

Princípios Físicos

Prof. Dr. Rogério Galante Negri

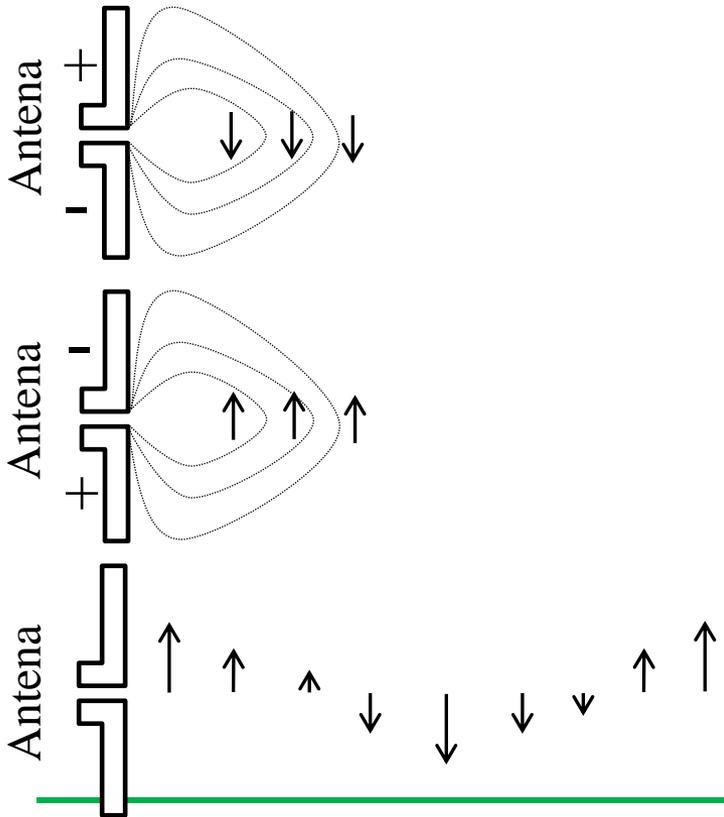
Radiação Eletromagnética

- Radiação Eletromagnética (REM) é o meio que transfere a informação dos objetos até o sensor
 - Forma dinâmica de energia que se manifesta ao interagir com a matéria
 - Natureza *dual*: onda e energia
 - Se propaga no vácuo como luz
 - Comparta-se segundo dois modelos
 - Modelo Ondulatório (onda)
 - Modelo Corpuscular (partícula)
 - Discussões em SR devem considerar esta dualidade
-

Modelo ondulatório

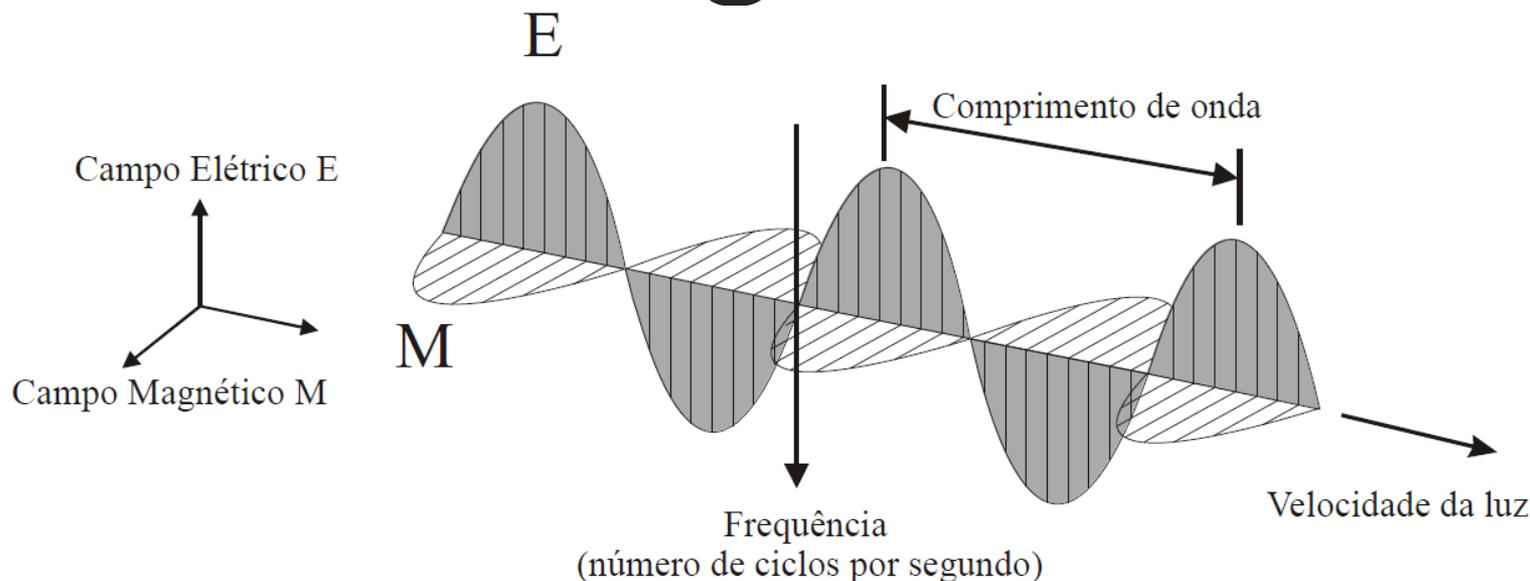
- Proposto por James Maxwell em 1864, descreve os efeitos eletromagnéticos por 4 equações

A aceleração de uma carga elétrica perturba o campo elétrico e magnético, e tais perturbações se propagam no vácuo como ondas eletromagnéticas com velocidade fixa ($c \approx 2,998 \times 10^{-8} m/s$)



- Cada vez que a carga é alternada é gerada uma corrente elétrica
- Toda corrente elétrica gera um campo magnético
- Surge uma onda eletromagnética com campos que oscilam senoidalmente

Onda Eletromagnética



- A velocidade (c) de propagação depende das propriedades elétricas/magnéticas do meio e da frequência (f) ou comprimento de onda (λ):

$$c = f \cdot \lambda$$

- A frequência não muda quando a onda penetra na matéria
- A velocidade e comprimento mudam com a trocar de meio
- No vácuo, c é a velocidade da luz

Geral - Interação da REM

- SR mede a interação da REM com os objetos

Segundo o modelo ondulatório, as características da imagem são explicadas segundo o tamanho das ondas e dos objetos (interação macroscópica)

- Se o comprimento de onda é menor que o objeto, eles aparecerão na imagem...pois a REM é barrada
- Assim, será medida a reflectância do objeto que “barrou”



