Ciências ULisboa

Deteção remota e processamento Imagem

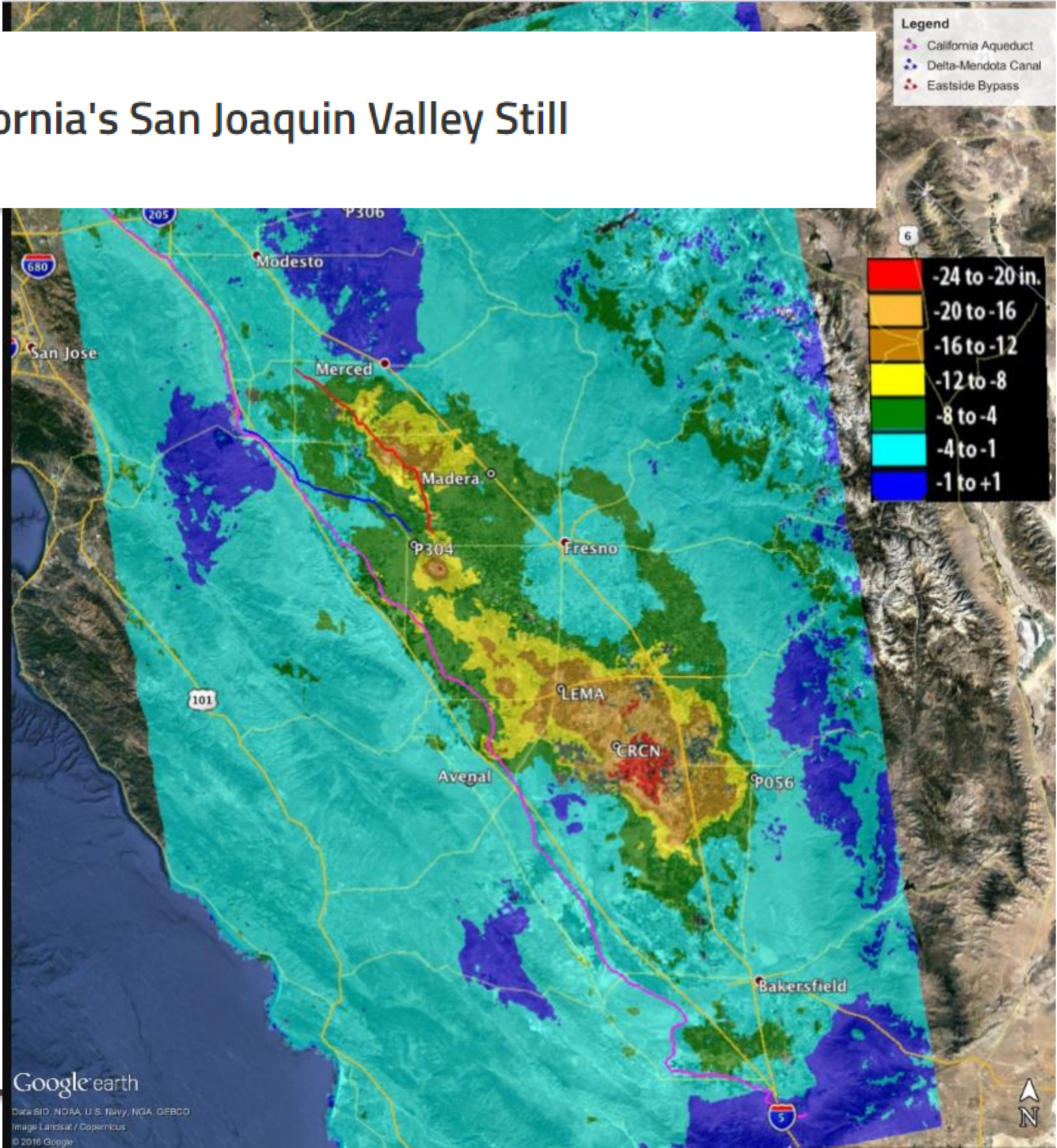
Princípios Físicos da Deteção Remota

Feb. 28, 2017

NASA Data Show California's San Joaquin Valley Still Sinking

Since the 1920s, excessive pumping of groundwater at thousands of wells in California's San Joaquin Valley has caused land in sections of the valley to subside, or sink, by as much as 28 feet (8.5 meters).

The subsidence maps in the new report were created by analyzing satellite data from the European Space Agency's Sentinel-1A satellite from March 2015 to Sept. 2016



Sumário

Capitulo 6 – Princípios Físicos da Detecção Remota

- Características da radiação eletromagnética
- Equações de Maxwell
- Polarização das ondas
- Interferência
- Fontes de radiação eletromagnética
- Radiação Solar
- Conversão DN para radiância

Características da Radiação eletromagnética

Os sistemas de deteção remota que abordamos neste curso são sistemas baseados na radiação eletromagnética.

Modelo das Partículas (Planck)

A energia é transportada por fotões, ou quanta, que viajam à velocidade da luz e cuja energia é proporcional à frequência de oscilação.

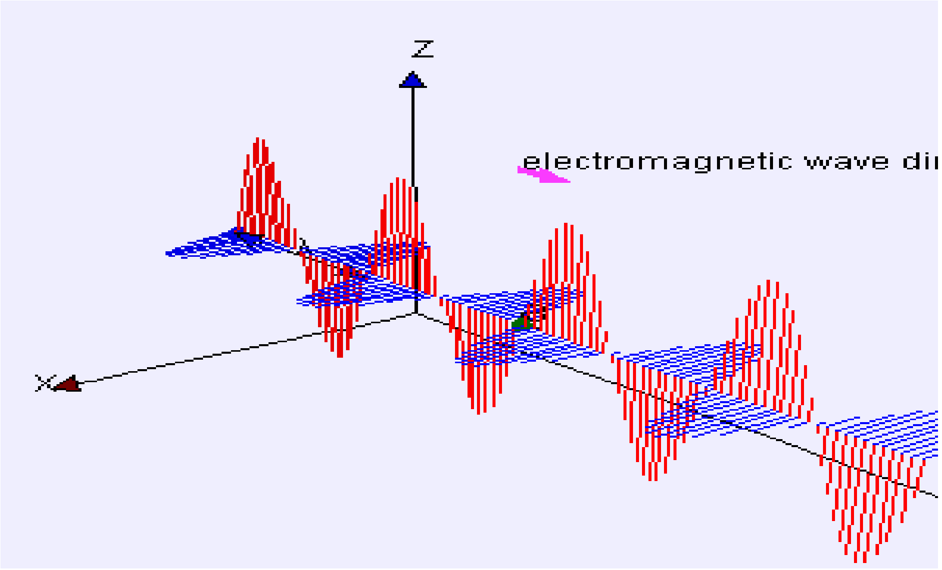
$Q = h\upsilon$ + $c=\lambda\upsilon$ → $Q = \frac{hc}{\lambda}$

Q é a energia de um quantum (em Joules), h a constante de Planck ($6.626X10^{-34}$ J.s)
υ a frequência em Hz (Hertz) e c a velocidade da luz.

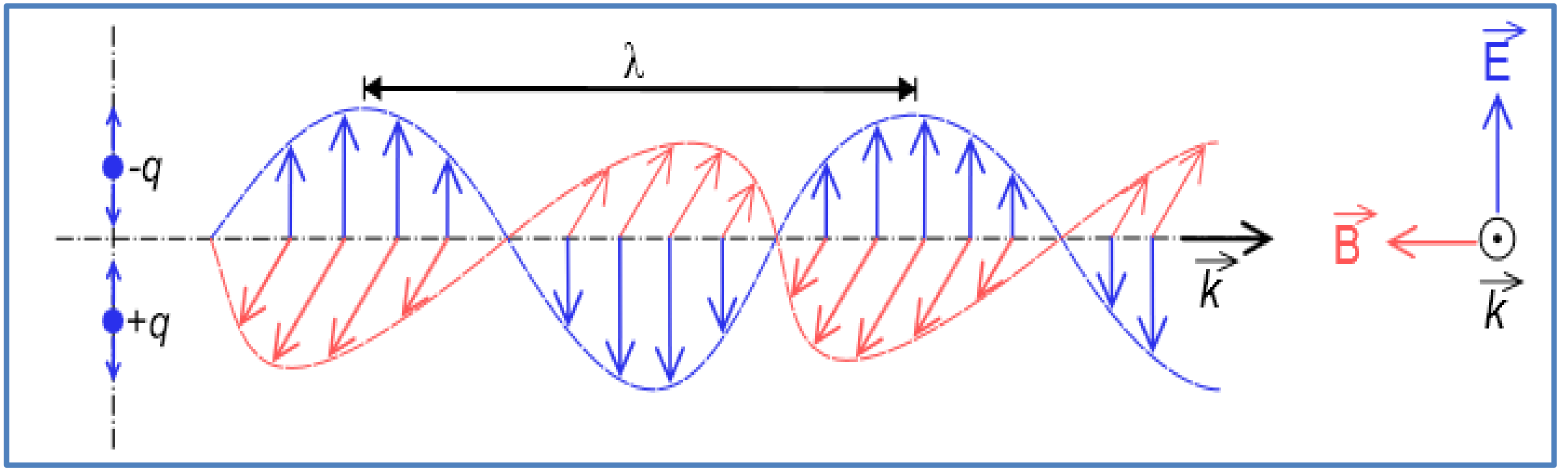
Características da Radiação eletromagnética

Modelo das Ondas

A teoria das ondas postula que a radiação electromagnética é um processo ondulatório composto por um campo elétrico e um campo eletromagnético perpendiculares entre si e à direção de propagação.



