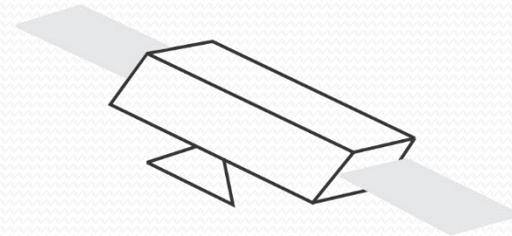
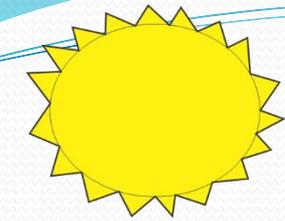
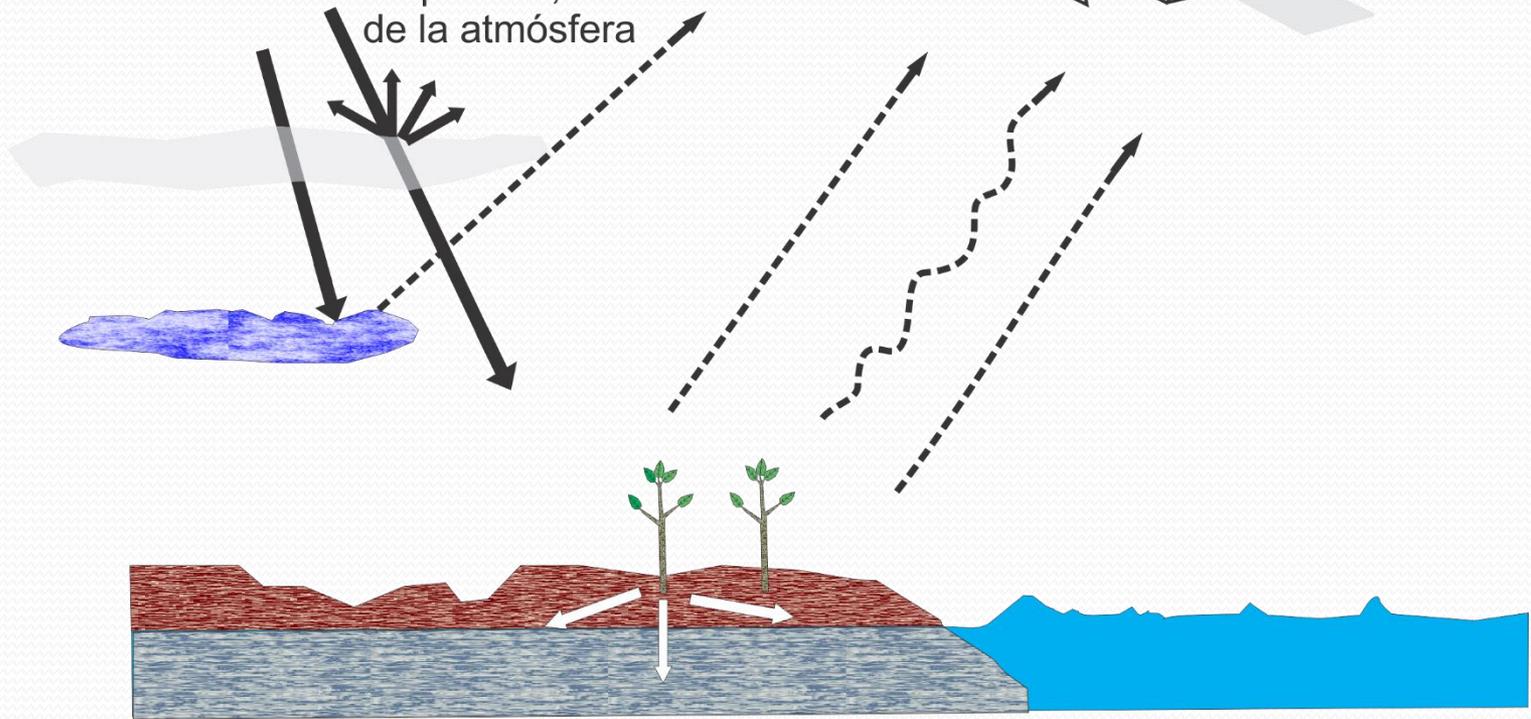


# Módulo 2. Conceptos básicos



Dispersión, absorción  
de la atmósfera



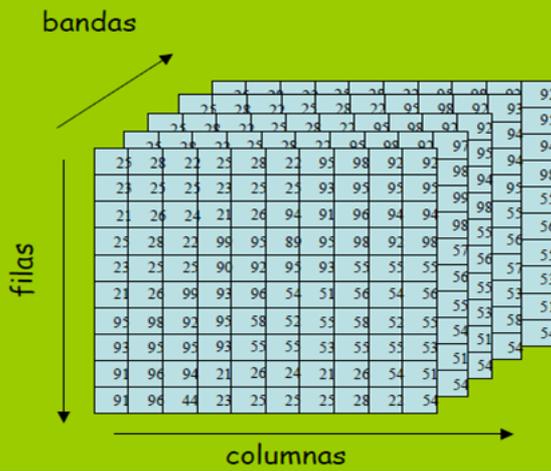
-  Radiación incidente
-  Radiación reflejada
-  Radiación emitida
-  Radiación transmitida

# Qué es una imagen satelital?

Representación visual (y cuantitativa) de la energía electromagnética capturada por un sensor que se encuentra montado en un satélite artificial.

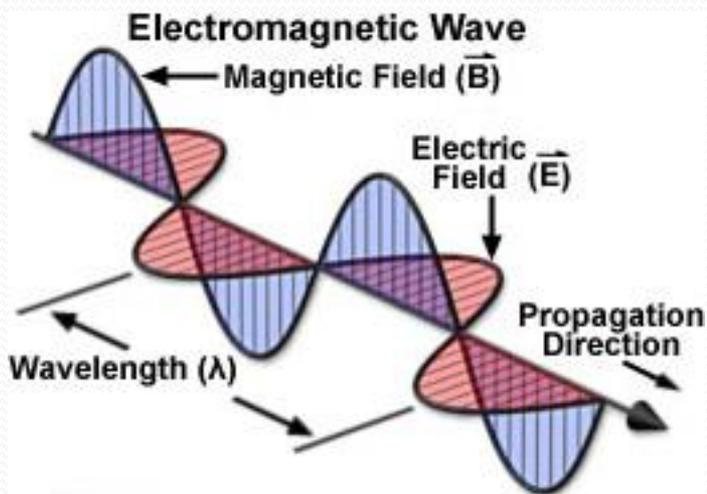


25	28	22	25	28	22	95	98	92	92
23	25	25	23	25	25	93	95	95	95
21	26	24	21	26	94	91	96	94	94
25	28	22	99	95	89	95	98	92	98
23	25	25	90	92	95	93	55	55	55
21	26	99	93	96	54	51	56	54	56
95	98	92	95	58	52	55	58	52	55
93	95	95	93	55	55	53	55	55	53
91	96	94	21	26	24	21	26	54	51
91	96	44	23	25	25	25	28	22	54



## Bases físicas de la teledetección

La radiación electromagnética (REM) se puede considerar bien como una serie de ondas o bien como un chorro de partículas, llamadas fotones. Considerando la REM como onda, la energía se transmite de un lugar a otro en forma armónica y continua. La **longitud de onda**  $\lambda$  y la **frecuencia de oscilación**  $f$  están relacionadas por la velocidad de la luz en el medio,  $c$ .



$$\lambda f = c$$

$$(c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s})$$

$\lambda$ :  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ;  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

Esta dualidad onda-corpúsculo hace que cada fotón tenga una energía:

$$E = hf$$

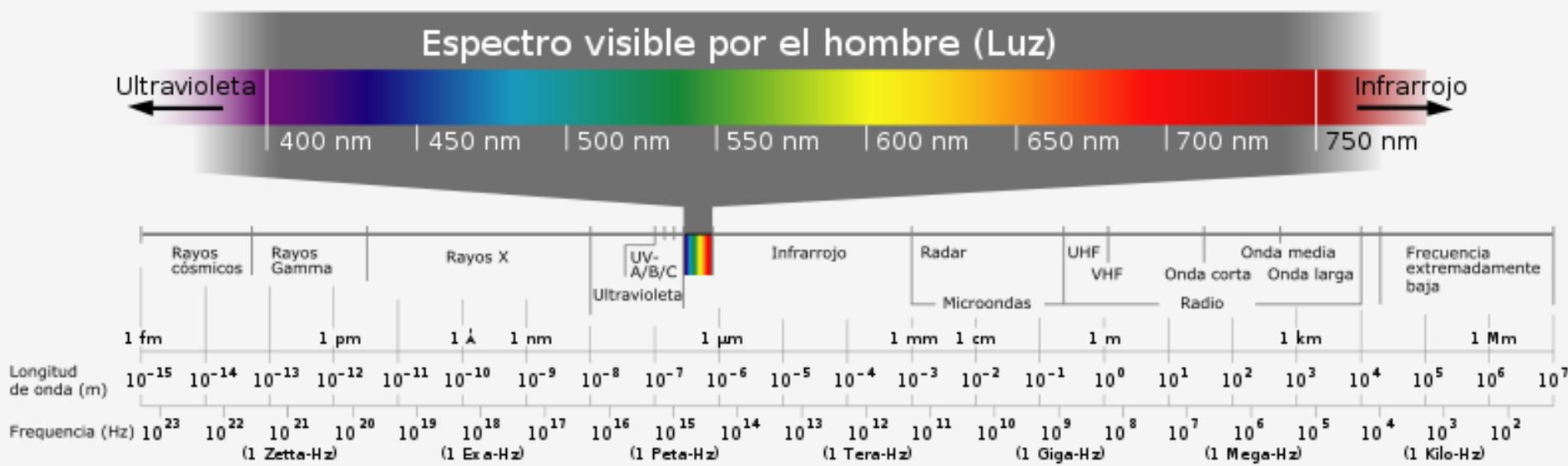
$$h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

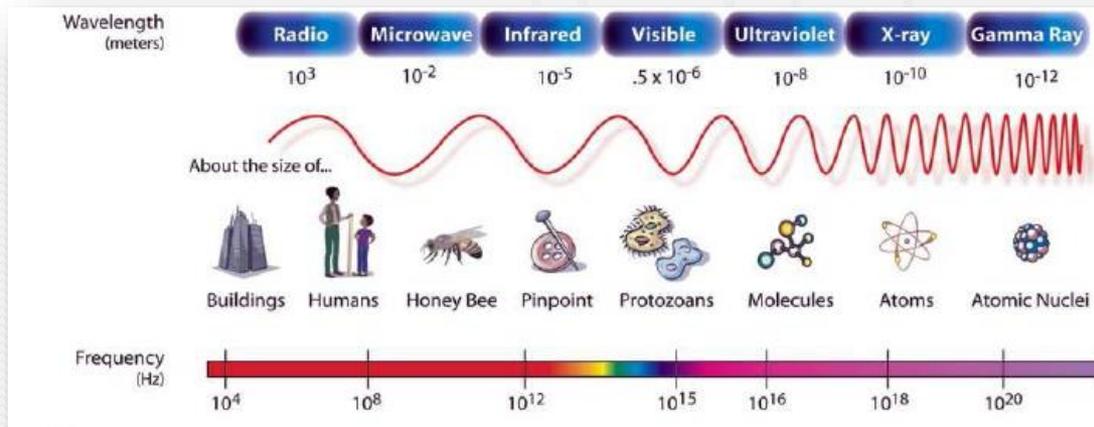
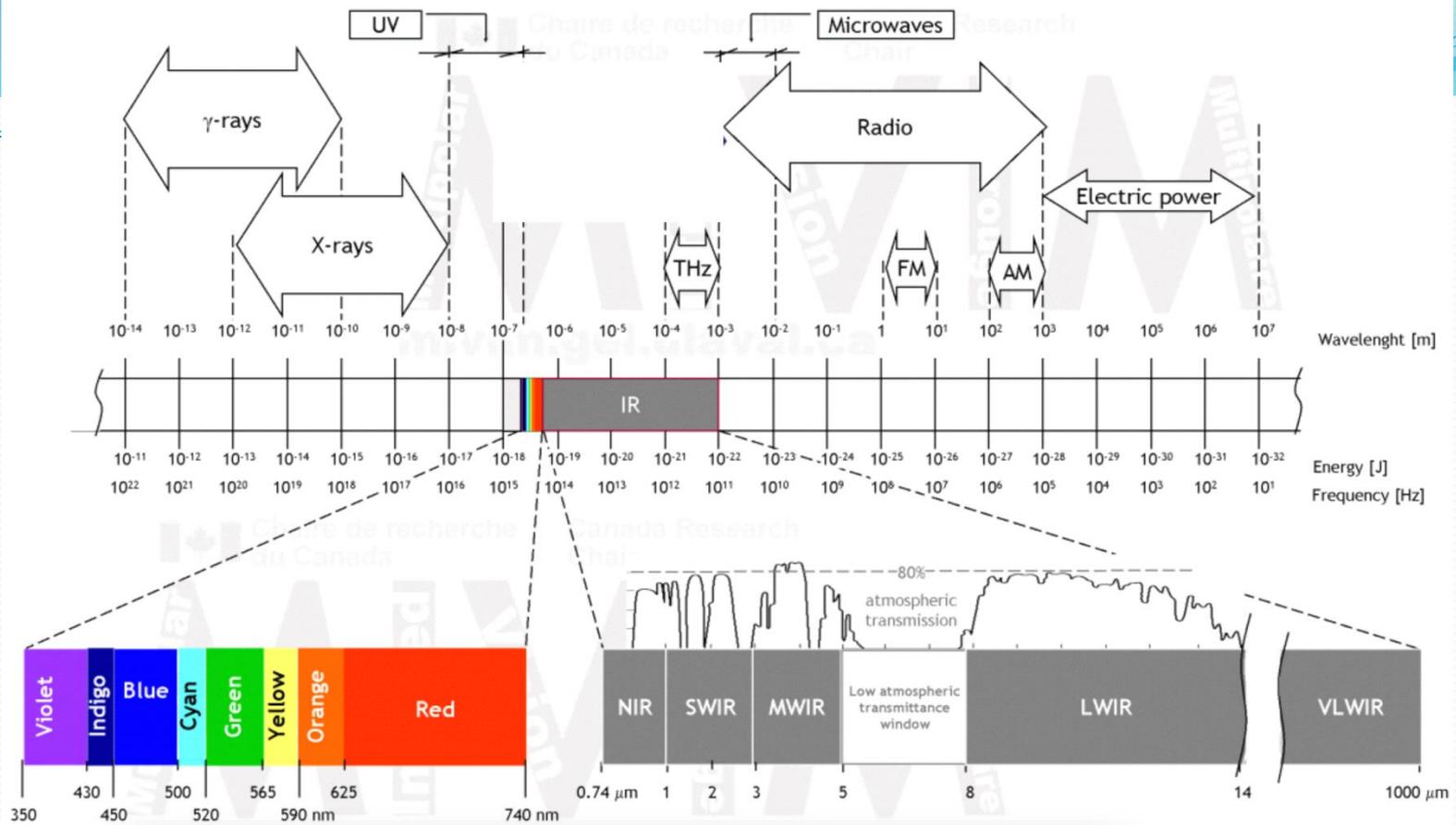
$E$ : energía radiante de un fotón

Considerándola como ondas...

