

Geomática e SIGDR

Introdução à Detecção Remota

Manuel Campagnolo

ISA

1 Fundamentos de Detecção Remota

2 Pré-processamento de imagens de detectores ópticos e determinação de grandezas físicas da superfície

- Estimação de reflectâncias à superfície
- Estimação da temperatura da superfície a partir da banda térmica
- Correções geométricas de imagens de satélite

3 Sistemas de Detecção Remota

- Sensores passivos: detectores ópticos e detectores térmicos
- Sistemas activos: RADAR e LIDAR

4 Representação de imagens multiespectrais

1 Fundamentos de Detecção Remota

2 Pré-processamento de imagens de detectores ópticos e determinação de grandezas físicas da superfície

- Estimação de reflectâncias à superfície
- Estimação da temperatura da superfície a partir da banda térmica
- Correções geométricas de imagens de satélite

3 Sistemas de Detecção Remota

- Sensores passivos: detectores ópticos e detectores térmicos
- Sistemas activos: RADAR e LIDAR

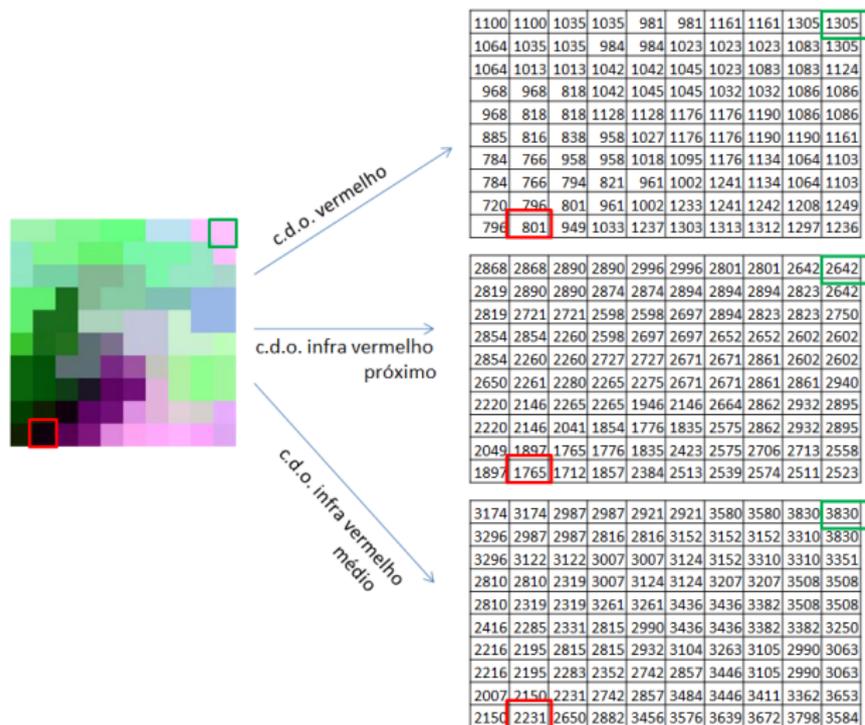
4 Representação de imagens multispectrais

Detecção remota designa o conjunto de técnicas para obtenção de informação sobre um objecto por um sensor que não está em contacto físico com o objecto e para interpretação dessa informação.

Contudo, detecção remota envolve tipicamente informação que pode ser representada por um conjunto de valores de pixels de uma imagem e que pode ser processada digitalmente.

Em geral, as imagens de detecção remota são obtidas através de sensores digitais instalados em satélites, mas podem igualmente ser obtidos por sensores instalados em aviões, em laboratório, ou por sensores portáteis usados em trabalho de campo.

Que informação está contida em imagens de detecção remota?



As imagens são **digitais** e em geral **multiespectrais**. Contém a resposta ao sinal a superfície para distintos comprimentos de onda.

Radiação electromagnética

As observações por detecção remota implicam algum tipo de transmissão de energia entre o objecto observado e o sensor. A fonte de energia pode ser o sol, um emissor artificial, ou própria superfície.

Em geral, energia por ser transmitida de várias formas:

- convecção (movimento de moléculas em fluidos);
- condução (em sólidos);
- energia latente (mudança de estado sem alteração de temperatura como em evaporação, transpiração ou condensação);
- **radiação electromagnética** – a mais relevante para detecção remota.

A radiação electromagnética é simultaneamente de natureza ondulatória e de natureza corpuscular.

Natureza ondulatória da radiação

As ondas electromagnéticas são periódicas e propagam-se no vácuo à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$).

As ondas são caracterizadas por

- frequência ν : medida em ciclos por segundo ou hertz (Hz); ou
- comprimento de onda λ : normalmente medido em nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) ou micrómetros ($1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ m}$).

A relação entre essas grandezas dada por

$$c = \lambda \nu.$$

Natureza corpuscular da radiação

A radiação electromagnética também é interpretada como uma sucessão de fotões (ou quanta).

A **energia** transportada por um fotão e a frequência da correspondente onda electromagnética estão relacionados por

$$Q = h\nu \quad \text{ou} \quad Q = \frac{hc}{\lambda}, \quad (\text{J})$$

em que Q é medido em joules (J) e h é a constante de Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$).

Consequentemente, a **quantidade de energia diminui com o aumento do comprimento de onda da radiação**.

O *fluxo* de energia (i.e. **potência**) é medido em watts ($\text{W} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$).

Nota: watt-segundo é uma unidade de energia (=1J). Para valores elevados usa-se a unidade **quilowatt-hora** (kWh) que é igual a 3.6×10^6 joules, i.e. 3600kJ. Exemplo: uma lâmpada “de 100W” tem uma *potência* de 100W; a *energia* que consome durante uma hora é 100Wh = 0.1kWh = 360kJ.

Lei de Plank e Lei de Wien

Todos os objectos (como por exemplo o sol) com temperatura superior ao zero absoluto ($0^{\circ}K = -273^{\circ}C$) emitem energia.

A **Lei de Planck** caracteriza a radiação emitida por um corpo negro (objecto ideal que absorve toda a radiação incidente) a uma dada temperatura (T) e para um dado comprimento de onda (λ).

Para todo o espectro, o fluxo de energia emitida por um corpo negro é

$$M_n = sT^4 \text{ (W m}^{-2}\text{)},$$

em que T é a temperatura absoluta em graus Kelvin (K) e s é a constante de Stefan-Boltzmann ($s = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

O comprimento de onda dominante dessa radiação é dada pela **Lei de Wien**:

$$\lambda_{\max} = \frac{k}{T} \text{ (}\mu\text{m)},$$

em que k é uma constante de valor $2898 \mu\text{m K}$.

Ilustração da variação do comprimento de onda dominante da radiação emitida e da emitância com a temperatura absoluta

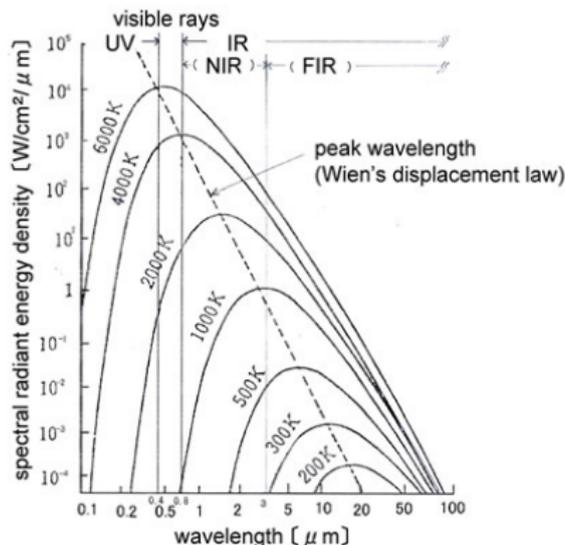


Figura: Ilustração da Lei de Wien ($\lambda_{\max} = \frac{k}{T}$). O eixo vertical (logarítmico) indica a energia emitida por unidade de superfície ($\text{Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$). O pico de cada curva depende da temperatura. <http://www.enseki.or.jp/>

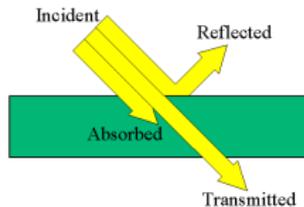
Aplicação da Lei de Wien a algumas superfícies

	Temperatura (K)	$\lambda_{\max}(\mu\text{m})$
Sol	6000	0.483
Vulcão	1350	2.147
Incêndio florestal	1000	2.898
Área urbana	315	9.200
Floresta	300	9.660
Terra	288	10.063
Gelo	273	10.615

Emissividade, reflectância, transmitância e absorptância

- **Emissividade** ε : razão entre radiação emitida pelo objecto e a radiação emitida por um corpo negro a igual temperatura. Varia entre 0 e 1 e depende do comprimento de onda.
- **Reflectância** (ρ), **absortância** (α) e **transmitância** (τ): cada um é a proporção da energia incidente que é respectivamente reflectida em qualquer direcção, absorvida e transmitida. Dependem do comprimento de onda.

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1.$$



Decomposição da radiação incidente (exemplo)

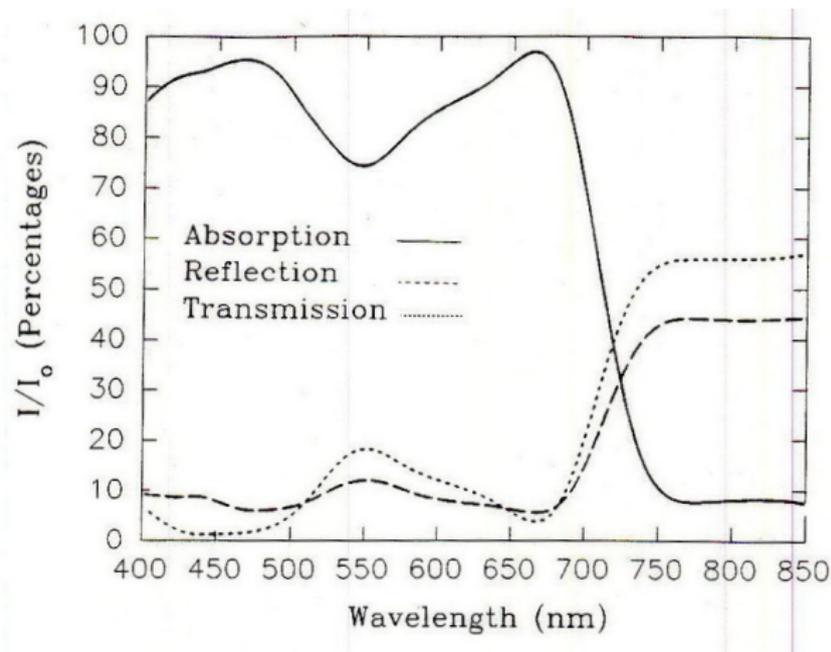


Figura: Decomposição da energia incidente em folhas de soja para diversos comprimentos de onda. <http://www.controlledenvironments.org/>. A figura ilustra a dependência de $\alpha(\lambda)$, $\rho(\lambda)$ e $\tau(\lambda)$ relativamente ao comprimento de onda λ .

Geometria de iluminação e de observação

Ângulos de iluminação e de observação:

- *ângulo de incidência zenital (θ_i);*
- *ângulo de incidência azimutal (ϕ_i);*
- *ângulo de observação zenital (θ_v);*
- *ângulo de observação azimutal (ϕ_v).*

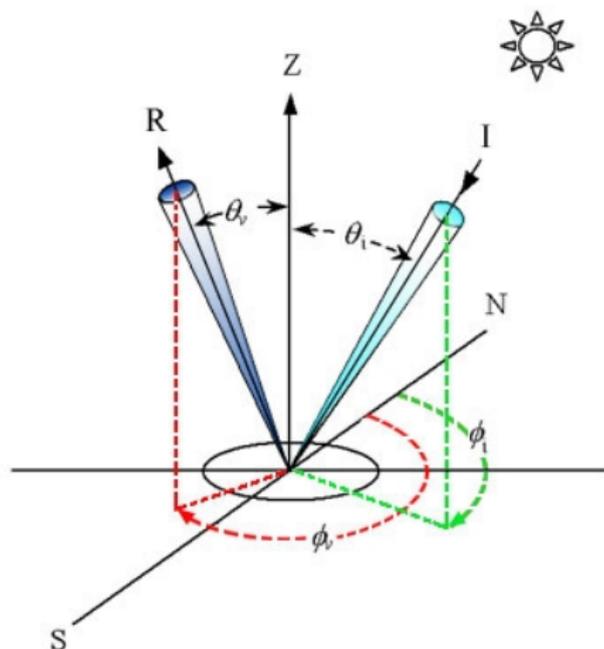


Figura: ângulos de incidência e de observação relativos à normal do lugar (Z) <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

Nadir e geometria de aquisição de uma imagem por um sensor

Dado um ponto na vizinhança do globo terrestre, o **nadir** é a direcção da força de gravidade e o **zénite** é a direcção oposta. Em detecção remota, *nadir* é também usado para designar o ponto da superfície na direcção do nadir do sensor.

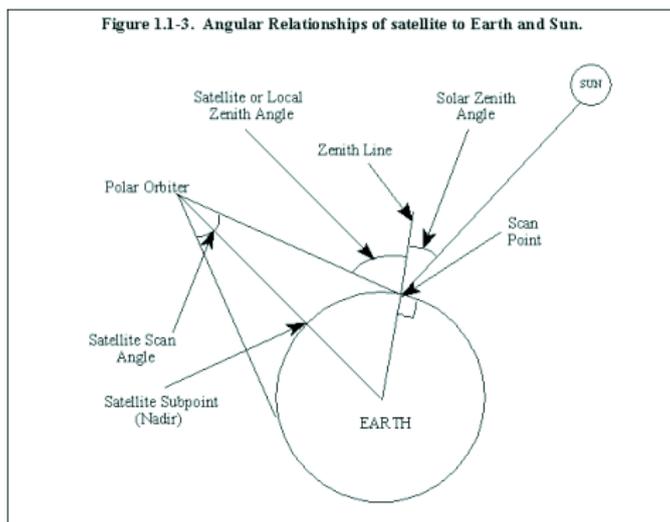


Figura: Ilustração dos ângulos zenitais e do ângulo de varrimento do sensor para um terreno horizontal. <http://www.ncdc.noaa.gov/>

Ângulos relevantes em detecção remota

Ângulos	Símbolo
<i>Posição da fonte de radiação relativamente à normal do lugar:</i>	
ângulo de incidência zenital	θ_i
ângulo de incidência azimutal	ϕ_i
<i>Posição do observador relativamente à normal do lugar:</i>	
ângulo de observação (ou de visão) zenital	θ_v
ângulo de observação (ou de visão) azimutal	ϕ_v
<i>Posição do sol relativamente ao zénite do lugar:</i>	
ângulo zenital solar	θ_s
ângulo azimutal solar	ϕ_s
ângulo de elevação do sol	$\frac{\pi}{2} - \theta_s$
<i>Posição do lugar relativamente ao nadir do sensor:</i>	
ângulo de varrimento	“scan angle”

Tabela: Alguns ângulos que descrevem a geometria de iluminação e de observação.

Exemplo

Considere um sensor a uma altitude de $a = 705$ km observando um lugar L , numa zona horizontal da superfície terrestre, com um ângulo de varrimento $\theta = 20^\circ$. Sabendo que a Terra é aproximadamente esférica com centro B e raio $r = 6371$ km, determine o ângulo de observação zenital θ_v do sensor relativamente a esse lugar.

Exemplo

Considere um sensor a uma altitude de $a = 705$ km observando um lugar L , numa zona horizontal da superfície terrestre, com um ângulo de varrimento $\theta = 20^\circ$. Sabendo que a Terra é aproximadamente esférica com centro B e raio $r = 6371$ km, determine o ângulo de observação zenital θ_v do sensor relativamente a esse lugar.

Solução:

- 1 Considere-se o triângulo **SLB**, em que S é a posição do sensor; então $\widehat{SLB} = 180^\circ - \theta_v$;
- 2 Usando a lei dos senos, conclui-se que $\frac{a+r}{\sin(180^\circ - \theta_v)} = \frac{r}{\sin \theta}$;
- 3 Finalmente, $\theta_v = \arcsin\left(\frac{a+r}{r} \sin \theta\right) = \arcsin\left(\frac{7076}{6371} 0.342\right) = \arcsin(0.379) = 22.32^\circ$.

Efeito da rugosidade do material sobre a reflexão da radiação incidente

- reflectores difusos (Lambertianos): o comprimento de onda da radiação é inferior às variações na rugosidade e à dimensão das partículas da superfície reflectora;
- reflectores especulares: o caso oposto, em que a superfície comporta-se como essencialmente como um “espelho”.

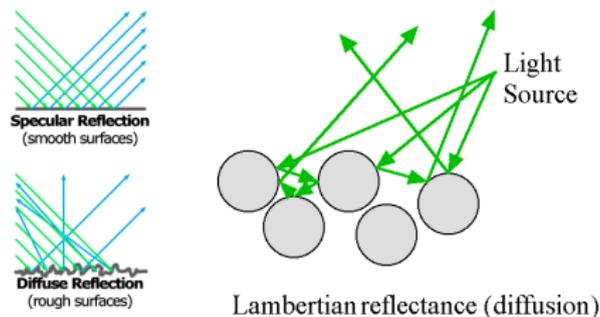


Figura: Tipos de reflexão e efeito da rugosidade da superfície na reflexão.

<http://www.screenetekinc.com/> e <http://nuweb2.neu.edu/>

Geometria de observação

A quantidade de radiação reflectida depende da posição da fonte de iluminação e do observador.



Figura: Efeito da posição do observador relativamente à posição da fonte de iluminação (sol). Na figura da esquerda, o sol está atrás do observador e na fotografia da direita o sol está à frente do observador.

<http://www-modis.bu.edu/brdf/images/>

Geometria de iluminação e observação: direccional, cónico, hemisférico

Na prática, a radiação incidente provém de uma fonte não pontual e por isso a radiação incidente sobre um ponto no terreno não é direccional mas preenche um cone com um ângulo sólido não nulo. O mesmo acontece relativamente ao observador (por exemplo o sensor). Quando o cone tem ângulo sólido de 2π esterradianos (metade da esfera), as grandezas chamam-se **hemisféricas**.

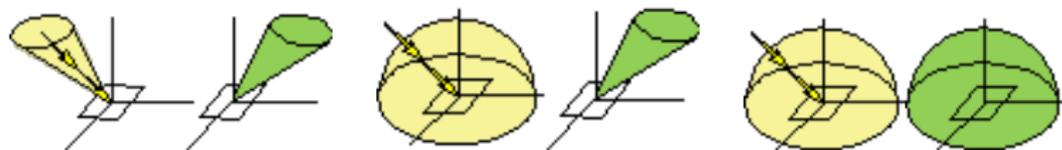


Figura: Três formas práticas de obter medições de reflectância da superfície: cónica-cónica, hemisférica-cónica e hemisférica-hemisférica.

<http://www.ncaveo.ac.uk/>

Geometria de iluminação e observação: ângulo sólido

A unidade de medida de ângulo sólido é o esterradiano (sr) que é equivalente ao ângulo sólido que, tendo o vértice no centro de uma esfera de raio r , determina sobre a superfície uma área igual a r^2 . A esfera contém 4π esterradianos.

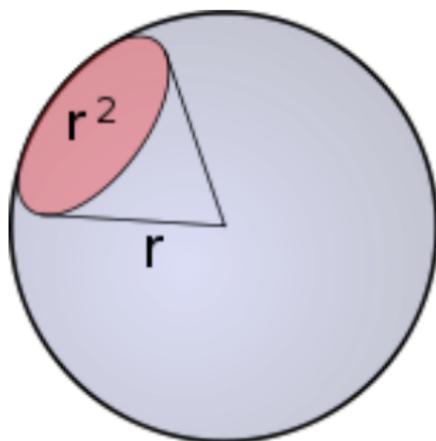


Figura: Ângulo sólido de 1sr. <http://www.ptbmagazine.com/>

Factores que afectam a reflectância numa certa direcção

A *função de distribuição de reflectância bidireccional* (BRDF) é característica do material à superfície e modela a distribuição da reflectância em função da posição da fonte de iluminação e do observador.

A BRDF é um conceito teórico pois corresponde a uma situação em que a iluminação e a observação são realizadas ao longo de direcções ideais.

Factores que afectam a reflectância numa certa direcção

A *função de distribuição de reflectância bidireccional* (BRDF) é característica do material à superfície e modela a distribuição da reflectância em função da posição da fonte de iluminação e do observador.

A BRDF é um conceito teórico pois corresponde a uma situação em que a iluminação e a observação são realizadas ao longo de direcções ideais.

A reflectância numa determinada direcção depende então de:

- material que reflecte (vegetação, solo, etc);
- comprimento de onda;
- geometria de iluminação e de observação.

Algumas grandezas radiométricas

Grandeza	Símbolo	Expressão	Unidades
<i>Incidindo sobre ou abandonando a superfície (hemisférico):</i>			
Energia radiante	Q		J
Fluxo radiante	Φ	dQ/dt	$W = J s^{-1}$
Irradiância (incidente)	E	$d\Phi/dA$	$W m^{-2}$
Emitância (“para fora”)	M	$d\Phi/dA$	$W m^{-2}$
<i>Abandonando a superfície, no cone de ângulo sólido Ω (cónico):</i>			
Intensidade radiante (pontual)	I	$d\Phi/d\Omega$	$W sr^{-1}$
Radiância (por área projectada)	L	$d\Phi / \cos \theta_v dA d\Omega$	$W m^{-2} sr^{-1}$
Radiância espectral	L_λ	$dL/d\lambda$	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
<i>Fracções da energia incidente:</i>			
Reflectância (hemisférica)	ρ_λ	$\Phi_{reflectido} / \Phi_{incidente}$	
Absortância	α_λ	$\Phi_{absorvido} / \Phi_{incidente}$	
Transmitância	τ_λ	$\Phi_{transmitido} / \Phi_{incidente}$	

Tabela: Algumas grandezas radiométricas: θ_v é o ângulo de observação zenital, i.e., o ângulo formado entre a direcção da radiação e a normal ao terreno, e Ω é o ângulo sólido, em esterradianos (sr).

Sensores, radiância, e medição da reflectância

Os sensores dos satélites medem essencialmente a **radiância** da superfície – grandeza “cónica” – mas os materiais à superfície são usualmente caracterizados pela sua **reflectância** – grandeza “hemisférica”.

Como se pode usar a radiância para estimar a reflectância?

Sensores, radiância, e medição da reflectância

Os sensores dos satélites medem essencialmente a **radiância** da superfície – grandeza “cónica” – mas os materiais à superfície são usualmente caracterizados pela sua **reflectância** – grandeza “hemisférica”.

Como se pode usar a radiância para estimar a reflectância?

Há essencialmente dois casos:

- Se a superfície é **lambertiana** então existe uma relação simples entre reflectância e radiância.
- Caso contrário é necessário dispor de um modelo de BRDF e de diversas medições de radiância segundo várias direcções para fazer uma boa estimativa da reflectância (exemplo: produto NBAR do sensor MODIS)

Na prática é usual admitir que a superfície é lambertiana.

Uniformidade da radiância em superfícies lambertianas

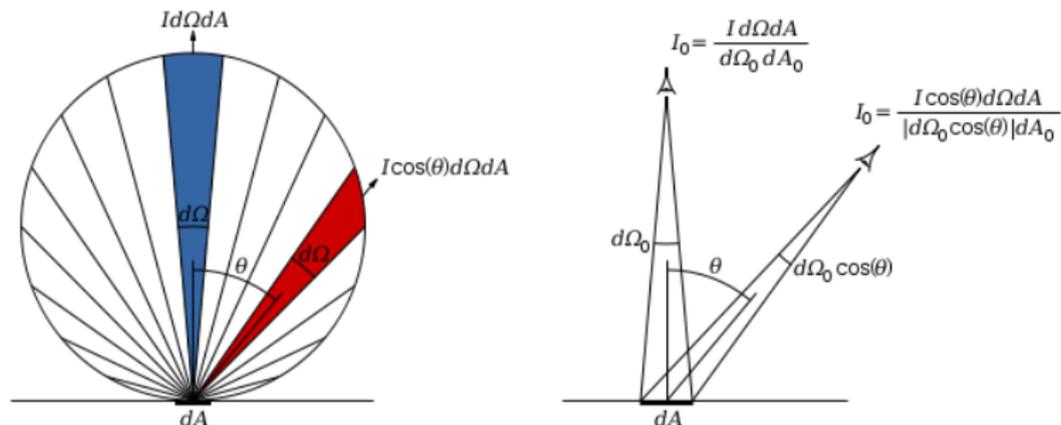


Figura: À esquerda ilustra-se o facto de a intensidade radiante (pontual) de uma superfície lambertiana ser proporcional a $\cos \theta$. A intensidade é representada pela área da região sombreada. À direita mostra-se que quando se considera uma área não pontual (dA), a grandeza resultante (radiância) é independente de θ . <http://en.wikipedia.org/>

Reflectância em superfícies lambertianas

Para superfícies lambertianas, a relação entre radiância espectral (L_λ , grandeza “cônica”) e emitância espectral (M_λ , grandeza “hemisférica”) é dada por

$$M_\lambda = \pi L_\lambda.$$

Consequentemente, a **reflectância espectral de superfícies lambertianas** pode ser obtida a partir da irradiância espectral (E_λ) e da radiância espectral (L_λ) como

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{E_\lambda}.$$

Essa equação é fundamental para estimar a reflectância da superfície a partir das imagens de satélite.

Albedo

O *albedo* é o valor da proporção de energia solar incidente sobre uma superfície que é reflectida e corresponde à razão M/E .

Albedo e reflectância são ambos definidos como a razão entre emitância (M) e irradiância (E):

- 1 **Reflectância** é definida como uma grandeza *espectral* $\rho_\lambda = \frac{M_\lambda}{E_\lambda}$;
- 2 **Albedo** corresponde a uma larga gama de comprimentos de onda, como por exemplo a gama de radiação visível.