Características da Radiação eletromagnética



E : campo eléctrico; **B** : campo magnético; **k** : deslocamento

- Frequência (f): numero de ondas completas que passam por um ponto por unidade de tempo (segundo)

- Período (T): tempo necessário para uma onda dar uma volta completa pelo mesmo ponto

Características da Radiação eletromagnética

Equações d

Publicadas num artigo "On Physical Lines of Force" em 1861 (reescritas por Oliver Heaviside e Willard Gibbs , que em 1884).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial}$$

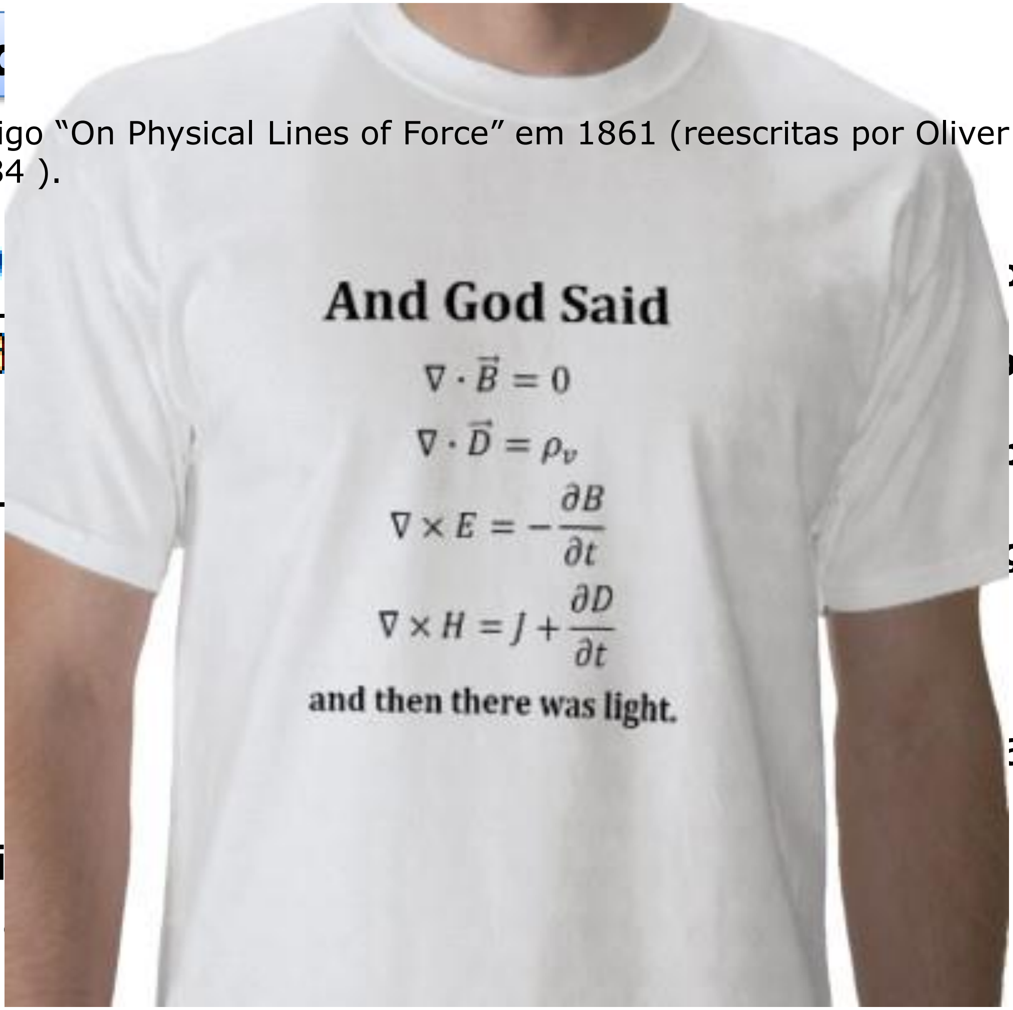
ocamento

o elétrico

$$\nabla \times \mathbf{E} = -$$

o magnético

ção magnética



Em que: a, usado

Como rotaci
j é a densid da carga
elétrica.

Características da Radiação eletromagnética

Para um meio homogéneo e isotrópico distante de qualquer fonte emissora, os campos **D** e **H** estão relacionados com os campos **E** e **B** pelas expressões:

$$D = \varepsilon E \qquad\qquad B = \mu H$$

Em que:

ε é a constante dielétrica ou permitividade elétrica e
μ é a permeabilidade magnética.

No caso do vácuo, que é um meio linear, homogéneo e isotrópico, as constantes elétricas são designadas por ε_0 e μ_0.

Características da Radiação eletromagnética

$$\vec{\nabla}\bullet\vec{E}=0 \Leftrightarrow \frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}=0$$

$$\vec{\nabla}\bullet\vec{B}=0 \Leftrightarrow \frac{\partial B_x}{\partial x}+\frac{\partial B_y}{\partial y}+\frac{\partial B_z}{\partial z}=0$$

$$\vec{\nabla}x\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \Leftrightarrow \begin{vmatrix}\hat{i} & \hat{j} & \hat{k}\\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z}\\ E_x & E_y & E_z\end{vmatrix}=-\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix}B_x\\ B_y\\ B_z\end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{matrix}\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z}=-\frac{\partial B_x}{\partial t}\\ \frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x}=-\frac{\partial B_y}{\partial t}\\ \frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}=-\frac{\partial B_z}{\partial t}\end{matrix}$$

$$\vec{\nabla}x\vec{B}=\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \Leftrightarrow \begin{vmatrix}\hat{i} & \hat{j} & \hat{k}\\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z}\\ B_x & B_y & B_z\end{vmatrix}=\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix}E_x\\ E_y\\ E_z\end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{matrix}\frac{\partial B_z}{\partial y}-\frac{\partial B_y}{\partial z}=\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E_x}{\partial t}\\ \frac{\partial B_x}{\partial z}-\frac{\partial B_z}{\partial x}=\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E_y}{\partial t}\\ \frac{\partial B_y}{\partial x}-\frac{\partial B_x}{\partial y}=\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E_z}{\partial t}\end{matrix}$$

Características da Radiação eletromagnética

As equações de Maxwell podem ser manipuladas e obtemos:

$$-\nabla^2\mathbf{E} = -\frac{\partial\nabla\times\mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right)$$

$$-\nabla^2\mathbf{B} = \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial\nabla\times\mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0\varepsilon_0\left(-\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}\right)$$

$$\nabla\times \quad \nabla\times\mathbf{H} = \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}+\mathbf{j} \qquad \nabla\times\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$$

De onde resulta a equação da onda para o campo elétrico:

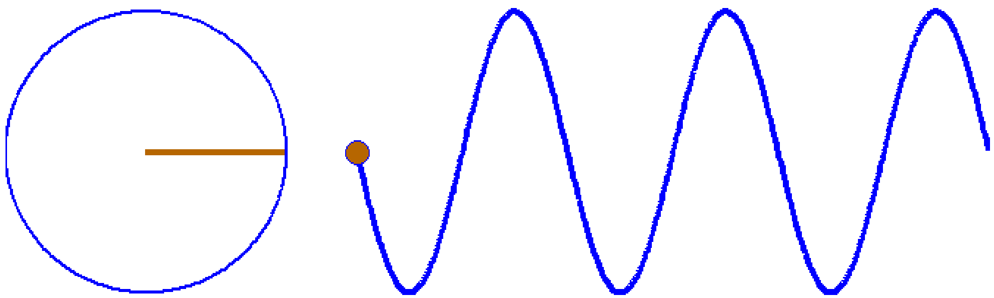
$$\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu_0\varepsilon_0}\nabla^2\mathbf{E} = 0 \;\Rightarrow\; \boxed{\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} - c_0^2\nabla^2\mathbf{E} = 0}$$

$$c_0^2 = \frac{1}{\mu_0\varepsilon_0}$$

$\varepsilon_0 = 8.8541\times10^{-12}$ F·m^{-1}; $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$ H/m $= 1.25663\times10^{-6}$ N/A^2

Ondas eletromagnéticas planas

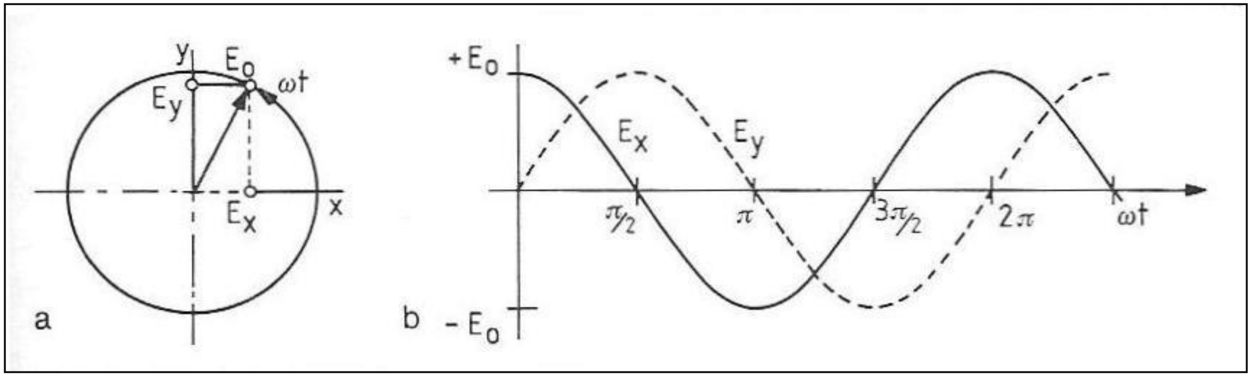
Comecemos por considerar uma oscilação fixa no espaço (sem propagação no espaço).



