acuerdo a planes previamente definidos. Una vez lanzado no se pueden alterar los parámetros fijados al momento del lanzamiento y puesta en órbita.

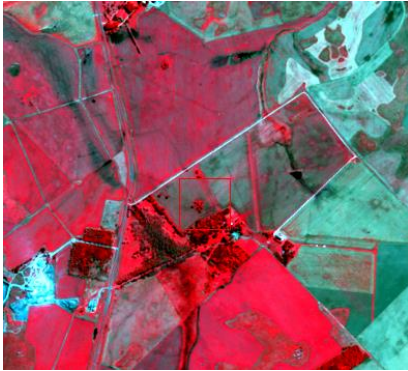


Ejemplo de satélite con órbita polar ubicado a 789 km de altitud.



# Ejemplos de imágenes ópticas y radar

- Ejemplo de imagen SPOT y Landsat 8 (óptico)

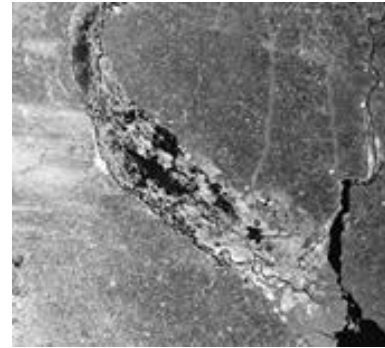


SPOT5, zona Chillar, set/2012

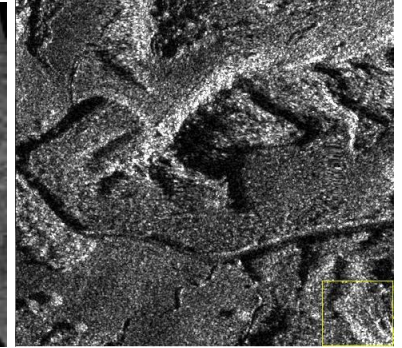


Landsat 8, zona Costa EEUU/2013

- Ejemplo de imágenes radar



ENVISAT ASAR-abril 2010, delta del Paraná. Baja resolución.



Cosmos Skymed, Italia 2010, alta resolución.

# Órbita polar

La gran parte de los satélites ópticos están sincronizados con el sol de forma que efectúan las medidas en una zona determinada a la misma hora del día. Esto garantiza que el ángulo de incidencia solar y las sombras resulten lo más parecidas posible en órbitas diferentes. La mayoría de estos satélites (Landsat, SAC/C y SPOT por ejemplo) están sincronizados para que el paso resulte por la mañana cuando el ángulo solar es bajo (de ese modo se puede ver el relieve del terreno a partir de las sombras).

Las órbitas pueden ser ascendentes o descendentes. En el caso de los satélites ópticos la información de superficie es captada en órbita descendente ya que se encuentra del lado iluminado de la tierra. Por el lado oscuro de la tierra (ascendente) no toma información. Los satélites radar (SAR) pueden captar información en órbita ascendente y descendente. Los satélites ópticos pueden captar imágenes de cualquier punto de la tierra excepto los polos. Solo se tiene información de los polos en aquellas misiones que permiten visión graduable (es necesario tener posibilidad de mover el sensor).

# Satélite de órbita Polar

Satélite de órbita polar o heliosincrónica mostrando la trayectoria, sentido de captura y rotación de la tierra. Ejemplo de satélites de órbita polar son las misiones argentinas SAC/C\* (lanzado en 2000) y SAC/D\* (lanzado en 2011). \* Consultar la página:

[www.conae.gov.ar/index.php/es](http://www.conae.gov.ar/index.php/es)



Características

hora local fija a lo largo del año para una latitud dada

escala de observación constante

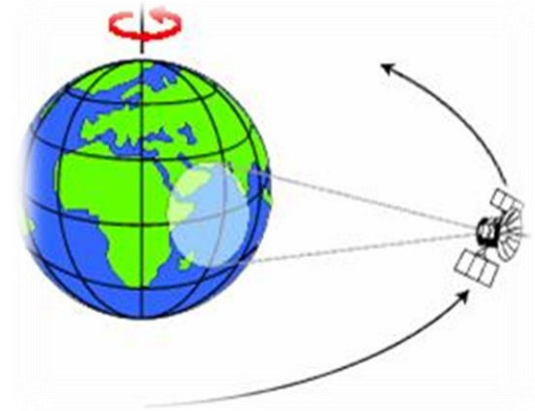
altitudes mayores a los 300 km

casi polares

fases

# Satélites Geoestacionarios

Los satélites geoestacionarios permiten el monitoreo continuo para el análisis de datos meteorológicos. Rodean a la tierra en una órbita geoestacionaria, lo que significa que orbitan el plano ecuatorial a la misma velocidad de rotación de la Tierra. Esto les permite registrar información continua de una misma zona de la superficie. La altura, aproximada en la que se ubican estos satélites, es de 36000 km por encima de la zona ecuatorial. La elevada altitud facilita que los satélites geoestacionarios tengan una vista amplia de diferentes sectores de la Tierra. Ejemplo de éstos son GOES y METEOSAT.