O albedo depende muito do tipo de material tomando os maiores valores (70-80%) para neve e alguns tipos de nuvens e valores baixos (cerca de 8%) para água profunda. O albedo planetário (cujo valor ronda os 30-35%) é uma grandeza fundamental para caracterizar o balanço de radiação global.

Albedo planetário estimado a partir de imagens de satélite

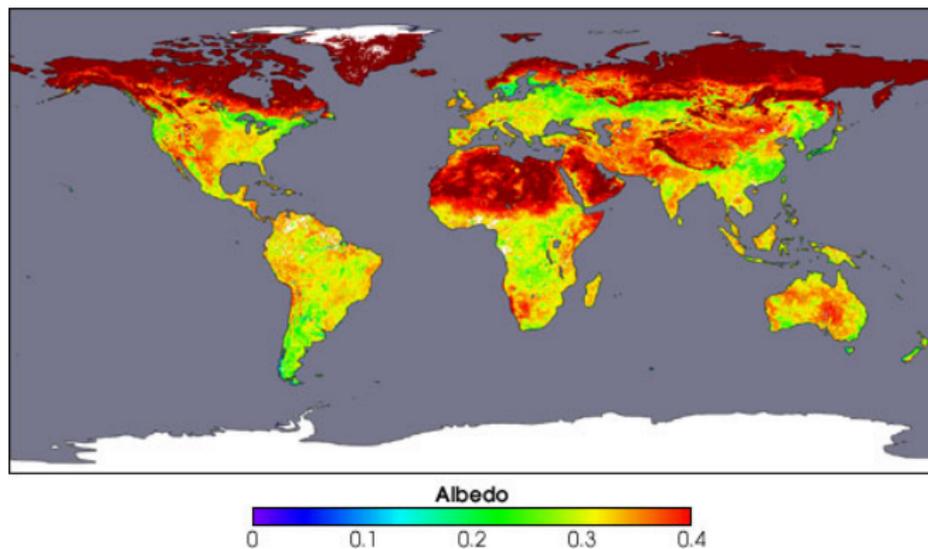


Figura: Estimativa a partir de imagens multitemporais de Abril 2002 do sensor MODIS do valor médio do albedo para as superfícies terrestres. Observe-se que zonas de deserto e cobertas por neve têm os valores mais elevados. <http://earthobservatory.nasa.gov>

Regiões do espectro electromagnético

Espectro electromagnético é a gama de comprimentos de onda (ou alternativamente, frequências) da radiação electromagnética.

O espectro electromagnético é habitualmente decomposto em **regiões**, que vão dos raios gama (menor λ , maior frequência e maior energia) até às ondas longas usadas em telecomunicações (maior λ , menor frequência e menor energia).

Para a detecção remota da superfície terrestre as regiões mais importantes são

- a região do **visível** (0.4 a 0.7 μm),
- a região do **infravermelho próximo** (0.7 a 1.2 μm),
- a região do **infravermelho médio** (1.2 a 8 μm),
- a região do **infravermelho térmico** (8 a 14 μm), e
- região das **microondas**, de comprimento de onda superior a 1mm.

Regiões do espectro electromagnético

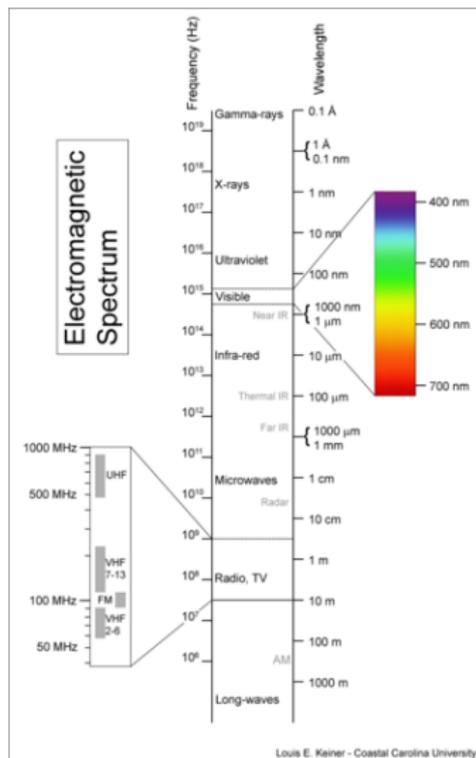


Figura: Regiões do espectro electromagnético

<http://www.scienceprog.com/>

Transmitância atmosférica

A atmosfera terrestre filtra a radiação. Consequentemente, a gama de comprimentos de onda captados por sistemas de detecção remota está nas seguintes bandas:

- 0.4 a 12 μm (visível e diversas bandas do infravermelho);
- 10 a 300 mm (microondas).

Janelas atmosféricas: regiões do espectro nas quais a transmitância atmosférica é elevada.

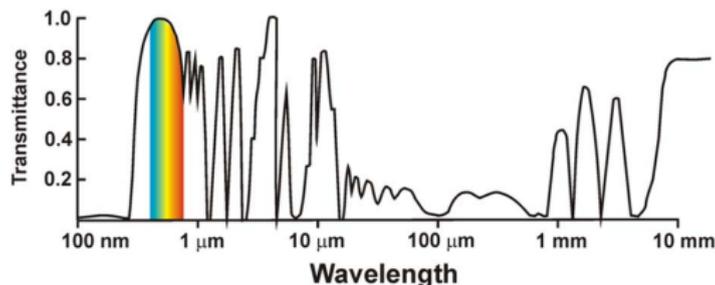


Figura: Transmitância atmosférica, <http://www.eeb.ucla.edu/>

Irradiância solar à superfície

A combinação das janelas atmosféricas e da energia da radiação – que depende do comprimento de onda de acordo com a equação

$Q = \frac{hc}{\lambda}$ – determina a irradiância solar sobre a superfície.

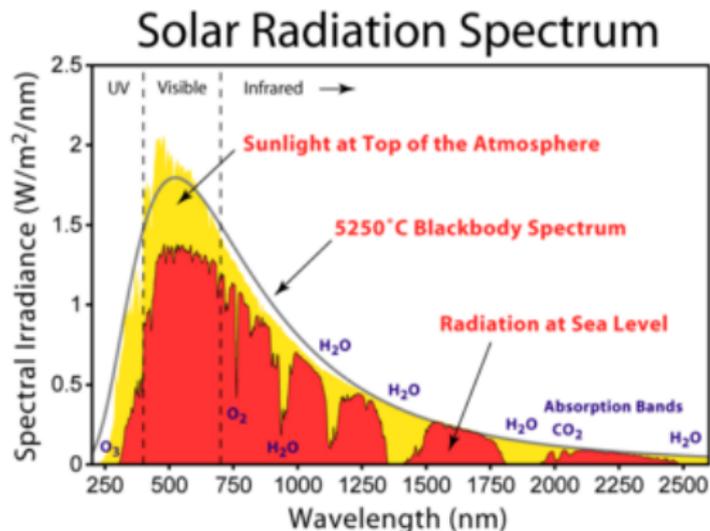


Figura: Irradiância solar no topo da atmosfera e à superfície em função do comprimento de onda, <http://tmp.kiwix.org>

Janela solar e janela térmica

- A **janela solar** (entre 0.3 e 1 μm) é a gama de c.d.o. para os quais a absorção da radiação solar pela atmosfera é baixa e a fonte de radiação é essencialmente solar.
- A **janela térmica** (vizinhança dos 10 μm) é a gama de c.d.o. para os quais a absorção da radiação emitida pela superfície pela atmosfera é baixa e em que a radiação provém principalmente dos objectos à superfície.

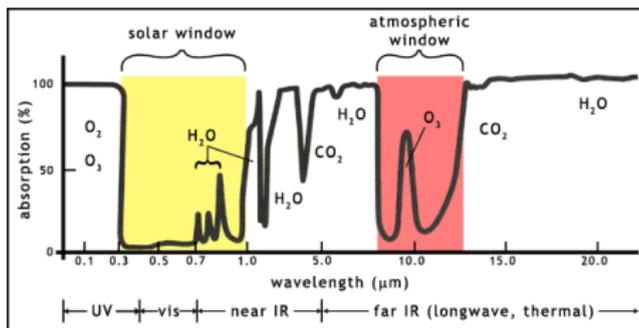


Figura: Absorção atmosférica em função do comprimento de onda com indicações das localizações da janela solar (a amarelo) e da janela térmica (a vermelho), www.helpsavetheclimate.com/

Assinaturas espectrais

A **assinatura espectral** é o padrão de reflectância em função do comprimento de onda da radiação incidente sobre o objecto.

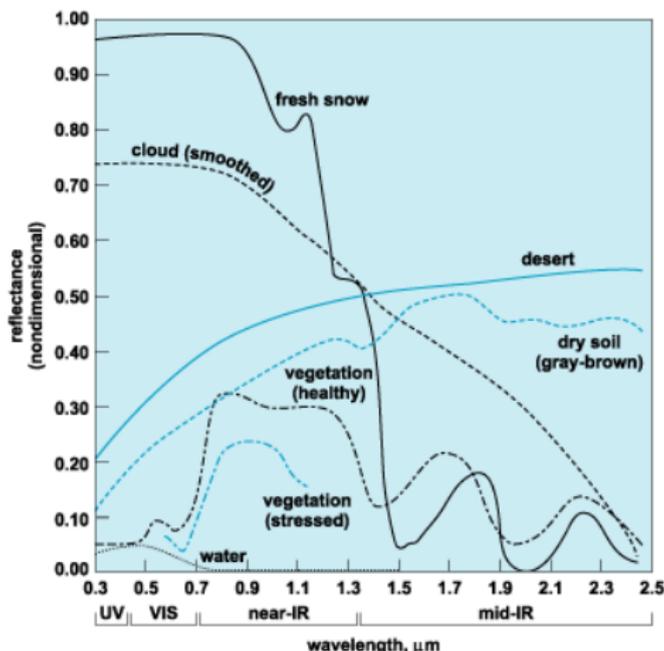


Figura: Assinaturas espectrais típicas de neve, nuvens, deserto, solo úmido, vegetação e água, <http://accessscience.com/>

Factores que afectam a assinatura espectral típica em detecção remota

- As imagens são obtidas em determinadas condições de iluminação e observação e por isso o sinal detectado não corresponde precisamente ao conceito de reflectância (hemisférica);
- As bandas dos sensores são em número finito (há uma discretização do sinal);
- O sinal no sensor depende não só pelo material à superfície mas também do efeito da atmosfera;
- Um pixel da imagem pode corresponder a uma mistura de diferentes materiais com assinatura espectrais distintas.

Esses factores introduzem “ruído” na assinatura espectral típica e tornam mais difícil a distinção dos materiais à superfície a partir das imagens.

Exemplo de ocupações do solo com assinaturas espectrais semelhantes



Spectral Signatures

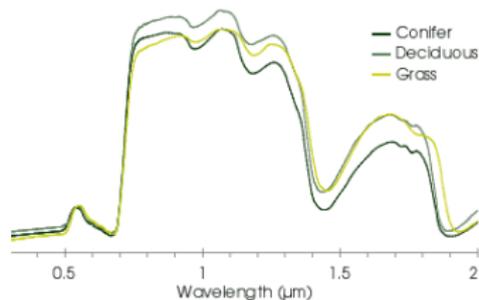


Figura: Fotografias verticais e respectivas assinaturas espectrais de solo coberto com coníferas, folhosas e relva

<http://earthobservatory.nasa.gov/>

Assinaturas espectrais da vegetação

- **região do visível** A clorofila absorve mais na região do azul e do vermelho (com picos de absorção em aproximadamente 0.43-0.45 e 0.64-0.67 μm) do que no verde (pico de reflexão em 0.54 μm aproximadamente). Em situação de senescência ou de stress, o teor de clorofila diminui e a cor das folhas é mais afectada por outros pigmentos como os carotenos, provocando a mudança de cor de verde para vermelho-amarelado como acontece em certas plantas no Outono. Em geral, a reflectância da vegetação na região espectral do visível (0.3 a 0.7 μm) é baixa.
- **infravermelho próximo** A estrutura interna das folhas causa um pico de reflectância na região do IV próximo (de 0.7 a 1.3 μm) com valores que podem atingir 50%.
- **infravermelho médio** Existem picos de absorção em 1.4, 1.9 e 2.7 μm aproximadamente, causados pela presença de água nas folhas.

Vegetação: assinaturas espectrais de pigmentos

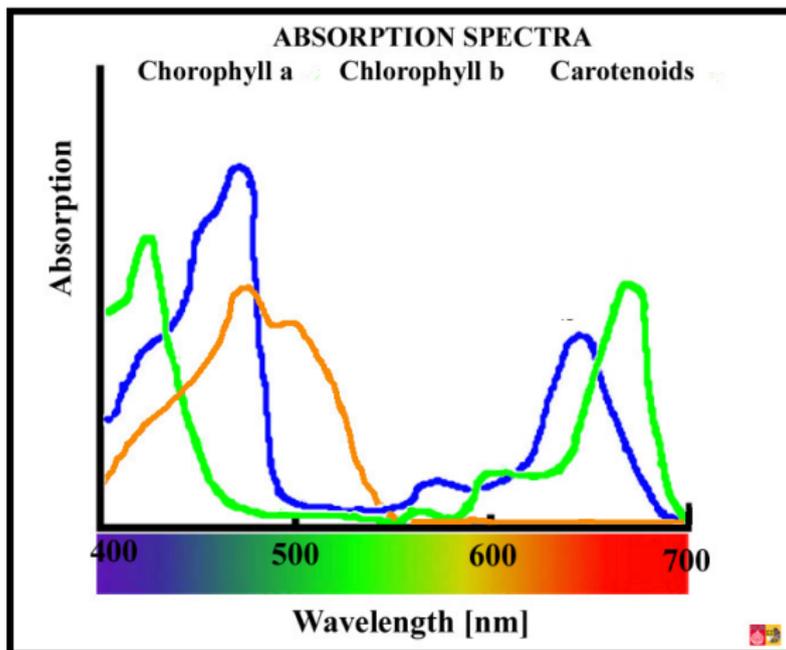


Figura: Assinaturas espectrais de vários pigmentos da vegetação, <http://www.vcbio.science.ru.nl/>

Assinaturas espectrais da água

A água é caracterizada por absorver ou transmitir a maior parte da radiação que a atinge.

Em geral, quanto maior o comprimento de onda, menor a quantidade reflectida. Para comprimentos de onda superiores a $1 \mu\text{m}$, a reflectância torna-se praticamente nula.

A reflectância de superfícies aquáticas pode aumentar na presença de **sedimentos** – o aumento da reflectância depende da natureza e das propriedades ópticas dos sedimentos (por exemplo, presença clorofila ou de detritos minerais de dimensões variáveis) –, quando **a profundidade é reduzida**, ou quando a superfície de água é muito regular (espelhada) e o ângulo de observação do sensor é elevado.

Assinaturas espectrais do solo

Ao contrário da vegetação, a transmissão da radiação nos solos é baixa, e por isso a assinatura espectral destes materiais depende essencialmente das sua camada superior.

Tipicamente, a reflectância dos solos aumenta com o c.d.o.

Os principais factores que afectam a sua reflectância são a **cor** do solo, a **classe** de solos, o teor de **matéria orgânica**, o teor de **ferro**, a composição **mineralógica**, o teor de **humidade**, e a **textura** do solo.

Em geral, um alto teor de **matéria orgânica** provoca – principalmente na região do visível – uma diminuição de reflectância, e um aumento do **teor de humidade** provova uma redução da reflectância.

A reflectância também diminui em geral com o aumento do **tamanho das partículas** (textura grosseira) dado que nessa situação, a radiação pode mais facilmente ficar retida no solo.

Efeito da atmosfera sobre a radiação

A atmosfera é constituída por gases (entre os quais o azoto 78%, oxigénio 21%, árgon 0.9%, vapor de água 0.04%, dióxido de carbon 0.033%, e o ozono 0.012%) e por partículas sólidas suspensas nos gases atmosféricos designadas por aerossóis (como sal, poeiras, e partículas diversas resultantes da poluição atmosférica e de fogos).

Alguns gases têm uma elevada absorptância para alguns intervalos de comprimento de onda.

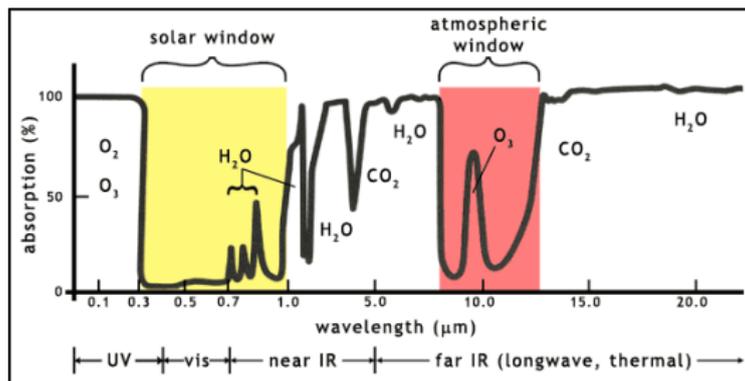


Figura: Efeito de gases na absorção atmosférica.

Efeitos de Rayleigh e de Mie

A dispersão atmosférica depende da dimensão das partículas da atmosfera que a causam e do c.d.o. (λ) da radiação.

- **Efeito de dispersão de Rayleigh**: é causado pelas moléculas com diâmetro inferior a aproximadamente $\frac{1}{10} \lambda$ e é **inversamente proporcional a λ^4** . Por exemplo, a dispersão causada pela atmosfera na banda do verde é aproximadamente quatro vezes superior à dispersão no infravermelho médio (de maior λ).
- **Efeito de dispersão de Mie**: ocorre para comprimentos de onda semelhantes ao diâmetro de partículas da atmosfera e também depende do comprimento de onda da radiação, embora essa dependência seja atenuada relativamente à dispersão de Rayleigh. A dispersão de Mie é causada sobretudo por **aerossóis**, e em particular por poeiras.
- **Dispersão não selectiva**: é causada por partículas de dimensão maior do que o comprimento de onda (como gotículas de água nas nuvens). Afecta da mesma forma radiação de diferente comprimento de onda.

Efeitos de Rayleigh e de Mie: comparação

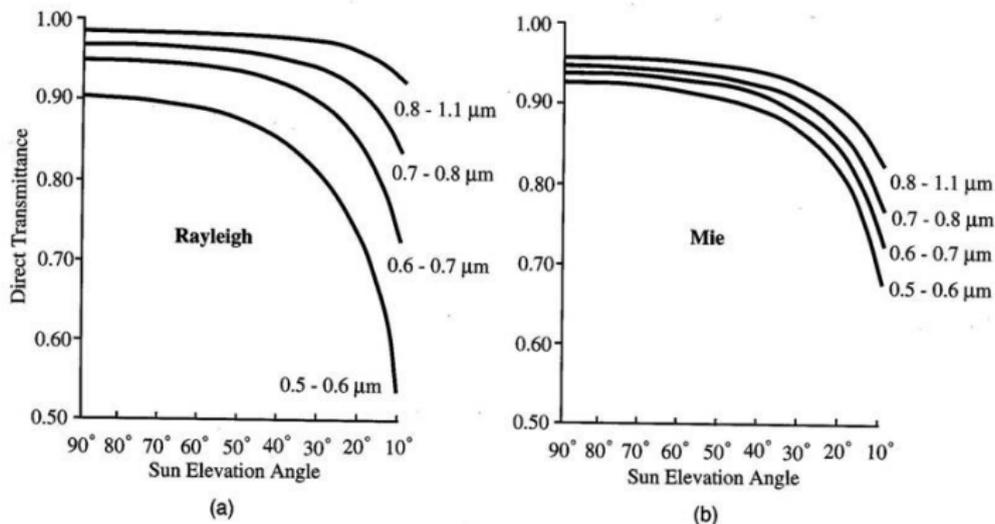


Figure 6-2 (a) Effects of molecular (Rayleigh) scattering and sun angle on incident radiation transmitted to Earth's surface; (b) Effects of aerosol (Mie) scattering and sun angle on radiation transmitted to Earth's surface.

Figura: A dispersão de Rayleigh é mais intensa do que a dispersão de Mie, sobretudo para baixos comprimentos de onda.

Efeitos de Rayleigh e de Mie (ilustração)

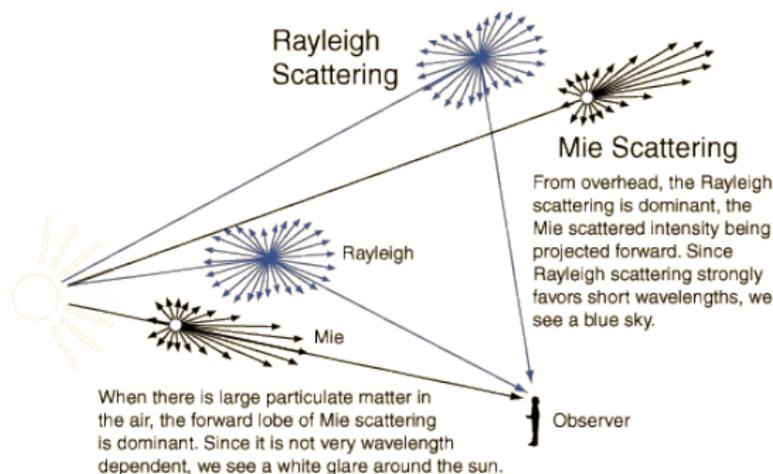
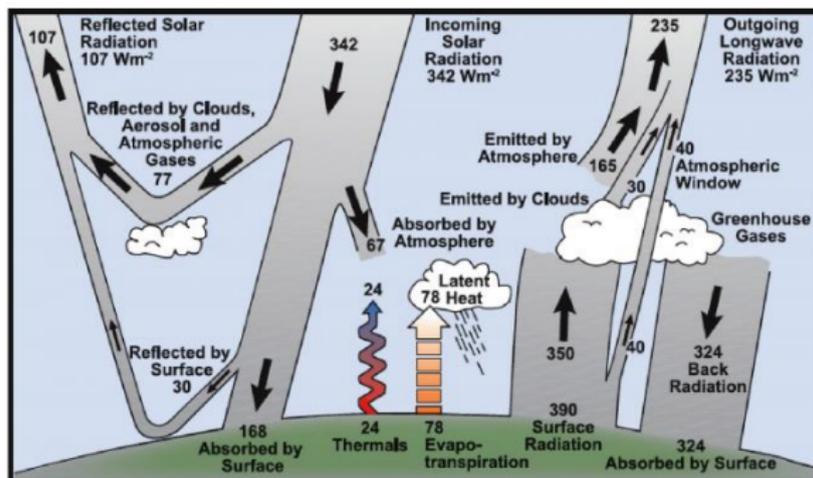


Figura: Ilustração do efeito de Rayleigh e do efeito de Mie sobre a radiação, na atmosfera, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/>

- Por que é que o céu é azul?
- Porque é que o pôr-do-sol é vermelho?
- Porque é que as nuvens são brancas ou cinzentas?

Balço energético e sinal da superfície

A reflectância da superfície explica apenas uma parte do fluxo de radiação captada por detecção remota.



FAQ 1.1, Figure 1. Estimate of the Earth's annual and global mean energy balance. Over the long term, the amount of incoming solar radiation absorbed by the Earth and atmosphere is balanced by the Earth and atmosphere releasing the same amount of outgoing longwave radiation. About half of the incoming solar radiation is absorbed by the Earth's surface. This energy is transferred to the atmosphere by warming the air in contact with the surface (Thermals), by evapotranspiration and by longwave radiation that is absorbed by clouds and greenhouse gases. The atmosphere in turn radiates longwave energy back to Earth as well as out to space. Source: Kiehl and Trenberth (1997).

Figura: Balço anual de energia: 342Wm^{-2} corresponde à irradiância solar média para a superfície do globo. Apenas 30Wm^{-2} corresponde a radiação reflectida pela superfície. <http://icestories.exploratorium.edu>

1 Fundamentos de Detecção Remota

2 Pré-processamento de imagens de detectores ópticos e determinação de grandezas físicas da superfície

- Estimação de reflectâncias à superfície
- Estimação da temperatura da superfície a partir da banda térmica
- Correções geométricas de imagens de satélite

3 Sistemas de Detecção Remota

- Sensores passivos: detectores ópticos e detectores térmicos
- Sistemas activos: RADAR e LIDAR

4 Representação de imagens multispectrais

Números digitais

Uma imagem é constituída por um arranjo regular de pixels. Quando o sensor adquire a imagem, cada elemento do sensor regista o valor para o respectivo pixel. Numa imagem com resolução radiométrica de n bits, o valor registado está entre 0 e $2^n - 1$ e designa-se por **número digital** (ND ou nível radiométrico, ou simplesmente valor do pixel).

Em modo multiespectral, o sensor adquire uma colecção de imagens, em bandas de comprimento de onda diferentes.

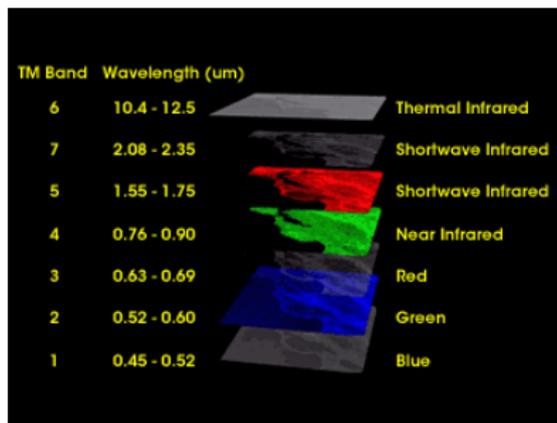
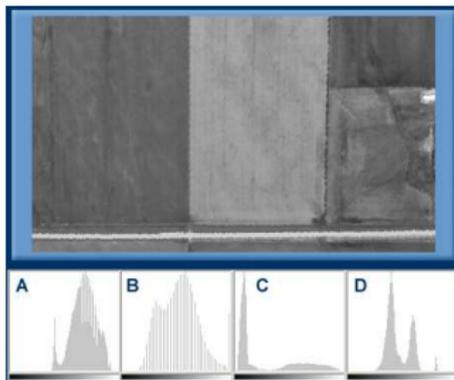


Figura: Uma imagem multiespectral com 7 bandas

Histogramas

O **histograma** de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem.

