Elementos de apoio às aulas de Detecção Remota

Primeiro Ciclo do ISA

Manuel Campagnolo
ISA, 2012

(última actualização: Maio de 2014)

Conteúdo

1 Fundamentos de detecção remota **5**

1.1 Radiação electromagnética 5
1.2 Geometria de iluminação e de observação 8
1.3 Grandezas radiométricas 16
1.4 Regiões do espectro electromagnético 18
1.5 Assinaturas espectrais 23
1.6 Efeito da atmosfera 28

2 Sistemas de detecção remota **33**

2.1 Satélites geossíncronos e heliossíncronos 34
2.2 Sensores passivos 34
2.3 Tipos de resolução para sensores passivos 39
2.4 Breve apresentação de sistemas activos de detecção remota . . 45
2.5 Exercícios 51

3 Pré-processamento de imagens de sensores passivos e determinação de grandezas físicas da superfície **61**

3.1 Correcções geométricas 62
3.2 Correcções radiométricas e estimação de reflectâncias à superfície 74
3.3 Estimação da temperatura da superfície 80
3.4 Exercícios 86

4 Interpretação de imagens multiespectrais **93**

4.1 Composições coloridas 94
4.2 Representação dos pixels no espaço espectral das bandas do vermelho e do infravermelho próximo 95
4.3 Índices de vegetação 97

4.4 Classificação automática de imagens multiespectrais e cartas de ocupação do solo 100
4.5 Exercícios 101

5 Exercícios resolvidos **105**

Referências bibliográficas **122**

Capítulo 1

Fundamentos de detecção remota

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 [4, 5, 7]. Contudo, detecção remota envolve em geral informação que pode ser representada por um conjunto de valores de pixels de uma imagem e que pode ser processada digitalmente. Tipicamente, 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.

1.1 Radiação electromagnética

□ *Os sistemas de detecção remota medem radiação electromagnética. Nesta secção recordam-se algumas leis fundamentais que descrevem como a radiação depende do comprimento de onda, da temperatura e da emissividade. Recorda-se igualmente que a radiação que incide sobre um material pode ser refectida, absorvida ou transmitida. Essas relações são fundamentais para poder interpretar o sinal captado pelos sistemas de detecção remota. (Cf. UC de Climatologia e Recursos Hídricos/AP, UC de Climatologia e Agrometeorologia/EngAgrFloAmb, UC de Métodos e Processos de Medição/EngAmb)*

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 a própria superfície.

A transmissão de energia pode ser feita 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) e radiação electromagnética [4]. Em detecção remota, esta última é a forma de transmissão de energia mais relevante.

A radiação electromagnética é simultaneamente de natureza ondulatória e de natureza corpuscular. As ondas electromagnéticas são periódicas e propagam-se no vácuo à velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \,\mathrm{m\,s^{-1}}$). As ondas são caracterizadas pela sua frequência ν (ciclos por segundo ou hertz, Hz) ou pelo comprimento de onda λ que é normalmente medido em nanómetros ($1\mathrm{nm} = 10^{-9}\mathrm{m}$) ou micrómetros ($1\mu\mathrm{m} = 1000\mathrm{nm} = 10^{-6}\mathrm{m}$), sendo a relação entre essas grandezas dada por

$$c = \lambda\,\eta.$$

A radiação electromagnética também é interpretada como uma sucessão de fotões (ou quanta). Fotões são emitidos sempre que um sistema transita de um estado de maior energia para um estado de menor energia. A energia transportada por um fotão e a frequência da correspondente onda electromagnética estão relacionados por

$$Q = h\,\nu \quad \text{ou} \quad Q = \frac{h\,c}{\lambda}, \tag{1.1}$$

em que Q é a energia (em joules, J), e $h = 6.626 \times 10^{-34}\mathrm{J\,s}$ é a constante de Planck, o que significa que a energia transportada diminui com o aumento do comprimento de onda da radiação.[1]

Todos os objectos (como por exemplo o sol) com temperatura superior ao zero absoluto ($0\ ^oK = -273\ ^oC$) emitem energia. Quanto mais quente for o objecto maior é a quantidade de energia gerada. A principal fonte de energia para detecção remota do globo terrestre é por essa razão o sol. O fluxo da radiação emitida por um corpo negro a uma temperatura T e para

[1] A unidade SI para *energia* é o joule (J). A *potência* é o fluxo de energia por unidade de tempo e é medido em watts $\mathrm{W} = Js^{-1}$. Por exemplo, uma lâmpada "de 100W" tem uma *potência* de 100W; a *energia* que consome durante uma hora é 100Wh = 0.1kWh = 360kJ (pois J=Ws).

um comprimento de onda (λ) é descrito pela Lei de Planck.

$$M(T,\lambda) = \frac{2\,\pi\,h\,c^2}{\lambda^5\,[\exp(\frac{h\,c}{\lambda\,k\,T}) - 1]} \quad (\mathrm{W\,m^{-2}}\mu\mathrm{m^{-1}}), \tag{1.2}$$

em que T é a temperatura absoluta em graus Kelvin (K), h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz, e $k = 1.3806488 \times 10^{-23}\mathrm{J\,K^{-1}}$ é a constante de Boltzmann.

Integrando $M(T,\lambda)$ relativamente a λ para a totalidade do espectro obtém-se a expressão do fluxo de energia emitida por um corpo negro,

$$M_n = s\,T^4 \quad (\mathrm{W\,m^{-2}}),$$

em que $s = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$ é a constante de Stefan-Boltzmann. O comprimento de onda dominante da radiação emitida é dado pela Lei de Wien,

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

em que $k = 2898\,\mu\mathrm{m\,K}$. Esses dois aspectos de dependência da radiação com a temperatura absoluta do corpo que a emite são ilustrados pela Figura 1.1, que descreve como o comprimento de onda dominante e a emitância dependem do comprimento de onda da radiação. A Tabela 1.1 mostra os valores de $\lambda_{\max}$ que resultam da aplicação da Lei de Wien a algumas superfícies.