órbita circular  
órbita en el plano ecuatorial  
aplicaciones: meteorológicas, geológicas, etc.

# Misiones de satélite

- Los sensores a bordo de las diferentes plataformas capturan datos del espectro en bandas y toman datos de la superficie utilizando diferentes técnicas (barridos de la información de superficie).

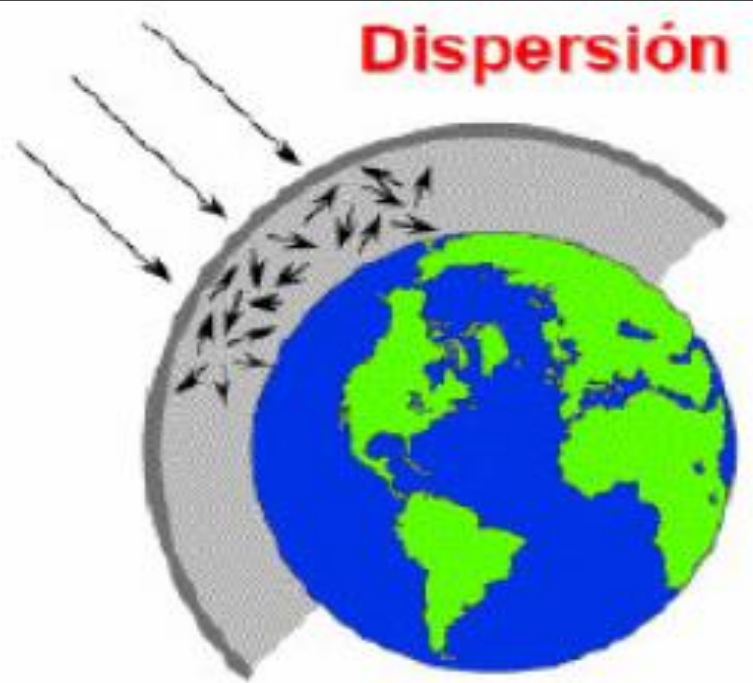
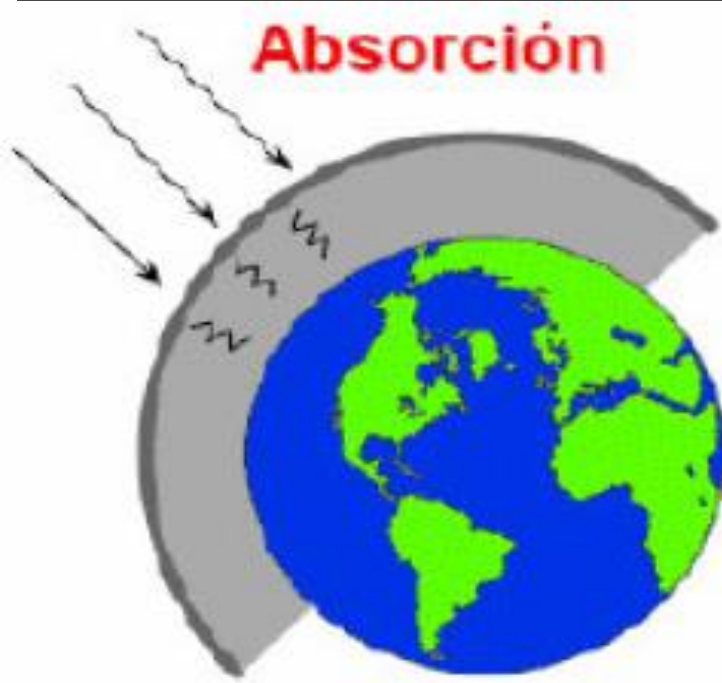
Los tres tipos de toma de datos son:

Instantáneo (cónico)

Instantáneo por intervalos semirígidos (SPOT)

Más complejos (LANDSAT)





## Corrección atmosférica

Ejemplo de aplicación a una imagen Landsat 5-7



# Conversión a Radiancia

$$L_{\lambda sat} = G_{\lambda} ND_{\lambda} + B_{\lambda} \quad (W m^{-2} \mu m^{-1} sr^{-1})$$

Los  $ND_{\lambda}$  → Radiancia ( $L_{\lambda sat}$ ). En Landsat la relación de transformación es una función lineal.