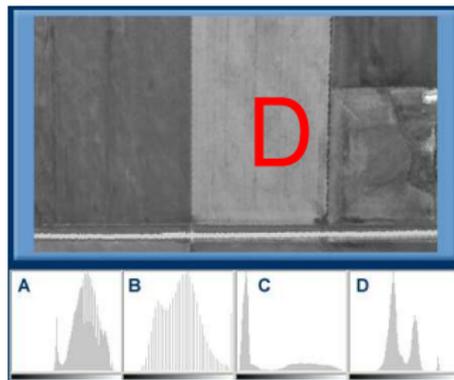
Exercício: Qual é o histograma correcto para a imagem?



Histogramas

O **histograma** de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem.

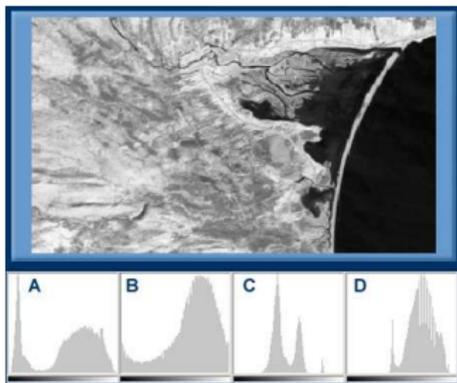
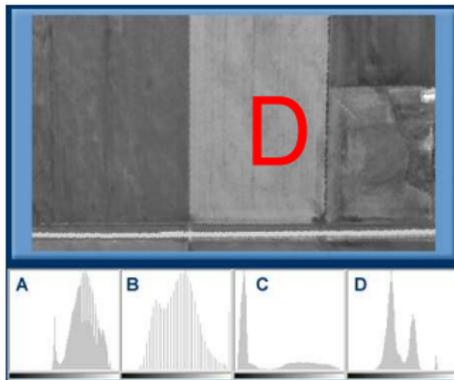
Exercício: Qual é o histograma correcto para a imagem?



Histogramas

O **histograma** de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem.

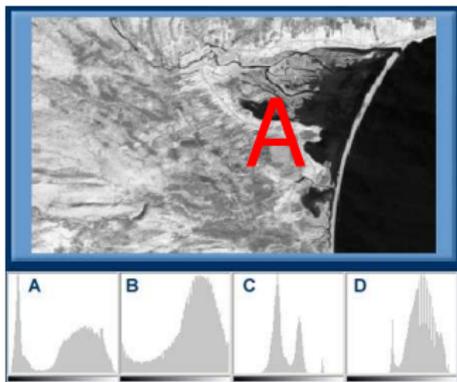
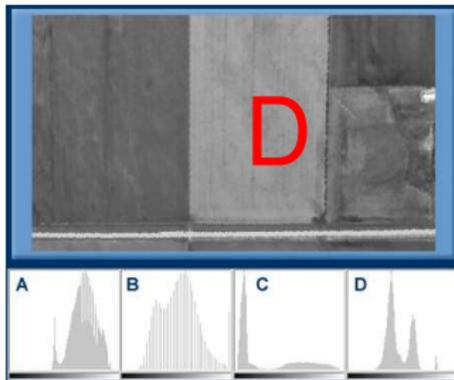
Exercício: Qual é o histograma correcto para a imagem?



Histogramas

O **histograma** de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem.

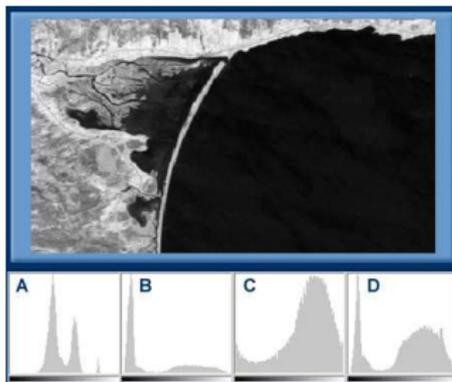
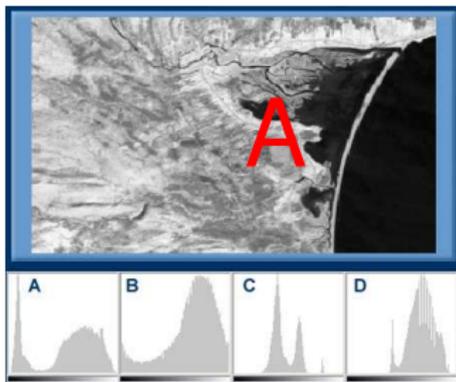
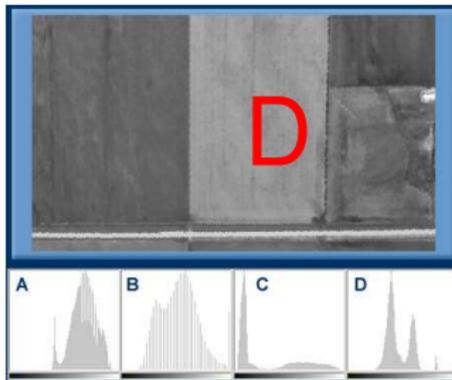
Exercício: Qual é o histograma correcto para a imagem?



Histogramas

O **histograma** de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem.

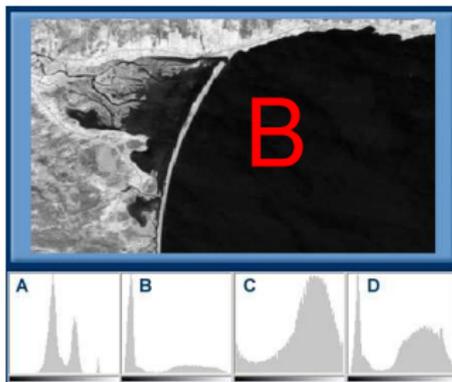
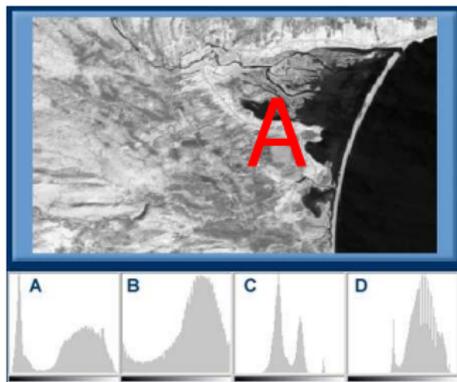
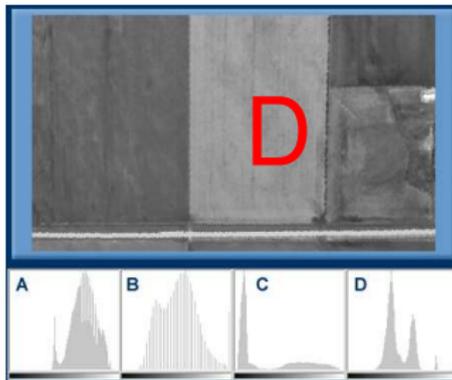
Exercício: Qual é o histograma correcto para a imagem?



Histogramas

O **histograma** de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem.

Exercício: Qual é o histograma correcto para a imagem?



Correcções radiométricas das imagens

Os valores originais dos pixels na imagem (números digitais) dependem de um conjunto de factores tais como a data, o lugar, as condições atmosféricas, o relevo, a banda espectral da imagem, a geometria de iluminação e de observação e as **características biofísicas da superfície**.

As correcções radiométricas consistem em transformar os números digitais da imagem original em grandezas físicas tais como **radiância**, **reflectância** (em cada banda espectral) ou **temperatura**.

Esses grandezas podem ser integradas, permitindo:

- comparar imagens de datas e condições de observação distintas;
- comparar imagens adquiridas por sensores distintos;
- construir mosaicos de imagens;
- comparar assinaturas espectrais obtidas por detecção remota por satélite com assinaturas obtidas em laboratório ou outras condições mais controladas.

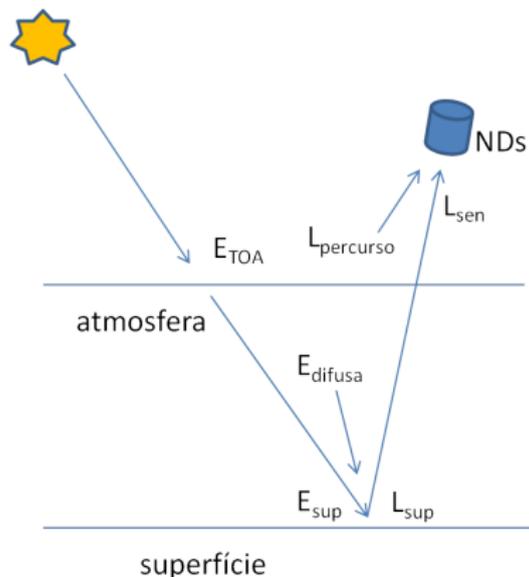
Correcções radiométricas

Os factores de distorção radiométrica que se pretende corrigir são:

- Calibração do sensor;
- Radiância de percurso e outros efeitos atmosféricos;
- Efeitos da geometria de aquisição das imagens;
- Efeito da topografia na iluminação do terreno.

Sequência de operações para cada banda (supondo que a superfície é lambertiana) para estimar a **reflectância**:

- 1 $L^{\text{sen}} = B + G \times \text{ND}$;
- 2 $L^{\text{sen}} = L^{\text{sup}} \tau + L^{\text{percurso}}$;
- 3 $E^{\text{TOA}} = \frac{E^{\text{sol}}}{d^2}$;
- 4 $E^{\text{sup}} = E^{\text{TOA}} \tau \cos \theta_s + E^{\text{difusa}}$;
- 5 $\rho = \pi \frac{L^{\text{sup}}}{E^{\text{sup}}}$.



1. Conversão de números digitais em radiância espectral “no sensor” L^{sensor} ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)

A relação entre números digitais – representados por ND – e L^{sensor} é linear. As constantes podem ser fornecidas de duas formas:

- ① Ganho e “bias” para cada banda:

$$L_{\lambda} = B + G \times \text{ND}; \text{ ou}$$

- ② Constantes de calibração L_{max} , L_{min} ,

$Q_{\text{cal}}^{\text{max}}$, $Q_{\text{cal}}^{\text{min}}$, sendo

$$L_{\lambda} = L_{\text{min}} + \frac{\text{ND} - Q_{\text{cal}}^{\text{min}}}{Q_{\text{cal}}^{\text{max}} - Q_{\text{cal}}^{\text{min}}} (L_{\text{max}} - L_{\text{min}}),$$

em que L_{min} e L_{max} tem unidades $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$.

Estes coeficientes são fornecidos com os metadados associados às imagens.

G_{rescale}	B_{rescale}
($\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$)/DN	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$
1.180709	-7.38
1.209843	-7.61
0.942520	-5.94
0.969291	-6.07
0.191220	-1.19
0.067087	-0.07
0.066496	-0.42
0.975591	-5.68

Figura: Coeficientes para Landsat 7 ETM⁺: a última linha corresponde ao modo pancromático.

Exercício

Considere que um pixel tem valores (34, 45, 43, 112, 87, 99, 54) nas sete bandas de uma imagem Landsat 5 TM, e que os metadados da imagem contêm a seguinte informação:

banda	L_{\max}	L_{\min}	Q_{cal}^{\max}	Q_{cal}^{\min}
1	193	-1.520	255	1
2	365	-2.84	255	1
3	264	-1.17	255	1
4	221	-1.51	255	1
5	30.2	-0.37	255	1
6	15.3	1.23	255	1
7	16.5	-0.15	255	1

Quais são os valores de radiância espectral “no sensor” para o pixel nas 7 bandas?

Resolução

banda	ND	radiância espectral ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)
1	34	$L_1 = -1.52 + \frac{34-1}{255-1} (193 + 1.52) = 23.8$
2	45	$L_2 = -2.84 + \frac{45-1}{255-1} (365 + 2.84) = 60.9$
3	43	$L_3 = -1.17 + \frac{43-1}{255-1} (264 + 1.17) = 42.7$
4	112	$L_4 = -1.51 + \frac{112-1}{255-1} (221 + 1.51) = 95.7$
5	87	$L_5 = -0.37 + \frac{87-1}{255-1} (30.2 + 0.37) = 9.9$
6	99	$L_6 = 1.23 + \frac{99-1}{255-1} (15.3 - 1.23) = 6.7$
7	54	$L_7 = -0.15 + \frac{54-1}{255-1} (16.5 + 0.15) = 3.3$

Nota: os valores de radiância têm tendência a diminuir com o aumento do comprimento de onda enquanto que os ND não seguem essa tendência.

2. Estimação da radiância de percurso L^{percurso} ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)

A radiância de percurso está associada ao efeito de dispersão da radiação na atmosfera que é maior para comprimentos de onda mais curtos (região do visível) e para elevações do sol mais baixas,

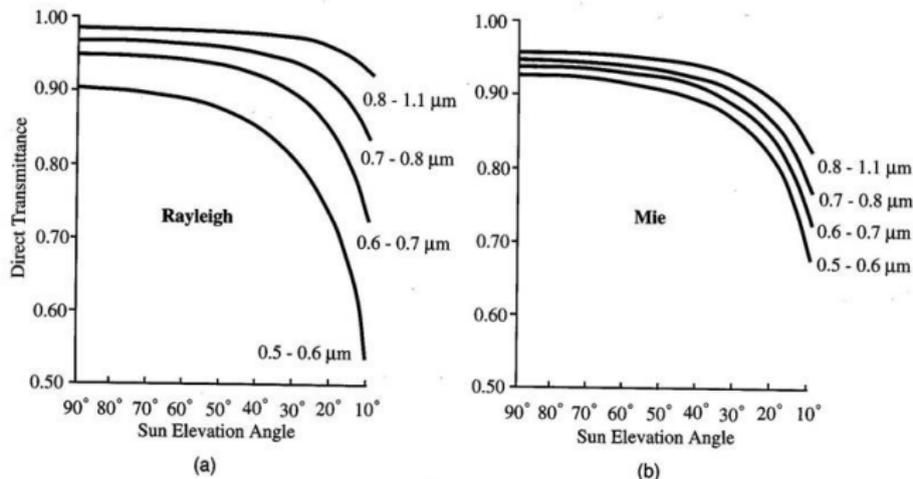


Figure 6-2 (a) Effects of molecular (Rayleigh) scattering and sun angle on incident radiation transmitted to Earth's surface; (b) Effects of aerosol (Mie) scattering and sun angle on radiation transmitted to Earth's surface.

Figura: Os efeitos de dispersão de Rayleigh e de Mie atenuam-se com o aumento do comprimento de onda.

- Técnica do objecto escuro (baseada nos histogramas das bandas);
- Técnica da linha empírica (baseada no conhecimento de L^{sensor} e da reflectância para objectos claros e escuros na imagem);
- Técnica da regressão entre bandas;
- Modelos de transferência (baseados nas condições atmosféricas).

Entre estas técnicas, a primeira depende apenas dos histogramas das bandas, mas pressupõe a existência na imagem de objectos com grande absorção (por exemplo uma zona de água suficientemente profunda).

Ilustração da técnica do objecto escuro

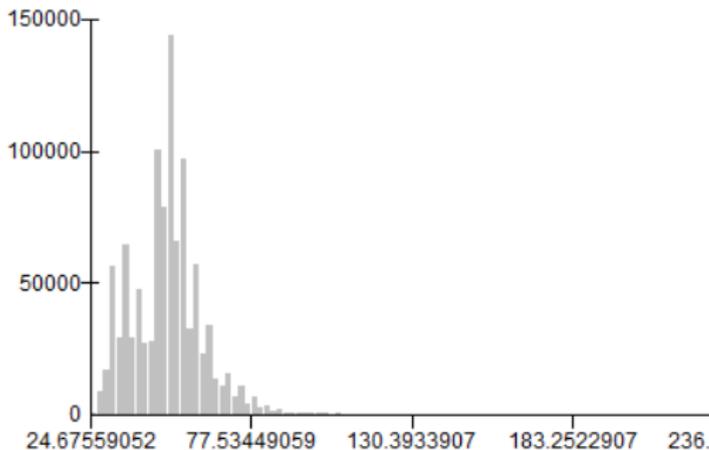
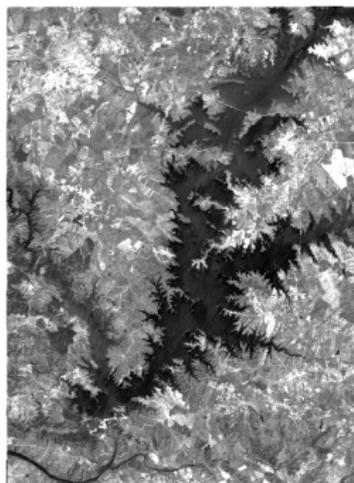


Figura: À esquerda está uma imagem da radiância “no sensor” da região espectral do verde. A imagem contém um “objecto escuro” que deveria ter uma radiância espectral próxima de zero. À direita está o histograma dessa imagem. O valor mínimo da banda ($24.67 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) é a estimativa da radiância de percurso para essa banda.

Exercício

Suponha que numa imagem SPOT-HRVIR de valores de radiância espectral no “sensor” para uma região costeira têm as seguintes características:

- o valor mínimo na banda $0.50 - 0.59\mu\text{m}$ é $24 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, e
 - o valor mínimo na banda $0.61 - 0.68\mu\text{m}$ é $12 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$.
- 1 Indique uma justificação para essa diferença.
 - 2 Que tipo de correcção radiométrica poderia realizar com base nesses valores?

Estimação da radiação “à superfície” $L^{\text{superfície}}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)

A radiação “à superfície” pode ser então estimada a partir da seguinte relação

$$L^{\text{sensor}} = L^{\text{superfície}} \tau_V + L^{\text{percurso}},$$

em que τ_V é a transmitância (adimensional) atmosférica na direcção da visão (i.e. do sensor) que depende das condições atmosféricas, da posição do sensor e do comprimento de onda. τ_V pode ser expresso como

$$\tau_V = \exp\left(-\frac{\tau_{\text{ozono}} + \tau_{\text{aerossois}} + \tau_{\text{Rayleigh}}}{\cos \theta_V}\right),$$

em cada banda, em que θ_V é o ângulo zenital do sensor que determina o comprimento do trajecto da radiação na atmosfera.

τ_V varia para cada banda do sensor e depende das condições atmosféricas (aerossóis e outras partículas). Existem diversos modelos para estimar a transmitância em função das condições atmosféricas (e.g. MODTRAN).

Ilustração dos valores médios de transmitância para as bandas 1 a 5 e 7 do sensor Landsat-TM

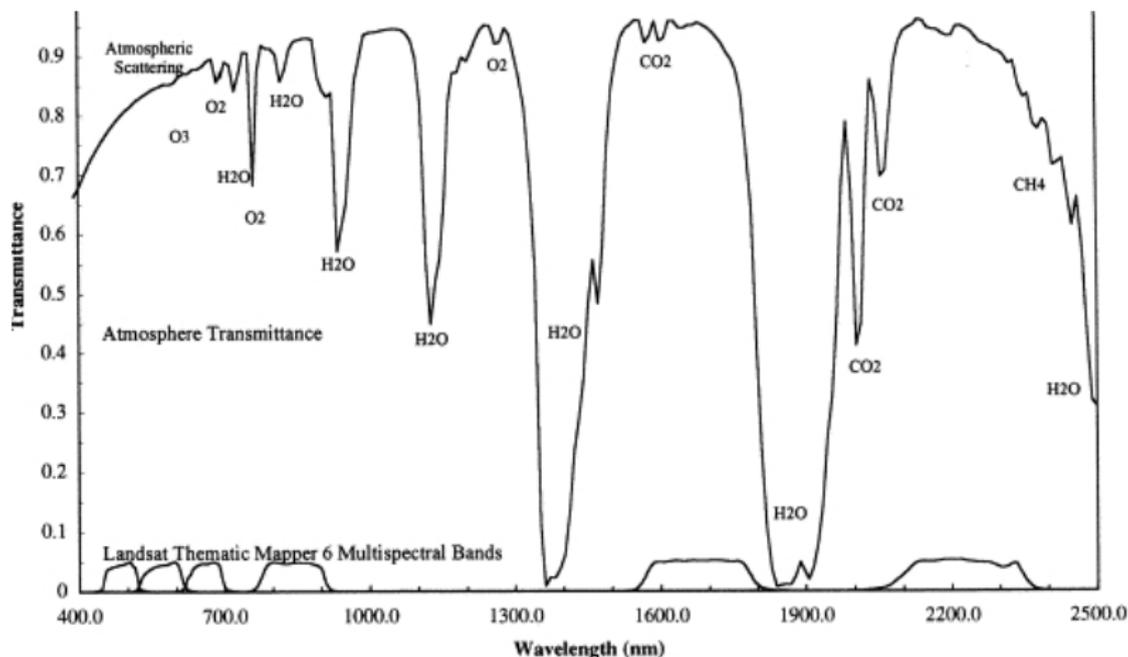


Figura: Transmitância atmosférica média para as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio e localização das bandas Landsat-TM.

Exercício

Considere que uma parcela de terreno de uma zona agrícola no Ribatejo, em Maio, correspondente a um pixel de uma imagem de um determinado sensor de observação da Terra a bordo de um satélite, tem **assinatura espectral** com valor **0.14** na banda do Vermelho ($0.61\text{-}0.68\mu\text{m}$) e com valor **0.35** na banda do IVP ($0.79\text{-}0.89\mu\text{m}$). Para essa localização, e para o momento de aquisição da imagem, suponha que se conhecem ainda os seguintes valores:

	banda V	banda IVP
Irradiância à superfície ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) :	1150	810
Radiância de percurso ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$):	12	2
Transmitância atmosférica:	0.85	0.91

Considerando que a superfície é horizontal e lambertiana, estime os valores da radiância “no sensor” na banda V e na banda do IVP para a parcela. Indique as unidades na resposta.

Resolução

Para uma superfície lambertiana, a reflectância para uma determinada banda é dada pela relação

$$\rho = \frac{\pi L^{\text{superfície}}}{E^{\text{superfície}}}$$

em que $L^{\text{superfície}}$ representa a radiância espectral à superfície ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) e $E^{\text{superfície}}$ representa a irradiância solar espectral à superfície ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$). Então,

Para a banda do V: $L^{\text{sensor}} = L^{\text{superfície}} \tau_V + L^{\text{percurso}} =$
 $= (0.14 \times 1150/\pi) \times 0.85 + 12 =$
 $= 51.248 \times 0.85 + 12 = 55.56 \text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1};$

Para a banda do IVP: $L^{\text{sensor}} = L^{\text{superfície}} \tau_V + L^{\text{percurso}} =$
 $= (0.35 \times 810/\pi) \times 0.91 + 2 =$
 $= 90.24 \times 0.91 + 2 = 87.73 \text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}.$

3. Estimativa da irradiância no “topo da atmosfera” ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)

Para converter a radiância à superfície em reflectância é necessário conhecer a irradiância à superfície.

O primeiro passo é determinar a **irradiância “no topo da atmosfera”** E^{TOA} para cada banda do sensor, que se calcula como

$$E^{TOA} = \frac{E^{solar}}{d^2}$$

em que E^{solar} é a **irradiância exoatmosférica** tabelada para cada sensor e d é a **distância da terra ao sol** em unidades astronómicas.

DOY	d										
1	0.98331	61	0.99108	121	1.00756	181	1.01665	241	1.00992	301	0.99359
2	0.98330	62	0.99133	122	1.00781	182	1.01667	242	1.00969	302	0.99332
3	0.98330	63	0.99158	123	1.00806	183	1.01668	243	1.00946	303	0.99306

Figura: Alguns valores de d .

$ESUN_h$
$W/(m^2.\mu m)$
1997
1812
1533
1039
230.8
N/A
84.90
1362

Figura: Constantes solares E^{solar} para as bandas do sensor ETM⁺.

4. Irradiância em superfícies horizontais $E^{\text{superfície horizontal}}$

($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)

No caso da superfície ser horizontal, todos os locais vizinhos sobre a superfície são iluminados da mesma forma. Assim, a transformação de E^{TOA} para $E^{\text{superfície horizontal}}$ é semelhante para qualquer pixel da imagem, mas depende da banda.

A transformação é definida por

$$E^{\text{superfície horizontal}} = E^{\text{TOA}} \tau_s \cos \theta_s + E^{\text{difusa}},$$

em que θ_s é o **ângulo zenital solar** que condiciona a quantidade de radiação que atinge uma unidade de área da superfície, τ_s é a **transmitância** na direcção do sol, e E^{difusa} é a **irradiância difusa** que atinge a superfície.

A **transmitância** τ_s pode ser descrita de forma análoga a τ_v , substituindo o ângulo zenital do sensor pelo ângulo zenital do sol. E^{difusa} é maior para c.d.o. mais curtos e ronda $60 - 80\text{Wm}^{-2}$, ou seja aproximadamente 5% do fluxo de radiação solar, para o conjunto do espectro.

Irradiância à superfície para uma superfície não horizontal. Exemplo.