## Espectro electromagnético

Cualquier tipo de energía radiante se puede definir por su  $\lambda$  o  $f$ . Su organización en bandas de comportamiento similar, da origen al espectro electromagnético.



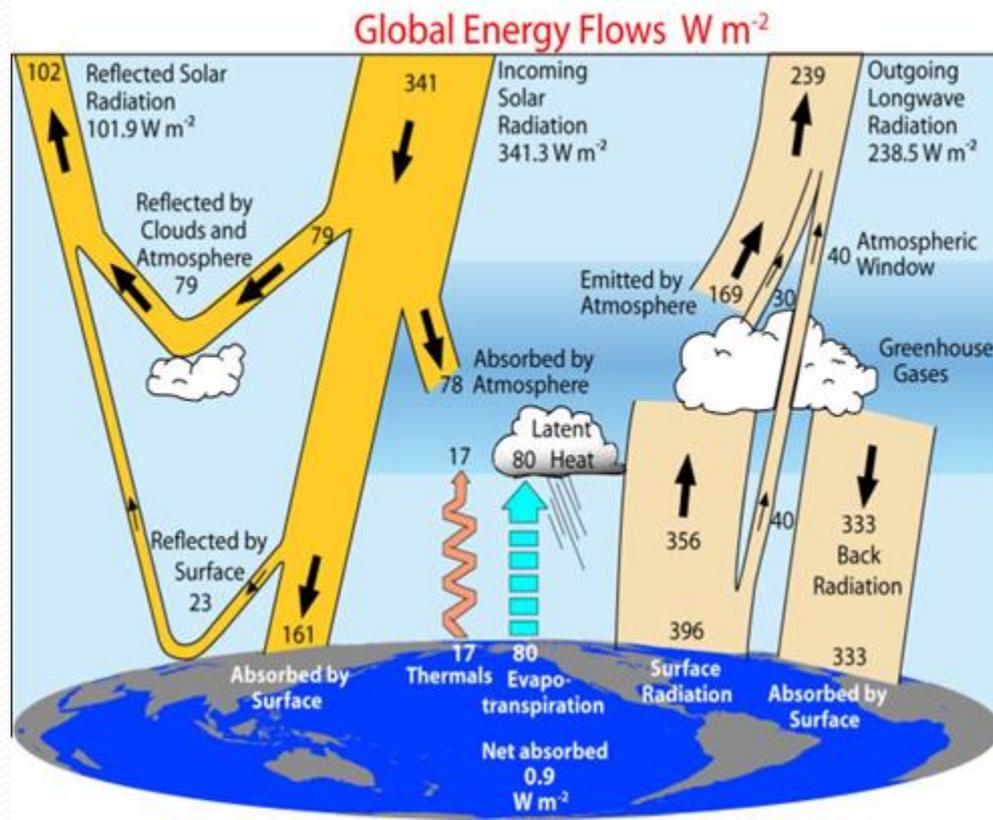


# INTERACCIÓN DE LA ATMÓSFERA

En el trayecto seguido por la radiación electromagnética, ésta sufrirá tres fenómenos principales:

- Absorción
- Emisión
- Dispersión

Sus efectos se muestran en una pérdida de claridad de la imagen; se reduce el contraste y la cantidad total de radiación que llega al sensor. Existen diversas correcciones en forma de algoritmos para tratar estos efectos.

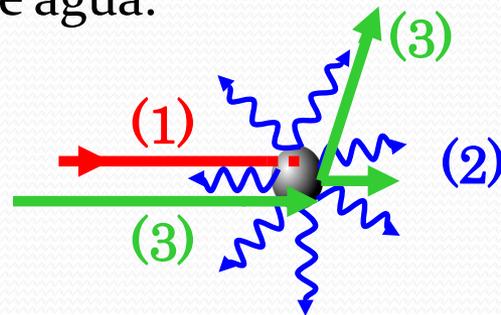


### 1) ABSORCIÓN y 2) EMISIÓN

Proceso por el cual las moléculas y partículas de la atmósfera absorben la energía radiante ( $\approx 65 \text{ Wm}^{-2}$ ) y la transforman en energía interna que **posteriormente será emitida en el infrarrojo térmico**. La atmósfera reduce así la observación espacial a ciertas bandas concretas del espectro, llamadas ventanas atmosféricas. Excepto si se quiere estudiar la atmósfera (satélites meteorológicos).

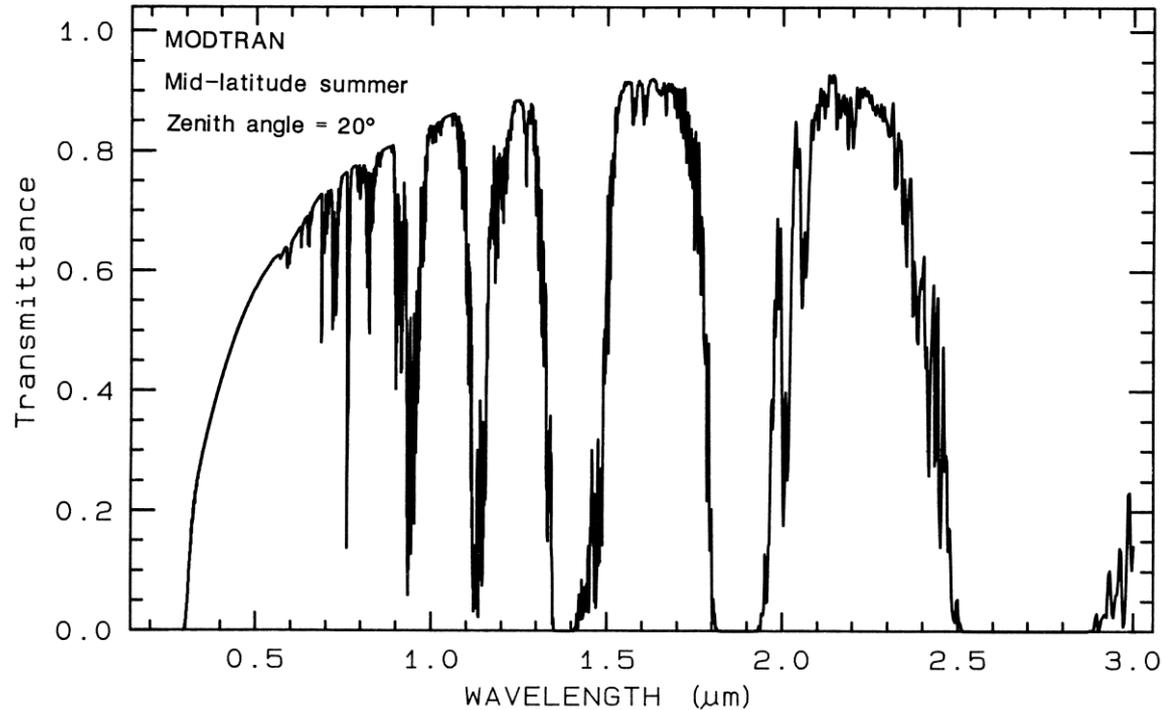
### 3) DISPERSIÓN

Este fenómeno se traduce en un redireccionamiento o pequeño desvío del camino recto de propagación. Es causado por la interacción entre la radiación y los gases y partículas atmosféricas. La reflexión consiguiente a ese choque, **supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre**. **Se reduce por tanto la radiancia directa, aumentando la difusa**. Los principales causantes son los aerosoles y el vapor de agua.



## Transmisión de la atmósfera

Si nos limitamos a la teleobservación de la radiación electromagnética en todo el sector del espectro, incluso el que no ven nuestros ojos, se puede lograr mucha información. La teleobservación se logra gracias a ventanas atmosféricas donde la atmósfera es transparente. Los sensores a bordo de los satélite 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).

Desde el punto de vista de la teledetección, las bandas destacadas son:

**-Espectro visible (0,4 – 0,7  $\mu\text{m}$ ):** es la radiación electromagnética perceptible por el ojo. Coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar. Podemos localizar los distintos colores en las longitudes. Útil para cartografía.

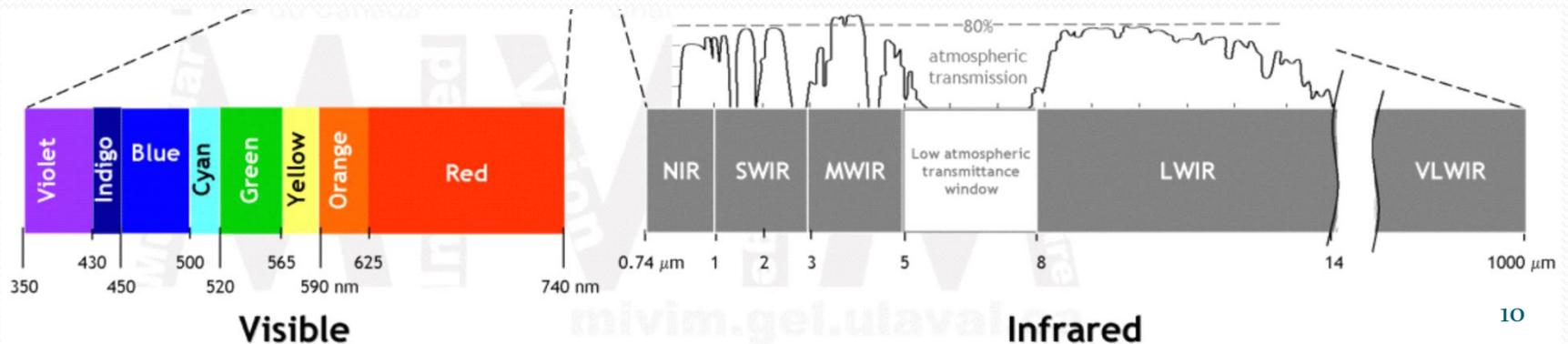
**Azul: 0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$ ; Verde: 0,5 – 0,6  $\mu\text{m}$ ; Rojo: 0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$**

**-Infrarrojo cercano (0,8 – 1,3  $\mu\text{m}$ ):** región importante para diferenciar vegetación y concentraciones de humedad.

**-Infrarrojo medio (1,3 - 8  $\mu\text{m}$ ):** región con mezcla de procesos de reflexión (SWIR, 1.3 a 2.5  $\mu\text{m}$ ) de luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Entre 3-5  $\mu\text{m}$ , IRm propiamente dicho.

**-Infrarrojo térmico (8 - 14  $\mu\text{m}$ ):** región del espectro en la que emiten energía todos los cuerpos de la superficie terrestre.

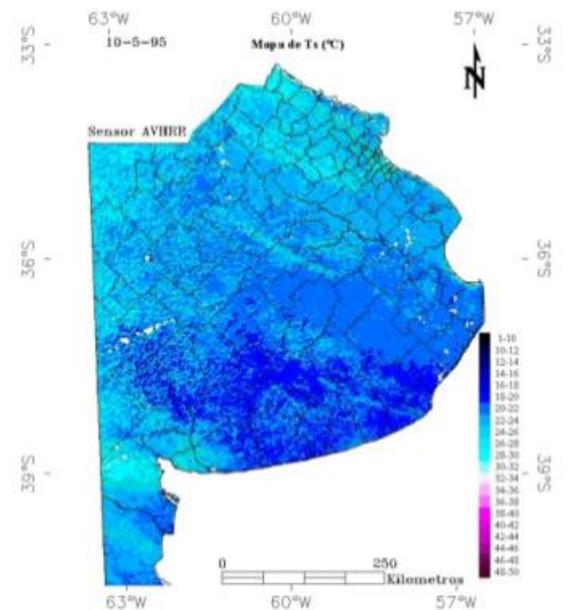
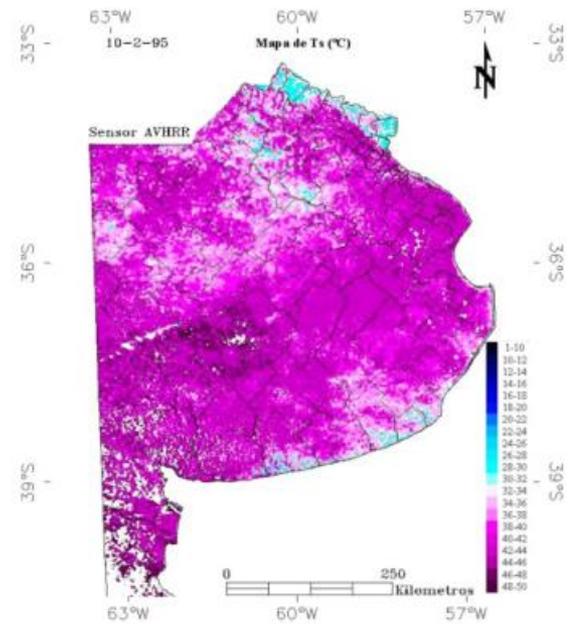
**-Microondas (desde 1 mm):** tiene la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa, pero también de llevar asociada muy poca energía. Actualmente se está logrando mucho en este sector del espectro.