Sensor	Banda	$G_{\lambda}$	$B_{\lambda}$
TM	1	0.762824(0.668706)	-1.5200
	2	1.442510(1.317020)	-2.8400
	3	1.039880	-1.1700
	4	0.872588	-1.5100
	5	0.119882	-0.3700
	6	0.055158	1.2378
	7	0.065294	-0.1500

Sensor	Banda	$G_{\lambda}$	$B_{\lambda}$
ETM+	1	0.775686	-6.2000
	2	0.795686	-6.4000
	3	0.619216	-5.0000
	4	0.965490	-5.1000
	5	0.125725	-1.0000
	7	0.043725	-0.3500
	8	0.971765	-4.7000
	6.1	0.066824	0.0000
	6.2	0.037059	3.2000

Tablas. parámetros  $G_{\lambda}$  y  $B_{\lambda}$  (sensores TM y ETM+) para calcular la radiancia TOA ( $L_{\lambda sat}$ ).

# Reflectancia TOA ( $\rho$ )

Cuando la energía electromagnética  $E_I(\lambda)$  incide sobre los cuerpos situados en la superficie terrestre ésta puede descomponerse en tres términos debido a la reflexión, absorción y transmisión de la superficie.

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad \rho = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)}$$

Si **NO** considero los efectos introducidos por la atmosfera y además considera **reflexión Lambertiana**:

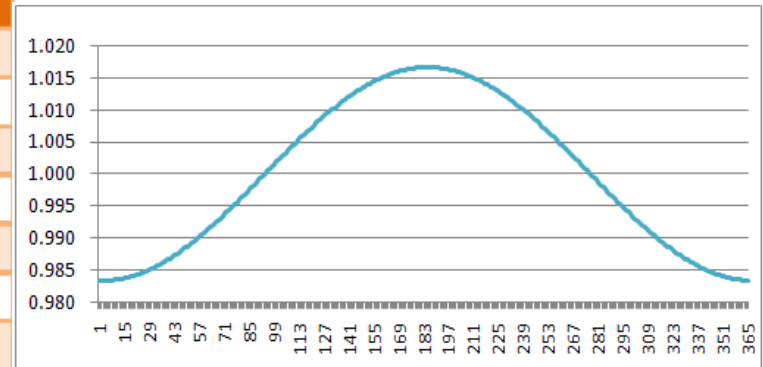
$$E_I(\lambda) = E_{\lambda 0} d^{-2} \cos\theta_z \quad E_R(\lambda) = \pi L_{\lambda sat} \quad \rho = \frac{\pi L_{\lambda sat}}{E_{\lambda 0} d^{-2} \cos\theta_z}$$

# Irradiancia solar espectral exoatmosférica

## Corrección por distancia Tierra-Sol

<i>Banda</i>	$E_{\lambda 0}$ (TM)	$E_{\lambda 0}$ (ETM+)
1	1957.00	1969.00
2	1826.00	1840.00
3	1554.00	1551.00
4	1036.00	1044.00
5	215.00	225.70
7	80.67	82.07
8	---	1368.00

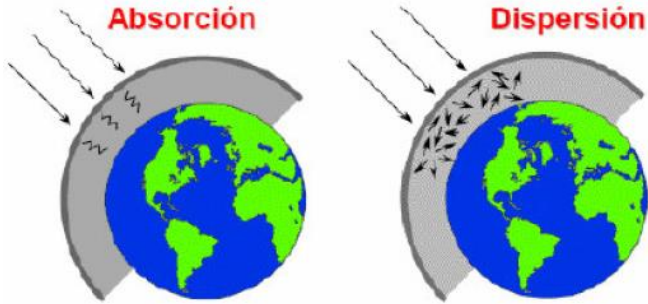
$$d = 1 - 0.01673 \cos\left(2\pi \frac{\text{día Juliano}-3}{365}\right)$$



(USGS, 2007 y 2008)