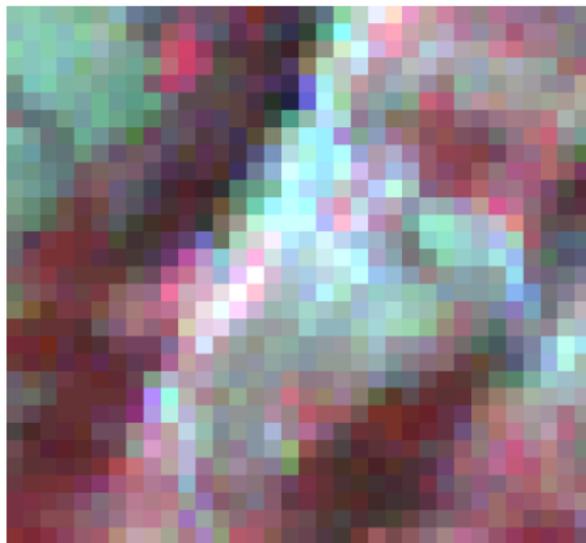


Figura: Na figura da esquerda observa-se Monsaraz, situado no topo de uma colina. Na composição colorida de bandas de satélite do mesmo local, observa-se que as zonas orientadas para SE, mais iluminadas pelo sol, têm maiores valores na imagem do que as zonas viradas para NW. Neste caso, a orientação das encostas condiciona mais o sinal do que a ocupação do solo.

Irradiância à superfície se o terreno não é horizontal

Se a superfície não é horizontal, a orientação da superfície relativamente à posição do sol no momento da aquisição da imagem determina a quantidade de radiação que atinge uma parcela da superfície.

A grandeza que é usada para medir a geometria de iluminação é o **ângulo de incidência zenital** θ_i : o ângulo formado pela direcção do sol e pela normal ao terreno no local.

O ângulo de incidência pode ser estimado em cada local a partir do declive (θ_{local}) e da orientação do local (ϕ_{local}) e a partir da posição do sol definida pelo **ângulo zenital solar** (θ_s) e pelo **ângulo azimutal solar** (ϕ_s) descritos nos metadados das imagens:

$$\cos \theta_i = \cos \theta_s \cos \theta_{\text{local}} + \sin \theta_s \sin \theta_{\text{local}} \cos(\phi_s - \phi_{\text{local}}).$$

Irradiância à superfície para uma superfície não horizontal

Para uma superfície perfeitamente lambertiana, $E^{\text{superfície}}$ é então dado pela expressão

$$E^{\text{superfície}} = E^{\text{TOA}} \tau_s \cos \theta_i + E^{\text{difusa}} \quad (\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$$

que apenas difere do caso em que a superfície é considerada horizontal por substituição de $\cos \theta_s$ por $\cos \theta_i$.

Nota. Na prática verifica-se que $\cos \theta_i$ sobrecorrigue $E^{\text{superfície}}$ quando θ_i é moderado ou elevado.

Efeito do ângulo de incidência

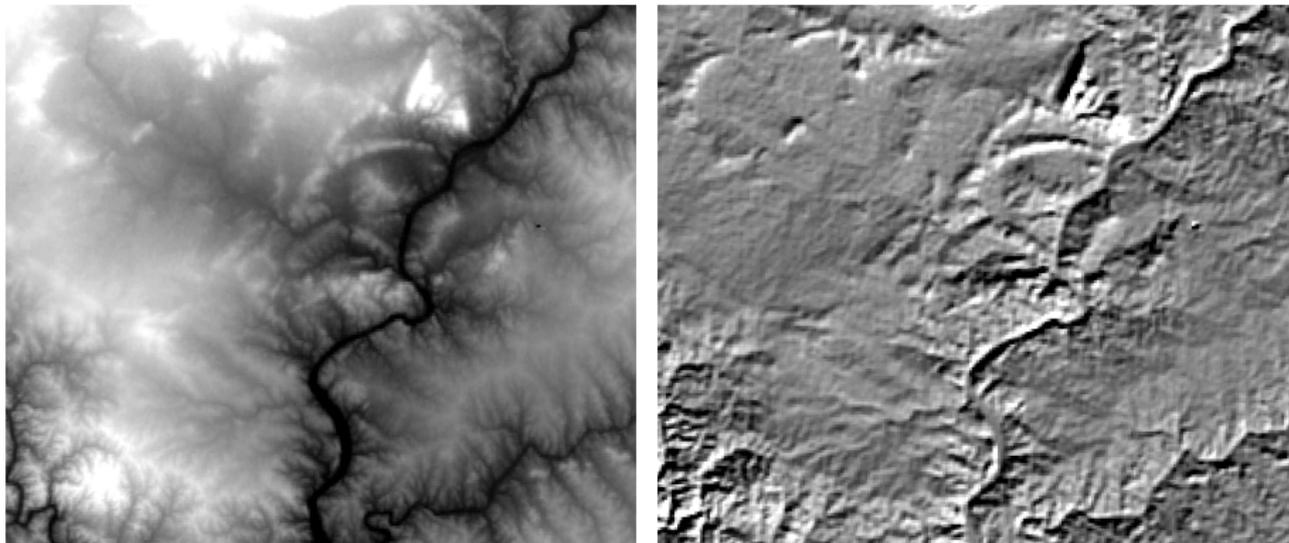


Figura: À esquerda o modelo digital de elevações de uma região. À direita o valor do coseno do ângulo de incidência para a localização do sol definida por $\theta_s = 26.6^\circ$ e $\phi_s = 129^\circ$.

5. Estimativa da reflectância em cada banda (adimensional)

Para uma **superfície lambertiana**, uma única observação “cônica” de radiância L_λ é suficiente para inferir a emitância M_λ pois

$$M_\lambda = \pi L_\lambda.$$

Assim, a reflectância espectral para **superfícies lambertianas** é dada pela razão entre emitância e irradiância, ou seja,

$$\rho_\lambda = \frac{M_\lambda}{E_\lambda^{\text{superfície}}} = \frac{\pi L_\lambda^{\text{superfície}}}{E_\lambda^{\text{superfície}}}$$

Em resumo, a relação entre **radiância espectral no sensor** e **reflectância** é dada por:

$$\rho_\lambda = \pi \frac{L_\lambda^{\text{sensor}} - L_\lambda^{\text{percurso}}}{\tau_{v,\lambda}} \times \frac{1}{E_\lambda^{\text{TOA}} \tau_{s,\lambda} \cos \theta_i + E_\lambda^{\text{difusa}}}.$$

Comparação de assinaturas espectrais com padrões de números digitais

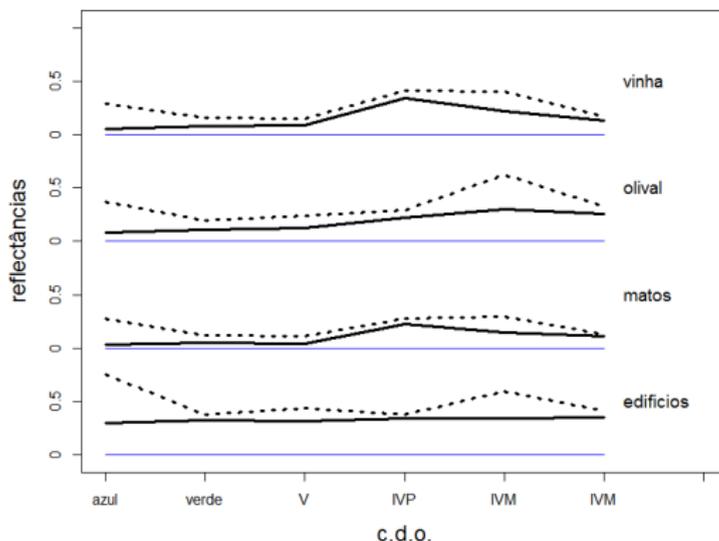


Figura: A traço contínuo estão representadas as assinaturas espectrais de 4 pixels de uma imagem Landsat TM. A traço descontínuo estão representados os padrões de números digitais. As assinaturas espectrais têm o padrão típico dos materiais enquanto que os números digitais incorporam outros efeitos (atmosfera, relevo, etc).

Exercício

Considere uma imagem Landsat 5 TM e um pixel com número digitais (34, 45, 43, 112, 87, 99, 54) nas bandas 1 a 7, que já foram convertidos em valores de radiância “no sensor” num exercício anterior.

Considere apenas as bandas 3 (região do vermelho) e 4 (IVP). Suponha que nessas bandas a **radiância de percurso** estimada é $12 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $2 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, e que a **irradiância difusa** é $15 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ e 0. Suponha ainda que a superfície é horizontal e lambertiana e que o **ângulo zenital solar** no momento de aquisição da imagem é de $23^\circ = 0.401\text{rad}$. Finalmente considere que a **irradiância “no topo da atmosfera”** é $E^{\text{TOA}} = 1536 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 3 e $E^{\text{TOA}} = 1031 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ para a banda 4 e que as **transmitâncias** são $\tau_V = \tau_S = 0.85$ para a banda 3 e $\tau_V = \tau_S = 0.91$ para a banda 4.

Mostre que os valores estimados de **reflectância** para o pixel são 0.094 para a banda 3 e 0.44 para a banda 4.

Exercício

Pretende-se estimar os valores de reflectância na banda de infravermelho próximo de uma imagem multiespectral. Para tal considera-se que a superfície é lambertiana e que a irradiância difusa nessa banda é nula. Não se dispendo de um modelo digital de elevações para a região considera-se que esta é plana e horizontal.

Com base nos pressupostos anteriores foi obtido um valor de reflectância de 0.35 para um pixel correspondendo a uma parcela A situada numa encosta virada a sul com ângulo de incidência zenital de 0° .

- 1 Mostre que a estimativa obtida com os mesmos pressupostos para a reflectância de uma outra parcela vizinha B com a mesma assinatura espectral do que A mas situada numa encosta virada a norte com ângulo de incidência do sol de 20° é 0.3288. (Nota: $\cos 20^\circ = 0.939$).
- 2 Comente a causa para a diferença entre os valores estimados para as reflectâncias de A e de B (cujos valores são na realidade iguais).

Resolução

Omite-se a indicação da banda espectral (λ) pois é única.

A estimativa da reflectância em B é $\rho = M_B / E_B^{\text{superfície}}$, em que M_B e $E_B^{\text{superfície}}$ são respectivamente a emitância e a irradiância em B.

Segundo o modelo que pressupõe que o terreno é horizontal (e que $E^{\text{difusa}} = 0$), o ângulo de incidência é simplesmente o ângulo zenital solar θ_s para qualquer pixel da imagem. Então,

$$E_B^{\text{superfície}} = E^{\text{TOA}} \tau_s \cos \theta_s.$$

Na realidade, as reflectâncias em A e B são iguais e por isso, admitindo que $E^{\text{difusa}} = 0$, $\theta_i = 0^\circ$ (para A) e $\theta_i = 20^\circ$ (para B),

$$\frac{M_A}{E^{\text{TOA}} \tau_s \cos 0^\circ} = \frac{M_B}{E^{\text{TOA}} \tau_s \cos 20^\circ} \quad \text{ou seja} \quad M_B = 0.939 \times M_A.$$

Finalmente, a reflectância estimada pelo modelo simplificado para B é $\rho_B = \frac{0.939 M_A}{E^{\text{TOA}} \tau_s \cos \theta_s}$ que é 0.939 multiplicado pelo valor de reflectância estimado pelo modelo simplificado para A (que é 0.35). Assim o valor estimado para ρ_B é $0.939 \times 0.35 = 0.3288$. A diferença resulta de ser atribuído o mesmo ângulo de incidência zenital a A e B.

Estimação da temperatura da superfície a partir da banda térmica

A estimação da temperatura é feita com base na Lei de Planck, que relaciona a radiância espectral com a temperatura T (em graus Kelvin) para um corpo negro ideal, i.e. cuja emissividade é $\varepsilon = 1$:

$$L(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1]} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}),$$

em que h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz, e k é a constante de Boltzmann.

Para uma banda térmica de um sensor $[\lambda_1, \lambda_2]$, a radiância é

$$L_{[\lambda_1, \lambda_2]} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) d\lambda \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}).$$

Estimação da temperatura da superfície a partir da banda térmica

Invertendo a relação anterior pode em princípio calcular-se a temperatura T de uma superfície a partir da radiação emitida pela mesma. Para uma certa banda do sensor, obtem-se a relação:

$$T = \frac{c_2}{\ln\left(1 + \frac{c_1 \varepsilon}{L^{\text{superfície}}}\right)} - 273.15 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

em que

- $L^{\text{superfície}}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) é a radiância espectral da superfície para a banda $[\lambda_1, \lambda_2]$ considerada,
- c_1 ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) e c_2 (K) são constantes que dependem da banda,
- ε é a emissividade da superfície.

Note-se que para o mesmo $L^{\text{superfície}}$, o aumento de ε corresponde a uma diminuição de T .

Valores típicos de emissividade

Para materiais reais (não correspondendo à definição teórica de corpo negro) a emissividade é inferior a 1 e depende do material à superfície. O valor de emissividade na fórmula anterior deve ser ajustado à ocupação da superfície.

Table 1. Seasonal mean emissivities for different 'emissivity classes' in MODIS band 31 and 32 (Snyder *et al.*, 1998).

Emissivity Classes	Mean Emissivity (ε)					
	Green Season			Senescent Season		
	10.8-11.3 μm	11.8-12.3 μm	Average	10.8-11.3 μm	11.8-12.3 μm	Average
Needle Forest	0.989	0.991	0.990	0.986	0.988	0.987
Broadleaf Forest	0.987	0.990	0.989	0.968	0.971	0.970
Woody Savanna	0.988	0.991	0.990	0.975	0.978	0.977
Grass Savanna	0.987	0.991	0.989	0.973	0.975	0.974
Sparse Shrubs	0.972	0.975	0.974	0.970	0.976	0.973
Water/Wetland	0.991	0.986	0.989	0.991	0.986	0.989
Organic Bare Soil	0.977	0.982	0.980	0.977	0.982	0.980
Arid Bare Soil/ Urban	0.966	0.972	0.969	0.966	0.972	0.969

Figura: Alguns valores típicos de emissividade nas bandas térmicas do sensor MODIS.

Sensibilidade da estimação da temperatura com a emissividade e a radiância à superfície

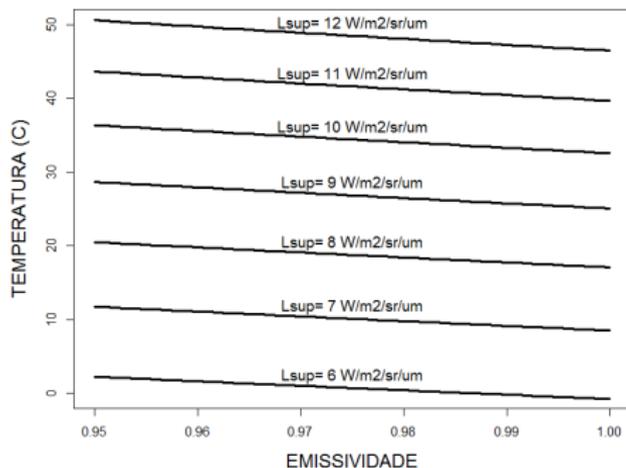


Figura: Ilustração da variação da estimativa de temperatura com o valor da emissividade (ϵ) e da radiância à superfície ($L^{\text{superfície}}$) para a banda térmica do sensor Landsat TM. A estimativa da temperatura é muito sensível aos valores dessas variáveis que caracterizam a superfície.

Balço de radiação térmica

Para a região do infravermelho térmico, o sinal adquirido pelo sensor pode ser escrito como

$$L_{\lambda}^{\text{sensor}} = \left(\varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{\text{corpo negro}}(T) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{\downarrow} \right) \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{\uparrow}.$$

- $L_{\lambda}^{\text{sensor}}$: radiância no sensor
- ε_{λ} : **emissividade** da superfície,
- $L_{\lambda}^{\text{corpo negro}}(T)$: radiância espectral de um corpo negro à temperatura T ,
- L_{λ}^{\downarrow} é a radiância espectral na direcção da superfície,
- τ_{λ} é a transmitância atmosférica, e
- L_{λ}^{\uparrow} é a radiância espectral devida à emissão e dispersão atmosférica na direcção do sensor.

Como a **emissividade** é tipicamente próxima de 1, L_{λ}^{\downarrow} tem uma influência reduzida. Consequentemente, $L_{\lambda}^{\text{sensor}}$ depende sobretudo da temperatura da superfície mas também de L_{λ}^{\uparrow} .

Técnicas alternativas para estimação da temperatura a partir de imagens de satélite

A radiância no sensor depende do efeito da atmosfera (em particular, da temperatura da atmosfera e da distribuição do teor de vapor de água), da emissividade da superfície e da temperatura da superfície.

Algumas abordagens possíveis com dados de detecção remota:

- 1 Com **uma única banda térmica** (e.g. Landsat TM): é necessário conhecer a emissividade e as características da atmosfera através de outras fontes de informação.
- 2 Com **duas bandas térmicas** (e.g. AVHRR e GOES): é necessário conhecer a emissividade da superfície. É possível estimar as características da atmosfera a partir das imagens.
- 3 Sensores **com múltiplas bandas térmicas** (e.g. MODIS e ASTER). É possível estimar simultaneamente a emissividade e a temperatura da superfície unicamente através das imagens (com erro $\approx 1^{\circ}\text{C}$ numa resolução espacial de 1km).

Exemplo: estimação da temperatura do solo a partir da banda térmica do sensor Landsat 5 TM

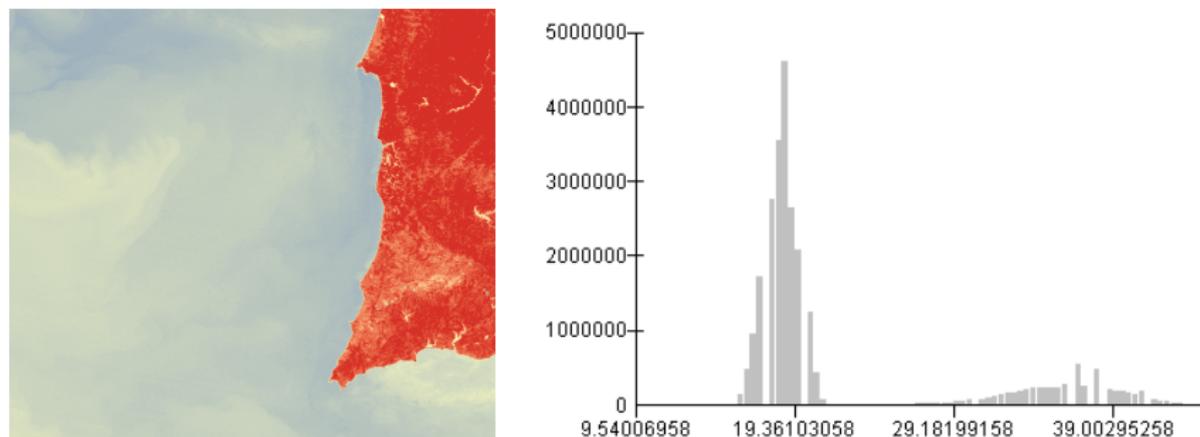


Figura: Para a banda térmica do sensor Landsat 5, as constantes são $c_1 = 607.76$ e $c_2 = 1260.56$. O mapa de temperaturas é derivado da banda 6 do sensor Landsat 5 TM na região sudoeste de Portugal para o dia 23 de Agosto de 2007 considerando-se uma emissividade $\varepsilon = 0.98$ e uma caracterização da atmosfera para esse dia. À direita mostra-se o respectivo histograma.

Produtos de satélite incorporando correcções radiométricas

Diversos produtores de imagens de satélite disponibilizam produtos pré-processados. As correcções são realizadas com informação de múltiplas bandas dos sensores e os resultados são validados.

Por exemplo, são derivados dos sensores MODIS os seguintes produtos:

- **reflectâncias à superfície** (resoluções nominais de 250m, 500m, 1000m, 5600m);
- **albedo** e **reflectância corrigida para o efeito do BRDF** (resoluções de 500m a 5600m).
- **temperatura da superfície** e **emissividade** (resoluções de 1000 a 5600m);
- **índices de vegetação** (resoluções de 250m a 5600 m);
- **índice de área foliar** (resolução de 1000m);

Está previsto, ainda em 2014, a disponibilização de produtos de **reflectância** para Landsat 8 (resolução de 30m).

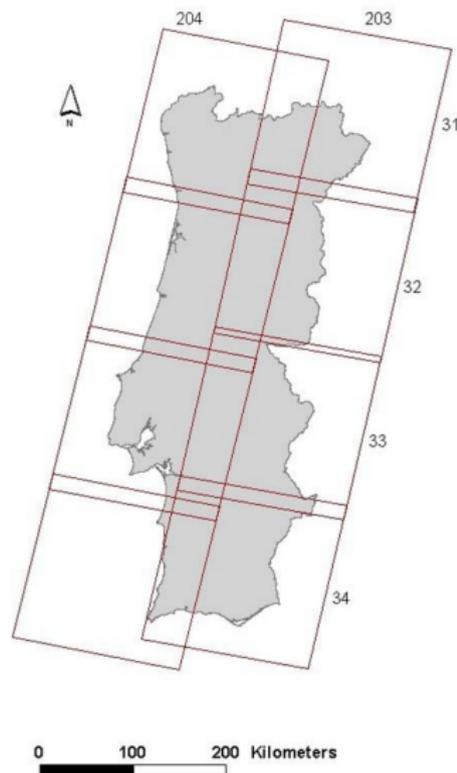
Correcções geométricas das imagens de satélite

As imagens adquiridas por sensores instalados em satélites sofrem deformações geométricas devido a diversos factores.

- A órbita quase polar dos satélites de observação combinada com a rotação da terra provoca uma **inclinação do eixo da imagem**;
- A distorção panorâmica devida ao **ângulo de varrimento** e à consequente variação da distância entre o sensor e o terreno. As imagens adquiridas por sensores com grande campo de visão (FOV) sofrem este efeito de forma muito mais marcada. As imagens obtidas nessas condições caracterizam-se por ter uma resolução espacial muito variável;
- A **curvatura da Terra** causa distorções, principalmente em sensores com grande campo de visão.
- **Erros instrumentais.**

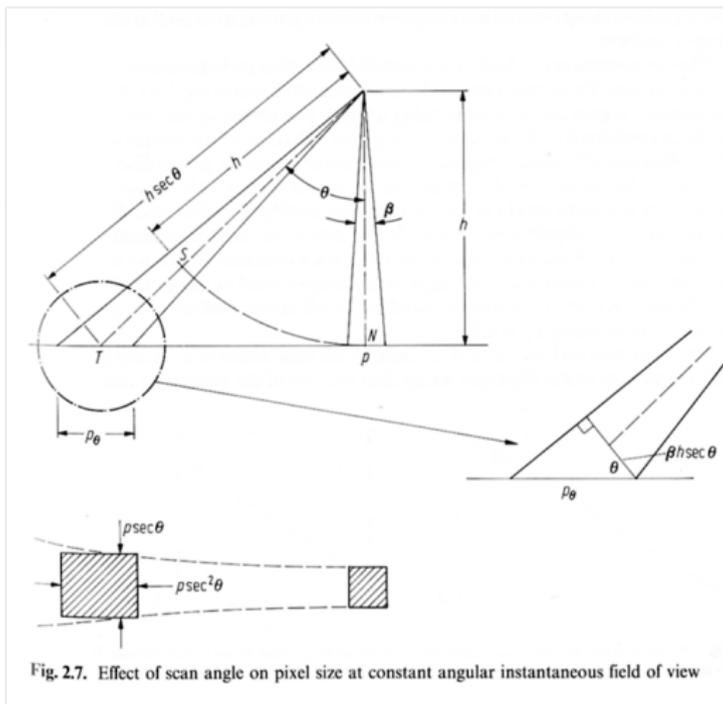
Inclinação do eixos das imagens: ilustração

Conjunto de imagens Landsat que cobrem Portugal Continental. O campo de visão destas imagens corresponde a 185 km no terreno.



Efeito do ângulo de varrimento variável: ilustração

Este efeito afecta sensores com elevado campo de visão como o sensor MODIS, o sensor SPOT-VGT, o sensor AVHRR, entre outros.



Técnicas para corrigir as distorções geométricas das imagens

As técnicas usadas – isoladamente ou em combinação – são as seguintes:

- **Modelar os factores de distorção** e deduzir as correcções a efectuar.
- Aplicar uma transformação (e.g. polinomial) às coordenadas para georreferenciar a imagem, e usar **pontos de controlo com coordenadas conhecidas** para estimar os parâmetros dessa transformação – ver aula sobre georreferenciação.
- **Ortorrectificar** as imagens com auxílio de um modelo digital do terreno.
- **Co-registrar** as imagens: semelhante à georreferenciação com pontos de controlo, mas neste caso os pontos de controlo são pontos comuns às duas imagens. Usa-se para co-referenciar imagens de datas distintas.

Ortorrectificação da imagem

As transformações polinomiais de coordenadas não são adequadas para corrigir deformações das imagens causadas por variações sensíveis do **relevo**.

As deformações devidas à **topografia** podem ser corrigidas com base num modelo de elevações desde que seja conhecida a geometria de aquisição da imagem.

A ortorrectificação é realizada em dois passos:

- 1 Converter as coordenadas x, y da imagem a ortorrectificar em coordenadas x, y, z usando o modelo de elevações e os parâmetros da geometria de aquisição da imagem. Esses parâmetros são tipicamente disponibilizados pelos produtores de imagens em formato RPC (“rational polynomial coefficients”);
- 2 Projectar as coordenadas x, y, z sobre o plano cartográfico.

