



# Sensoriamento Remoto II

GA115

Prof. Dr.Ing. Jorge A.S. Centeno

Departamento de Geomática

UFPR

2020



## Apresentação

Este material didático foi organizado como apoio às aulas a disciplina GA111 Sensoriamento Remoto I, do Departamento de Geomática da UFPR. O material é destinado aos alunos de graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da UFPR. A disciplina aborda os conceitos fundamentais do processo de aquisição de informações de sensoriamento remoto desde o espaço, inclui também alguns métodos de processamento e análise de imagens, dando ênfase às fases de correção geométrica e classificação digital. O curso pretende ser introdutório e um primeiro contato com esta disciplina. É assumido que os alunos têm algum conhecimento de processamento de imagens.

Na disciplina são apresentados os conhecimentos básicos de sensoriamento remoto com o que se pretende informar o aluno da teoria básica por trás do sensoriamento remoto e capacitá-lo para usar imagens e delas derivar informações úteis para a Cartografia da superfície da Terra com base em imagens orbitais.

### EMENTA (Unidades Didáticas):

- Conceituação. Histórico. Objetivos e perspectivas futuras.
- Princípios físicos. Principais sensores e produtos.
- Interpretação e análise de dados em Sensoriamento remoto.
- Classificação digital.

A disciplina está organizada em módulos, cada um deles constituindo uma unidade temática dentro da área de conhecimento.

- A primeira unidade uma breve introdução ao sensoriamento remoto, passando por uma revisão histórica de sua evolução.

Também são apresentados os princípios físicos da interação da radiação eletromagnética e os objetos;

- Na segunda unidade são apresentadas as assinaturas espectrais dos alvos mais comuns na Terra, bem como suas alterações.
- No terceiro módulo são apresentadas as principais características dos sistemas orbitais, incluindo suas resoluções. A seguir são apresentados os sistemas comerciais mais comumente usados na Cartografia;
- No quarto módulo são apresentados conceitos de imageamento pro RADAR.
- No sétimo módulo são apresentados métodos de classificação de imagens, incluindo métodos supervisionados e não supervisionados.
- No quarto módulo são apresentados métodos de classificação de imagens, incluindo métodos supervisionados e não supervisionados.

Pretende se seguir o seguinte cronograma:

- [Aula 1](#) Introdução: Histórico. Objetivos e perspectivas
- [Aula 2](#) Princípios físicos
- [Aula 3](#) assinaturas espectrais (a)
- [Aula 4](#) assinaturas espectrais (b)
- [Aula 5](#) Sistemas sensores
- [Aula 6](#) sistemas comerciais
- [Aula 7](#) Produtos
- [Aula 8](#) sistemas ativos - RADAR
- [Aula 9](#) Correções geométricas
- [Aula 10](#) Classificação (a)
- [Aula 11](#) Classificação (b)
- [Aula 12](#) Classificação (resumo)



## Introdução

Para o desenvolvimento deste curso o aluno deve ter conhecimentos básicos de processamento digital de imagens e programação. Como o curso será desenvolvido de forma semi-remota, com aulas assíncronas, o aluno deverá ser capaz de trabalhar com o software Multispec e elaborar pequenos programas em linguagem python. Recomendamos, para isto, instalar o ambiente pyzo, usando nas aulas de procesaemnto de imagens.

Sabe-se que o aluno não tem acesso ao software utilizado no laboratório de sensoriamento remoto do Departamento de Geomática, por isso, os execício foram simplificados e podem ser desenvolvidos em casa usando:

- Software [Multispec](#)
- ambiente Python. Recomenda-se usar o [PYZO](#). Porém qualquer outro, com o qual o aluno tenha familiaridade pode ser usado.

### •Organização semanal

- 1 hora leitura do material disponibilizado pelo docente
- 2 horas Aula síncrona no ambiente UFPR Virtual
- 2 horas Exercícios/solução de questionários (nota)

código	GA111
denominação	SENSORIAMENTO REMOTO I
carga horária semanal	05 hrs e total 75 hrs.



## Introdução

Para começar as aulas serão introduzidos alguns conceitos básicos, tanto sob forma de definições, como também com ajuda de equações e exemplos. Pretende-se responder a algumas questões básicas que podem ser novas para o aluno, como:

- O que é sensoriamento remoto?
- Como começou?
- Quando começou?
- Como evoluiu?
- Que vantagens oferece?
- Como pode ser usado na Cartografia?

A definição clássica de sensoriamento remoto pode ser encontrada no livro de Lillesand & Kiefer. A seguir é mostrada uma tradução livre:

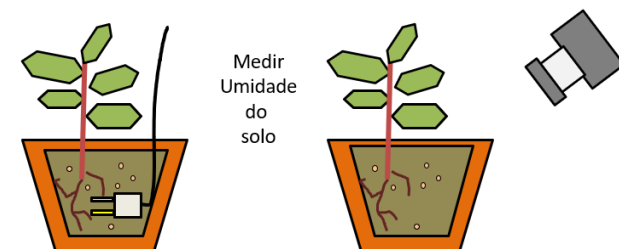
*“A ciência e arte de obter informações a respeito de um objeto, área ou fenômeno pela análise de dados adquiridos por um sistema que não se encontra em contato com o objeto, área ou fenômeno sob investigação”* (Lillesand & Kiefer, 1994).

Esta definição inclui dois conceitos básicos dosmque se deriva o nome:

“obtenção de informações”, SENSORiament

“sem entrar em contato” Remoto

Ou seja, trata-se de derivar alguma informação de um objeto a distância. Por exemplo, é possível medir a umidade do solo usando aparelhos que podem ser enterrados no solo, como mostrado na figura abaixo. Porém, é possível diferenciar se o solo está seco ou molhado sem tocar nele. Os solos molhados escurecem, então mudam sua cor. Assim sendo, seria possível determinar se um solo está úmido ou seco analisando sua claridade. Isto poderia ser feito, por exemplo, usando uma câmera digital sobrevoando a área. Claro, o solo deverá estar descoberto e visível.



Outro exemplo do dia a dia é a medição de temperatura. Tradicionalmente a temperatura de uma pessoa era determinada colocando um termómetro na axila ou na boca, mas com os riscos de contaminação por vírus, se popularizou o uso de sensores que medem a temperatura a distancia (Sensor Remoto).

Pode imaginar outro exemplo?



A definição apresentada é bastante geral. Na prática, o termo sensoriamento remoto é aplicado para descrever

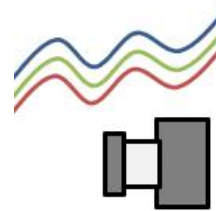
*“Procedimentos destinados à obtenção de imagens mediante o registro das variações gravimétricas, ondas sísmicas, ondas acústicas e energia eletromagnética.”*

(Swain and Davis [1978]).