Comprimento do visível e infravermelho é 0,4 a 2,5 μm

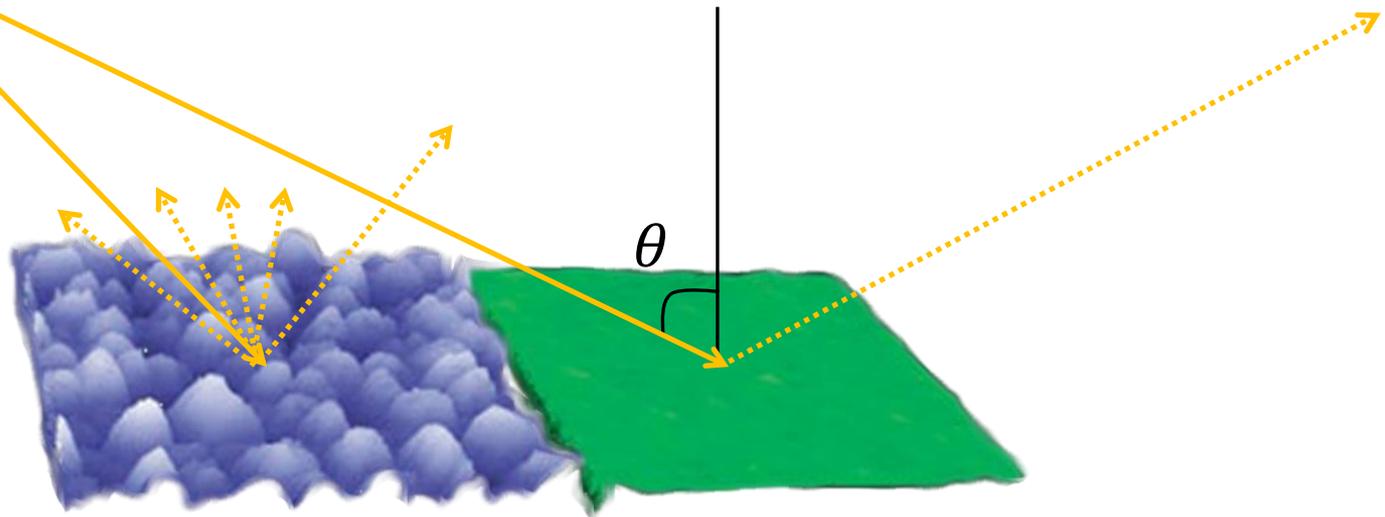
Moléculas de vapor $\approx 30\mu m$

Microondas atravessam a névem!

Interação Macroscópica

- Int. Macroscópica é a resposta da intensidade que o objeto reflete a REM diante o tamanho da onda e textura do objeto
- Textura é a rugosidade da superfície, que segundo o critério de Rayleigh:

$$\lambda / (8 \cos \theta) \begin{cases} \geq h \Rightarrow \textit{Especular (lisa)} \\ < h \Rightarrow \textit{Difusora (rugosa)} \end{cases}$$



Depende de λ e θ !

h é a altura média da superfície

Modelo corpuscular

- Foi observado que a REM carrega energia
- Planck (1901) observou que a REM transferia energia entre corpos de forma fixa e discreta (fótons)
- Fóton é a partícula básica do quantum (mecânica quântica)

Modelo Corpuscular → REM é energia dinâmica que se manifesta ao interagir com a matéria

$$E = h \cdot f \quad (\text{ou} \quad E = h \cdot c / \lambda)$$


Frequência
Const. de Planck ($6,624 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$)
Energia (do quantum)

- E é inversamente proporcional a λ , logo $\downarrow \lambda \uparrow E$
- A unidade usada é o elétron-volt ($\equiv 1,59 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

Interação onda-matéria

- SR descreve o que ocorre quando a REM atinge o objeto e acontece transferência de radiação

Planck (1901): REM é transferida por “pacotes de energia”

- REM são emitidas na forma de pulsos discretos
 - Cada pulso contém uma quantidade fixa de energia (quantum)
 - A absorção e emissão da REM não é contínua ao longo do espectro!
-

Modelo corpuscular - átomos

- A REM ao atingir os objetos realiza trocas de energia (com átomos/moléculas)
 - A energia nos átomos/moléculas são distribuídas pelos orbitais dos elétrons e pelas forças de vibração da ligações moleculares
 - A incidência da REM pode ser absorvida, causando mudança de elétrons nos orbitais ou aumentar a vibração das ligações
 - Parte da energia não absorvida é refletida para o sensor
 - A parte absorvida define informações sobre o alvo!
 - Esta interação é microscópica, e depende da constituição química do alvo
 - Materiais diferentes → absorção/reflectância diferente → rep. diferente
 - O modelo corpuscular é mais adequado para λ menores (visível)
 - O modelo ondulatório é mais adequado à interação macroscópica
-

Indissociabilidade onda-energia

- Imagem dos objetos são resultantes do tamanho da onda e da sua energia (proporções diferentes)
- Segundo o tamanho da onda:
 - $\lambda \downarrow \Rightarrow$ Interação Microscópica (composição química)
 - $\lambda \uparrow \Rightarrow$ Interação Macroscópica (rugosidade)

Imagens LANDSAT-5
TM de uma região
amazônica



Imagem do infravermelho próximo

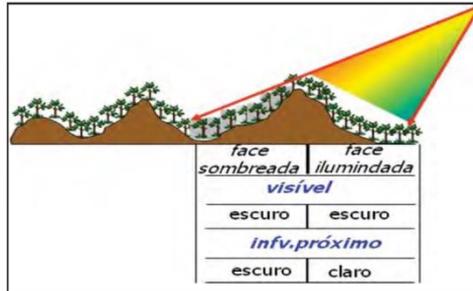
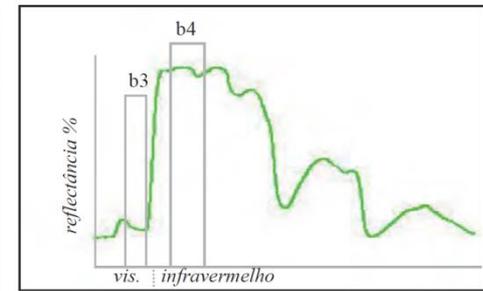


Imagem do visível



Curva de reflectância da vegetação

- Os dosséis é uma aproximação do relevo
- Devido o relevo, a frente é iluminada e atrás não
- No “visível”, tudo é escuro pela alta absorção
- Infra. prox, além de refletir bem a vegetação, o sombreamento também é visto

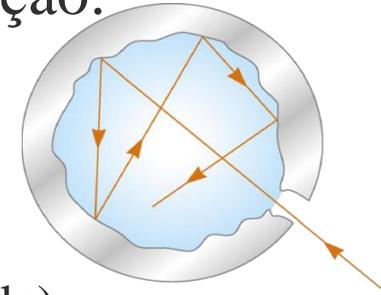
Fontes de REM

- REM origina de outras energias: cinética, química, térmica e nuclear
 - Todo corpo com Temp. $> 0K$ emite REM
 - Para SR da superfície da Terra, o Sol é a fonte de REM [sensores passivos]
 - Imagens dependem da qualidade e intensidade de REM
 - Sol: 6000 °C
 - Terra: 27 °C
 - Não há REM em todos comprimentos de onda emitidos pelo Sol/Terra
 - Fontes artificiais podem ser usadas para gerar REM em outros comprimentos, como o comprimento das microondas
-

Corpo negro (modelo)

- Utilizado por Planck para desenvolver leis sobre a radiação:

- Esfera oca com temperatura de superfície uniforme
- Possui pequeno orifício por onde entra um feixe de radiação
- A radiação que entra é toda absorvida por múltiplas reflexões
- O orifício é o corpo negro (emite tão logo toda energia que incide)



- Com isso Planck concluiu:

- A radiação total de um corpo negro é função da temperatura
- Em uma dada região do espectro, quanto maior a temperatura, maior é a energia
- Fixada temperatura, a energia emitida não é a mesma para todo comp. de onda