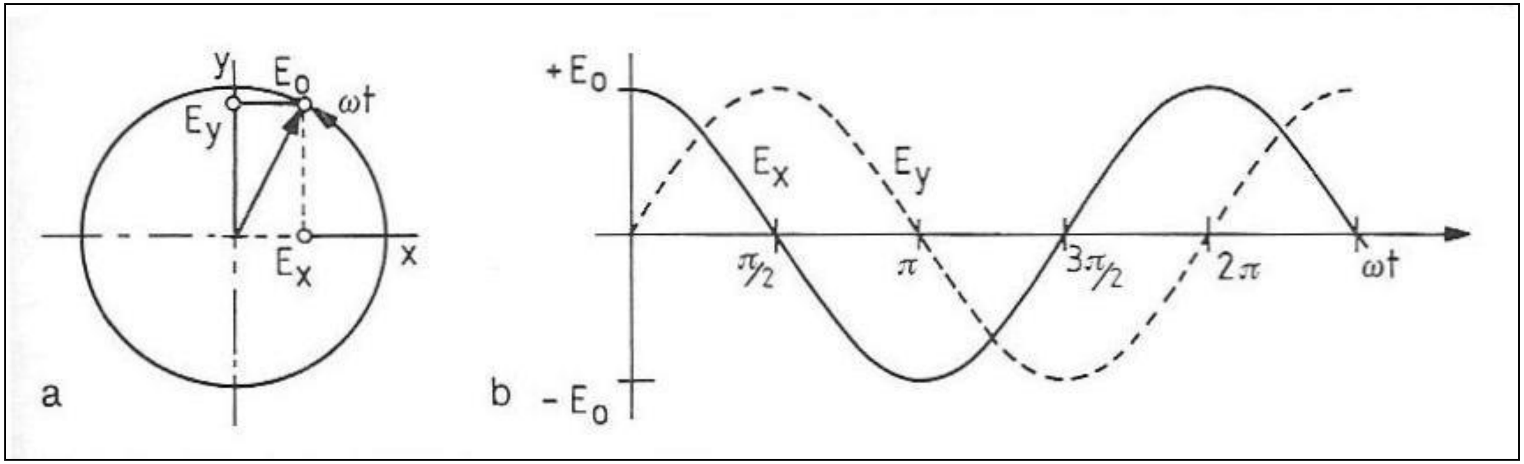
$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

$$c_0^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}$$

$$\frac{d^2 \mathrm{E}}{dt^2} + \omega^2 \mathrm{E} = 0$$



Ondas eletromagnéticas planas



$$\frac{d^2E}{dt^2} + \omega^2 E = 0$$

Em que E é o campo elétrico e ω é uma constante (**frequência angular**). Uma possível solução para esta equação é:

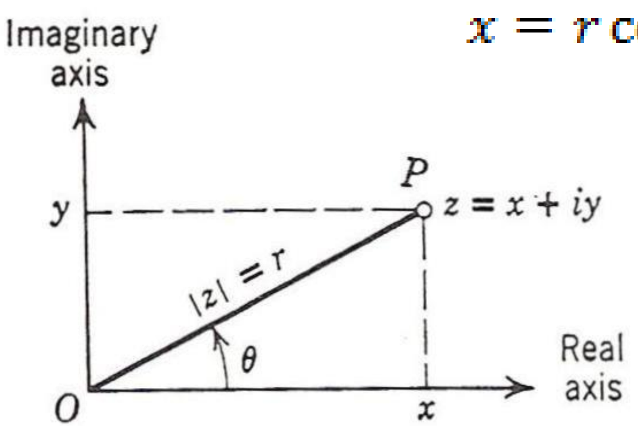
$$E = E_0 \cos \omega t$$

Ondas eletromagnéticas planas

Outra possível solução seria: $\mathrm{E} = \mathrm{E}_0 \sin \omega t$

Para englobar as duas possíveis soluções é usual representar o movimento no plano complexo com o eixo dos xx real e um eixo dos yy imaginário. A solução é:

$$\mathrm{E} = \mathrm{E}_0 \left(\cos \omega t + i \sin \omega t\right) = \mathrm{E}_0 \exp\left(i\omega t\right)$$

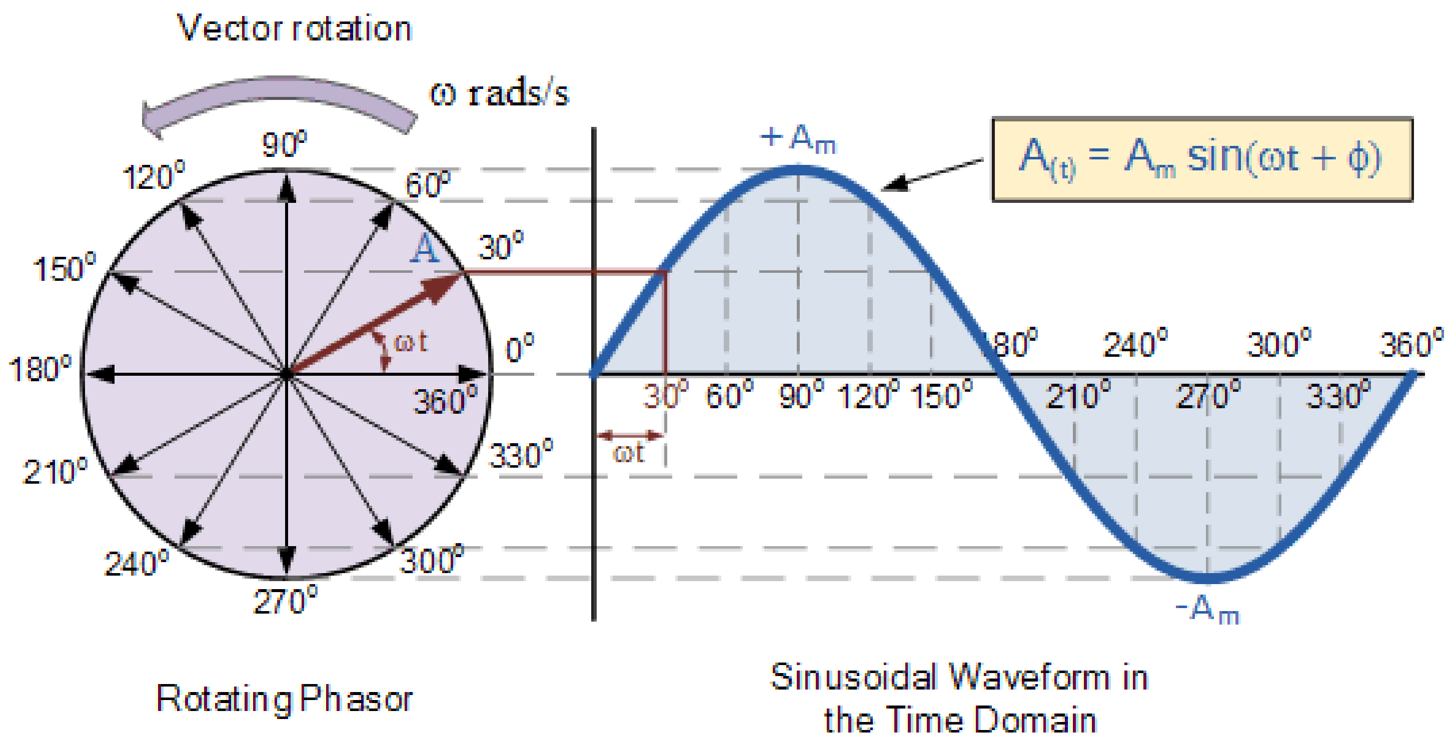


$$x = r\cos\theta\,;\quad y = r\sin\theta\,;\quad z = r\left(\cos\theta + i\sin\theta\right)$$

$$e^{iy} = \cos y + i \sin y$$

$$z = re^{i\theta}$$

Ondas eletromagnéticas planas



$$E(t) = E_0 \sin(\omega t + \phi) = E_0 \sin(\frac{2\pi}{T} t + \phi)$$

E0 é amplitude; ω é frequência angular; T é o período; ϕ é fase

Ondas eletromagnéticas no espaço

Com propagação no espaço, na direção z:

$$\frac{\partial^2 \mathrm{E}}{\partial \mathrm{t}^2} - \mathrm{c}^2 \frac{\partial^2 \mathrm{E}}{\partial \mathrm{z}^2} = 0$$

A solução é:

$$\mathrm{E}(\mathrm{z},\mathrm{t}) = \mathrm{E}_0 \cos(\omega \mathrm{t} - \mathrm{kz})$$

Em que k uma constante relacionada com o numero de oscilações ao longo da direção z. As equações de Maxwell ficam então:

$$\begin{cases} \mathrm{E}_x(\mathrm{z},\mathrm{t}) = \mathrm{E}_0 \cos(\omega \mathrm{t} - \mathrm{kz}) \\ \mathrm{E}_y(\mathrm{z},\mathrm{t}) = 0 \\ \mathrm{E}_z(\mathrm{z},\mathrm{t}) = 0 \end{cases}$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Esta solução representa uma onda que se propaga na direção z (a onda transporta a energia eletromagnética, neste sentido)

Ondas electromagnéticas no espaço

Outra solução das equações de Maxwell, rodada 90°, é:

$$\begin{cases} E_x(z,t) = 0 \\ E_y(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \\ E_z(z,t) = 0 \end{cases}$$

Ou seja: no plano yy.

A solução geral das equações de Maxwell, é:

$$\begin{cases} E_x(z,t) = E_{0,x}\cos\,(\omega t - kz - \varphi_x) \\ E_y(z,t) = E_{0,y}\cos\,(\omega t - kz - \varphi_y) \\ E_z(z,t) = 0 \end{cases}$$

A diferença de fase φ_y-φ_x determina o estado de polarização da onda eletromagnética.

Polarização das ondas eletromagnéticas

A polarização é dada pela direção do campo elétrico E.

$$\varphi_y - \varphi_x = 0$$

$$\varphi_y - \varphi_x = \pi \quad (\text{ou} \quad -\pi)$$

→ Polarização linear

$$\varphi_y - \varphi_x = \frac{\pi}{2}$$

→

$E_{ox} \neq E_{oy}$ Polarização elíptica de esquerda

$E_{ox} = E_{oy}$ Polarização circular de esquerda

$$\varphi_y - \varphi_x = -\frac{\pi}{2}$$

→

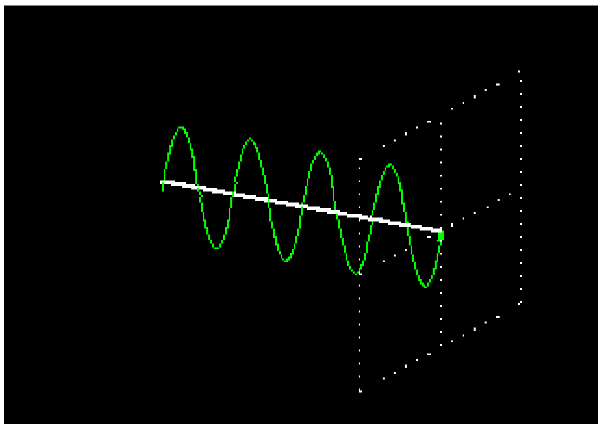
$E_{ox} \neq E_{oy}$ Polarização elíptica de direita

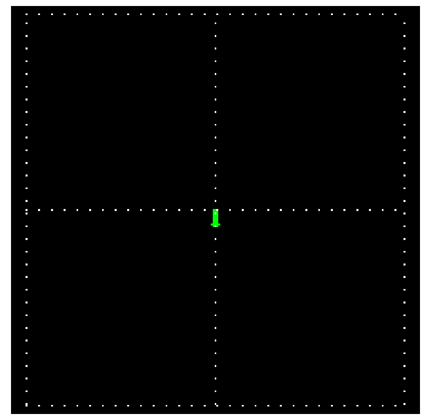
$E_{ox} = E_{oy}$ Polarização circular de direita

Polarização das ondas electromagnéticas

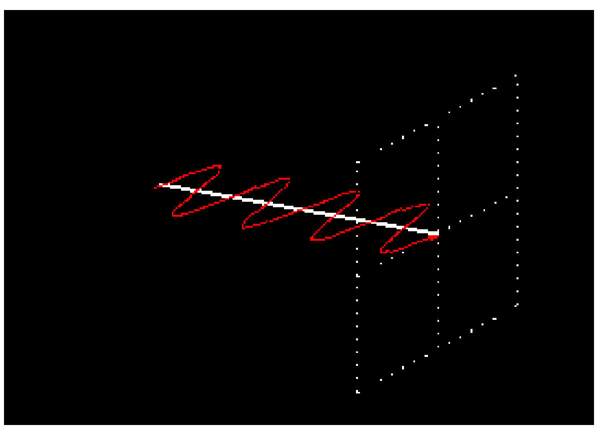
Por definição, a polarização de uma onda eletromagnética é o plano no qual se encontra a componente elétrica da onda.