Bem, aqui temos uma descrição de diferentes formas de energia que podem ser medidas para derivar informações. Na prática, porém, a forma mais difundida é aquela que usa a radiação **eletromagnética**. Por isso, neste curso será dada ênfase a esta forma de sensoriamento remoto.

Com isso, pode-se descrever sensoriamento remoto segundo a definição dos elementos de Fussel et al. [1986]:

- aquisição, coleta ou registro sem necessidade de entrar em contato com o objeto;
- utilizando regiões do espectro eletromagnético (tipicamente, mas não exclusivamente) que incluem e excedem a região visível;
- usando instrumentos;
- localizados em plataformas móveis;
- e a transformação simbólica dos dados coletados por meio de técnicas de interpretação e/ou técnicas de reconhecimento de padrões utilizando computadores.



O Engenheiro Cartógrafo desenvolve atividades especialmente no último elemento desta lista, porém deve conhecer todos os demais para poder desenvolver suas atividades de forma adequada e tomar as decisões baseado na teoria consolidada.



## Primórdios

O nascimento do sensoriamento remoto (que analisa a radiação eletromagnética) se confunde com o nascimento da fotografia. Sendo a luz uma forma de radiação eletromagnética, a fotografia é o registro de uma forma de radiação eletromagnética sob forma de uma imagem.

A história da fotografia é muito bonita, pois envolve processos físicos e a busca do ser humano por captar e representar seu meio ambiente. Uma descrição interessante é encontrada em:

[www.culturagenial.com/historia-evolucao-fotografia/](http://www.culturagenial.com/historia-evolucao-fotografia/)

O uso da fotografia como ferramenta de coleta de informações para mapear uma região é atribuído a Gaspar Nadar, quem em 1855 propôs tirar fotos desde um balão para poder registrar os elementos na superfície da terra e assim poder elaborar um mapa mais acurado e de forma mais rápida do que percorrendo a mesma região por terra.

Esta prática se mostrou eficiente e posteriormente, em 1908, aviões foram empregados como plataforma. Aviões são mais fáceis de controlar do que um balão e podem sobrevoar a região com maior eficiência e desde diferentes distancias. Com isto, a fotogrametria foi desenvolvida, criando métodos e sistemas para derivar a informação geométrica e temática das imagens.



<http://mazz.blogia.com/>

*The first known aerial photograph was taken in 1858 by French photographer and balloonist, Gaspar Felix Tournachon, known as "Nadar". In 1855 he had patented the idea of using aerial photographs in mapmaking and surveying, but it took him 3 years of experimenting before he successfully produced the very first aerial photograph. It was a view of the French village of Petit-Becetre taken from a tethered hot-air balloon, 80 meters above the ground.*  
(<http://www.papainternational.org/history.html>)



O mapeamento desde aeronaves recebeu um grande impulso durante as guerras mundiais. O conflito bélico envolveu vários países e os combates se desenvolveram em diferentes regiões do planeta, muitas delas com Cartografia precária. A necessidade de se planejar ações militares, deslocamento de tropas e localização de infraestrutura e recursos que possam ser usados para dar suporte à instalação de acampamentos demandou a Cartografia atualizada. Por outro lado, também havia interesse em se conhecer a movimentação inimiga para planejar ataques. Nada mais adequado do que um método “remoto” para esta tarefa, então aviões de reconhecimento e mapeamento foram largamente empregados durante as guerras. O avião foi usado para a observação da frente de batalha, incluindo o registro de imagens aéreas com câmaras fotográficas que depois eram analisadas.



<http://pw20c.mcmaster.ca/us-air-force-photograph-1918-0>

Na primeira guerra mundial, o valor do reconhecimento fotográfico foi valorizado por ambos os lados. Por exemplo, Alemanha adquiriu 4.000 fotografias por dia como parte do seu planejamento para a grande ofensiva de 1918;

Por outro lado, o Exército Americano imprimiu mais de 1.000.000 fotografias nos 4 últimos meses da guerra. Isto comprova que a fotogrametria foi amplamente usada nas tarefas de mapeamento da Terra e abriu também oportunidade para o desenvolvimento de métodos sistematizados para a análise e tratamento destes dados.



MINISTRY OF INFORMATION FIRST WORLD WAR OFFICIAL COLLECTION



O uso militar de imagens para o mapeamento deixou uma herança valiosa que teve grande aceitação nos anos que seguiram o fim da guerra. Se é possível mapear um território para planejar um ataque ou verificar a existência de alguma infra-estrutura, por exemplo uma ponte, então esta mesma técnica pode ser aplicada para fins pacíficos, por exemplo na engenharia.

O uso da fotografia aérea foi assim ampliado em projetos civis, como:

- mapeamento na fase de anteprojeto,
- Reconhecimento,
- obras de construção civil.

Por exemplo, quando se deseja projetar uma estrada de ferro, por exemplo, que deve atravessar um território sem mapeamento adequado e atualizado, fotografias aéreas podem ser usadas para mapear o local e selecionar o melhor traçado da linha.

Da mesma forma, é possível verificar, usando imagens aéreas, se existem assentamentos humanos em regiões que podem ser afetadas pelas obras.

Os avanços tecnológicos possibilitaram o uso de imagens coloridas, o que ampliou a capacidade de diferenciar objetos e, posteriormente, a inclusão de imagens no infravermelho próximo, uma contribuição significativa no mapeamento de vegetação.



AIR MINISTRY SECOND WORLD WAR OFFICIAL COLLECTION



Exemplo de Imagem preto e branco, colorida e infravermelho.

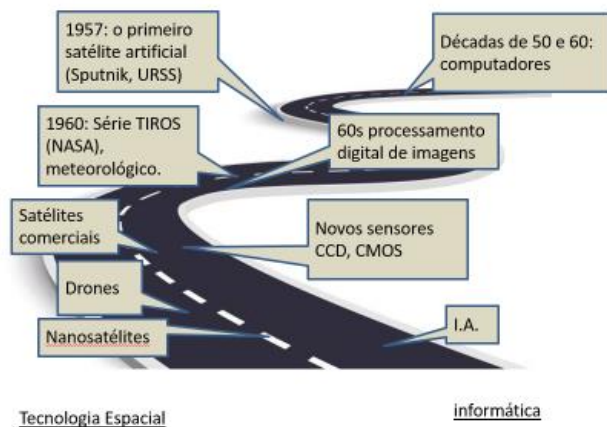
*Use of land surface remotely sensed satellite and airborne data for environmental exposure assessment in cancer research. Maxwell Jaymie, S. et al (2009). Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology 20(2):176-85.*