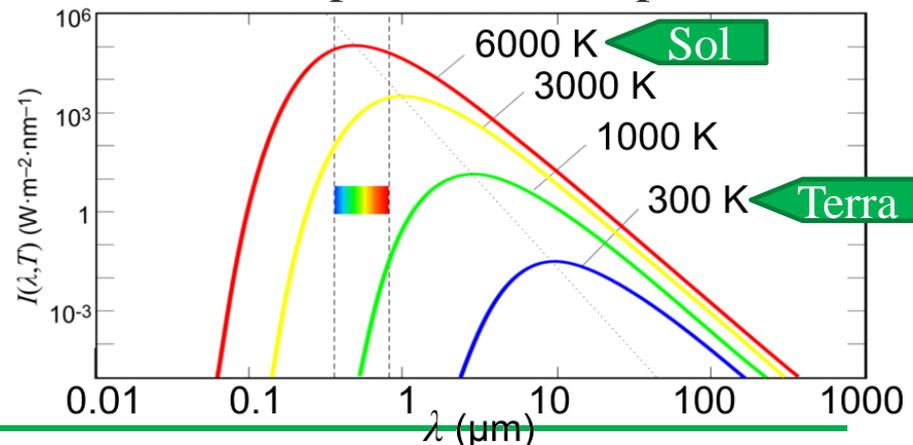
$$B_{\lambda} = C_1 \div (\lambda^5 \cdot (e^{C_2/\lambda T} - 1))$$

$$C_1 = 3,74 \times 10^8$$

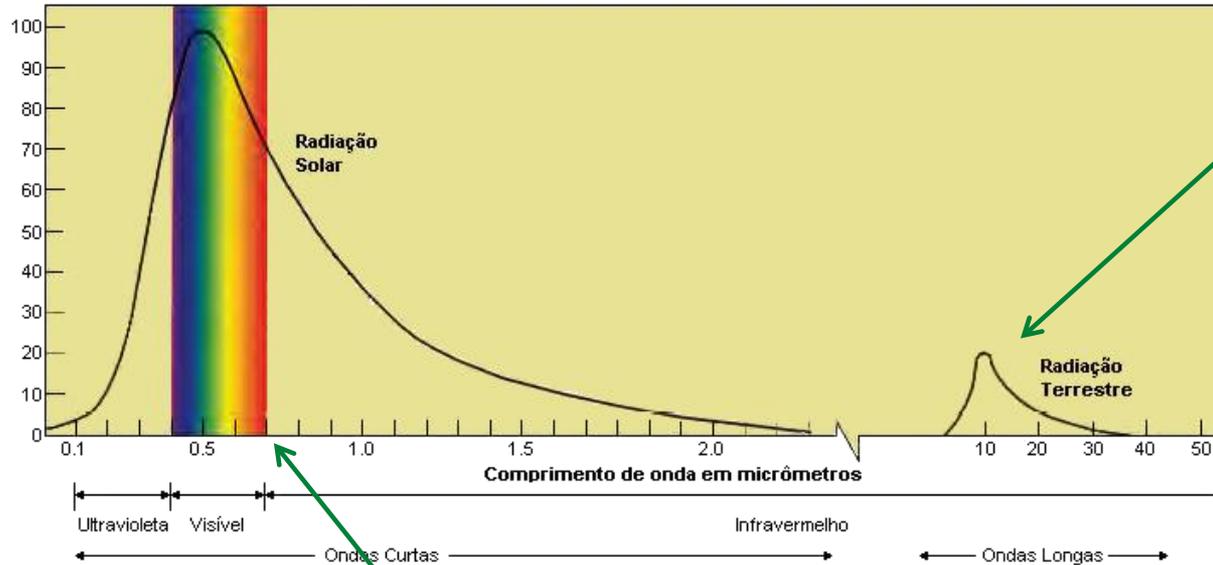
$$C_2 = 1,439 \times 10^4$$

$$\lambda_{max} = C/T$$

$$\text{Const. Wien: } C = 2,898 \times 10^3$$



Fluxos de energia radiante Sol-Terra



A temp. média da Terra é de 300 K

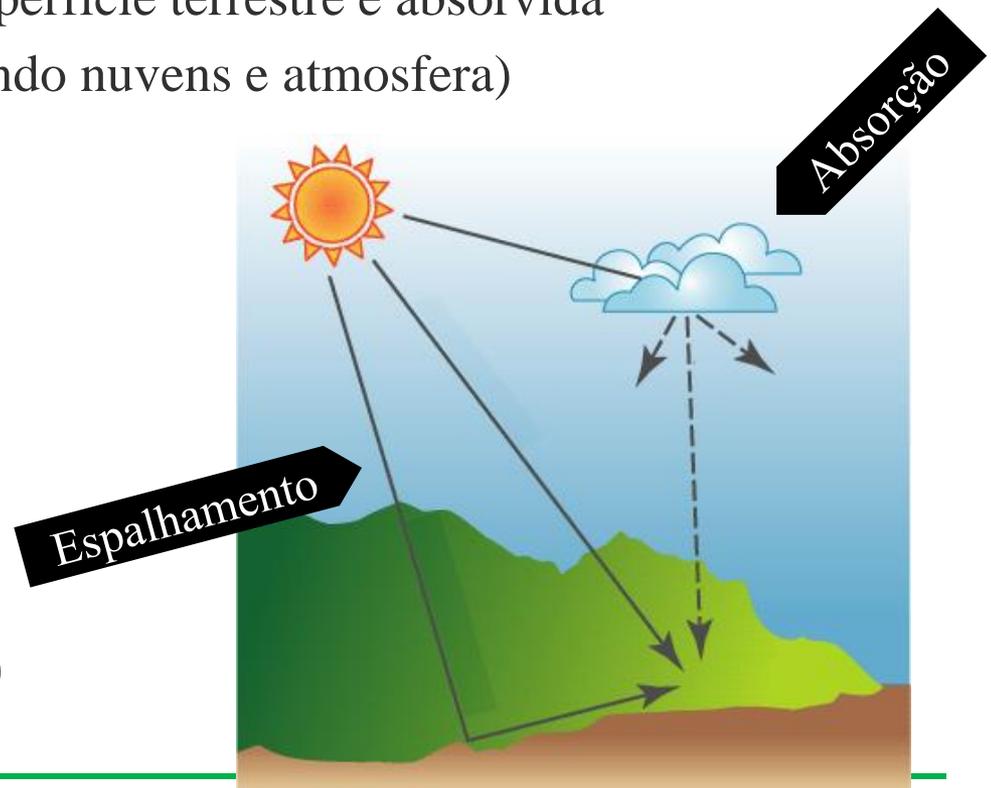
Um corpo negro nessa temp. emite o máximo de energia radiante em $9,6\ \mu m$ e sua faixa de REM é de 8 a $35\ \mu m$

- A energia do Sol decai abruptamente abaixo do ultravioleta e acima de $3\ \mu m$
- Com isso, apenas o intervalo de $0,45$ a $2,5\ \mu m$ é usado em SR
- O pico de energia ocorre entre $0,45$ a $0,76\ \mu m$, que é a “região do visível”