Os objectos reais não se comportam no entanto como corpos negros. Define-se emissividade ε como a razão entre radiação emitida pelo objecto e a radiação emitida por um corpo negro a igual temperatura. A emissividade varia entre 0 (corpo branco) e 1 (corpo negro) e é uma função do comprimento de onda.[2] Para materiais reais (não correspondendo à definição teórica de corpo negro) a emissividade é portanto inferior a 1 e depende do material é superfície. Na Tabela 1.2 são indicados alguns valores de emissividade para comprimentos de onda da região espectral do infravermelho térmico (ver Secção 1.4) em função do tipo de coberto e da estação do ano.

Cada material afecta de forma diferente a radiação incidente. A radiação incidente pode ser reflectida, absorvida ou transmitida como ilustrado na Figura 1.2. As proporções da energia incidente que é respectivamente reflectida

[2] A Lei de Kirchhoff de radiação térmica que estabelece que "Em equilíbrio térmico, a emissividade de um corpo (ou superfície) é igual é sua absortância" implica que a emissividade é igual ou inferior a 1.

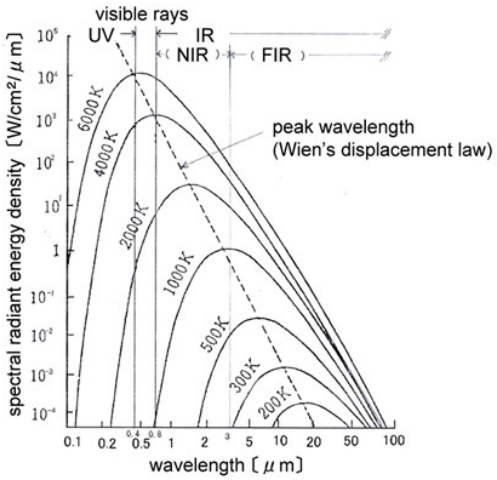


Figura 1.1: Ilustração da Lei de Wien. O eixo das ordenadas é logaritmico e representa o fluxo de energia radiante espectral. O pico de cada curva corresponde a $\lambda_{\max}$ (μm) e varia com a temperatura. `http://www.enseki.or.jp/e_tokusei.html`, 15.04.2011.

em qualquer direcção, absorvida e transmitida designam-se por reflectância (ρ), absortância (α) e transmitância (τ), e são função do comprimento de onda. Para qualquer objecto e para qualquer comprimento de onda (λ) pode portanto escrever-se:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1. \tag{1.3}$$

Por exemplo, a componente reflectida pela clorofila na região de 0.5 a 0.6 μm (região espectral do verde) é superior à componente reflectida na região de 0.6 a 0.7 μm (região espectral do vermelho). Na Figura 1.3 ilustra-se como essa decomposição depende do comprimento de onda para folhas de soja.

1.2 Geometria de iluminação e de observação

□ *O sinal de um material depende da posição da fonte de radiação e da posição do sensor. Isso significa que o mesmo material tem sinais distintos para geometrias de iluminação e observação distintas. Se o material é um*

	Temperatura (K)	$\lambda_{\max}(\mu m)$
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

Tabela 1.1: Temperatura média e $\lambda_{\max}$ para alguns corpos.

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		
	10.8-11.3μm	11.8-12.3μm	Average	10.8-11.3μm	11.8-12.3μm	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

Tabela 1.2: Alguns valores típicos de emissividade nas bandas térmicas do sensor MODIS.

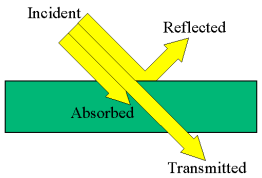


Figura 1.2: Ilustração da decomposição da radiação incidente, `http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/images/`, 8.06.2010.

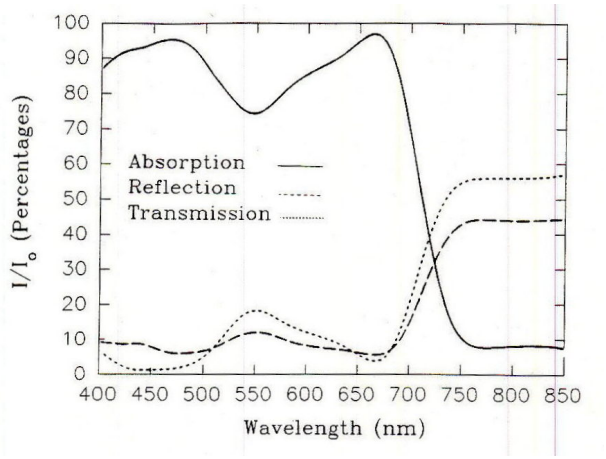


Figura 1.3: Decomposição da energia incidente em folhas de soja para diversos comprimentos de onda. `http://www.controlledenvironments.org/-Light1994Conf/1_1_Geiger/`, 8.06.2010.

reflector predominantemente lambertiano então a diferença é pequena. Caso contrário, é necessário dispôr de um modelo BRDF do material para se poder comparar as diferentes sinais obtidas em condições distintas. Nesta secção também se descreve o que são grandezas cónicas e hemisféricas.

Num dado lugar, define-se a *normal do lugar* (Z) como a direcção normal à superfície. A posição relativa da fonte de radiação incidente (por exemplo o sol) relativamente à normal do lugar é definida por dois ângulos. O *ângulo de incidência zenital* (θ_i) toma valores entre 0, quando a fonte de radiação está na direcção normal ao lugar, e $\frac{\pi}{2}$. O *ângulo de incidência azimutal* (ϕ_i) varia entre 0 e 2π, sendo 0 quando a fonte de radiação está a Norte e crescendo no sentido horário (ver Figura 1.4). A direcção de *visão* é dada pela posição relativa do observador (por exemplo o sensor instalado no satélite) relativamente à normal do lugar e é analogamente definida pelo *ângulo de observação zenital* (θ_v) e o *ângulo de observação azimutal* (ϕ_v).

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. A posição do sol relativamente a um ponto à superfície é definida *em relação ao zénite* nesse ponto e não à normal do lugar (a normal do lugar

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

Tabela 1.3: Alguns ângulos que descrevem a geometria de iluminação e de observação.

é usada para definir os ângulos θ_i, θ_v, ϕ_i e ϕ_v). A posição do sol é descrita pelo ângulo zenital solar θ_s e pelo ângulo azimutal solar ϕ_s. Adicionalmente, designa-se por *ângulo de elevação do sol* o ângulo $\frac{\pi}{2} - \theta_s$.