Ilustração do processo de ortorrectificação de uma imagem

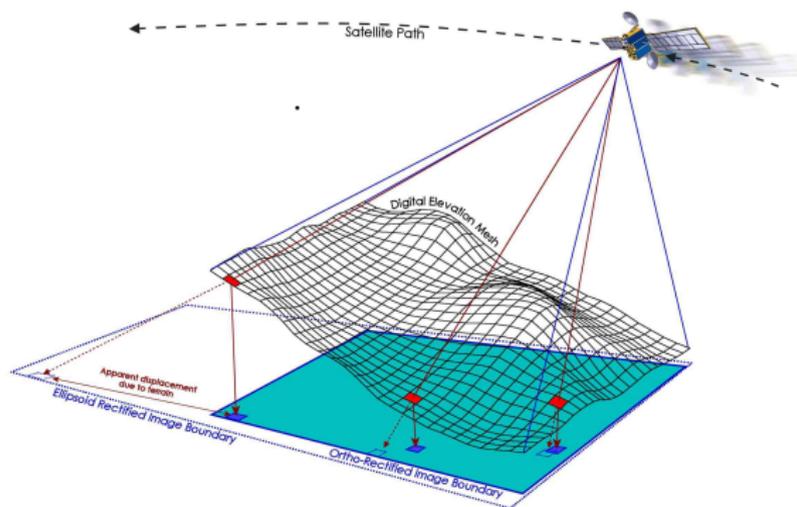


Figura: Ilustração do efeito combinado da geometria de aquisição da imagem e do relevo nas distorções sofridas pela imagem. Cada **pixel** deveria ser projectado verticalmente mas sofre um **deslocamento horizontal**. Se a **cota** do pixel é h e o **ângulo de observação zenital** é θ então o deslocamento horizontal é aproximadamente $h \times \cot(\pi/2 - \theta)$ e cresce portanto com h .

Ilustração do efeito da ortorrectificação

Esta imagem com resolução espacial de 1m representa um terreno com variação de altitude da ordem de 60 m. Em colorido representa-se a localização correcta da rede viária. Se as variações de relevo são importantes, a georreferenciação só pode dar bons resultados se for precedida por uma ortorrectificação.

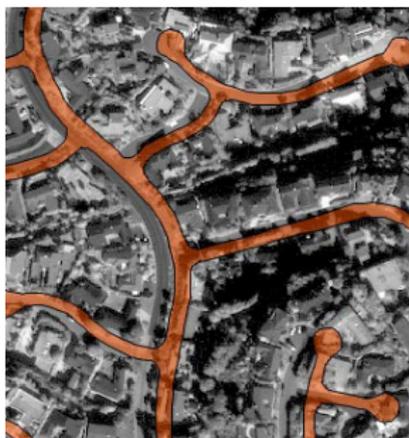


Figura: Imagem georreferenciada mas não ortorrectificada.

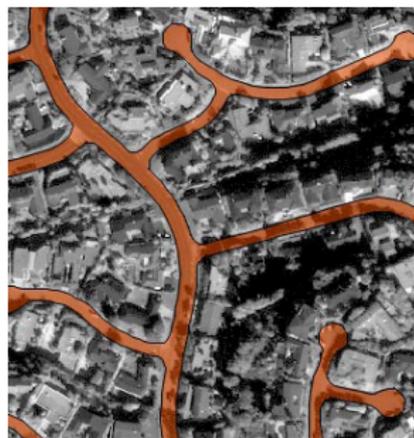


Figura: Imagem georreferenciada e ortorrectificada.

Combinações de técnicas

A técnica de georreferenciação com pontos de controlo é uma técnica empírica mas dá bons resultados em zonas relativamente planas e não muito extensas. Caso as variações de elevação sejam importantes deve ser combinada com a ortorrectificação da imagem. Caso a região seja vasta, uma parte das distorções pode ser corrigida usando modelos de geometria de aquisição da imagem e a técnica de georreferenciação com pontos de controlo pode ser usada complementarmente.

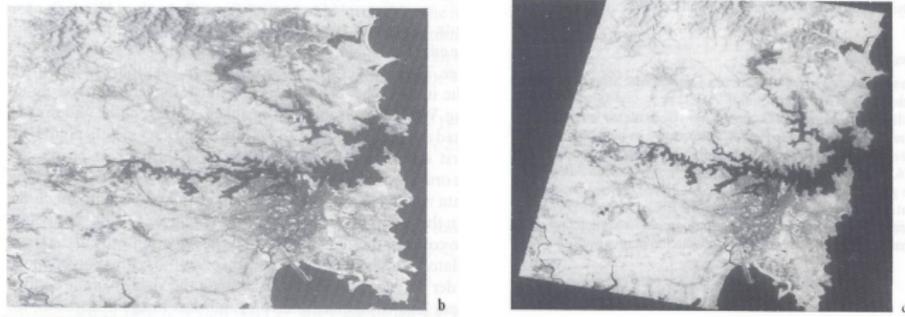


Figura: Imagem original e imagem corrigida.

Níveis de pré-processamento de imagens de satélite

As imagens são disponibilizadas em diversos níveis de processamento. Por exemplo, para o satélite SPOT os níveis são:

Primeiro nível sem uso de pontos de controlo:

- 1A** correcções radiométricas para calibração dos detectores;
- 1B** como 1A e correcção das distorções geométricas causadas pelo percurso do sensor e curvatura;
- 2A** como 1B e definição de uma projecção para coordenadas rectangulares;

Segundo nível usando pontos de controlo:

- 2B** georreferenciação da imagem com pontos de controlo;
- 3** imagem georreferenciada e ortorrectificada usando um modelo de elevações.

1 Fundamentos de Detecção Remota

2 Pré-processamento de imagens de detectores ópticos e determinação de grandezas físicas da superfície

- Estimacão de reflectâncias à superfície
- Estimacão da temperatura da superfície a partir da banda térmica
- Correccões geométricas de imagens de satélite

3 Sistemas de Detecção Remota

- Sensores passivos: detectores ópticos e detectores térmicos
- Sistemas activos: RADAR e LIDAR

4 Representação de imagens multispectrais

Sistemas de detecção remota quanto à fonte de radiação

Sensores passivos. Registam a radiação proveniente do sol e refletida pela superfície (detectores ópticos nas regiões espectrais do visível, infravermelho próximo e médio) ou emitida pela superfície (detectores térmicos na região do infravermelho térmico)

Sensores activos. Dispõem de uma fonte de radiação própria acoplada ao sensor e detectam a resposta da superfície a essa radiação.

As duas principais regiões de comprimento de onda usadas por sensores activos são:

- Sistemas de RADAR (RADio Detection And Ranging): microondas (1mm a 1m);
- Sistemas de LIDAR (Light Detection And Ranging): radiação de c.d.o. próximo do visível (UV, visível, IVP).

Sistemas de detecção remota quanto ao tipo de órbita

- **Geossíncronos ou geoestacionários**: observam sempre a mesma região do globo. A altitude da órbita é da ordem dos 36000 Km para que o período da órbita seja de 24 h. Exemplos: satélites de observação meteorológica METEOSAT e GEOS.
- **Heliossíncronos**, com órbita quase polar: para cobrir toda a superfície terrestre, e assegurar as mesmas condições de iluminação para a mesma zona. Exemplos: satélites de observação da terra como Landsat, SPOT, NOAA, Envisat. As órbitas têm altitude em torno dos 700-800km.

Os satélites geoestacionários obtêm informação com uma grande frequência temporal. Podem obter imagens de 15 em 15 minutos da mesma região do globo.

Satélites geoestacionários

Este tipo de satélites observa sempre a mesma porção do globo.

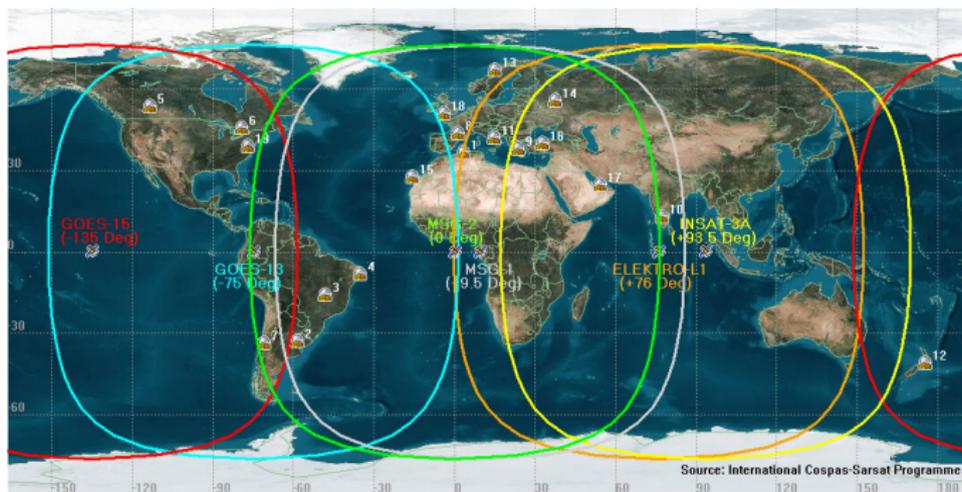


Figura: Áreas observadas por alguns satélites geoestacionários.

<http://www.cospas-sarsat.org/images/>, 20.04.2012.

Órbita heliossíncrona quase polar

O objectivo de uma órbita heliossíncrona é obter imagens em condições de iluminação semelhantes. Assim, as órbitas destes satélites acompanham a posição do sol.

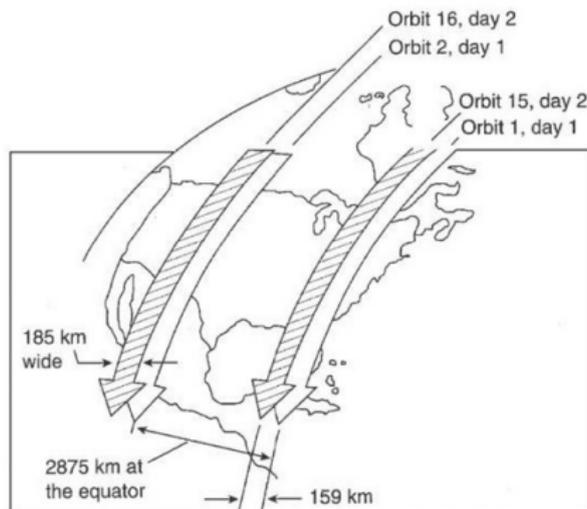


Figura: Ilustração de uma órbita quase polar e sincronizada com a posição do sol. <http://what-when-how.com/>, 20.04.2012.

Geometria de aquisição de imagens por satélites heliossíncronos

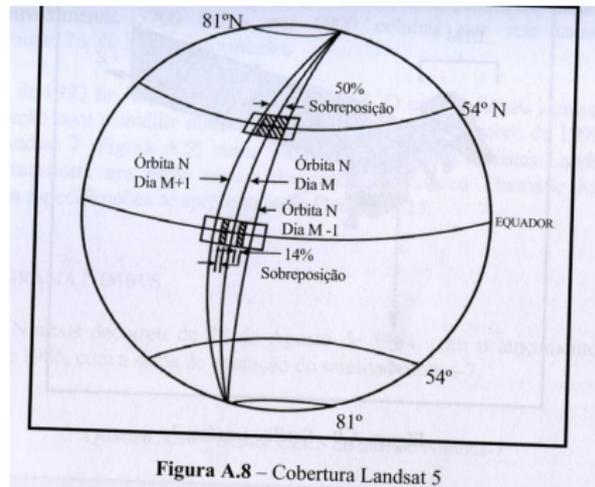
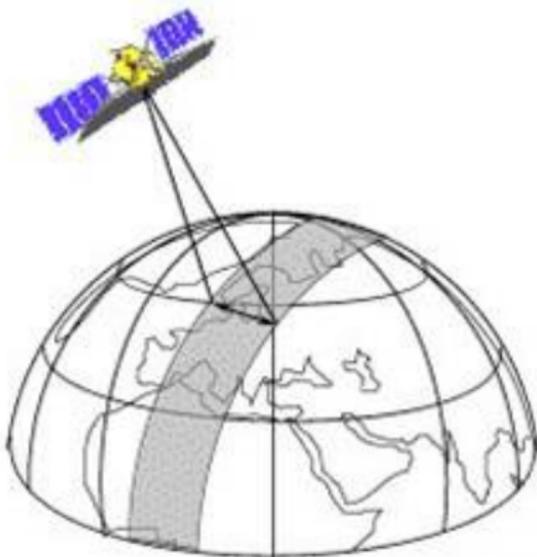


Figura A.8 – Cobertura Landsat 5

Figura: Ilustração da aquisição de imagens por um sensor instalado a bordo de um satélite com órbita heliossíncrona. As faixas de observação têm uma maior sobreposição para latitudes elevadas.

Exemplo: observações do sensor Suomi NPP/VIIRS

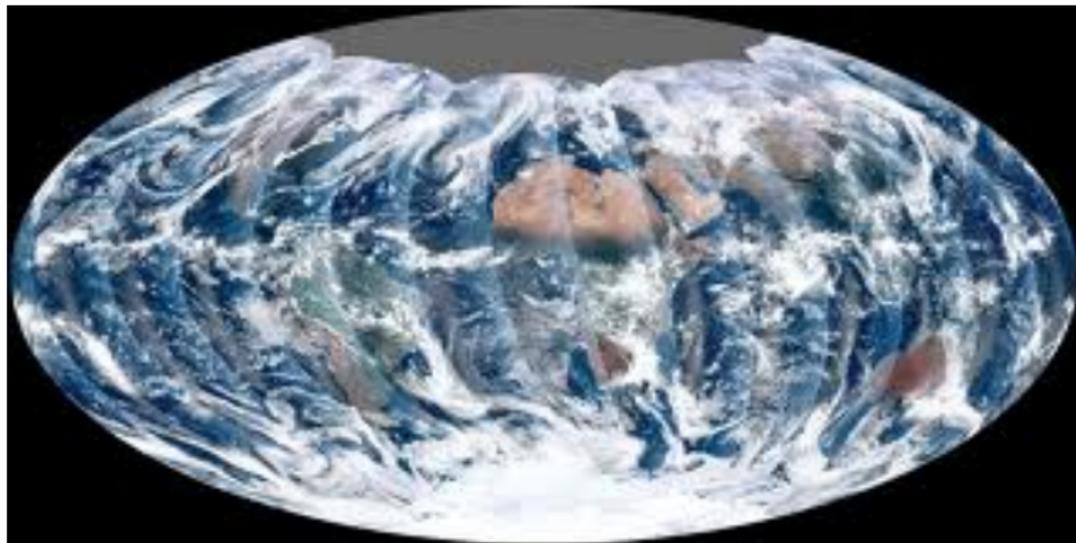


Figura: Composição de faixas de observação do sensor VIIRS. Cada faixa mede aproximadamente 3000km.

<http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/>, 20.04.2012

Sensores passivos

Os sensores passivos medem a radiação solar reflectida pela superfície ou radiação térmica emitida pela superfície. Não possuem uma fonte de radiação própria.

Tipos de sensores passivos quanto à tecnologia de aquisição de imagens:

- câmaras fotográficas (analógicas), em desuso;
- **sensores digitais de varrimento mecânico**: o detector tem um espelho oscilante de varrimento. Exemplo: sensores TM e ETM+ dos satélites Landsat, sensores MODIS, NOAA/AVHRR;
- **sensores digitais de matriz linear** (CCD): com uma bateria de sensores em linha. Exemplos: sensor HRV dos satélites SPOT, sensores dos satélites IRS, IKONOS, QuickBird, sensor OLI em Landsat 8, sensor MSI nos futuros Sentinel-2;
- radiómetros de microondas.

Sensores de varrimento e sensores de matriz linear

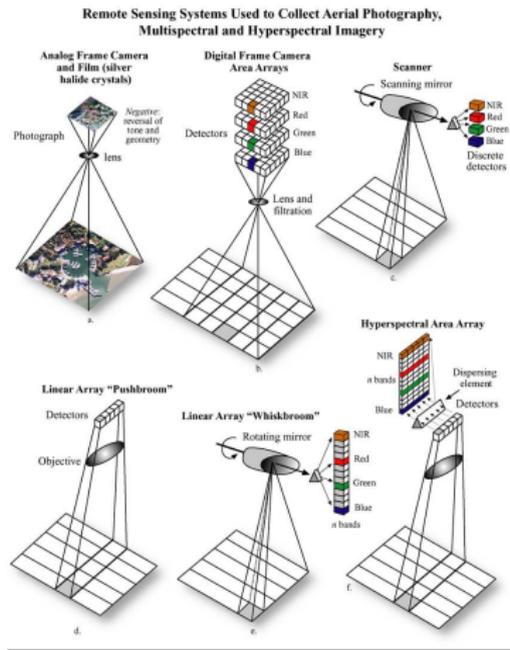


Figura: Um sensor de matriz linear “pushbroom” está associado a menores distorções nas imagens e a um intervalo de tempo mais elevado para a aquisição de informação sobre cada elemento do terreno do que um sensor de varrimento “whiskbroom” <https://www.e-education.psu.edu/>, 23.04.2011.

Campo de visão e projecção na superfície

- **FOV** (campo de visão) é o ângulo do cone de observação do sensor correspondente à largura da imagem;
- **IFOV** (campo de visão instantâneo) é o ângulo do cone de observação que corresponde a *um elemento da imagem*;
- **GFOV** e **GIFOV** são as distâncias no terreno (G de *ground*) correspondentes aos ângulos FOV e GFOV.
- O GFOV corresponde à **largura da imagem**.

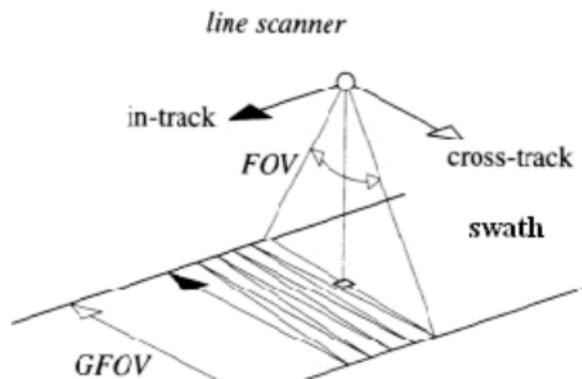
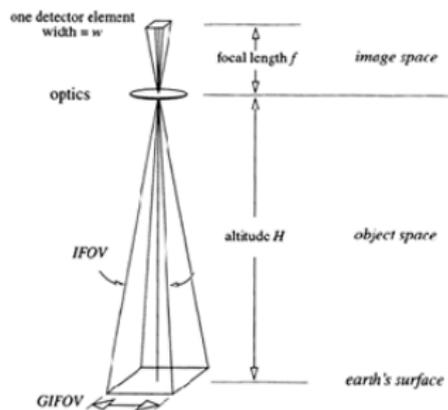


Figura: Ilustração de FOV, IFOV, GFOV e GIFOV.

Exercício: determinar o GIFOV a partir da altitude do sensor e do ângulo de varrimento, supondo que a superfície é horizontal

Considere um sensor a uma altitude $H=705$ km e com um campo de visão de $\text{IFOV}=0.01878^\circ$. Determine:

- 1 o GIFOV do sensor na vertical do lugar (nadir), i.e. para um ângulo de varrimento de 0° ;
- 2 o GIFOV do mesmo sensor para observar um ponto P no terreno com um ângulo de varrimento de $\theta = 20^\circ$.

Resolução:

- 1 $\text{GIFOV}_0 = 2 H \times \tan\left(\frac{\text{IFOV}}{2}\right)$. $\text{GIFOV}_0 = 231.1 \text{ m}$.
- 2 Primeiro, calcular a distância do sensor à superfície ao ponto observado P através da relação $\cos \theta = \frac{705}{H_\theta}$. O resultado é $H_{20} = 750.24$ km. Para calcular $\text{GIFOV}_{20}/2$ usar a relação

$$\frac{H_\theta}{\sin(90 - \text{IFOV}/2 - \theta)} = \frac{\text{GIFOV}_\theta/2}{\sin(\text{IFOV}/2)}$$

Para $\theta = 20^\circ$, o resultado é $\text{GIFOV}_{20} = 261.7\text{m}$, ou seja uma parcela no terreno 30.6m mais larga do que no nadir.

Tipos de resolução das imagens

Em geral, resolução diz respeito à capacidade de discriminar informação. Pode distinguir-se a capacidade de *detecção*, i.e., decidir sobre a ocorrência de um qualquer objecto (e.g. ocorrência de um fogo activo) e a capacidade de *identificação* (e.g. delimitação de uma área ardida).

Existem diferentes tipos de resolução:

- Resolução espacial (dimensão da parcela);
- Resolução espectral (número e tipo de bandas);
- Resolução temporal (frequência temporal);
- Resolução radiométrica (níveis do sinal);
- Resolução angular (ângulos de observação).

Resolução espacial

A resolução espacial pretende medir a dimensão (linear) do mais pequeno objecto que pode ser detectado numa imagem. Mas um objecto de uma certa dimensão no terreno pode ou não ser detectado dependendo do contraste com os objectos vizinhos.

Assim, **resolução espacial** deve ser uma medida que não depende dos objectos à superfície mas apenas das características do sensor, em particular da altitude do sensor H (m) e do campo de visão instantâneo IFOV. Por isso define-se resolução espacial como o **GIFOV** (campo de visão instantâneo projectado no terreno) para um ângulo de varrimento de 0° (observação no nadir)

$$\text{GIFOV}_0 = 2 H \times \tan \frac{\text{IFOV}}{2} \quad (\text{m})$$

Esta medida é interpretada como sendo o comprimento do lado de uma parcela de terreno que corresponde a um pixel na imagem de satélite quando a observação é vertical.

Resolução espacial (continuação)

Classificação dos sensores quanto à resolução espacial:

Muito boa resolução resolução espacial até 4 m. Exemplos: constelação de satélites DigitalGlobe – QuickBird, WorldView-1 e 2, IKONOS (1999), GeoEye-1 (2008) e GeoEye-2 (2013) este com resolução entre 34cms (pancromático) e 1.36m (multiespectral, 4 bandas) –; EROS-A e B (2000, 2006); SPOT5-HRG e SPOT6 (2012) com resolução espacial de 1.5m (pan) e 8m (multiesp.).

Boa ou média resolução resolução espacial entre 4 a 30 m. Exemplos: SPOT 4 e 5; Landsat 5 e 7 e Landsat 8 (2013); os futuros Sentinel-2 (ESA); TERRA/ASTER (NASA); Hyperion (EO-1/NASA).

Resolução grosseira resolução espacial maior do que 30m, adequada para análises globais. Exemplos: Aqua e Terra MODIS e NPP/VIIRS (NASA); ENVISAT/MERIS (ESA), NOAA/AVHRR; SPOT/VGT.

Exercício

O sensor ETM+ do satélite Landsat tem 7 bandas espectrais: as bandas 1 a 3 correspondem à região da radiação visível, a banda 4 situa-se no infravermelho próximo e as bandas 5 e 7 no infravermelho médio. A banda 6 é a banda que corresponde aos maiores comprimentos de onda (10.4 a 12.5 μm).

- 1 Por que motivo a banda 6 é designada de *banda térmica*?
- 2 As resoluções espaciais das bandas 5 e 6 são, respectivamente, 30 m e 60 m para este sensor. Indique uma justificação para essa diferença.

Resolução espectral

A **resolução espectral** é definida pelo número de bandas do sensor e pela gama espectral (intervalo de comprimentos de onda) dessas bandas. Distinguem-se dois modos de obtenção de imagens quanto à resolução espectral:

- **Modo pancromático**: uma só banda (um único intervalo de c.d.o.);
- **Modo multiespectral**: várias bandas em regiões espectrais distintas.

Por exemplo a resolução espectral do sensor VGT (a bordo dos satélites SPOT-4 e SPOT-5) tem uma resolução espectral de 4 bandas com as seguintes gamas de comprimento de onda: $0.43\text{-}0.47\mu\text{m}$ (azul), $0.61\text{-}0.68\mu\text{m}$ (vermelho), $0.78\text{-}0.89\mu\text{m}$ (infravermelho próximo) e $1.58\text{-}1.75\mu\text{m}$ (infravermelho médio).

Resolução espectral (continuação)

Classificação das imagens multiespectrais quanto à resolução espectral:

Alta resolução espectral : de 15 a 220 bandas. Exemplos: EO-1/Hyperion (220 bandas, até $2.5\mu\text{m}$); MODIS (36 bandas, até $14.385\mu\text{m}$); VIIRS (22 bandas, até $12\mu\text{m}$).

Média resolução espectral : de 5 a 15 bandas. Exemplos: Landsat 5 e 7; NOAA/AVHRR; futuro MSI/ESA Sentinel-2 (13 bandas, até $2.4\mu\text{m}$).

Baixa resolução espectral : menos de 5 bandas. Exemplos: SPOT-5 (4 bandas multiespectrais); sensores DigitalGlobe.

Resolução espectral: exemplo

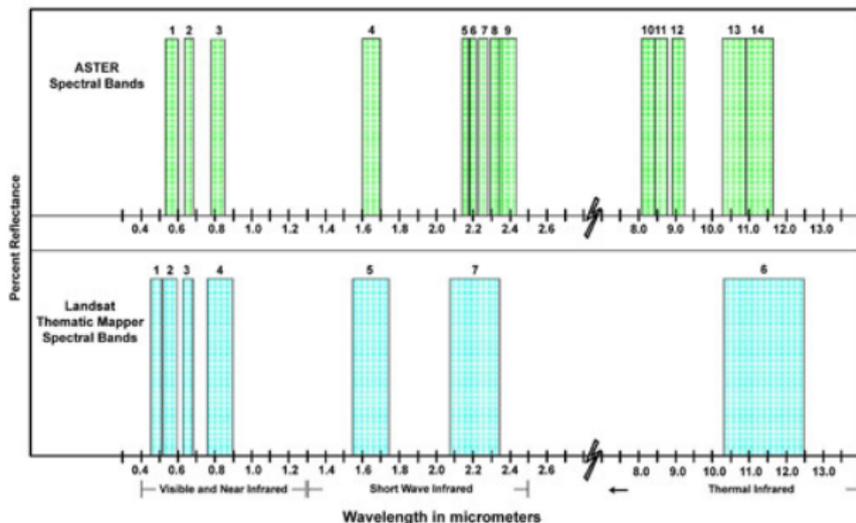


Figura: Comparação da resolução espectral do sensor Aster, em funcionamento desde 1999, com resolução espacial de 15m (visível e IVP), 30m (IVM) e 90m (IV térmico) e do sensor Landsat-TM com resolução espacial de 30m e 120m (IV térmico), em funcionamento desde 1984. Com o desenvolvimento tecnológico ambas as resoluções podem melhorar.