## 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.

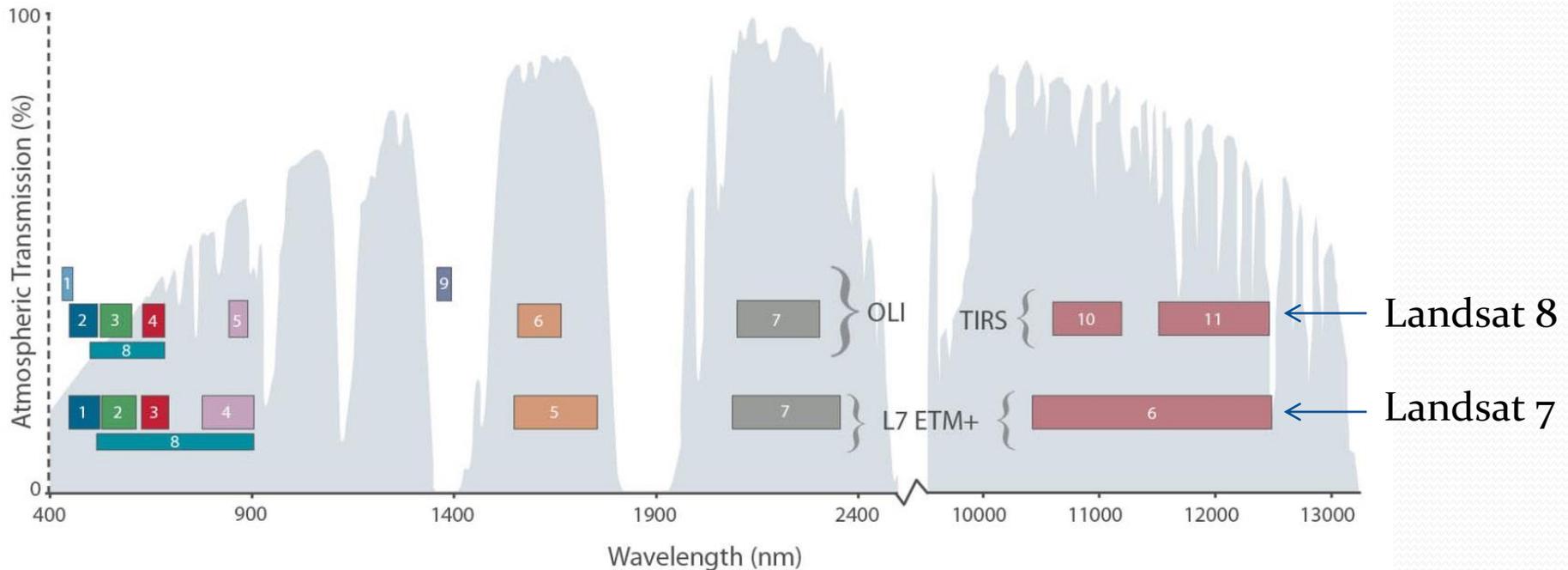
Así, los sensores a bordo de los satélites permiten tener una perspectiva general de grandes áreas y su seguimiento en el tiempo (actualmente se dispone de series de tiempo desde la década de 1970 a la actualidad).



Temperatura de la superficie en la provincia de Buenos Aires.

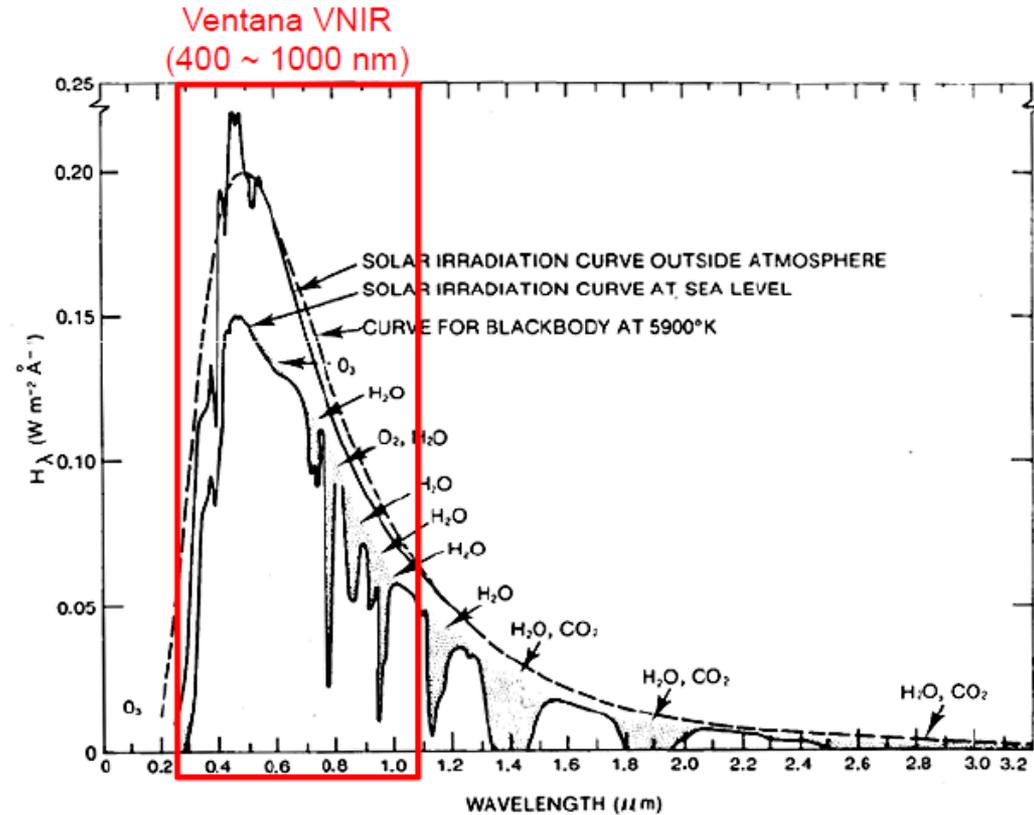
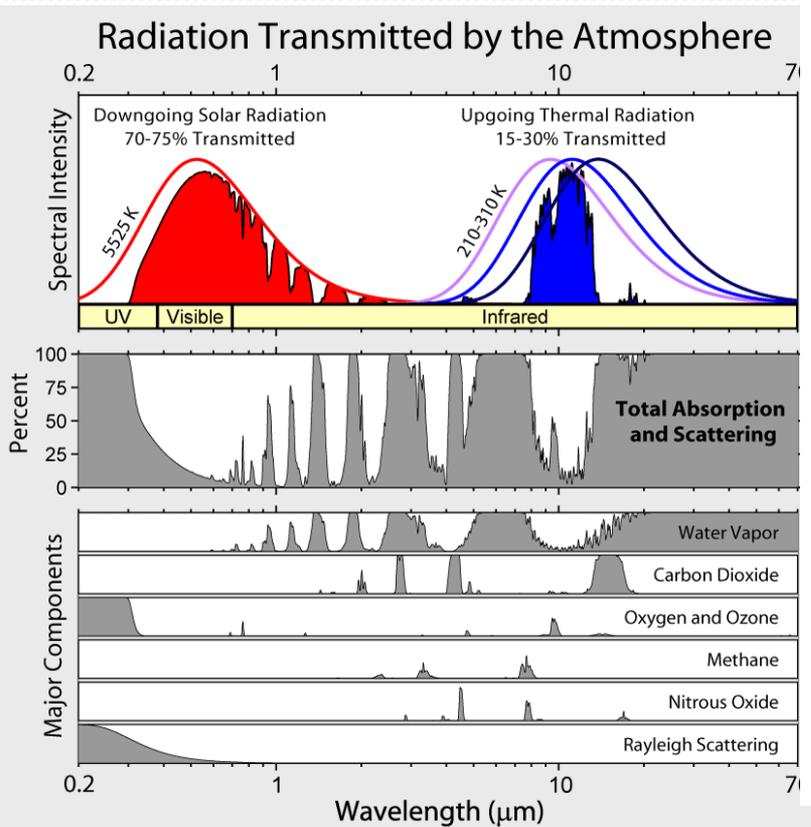
## Bandas de sensores en ventanas de transmisión

Los sensores captan información 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 distintas regiones del espectro



Efectos de los principales componentes de la atmósfera.

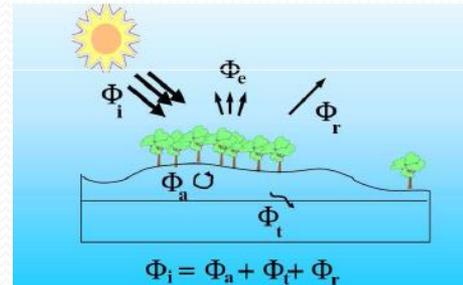
Transferencia radiativa al tope de la atmósfera, a nivel del mar y cuerpo negro (5900 K).

# Términos y unidades de medida de la radiación electromagnética

## Magnitudes radiométricas

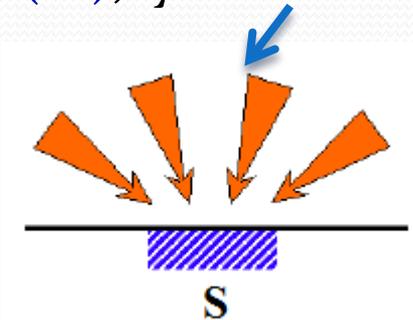
- ❑ **Energía radiante (Q):** energía transmitida en forma de REM (**joule, J**)
- ❑ **Flujo radiante ( $\phi$ ):** energía radiante transmitida por unidad de tiempo. No aporta ninguna información de la distribución de la radiación, ni de la dirección sobre una superficie.

$$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{J/s, Watt, W})$$



- ❑ **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)**

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



cuando se emite por la fuente

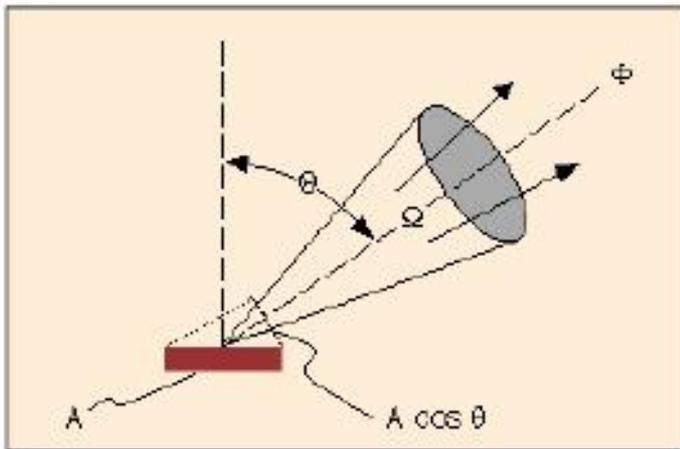
la radiación se recibe sobre la superficie

## Ángulo sólido

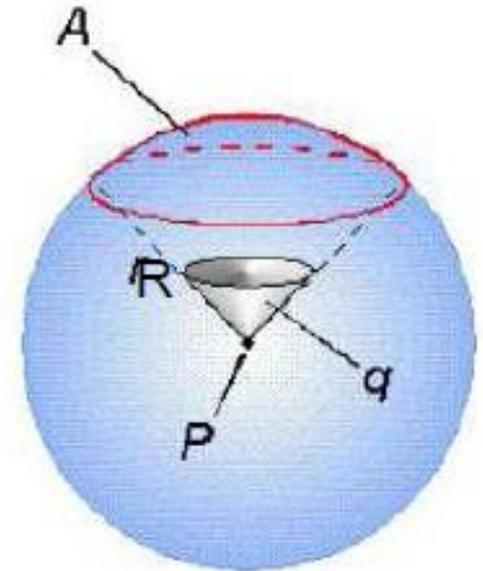
El concepto de ángulo sólido de un cono es fundamental para dos magnitudes cuantitativas del flujo radiante.

El ángulo cónico subtendido por una parte de una superficie esférica de área  $A$ .

La unidad de ángulo cónico o ángulo sólido es el *estereorradián (sr)*. Es adimensional.