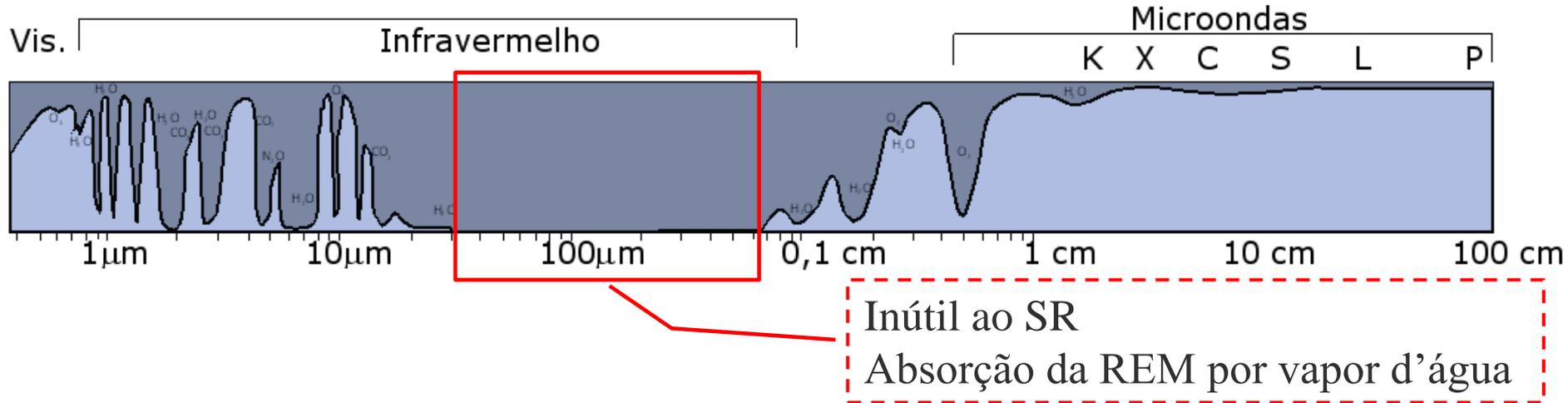
Interferências atmosféricas

A REM, vinda do Sol ou emitida pela Terra, interage com as moléculas da atmosfera

- A atmosfera interfere na intensidade do fluxo radiante, na distribuição espectral e na direção dos raios incidentes
 - 47% da radiação que incide na superfície terrestre é absorvida
 - 37% é refletido pela Terra (incluindo nuvens e atmosfera)
 - 17% é absorvido pela atmosfera.
- Parte da REM que interage diretamente com a atmosfera sofre:
 - Absorção
 - Espalhamento (difusão/dispersão)



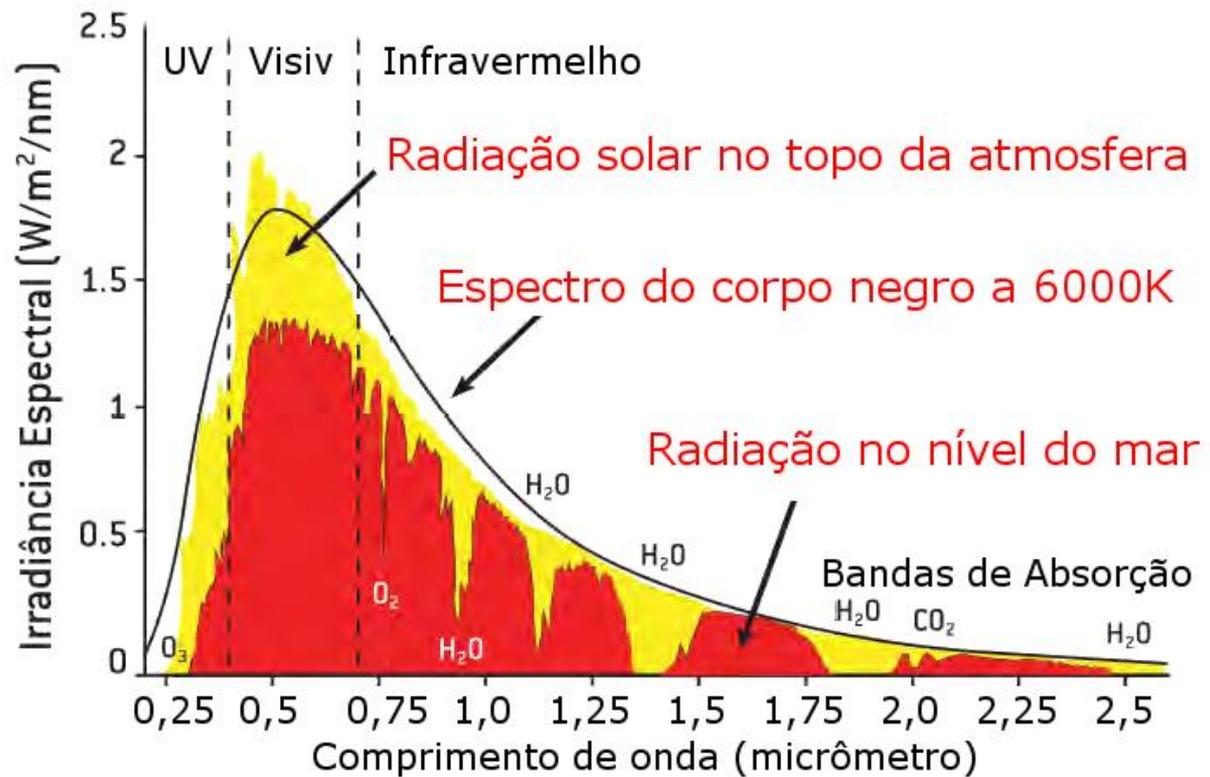
Absorção



- A absorção é o efeito mais prejudicial ao SR
- Em vários intervalos do espectro a atmosfera é parcial ou totalmente opaca às passagens da radiação solar e da radiação emitida pela Terra
- Como consequência, a radiação solar pode ser impedida de atingir a superfície terrestre ou no mínimo sua intensidade é atenuada
- Dessa forma, o sensor colocado no espaço ficará impedido de obter imagens da superfície terrestre nesses comprimentos de onda.

Absorção

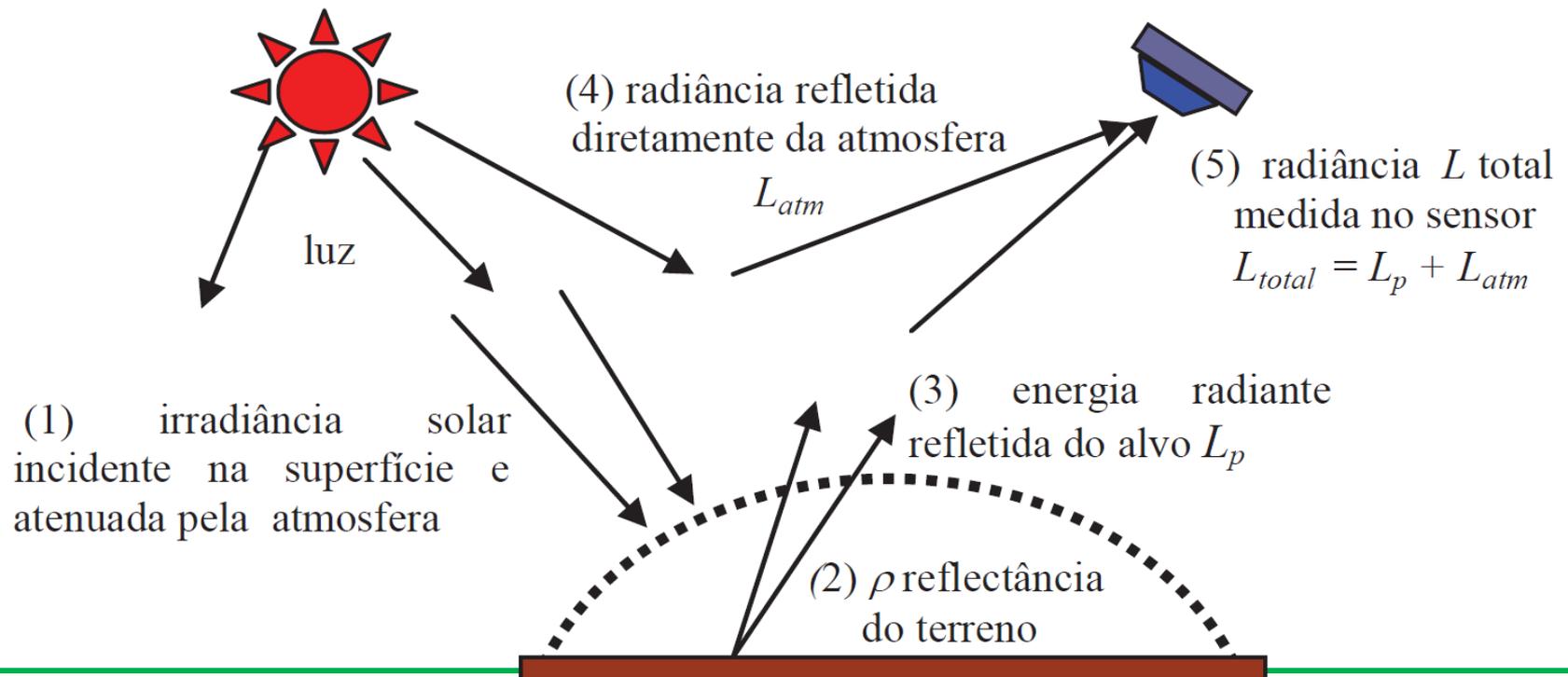
- Bandas de absorção: regiões do espectro que a atmosfera é opaca à radiação
- Janelas atmosféricas: regiões do espectro que a atmosfera é transparente à radiação