<http://news.satimagingcorp.com/>, 20.04.2012

Resolução espacial na banda pancromática e nas bandas multiespectrais: exemplo.

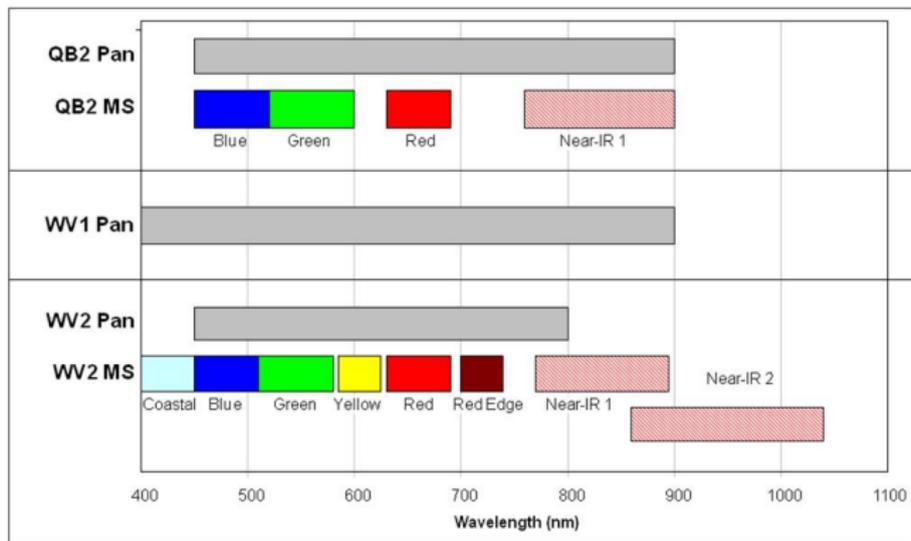


Figura: Resolução espectral dos sensores Quickbird, Worldview-1 e Worldview-2. Para imagens pancromáticas e multiespectrais as resoluções espaciais para Quickbird são 61cm e 2.44m e para Worldview são 46cm e 1.84m. <http://www.scanex.ru/imgs/>, 16.05.2012.

Resolução espacial na banda pancromática e nas bandas multiespectrais: exemplo.



Figura: A resolução espacial das imagens multiespectrais Worldview é 1.84m (à esquerda). A resolução espacial das imagens pancromáticas Worldview é 46cm (ao centro). À direita está representada uma composição colorida usando um algoritmo de fusão da imagem pancromática com as imagens multiespectrais. <http://www.geoimage.com.au/>, 16.05.2012.

Exercício

O sensor Quickbird tem uma resolução espacial de 61 centímetros no modo pancromático e 2.44 metros no modo multiespectral (4 bandas espectrais, entre os $0.45 \mu\text{m}$ e os $0.9 \mu\text{m}$).

- 1 Defina *resolução espacial e modo pancromático*.
- 2 Indique uma justificação para a diferença de resolução das imagens Quickbird no modo pancromático e no modo multiespectral.
- 3 Dada a sua resolução espectral, considera que as imagens Quickbird são adequadas para avaliar de forma directa características do coberto tais como o teor de água ou a temperatura? Justifique.
- 4 Suponha que uma banda (não compactada) da imagem multiespectral de uma certa região ocupa 100 kilobytes. Mostre que uma imagem pancromática da mesma região ocupa 1600 kilobytes.

Resolução temporal

A **duração do ciclo orbital** de um satélite (em dias) é o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas de um satélite na vertical do mesmo lugar. Em cada passagem, um sensor instalado no satélite observa o globo com um determinado campo de visão FOV e por isso adquire informação sobre uma faixa no terreno com largura igual ao GFOV.

A **resolução temporal** (medido em dias ou horas) de um sensor é o intervalo de tempo entre observações sucessivas no mesmo local, possivelmente realizadas com ângulos de observação distintos.

Dada a geometria de observação, a resolução temporal varia com a latitude e com o ângulo de varrimento do sensor.

Resolução temporal (continuação)

Se um sensor tem direcções de observação pré-definidas então a resolução temporal depende do campo de visão (FOV): um maior campo de visão corresponde a uma resolução temporal mais curta.

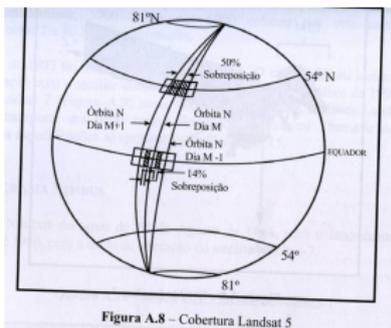
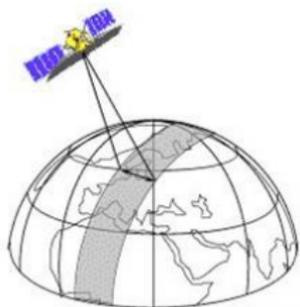


Figura A.8 - Cobertura Landsat 5

Figura: Ilustração da aquisição de imagens por um sensor instalado a bordo de um satélite com órbita heliossíncrona. As faixas de observação têm uma maior sobreposição para latitudes elevadas.

Resolução temporal para sensores de geometria variável

Para alguns sensores é possível alterar a geometria de observação em órbita e assim reduzir a resolução temporal para um dado local.

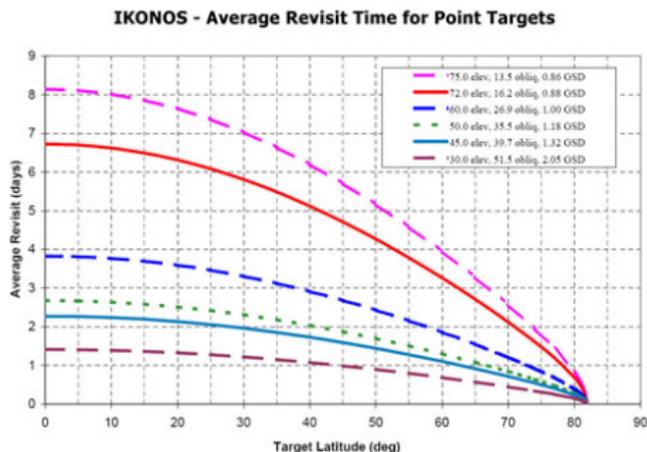


Figura: O sensor de muito boa resolução espacial IKONOS tem um ciclo orbital com duração de 144 dias. No entanto pode adquirir imagens em intervalos de tempo mais curtos com ângulos de observação distintos. As linhas inferiores correspondem a maiores ângulos de varrimento. A resolução temporal depende também da latitude do lugar.

Resolução temporal

A resolução temporal é em geral pior para sensores com uma boa resolução espacial. No entanto, os sensores de boa resolução espacial com geometria de observação variável podem ter uma boa resolução temporal.

Boa resolução temporal : até 1-2 dias. Exemplos: NOAA/AVHRR (6 horas); TERRA/AQUA (1 dia); SPOT-VGT (1 dia); METEOSAT (15-30 minutos); SPOT-HRG (geometria variável), IKONOS (geometria variável).

Resolução temporal média : entre 3 e 16 dias. Exemplos: Landsat TM e ETM.

Fraca resolução temporal : maior do que 16 dias. SPOT-HRV e SPOT-HRVIR.

Comparação de resolução espacial e de resolução temporal

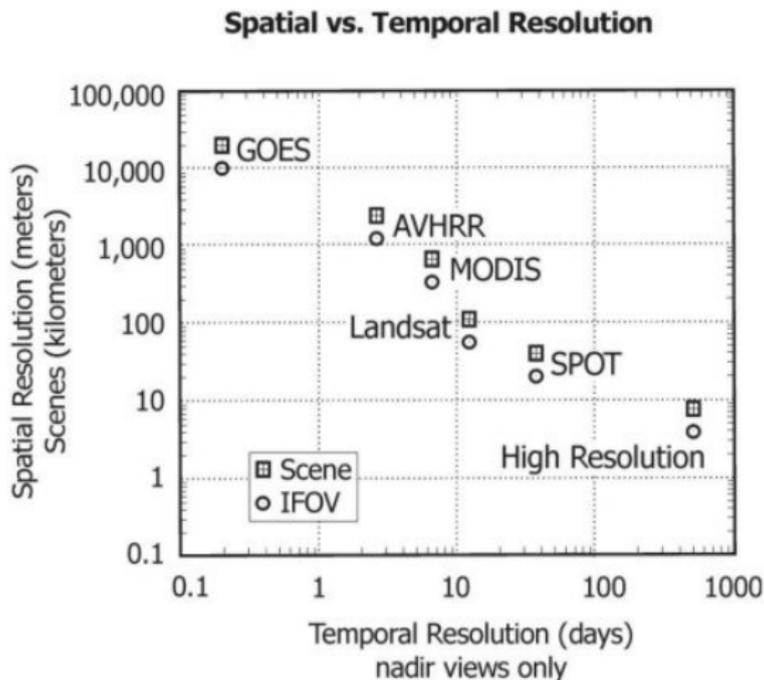


Figura: Comparação de resolução espacial e resolução temporal para alguns sensores. <http://www.geog.ucsb.edu/>, 20.04.2012.

Os sensores SPOT-VEGETATION e SPOT-HRVIR estão na mesma plataforma (SPOT-4) e têm a mesma resolução espectral na banda do infravermelho próximo. O primeiro tem uma resolução espacial de 1 km e o segundo tem uma resolução espacial de 20m.

- Supondo que a orientação dos sensores é idêntica, qual dos sensores deverá ter a melhor resolução temporal? Justifique a sua resposta utilizando as noções de campo de visão instantânea do sensor (IFOV) e de distância no terreno associada ao campo de visão do sensor (GFOV), i.e., a largura de imagem.

Resolução radiométrica

A resolução radiométrica é medida em bits. Se o sensor tiver a capacidade de distinguir $N = 2^n$ níveis radiométricos do sinal, então a resolução radiométrica é n . A resolução radiométrica mais comum é de 8 bits mas pode ir até 12 bits (MODIS). Para 8 bits por exemplo, os níveis radiométricos são numerados de 0 a 255.

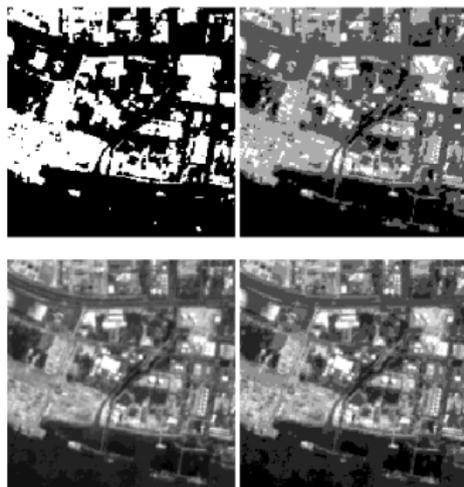


Figura: A mesma zona representada por imagens com resoluções radiométricas de 1, 2, 3, e 4 bits e a mesma resolução espacial.

Resolução angular

A resolução angular é definida pelo conjunto de ângulos de observação com que o sensor pode observar o mesmo lugar.

A maior parte dos sensores pode observar o mesmo local sob direcções distintas mas, em geral, de forma espaçada no tempo (resolução temporal do sensor).

Alguns programas de observação permitem observações quase simultâneas segundo ângulos diferentes como o ATRS 2 (1995), POLDER (1997) ou MISR (1999) ou os sensores ASTER e SPOT5.

A medição de radiâncias sob ângulos distintos é necessárias para obter medições fiáveis de algumas grandezas como o albedo. A aquisição de stereo pares pelos sensores ASTER e SPOT5 possibilita a obtenção de modelos digitais de elevação.

Ilustração de resolução angular

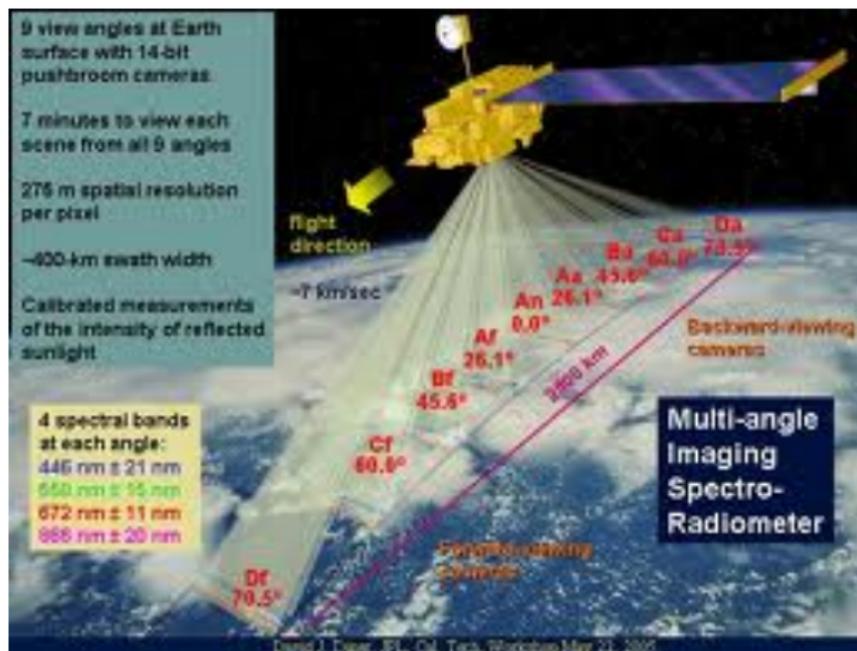


Figura: O sensor MISR faz observações quase simultâneas com diferentes ângulos de varrimento.

Exercício

Cada satélite do par de satélites Sentinel-2 (ESA) transportará o sensor MSI com 13 bandas espectrais, entre $0.443 \mu\text{m}$ e $2.19 \mu\text{m}$, resolução espacial de 10m (4 bandas) , 20m (6 bandas) ou 60m (3 bandas para correções atmosféricas e detecção de nuvens), FOV de 290 km e resolução radiométrica de 12 bits. A resolução temporal será de 5 dias no Equador (par de satélites).

- 1 A resolução temporal para regiões afastadas do Equador será superior ou inferior a 5 dias? Justifique.
- 2 Proponha uma justificação para a diferença de amplitude da gama de comprimento de onda da banda B8 (resolução espacial de 10m) com a banda B8a (resolução espacial de 20m).
- 3 Indique uma razão pela qual o sensor não tem uma banda com 10m de resolução espacial para a região $.4-0.5 \mu\text{m}$.
- 4 Diga por que razão a banda para avaliação do efeito dos aerossóis tem valores baixos de comprimento de onda.
- 5 Será que este satélite é adequado para monitorizar com frequência semanal o estado vegetativo de cereais de inverno no centro da Europa?

Resolução espectral do sensor Sentinel2-MSI

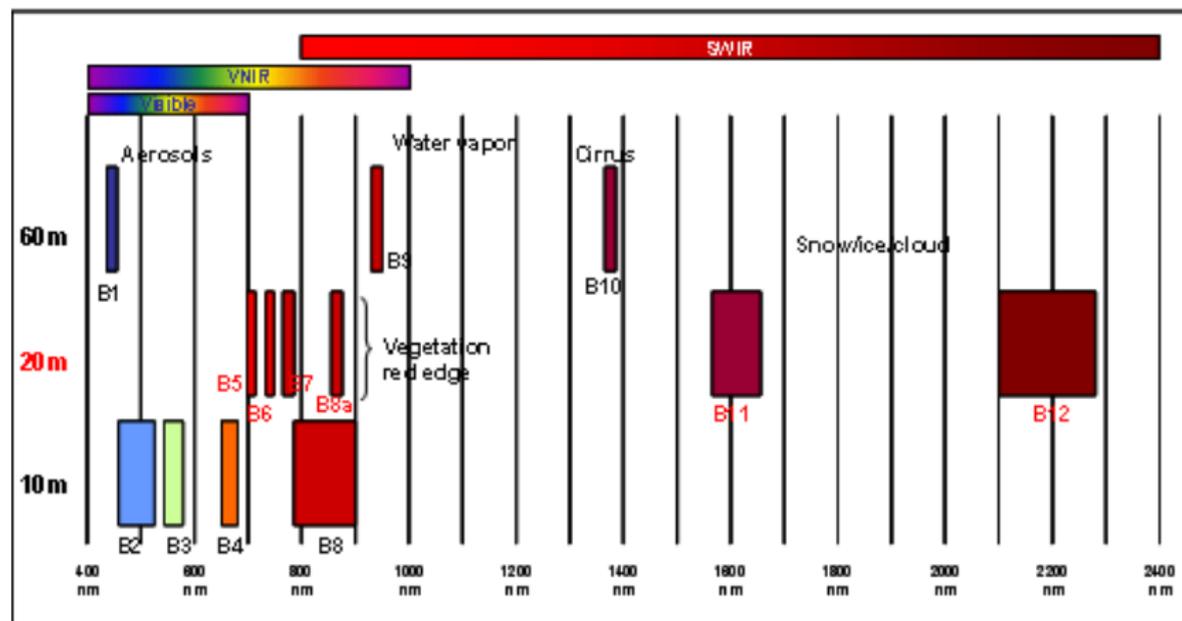


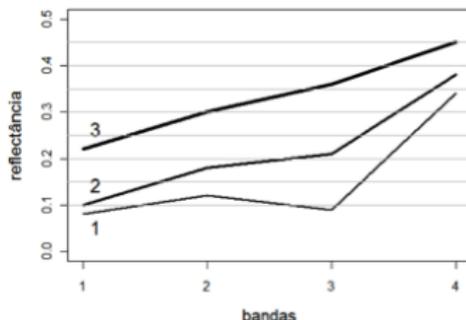
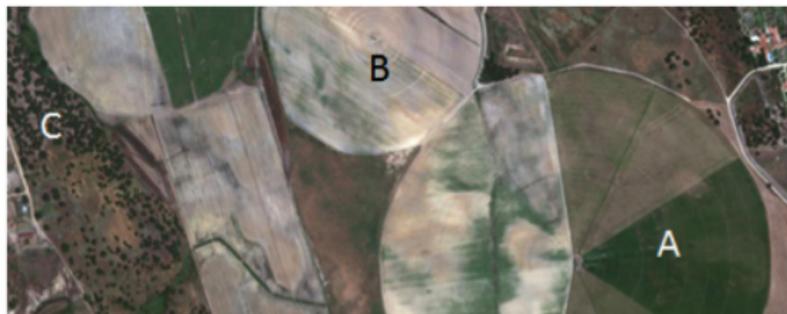
Figura: Resolução espectral do sensor MSI a bordo do futuro satélite Sentinel-2 (ESA). <http://www.cesbio.ups-tlse.fr/>, 15.05.2012.

Exercício

Considere uma imagem e algumas assinaturas espectrais para o sensor GeoEye1 com as seguintes características.

Band	Wavelength (μm)	Bandwidth (μm)	Resolution (m)	Swath width (km)	Revisit time (days)
Band 1 (VIS)	0.45 to 0.51		1.65	15.2	
Band 2 (VIS)	0.51 to 0.58		1.65	15.2	
Band 3 (VIS)	0.655 to 0.69		1.65	15.2	
Band 4 (NIR)	0.78 to 0.92		1.65	15.2	

(a) Determine aproximadamente o valor do NDVI para cada assinatura espectral (1, 2 e 3). (b) Estabeleça uma associação entre cada um dos pontos assinalados (A,B,C) e as três assinaturas espectrais.



Sistemas activos de detecção remota

Estes sistemas podem ser classificados em função do tipo de informação que adquirem: coeficiente de retrodifusão da superfície ou distância aos objectos a detectar.

- 1 **Imagens RADAR** : Embora as imagens têm um aspecto semelhante a imagens de detectores ópticos, os princípios de aquisição são muito distintos. Uma imagem de radar tem dois tipos de resolução espacial.
 - ▶ **resolução de alcance**: é a resolução na direcção perpendicular ao movimento da plataforma e depende das características dos impulsos de radiação;
 - ▶ **resolução azimutal**: é a resolução na direcção do movimento da plataforma e depende do tamanho da antena. Para melhorar esta resolução muitos sistemas usam uma *abertura sintetizada* i.e. simulam uma antena de maiores dimensões tirando partido do movimento da plataforma.
- 2 **Altímetros** (RADAR ou LIDAR): sistemas que medem distâncias na vertical entre o sensor e a superfície. A partir do intervalo de tempo entre a transmissão e recepção de um impulso, a distância ao alvo pode ser determinada.

RADAR

Em sistemas RADAR o transmissor envia na direcção da superfície impulsos de microondas com um certo comprimento de onda e uma certa duração. Em sistemas RADAR, a radiação incidente e a observação são realizadas numa direcção oblíqua.

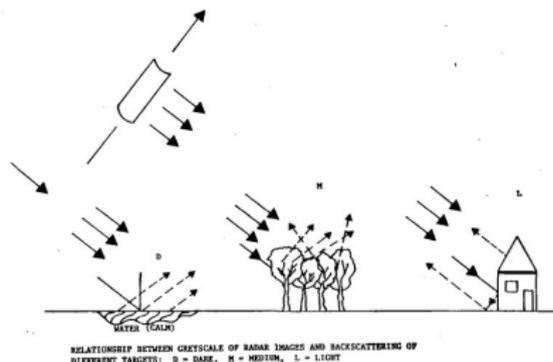


Figura: O transmissor de microondas incide sobre a superfície numa direcção oblíqua ao plano terrestre e é reflectido de acordo com a geometria e a rugosidade dos objectos à superfície. A superfície “suave” é mais escura na imagem, e a superfície artificial vertical na direcção perpendicular à direcção de observação é a mais brilhante. <http://galathea3.emu.dk/>, 23.04.2012

Bandas de c.d.o. em imagens RADAR

Radar Band	Frequency (GHz)	Wavelength (cm)
Millimeter	40 to 100	0.75 to 0.30
Ka	26.5 to 40	1.1 to 0.75
K	18 to 26.5	1.7 to 1.1
Ku	12.5 to 18	2.4 to 1.7
X	8 to 12.5	3.75 to 2.4
C	4 to 8	7.5 to 3.75
S	2 to 4	15 to 7.5
L	1 to 2	30 to 15
UHF	0.3 to 1	100 to 30

Figura: Gammas de comprimento de onda usuais em bandas em sensores de microondas. <http://www.eetimes.com/>, 23.04.2012

Polarização em imagens RADAR

Para aumentar o conteúdo de informação dos sinais de radar, vários modos de polarização podem ser considerados na emissão e recepção do sinal.

Em particular, a polarização pode ser vertical ou horizontal, havendo portanto quatro modos – **HH**, **VV**, **HV**, **VH** – em que o primeiro símbolo representa a polarização da radiação emitida, e o segundo representa a polarização da radiação captada pela antena do sensor.

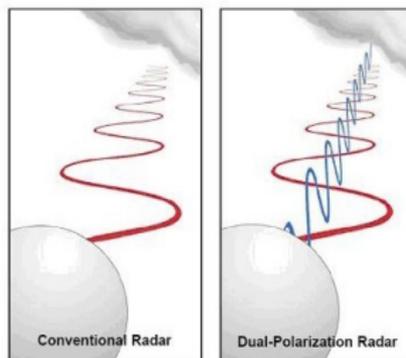


Figura: Ilustração de polarização horizontal e vertical em impulsos de RADAR. <http://www.roc.noaa.gov/>, 23.04.2012.

Características da superfície que afectam o sinal em imagens RADAR

O sinal em imagens de RADAR depende de características da superfície fundamentalmente distintas das características que afectam as imagens de detectores ópticos.

Essa diferença deve-se essencialmente dois factores: comprimentos de onda mais longos; geometria de observação inclinada.

No caso dos sistemas RADAR as principais características da superfície que afectam as imagens são os seguintes.

- Rugosidade;
- Condutividade e teor de humidade no solo;
- Teor de humidade da vegetação, estrutura das copas e quantidade de biomassa;
- Características geométricas da superfície.

Efeito da rugosidade da superfície em imagens RADAR

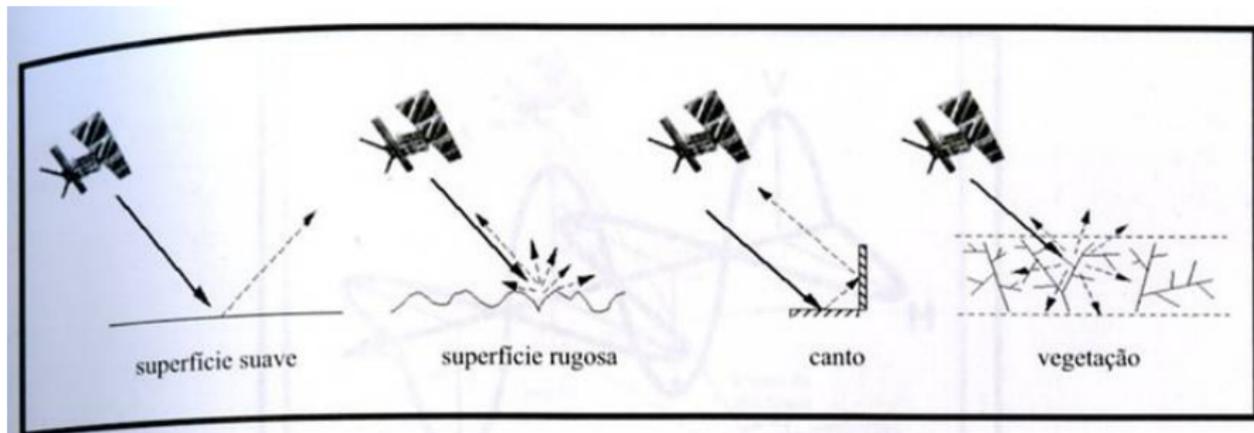


Figura 27 – Mecanismos de Retroreflexão

Figura: Em função da rugosidade do material à superfície e da geometria de observação, a intensidade do sinal detectado pelo sensor varia. A superfície “suave” é que será mais escura na imagem, e a superfície artificial vertical na direcção perpendicular à direcção de observação será a mais escura.