A evolução da tecnologia é cada vez mais acelerada e conseqüentemente este campo da engenharia teve alterações significativas no final do século passado. Duas grandes vertentes podem ser consideradas:

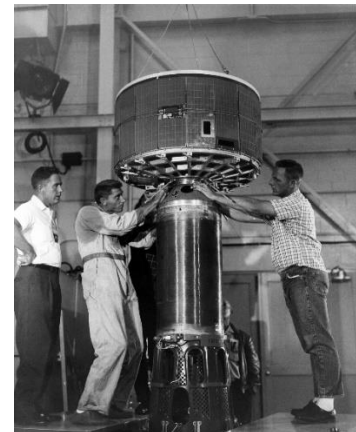
- a) A tecnologia espacial permitiu o desenvolvimento de plataformas cada vez mais sofisticadas, capazes de sobrevoar o planeta desde o espaço ou desde curta distância com o use de drones.
- b) Por outro lado, o constante aprimoramento da informática permitiu usar computadores em diferentes etapas do sensoriamento remoto, culminando com o desenvolvimento de sensores eletrônicos que substituíram os tradicionais filmes, e mais recentemente o desenvolvimento de métodos de processamento e análise de imagens baseados em Inteligência artificial.



Um marco na história é o lançamento do primeiro satélite artificial (Sputnik, URSS) em 1957. Isto comprovou que era possível sobrevoar a Terra com satélites artificiais e que posteriormente abriria a possibilidade de instalar sensores nestas plataformas.

Assim, em 1960, a NASA colocou em órbita o primeiro satélite da série TIROS, com a finalidade de obter imagens da atmosfera para a meteorologia. Porém, quando nuvens não cobriam a Terra, as imagens mostravam a superfície do Planeta, o que sugeriu o uso de sensores próprios para o mapeamento da superfície do planeta.

Hoje fala-se até em nanosatélites, plataformas pequenas (10cm x 10cm x 10cm) que são mais baratas e de acesso fácil. Porém a questão do lançamento ainda dificulta sua popularização.



TIROS(NASA): <http://www.nasa.gov/centers/goddard/about/didyouknow.html>

CubeSAT <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-opens-new-cubesat-opportunities-for-low-cost-space-exploration>



## Desafio

*O profissional atual deve ser capaz de aproveitar esta grande quantidade de dados de maneira eficiente e racional em benefício do desenvolvimento da sociedade e a preservação do meio ambiente.*

Com base no apresentado... Enumere as vantagens do sensoriamento remoto, mostrando um exemplo em cada caso.



## Princípios físicos

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos do processo de coleta de informações com sensoriamento remoto, a radiação eletromagnética e sua interação com a superfície da matéria. Os seguintes conceitos devem ficar claros para o aluno após esta leitura:

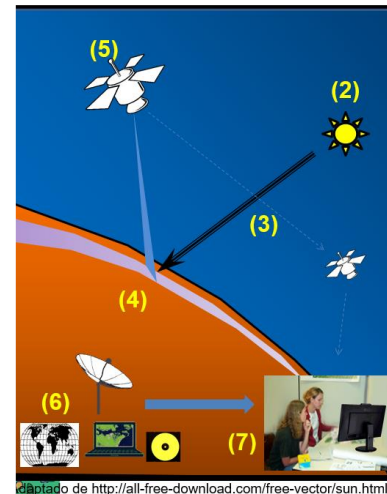
- Etapas e processos do sensoriamento remoto
- Princípios e leis da radiação eletromagnética
- Radiação solar
- Conceito de corpo negro
- REM e sensoriamento remoto
- Modelos da radiação eletromagnética:
- Onda e partícula
- Espectro eletromagnético
- Geometria da radiação, termos, unidades
- Interação com a atmosfera
- Interação com a superfície

Os principais elementos do sensoriamento remoto são representados na figura ao lado. Eles incluem

A Radiação Eletromagnética (1), que será detectada e medida. Para entender a radiação eletromagnética proveniente do alvo (seja ela refletida ou emitida), é importante revisar algumas leis da física que descrevem seu comportamento.

A Fonte desta radiação (2). Nem todos os objetos emitem radiação da mesma forma. Assim sendo, a radiação utilizada depende muito da sua fonte. Por isto, alguns conceitos da emissão de energia por parte da matéria serão

apresentados. Como no sensoriamento remoto é frequentemente usada a energia solar, a emissão do Sol será descrita em detalhe.



adaptado de <http://all-free-download.com/free-vector/sun.html>

Para chegar à superfície da Terra, a radiação se propaga (3) no vácuo e depois atravessa a atmosfera. Neste caminho, ela pode sofrer alterações, que serão estudadas.

Também devemos entender como a radiação eletromagnética interagem com a superfície dos objetos (4). Como ela pode ser absorvida ou refletida, por exemplo. E qual a parcela da energia incidente no objeto que podemos medir usando um sensor remoto (5).

A engenharia permitiu desenvolver diferentes sensores instalados em plataformas espaciais. Por isto, devemos também estudar as características dos sistemas sensores (5), como sua órbita e velocidade, como também que tipo de sensor é usado e qual a radiação medida.

Os sistemas de transmissão e recepção (6). A informação é registrada e medida no sensor a bordo do satélite, mas para seu uso na Terra, ela é transformada ao formato digital e transmitida a estações de recepção para sua veiculação.

Finalmente, temos a interpretação e geração de informações (7) por parte de diferentes profissionais. É nesta etapa que nossos alunos terão possibilidades de participar, processando e analisando os dados, com base nos conhecimentos das etapas anteriores. O profissional deve tomar a decisão adequada com base em conhecimento.



## A radiação eletromagnética

### Teoria ondulatória: modelo de onda (Maxwell)

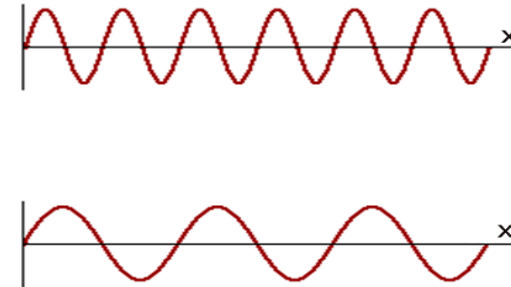


- James Clerk Maxwell
- (1831 — 1879)

O físico James C. Maxwell foi um físico e matemático escocês que se dedicou ao estudo da luz e a radiação eletromagnética (a luz é uma forma de radiação eletromagnética) e finalmente desenvolveu a teoria do eletromagnetismo, uma teoria que une os conceitos do magnetismo com os da eletricidade e a óptica para descrever o comportamento da radiação eletromagnética. Maxwell observou que se um campo magnético em movimento pode gerar um campo elétrico, então um campo elétrico (uma carga elétrica oscilando, por exemplo) pode criar um campo magnético. Com isso, Maxwell concluiu que a radiação eletromagnética pode ser descrita como ondas. Estas ondas são uma junção de um campo magnético com um campo elétrico e se propagam a uma velocidade constante no vácuo. Importante, elas transportam energia.