# Reflectividad TOA

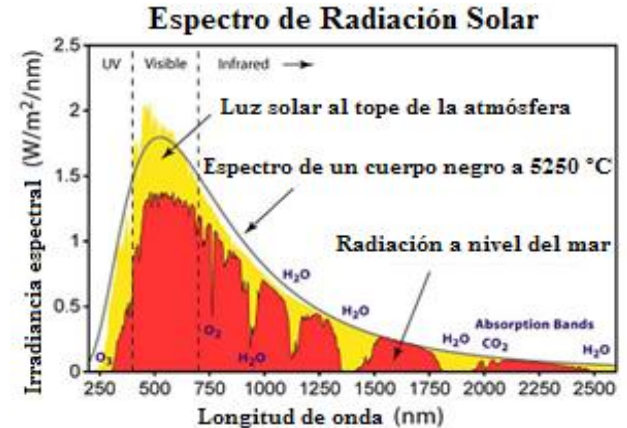
En realidad la Reflectancia TOA ( $\rho$ ) no expresa la Reflectancia de la superficie, debido a la interacción de los Fotones con los componentes de la atmósfera.



Necesitamos conocer:

$$\rho_{\lambda sup} = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)}$$

Es por eso que debemos introducir un **modelo de corrección atmosférica** para conocer la **Energía que recibe la superficie** y la **fracción reflejada** por ésta.



# Efectos de la ATMÓSFERA Rayleigh

## 1) ATENUA

reduce la energía que ilumina la superficie y la que refleja éste.

## 2) ACTÚA TAMBIÉN COMO REFLECTOR

agrega una radiancia atmosférica (path radiance  $L_{\lambda p}$ )

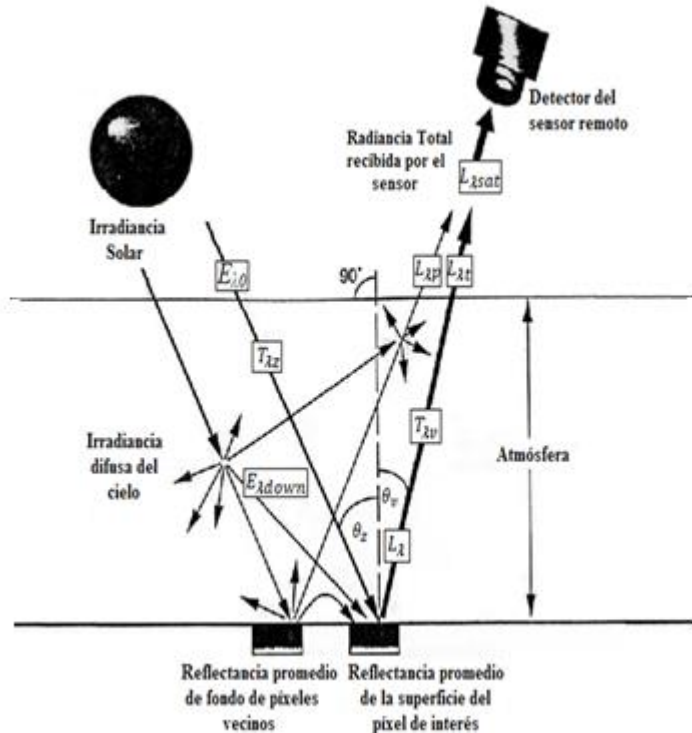
$$E_I(\lambda) = E_{\lambda 0} d^{-2} \cos\theta_z$$

$$E_I(\lambda) = (E_{\lambda 0} d^{-2} \cos\theta_z T_{\lambda z} + E_{\lambda down})$$

$$E_R(\lambda) = \pi L_{\lambda sat}$$

$$E_R(\lambda) = \frac{\pi(L_{\lambda sat} - L_{\lambda p})}{T_{\lambda v}}$$

# Esquema para estimación de las $\rho_{\lambda\text{sup}}$



La Figura de la izquierda muestra la radiancia recibida por un sensor, a bordo de una plataforma, y las interacciones atmósfera-energía electromagnética (Modificado de Jensen, 1996).

Para comprender los cálculos utilizar la hoja (anexa a esta presentación): Ecuaciones\_para\_reflec\_sup\_Landsat5.xls

# Modelo Simple de Transferencia Radiativa: Reflectancia de superficie ( $\rho_{\lambda_{sup}}$ )

$$\rho_{\lambda_{sup}} = \frac{\pi(L_{\lambda_{sat}} - L_{\lambda_p})}{T_{\lambda_v}(E_{\lambda_0} d^{-2} \cos\theta_z T_{\lambda_z} + E_{\lambda_{down}})}$$

(Schroeder et al., 2006; Soudani et al., 2006)

$d$  es la distancia Tierra-Sol (UA)

$E_{\lambda_0}$  es la irradiancia solar espectral exoatmosférica ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ).