Essas absorções são o motivo dos sensores mostrarem descontinuidades nos comprimentos de onda entre bandas contínuas

Espalhamento

- O espalhamento corresponde à mudança aleatória da direção de propagação da radiação solar
- Diminuir a eficiência na identificação dos objetos
- O sensor recebe a energia refletida pelo alvo (L_p) mais a energia espalhada pela atmosfera (L_{atm}) [antes de atingir a superfície]
- É conhecido por “efeito aditivo da atmosfera”

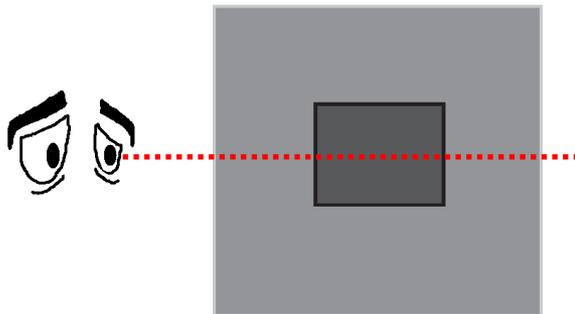


Espalhamento

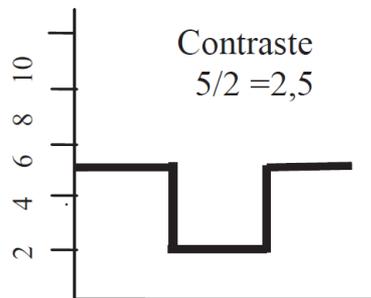
- Dividido em [função de λ e dim. partícula atmosférica]:
 - Espalhamento Rayleigh:
 - Diâmetro das partículas é menor que λ
 - Depende de λ , qnt. de partículas/ m^3 e índices refrativos (do meio/partículas)
 - É proporcional ao comprimento de onda: $R = 1/\lambda^4$
 - Influencia mais ondas curtas
 - Espalhamento Mie:
 - Diâmetro da partícula é comparável a λ
 - O coeficiente é a razão entre a frente de onda sobre a partícula pela secção transversal da partícula
 - Espalhamento Não-Seletivo
 - Partículas muito maiores que λ [do visível ao termal - 0,4 a 14 μm]
 - Ocorre em atmosferas densas
 - É responsável pela cor branca das nuvens, vista pelo sensor [reflete com força]
-

Espalhamentos Rayleigh e Mie

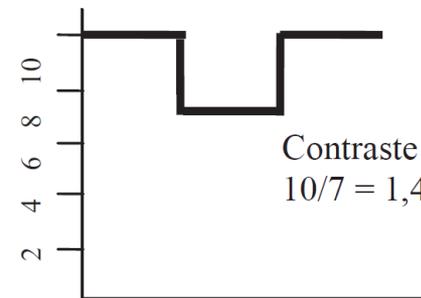
- Perda de contraste devido espalhamento Rayleigh e Mie:
 - Sejam alvo/fundo com de brilhos, sem influência atmosférica
 - Com influência atmosférica, os brilhos aumentam igualmente
 - Há perda de contraste (razão) entre os alvos!



cena original



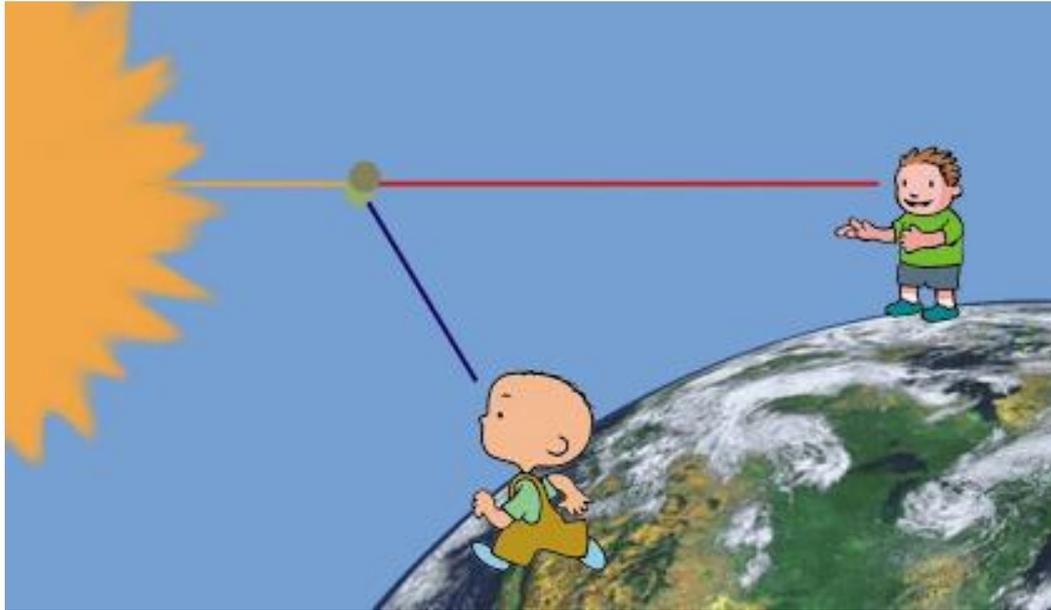
brilho sem espalhamento



5 unidades de brilho adicionadas

Tipo	Tamanho das partículas	Tipo da partículas	Efeito sobre o contraste
Rayleigh	$\ll \lambda$	Mol. de gás	Visível de pequeno comp.
Mie	$0,1 \sim 10\lambda$	Gotas d'água e aerossóis	Visível de longo comp.
Não-seletivo	$> 10\lambda$	Nuvem, névoa, etc.	Afeta todos comp. de onda