Bem, se a radiação eletromagnética pode ser descrita como uma onda, vale a pena revisar alguns conceitos de uma onda. Na figura a seguir, o que é: a Amplitude da onda? seu Comprimento de onda? E sua frequência? Que unidades são usadas para medir estas grandezas?





Imagine uma onda se propagando pelo vácuo, seguindo uma trajetória como foi mostrada na figura. Ela se desloca no espaço e em um determinado tempo (t) cobre uma determinada distância (x) a uma velocidade constante. Se for no vácuo, a velocidade da luz (c).

Qual o tempo necessário que a onda complete um ciclo?

Se velocidade= $dx/dt$ , então:

$$c = dx/dt$$

sendo a distância na qual a onda completa um ciclo igual a seu comprimento de onda ( $\lambda$ ),

$$c = \lambda/dt$$

e o tempo necessário para completar um ciclo igual ao inverso da frequência (f)

$c = \lambda * f$  ... do que resulta que

$$\lambda = c/f$$

Logo, podemos descrever uma onda em termos de comprimento de onda ou frequência. Dada a frequência, podemos calcular o comprimento de onda e vice-versa.

A frequência é descrita em Herz (Hz). O que é um Herz?



Heinrich Hertz (1857 - 1894)

Agora vamos fazer um pequeno exercício mental. Como estão suas habilidades matemáticas? No site:

[www.acheradios.com.br/radios/pr/curitiba/](http://www.acheradios.com.br/radios/pr/curitiba/)

podemos encontrar uma lista de emissoras de rádio de Curitiba. Ah! também incluímos na lista a frequência de operação de um forno micro-ondas. Calcule o tamanho do comprimento de onda de cada uma delas.

Emissor	frequencia	Comprimento de onda	Obs.
Caiobá	102.3 MHz		
Dufisora	590 kHz		
Marumby	730 kHz		
Ouro verde	105.5 MHz		
Seu microondas	2.450 MHz		

Quais fontes emissoras têm menor comprimento de onda?

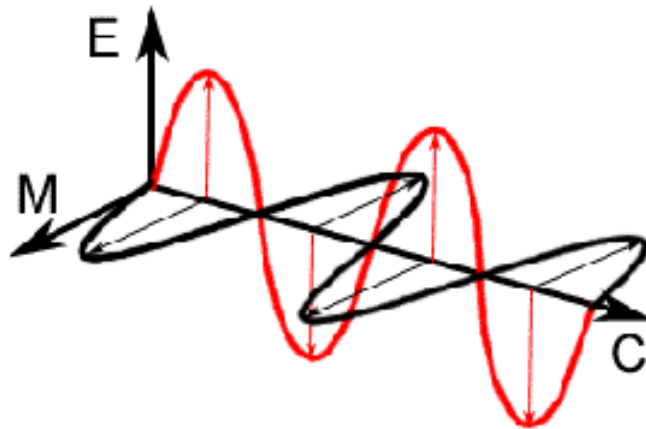
Pelo comprimento de onda, pode agrupar as emissoras de rádio em dois grupos?



## Teoria ondulatória

Então, segundo Maxwell, a radiação eletromagnética consiste em dois campos: campo magnético e campo elétrico, que seguem um movimento harmônico simples e se propaga à velocidade da luz ( $c$ ).

Lembre-se que um campo magnético em movimento pode gerar um campo elétrico, como ocorre nos motores elétricos. Um campo magnético em movimento gera um campo elétrico, ou vice-versa, e estes campos se propagam seguindo um movimento harmônico simples, porém posicionados de forma perpendicular um ao outro, transportando energia sob a forma de “radiação eletromagnética”.



## Importante:

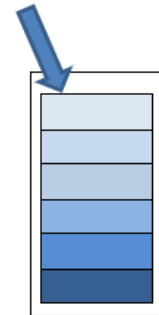
A existência dos campos magnéticos e elétricos, perpendiculares, explica alguns fenômenos que percebemos ao olho nu: a **reflexão** e **refração**.



A refração da luz ocorre quando a luz passa de um meio para outro, ou seja, muda o meio no qual se propaga. Por exemplo, passando do ar à água em uma piscina. A frequência da radiação não é alterada ao atravessar este novo meio, porém, sua velocidade sim. Assim sendo, ao passar do ar à água os feixes de luz são desviados.

Confira na figura ao lado como a imagem do canudo de metal é “quebrada” ao passar de um meio (ar) para outro (água). Este efeito é causado pela refração da luz e ocorre apenas na interface, na superfície da água.

Pergunta: O que ocorreria se a água tivesse densidades diferentes variando na vertical?

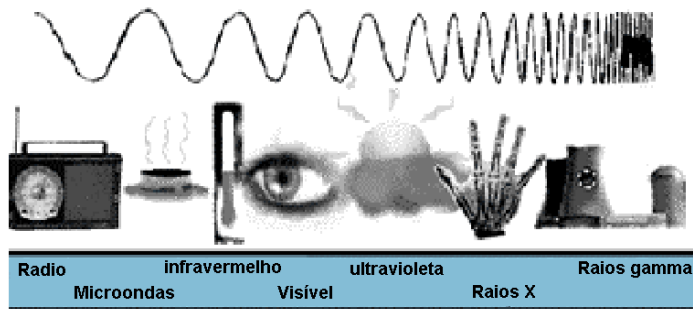




## O espectro eletromagnético.

Considerando as possíveis frequências, ou comprimentos de onda, em teoria, o comprimento de uma onda poderia variar de zero até infinito. Ou seja, valores extremamente pequenos são possíveis de serem encontrados, mas também ondas maiores, como as que foram calculadas no exercício acima. valores

Porém, na prática, toda essa gama de variação foi organizada e dividida em regiões com características similares, regiões nas que a radiação eletromagnética se comporta de forma similar ou interage de forma similar com os objetos na terra. Esta organização é denominada de “espectro eletromagnético”



<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>

A figura acima pode ser usada para se ter uma ideia das faixas mais comuns e sua ordem de grandeza.

As ondas com maior comprimento de onda, na figura, são as ondas de rádio. Lembra do exercício anterior onde você

calculou o comprimento de onda de algumas emissoras de rádio? Grandes são também as micro-ondas, também vimos isso no exercício.