$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

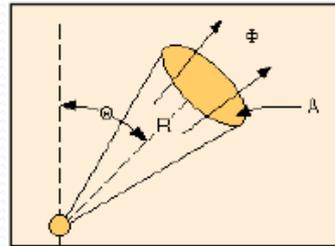


# Intensidad-radiancia

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

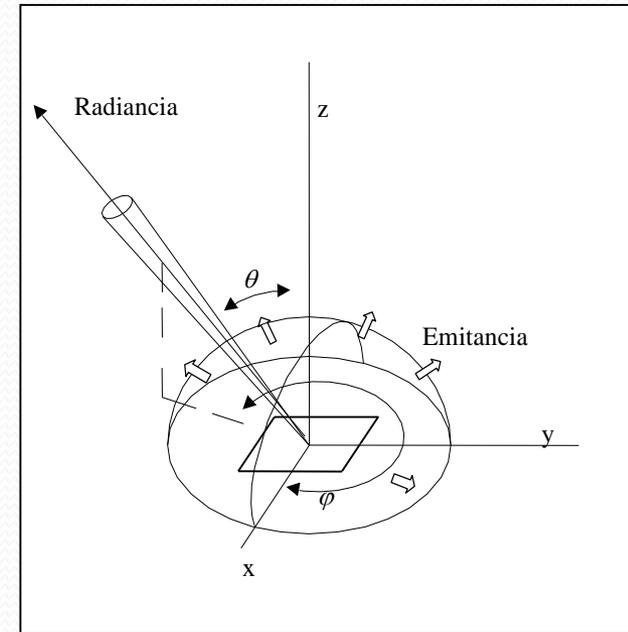
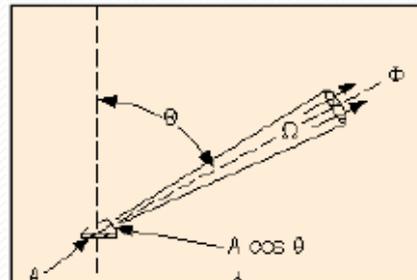
□ **Intensidad radiante (I)**: flujo radiado por unidad de ángulo sólido (**FUENTES PUNTUALES**)

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \frac{d^2Q}{dt d\Omega} \quad (\text{W/sr})$$



□ **Radiancia (L)**: flujo radiativo procedente de una unidad de área, en una dirección dada, por unidad de ángulo sólido

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



Todas las magnitudes anteriores dependen, normalmente, de la longitud de onda,  $\lambda$ , por lo que deben entenderse como **cantidades radiométricas espectrales**. Así por ejemplo, en el caso particular de la radiancia, que es la que mide el sensor, hablaríamos de **radiancia espectral**,  $L_\lambda$ , con unidades **(W/m<sup>2</sup>sr  $\mu$ m)**.

Los sensores miden esa radiancia espectral en cada banda.

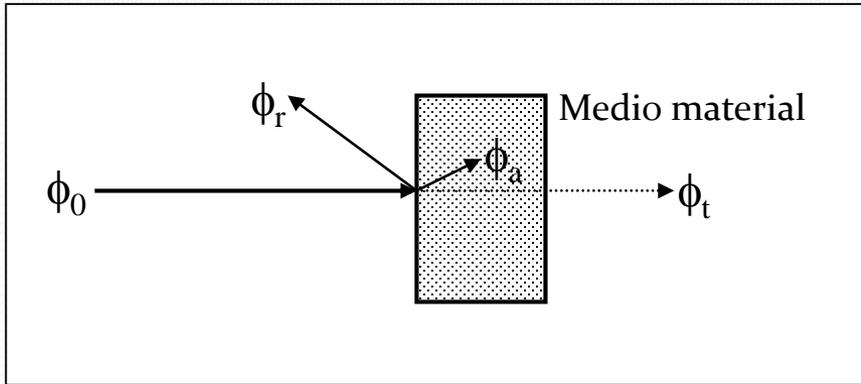
# Tabla de unidades para recordar

Concepto	Simbolo	Fórmula	Unidad de medida
Energía radiante	$Q$	—	Julios (J)
Flujo radiante	$\phi$	$\delta Q/\delta t$	Vatios (W)
Emitancia	$M$	$\delta\phi/\delta A$	$W\ m^{-2}$
Irradiancia	$E$	$\delta\phi/\delta A$	$W\ m^{-2}$
Intensidad radiante	$I$	$\delta\phi/\delta\Omega$	$W\ sr^{-1}$
Radiancia	$L$	$\delta\phi/\delta A\ \cos\ \theta$	$W\ m^{-2}\ sr^{-1}$
Radiancia espectral	$L_\lambda$	$\delta L/\delta\lambda$	$W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$
Emisividad	$\epsilon$	$M/M_n$	
Reflectividad	$\rho$	$\phi_r/\phi_i$	
Absortividad	$\alpha$	$\phi_a/\phi_i$	
Transmisividad	$\tau$	$\phi_t/\phi_i$	

- sr: Estéreo-radián, medida del ángulo sólido.
- $\mu m$ : Micrómetro o micra ( $10^{-6}$  metros).
- $M_n$ : Emitancia de un cuerpo negro a la misma temperatura.
- $\phi_i$ : Flujo incidente.
- $\phi_r$ : Flujo reflejado.
- $\phi_a$ : Flujo absorbido.
- $\phi_t$ : Flujo transmitido.
- $\theta$ : Ángulo formado por el flujo y la dirección normal.

Fuente: Chuvieco, 2008

## Magnitudes relativas (adimensionales) que surgen de la interacción materia-radiación



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

❑ **ABSORTIVIDAD ( $\alpha$ )**: relación entre energía absorbida y energía incidente

❑ **EMISIVIDAD ( $\varepsilon$ )**: relación entre la emitancia de la superficie (M) y la de un emisor perfecto (cuerpo negro) a la misma temperatura

❑ **TRANSMISIVIDAD ( $t$ )**: relación entre energía transmitida y energía incidente

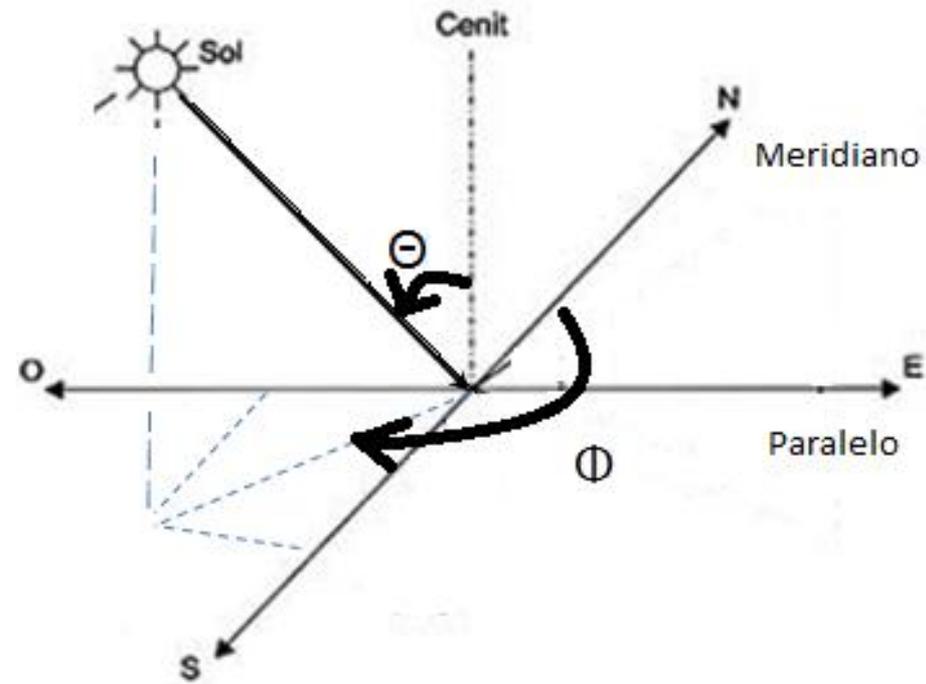
❑ **REFLECTIVIDAD ( $\rho$ )**: relación entre energía reflejada y energía incidente

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

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

## Otros conceptos de interés...

- Los ángulos cenital y azimutal permiten definir la posición del sol y del satélite. El ángulo cenital solar (zenith ó  $\Theta$ ) queda definido entre el cenit y la dirección del Sol. El ángulo azimutal ( $\Phi$ ), entre la dirección del norte y la proyección de la dirección del Sol 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

## Leyes de la radiación electromagnética

Estas leyes permitirán una mejor interpretación espectral de los objetos.

**Ley de Planck:** expresa la emitancia espectral de un **cuerpo negro**:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

(W/m<sup>2</sup> sr μm)

$$C_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^8 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^4 \text{ Sr}^{-1} ;$$

$$C_2 = hc/k = 1,4388 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$$

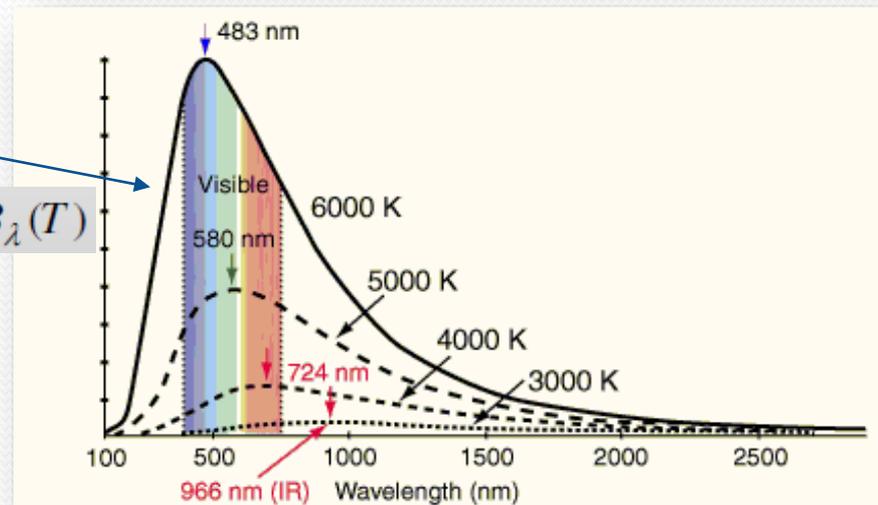
**CUERPO NEGRO:** es un cuerpo ideal, emite toda la energía incidente (**EMISOR PERFECTO**)

Cualquier cuerpo que tenga una temperatura mayor al cero absoluto (-273 °C) radia energía. Más energía y a menor  $\lambda$  si esa temperatura es mayor.

Crecimiento rápido

$B_{\lambda}(T)$

**Radiancia de un cuerpo negro a la temperatura T**



**Ley de Wien:** indica la  $\lambda$  a la que un cuerpo negro emite su máxima energía, según su temperatura. Se deduce a partir de la ley de Planck para una determinada temperatura T:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (\mu\text{m})$$

**Relación entre  $\lambda_{\max}$  y T**

**Ejercicios**

- Qué longitudes de onda (bandas) utilizaría para detectar energía emitida por la superficie?
- A qué longitud de onda se encuentra la máxima emitancia del Sol ( $\approx 6000\text{K}$ )?

**Ley de Stefan-Boltzmann:** establece que la emitancia de un cuerpo negro para todas las  $\lambda$  es una función de la cuarta potencia de la temperatura del citado cuerpo.

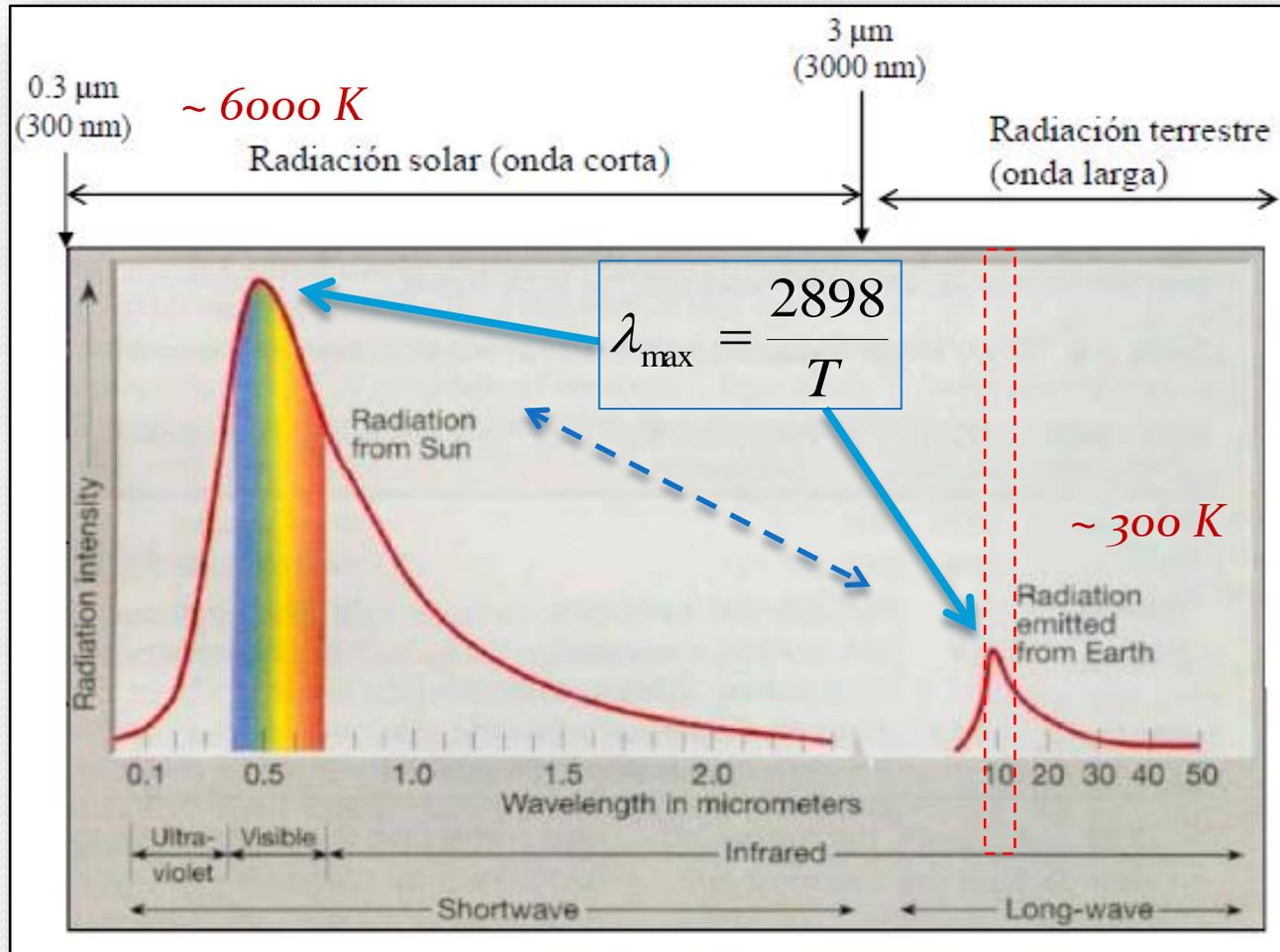
$$M_B = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$M_B = \text{W/m}^2$$

Para un cuerpo negro la radiación emitida sólo está determinada por T

## Radiación emitida desde el Sol y desde la Tierra.



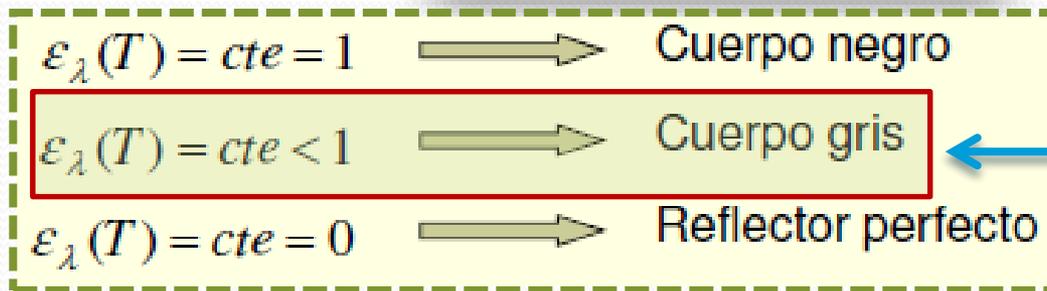
## EMISIVIDAD

Importante el concepto de emisividad en sistemas naturales

Los sistemas naturales no se comportan como cuerpos negros perfectos, la energía absorbida y emitida es menor que la de un cuerpo negro a su misma temperatura.