$\theta_z$  es el ángulo cenital solar.

$L_{\lambda_p}$  es el path radiance ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ).

$T_{\lambda_v}$  y  $T_{\lambda_z}$  son las transmisividades atmosféricas.

$E_{\lambda_{down}}$  es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ).

*A continuación se presentan los procesos realizados para estimar los parámetros considerados en éste modelo.*

# Método DOS (Dark Object Subtraction): Estimación de los $L_{\lambda p}$ (path radiance)

$$L_{\lambda p} = ND_{\lambda dark} G_{\lambda} + B_{\lambda} - 0.01 \left( \frac{E_{\lambda 0} \cos \theta_z T_{\lambda z} T_{\lambda v}}{d^2 \pi} \right)$$

(Schroeder et al., 2006; Chavez, 1988 & 1996; Moran et al., 1992)

$ND_{\lambda dark} > 1000$  píxeles (Teillet & Fedosejevs, 1995).

Atmosfera Rayleigh sin aerosoles.

$\rho_{\lambda sup}$  del 1% para el objeto oscuro.

$E_{\lambda down}$  se considera igual a cero (Song et al., 2001; Barnaby & Pellikka, 2003).



# Cálculo de las Transmisividades

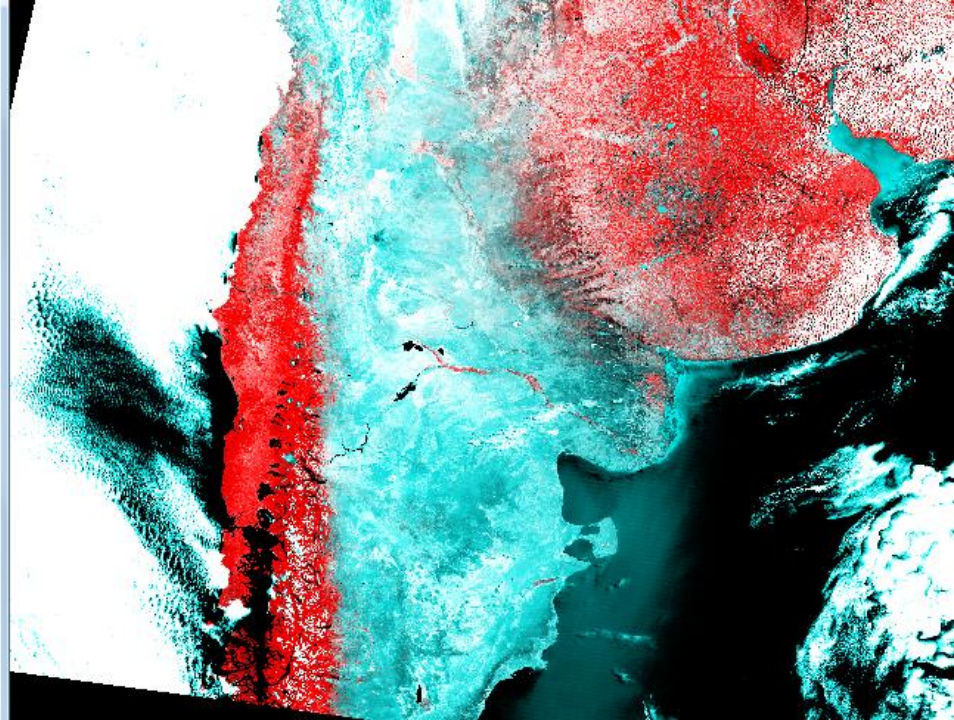
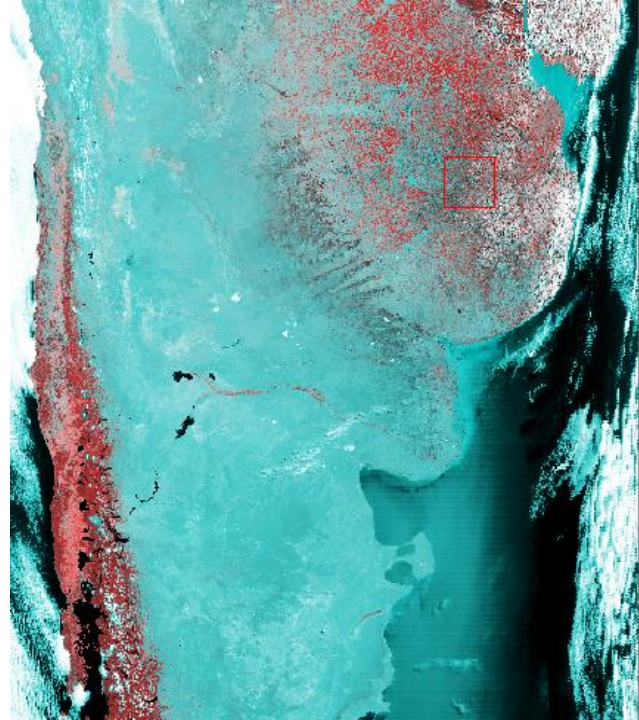
$$T_{\lambda v} = e^{-\tau_{\lambda r} / \cos \theta_v} \quad T_{\lambda z} = e^{-\tau_{\lambda r} / \cos \theta_z}$$