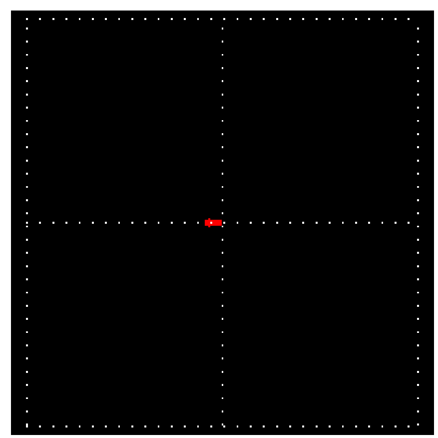
Linear





Vertical



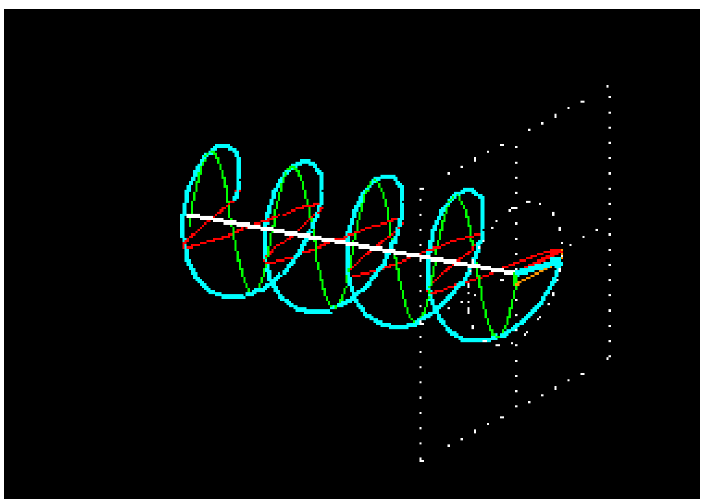


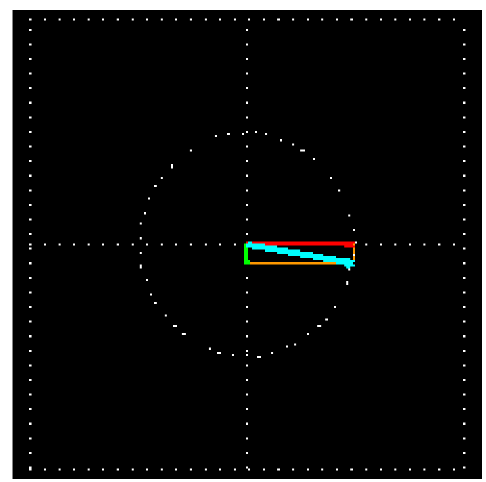
Horizontal

Polarização das ondas eletromagnéticas

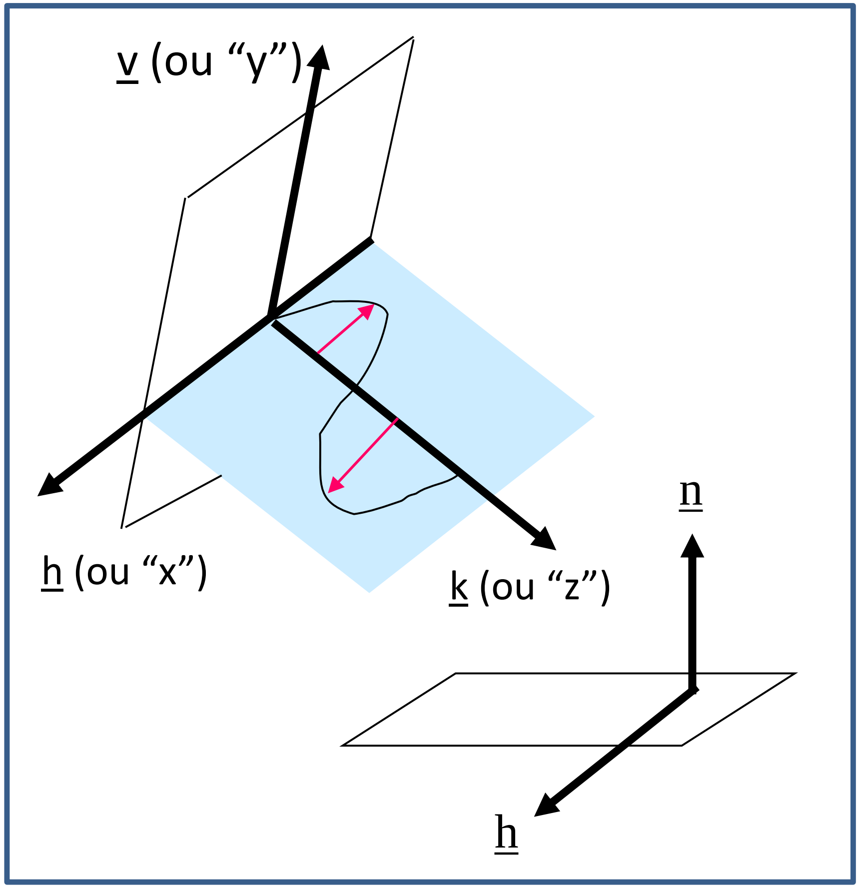
A combinação de duas ondas linearmente polarizadas, uma vertical e outra horizontal, de mesma amplitude e eletricamente desfasadas de 90 graus, $\varphi_y - \varphi_x = \frac{\pi}{2}$ resulta em uma onda circularmente polarizada.