Cualquier cuerpo a una temperatura determinada le corresponde una radiancia  $L_{(T)}$ , que en función de la del cuerpo negro  $B_{(T)}$ , se puede escribir como:

$$L_{\lambda}(T) = \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T)$$



**SUPERFICIES NATURALES**

$$0 < \varepsilon < 1$$

LEY DE KIRCHHOFF: todo cuerpo en equilibrio térmico y radiativo tiene una eficiencia emisiva igual a su eficiencia absorbente, es decir:

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

## Ejercicio

### Ley Stefan-Boltzmann (emitancia de cuerpo negro)

$$M_B = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

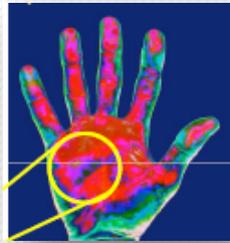
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

$$M_B = \text{W/m}^2$$

Superficie naturales:  $\epsilon < 1$

$$M_n = \epsilon M_B$$

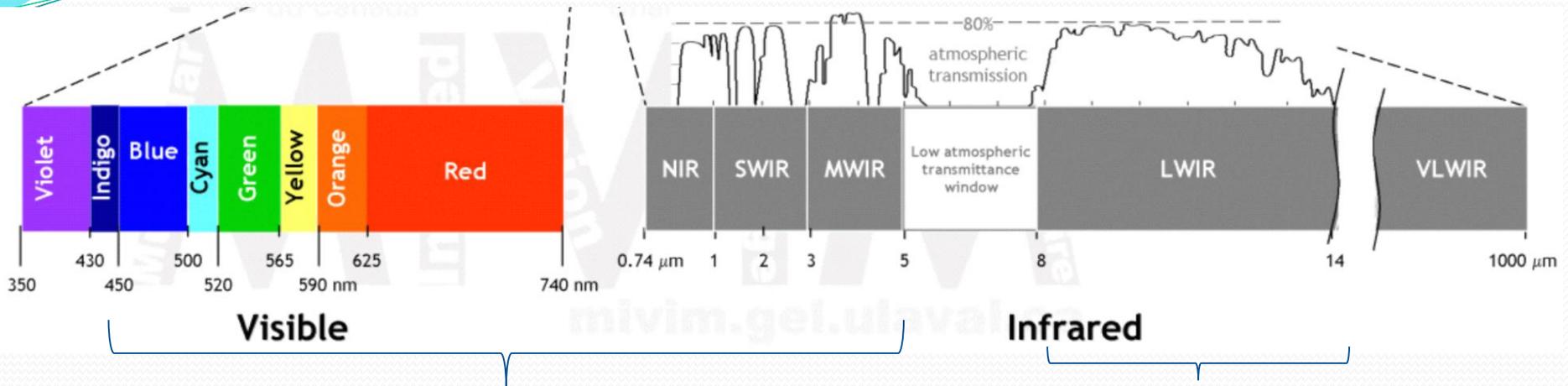
- 1) Cuánto emite una mano (36 °C) suponiéndola cuerpo negro?
- 2) Cuánto emite realmente según la tabla de emisividad de la derecha?
- 3) Si con un sensor medimos la misma emitancia, en qué caso la mano estará más caliente?



### Table of emissivity values of common materials

Aluminium*	0,30
Asbestos	0,95
Asphalt	0,95
Basalt	0,70
Brass*	0,50
Brick	0,90
Carbon	0,85
Ceramic	0,95
Concrete	0,95
Copper*	0,95
Dirt	0,94
Frozen food	0,90
Hot food	0,93
Glas (plate)	0,85
Ice	0,98
Iron*	0,70
Lead*	0,50
Limestone	0,98
Oil	0,94
Paint	0,93
Paper	0,95
Plastic**	0,95
Rubber	0,95
Sand	0,90
<b>Skin</b>	<b>0,98</b>
Snow	0,90
Steel*	0,80
Textiles	0,94
Water	0,93
Wood***	0,94

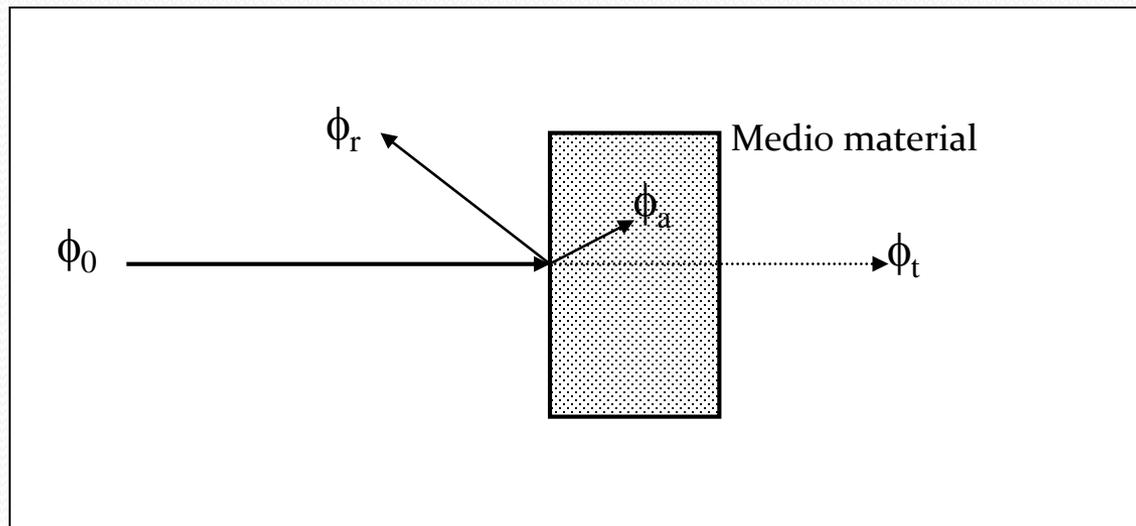
# Espectro electromagnético-Espectro solar y térmico



*Espectro solar (Energía reflejada)*

*Espectro térmico (Energía emitida)*

## Espectro solar

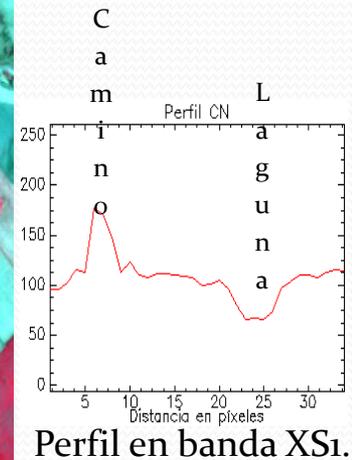
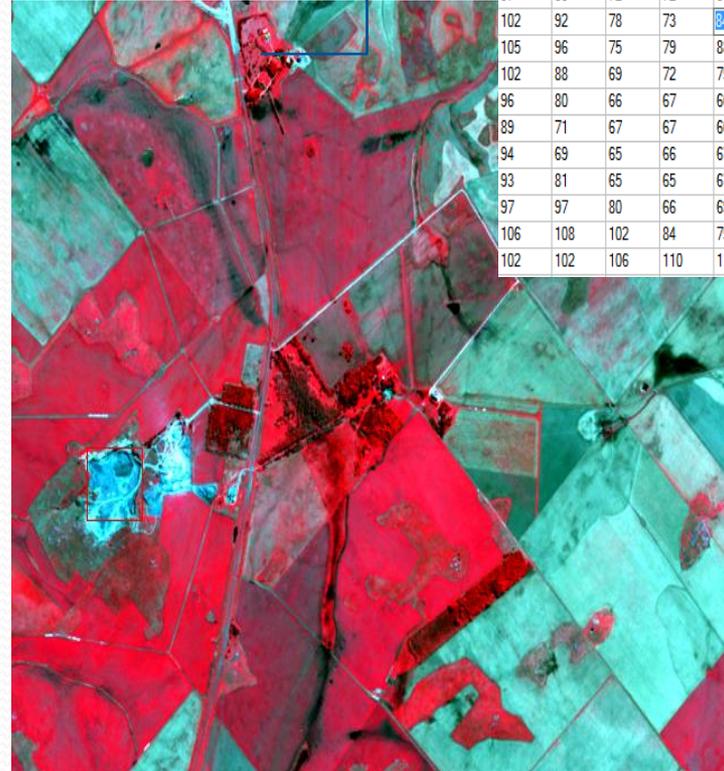


## *Campo espectral de trabajo*

El curso se restringe al uso de sensores pasivos a bordo de diferentes misiones de satélite. La región espectral en la que se trabajará está comprendida entre 0,4 y 15µm. Dentro de este ámbito, se hará énfasis en el análisis cuantitativo de la imagen digital, en particular el procesamiento para la identificación de objetos y análisis radiométrico.

Matriz de datos

102	104	106	107	110	108	107	107	106
107	109	109	109	109	107	107	109	109
110	104	103	103	101	102	106	109	110
107	98	97	96	96	103	108	112	114
104	103	98	99	97	105	112	111	113
108	106	101	92	92	103	110	107	105
101	94	83	77	85	99	107	110	106
97	83	72	72	80	95	108	113	109
102	92	78	73	84	96	105	113	110
105	96	75	79	88	95	105	114	112
102	88	69	72	75	82	101	108	109
96	80	66	67	66	74	97	104	110
89	71	67	67	66	73	92	100	103
94	69	65	66	67	70	92	100	97
93	81	65	65	67	67	96	104	101
97	97	80	66	69	71	90	107	108
106	108	102	84	75	82	94	105	111
102	102	106	110	111	102	100	103	106

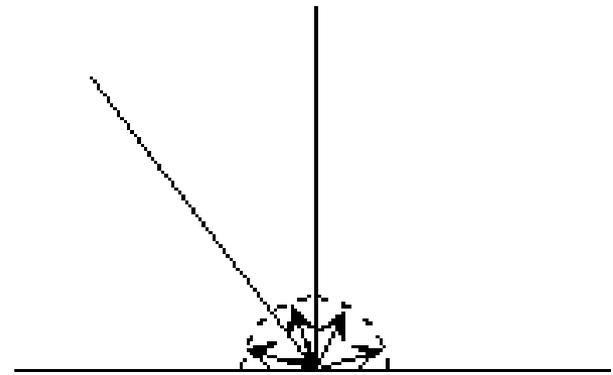
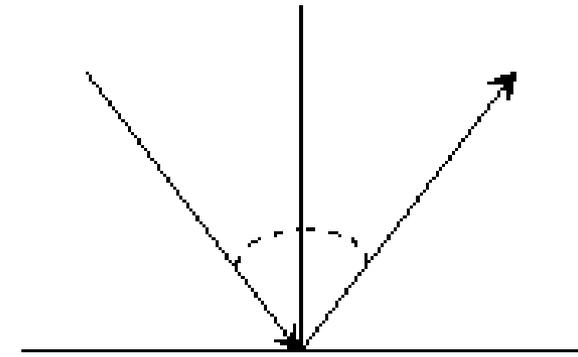


Composición falso color compuesto (XS<sub>3</sub>, XS<sub>2</sub>, XS<sub>1</sub>) SPOT 5 (área de Chillar, provincia de Buenos Aires, setiembre de 2012).

## Superficie especular y lambertiana

- **Especular:** es la superficie ideal en la que se cumple perfectamente la ley de la reflexión (ángulo incidente = ángulo reflejado). Ej.: nieve, algunos materiales de construcción.
- **Lambertiana:** es la superficie, también ideal, que refleja la radiación incidente de manera uniforme en todas las direcciones. Ej.: puede ser zona rocosa, vegetación.

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.