Efeito da rugosidade da superfície em imagens RADAR (cont.)

Uma superfície é *rugosa* numa certa região espectral se a dimensão das partículas da superfície é maior do que o comprimento de onda da radiação que a atinge. Uma zona pouco rugosa é “escura” numa imagem RADAR.

Um exemplo conhecido da utilização dessa característica das imagens RADAR é a monitorização de derrames de petróleo em oceanos.

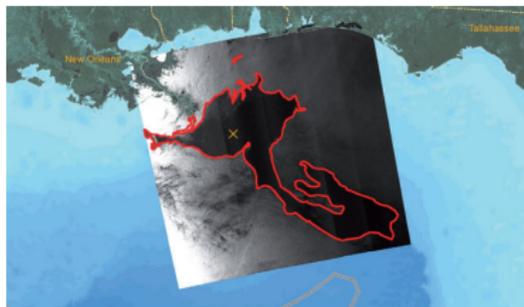


Figura: Imagem Envisat do Golfo do México para monitorização da evolução da mancha de petróleo resultante do derrame de petróleo causado pela explosão na plataforma *Deepwater Horizon* em 20 de Abril de 2010. Como a mancha de petróleo é mais “lisa” do que a água, a zona afectada aparece mais escura na imagem. <http://www.astrium.eads.net/>, 23.04.2012.

Efeito da rugosidade da superfície em imagens RADAR (outro exemplo)

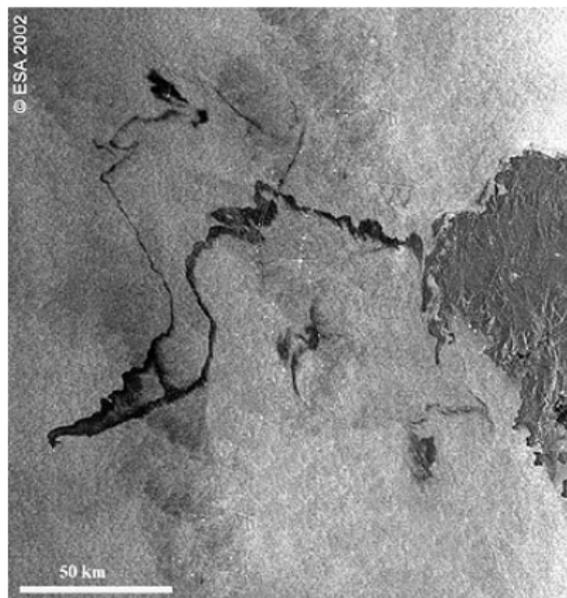


Figura: Imagem Envisat da costa da Galiza em Novembro de 2002 para monitorizar a evolução da mancha de petróleo derramada pelo navio Prestige. Como a mancha de petróleo é mais “lisa” do que a água, a zona afectada aparece mais escura na imagem.

Nuvens e precipitação em imagens RADAR

As nuvens e a precipitação são permeáveis à radiação de muito longo comprimento de onda dado que as partículas que constituem o vapor de água e as gotículas de precipitação têm dimensões menores do que algumas gamas de comprimento de onda usadas em sistemas de RADAR. Assim, é possível observar a superfície através das nuvens.

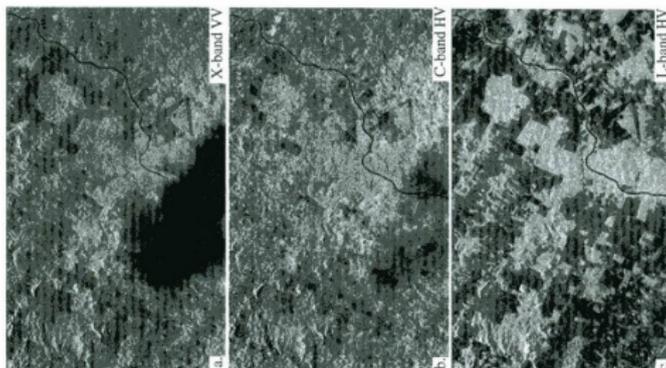


Figura: Imagens simultâneas na região amazônica. O comprimento de onda cresce da esquerda para a direita e a polarização varia. Na imagem da esquerda (banda X, menor c.d.o.) nota-se claramente a presença de uma nuvem e de precipitação que não é visível na imagem da direita (banda L, maior c.d.o.).

Estrutura do solo em imagens RADAR

A radiação de longo c.d.o. penetra nas camadas superficiais de solo e ao interagir com essas camadas revela características que não são visíveis à superfície em imagens de detectores ópticos.

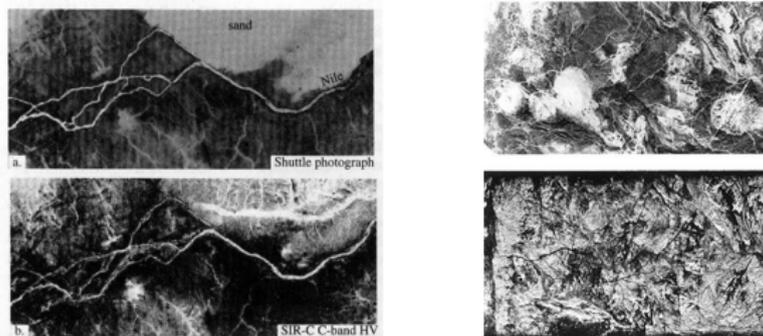


Figura: À esquerda, uma imagem de uma região junto ao rio Nilo. A imagem superior é uma fotografia tirada do espaço e a imagem inferior é uma imagem radar que revela a marca do leito abandonado do rio Nilo. Do lado direito, está outro par de imagens obtidas simultaneamente sobre uma zona do Egito: a imagem superior é uma imagem Landsat (onde são visíveis nuvens) e a imagem inferior é uma imagem SIR-A radar onde é visível a estrutura das camadas superiores da superfície.

Efeito de *superfície* e efeito de *volume* em imagens RADAR

A reflexão das copas tem duas componentes: **reflexão de superfície** e **reflexão de volume**. Quando maior o comprimento de onda do impulso radar, maior é a penetração da radiação nas copas e maior é o efeito de volume.

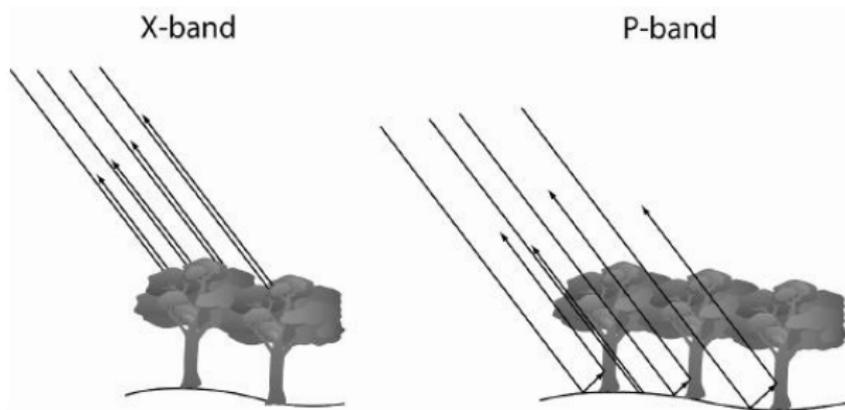


Figura: Radiação de maior comprimento de onda penetra mais nas copas. As características do coberto de que depende o sinal variam com o comprimento de onda: na figura à esquerda o sinal é afectado pela maior parte da copa enquanto que na figura à direita apenas a parte superficial das copas contribui para o sinal adquirido pelo sensor.

Principais características distintivas de imagens RADAR

- A **interacção da radiação com as nuvens ou precipitação é reduzida**, sobretudo para bandas de maior comprimento de onda;
- A informação fornecida por imagens de radar é distinta da informação obtida na gamas de comprimento de onda do visível, infravermelho e térmico. Enquanto a reflectância no visível e infravermelho está relacionada com as propriedades moleculares dos objectos, as imagens de radar dependem de **características macroscópicas da superfície**: rugosidade orientação, e volume (por exemplo, das copas);
- As imagens RADAR são obtidas para **quaisquer condições meteorológicas, de dia ou de noite, e independentemente das condições de iluminação**;
- Essas características fazem com que as imagens de radar sejam de grande utilidade para a monitorização da superfície em **áreas com grande nebulosidade** como as regiões temperadas e as regiões equatoriais.

Altímetros RADAR e interferometria

Outra área importante de aplicação de RADAR é a medição da altimetria à escala global.

A técnica usada para obtenção dessa informação é designada por *interferometria radar* (InSAR ou IfSAR) e baseia-se numa aquisição simultâneas de imagens RADAR por dois receptores.

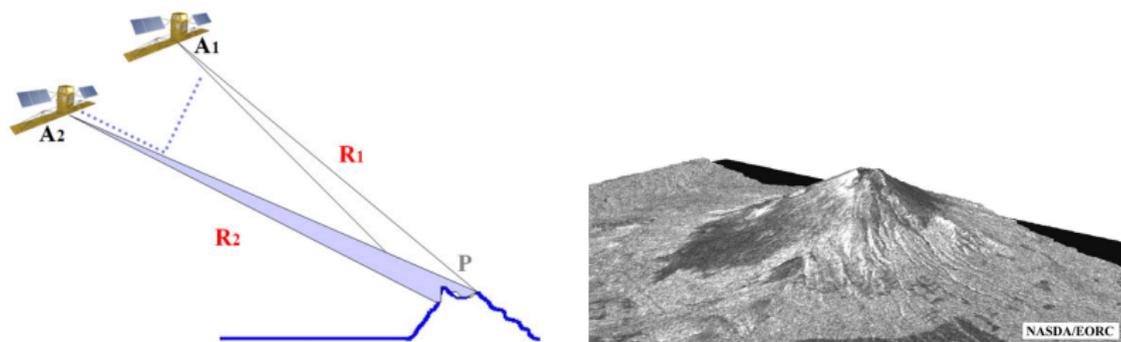


Figura: São necessários dois sinais simultâneos de RADAR para obter uma medição precisa da diferença entre as distâncias R_1 e R_2 por forma a poder derivar a elevação do ponto P. Na figura da direita está representado o modelo digital de elevações resultante: os erros podem ser inferiores a 1m.
<http://mundogeo.com/> e <http://www.eorc.jaxa.jp/>, 23.04.2012.

Modelos digitais de elevações globais obtidos por RADAR

- **SRTM** (2000). A missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) foi realizada através de um *shuttle* transportando duas antenas. O modelo digital de superfície resultante tem resolução espacial de 90m (30m nos EUA) e uma precisão altimétrica de 16 m (com 90% de confiança).
- **ASTER-GDEM** versão 1 (2009) e versão 2 (2011). Embora a resolução espacial nominal do modelo digital de elevações ASTER seja de 30m a resolução real é considerada semelhante à do modelo SRTM.
- **ACE2** (EAPRS/ESA): combina o modelo digital da superfície SRTM com outras medições de altímetros para originar um modelo digital de elevações (removendo o efeito das copas das árvores no SRTM).
- **GMTED2010** (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010): produto de resolução entre aproximadamente 250m e 1000m.

Obtenção de dados pelo SRTM

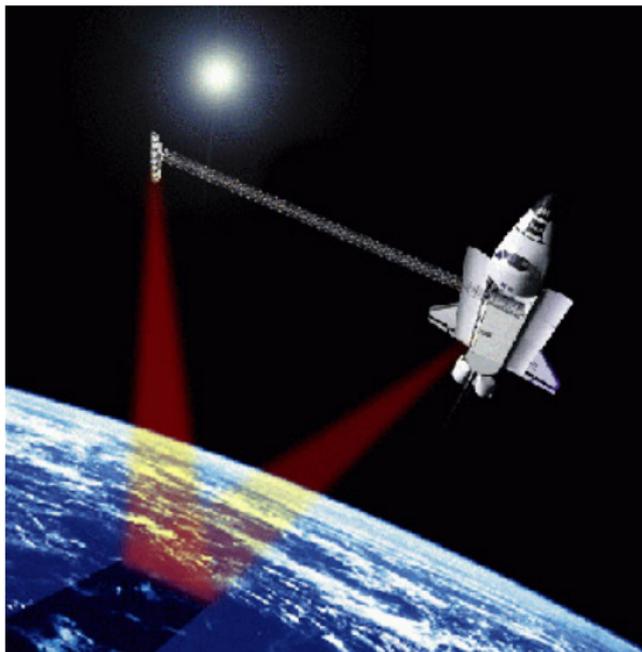


Figura: A missão SRTM foi realizada através de um *shuttle* transportando duas antenas distantes de 60m para obter os dados necessários à aplicação da técnica de interferometria radar.

Algumas áreas de aplicações de imagens radar

- Altimetria e topografia;
- Agricultura: monitorização de culturas, estimativas de produção;
- Floresta: quantidade de biomassa, incêndios;
- Controlo de tráfego marítimo e de poluição marítima (exemplo: marés negras);
- Aplicações militares: reconhecimento, vigilância
- Produção de cartas temáticas: geológicas, uso do solo;
- Cartografia de zonas húmidas;
- Gelos nos oceanos: detecção de icebergs, monitorização das superfícies geladas.

Alguns programas de imagens radar

- ERS SAR: ERS-1 (1991); ERS-2 (1995)
- JERS SAR: JERS-1 (1992);
- RADARSAT: RADARSAT-1 (1995); RADARSAT-2 (2006)
- Shuttle Imaging radar (SIR): 1981, 1984 (SIR-A e SIR-B); SIR-C: primeiro sensor espacial de multifrequência e multipolarização;
- Envisat (2002): ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar);
- TerraSAR-X (2008);

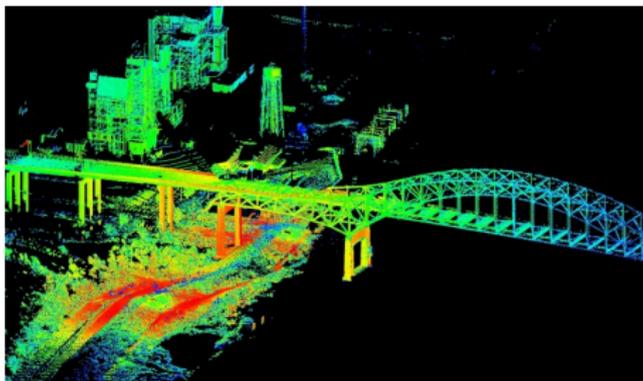
O LIDAR (*Light Detection and Ranging*) é tecnologia semelhante ao RADAR com duas diferenças principais:

- O LIDAR usa radiação da região do visível ou do infravermelho próximo em vez de radiação das gamas do RADAR que correspondem a maiores comprimentos de onda. Por isso o LIDAR consegue detectar **objectos de menor dimensão** (incluindo partículas atmosféricas e aerossóis) do que os objectos detectados por RADAR. Em contrapartida, os sistemas de LIDAR **apenas podem operar abaixo das nuvens ou em condições de céu limpo**, podendo — como os sistemas RADAR— obter informação de dia ou de noite.
- O LIDAR observa a superfície essencialmente na vertical ao contrário da observação oblíqua dos sistemas de RADAR, o que permite **uma melhor penetração do sinal através do coberto do solo**.

Altímetros LIDAR

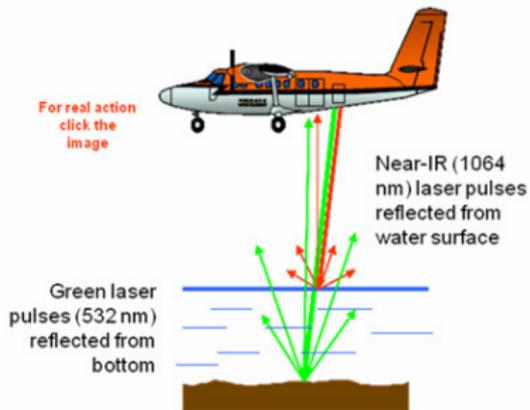
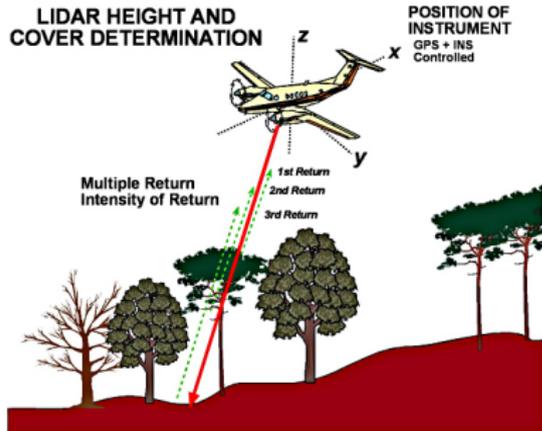
Tal como o RADAR, o LIDAR mede o intervalo de tempo entre a transmissão de um impulso e a detecção do sinal reflectido pela superfície.

O tecnologia LIDAR permite a obtenção de uma grande quantidade de informação sobre a localização 3D de materiais à superfície.



Altímetros LIDAR

A tecnologia LIDAR permite obter medições de distâncias para diversos níveis de profundidade no coberto, permitindo assim a elaboração de **perfis verticais**.



Aplicação de imagens LIDAR em cobertos naturais

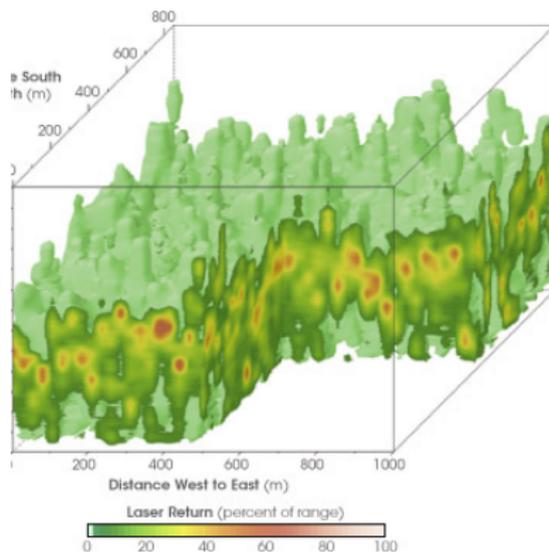


Figura: Estrutura de floresta tropical (Costa Rica) determinada a partir de imagens LIDAR. A quantidade de sinal reflectido para cada elevação é proporcional à densidade do copado e sub-copado.

<http://earthobservatory.nasa.gov/>, 15.05.2012.

Resolução e resposta de altímetros LIDAR

Dependendo da altura da plataforma e da tecnologia usada, a resolução de sensores LIDAR varia. A resposta pode ser um sinal contínuo (distribuição de distâncias) ou um sinal discreto (nuvem de pontos).

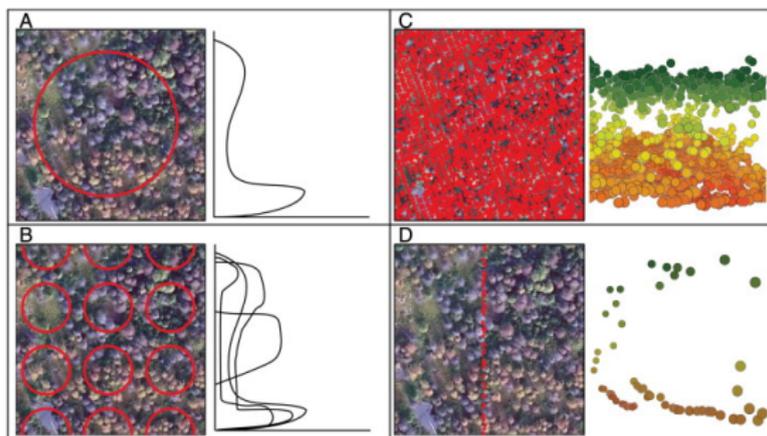
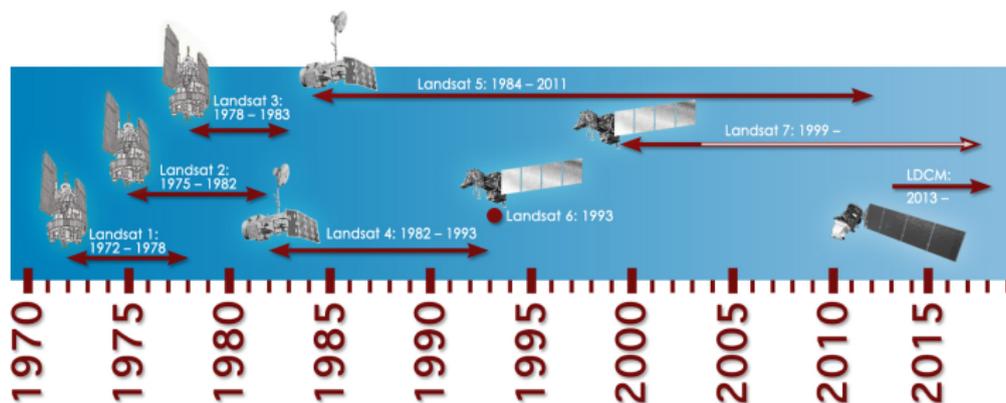


Figura: Várias observações LIDAR sobre uma zona florestal. (A) e (B) têm uma resolução de 60m e 20m e uma resposta contínua (perfil de vegetação); (C) e (D) têm menor resolução espacial e uma resposta discreta que consiste numa nuvem de pontos de coordenadas (x,y,z). RSE 121 (2012) 196–209

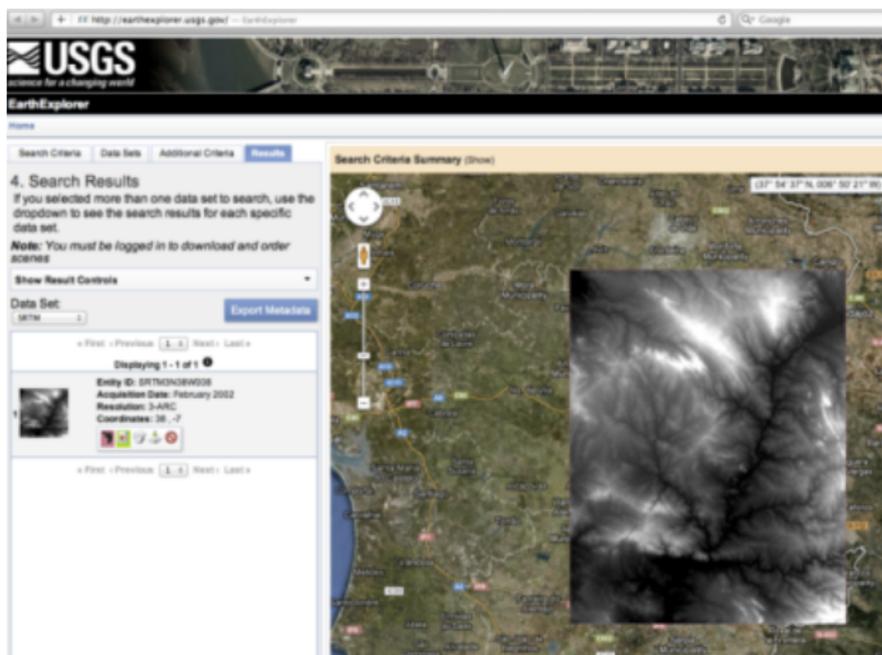
Acesso a dados de satélite

Existem diversos sites onde podem ser descarregados dados de satélite gratuitamente como, por exemplo, o site EarthExplorer <http://earthexplorer.usgs.gov/> que disponibiliza, entre outras, imagens Landsat e modelos digitais de elevação (SRTM, Aster Global DEM, GMTED2010, entre muitos outros conjuntos de dados. Em particular é possível aceder a longas séries temporais de imagens como a dos satélites Landsat.



Acesso a dados de satélite

No site basta indicar a região de interesse, as datas e o tipo de produto (satélite, sensor) para poder requisitar as imagens para serem descarregadas.



The screenshot shows the USGS EarthExplorer interface. At the top, there is a search bar and navigation tabs for 'Search Criteria', 'Data Sets', 'Additional Criteria', and 'Results'. The main content area displays '4. Search Results' with a note: 'If you selected more than one data set to search, use the dropdown to see the search results for each specific data set.' Below this, there is a 'Data Set:' dropdown menu set to 'SRTM' and an 'Export Metadata' button. A search result is shown with a thumbnail image and the following details: Entity ID: SRTM01N02020, Acquisition Date: February 2002, Resolution: 3-ARC, and Coordinates: 38, -7. To the right of the search results is a 'Search Criteria Summary (Show)' section with a map view. The map shows a geographical area with a large, semi-transparent SRTM elevation model overlay. The USGS logo and 'EarthExplorer' text are visible in the top left corner of the browser window.

Figura: Pesquisa do modelo digital de elevações da superfície SRTM.

Acesso a dados de satélite: produtos MODIS

Estão disponíveis diversos produtos MODIS à escala global.