A região visível do espectro é muito pequena e fica em torno de 400 a 700 nm (nano metros). Agora, a radiação também varia de forma contínua na região do visível. Os comprimentos de onda menores estão associados ao azul (indo para o violeta). Aumentando o comprimento de onda, passamos pelo ciano, verde, amarelo, laranja e no extremo superior encontramos o vermelho. Para simplificar, esta região foi dividida em três grandes regiões, azul (400-500nm), verde (500-600nm) e vermelho (600-700nm).



Complete a tabela:

Cor	Comprimento de onda	frequencia	Obs.
Azul	400-500nm		
Verde	500-600 nm		
Vermelho	600-700nm		

Por conveniência, algumas faixas do espectro foram batizadas em função de sua posição em relação ao espectro visível. Assim, por exemplo, a região vizinha com frequências maiores foi denominada de “ultra-violeta”. Já a região com frequências abaixo do vermelho se chama de “infra-vermelho”.

Especial atenção merece o infravermelho, pois ele é muito usado no sensoriamento remoto. Lembra da importância da fotografia infravermelha para a agricultura?



A região do infravermelho pode ser dividida em três grandes regiões.

A região mais próxima ao visível é chamada de infravermelho próximo (Near-IR, NIR). Ela é consideravelmente larga, vai de 700 a 1300nm. O ser humano não pode perceber essa radiação ao olho nu, apenas com o uso de sensores artificiais como o CCD.

A seguir se encontra a região do infravermelho médio, em trono de 1300nm a 4000nm. Ou em micras, entre 1,3 a 4 micras.

Finalmente, os maiores comprimentos de onda do infravermelho (entre 4 a 100 micras) são conhecidos como a região do infravermelho distante (distante do visível). Esta região também é chamada de “termal” porque nela predomina a radiação eletromagnética emitida pelos corpos na terra sob forma de calor. Por isso, outra denominação é “infravermelho emissivo”.

É comum também dividir o infravermelho em duas grandes regiões, agrupando a região do próximo com a do médio, pois nestas regiões a radiação eletromagnética na terra que predomina é a energia solar refletida pelos objetos. Assim sendo, as regiões são denominadas de infravermelho refletido (short wave infrared, ou infravermelho de ondas curtas) e infravermelho emitido (ou long wave infrared, infravermelho de ondas longas).

Abaixo do ultravioleta, em termos de comprimento e onda, se encontram os raios X e os raios Gamma. Acima do

infravermelho se encontram as microondas e as ondas de rádio.

As micro-ondas variam na ordem de mm, cm ou m. Esta região também é dividida em bandas mais estreitas e recebem a seguinte denominação:

banda	Faixa cm
P	30-100
L	15-30
S	7,5-15
C	3,75-7,5
X	2,4-3,75
Ku	1,57-2,4
Ka	1,1-1,67

Com isto, as faixas espectrais mais usadas no sensoriamento remoto estão localizadas no visível, infravermelho e nas micro-ondas. Isto se deve à viabilidade técnica de se obter informação espectral desde o espaço.

Região	nome	Faixa (µ m)
Visível	Azul	0.4-0.5
Visível	Verde	0.5-0.6
Visível	Vermelho	0.6 - 0.7
infra-vermelho	próximo	0.7 a 1.3
infra-vermelho	médio	1.3 a 4.0
infra-vermelho	Distante	4 a 100
microondas	Micro-ondas	Maior que 1mm





## REM: como partícula

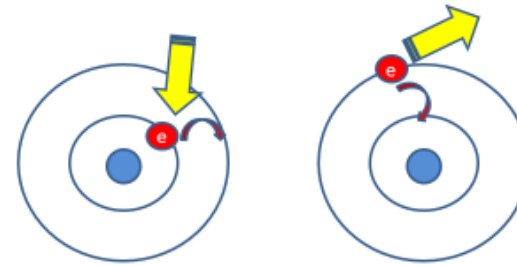
Alguns fenômenos não podem ser explicados com o modelo ondulatório da radiação eletromagnética. Por isso, novas teorias foram propostas na medida em que o conhecimento em física era aprofundado.



Em 1911, Ernest Rutherford propôs um modelo do átomo composto por elétrons, (com carga negativa) circulavam em torno de um núcleo (com carga positiva) composto por nêutrons e prótons. O modelo seria para explicar alguns conceitos, como as cargas dos diferentes elementos, porém existia uma falha no modelo: Se o elétron descreve uma órbita circular em torno do núcleo igual que um planeta em torno do sol, o elétron teria uma aceleração tangencial. Porém, segundo as leis de Maxwell, por ter aceleração o elétron deveria emitir luz, e com isso perder energia gradualmente, o que causaria perda de sua aceleração, o que levaria o elétron a colidir com o núcleo.



Uma solução foi encontrada por Niels Bohr e sua teoria quântica. Ele explicou que existem órbitas estáveis possíveis para o elétron, cada uma caracterizada por uma quantidade fixa de energia. Neste modelo, a o eletron pode mudar de órbita ganhando o perdendo energia, sendo que a quantidade de energia é fixa (quanta).



Quando o elétron cai para uma órbita menor, energia é liberada, mas esta quantidade é fixa, o que restringe as possíveis órbitas. Por outro lado, para subir a uma órbita maior, o elétron necessita uma unidade de energia.

Ao descer de nível, o elétron libera uma quantidade fixa de energia (um fóton). Assim, e segundo Plank, A energia eletromagnética é emitida, absorvida ou mesmo propagada sob forma de pequenas partículas, em unidades fixas, os fótons ou quanta.



A energia transportada por um fóton pode ser calculada em função da frequência da radiação:

$$Q = h \cdot f,$$

onde “h” representa a constante de Plank.

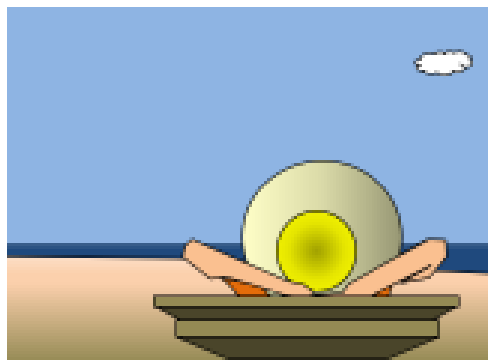
$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  constante de Plank [Js].