$\tau_{\lambda r}$  es el espesor óptico para la dispersión Rayleigh (Kaufman, 1989). ( $\lambda$  en  $\mu\text{m}$ )

$$\tau_{\lambda r} = 0.008569 \lambda^{-4} (1 + 0.0113 \lambda^{-2} + 0.00013 \lambda^{-4})$$

Sensor	Banda	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\tau_{\lambda r}$
TM	1	0.4850	0.1627
	2	0.5600	0.0904
	3	0.6600	0.0463
	4	0.8300	0.0183
	5	1.6500	0.0012
	7	2.2000	0.0004
ETM+	1	0.4787	0.1716
	2	0.5610	0.0897
	3	0.6614	0.0460
	4	0.8346	0.0180
	5	1.6500	0.0012
	7	2.2080	0.0004

Tabla.  $\tau_{\lambda r}$  estimados para las bandas de los sensores TM y ETM+.



## Corrección geométrica

Conceptos básicos y métodos clásicos.

# Corrección geométrica

El proceso de corrección consiste en dar a cada píxel su localización en un sistema de referencia (UTM, Posgar, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas de información en un SIG. Tras la corrección se obtiene una nueva imagen (definida como capa en un SIG) en la que cada píxel de la imagen tiene un valor de longitud y de latitud. En caso de que la imagen no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo, sin embargo una imagen puede sufrir diversos tipos de distorsiones.

# Proceso de corrección geométrica

Las correcciones necesarias para transformar cada punto de la imagen fila-columna (f,c) en coordenadas reales (X e Y UTM por ejemplo) se logra mediante un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada coordenada de píxel (f,c) un par de coordenadas en latitud longitud (X,Y ).

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

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

Las funciones a aplicar depende del método que se seleccione para realizar la corrección geométrica.

Existen dos métodos: uno es el de corrección orbital (modelo físico) utilizando las efemérides de satélite y el otro, de carácter empírico, modela los errores de la imagen utilizando puntos de control.

## Aplicación de índices

Los índices como resultantes de la operación entre diferentes bandas del espectro. Posibilidades de aplicación y utilidad de éstos para la obtención de características biofísicas de superficie.

# Concepto

La obtención de un índice de vegetación (IV) se logra a partir de valores de reflectividad obtenidos en diferentes longitudes de onda. En realidad los índices se derivan de la comprensión de la respuesta espectral de las superficies (coberturas vegetales) en las diferentes longitudes de onda. El estudiante que comprendió y analizó las firmas espectrales de vegetación puede interpretar y explicar con facilidad el concepto de índice. Jackson et al. (1983) define a IV como aquel que es sensible a la cubierta vegetal, insensible a los efectos del suelo (brillo y color) y con baja perturbación de la atmósfera, del ambiente y de las condiciones de captura de la imagen (geometría de la iluminación y de observación del sensor).

Si recordamos que el sector del rojo e infrarrojo cercano del espectro es el que mejor responde la vegetación podemos pensar que son estos sectores espectrales los que se utilizarán en la estimación de IV.