## *Firmas espectrales*

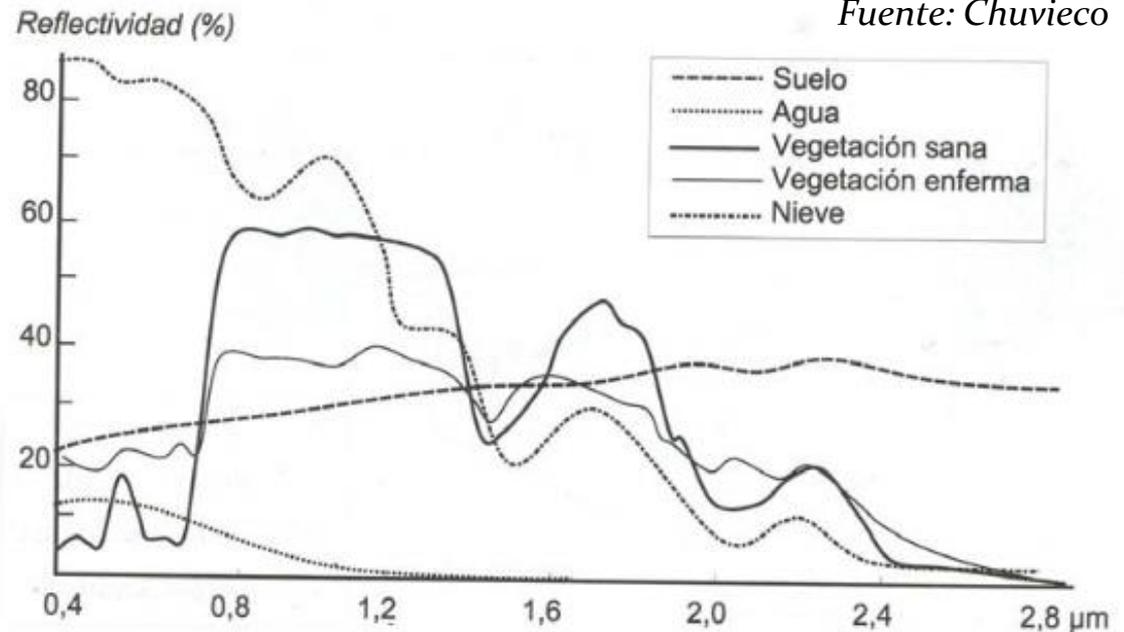
La energía reflejada y posteriormente recibida por el sensor depende de varios factores como:

- condiciones atmosféricas
- geometría de la observación
- homogeneidad de las cubiertas
- propiedades de los objetos

No obstante estos factores, para distintas cubiertas terrestres se pueden definir curvas típicas de reflectividad en las distintas bandas del espectro solar: firmas espectrales.

## *Firmas espectrales de distintas superficies*

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



Fuente: Chuvieco

En las próximas diapositivas se darán detalles específicos de las diferentes características de las firmas espectrales (algunas, medidas en Tandil).

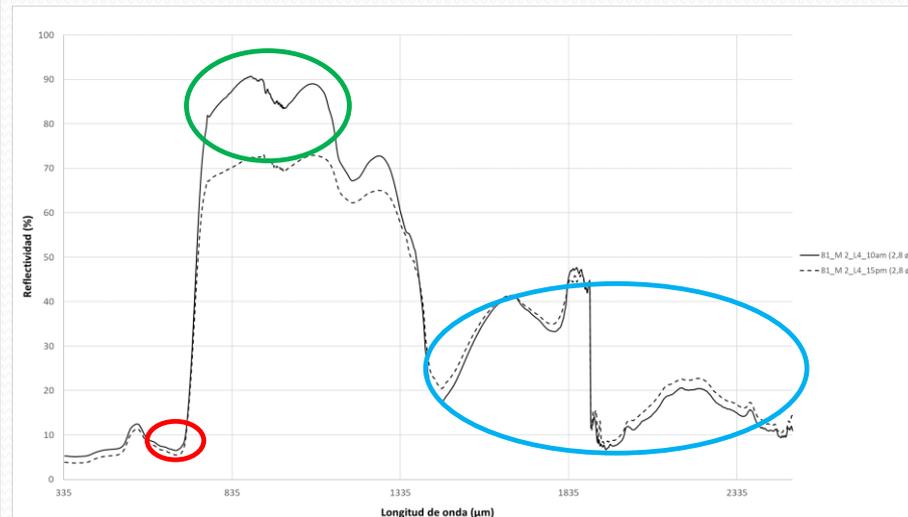
# Vegetación

- Presenta reducida reflectividad en las bandas del visible, con un máximo relativo en la región del verde ( $0.55 \mu\text{m}$ ). Esto es debido al efecto absorbente de los pigmentos fotosintéticos de las hojas. De éstos, la clorofila absorbe en la zona del rojo. Por eso, en vegetación no vigorosa la clorofila no absorbe tanto y la hoja presenta un color amarillo (verde + rojo).
- La estructura celular interna da la elevada reflectividad en el IRC que luego va reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.



Fuente: [speclib.jpl.nasa.gov/library](http://speclib.jpl.nasa.gov/library)

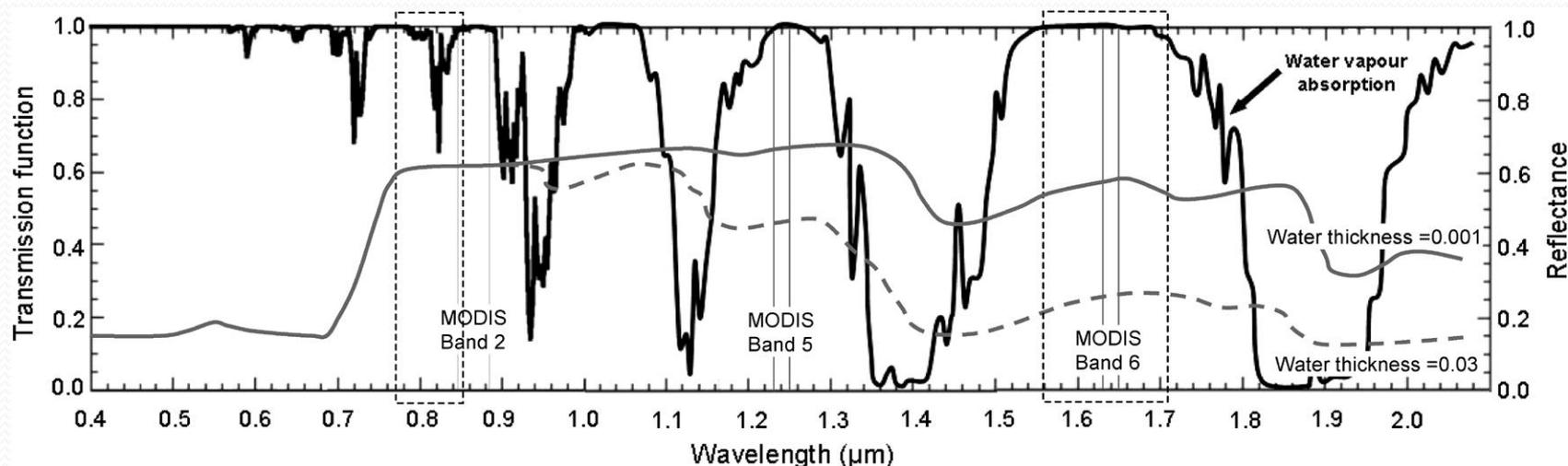
Spectra Vista Corporation HR 1024i



Firma espectral de soja medida a campo con distinto contenido de agua en la hoja.

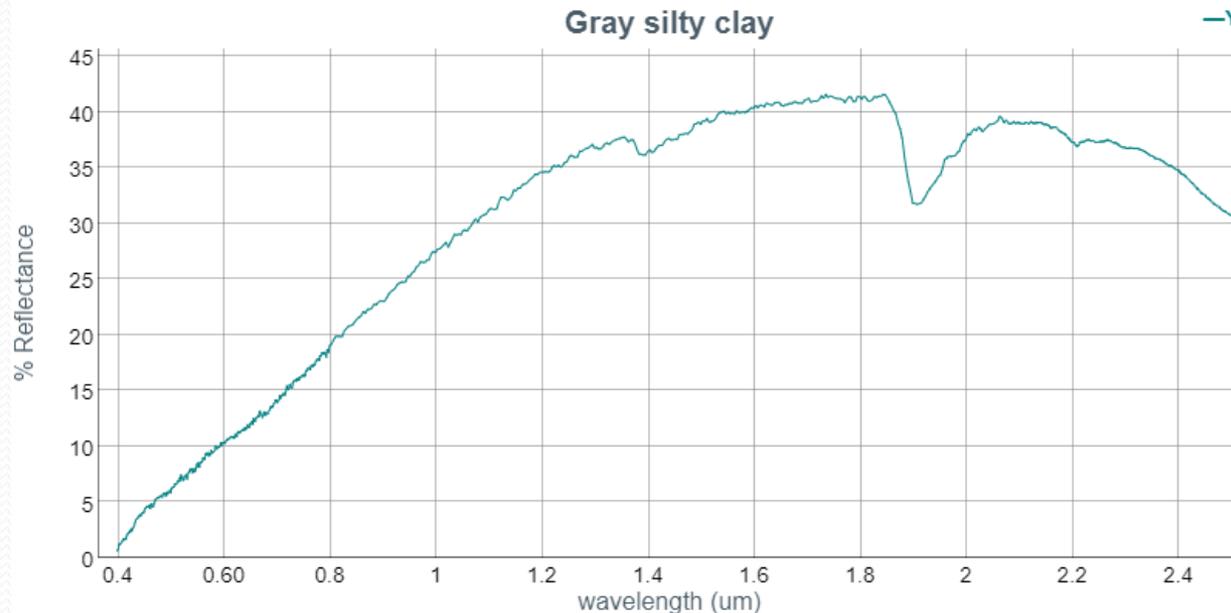


- La alta reflectividad en el IRC (~50 %) permite alto contraste en comparación con las bandas visibles, especialmente rojo y en menor medida en el verde del espectro. Cuanto mayor resulte el contraste, mayor será el vigor de la vegetación.
- Los parámetros cantidad de pigmentos, estructura celular y contenido de agua, manifestados por la respuesta espectral de esa masa de vegetación de la que forman parte, puede servir para discernir entre unas especies y otras, su nivel de desarrollo e incluso su estado sanitario.



# Suelos

- Los suelos desnudos, presentan un comportamiento espectral más uniforme que el de la vegetación. La curva espectral que presentan es bastante plana y de carácter ligeramente ascendente.
- Los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura y estructura y el contenido en humedad. Por ejemplo, un suelo de origen calcáreo tiende al color blanco, indicando alta reflectividad en todas las bandas visibles, mientras que los arcillosos ofrecen una mayor reflectividad en el rojo, como consecuencia de su contenido en óxido de hierro.

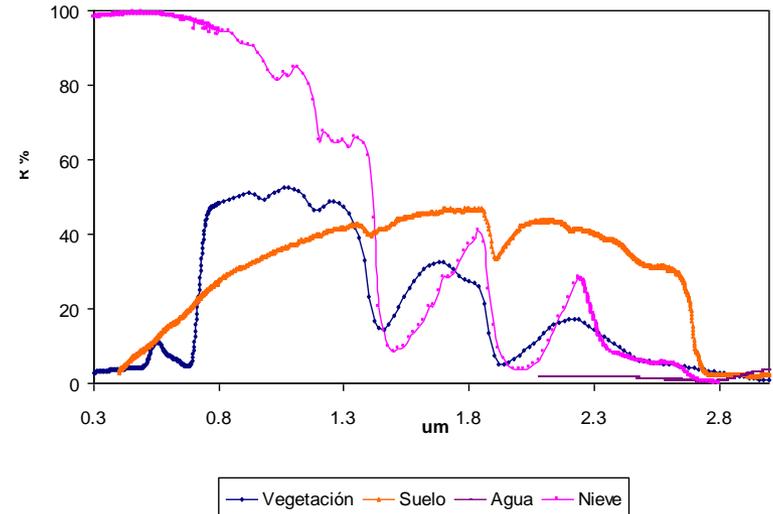
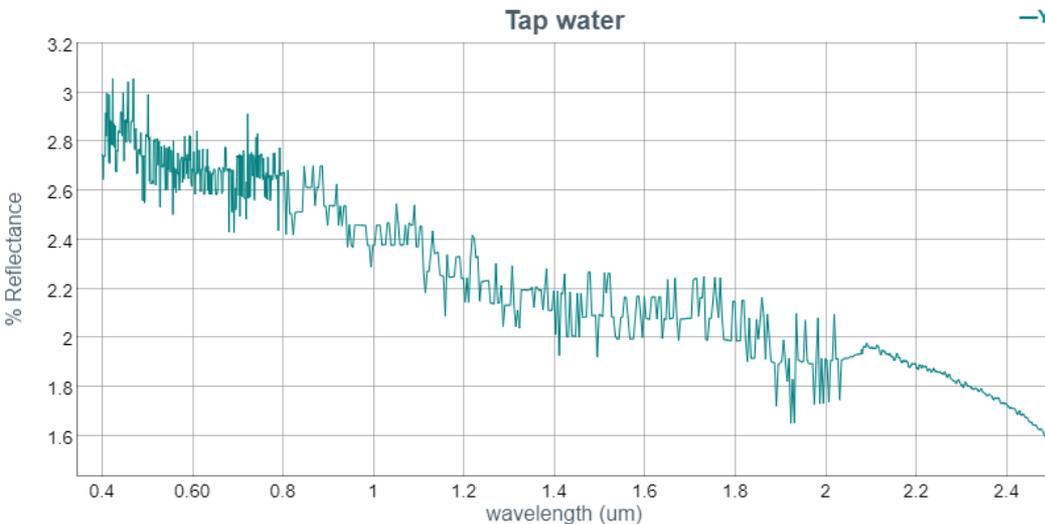


Fuente: [speclib.jpl.nasa.gov/library](https://speclib.jpl.nasa.gov/library)

- La reflectividad espectral presenta mayores valores en suelos de textura gruesa (por ejemplo los suelos con alto contenido de arena), planchados, secos y con bajo contenido de materia orgánica.
- El contenido en humedad es uno de los elementos destacados en la reflectividad en longitudes de onda largas (SWIR) y así, suelos con alto contenido en humedad darán una reflectividad baja en esas longitudes de onda (ej: suelos bajos de la cuenca Tapalqué o Azul) (reflectividad menor al 10 %). Cuanto más seco y planchado resulte un suelo, mayor será su reflectividad.