No caso particular em que o terreno é horizontal num dado lugar a direcção normal à superfície coincide com a direcção do zénite. Nesse caso, e se a radiação incidente é solar, verifica-se $\theta_i = \theta_s$ e $\phi_i = \phi_s$.

A Figura 1.5 ilustra os ângulos descritos acima quando a radiação incidente provém do sol e o observador é o sensor do satélite. Para além dos ângulos θ_i, θ_s, θ_v, ϕ_i, ϕ_s e ϕ_v, define-se também o ângulo de varrimento do sensor (*scan angle*) como o ângulo entre o nadir do sensor e a direcção de observação, ou seja o ângulo $\widehat{NSP}$ em que S é o sensor, N é o seu nadir, e P é o ponto no terreno que está a ser observado. A Tabela 1.3 resume os ângulos definidos acima.

O padrão espacial observado de reflectância de um material depende da geometria de iluminação, do comprimento de onda e da rugosidade da superfície, i.e. varia com a dimensão das partículas à superfície. Se o comprimento de onda da radiação for inferior às variações na rugosidade e à

dimensão das partículas da superfície reflectora, a reflexão é predominantemente difusa e o material é designado por reflector difuso ou lambertiano. No caso oposto, a superfície comporta-se como essencialmente como um "espelho" e o material é designado por reflector especular. Na Figura 1.6 ilustra-se o comportamento de uma reflexão especular e de uma reflexão difusa. A mesma figura também ilustra o efeito das partículas da superfície sobre a radiação. Por exemplo, uma superfície coberta por água na ausência de vento comporta-se predominantemente como um reflector especular, e um terreno mobilizado pode comportar-se predominantemente como um reflector lambertiano. No entanto, a maior parte dos materiais tem um comportamento intermédio.

A *função de distribuição de reflectância bidirecional* (BRDF) modela a distribuição da reflectância em função de duas direcções: a da fonte de radiação e a do observador. Por isso a BRDF é uma função de θ_i, ϕ_i, θ_v e ϕ_v como é ilustrado na Figura 1.7. Nessa figura, a posição do observador relativamente à posição do sol altera de forma evidente a resposta da superfície à radiação incidente. Adicionalmente a variação direccional da reflectância depende também do comprimento de onda, i.e. o padrão de distribuição espacial da reflectância depende da gama de comprimento de onda considerada (ver Secção 1.4).

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. Na prática, a radiação incidente provém de uma fonte não pontual e por isso a radiação incidente sobre um ponto no terreno preenche um cone com um ângulo sólido não nulo. O ângulo sólido é medido em esterradiano como ilustrado na Figura 1.8. Da mesma forma, o observador (por exemplo o sensor) também não é pontual e regista por isso a radiação contida num cone de ângulo sólido não nulo. Quando o cone tem ângulo sólido de 2π esterradianos (metade da esfera), a grandeza respectiva chama-se *hemisférica*. As condições em que as medições de refletância são realizadas na prática são designadas de cónica-cónica, hemisférica-cónica e hemisférica-hemisférica [9] (ver Figura 1.9). Embora a radiação directa seja bem modelada por grandezas cónicas estritas, para modelar a radiação difusa é necessário considerar grandezas hemisféricas.

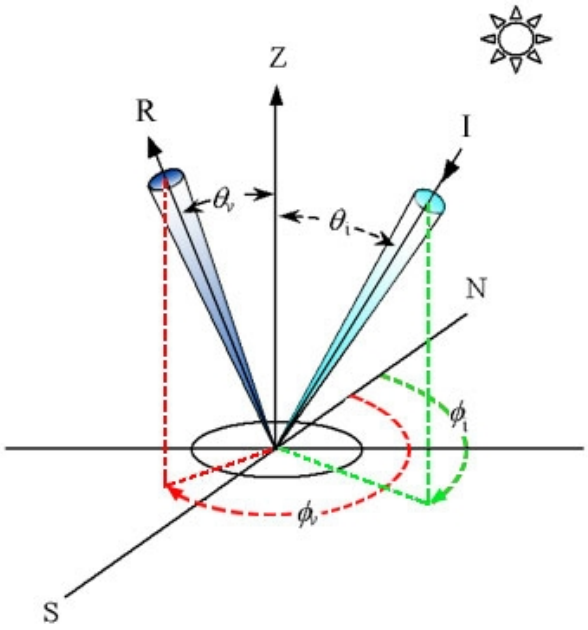


Figura 1.4: Ilustração dos ângulos de incidência θ_i e ϕ_i e dos ângulos de observação θ_v e ϕ_v. A direcção Z é normal é superfície reflectora. `http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/`, 07.04.2011.

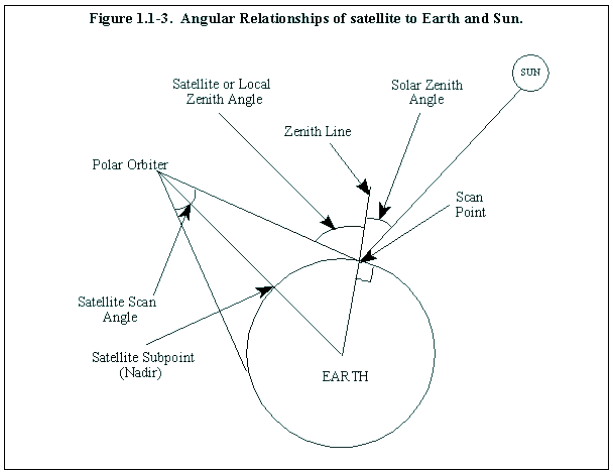


Figura 1.5: Ilutração dos ângulos envolvendo as verticais do lugar do sensor. `http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/`, 07.04.2011.