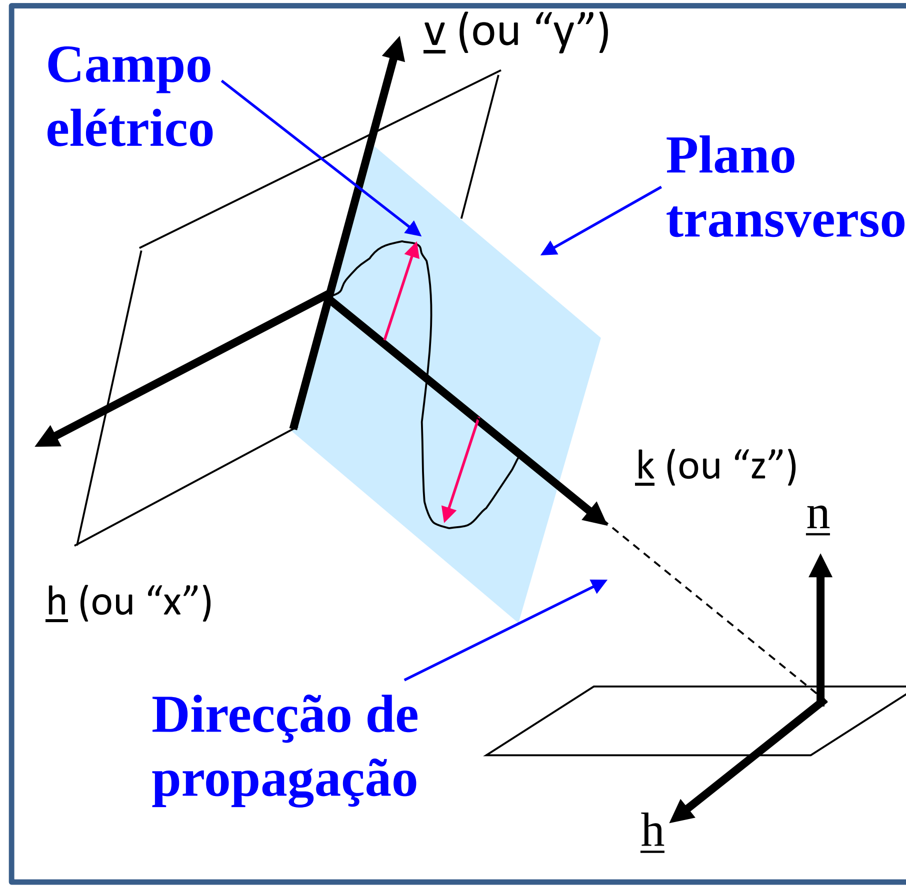
Polarização Circular





Polarização das ondas eletromagnéticas

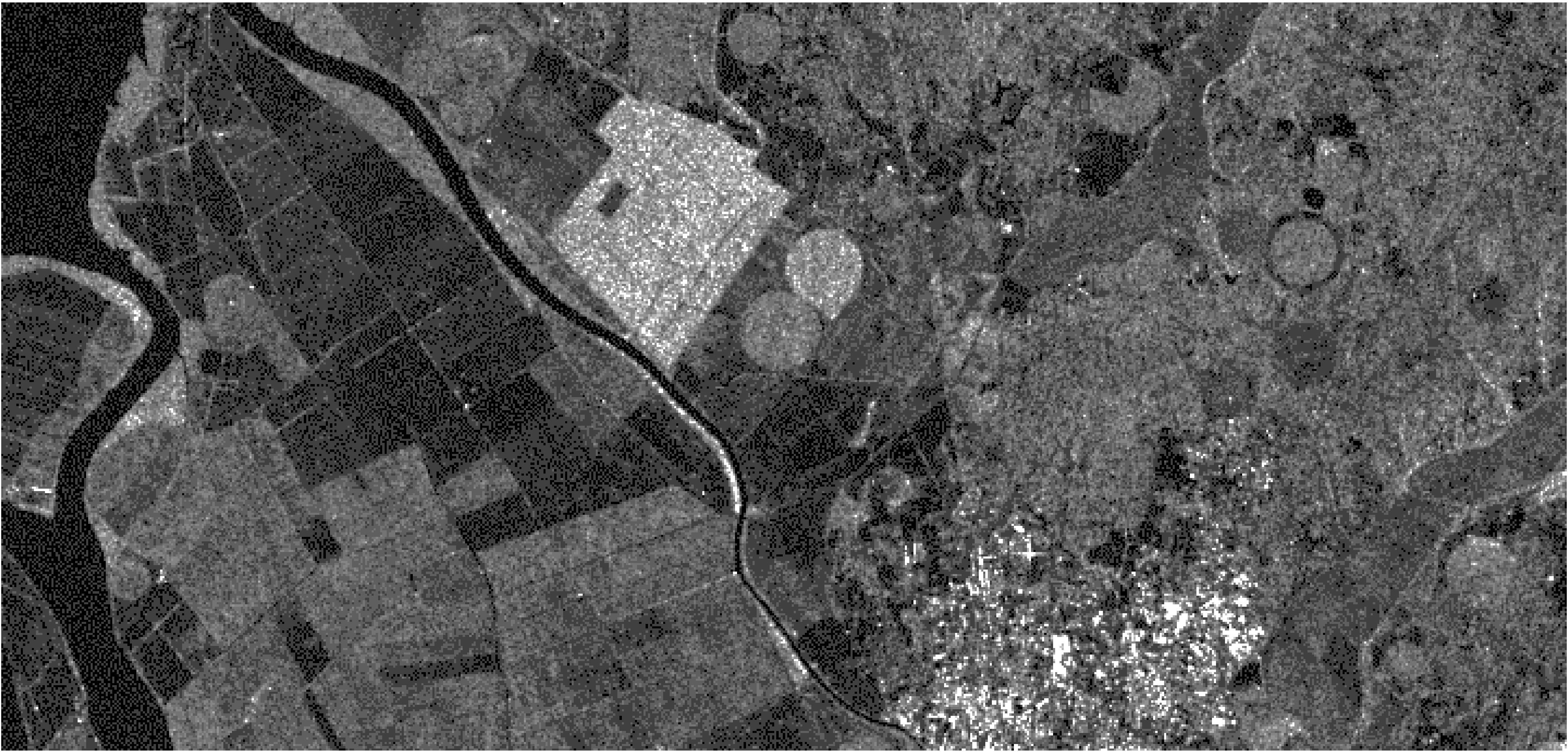




Polarização horizontal
(Ex. RADARSAT HH)

Polarização vertical
(Ex. Sentinel-1 VV)

Tejo VH



Tejo VV

Sentinel-1A's radar shows the metropolitan area of Portugal's capital, Lisbon, on 8 October 2014.

Interferência

Interferência fenómeno caracterizado por uma variação da intensidade (espacial ou temporal) da radiação eletromagnética na sequência da sobreposição de duas ondas eletromagnéticas **com a mesma frequência** e que se propagam na mesma direção. A intensidade não é igual ao somatório das intensidades de cada uma das duas ondas.

Interferência ⇒ **Fontes coerentes**

fontes que emitem radiação eletromagnética com uma diferença de fase constante no tempo (ou no espaço).

Exemplos de fontes coerentes são: LASER RADAR

Interferência

Falamos em:

Coerência Espacial

diferença de fase observada no instante t entre os pontos P1 e P2. Se essa diferença de fase se mantiver constante no tempo fala-se em coerência espacial perfeita.

Coerência Temporal

diferença de fase observada no ponto P nos instantes t e $t+\Delta t$. Se, por um dado Δt, essa diferença de fase se mantiver constante, por cada t, fala-se em coerência temporal perfeita.

Interferência

No caso da interferometria radar a interferência é observada ao nível da fase (e não da intensidade) sendo esta dependente da morfologia do terreno ou das suas variações.

Usando a notação complexa para o campo elétrico

$$E_1 = E_0 \cdot e^{i \cdot \left(2\pi \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right] + \varphi_1 \right)} \qquad E_2 = E_0 \cdot e^{i \cdot \left(2\pi \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right] + \varphi_2 \right)}$$

O termo de interferência é dado por

$$E_1^{*} \cdot E_2 = E_{0,1} \cdot e^{-i \cdot \left(2\pi \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right] + \varphi_1 \right)} \cdot E_{0,2} \cdot e^{i \cdot \left(2\pi \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right] + \varphi_2 \right)} = \left| E_0 \right|^2 \cdot e^{i \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot [r_1 - r_2] - [\varphi_1 - \varphi_2] \right)}$$

Interferência

$$z = re^{i\phi} = E_1^{\ *} \cdot E_2 = \left|E_0\right|^2 \cdot e^{i\cdot\left(\frac{2\pi}{\lambda}\cdot[r_1-r_2]-[\varphi_1-\varphi_2]\right)}$$

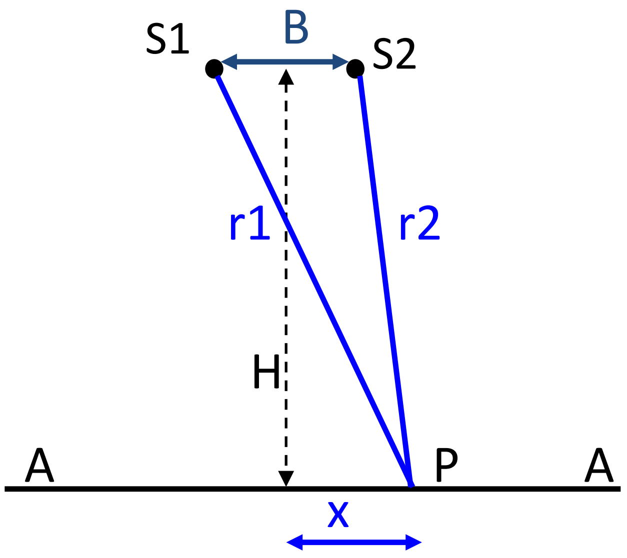
O argumento (ângulo θ) do numero complexo z fornece a informação contida no interferograma SAR.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot[r_1-r_2]-[\varphi_1-\varphi_2]$$

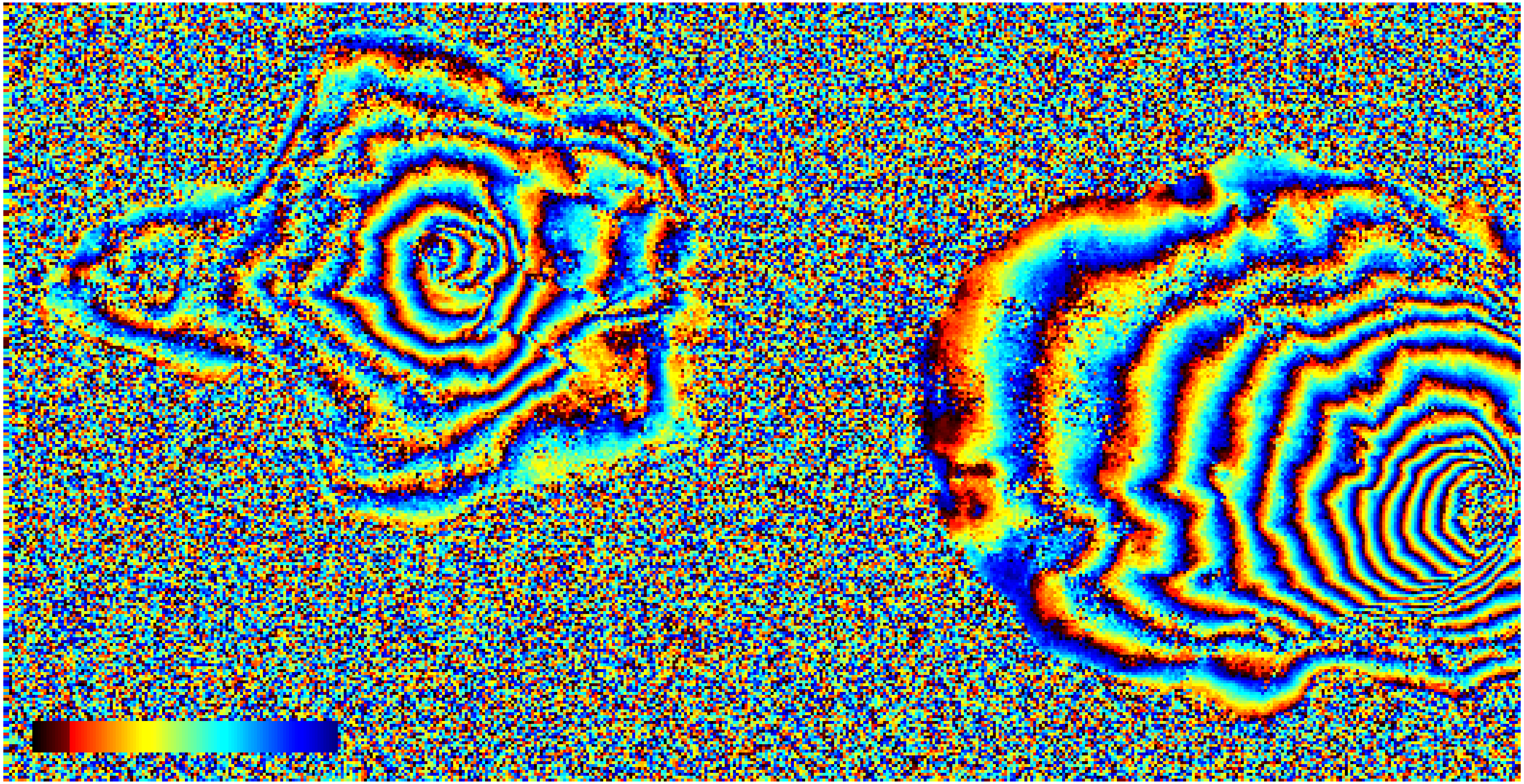
Diferença de fase constante devido à coerência das fontes de radiação electromagnética

$$\varphi_1-\varphi_2=0$$

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot[r_1-r_2]$$



Interferência RADAR



Fontes de radiação eletromagnética

Todos os corpos com temperatura superior a 0°K emitem radiação com comprimento de onda λ variável no espectro eletromagnético.