MOD44W	Terra	Land Water Mask Derived	Tile	250m	none
MOD11_L2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Swath	1000m	5 Min
MYD11_L2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Swath	1000m	5 Min
MOD11A1	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	Daily
MYD11A1	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	Daily
MOD11A2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	8 Day
MYD11A2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	8 Day
MOD11B1	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	6000m	Daily
MYD11B1	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	6000m	Daily
MOD11C1	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Daily
MYD11C1	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Daily
MOD11C2	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	8 Day
MYD11C2	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	8 Day
MOD11C3	Terra	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Monthly
MYD11C3	Aqua	Land Surface Temperature & Emissivity	CMG	5600m	Monthly

MOD13A1	Terra	Vegetation Indices	Tile	500m	16 Day
MYD13A1	Aqua	Vegetation Indices	Tile	500m	16 Day
MOD13A2	Terra	Vegetation Indices	Tile	1000m	16 Day
MYD13A2	Aqua	Vegetation Indices	Tile	1000m	16 Day
MOD13Q1	Terra	Vegetation Indices	Tile	250m	16 Day
MYD13Q1	Aqua	Vegetation Indices	Tile	250m	16 Day
MOD13A3	Terra	Vegetation Indices	Tile	1000m	Monthly
MYD13A3	Aqua	Vegetation Indices	Tile	1000m	Monthly
MOD13C1	Terra	Vegetation Indices	CMG	5600m	16 Day
MYD13C1	Aqua	Vegetation Indices	CMG	5600m	16 Day
MOD13C2	Terra	Vegetation Indices	CMG	5600m	Monthly
MYD13C2	Aqua	Vegetation Indices	CMG	5600m	Monthly

Figura: Temperatura à superfície e emissividade, índices de vegetação.

Acesso a dados de satélite: produtos MODIS (cont.)

MCD45A1	Combined	Burned Area	Tile	500m	Monthly
MOD09GA	Terra	Surface Reflectance Bands 1-7	Tile	500/1000m	Daily
MYD09GA	Aqua	Surface Reflectance Bands 1-7	Tile	500/1000m	Daily
MOD09GQ	Terra	Surface Reflectance Bands 1-2	Tile	250m	Daily
MYD09GQ	Aqua	Surface Reflectance Bands 1-2	Tile	250m	Daily
MOD09CMG	Terra	Surface Reflectance Bands 1-7	CMG	5600m	Daily
MYD09CMG	Aqua	Surface Reflectance Bands 1-7	CMG	5600m	Daily
MOD09A1	Terra	Surface Reflectance Bands 1-7	Tile	500m	8 Day
MYD09A1	Aqua	Surface Reflectance Bands 1-7	Tile	500m	8 Day
MOD09Q1	Terra	Surface Reflectance Bands 1-2	Tile	250m	8 Day
MYD09Q1	Aqua	Surface Reflectance Bands 1-2	Tile	250m	8 Day

MCD43A3	Combined	Albedo	Tile	500m	16 Day
MCD43B3	Combined	Albedo	Tile	1000m	16 Day
MCD43C3	Combined	Albedo	CMG	5600m	16 Day
MCD43A1	Combined	BRDF-Albedo Model Parameters	Tile	500m	16 Day
MCD43B1	Combined	BRDF-Albedo Model Parameters	Tile	1000m	16 Day
MCD43C1	Combined	BRDF-Albedo Model Parameters	CMG	5600m	16 Day
MCD43A2	Combined	BRDF-Albedo Quality	Tile	500m	16 Day
MCD43B2	Combined	BRDF-Albedo Quality	Tile	1000m	16 Day
MCD43C2	Combined	BRDF-Albedo Snow-free Quality	CMG	5600m	16 Day
MCD43A4	Combined	Nadir BRDF-Adjusted Reflectance	Tile	500m	16 Day
MCD43B4	Combined	Nadir BRDF-Adjusted Reflectance	Tile	1000m	16 Day
MCD43C4	Combined	Nadir BRDF-Adjusted Reflectance	CMG	5600m	16 Day

MCD12Q1	Combined	Land Cover Type	Tile	500m	Yearly
MOD12Q2	Terra	Land Cover Dynamics	Tile	1000 m	Yearly
MCD12Q2	Combined	Land Cover Dynamics	Tile	500 m	Yearly
MCD12C1	Combined	Land Cover Type	CMG	5600m	Yearly
MOD44B	Terra	Vegetation Continuous Fields	Tile	250m	Yearly

MOD14	Terra	Thermal Anomalies & Fire	Swath	1000m	5 Min
MYD14	Aqua	Thermal Anomalies & Fire	Swath	1000m	5 Min
MOD14A1	Terra	Thermal Anomalies & Fire	Tile	1000m	Daily
MYD14A1	Aqua	Thermal Anomalies & Fire	Tile	1000m	Daily
MOD14A2	Terra	Thermal Anomalies & Fire	Tile	1000m	8 Day
MYD14A2	Aqua	Thermal Anomalies & Fire	Tile	1000m	8 Day
MCD15A2	Combined	Leaf Area Index - FPAR	Tile	1000m	8 Day
MOD15A2	Terra	Leaf Area Index - FPAR	Tile	1000m	8 Day
MYD15A2	Aqua	Leaf Area Index - FPAR	Tile	1000m	8 Day
MCD15A3	Combined	Leaf Area Index - FPAR	Tile	1000m	4 Day
MOD17A3	Terra	Gross Primary Productivity	Tile	1000m	Yearly
MOD17A2	Terra	Gross Primary Productivity	Tile	1000m	8 Day
MYD17A2	Aqua	Gross Primary Productivity	Tile	1000m	8 Day

Figura: Produtos de reflectância, áreas ardidas e fogos activos, albedo, BRDF, coberto, índice de área foliar, produtividade primária.

1 Fundamentos de Detecção Remota

2 Pré-processamento de imagens de detectores ópticos e determinação de grandezas físicas da superfície

- Estimação de reflectâncias à superfície
- Estimação da temperatura da superfície a partir da banda térmica
- Correções geométricas de imagens de satélite

3 Sistemas de Detecção Remota

- Sensores passivos: detectores ópticos e detectores térmicos
- Sistemas activos: RADAR e LIDAR

4 Representação de imagens multiespectrais

Composição colorida de imagens multiespectrais

É uma associação de três bandas espectrais aos canais RGB de uma imagem colorida.

- a composição é em **cor verdadeira** quando os canais correspondem às regiões espectrais da radiação visível respectivamente do vermelho, verde e azul. Por exemplo, uma composição RGB=321 para o sensor Landsat 5 TM.
- a composição é em **falsa cor** caso contrário. As composições coloridas em falsa cor podem representar informação espectral do infravermelho. Exemplos: composições RGB=432 ou RGB=742 do sensor Landsat 5 TM.

Interpretação de uma composição colorida em falsa cor

Na composição RGB=(IVP,Vermelho,Verde), as cores obtidas tem em geral a seguinte interpretação: **vermelho-magenta** – vegetação vigorosa; **rosa** – vegetação mais esparsa ou com menor vigor vegetativo; **branco** – areia, solo descoberto, pedreiras; **azul escuro ou negro** – água ou estradas recentemente alcatroadas; **cinzento e azul metálico** – zonas urbanas; **castanho** – pastagens pobres e matos esparsos; **bege** – zonas de transição.

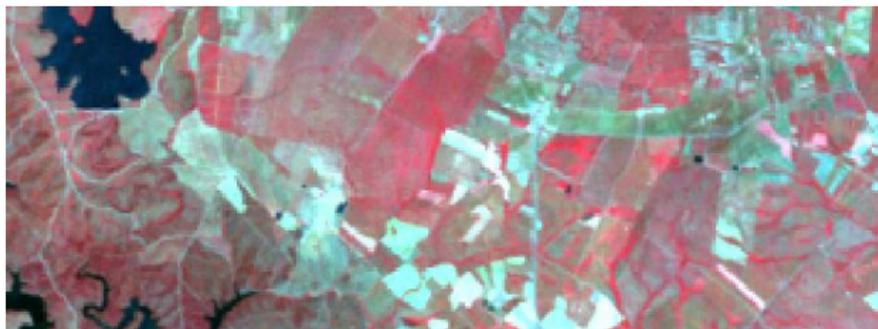
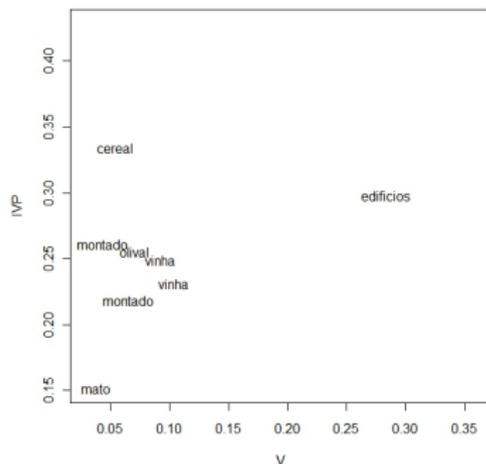


Figura: Composição colorida RGB=432 derivada de imagens de reflectância para as bandas do sensor Landsat 5 TM. Reguengos de Monsaraz, 20/05/2010.

Representação dos pixels no espaço espectral das bandas do vermelho e do infravermelho próximo

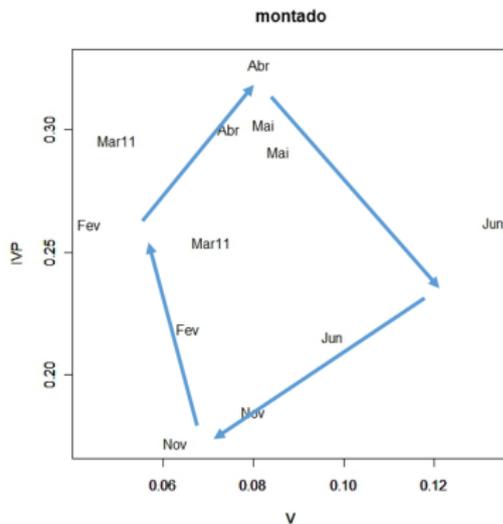
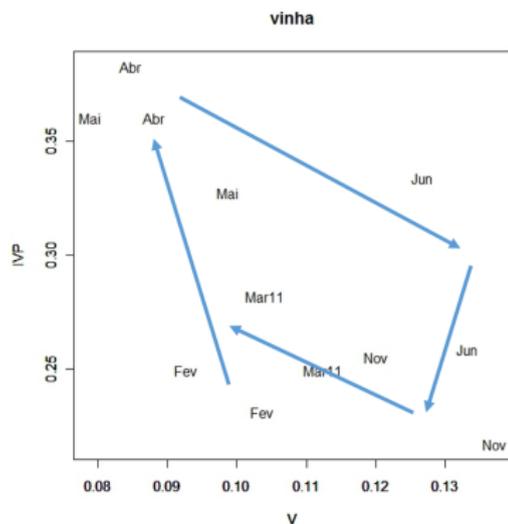
A generalidade dos satélites de observação da terra adquirem informação espectral nas regiões do **vermelho** (aproximadamente $0.6 - 0.7 \mu\text{m}$) e na região do **infravermelho próximo** (aproximadamente $0.7 - 1.3 \mu\text{m}$) pois essas duas bandas fornecem muito informação sobre as materiais que ocorrem à superfície.

Representação das assinaturas espectrais de um conjunto de pixels correspondentes a diferentes ocupações do solo no plano V/IVP. Reguengos de Monsaraz, 20/05/2010.



Evolução do padrão V/IVP ao longo do tempo

Os dados de satélite têm em geral uma boa resolução temporal. Por isso, é possível essas imagens para monitorizar a evolução de culturas ao longo do ciclo vegetativo.



Nas figuras acima observa-se a evolução das reflectâncias nas duas bandas ao longo do período entre Fevereiro de 2010 e Março de 2011 para dois pixels de cada tipo de coberto.

O índice NDVI (*normalized difference vegetation index*)

Este índice é de utilização generalizada e é definido por

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IVP} - \text{V}}{\text{IVP} + \text{V}},$$

em que IVP e V são, respectivamente, as reflectâncias na região do infravermelho próximo e do vermelho.

Propriedades do índice NDVI:

- Se $\text{NDVI} = k$ então $\text{IVP} = \frac{-k-1}{k-1} \text{V}$ (a curva de nível é radial no plano V/IVP);
- NDVI toma sempre um valor entre -1 e 1 ;
- O valor de NDVI é muito instável quando $\text{V} + \text{IVP}$ está próximo de 0 (NDVI não está definido quando $\text{V} = \text{IVP} = 0$);
- Se se multiplicar V e IVP pela mesma constante, NDVI não é alterado.

Ilustração dos valores de NDVI no plano V/IVP

A figura mostra assinaturas espectrais em V/IVP para alguns tipos de coberto e diversas datas (as letras maiores correspondem a datas na primavera).

As rectas indicam valores constantes de NDVI. Note-se que valores negativos de NDVI são pouco comuns. Alguns autores sugerem que valores de NDVI superiores a 0.5 correspondem a um coberto vegetal denso.

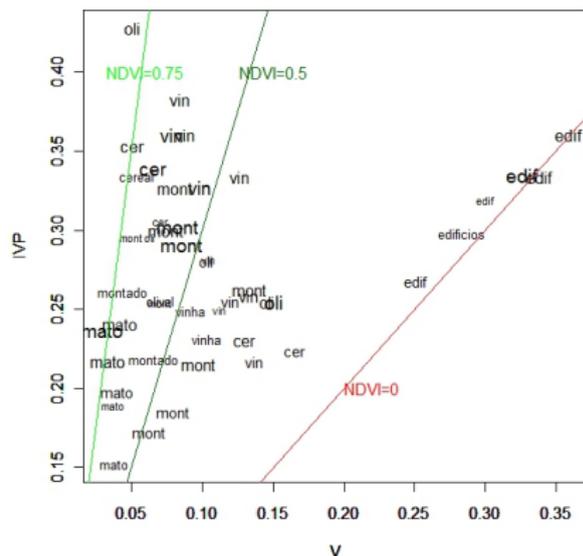
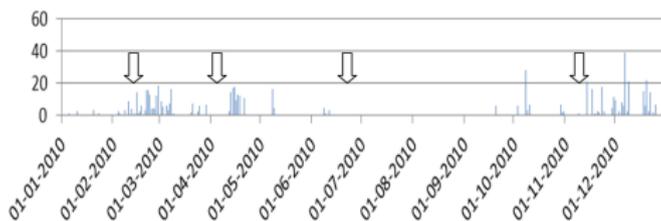
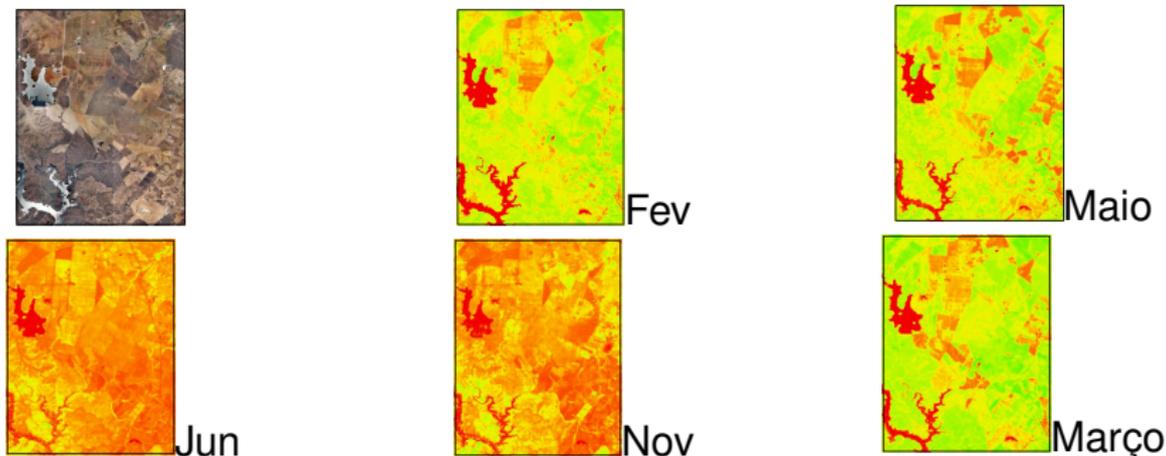


Ilustração da evolução do NDVI ao longo do ano: Reguengos de Monsaraz, de Fevereiro de 2010 a Março de 2011



Vermelho representa NDVI=0 e verde indica valores de NDVI próximos de 1. O gráfico de barras indica a precipitação em 2010 na região.

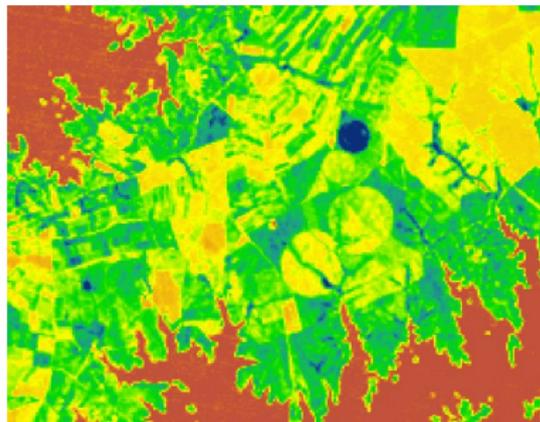
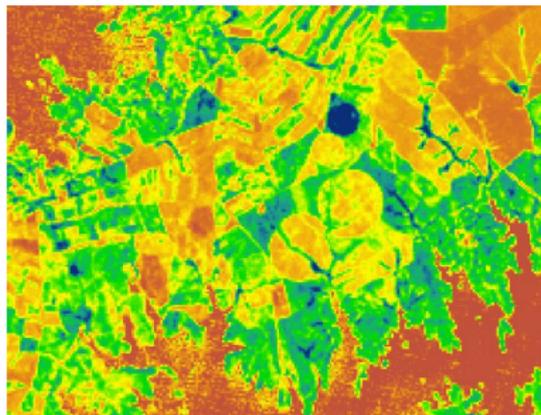
Exercício

As assinaturas espectrais $a = (.15, .16, .20, .25, .23, .25)$, $b = (.08, .12, .10, .32, .25, .22)$ correspondem às reflectâncias nas bandas 1, 2, 3 (visível), 4 (IVP), e 5 e 7 (infravermelho médio) de dois pixels de uma imagem Landsat TM do final do verão de uma região onde existe pinhal, matos esparsos e culturas anuais de sequeiro.

- 1 Qual das assinaturas espectrais deverá corresponder a uma parcela de terreno coberta pela cultura anual de sequeiro e qual deverá corresponder a uma parcela de pinhal? Justifique.
- 2 Suponha que constrói uma composição colorida em falsa cor (RGB=742) da imagem. Qual das assinaturas espectrais terá uma cor mais verde na composição colorida? Justifique.
- 3 Determine os valores do índice de vegetação NDVI para as assinaturas a e b .

Exercício

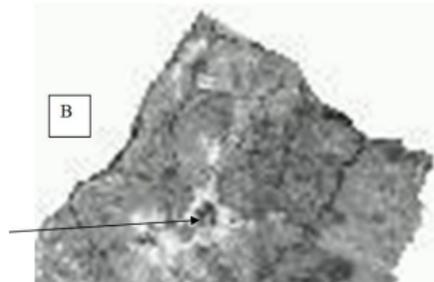
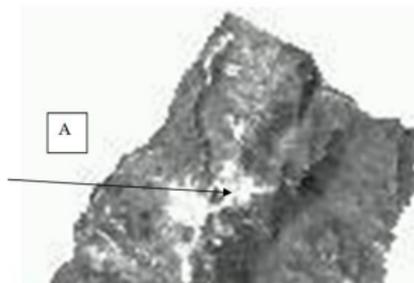
As seguintes imagens correspondem à razão $\frac{IVP-V}{IVP+V}$. Numa das imagens, IVP e V correspondem aos **números digitais** nas bandas originais do sensor (números digitais) e na outra correspondem a **reflectâncias**. As zonas mais vermelhas na imagem são zonas inundadas. Indique, justificando, a correspondência correcta.



Exercício

A imagem A abaixo representa os valores de números digitais no IVP para uma região montanhosa em Portugal (no verão). A imagem B representa a razão $\frac{IVP-V}{IVP+V}$ em que V e IVP são os números digitais das bandas respectivas para a mesma região.

- 1 Que tipo de ocupação do solo poderá ocorrer na região assinalada nas imagens (com valores elevados em A e valores baixos em B)? Justifique.
- 2 Na imagem B o efeito do relevo é mais atenuado do que na imagem A. Como explica esse facto?



Classificação automática de imagens multiespectrais e cartas de ocupação do solo

Cada pixel de uma imagem espectral tem uma assinatura espectral e por isso pode ser representado como um ponto no **espaço das bandas espectrais**.

Por exemplo, o pixel do exercício anterior com assinatura (.08, .12, .10, .32, .25, .22) pode ser representado num espaço de dimensão 6: as reflectâncias nas 6 bandas do sensor.

Os pixels da imagem formam então uma nuvem de pontos nesse espaço. É natural aceitar que pixels correspondentes à mesma ocupação do solo no terreno se agrupem nesse espaço multidimensional.

Existem diversas técnicas para procurar no espaço das bandas do sensor conjuntos de pixels que pertencem à mesma **classe** de ocupação de solo. A afectação de pixels a classes origina uma **carta de ocupação do solo**.

Classificação pela técnica da média mais próxima

Há uma grande diversidade de técnicas de classificação (ou de reconhecimento de padrões) que se dividem normalmente em dois grupos:

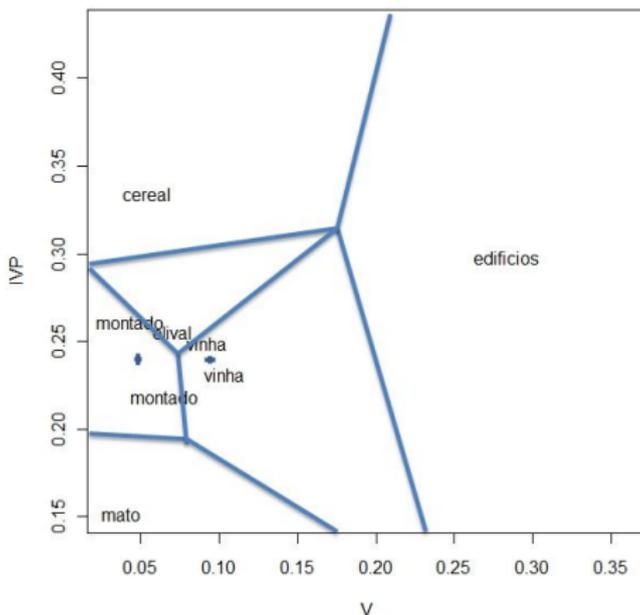
- **classificação assistida**, quando as classes são definidas à partida e é conhecida a classificação de uma amostra de pixels;
- **agrupamento**, quando é a própria classificação que define as classes.

Um das técnicas de classificação assistida mais simples, conhecida por “distância mínima às médias” consiste em calcular para cada pixel a diferença entre a sua assinatura espectral e a **assinatura espectral média de cada classe** e associar o pixel à classe cuja assinatura espectral média é mais próxima.

Para aplicar essa técnica é necessário dispor de uma **amostra representativa de pixels das classes** para poder calcular a assinatura espectral média na classe.

Exemplo

Para duas bandas, é fácil entender como é que os pixels são associados a cada classe. Na figura abaixo mostra-se como o espaço das assinaturas espectrais é dividido em regiões, cada qual associada a uma classe de ocupação do solo.



Exercício

O seguintes quadros descrevem algumas características de dois sensores a bordo do satélite Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission) lançado em 2013 e cujos dados ficaram disponíveis para os utilizadores em 30 de Maio 2013. A coluna “swath width” indica a largura da imagem captada ao longo do órbita do satélite.

Band	Wavelength (μm)	Bandwidth (μm)	Resolution (m)	Swath width (km)	Revisit time (days)
Band 1 Coastal/Aerosol (Other)	0.43 to 0.45		30	185	
Band 2 Blue (VIS)	0.45 to 0.51		30	185	
Band 3 Green (VIS)	0.53 to 0.59		30	185	
Band 4 Red (VIS)	0.64 to 0.67		30	185	
Band 5 Near Infrared (NIR)	0.85 to 0.88		30	185	
Band 6 SWIR 1 (SWIR)	1.57 to 1.65		30	185	
Band 7 SWIR 2 (SWIR)	2.11 to 2.29		30	185	
Band 8 Panchromatic (Other)	0.5 to 0.68		15	185	
Band 9 Cirrus (Other)	1.36 to 1.38		30	185	

Band	Wavelength (μm)	Bandwidth (μm)	Resolution (m)	Swath width (km)	Revisit time (days)
Band 10 TIR 1 (TIR)	10.6 to 11.19		100	185	
Band 11 TIR 2 (TIR)	11.5 to 12.51		100	185	

Exercício (cont.)

- Descreva de forma completa, referindo-se às tabelas, a resolução espectral de cada um dos sensores. A qual dos dois sensores corresponde o termo “detector óptico”?
- Sabendo que a irradiância espectral no topo da atmosfera é em média de $1031 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ para a banda 5, que a transmitância atmosférica na direcção do sol é 0.91 e que a irradiância difusa à superfície é nula para essa banda, estime a irradiância *não espectral* à superfície para a banda 5 (indique as unidades na resposta).
- Indique, justificando, que bandas do sensor deveria usar se o objectivo da análise dos dados sobre uma determinada área rural fosse: (1) Construir, por digitalização sobre a imagem, um cdg com a localização de edifícios; (2) Monitorizar a temperatura do solo.

Exercício (cont.)

- Considere uma região com ocupação do solo que pode ser eucaliptal ou então zonas de solo descoberto. Suponha que as assinaturas espectrais de dois pixels da imagem para as bandas 3, 4, 5, 6, e 7 (por essa ordem) são $A=(0.16,0.20,0.26,0.26,0.27)$ e $B=(0.13,0.12,0.33,0.25,0.22)$. Determine o índice de vegetação NDVI para cada um dos pixels e indique o tipo de ocupação do solo que deverá corresponder a cada um deles.
- Sabendo que a altitude do satélite é de 705km, determine o campo de visão (FOV) e o campo de visão instantâneo (IFOV) para a banda 8 do sensor. Qual é dimensão aproximada no terreno correspondente um pixel da margem da largura da imagem na banda 8? (considere para a aproximação pretendida que a superfície da Terra é plana). Justifique as suas respostas com os cálculos necessários e indique as unidades.