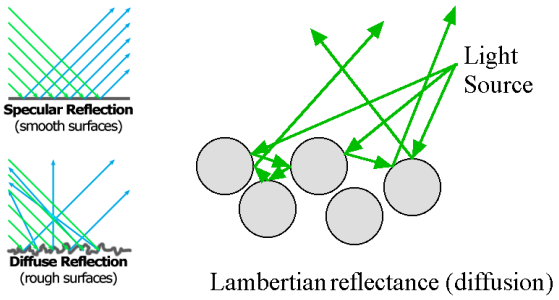


Figura 1.6: Ilustração de reflexão especular e de reflexão difusa (à esquerda) e do efeito da rugosidade da superfície na reflexão (à direita). `http://www.screentekinc.com/glossary/` e `http://nuweb2.neu.edu/-math/cp/blog/Reflectivity/` 3.06.2010

Figura 1.7: Efeito da posição do observador relativamente é posição da fonte de iluminação (sol). Na imagem da esquerda, o sol está atrás do observador e na imagem da direita o sol está à frente do observador. `http://www-modis.bu.edu/brdf/images/`, 03.06.2010

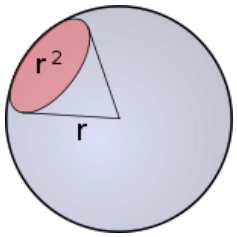


Figura 1.8: Um ângulo sólido de 1 esterradiano (1 sr) corresponde a um cone que delimita uma área r^2 na superfície de uma esfera de raio r. A esfera contêm $4\,\pi$ esterradianos.

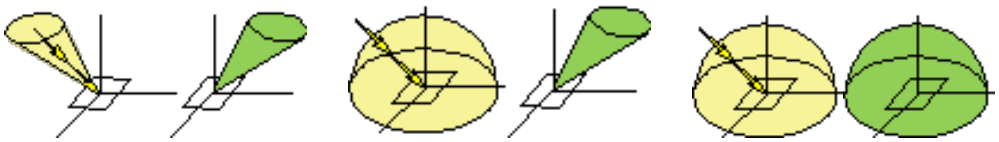


Figura 1.9: Três formas práticas de obter medições de reflectância da superfície: cónica-cónica, hemisférica-cónica e hemisférica-hemisférica. A claro está representada a radiação incidente e a escuro a radiação reflectida `http://www.ncaveo.ac.uk/special_topics/field_spectroscopy-/natural_environment/`, 13.04.2011.

Grandeza	Símbolo	Expressão	Unidades
Incidindo sobre ou abandonando a superfície, em todas as direcções (hemisférico):			
Energia radiante	Q		J
Fluxo radiante	Φ	$\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$	$\mathrm{W} = \mathrm{J\,s^{-1}}$
Irradiância (incidente)	E	$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}A$	$\mathrm{W\,m^{-2}}$
Emitância/exitância ("para fora")	M	$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}A$	$\mathrm{W\,m^{-2}}$
Abandonando a superfície, nas direcções definidas pelo cone de ângulo sólido Ω (cónico):			
Intensidade radiante	I	$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}\Omega$	$\mathrm{W\,sr^{-1}}$
Radiância	L	$\mathrm{d}\Phi/\cos\theta_v\,\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\Omega$	$\mathrm{W\,m^{-2}\,sr^{-1}}$
Radiância espectral	L_λ	$\mathrm{d}L/\mathrm{d}\lambda$	$\mathrm{W\,m^{-2}\,sr^{-1}}\mu\mathrm{m^{-1}}$
Fracções da energia incidente:			
Reflectância (hemisférica)	ρ_λ	$\Phi_{\text{reflectido}}/\Phi_{\text{incidente}}$	
Absortância	α_λ	$\Phi_{\text{absorvido}}/\Phi_{\text{incidente}}$	
Transmitância	τ_λ	$\Phi_{\text{transmitido}}/\Phi_{\text{incidente}}$	

Tabela 1.4: 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).

1.3 Grandezas radiométricas

□ *Os sensores dos satélites medem essencialmente a radiância. Nesta secção serão descritas essa e outras grandezas radiométricas fundamentais. Mostra-se que para superfícies lambertianas a reflectância do material pode determinar-se de forma simples a partir da radiância. (Cf. UC de Climatologia e Recursos Hídricos/AP, UC de Climatologia e Agrometeorologia/EngAgrFloAmb)*

A energia electromagnética varia em intensidade, composição espectral, e direcção. As grandezas mais relevantes em detecção remota e as respectivas unidades estão descritas na Tabela 1.4. Nessa tabela usam-se unidades de energia (J), de potência ou fluxo de energia ($\mathrm{W} = \mathrm{J\,s^{-1}}$), e de potência por unidade de área e/ou por unidade de ângulo sólido.

O primeiro grupo de grandezas da tabela (Q, Φ, E, M) diz respeito ao fluxo de radiação em todas as direcções (hemisférico). No entanto, e dado que os sensores apenas medem a quantidade de energia que os atinge, é natural considerar grandezas que dependem da abertura do cone – ver ilustração na Figura 1.9 e ver também a ilustração de esterradiano na Figura 1.8 – que

delimita um conjunto de direcções da radiação, como as indicadas no segundo grupo da Tabela 1.4. A intensidade radiante (I) diz respeito a pontos ideais (de área nula) na superfície, enquanto que radiância (L) descreve objectos reais, com uma certa área projectada, como ilustrado na Figura 1.10.

A radiância é uma grandeza fundamental em detecção remota – está relacionada de forma aproximadamente linear com a medição realizada no sensor segundo a Equação 3.4 (ver pág. 76); tem unidades $\mathrm{Wm^{-2}s^{-1}}$, i.e. é um fluxo de energia por unidade de área projectada e por unidade de ângulo sólido. É habitual usar o índice λ para representar a correspondente grandeza *espectral*, que depende do comprimento de onda. Por exemplo, a radiância espectral é representada por L_λ.

Formalmente, o *albedo* é o valor da proporção de energia solar incidente sobre uma 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). No entanto, a reflectância é definida como uma grandeza *espectral* $\rho_\lambda = \frac{M_\lambda}{E_\lambda}$ enquanto que o 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. Uma estimativa da distribuição do albedo pela superfície do globo é representada na Figura 1.11.

Na Secção 1.2 foi referido que o padrão de reflectância de uma superfície depende em particular da sua rugosidade e foi feita referência a superfícies lambertianas. A Lei de Lambert dos cosenos estabelece que a intensidade radiante é directamente proporcional ao coseno do ângulo θ_v entre a linha de observação e a normal à superfície. Uma superfície lambertiana é uma superfície que se comporta de acordo com essa lei. Dado que a radiância está relacionada com a intensidade radiante por

$$L = \frac{I}{\cos\theta_v \, \mathrm{d}A},$$

então uma superfície lambertiana exibe a mesma *radiância* quando é observada de qualquer ângulo. Esse facto é ilustrado na Figura 1.12.