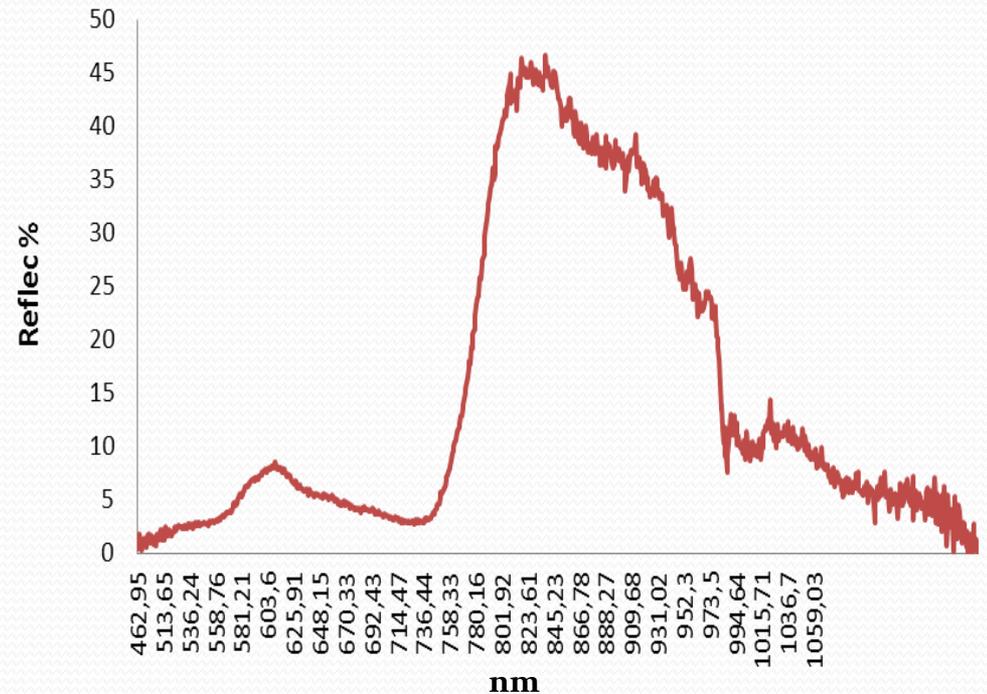
# Agua

- El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe. Por lo tanto presentará una curva espectral plana, baja y de sentido descendente hacia longitudes de onda del SWIR. De todas formas, en aguas poco profundas, la reflectividad aumenta. Los factores que afectan el comportamiento del agua son: profundidad, contenido de material en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes) y rugosidad de la superficie (factor extremadamente importante).
- La nieve presenta un comportamiento completamente diferente al agua, con una reflectividad elevada en las bandas visibles (próximas al 100 %), reduciéndose drásticamente en el IRC y picos en el SWIR.

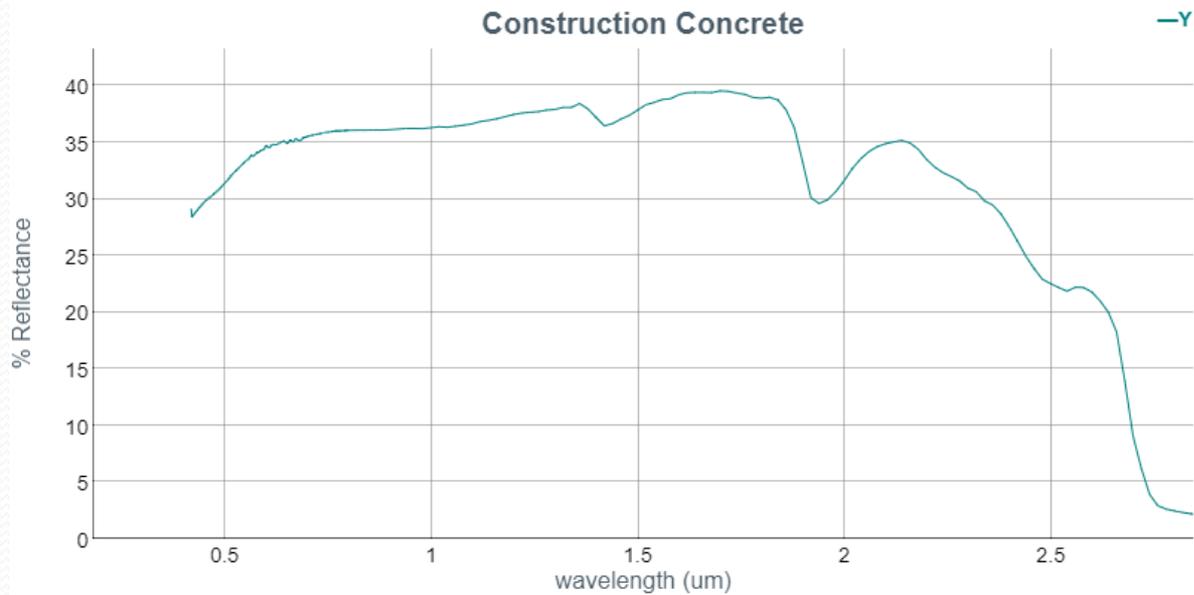
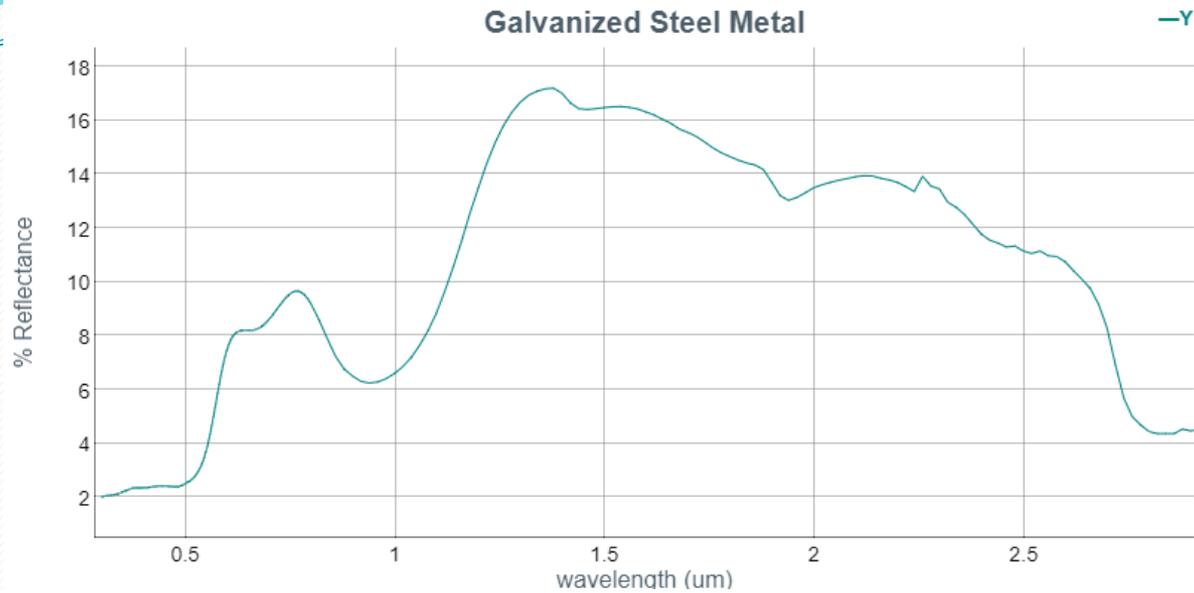


## *Ejemplo de curva de terreno: maíz*

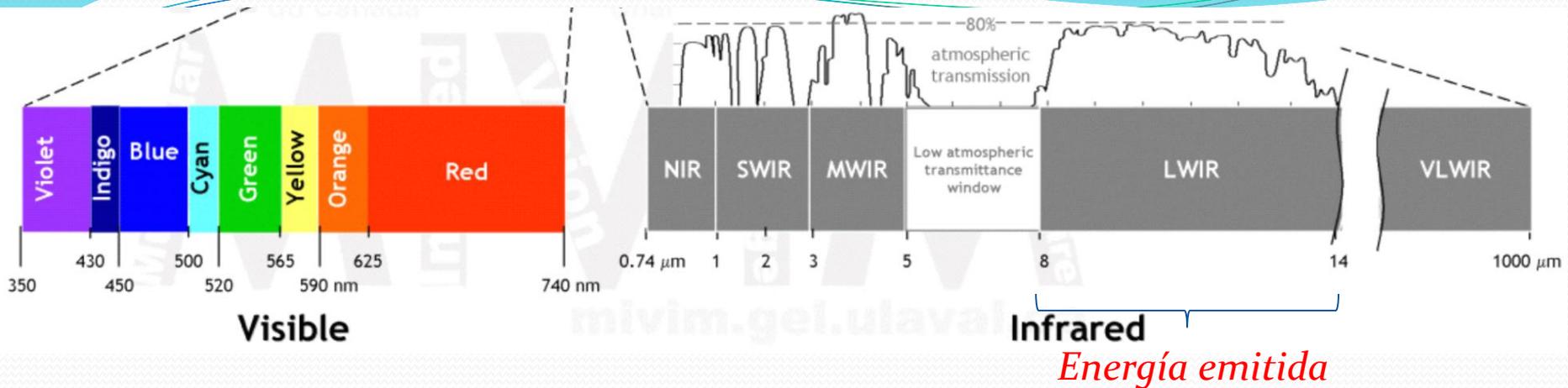
- La firma espectral de la derecha corresponde a un cultivo de maíz (campaña 2014) ubicado en INTA Balcarce. El maíz está bajo riego. Las medidas fueron realizadas con un espectroradiómetro marca Ocean Optic.



# Otros materiales



# Espectro térmico



- La temperatura promedio de la superficie terrestre es de aproximadamente 300 K y su emitancia espectral es máxima en el intervalo 8 - 14  $\mu\text{m}$  (IRT). Esto nos permite detectar la energía que procede de las distintas superficies, pero para ello no se mide la energía reflejada, sino la emitida, en función de la temperatura.
- La vegetación, el suelo y el agua en el térmico tienen un comportamiento de gran interés para estudios ambientales. Actualmente es un sector del espectro con el cual se está logrando un importante aporte para estudios de estrés hídrico en las plantas, para la estimación del flujo de calor sensible y para la estimación de la evapotranspiración (flujo de calor latente) entre otros.

La energía captada por los sensores en el espectro térmico es la energía radiante del cuerpo (emitida según su temperatura y emisividad para esa  $\lambda$ ). A partir de esa energía, se puede calcular la temperatura radiativa del cuerpo o temperatura de superficie ( $T_s$  o LST).

LEY DE KIRCHHOFF: eficiencia emisiva igual a su eficiencia absorbente, es decir:

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

La transmitancia en el térmico se puede considerar casi nula.

## Agua

El agua absorbe gran parte de la radiación incidente (mayor reflectancia por ejemplo con algas, sólidos en suspensión, cuerpos poco profundos).

Su emisividad es alta (0.93-0.99).

Debido a su alto calor específico e inercia térmica, los cuerpos de agua tendrán una menor  $T_s$  diurna que otras coberturas.

La temperatura superficial de cuerpos de agua, incluso el océano, es objeto de estudio en diferentes campos (eutrofización, corrientes oceánicas, procesos océano-atmosféricos).

## Suelos

Suelos arenosos tendrán una menor inercia térmica que, por ejemplo, suelos arcillosos.

Pero fundamentalmente su comportamiento está dado por el contenido de agua. Mayor contenido de agua produce menores  $T_s$  y mayor inercia térmica (día-noche) que suelos secos. La  $T_s$  en suelos es un indicador de la evaporación.



Alta  $T_s$ , menor inercia térmica



Baja  $T_s$ , mayor inercia térmica y evaporación

## Vegetación

Posee alta inercia térmica. Se mostrará más fría que otras coberturas como suelo o áreas urbanas (dependiendo su  $T_s$  del estado de humedad y salud de la vegetación).

La  $T_s$  de la vegetación es indicadora de la evapotranspiración.