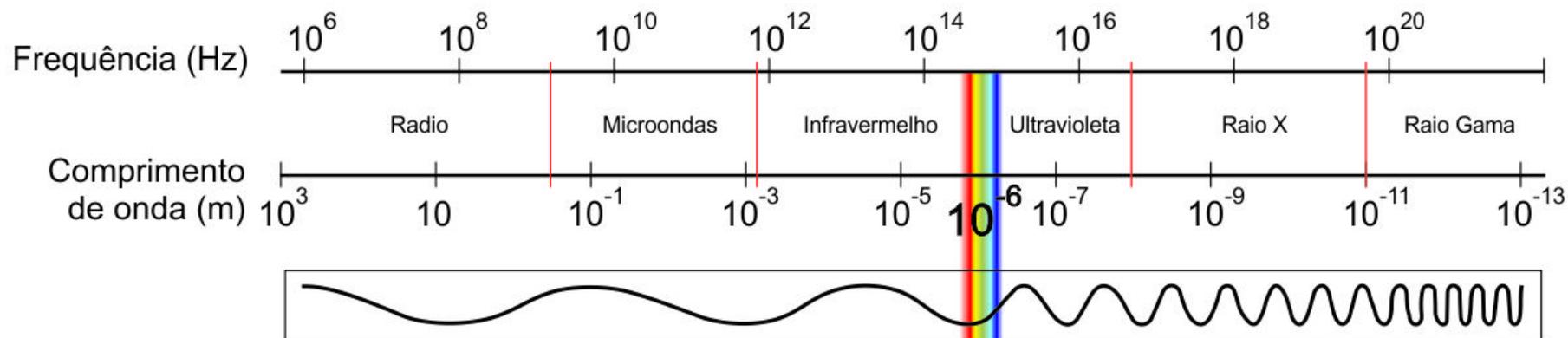
Espalhamento Rayleigh no céu!



- Observador em ângulo rasante, a camada de ar a ser atravessada é mais espessa, logo há mais espalhamento Rayleigh!
 - O comprimento de onda do vermelho é maior, ultrapassando materiais em suspensão na atmosfera
 - Já o azul, por ser mais curto, é retido...

Espectro Eletromagnético

- O conjunto de ondas que compõe o campo de REM de um objeto é denominado espectro
- Espectro Eletromagnético (EE) é todo o conjunto de comprimentos de onda conhecidos
- Divisões do EE
 - Processos físicos que originam a energia
 - Tipo de interação entre a radiação e os objetos
 - Transparência da atmosfera em relação a radiação



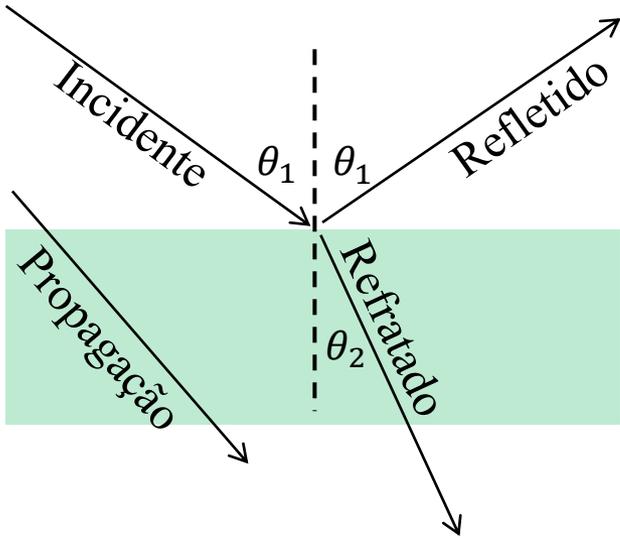
Índice de Refração

- A velocidade de propagação no vidro é $c/1,5$, comparado ao vácuo, logo o comprimento de onda também diminui (densidade do meio)
- Tal redução é denominado Índice de Refração:

$$\eta = c/m$$

m é a velocidade no meio e c no vácuo

- Neste caso, a Óptica Geométrica explica melhor



Densidade	Ângulo
$A < B$	$\theta_1 > \theta_2$
$A > B$	$\theta_1 < \theta_2$

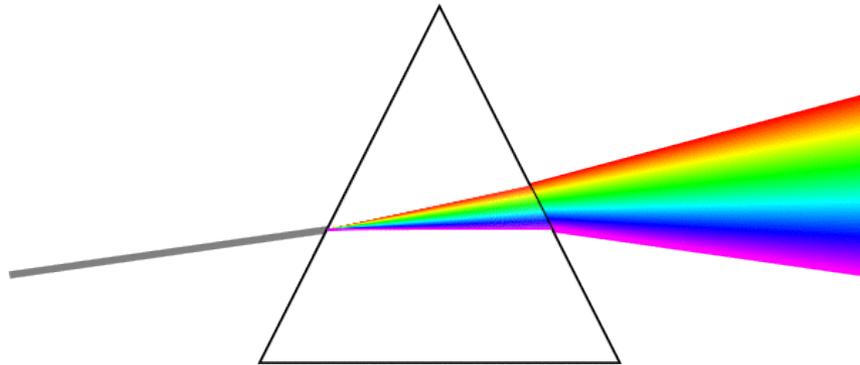
Lei de Snell e Prisma

- Ao atravessar dois meios com η 's diferentes, há mudança na direção de propagação
- A mudança depende do ângulo de incidência da REM na superfície dos meios (interface)
- Lei de Snell fornece uma relação entre índices e ângulos:

$$\text{sen}(\theta_1)\eta_1 = \text{sen}(\theta_2)\eta_2$$

η com $\lambda = 589$

Material	η
Ar	1,0003
Água	1,333
Gelo	1,31



- A luz branca é decomposta como mistura de cores
- η varia de acordo com o comprimento de onda
- Cada cor é refratada segundo um diferente ângulo
- Esse comportamento definiu o espectro visível!

Divisões do EE

Intervalo Espectral	λ
Raios cósmicos	0,01 Å
Raios gama	0,01 ~ 0,1 Å
Raios X	0,1 ~ 10Å
Ultravioleta	100 nm ~ 0,38 μm
Visível	0,38 ~ 0,76 μm
Infravermelho próximo	0,76 ~ 1,2 μm
Infravermelho de ondas curtas	1,2 ~ 3,0 μm
Infravermelho médio	3,0 ~ 5,0 μm
Infravermelho termal	5,0 ~ 1,0 mm
Microondas	1 mm ~ 1 m
Rádio	1 m ~ 10 km
Áudio	10 ~ 100 km
Corrente alternada	> 100 km

Divisões do espectro visível

λ (μm)	Cor
0,38 ~ 0,455	Violeta
0,455 ~ 0,482	Azul
0,482 ~ 0,487	Azul-esverdeado
0,487 ~ 0,493	Azul-verde
0,493 ~ 0,498	Verde-azulado
0,498 ~ 0,53	Verde
0,53 ~ 0,559	Verde-amarelado
0,559 ~ 0,571	Amarelo-verde
0,571 ~ 0,576	Amarelo-esverdeado
0,576 ~ 0,58	Amarelo
0,58 ~ 0,587	Laranja-amarelado
0,587 ~ 0,597	Laranja
0,597 ~ 0,617	Laranja-avermelhado
0,671 ~ 0,76	Vermelho

Resumo dos intervalos espectrais

Visível: região com mais alta incidência de fluxo radiante e onde há melhor janela atmosférica; porém há alto espalhamento da radiação

Infraverm. próximo: região onde ocorre importantes interações da REM com os átomos, gerando feições espectrais que permite identificar a natureza de vários tipos de minerais