Q representa a energia em Joule [J]

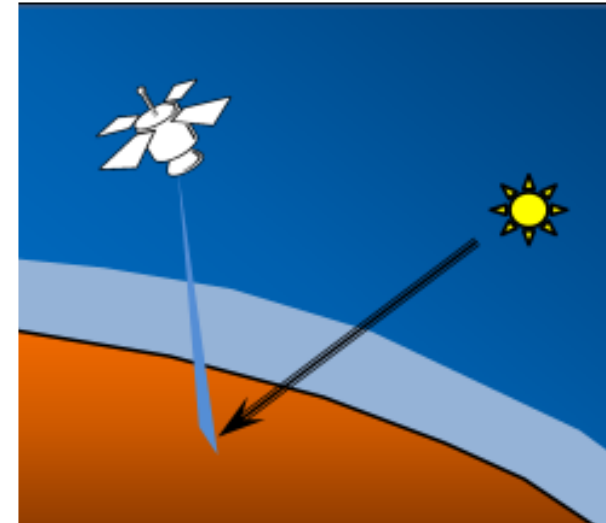
Isto também pode ser descrito em função do comprimento de onda, pois existe uma estreita relação entre a frequência e o comprimento de onda, como já vimos.

$$Q = h \cdot c / \lambda$$

Muito bem, com base nesta teoria podemos entender alguns fenômenos. Por exemplo, quando você vai à praia e pretende evitar se queimar com a radiação solar, você compra um creme de filtro solar. Se existissem filtros infravermelhos e ultravioletas, qual deles você compraria? Por quê?



Agora, se você deseja medir a radiação eletromagnética da região do visível desde uma considerável distância, qual cor seria mais fácil de medir? Qual mais difícil? Considere que a medição se torna mais difícil na medida em que a energia disponível for menor.





## Sensoriamento remoto PASSIVO ou ATIVO

Pela definição de sensoriamento remoto, trata-se de deduzir informações de um objeto a partir da radiação (eletromagnética) proveniente de sua superfície. Isto, claro, usando instrumentos geralmente desde o espaço. Porém, estando o sensor a uma considerável distância, como saber se a radiação é emitida pelo objeto ou se ela é proveniente de outra fonte e está sendo apenas refletida pelo objeto?

Caso o objeto não emita radiação eletromagnética e não exista uma fonte externa, então seria impossível fazer sensoriamento remoto. A não ser que...

Na ausência de uma fonte externa podemos usar uma fonte própria para iluminar o objeto. É o que ocorre quando fotografamos a noite, usamos o “flash”. O flash é uma fonte própria de energia, que emite luz por um instante, em quantidade suficiente para registrar a imagem.

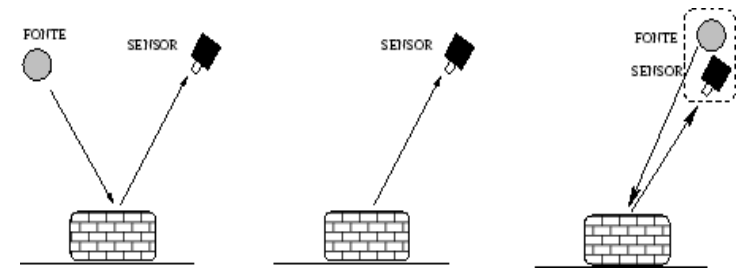


*Foto sem e com flash*

NO sensoriamento remoto também podemos usar uma fonte própria e artificial para iluminar a superfície da Terra. Isto ocorre, por exemplo, quando são tomadas imagens de radar. Neste caso, micro-ondas são emitidas pelo sistema e uma parcela, aquela refletida pelo objeto, é medida. Neste caso, como produzimos a resposta do objeto à radiação, estamos fazendo sensoriamento remoto “ativo”. Quando a fonte é externa ao sistema, o sensoriamento remoto é chamado de “passivo”.

Na figura abaixo, trata-se de uma forma “ativa” ou “passiva” de sensoriamento remoto?

- energia emitida por uma fonte natural e refletida pela superfície do objeto,
- energia emitida pelo objeto e
- energia emitida artificialmente em direção ao objeto e refletida pela superfície do objeto.

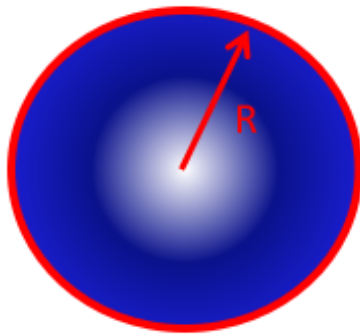




## Uma fonte natural: o SOL

Embora seja possível “iluminar” o a Terra desde o espaço, como é feito no RADAR, esta prática é mais cara, pois demanda a emissão de energia. Uma forma mais barata consiste em medir a radiação emitida pela Terra ou então a radiação solar refletida pela superfície da Terra, o sensoriamento remoto passivo. Então, é importante conhecer em mais detalhe a forma como o Sol irradia radiação eletromagnética.

**Isotropia:** O sol irradia energia aproximadamente de forma uniforme em todas as direções. (irradiador isotrópico). Por isso, pode-se dizer que a potencia total ( $P_t$ ) da radiação emitida está distribuída em todas as direções.



Logo, considerando uma esfera de raio “R” em torno do Sol, o fluxo de energia total é constante para qualquer raio.

Claro que, considerando apenas uma pequena unidade de área desta esfera teórica, o fluxo será menor na medida em que

o raio é aumentado.

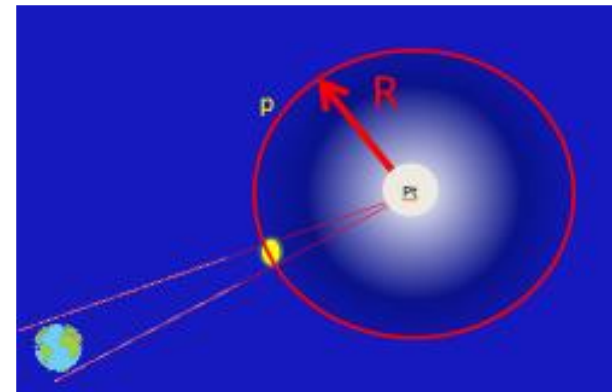
Podemos calcular o fluxo de energia que atravessa uma unidade de área a uma determinada distância (R) da fonte.

Se o Sol tem uma potência total  $P_t$

$$p = P_t / (4\pi R^2)$$

LOGO: a densidade de potência é inversamente proporcional ao quadrado da distância.

Visto desde a terra, o Sol pode ser considerado uma fonte pontual de energia, porque está muito distante. Assim, apenas uma pequena parcela de sua energia chega à Terra.