Nesse caso, existe uma relação muito simples entre radiância (que é uma grandeza "cónica") e emitância (que é uma grandeza "hemisférica"). Para

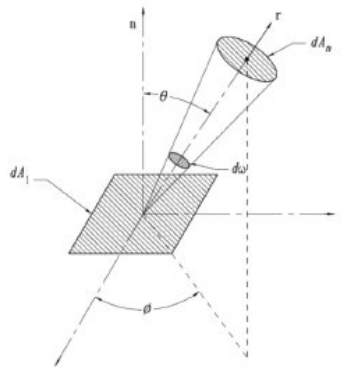


Figura 1.10: Ilustração do conceito de radiância $L = \mathrm{d}\Phi / \cos\theta_v \, \mathrm{d}A \, \mathrm{d}\Omega$. θ é o ângulo zenital de observação (relativo à normal à superfície). `http://www.ptbmagazine.com/features/2009/feat1_0909.html`, 13.04.2011.

superfícies lambertianas, a relação entre radiância espectral e emitância espectral é dada por

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

Consequentemente, a reflectância espectral de superfícies lambertianas pode ser escrita simplesmente como (ver [9, Equação 6]):

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \, L_\lambda}{E_\lambda}. \tag{1.4}$$

A Equação 1.4 permite estimar a reflectância da superfície a partir do valor da irradiância (que depende das condições de iluminação que variam com a data, a posição e o relevo do local, e das condições da atmosfera) e da medição da radiância no sensor (que é também influenciada pela atmosfera). Este tópico será o objecto da Secção 3.2.

1.4 Regiões do espectro electromagnético

□ *Nesta secção descrevem-se as principais regiões do espectro electromagnético correspondentes às bandas de comprimento de onda nas quais os sensores captam informação. (Cf. UC de Climatologia e Recursos Hídricos/AP, UC de Climatologia e Agrometeorologia/EngAgrFloAmb, UC de Métodos e*

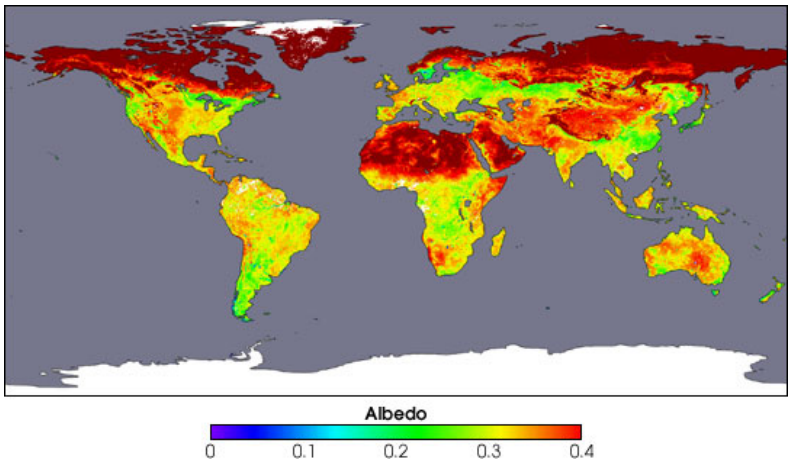


Figura 1.11: Estimativa a partir de imagens multitemporais de Abril 2002 do sensor MODIS do valor médio do albedo para as superfícies terrestres. Observe-se que zonas de deserto e cobertas por neve têm os valores mais elevados. `http://earthobservatory.nasa.gov` 5.05.2011

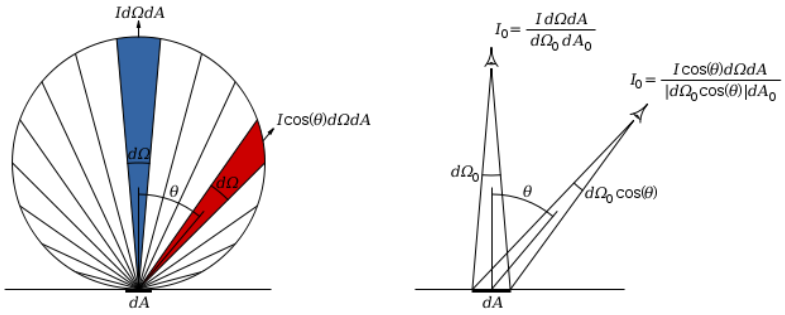


Figura 1.12: Descrição da uniformidade da radiância para superfícies lambertianas. À esquerda ilustra-se o facto de a intensidade radiante (pontual) de uma superfície lambertiana ser proporcional a $\cos\theta$. A intensidade é representada pela área da região sombreada. À direita mostra-se que quando se considera uma área não pontual (dA), a grandeza resultante (radiância) é independente de θ. `http://en.wikipedia.org/wiki/Lambert´s_cosine_law`, 27.05.2011.

Processos de Medição/EngAmb)

Designa-se por espectro electromagnético a gama de comprimentos de onda (ou alternativamente, frequências) da radiação electromagnética. O espectro electromagnético é habitualmente decomposto em regiões, desde os raios gama (menor λ, maior frequência e maior energia) até às ondas longas usadas em telecomunicações (maior λ, menor frequência e menor energia). As principais regiões estão ilustradas na Figura 1.13. Para a detecção remota da superfície terrestre as regiões mais importantes são a região do visível (0.4 a 0.7μm ou seja de 400nm a 700nm), 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 a região das microondas, de comprimento de onda superior a 1mm. A radiação visível corresponde portanto a uma reduzida porção do espectro electromagnético com interesse em detecção remota.

A gama de comprimentos de onda captados por sistemas de detecção remota é portanto apenas uma parte do espectro electromagnético. A razão principal para essa limitação está relacionada com o facto de a atmosfera terrestre filtar a radiação. Esse efeito pode ser descrito pelos valores de transmitância da atmosfera em função do comprimento de onda como ilustrado na Figura 1.14. Consequentemente, a gama de comprimentos de onda captados por sistemas de detecção remota é aproximadamente 0.4 a 12 μm (visível e infravermelho), correspondentes a frequências entre 20 e 60 GHz, e 30 a 300 mm (microondas), correspondentes a frequências entre 1 e 10 GHz. As regiões do espectro para as quais a transmitância atmosférica é elevada são designadas por janelas atmosféricas.