A quantidade de energia (Radiância) que um objeto radia é função da temperatura do corpo e é dada pela Lei de Planck do corpo negro:

$$L_v = \frac{2hv^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1}$$

Usualmente com unidades: $Wm^{-2}\ sr^{-1}\ Hz^{-1}$

em que k é a constante de Boltzman, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J K^{-1} , e h é a constante de Planck (6.6261×10^{-34} J s)

Radiação Térmica

A equação de Planck pode ser expressa em termos de comprimento de onda em vez de frequência e neste caso a **Radiância Espectral** é dada por:

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad Wm^{-3}sr^{-1}$$

Se $\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} << 1$, o que é válido no caso da radiação emitida pela Terra (T cerca de 290° K) na região das microondas e das frequências radio, então:

$$L_\lambda = \frac{2 \cdot k \cdot T}{\lambda^2}$$

Aproximação de Rayleigh-Jeans

As fontes da radiação eletromagnética

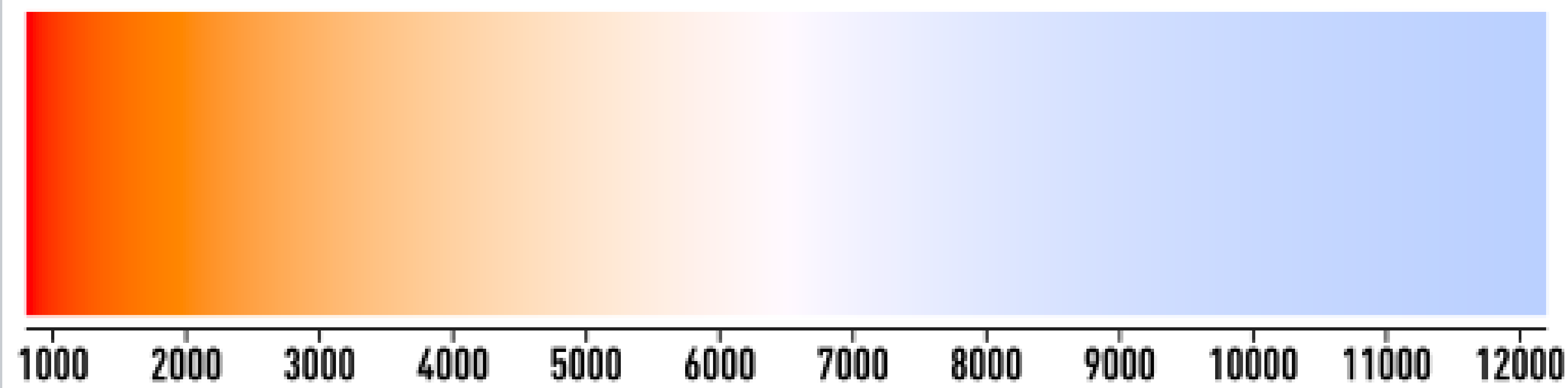
Integrando a função de Planck em todos os comprimentos de onda (ou frequências) obtemos a Lei de Stefan-Boltzman:

$$L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda = \frac{2k^4\pi^4}{15\, c^2 h^3} T^4$$

Integrando em todas as direções, obtemos:

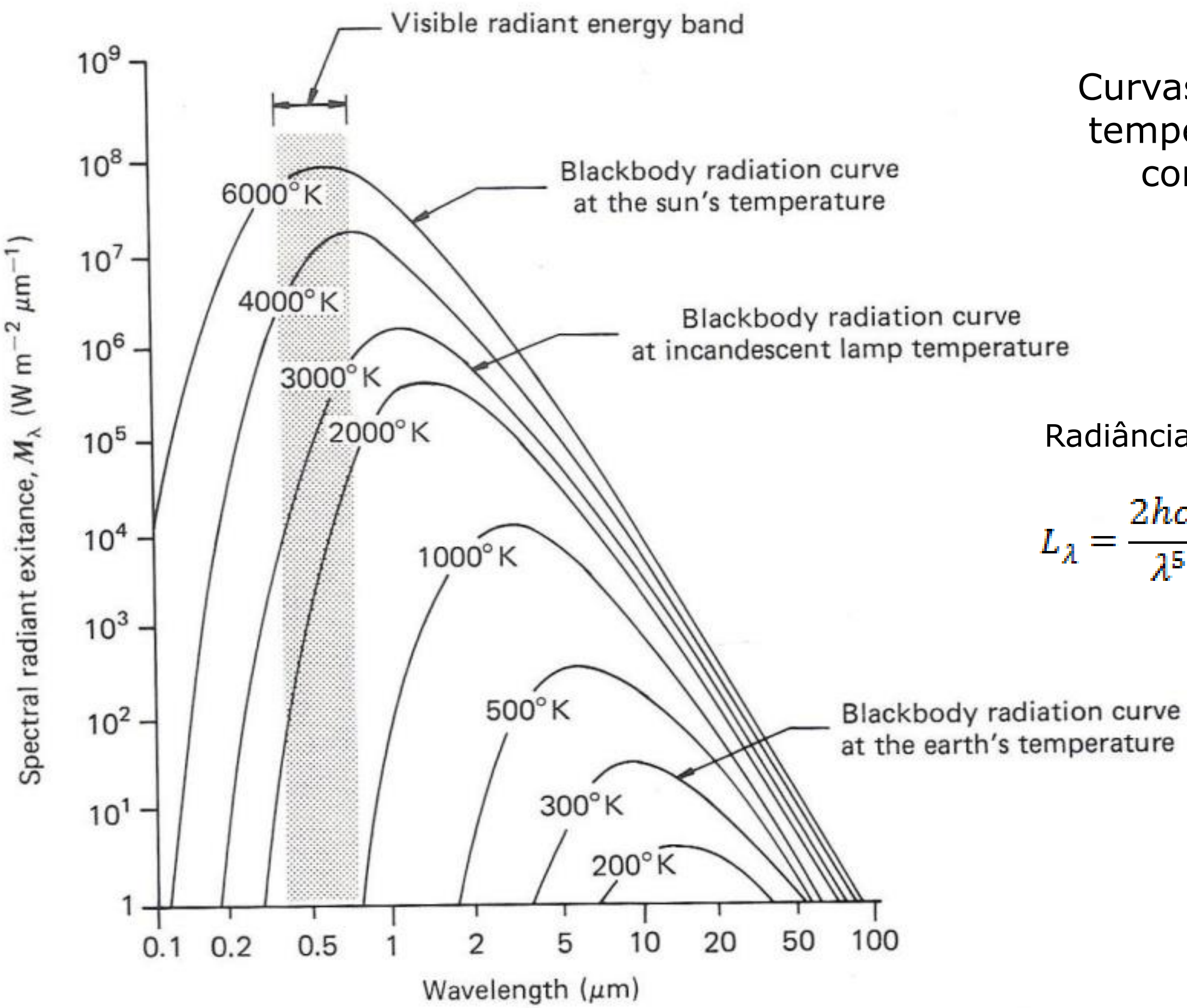
(emitância) $$M = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta \; \cos\theta \; L \, d\theta = \sigma \, T^4 \qquad W\, m^{-2}$$

Com σ= 5.670x10^{-8} (W m^{-2} K^{-4}), constante de Stefan-Boltzman e T a temperatura em K.



Color of a black body from 800 K to 12200 K. This range of colors approximates the range of colors of stars of different temperatures, as seen or photographed in the night sky.