Infraverm. de ondas curtas: região importante para identificar minerais; porém sofre muita absorção atmosférica

Infraverm. médio: O Sol e a Terra não emitem radiações nesta faixa, somente alvos como incêndios e vulcões são detectados; faixa pouco usada em SR

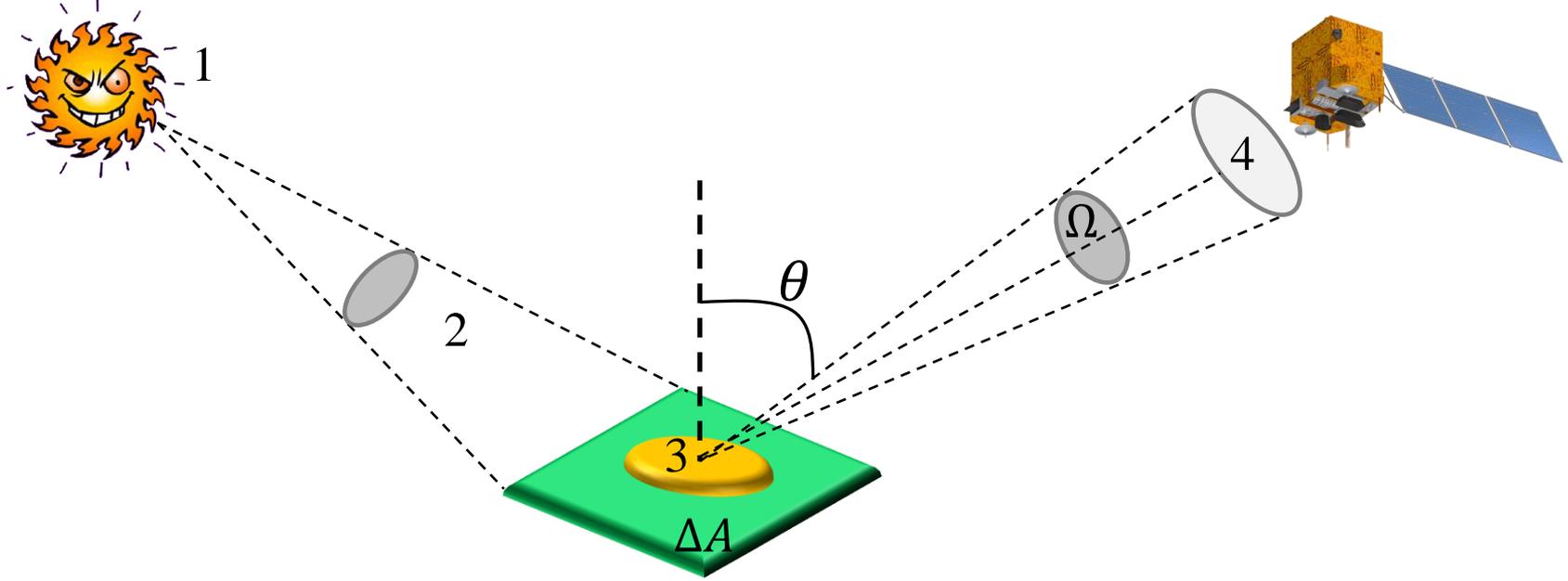
Infraverm. termal: ou região termal, corresponde a região onde se observa a radiação térmica dos alvos

Microondas: região de uso por sensores ativos (RADAR), onde a fonte geradora de REM é artificial

Radiância e Reflectância

- A forma como o sensor mede a REM é semelhante nos diferentes λ
 - Importante é saber qual componente da REM, que sai do alvo até o sensor, é medido e transformado em imagem
 - Existe um conceito radiométrico que define a radiação que deixa o alvo, e que depende do intervalo espectral
 - Primeiramente, trataremos da radiação óptica da luz solar
 - Simploriamente, o sensor faz uma medição radiométrica da radiação emitida pelos objetos (sensores são radiômetros imageadores)
 - A “Radiometria” é composta por uma série de termos e leis fundamentais para explicar o significado dos valores de REM medidos pelo sensor
-

Modelo básico de SR

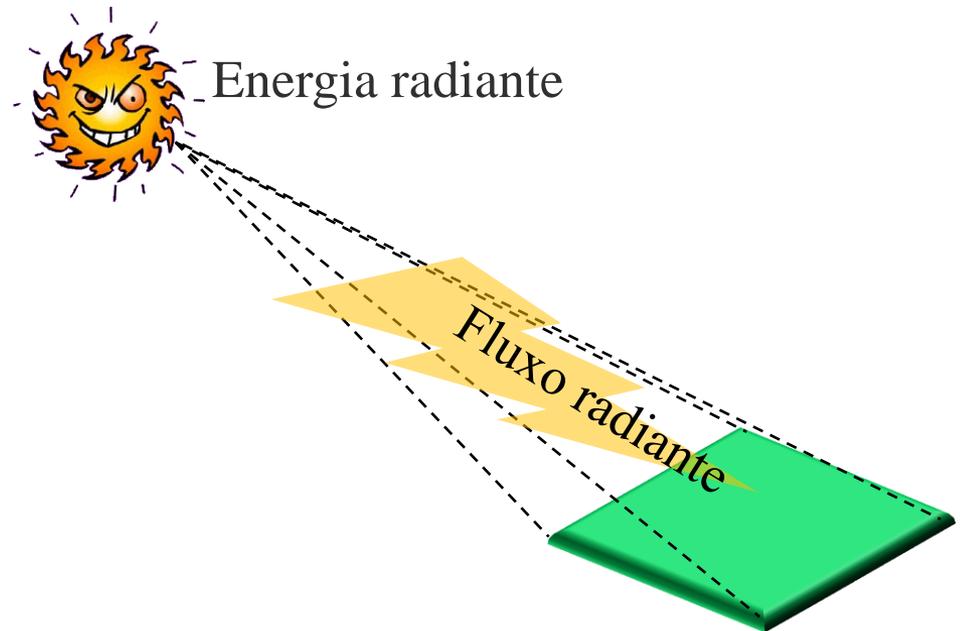


- 1 – Energia radiante
- 2 – Fluxo radiante
- 3 – Irradiância
- 4 – Radiância

- ΔA – Área imageada
- θ – Direção de propagação
- Ω – Ângulo sólido

Energia e fluxo radiantes

- Energia radiante: Q é a energia que se propaga da fonte [em Joules – J]
- Fluxo radiante: $\phi = \partial Q / \partial t$ é a taxa com que Q é transferido de um ponto/superfície para outra superfície [em Watts – W]



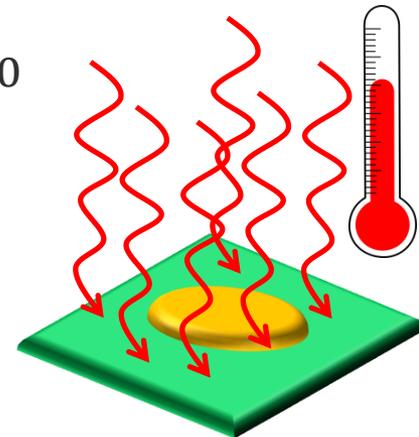
Irradiância (Incidente)

- Irradiância: $E_\lambda = \phi / \Delta A$ é o fluxo solar que incide em uma superfície, por área [em W/m^2]
- A Irradiância Incidente ($E_{g\lambda}$) é obtida integrando variáveis ambientais por onde a radiação passa:

$$E_{g\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda$$

Sendo:

- $E_{0\lambda}$ – irradiação solar no topo da atmosfera
- T_{θ_0} – transmitância atmosférica no ângulo zenital θ_0
- $E_{d\lambda}$ – contribuição solar difusa

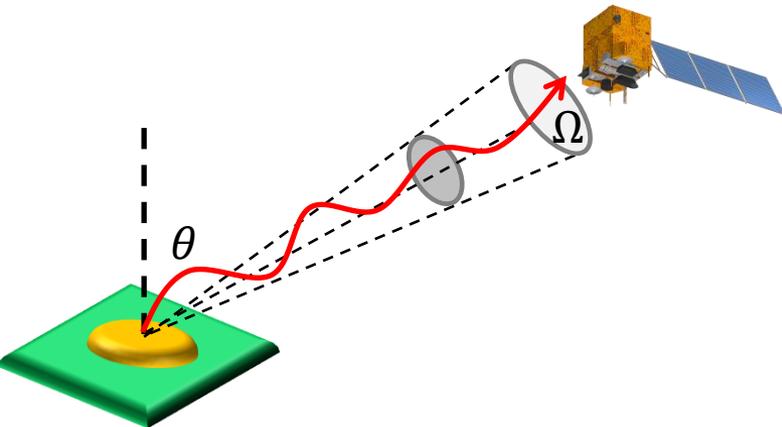


Radiância (Total)

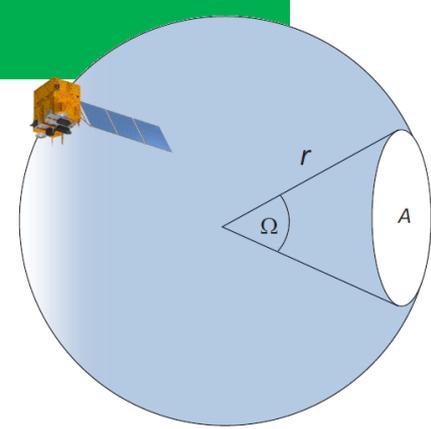
- Radiância: $L_\lambda = ((\phi/\Delta\Omega)/\Delta A) \cos \theta$ é a medida feita pelo sensor da densidade de fluxo radiante que deixa um elemento de área do terreno e que se propaga em uma direção (a do sensor), definida pelo cone (ângulo sólido) que contém tal direção [em $Wm^{-2}str^{-1} \mu m$]
- Assumindo que a Terra é um difusor perfeito, temos a radiância total:

$$L_T = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda T_{\theta_0} (E_{0\lambda} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda$$

Reflectância média da superfície



Ângulo sólido



- Descreve a convergência/divergência angular em, 3D, do fluxo de/para uma superfície
- É definido como a razão entre a superfície da área da esfera subentendida (pelo cone) pelo quadrado do raio da esfera:

$$\Omega = A/r^2 \quad [\text{em str} - \text{esferorradiano}]$$

- Usualmente, A é substituído pela base plana do cone
- A área que o sensor focaliza (visada) é dado em ângulo sólido
- Tal ângulo de visada é definido pela abertura do sistema óptico
- Assim, o sensor mede a intensidade radiante que deixa determinada área do terreno limitada pelo ângulo sólido Ω

Considerações adicionais

- Além de Ω , radiação medida depende da posição do sensor no espaço
- Toda discussão feita foi sobre Radiância, mas ainda há algo...
- A Irradiância varia no tempo (H-D-M), já que a posição do Sol muda
- A atmosfera é dinâmica, permitindo a passagem de quantidades diferentes de ϕ devido as absorções dos gases
- Assim, em diferentes instantes, a medida de radiância poderá ser diferente, apesar do alvo ser o mesmo
- Tal influência poderia ser removida se durante a medição da radiância (L_λ), também fosse medida a irradiância (E_λ) sobre o alvo
- A relação de radiância com irradiância estabelece a reflectância (ρ_λ)

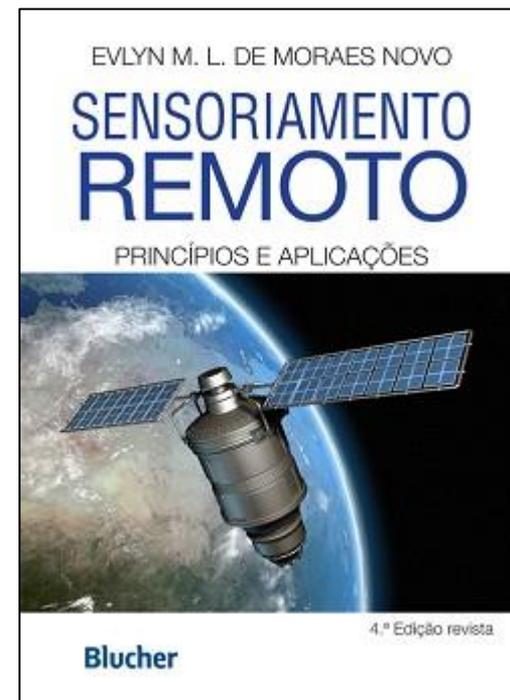
$$\rho_\lambda = \frac{L_\lambda}{E_\lambda} \text{ (\%)} \text{ [medida adimensional]}$$

Considerações adicionais

- Porém, os sensores não medem a irradiância solar, logo as imagens são representações da radiância
 - Para obter a imagem de reflectância é necessário converter os valores digitais em radiância e em seguida calcular a reflectância via 
 - Ainda, é necessário conhecer os valores de irradiância quando a imagem foi tomada
 - Usualmente, para imagens multiespectrais, a imagem de radiância é uma boa aproximação... já para hiperespectrais é necessário obter a reflectância
-

Bibliografia da aula

- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Orgs.) **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**, UNB/CNPq, Brasília, 2012.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**, 4ª Ed. Rev., Editora Blucher, 2014.



Grandezas Radiométricas

[ADICIONAL]

Grandeza	Símbolo	Equação	Conceito
En. Radiante	Q [J (Joules)]		Energia transportada como onda EM ou fóton
Fluxo Radiante	ϕ [W (Watts)]	$\phi = dQ/dt$	Taxa de variação no tempo
Irradiância	E [W m ⁻²]	$E = d\phi/dA$	Fluxo incidente sobre superfície por área
Excitância ou Emitância	M [W m ⁻²]	$M = d\phi/dA$	Fluxo que deixa superfície por área
Intensidade Radiante	I [W sr ⁻¹]	$I = d\phi/d\Omega$	Fluxo radiante que deixa fonte por unidade de ângulo sólido em dada direção
Radiância	L [W sr ⁻¹ m ⁻²]	$L = (d\phi/d\Omega)/dA \cos \theta$	Intensidade radiante por unidade de área normal á fonte em dada direção

Grandezas Radiométricas

[ADICIONAL]

Grandeza	Símbolo	Equação	Conceito
Emissividade	ϵ [Adim.]	$\epsilon = M/M_{bb}$	Razão entre exitâncias de material e do corpo negro
Absortância	α [Adim.]	ϕ_a/ϕ_i	Razão entre fluxo absorvido (ϕ_a) e fluxo incidente (ϕ_i) na superfície
Reflectância	ρ [Adim.]	ϕ_r/ϕ_i	Razão entre fluxo refletido (ϕ_r) e fluxo incidente (ϕ_i) sobre superfície
Transmitância	τ [Adim.]	ϕ_t/ϕ_i	Razão entre fluxo transmitido (ϕ_r) e fluxo incidente (ϕ_i) sobre a superfície