A combinação das janelas atmosféricas e da energia da radiação (que depende do comprimento de onda de acordo com a Equação 1.1) determina a irradiância solar sobre a superfície como ilustrado na Figura 1.15.

A radiação de comprimento de onda entre 8 e 12 μm (região espectral do infravermelho térmico) depende da temperatura do objecto para temperaturas comuns de objectos situados na superfície terrestre (em redor de 300K) de acordo com a Lei de Wien (ver Figura 1.1). Nessa gama de comprimentos de onda a radiação captada pelo sensor é essencialmente radiação *emitida* pelo próprio objecto [4] enquanto que a radiação proveniente de um objecto na gama do visível e do infravermelho próximo e médio e captada pelo sensor é essencialmente radiação solar *reflectida* pelo objecto.

Na Figura 1.16, ilustra-se a noção de *janela solar* (entre 0.3 e 1 μm; gama de comprimentos de onda para os quais a absorção da atmosfera da

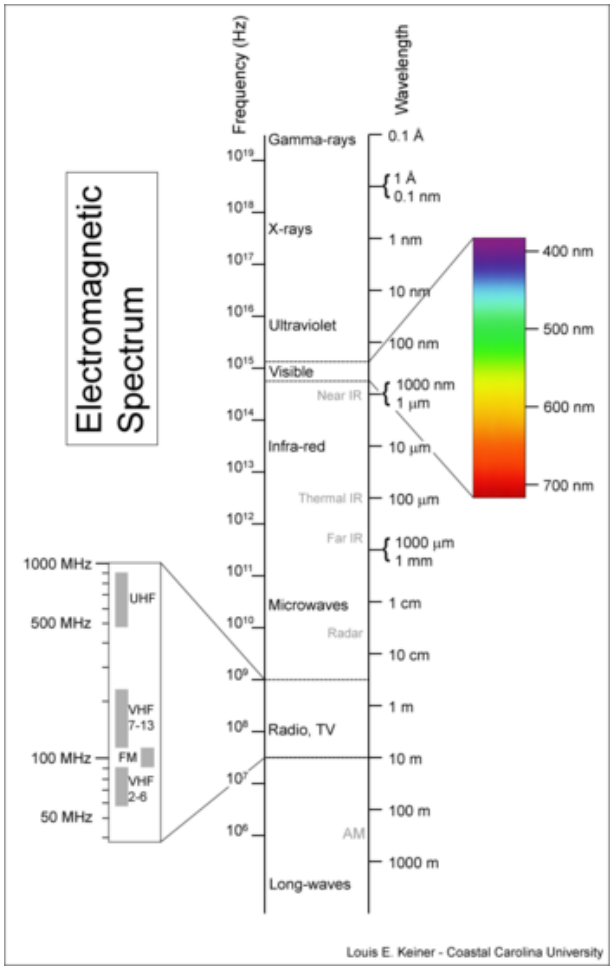


Figura 1.13: Regiões do espectro electromagnético `http://www.scienceprog.com/wp-content/uploads/2009/05/-electromagnetic_spectrum.jpg` 1.06.2010

radiação solar é baixa) e de *janela térmica* (vizinhança dos 10 μm; gama de comprimentos de onda para os quais a absorção da atmosfera da radiação emitida pela superfície é baixa).

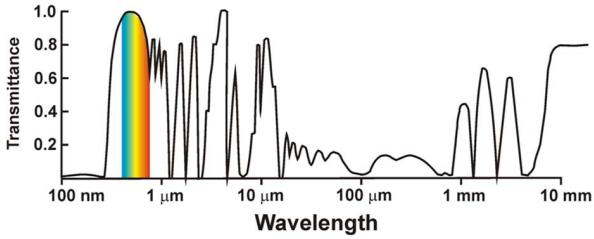


Figura 1.14: Transmitância atmosférica, `http://www.eeb.ucla.edu/test/faculty/nezlin/-SatellitesAndSensors.htm` 13.04.2011.

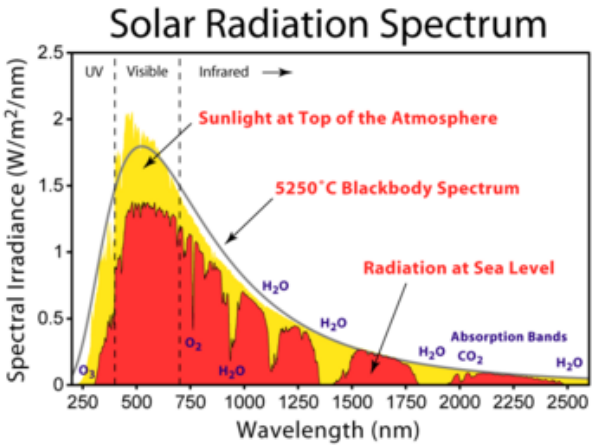


Figura 1.15: Irradiância solar no topo da atmosfera e é superfície em função do comprimento de onda, `http://tmp.kiwix.org` 13.04.2011.

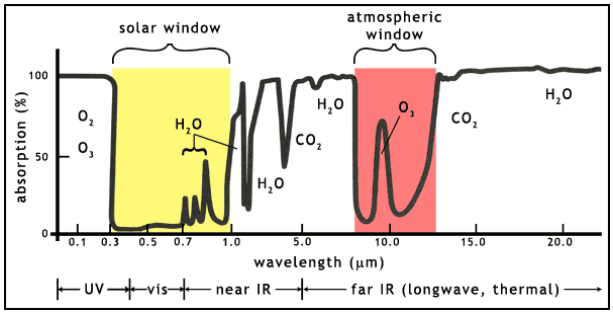


Figura 1.16: Absorção atmosférica em função do comprimento de onda com indicações das localizações da janela solar (a claro) e da janela térmica (a escuro), `http://www.helpsavetheclimate.com/climatetheory.html` 13.04.2011.