As fontes da radiação eletromagnética

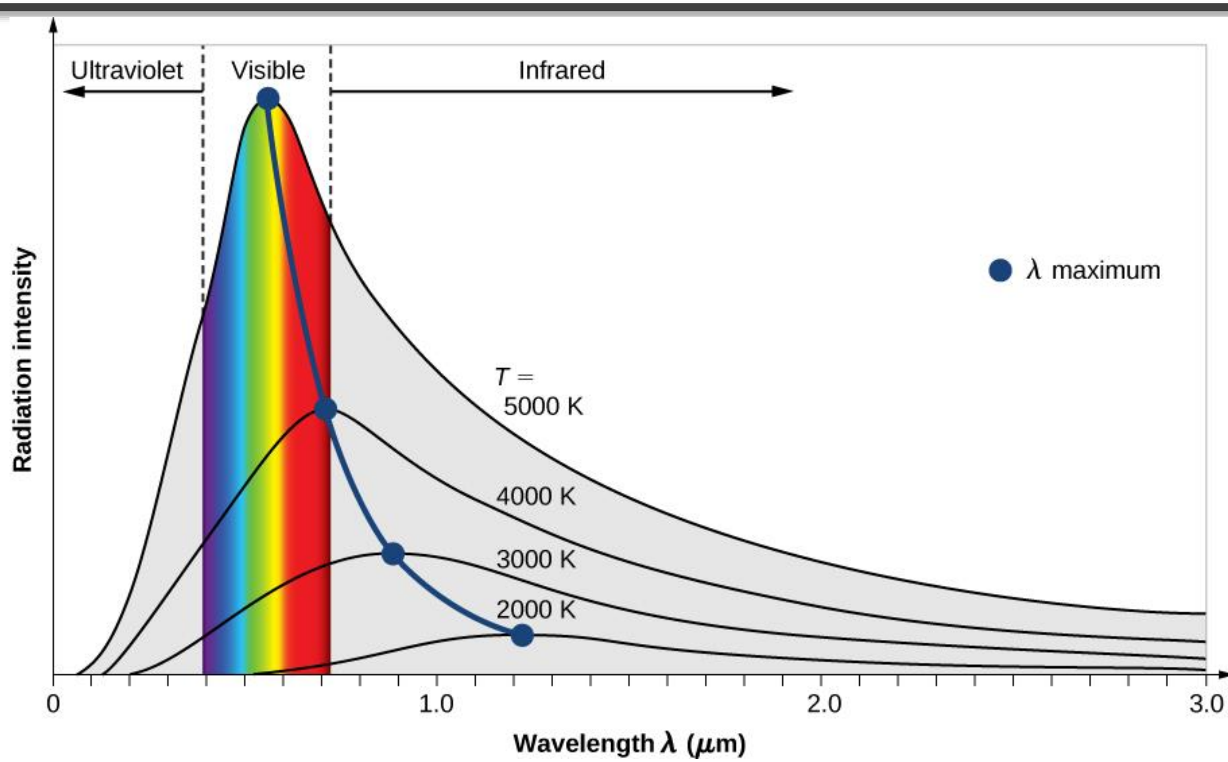


Curvas de Planck para várias temperaturas em função do comprimento de onda

Radiância espectral

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \qquad Wm^{-3}sr^{-1}$$

As fontes da radiação eletromagnética



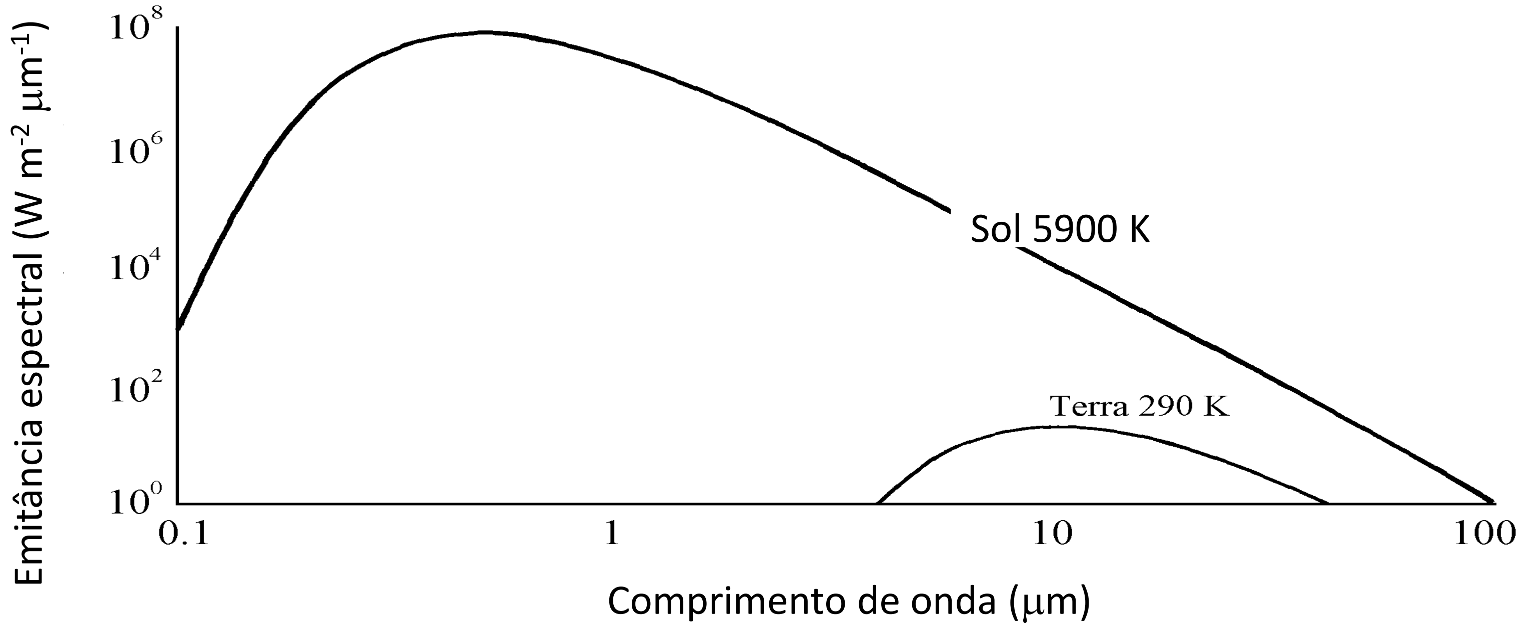
O comprimento de onda para o qual a curva atinge o máximo está relacionada com a sua temperatura pela lei do deslocamento de Wien's. Esta lei é obtida calculando o máximo da curva de Planck é:

$$\lambda_{max} = \frac{2.989 \times 10^{-3}}{T} \quad \mu\text{m}$$

Temperatura de cor

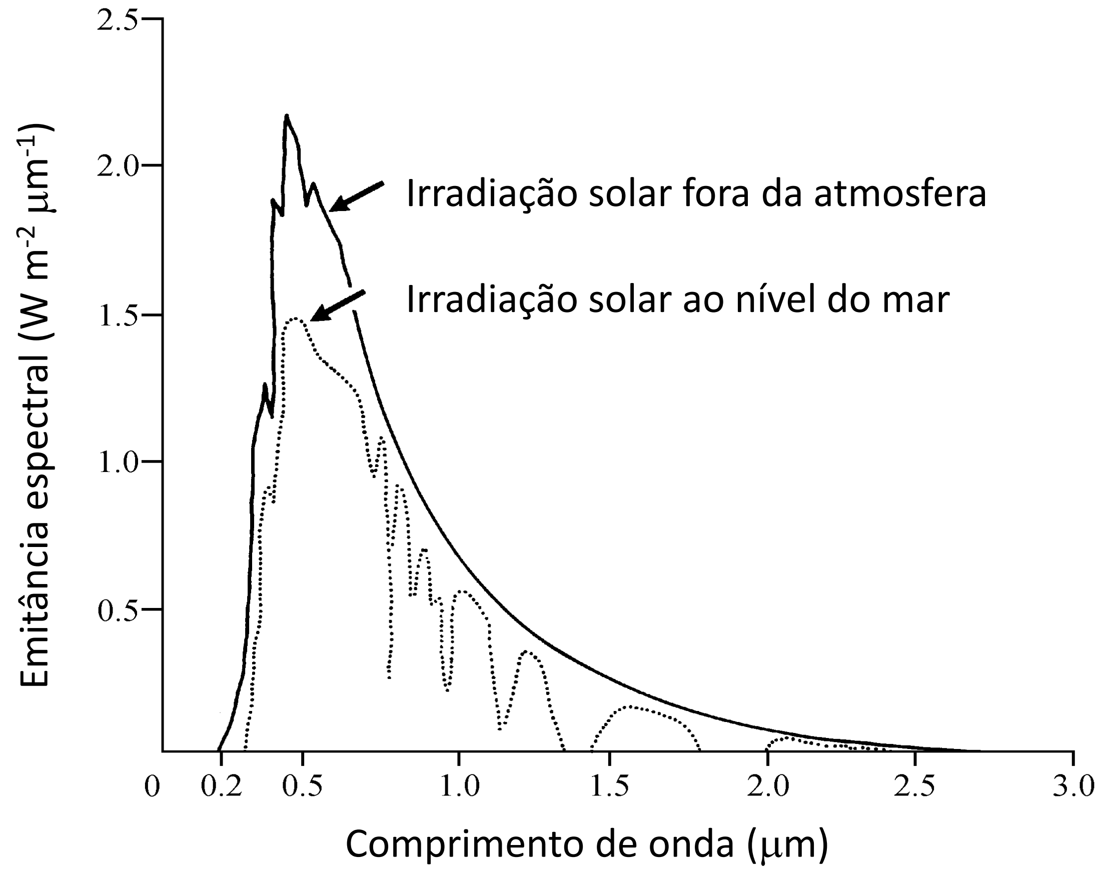
As fontes da radiação eletromagnética

Curvas da emitância espectral de dois corpos com temperaturas próximas do Sol e da Terra



Para T=290K -> λ_{max} = 9.7 μm (infravermelho térmico). Para o Sol o valor de comprimento de onda dominante é 0.480 μm (amarelo) .

As fontes da radiação eletromagnética

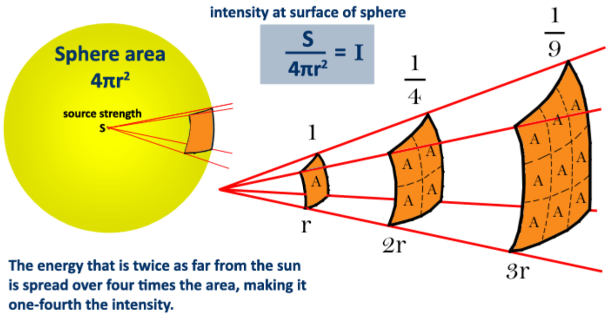


Sobre a superfície terrestre chega apenas uma fração da energia emitida pelo Sol; a atmosfera desempenha uma função de filtragem.

Radiação Solar

Podemos considerar que o Sol emite radiação no interior dum cone que tem como base o disco solar (r) e como altitude a distancia Sol-Terra (d). No topo da atmosfera a irradiância do Sol é dada por:

$$E_\lambda^0 = L_\lambda \times \frac{\text{área do disco solar}}{(\text{distancia à Terra})^2}$$



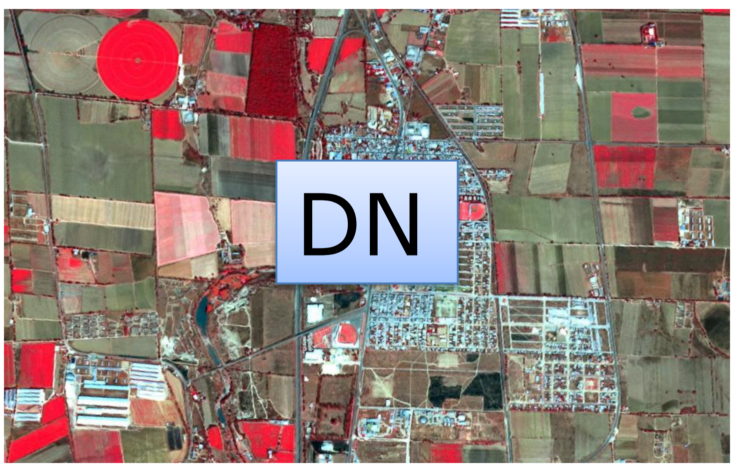
E_{TOP}= 1367 Wm^{-2}

irradiância média exo-atmosférica (600-800 km)

Este valor médio, designado por **constante solar**, foi adotado como padrão pela Organização Meteorológica Mundial.

Conversão de números digitais (DNs) para radiância

O calculo do valor da **radiância espectral** no sensor é essencial para a conversão de dados imagem de múltiplos sensores e plataformas numa quantidade com significado físico numa escala radiométrica comum.