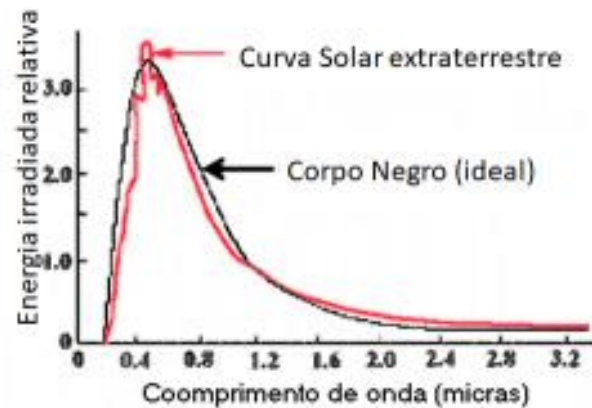


## Modelo do corpo negro

Embora seja dito muitas vezes na escola que o sol “emite todas as cores por igual”, o Sol não emite todos os comprimentos de onda por igual, especialmente se se consideram regiões fora do espectro visível. O Sol emite energia de maneira diferenciada ao longo do espectro.

Então, para entender a emissão solar, pode-se usar o modelo físico teórico do **corpo negro**, pois o sol se aproxima muito de um corpo negro.

Um corpo negro “emite toda a energia disponível” e o Sol pode ser considerado um emissor ideal (Corpo Negro) a 6000K, como é mostrado na figura abaixo., a variação da emissão solar em diferentes comprimentos de onda se aproxima muito bem do modelo do corpo negro.



Adaptado de <http://web.pdx.edu/~emch/rs/EXArs.html>

A emitância (Energia emitida pela superfície do corpo, por segundo e por unidade de área) de um corpo negro pode ser modelada como:

$$M_{\lambda} = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}$$

onde

K= constante de Boltzman

c= velocidade da luz

$\lambda$ = comprimento de onda

T= temperatura

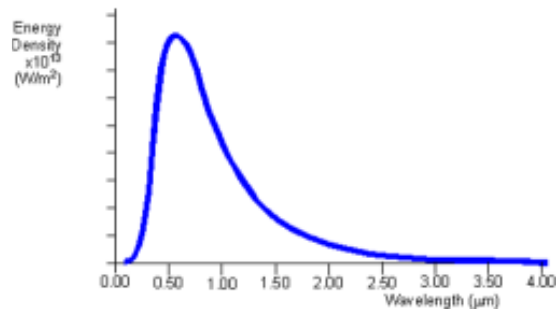
Com base nesta teoria, pode-se dizer que:

- A radiação emitida é constante ao longo de todo o espectro?
- A emissão de energia depende da Temperatura do objeto?



## Um pouco de exercício

Na seção anterior vimos que o Sol se comporta de forma muito similar a um corpo negro e entendemos o que seria o modelo do corpo negro. Por exemplo, na figura abaixo é mostrada a variação da emissão de radiação eletromagnética de um corpo negro a 5000K.



Fonte: <http://voyager.egglecliffe.org.uk/physics/astronomy/blackbody>

Notas-se que a emissão não é uniforme ao longo do espectro e que é registrado um pico máximo de emissão em um comprimento de onda específico.

Para calcular o comprimento de onda onde ocorre o máximo de emitância para uma determinada temperatura, deve-se derivar a expressão e igualando a zero. Após as devidas operações, tem-se:

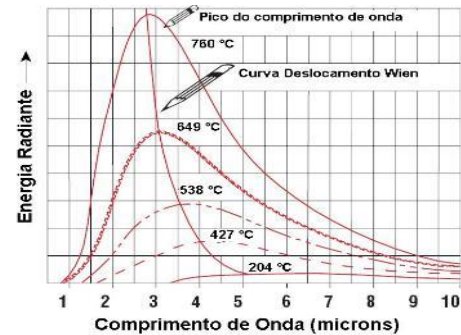
$$\lambda_{\text{máx}} = 2897/T$$

Qual o comprimento de onda do pico de emitância do Sol? e da Terra? Em que regiões do espectro se localizam?

## Lei de deslocamento de Wien

Conforme o modelo do corpo negro, o pico de emissão depende da temperatura do objeto e, na medida em que a superfície do objeto é esfriada, a intensidade da emissão diminui.

Sendo assim, quando um corpo negro é esfriado, o pico se desloca para comprimentos de onda maiores, porém com menor intensidade. Isto é conhecido como a lei de deslocamento de Wien e é ilustrado na figura abaixo.

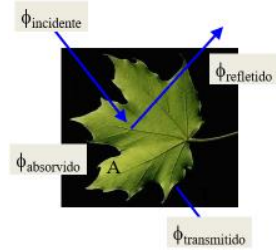


<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAlccAD/teoria-infravermelho>

agora, pense e responda, o que ocorre se um objeto na temperatura ambiente da Terra (digamos 30 graus Celcius) é aquecido? Inicialmente, pequenas alterações da temperatura não serão vistas pelo olho humano. Mas... Se aquecermos o suficiente para que o pico atinja a região do visível, qual cor seria visível primeiro?



O que ocorre quando a REM atinge uma superfície ou um gas?



$$\phi_{\text{incidente}} = \phi_{\text{refletido}} + \phi_{\text{absorvido}} + \phi_{\text{transmitido}}$$

**Chamando:**

$$\rho = \phi_{\text{refletido}} / \phi_{\text{incidente}}$$

$$\alpha = \phi_{\text{absorvido}} / \phi_{\text{incidente}}$$

$$\tau = \phi_{\text{transmitido}} / \phi_{\text{incidente}}$$

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

As proporções são diferentes para cada objeto e dependem do comprimento de onda:

$$1 = \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda}$$

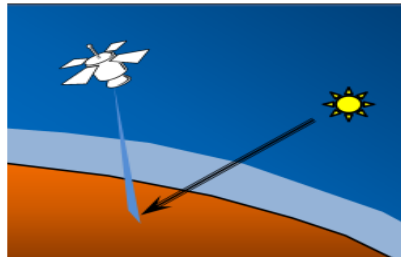
• Interação com a atmosfera

- absorção
- espalhamento



## Efeitos atmosféricos

A radiação solar percorre uma grande distância entre o Sol e a Terra e no último trecho deve atravessar a atmosfera que rodeia o planeta. Embora esta camada seja relativamente pequena, ela pode afetar significativamente a radiação solar, reduzindo a possibilidade de se usar todo tipo de energia solar no sensoriamento remoto.