1.5 Assinaturas espectrais

□ *Um dos objectivos da detecção remota é identificar as características do coberto a partir do sinal captado pelo sensor. Nesta secção descrevem-se algumas características dos materiais à superfície que afectam as assinaturas espectrais. (Cf. UC de Biologia Funcional/EngAgr)*

O padrão de reflectância para uma gama de comprimentos de onda da radiação incidente sobre o objecto designa-se por *assinatura espectral*. Nesta secção serão discutidos alguns aspectos que afectam as assinaturas espectrais de diversos materiais nas regiões espectrais de 0.3 a 2.5 μm (regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio). Na Figura 1.17 mostram-se padrões de reflectância típicos de alguns materiais para essa gama de comprimentos de onda. Os diferentes materiais descritos nessa figura têm de facto padrões bastante distintos, dando ideia que a detecção remota permite, em princípio, identificar o coberto da superfície. Assinaturas espectrais típicas de uma grande diversidade de materiais existem em repositórios de assinaturas espectrais tal como, por exemplo, o repositório *Aster spectral library* (`http://speclib.jpl.nasa.gov/`).

Há no entanto um conjunto de factores que limitam a capacidade da detecção remota ser usada para identificar o coberto à superfície. Por um lado, as imagens obtidas por sensores multiespectrais são obtidas em determinadas condições de iluminação e observação (ver Secção 1.2) e por isso

o sinal detectado não corresponde precisamente ao conceito de reflectância (hemisférica). Em segundo lugar, as bandas dos sensores (ver Secção 2) são em número finito (e geralmente pequeno) e por isso há um efeito de discretização do sinal. Cada banda do sensor corresponde a um valor associado a um intervalo de comprimentos de onda e não a um valor pontual do espectro (ver Secção 2.3). Em terceiro lugar, o sinal que chega ao sensor não depende apenas do material à superfície pois é influenciado pela atmosfera. Finalmente, cada parcela do terreno correspondente a um valor do sensor (pixel da imagem) pode conter uma mistura de diferentes materiais, cada qual com uma assinatura espectral distinta.

Todos os factores descritos acima causam distorções do sinal obtido por detecção remota relativamente às assinaturas típicas como as representadas na Figura 1.17. Quando, como nesse caso, as assinaturas são à partida muito distintas, pode ainda ser possível distinguir no sinal captado pelo sensor os materiais originais. No entanto, alguns dos tipos de coberto do terreno com interesse podem ter assinaturas típicas muito semelhantes, o que torna a sua discriminação difícil a partir do sinal captado pelo sensor. A Figura 1.18 contêm fotografias verticais de três tipos de coberto de vegetação. As suas assinaturas espectrais típicas na gama de comprimentos de onda de 0.3 a 2 μm são mostradas na Figura 1.19. Como se pode verificar, essas assinaturas são muito semelhantes para os três casos considerados.

Nas figuras 1.17 e 1.19 foram ilustradas as assinaturas típicas de alguns materiais, e em particular de vegetação, solo e água. As características principais das assinaturas desses materiais são descritas abaixo.

Vegetação 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), como indicado na Figura 1.20. 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.

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% [4]. O padrão típico da vegetação pode ser observado na Figura 1.17 que ilustra o fenómeno conhecido como *red edge* próprio da vegetação:

em geral, quanto maior o contraste entre a reflectância na região do vermelho e do infravermelho próximo, maior a quantidade e vigor da vegetação [4]. Na região do IV médio existem picos de absorção em 1.4, 1.9 e 2.7 μm aproximadamente, causados pela presença de água nas folhas. Dado que a reflectância aumenta na região do infravermelho próximo com o número de camadas de folhas, a reflectância de um coberto verde é afectada pelo índice de área foliar.

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 μm, a reflectância torna-se praticamente nula (ver Figura 1.17). 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 de 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. A água no estado sólido (gelo ou neve) tem características muito distintas (ver Figura 1.17).

Solo descoberto Ao contrário da vegetação, a transmissão da radiação de baixo comprimento de onda nos solos é baixa, e por isso a assinatura espectral deste material depende essencialmente da sua camada superior. Tipicamente, a reflectância dos solos aumenta com o comprimento de onda (ver Figura 1.17) ao contrário da vegetação que tem um pico de reflectância no infravermelho próximo. 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, tanto um elevado teor de matéria orgânica como um elevado teor de humidade provocam 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 (ver Figura 1.6). A textura tem um efeito muito importante no padrão espacial de reflectância (ver Secção 1.2) e por isso imagens de detecção remota de solos descobertos dependem significativamente das condições de iluminação e observação [4].

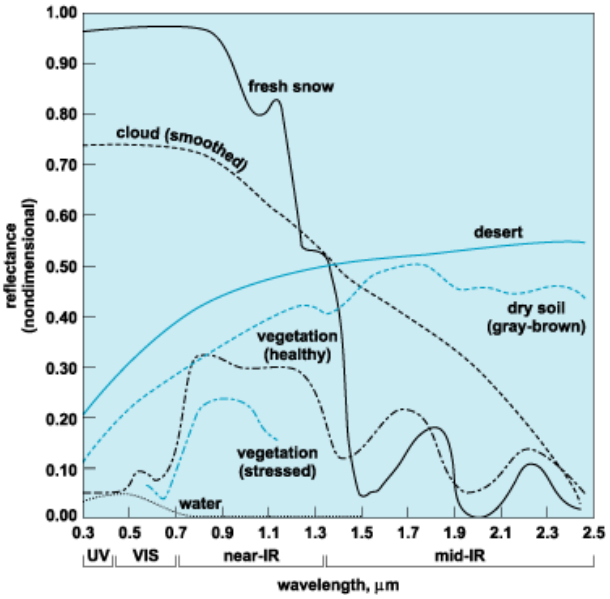


Figura 1.17: Assinaturas espectrais típicas de neve, nuvens, deserto, solo descoberto, vegetação e água, `http://accessscience.com/content/-Satellite-climatology/YB051870` 15.04.2011.

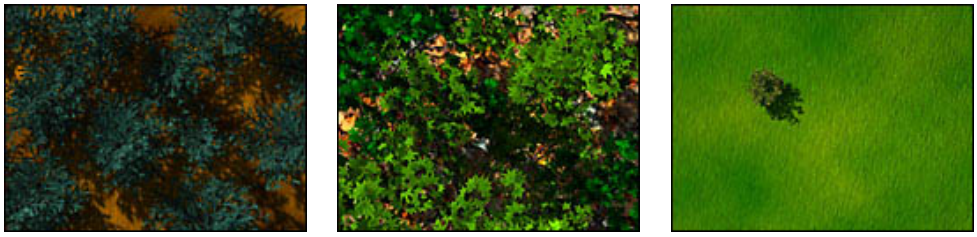


Figura 1.18: Fotografias verticais solo coberto com coníferas, folhosas e relva , `http://earthobservatory.nasa.gov/Features/LandCover` 15.04.2011.