# Ecuaciones de los principales índices

ÍNDICE	FÓRMULA	AUTOR
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$\text{NDVI} = \frac{\text{irc}-r}{\text{irc}+r}$	Rouse et al. (1974)
RVI (Ratio Vegetation Index)	$\text{RVI} = \frac{\text{irc}}{r}$	Pearson y Miller (1972)
PVI <sup>1</sup> (Perpendicular Vegetation Index)	$\text{PVI} = \frac{\text{irc}-a*r-b}{\sqrt{a^2 + 1}}$	Richardson y Wieganel (1979)
SAVI <sup>1</sup> (Soil Adjusted Vegetation Index)	$\text{SAVI} = \frac{(\text{irc}-r) * (1 + L)}{(\text{irc}+r+L)}$	Huete (1988)
TSAVI <sup>2</sup> (SAVI Transformado)	$\text{TSAVI} = \frac{a*(\text{irc}+a*r-b)}{r+a*\text{irc}-a*b+X*(1+a^2)}$	Baret y Guyot (1991)
MSAVI (SAVI Modificado)	$\text{MSAVI} = 2*\text{irc}+1\sqrt{(2*\text{irc}+1)^2*8*(\text{irc}-r)}$	Qui et al. (1994)
OSAVI (SAVI Optimizado)	$\text{OSAVI} = \frac{\text{irc}-r}{\text{irc}+r+Y}$	Rondeau et al. (1996)

# Referencias a la Tabla anterior

1, 2. Las constantes **a** y **b** son, respectivamente, la ordenada en el origen y la pendiente de la línea del suelo ( $\text{irc}_{\text{suelo}} = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{r}$ ). En el plano de reflectividades **irc-r**, los puntos que representan a superficies desnudas se distribuyen a lo largo de una línea recta que se denomina línea del suelo. A medida que la vegetación crece sobre un tipo de suelo determinado, disminuye la reflectividad en el rojo y aumenta en el infrarrojo cercano, por lo que el punto representativo de una cubierta vegetal va separándose de la línea del suelo en sentido ascendente y hacia la izquierda. La distancia de cada uno de estos puntos a la línea del suelo será proporcional a la cantidad de vegetación existente. **X** es un parámetro a determinar para minimizar, todavía más, la influencia del suelo, y que, según sus autores toma el valor 0.08, aunque conviene calcularlo para cada tipo de cultivo.

**L** es el factor de ajuste del suelo. Huete basándose en un modelo de transferencia radiativa mostró que un valor de **L = 0.5** permitía mejorar el ajuste.

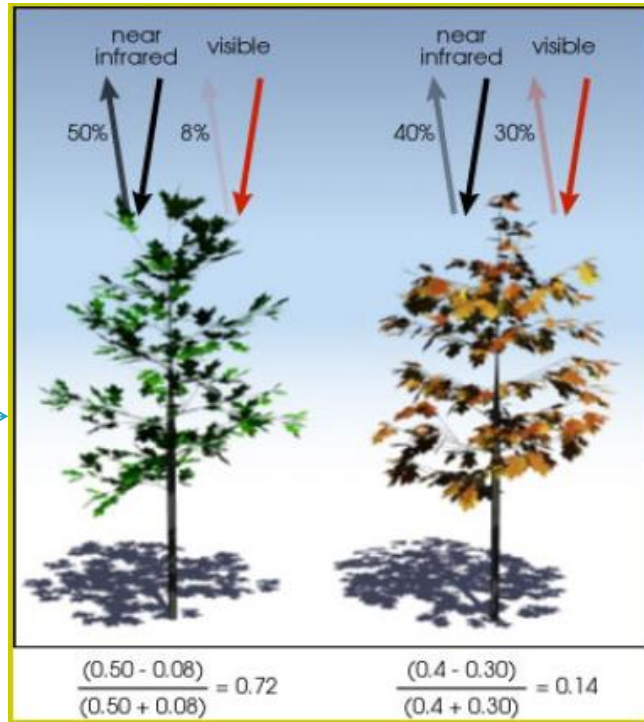


# El NDVI\*: concepto

\* Definido por Rouse et al. 1974.

Figura tomada de Curso CPTEC-INPE (Peres, 2007).

Vegetación en condiciones fisiológicas óptimas



Vegetación en malas condiciones (enferma, con déficit hídrico...)

Valor de NDVI

# Valores de NDVI

- El NDVI varía entre -1 y 1
- Áreas con elevada proporción de vegetación presentan valores altos (NIR >>> R) en el orden de 0,9
- El agua tiene NDVI próximo a cero y tiende a tomar valores negativos (en suelos desnudos arcillosos húmedos se pueden observar valores negativos)
- Los suelos secos con muy baja proporción de vegetación arroja valores próximos a 0,1. En rocas y suelos totalmente desnudos tiende a cero.