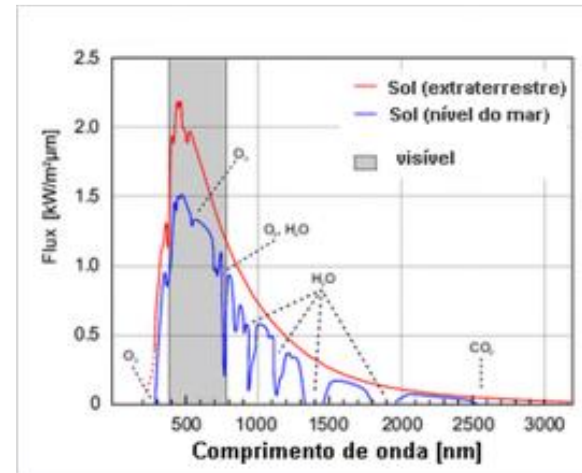


## Absorção atmosférica

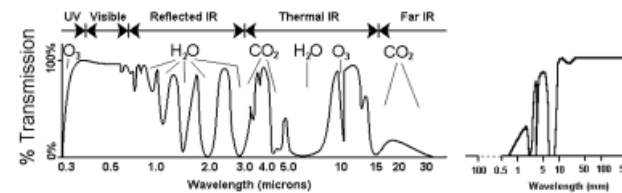
Um dos fenômenos que ocorre na atmosfera é a absorção da radiação pelos elementos, partículas ou gases, que a compõem. Por exemplo, ao atingir uma partícula a radiação solar na região do ultravioleta pode ser absorvida. Lembra-se da importância da presença de ozônio na atmosfera. Esta radiação é transformada em calor e emitida em um comprimento de onda diferente.

Porém, se a absorção for alta, então torna-se impossível medir a parcela refletida pelos objetos na Terra. Na figura a seguir é mostrada uma comparação da curva da radiação solar na superfície da Terra (azul) e no topo da atmosfera. [E

visível que, em algumas regiões, a atmosfera absorve praticamente toda a radiação.



Os principais elementos que causam a absorção atmosférica são o ozônio, a água, e o dióxido de carbono.



[www.sarracenia.com/astronomy/remotesensing](http://www.sarracenia.com/astronomy/remotesensing)

Ozônio absorve muita radiação na faixa do ultravioleta. A água presente na atmosfera absorve em torno de 1,4; 1,9 e 2,50 µm. Similarmente, o dióxido de Carbono absorve em torno de 1,4; 1,6 e 2,0 µm.





## Janelas atmosféricas

Devido à absorção diferenciada ao longo do espectro, pode-se dizer que a transmitância da atmosfera não é uniforme, ou seja, a capacidade da atmosfera de deixar passar radiação eletromagnética não é uniforme para todo o espectro.

No sensoriamento remoto buscamos regiões do espectro onde exista alta transparência. Estas regiões espectrais são chamadas de “janelas atmosféricas”. Por exemplo, é impossível medir na região próxima a  $1,4 \mu\text{m}$ , pois existe uma faixa muito forte de absorção causada pela água na atmosfera.

Na tabela a seguir são mostradas as principais janelas atmosféricas usadas no sensoriamento remoto.

0,3-1,3 $\mu\text{m}$
1,5-1,8 $\mu\text{m}$
2,0-2,4 $\mu\text{m}$
3,0-3,6 $\mu\text{m}$
4,2-5,0 $\mu\text{m}$
8,0-10,0 $\mu\text{m}$
>20mm



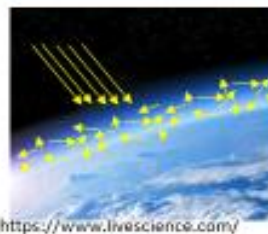
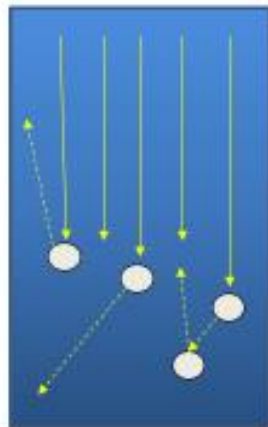
## Espalhamento atmosférico

Outro fenômeno que ocorre na atmosfera é o espalhamento atmosférico. Neste caso a radiação eletromagnética não é perdida ou transformada em outro comprimento de onda, os feixes são apenas desviados de sua trajetória, pois na atmosfera pode ocorrer **refração** e **reflexão** quando a radiação encontra gases ou partículas na atmosfera (moléculas de gases, pó, água).

O espalhamento atmosférico depende de comprimento de onda, a densidade de partículas ou gases na atmosfera e da distância que a energia deve percorrer ao atravessar a atmosfera. Ele pode variar a cada dia, pois a atmosfera é dinâmica.

O efeito do espalhamento atmosférico nas imagens de sensoriamento remoto é visível sob forma de bruma. Parece que a imagem está embaçada, coberta de névoa fina.

Três tipos de espalhamento se destacam:



## Espalhamento Raleigh

O espalhamento Raleigh ocorre nas regiões altas da atmosfera, quando o diâmetro da partícula é pequeno em relação ao comprimento de onda da radiação. Os principais causadores do espalhamento Raleigh são o oxigênio e o Nitrogênio.

Uma característica do espalhamento Raleigh é que ele é seletivo, ou seja, não afeta a todos os comprimentos de onda por igual. Este tipo de espalhamento afeta em maior intensidade radiação com comprimentos de onda menores.

Do ponto de vista de uma pessoa na superfície da Terra, o Espalhamento Raleigh é visível ao contemplar o céu durante o dia. Como a cor que mais sofre espalhamento é o azul (menor comprimento de onda), então esta cor predomina no céu.

Mas então, como explicar a cor avermelhada/alaranjada que é percebida alguns dias de manhã cedo ou no final da tarde? Considere a fotografia abaixo e justifique sua resposta. Definitivamente, o céu não parece azul.





## Espalhamento Mie

O espalhamento Mie ocorre principalmente nas regiões baixas da atmosfera, quando o diâmetro das partículas é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda.

Este espalhamento pode ser causado pela presença de aerossóis, pó, fumaça, pólen ou vapor de água na atmosfera e dá à imagem a aparência de estar coberta por uma camada de névoa ou fumaça. Na fotografia abaixo é visto como a presença de poluição no ar espalha a luz criando uma sensação de que a foto está embaçada.



<http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/>

## Espalhamento não seletivo:

O espalhamento não seletivo, como o próprio nome indica, não discrimina os comprimentos de onda e os espalha com a mesma intensidade, dentro da região do visível e infravermelho, e ocorre quando o diâmetro das partículas na atmosfera é muito maior do que o comprimento de onda da radiação.

Este espalhamento é causado principalmente por vapor de água na atmosfera.

Um exemplo é visto nas nuvens e na névoa, compostas principalmente por água. Teoricamente a água é transparente e a luz branca deveria atravessar ela sem ser refletida. Porém, ao ocorrer o espalhamento, todos os comprimentos de onda são redirecionados, e em todas as direções. Por isso, as nuvens e a névoa ganham cor branca.

Outro efeito deste espalhamento é que, ao redirecionar os feixes de luz incidentes, o espalhamento não seletivo impossibilita o sensoriamento remoto quando ele está presente. Não somente bloqueando a radiação solar, mas também projetando sombras na terra. Confira na imagem abaixo como a presença de nuvens impede o estudo da superfície da Terra com sensores ópticos.