*Ecuación de balance de energía:*

$$R_n = LE + H + G$$

R<sub>n</sub>: radiación neta

LE: flujo de calor latente o evapotranspiración

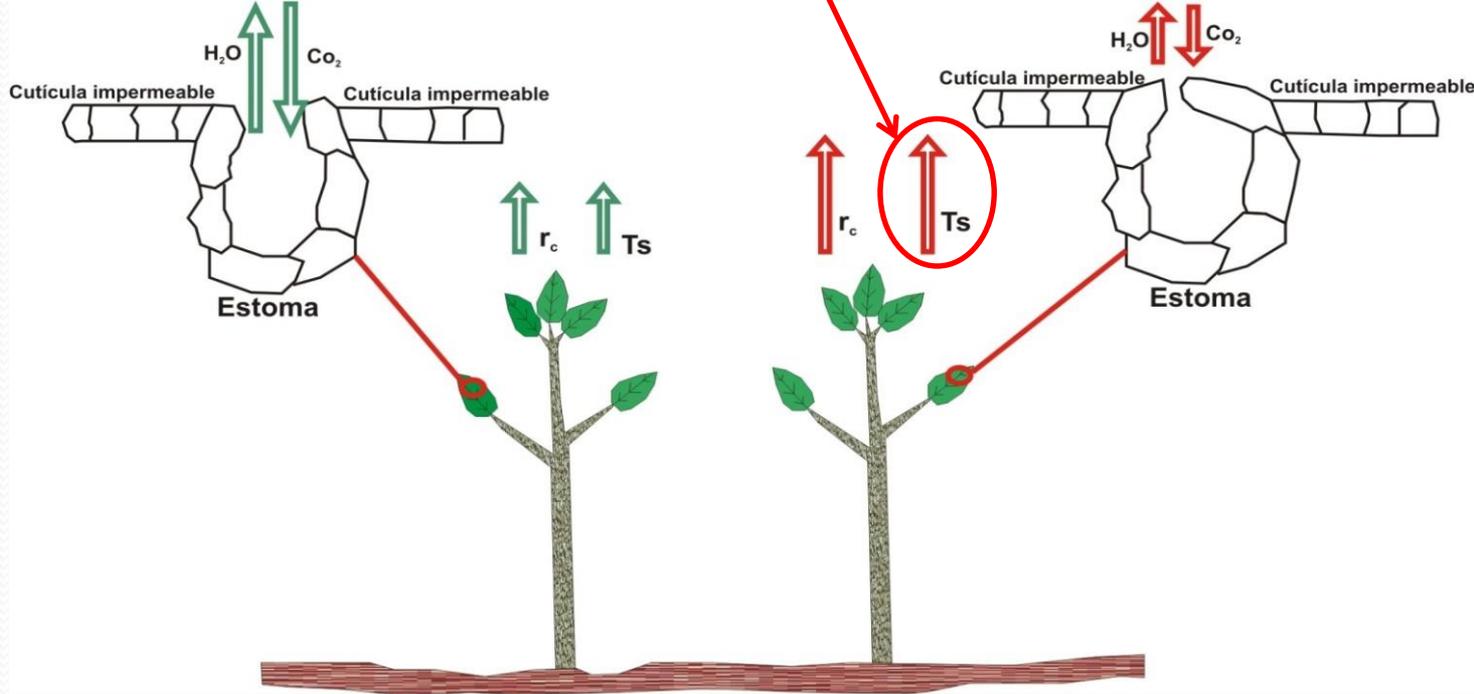
H: flujo de calor sensible

G: flujo de calor en el suelo

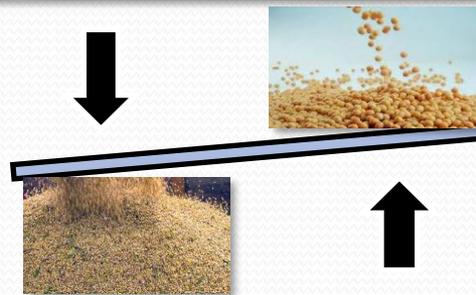
Captada desde satélite (IRT)

Alta disponibilidad de Hs

Baja disponibilidad de Hs



Productividad



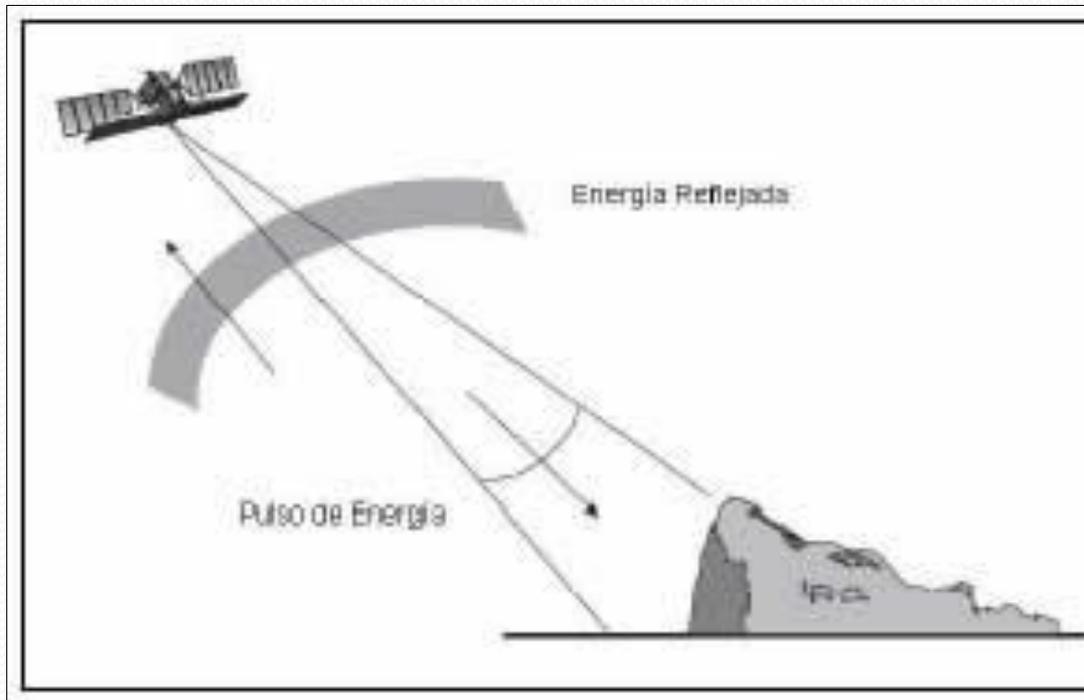
## Microondas

Operan en  $\lambda$  entre 0.5 y 75 cm.

La atmósfera es transparente a estas longitudes de onda.

Están asociadas a poca energía, por lo que los sistemas pasivos en general brindan baja resolución (varios km).

Los sistemas activos emiten pulsos de energía con una frecuencia y duración muy precisa y captan la energía retro-dispersada. Permiten monitorear de noche. Resoluciones: centímetros a 30-90m.



Fuente: Marchionni y Cavayas, 2014

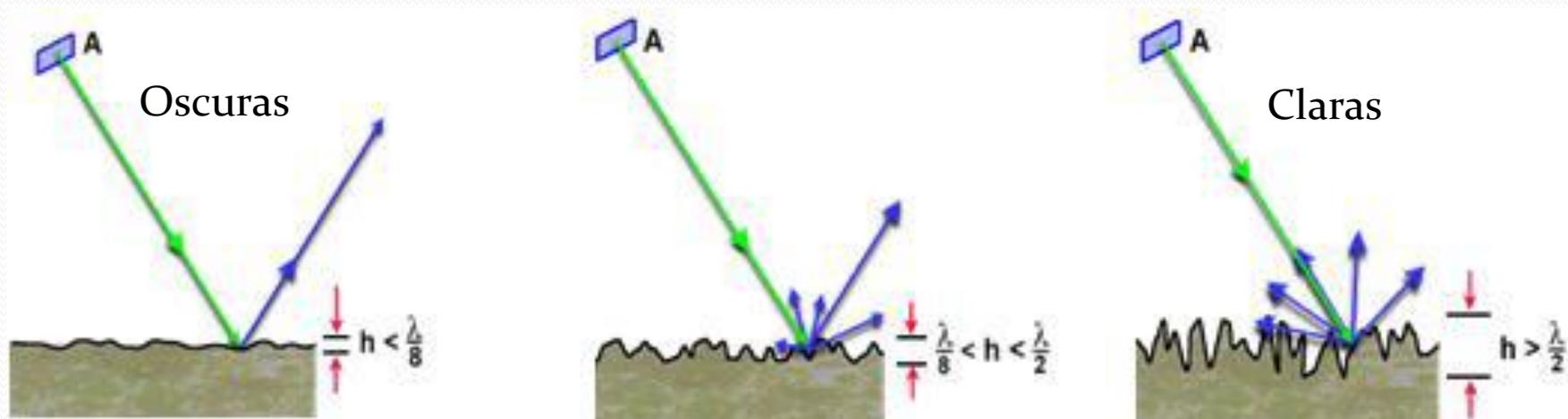
Cada píxel en la imagen de radar representa la intensidad de la radiación retrodispersada, dependiente del coeficiente de retro-dispersión de esa área.

Ese coeficiente depende de varios factores:

**-rugosidad y morfología del terreno** (pendiente y orientación del ángulo de incidencia del haz)

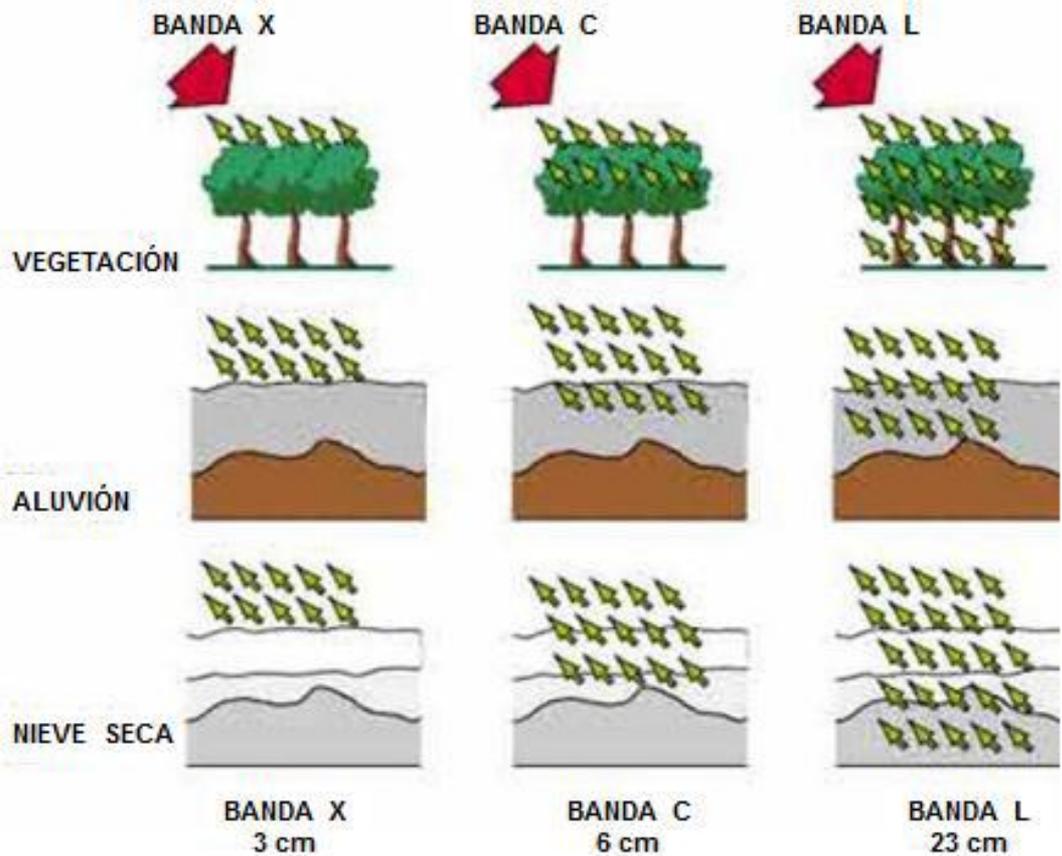
Incide en la señal de retorno. La rugosidad depende de  $\lambda$  y la altura de la cubierta ( $h$ ).

En base al tiempo en que se reciben los ecos se puede calcular la geometría del terreno (relieve y estructura de la vegetación).



Fuente: Masuelli, 2010.

Según la longitud de onda a la que trabajen, los radares pueden penetrar en la superficie (vegetación y suelo).



Fuente: SARMAP (2008)

### **-ángulo de incidencia del haz**

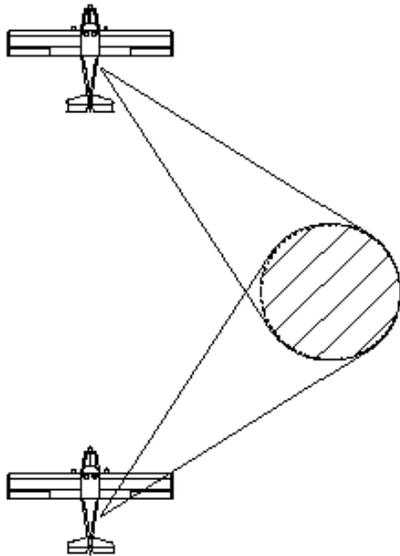
A mayor ángulo, en general, se corresponde un menor pulso de retorno (menor rugosidad y dispersión) y mayor penetración en vegetación.

### **-características eléctricas de los objetos**

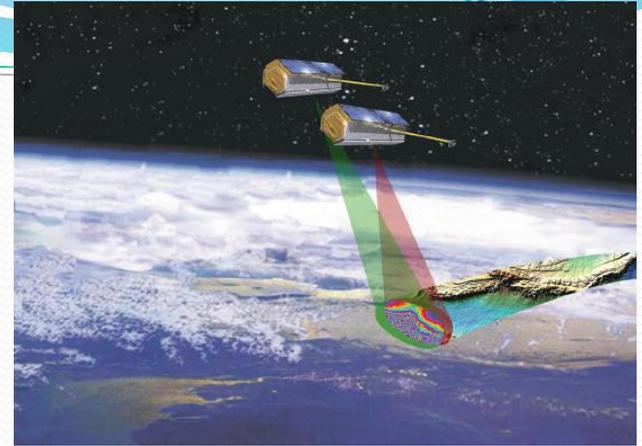
La constante dieléctrica de un objeto refiere a la conductividad y reflectividad.

Materiales secos tienen baja constante dieléctrica en microondas (3-8) con respecto al agua (80). Los objetos muy húmedos aparecerán en tonos claros, excepto cuerpos de agua sin olas. Brindan información del contenido de agua.

La técnica de interferometría (señal de retorno medida por 2 antenas separadas) es la base para la obtención de DEM (ej.: SRTM)



Ejemplo de interferometría



Interferometría TerraSAR



DEM de TerraSAR-X (16 m-1 m resolución)

Más sobre DEM de alta resolución:

<http://www.intelligence-airbusds.com/worlddem/>

<http://www.intelligence-airbusds.com/en/5646-terrasar-x-image-products>