# El IV mejorado: EVI

El EVI (Enhanced Vegetation Index) es un excelente índice para el seguimiento de la vegetación debido que elimina los efectos de la atmósfera (incluido en los parámetros contenidos en la ecuación de calculo). El Dr. A. Huete (2002) es el investigador que propone el índice. La ecuación operativa es:

$$EVI = 2.5 \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C1 \times RED - C2 \times Blue + L)}$$

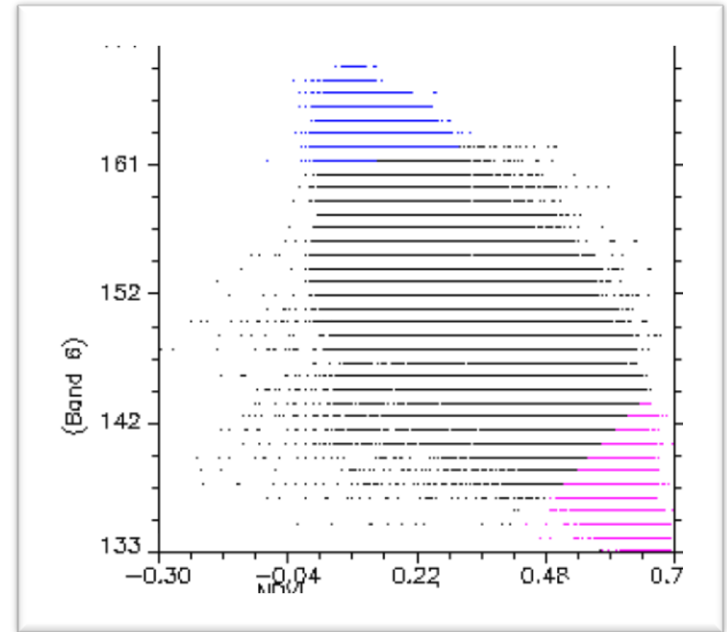
NIR es el infrarrojo cercano, RED es el rojo y blue es el azul del espectro electromagnético. C1 y C2 corresponden a coeficientes debido a aerosoles y L es un ajuste entre NIR y RED. G está incluido en la ecuación de arriba.

L=1, C1 = 6, C2 = 7.5, and G (gain factor) = 2.5.

# Otros índices

Existen otros índices que combinan diferentes sectores del espectro electromagnético, en lugar del R y NIR, que facilitan el conocimiento del estado biofísico de la superficie. Estos índices permiten extraer información de la superficie observada como consecuencia de una diferente respuesta espectral en el R, NIR, SWIR y TIR.

Un ejemplo de combinación puede ser la relación entre R, NIR, TIR por medio de la dispersión que se logra entre NDVI y Ts. Una combinación así permite el seguimiento de zonas con estrés y sin estrés.



Dispersión NDVI (eje x) – TIR (eje y)

# Ecuaciones con datos R, NIR, SWIR, TIR

INDICE	FORMULA	AUTOR
<b>NDII</b> (Normalized Difference Infra Red Index)	$NDII = \frac{\rho(0.86\mu m) - \rho(1.64\mu m)}{\rho(0.86\mu m) + \rho(1.64\mu m)}$	<i>Hardisky et al. 1983</i>
<b>NDWI</b> (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = \frac{\rho(0.86\mu m) - \rho(1.24\mu m)}{\rho(0.86\mu m) + \rho(1.24\mu m)}$	<i>Gao, 1996</i>
<b>TDVI</b> (Temperature Vegetation Dryness Index)	$TVDI = \frac{T_s - T_{s \min}}{a + b NDVI - T_{s \min}}$	<i>Sandholt et al. 2002</i>
<b>WDI</b> (Water Deficit Index)	$WDI = 1 - \left[ \frac{(T_{su} - T_a) - (T_s - T_a)}{(T_{su} - T_a) - (T_{inf} - T_a)} \right]$	<i>Luquet et al., 2004</i>

Donde:  $T_s$  es la temperatura en el píxel,  $T_{s \min}$  es la mínima temperatura de superficie,  $a$  y  $b$  son parámetros propios del área de estudio que se calculan a partir de la relación existente entre  $NDVI$  y  $T_s$  desde las imágenes de satélite.  $T_{su}$  y  $T_{inf}$  corresponden a los límites superior e inferior logrados a partir de la gráfica  $NDVI$  versus  $(T_s - T_a)$  en el trapecioide propuesto por *Moran et al. (1994)*.

# Patrón de prueba de pantalla panorámica (16:9)

**Prueba de la  
relación de  
aspecto**

(Debe parecer circular)

4x3

16x9