Radiância Espectral

Conversão para radiância dos produtos nível 1

Os valores dos pixels no nível 1 são representados como Q_{cal}.

A conversão dos produtos de nível 1 (Q_{cal}) em radiâncias espectrais ao nível do sensor (L_λ) requer o conhecimento dos valores mínimos e máximos dos fatores de escala originais.

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{max,\lambda} - L_{min,\lambda}}{Q_{cal,max} - Q_{cal,min}}\right) \cdot (Q_{cal} - Q_{cal,min}) + L_{min,\lambda}$$

=1

Dinâmica da imagem.
Tipicamente $255=2^8-1$

DN

Conversão em reflectância TOA (Top of Atmosphere)

Poderemos obter uma menor variabilidade entre imagens adquiridas em diferentes datas convertendo a reflectância ao nível do sensor na reflectância exo-atmosfera (no topo da atmosfera, TOA), também conhecido como albedo planetário

$$\rho_\lambda = \frac{\pi . L_\lambda . d^2}{E_{SUN_\lambda} \cos\theta_S}$$

ρ_λ é a refletância planetária TOA

L_λ é a radiância ao nível do sensor (W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1})

d é a distância da Terra ao Sol em unidades astronómicas (1UA= 149,597,870,691km)

Conversão para radiância dos produtos nível 1

Parâmetros calibrados para o sensor ETM+ do Landat 7 e irradiancia solar exo-atmosférica (ESUN).

L7 ETM+ Sensor ($Q_{calmin} = 1$ and $Q_{calmax} = 255$)

Band	Spectral range	Center wavelength	$LMIN_\lambda$	$LMAX_\lambda$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	$ESUN_\lambda$
Units	μm		$W/(m^2\ sr\ \mu m)$		$(W/m^2\ sr\ \mu m)/DN$	$W/(m^2\ sr\ \mu m)$	$W/(m^2\ \mu m)$
Low gain (LPGS)							
1	0.452–0.514	0.483	−6.2	293.7	1.180709	−7.38	1997
2	0.519–0.601	0.560	−6.4	300.9	1.209843	−7.61	1812
3	0.631–0.692	0.662	−5.0	234.4	0.942520	−5.94	1533
4	0.772–0.898	0.835	−5.1	241.1	0.969291	−6.07	1039
5	1.547–1.748	1.648	−1.0	47.57	0.191220	−1.19	230.8
6	10.31–12.36	11.335	0.0	17.04	0.067087	−0.07	N/A
7	2.065–2.346	2.206	−0.35	16.54	0.066496	−0.42	84.90
PAN	0.515–0.896	0.706	−4.7	243.1	0.975591	−5.68	1362
High Gain (LPGS)							
1	0.452–0.514	0.483	−6.2	191.6	0.778740	−6.98	1997
2	0.519–0.601	0.560	−6.4	196.5	0.798819	−7.20	1812
3	0.631–0.692	0.662	−5.0	152.9	0.621654	−5.62	1533
4	0.772–0.898	0.835	−5.1	157.4	0.639764	−5.74	1039
5	1.547–1.748	1.648	−1.0	31.06	0.126220	−1.13	230.8
6	10.31–12.36	11.335	3.2	12.65	0.037205	3.16	N/A
7	2.065–2.346	2.206	−0.35	10.80	0.043898	−0.39	84.90
PAN	0.515–0.896	0.706	−4.7	158.3	0.641732	−5.34	1362

LandSat 8

Conversion to TOA Radiance

OLI and TIRS band data can be converted to TOA spectral radiance using the radiance rescaling factors provided in the metadata file:

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$$

where:

L_λ = TOA spectral radiance (Watts/(m2 * srad * μm))
M_L = Band-specific multiplicative rescaling factor from the metadata (RADIANCE_MULT_BAND_x, where x is the band number)
A_L = Band-specific additive rescaling factor from the metadata (RADIANCE_ADD_BAND_x, where x is the band number)
Q_{cal} = Quantized and calibrated standard product pixel values (DN)

Conversion to TOA Reflectance

OLI band data can also be converted to TOA planetary reflectance using reflectance rescaling coefficients provided in the product metadata file (MTL file). The following equation is used to convert DN values to TOA reflectance for OLI data as follows:

$$\rho\lambda' = M_\rho Q_{cal} + A_\rho$$

where:

$\rho\lambda'$ = TOA planetary reflectance, without correction for solar angle. Note that $\rho\lambda'$ does not contain a correction for the sun angle.
M_ρ = Band-specific multiplicative rescaling factor from the metadata (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, where x is the band number)
A_ρ = Band-specific additive rescaling factor from the metadata (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, where x is the band number)
Q_{cal} = Quantized and calibrated standard product pixel values (DN)

LandSat 8

```
GROUP = L1_METADATA_FILE
  GROUP = METADATA_FILE_INFO
    ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
    REQUEST_ID = "0501505116091_00442"
    LANDSAT_SCENE_ID = "LC82040332015001LGN00"
    FILE_DATE = 2015-05-12T16:55:09Z
    STATION_ID = "LGN"
    PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_2.5.0"
  END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
```

```
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 786.09534
  RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -64.91601
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 804.97119
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -66.47478
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 741.77411
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -61.25595
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 625.50568
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -51.65446
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 382.77829
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -31.60996
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 95.19348
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = -7.86111
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 32.08530
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -2.64961
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 707.90033
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -58.45864
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 149.59843
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_9 = -12.35389
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_10 = 22.00180
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_10 = 0.10033
    RADIANCE_MAXIMUM_BAND_11 = 22.00180
    RADIANCE_MINIMUM_BAND_11 = 0.10033
```

$$L_\lambda = \boxed{\left(\frac{L_{max,\lambda} - L_{min,\lambda}}{Q_{cal,max} - Q_{cal,min}}\right)} . \left(Q_{cal} - Q_{cal,min}\right) + L_{min,\lambda}$$

```
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2986E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3298E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.2254E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0333E-02
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.3233E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5725E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.3003E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1694E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4713E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
```

```
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.92899
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -66.48808
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -61.26820
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -51.66480
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -31.61628
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.86268
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.65014
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -58.47033
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.35636
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
```

LandSat 8

Question:
Where can I find the solar exoatmospheric spectral irradiances (ESUN) values for Landsat 8 OLI data?
Answer:
ESUN values are not provided for Landsat 8 data because they are not required for converting data to reflectance. Landsat 8's Operational Land Imager (OLI) adopted two independent National Institute for Standards and Technology (NIST) traceable radiance and reflectance calibration methods. The Landsat 8 metadata file provides coefficients necessary to convert to radiance and reflectance from the quantized and calibrated Digital Numbers (DNs) of the product
(see http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php). Thus, ESUN values are not required for reflectance conversion.
Relative Spectral Response (RSR) of the OLI spectral bands can be found onhttp://ldcm.gsfc.nasa.gov/spacecraft_instruments/oli_band_average.html and used along with the user's preferred solar spectrum to calculate ESUN values corresponding to Landsat 8 OLI bands. (NOTE: ESUN values calculated from RSRs were not used for OLI calibration).

LandSat 8

TOA reflectance with a correction for the sun angle is then:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}$$

where:

$\rho\lambda$ = TOA planetary reflectance
θ_{SE} = Local sun elevation angle. The scene center sun elevation angle in degrees is provided in the metadata (SUN_ELEVATION).
θ_{SZ} = Local solar zenith angle; $\theta_{SZ} = 90° - \theta_{SE}$

For more accurate reflectance calculations, per pixel solar angles could be used instead of the scene center solar angle, but per pixel solar zenith angles are not currently provided with the Landsat 8 products.

```
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
```

```
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
  CLOUD_COVER = 0.49
  CLOUD_COVER_LAND = 0.75
  IMAGE_QUALITY_OLI = 9
  IMAGE_QUALITY_TIRS = 9
  TIRS_SSM_POSITION_STATUS = "ESTIMATED"
  ROLL_ANGLE = -0.001
  SUN_AZIMUTH = 158.52732765
  SUN_ELEVATION = 25.19344132
  EARTH_SUN_DISTANCE = 0.9833024
  GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 2
  GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 408
  GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 8.874
  GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 7.353
  GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 4.968
  GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 111
  GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 4.466
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
```

Exercício

1. Calcule a irradiância solar no topo da atmosfera. Considere que a temperatura do Sol é de cerca 5800ºK. O seu raio é $r = 6.96 \bullet 10^8$ m e a sua distancia à Terra $D = 1.50 \bullet 10^{11}$ m.

2. De acordo com a lei do deslocamento de Wiens qual é o comprimento de onda de máxima emissividade do Sol? (considere a temperatura de 5800 K)

3. Considere um pixel com os valores (75, 36, 29, 123, 103) nas primeiras 5 bandas de uma imagem Landsat 7 ETM+. Quais os valores de radiância espectral para o pixel nas 5 bandas?

4. Considerando os dados do problema 3, determine o valor do índice de vegetação NDVI para esse pixel e interprete o valor. A imagem foi adquirida no dia 6 de Julho de 2007. O Sol tinha no momento da aquisição da imagem num azimute de 122.8º e uma elevação de 64.5º.

Exercício

4.5 Sabendo que a irradiância espetral no topo da atmosfera é em média 1039 Wm^{-2} μm^{-1} para a banda 4 do Landsat (0.772- 0.898μm), que a transmissividade atmosférica na direção do Sol é 0.91 e que a radiação difusa é nula para essa banda, estime a irradiância à superfície para essa banda.

4.6 Suponha que um determinado pixel na banda (0.79 -0.89 μm) tem um valor de radiância de 90 W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1} e que a irradiância à superfície nessa banda na altura da aquisição da imagem é de 900 W m^{-2} μm^{-1}. Suponha ainda que a transmissividade atmosférica na direcção do sensor nessa banda do espetro é de 0.91. Com base na informação de que dispõe estime a reflectância da parcela de terreno correspondente a esse pixel da imagem.

$$L_\lambda^s(x,y) = \rho(x,y,\lambda)\frac{\tau_v(\lambda)}{\pi}\left\{\tau_s(\lambda)E_\lambda^0\cos\big(\theta(x,y)\big) + F(x,y)\cdot E_\lambda^d\right\} + L_\lambda^{sp}(x,y)$$