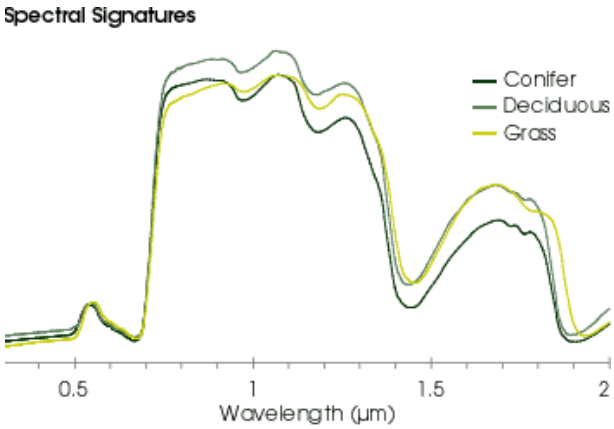


Figura 1.19: Assinaturas espectrais de solo coberto com coníferas, folhosas e relva de acordo com a Figura 1.18, `http://earthobservatory.nasa.gov/-Features/LandCover` 15.04.2011.

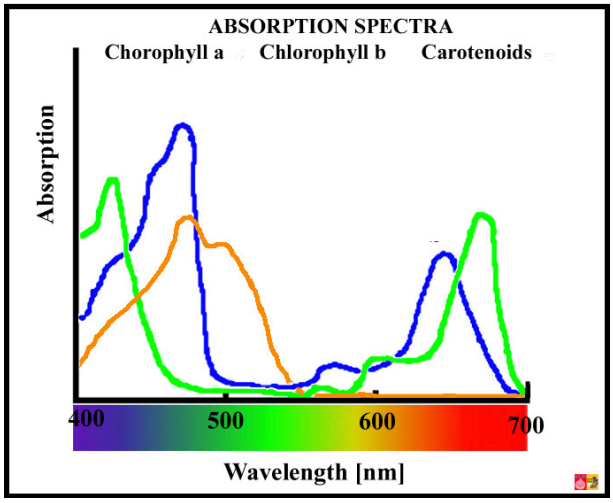


Figura 1.20: Assinaturas espectrais de vários pigmentos da vegetação, `http://www.vcbio.science.ru.nl/public/Final-Images/` 17.04.2011.

1.6 Efeito da atmosfera

□ *O sinal que chega ao sensor é uma combinação do sinal dos materiais à superfície e do efeito da atmosfera. Nesta secção apresentam-se alguns elementos que permitem compreender o efeito da atmosfera. (Cf. UC de Climatologia e Recursos Hídricos/AP, UC de Climatologia e Agrometeorologia/EngAgrFloAmb)*

Se não houvesse atmosfera, o céu seria negro, com excepção do brilho das estrelas e da reflexão dos planetas. A atmosfera é constituida por gases (entre os quais o azoto 78%, oxigénio 21%, árgon 0.9%, vapor de água 0.04%, dióxido de carbono 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 absortância para alguns intervalos de comprimento de onda como ilustrado nas figuras 1.15 e 1.16.

As partículas e os gases atmosféricos também reflectem a radiação. Este efeito é designado por *dispersão atmosférica*. Na Figura 1.21 são ilustrados os diferentes percursos possíveis para a radiação entre o sol e o sensor.

Em geral, a dispersão atmosférica depende da dimensão das partículas da atmosfera que a causam e do comprimento de onda da radiação. O efeito de *dispersão de Rayleigh* é causado pelas moléculas com diâmetro inferior a aproximadamento $\frac{1}{10}\lambda$ (em que λ é o comprimento de onda da radiação) e é inversamente proporcional a λ^4. Por exemplo, a dispersão causada pela atmosfera na banda do verde (0.5 a 0.6 μm) é aproximadamente quatro vezes superior à dispersão no infravermelho próximo (0.7 a 0.8 μm). O 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. A relação entre esses efeitos e o comprimento de onda e a elevação do sol é descrita na Figura 1.22. Essa figura mostra que o efeito de dispersão de Mie é mais atenuado do que o efeito de dispersão de Rayleigh. A Figura 1.23 ilustra as diferenças no aspecto do céu quando a observação é feita na direcção do sol (céu esbranquiçado) e quando é feita para outra direcção (céu azul).

Existe ainda um terceiro tipo de dispersão atmosférica, designado por *dispersão não selectiva*, que é causado por partículas de dimensão maior

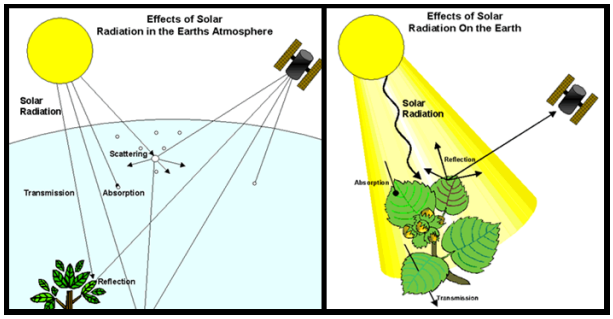


Figura 1.21: Transmissão, absorção e dispersão da radiação na atmosfera, e comparação com a vegetação, `http://www.ctahr.hawaii.edu/-miuralab/projects/makaha/intro_RS.html` 20.04.2011.

do que o comprimento de onda (como gotículas de água nas nuvens). A designação deste efeito deve-se ao facto de ese tipo de dispersão afectar da mesma forma radiação de diferente comprimento de onda. Assim se explica que as nuvens tomam diferentes tonalidades de cinzento, pois nenhuma gama de comprimento de onda do visível sofre um efeito mais pronunciado do que as outras gamas.

A atmosfera desempenha um papel preponderante nas trocas energéticas do planeta, a par da superfície do globo composta pelos continentes (29%) e oceanos (71%). Na Figura 1.24 são descritas as principais componentes do balanço de energia à escala global. A parte da irradiância solar que atinge directamente a superfície ($198\,\mathrm{W\,m^{-2}}$) é aproximadamente 58% do total ($342\,\mathrm{W\,m^{-2}}$). A quantidade reflectida pela superfície é aproximadamente $30\,\mathrm{Wm^{-2}}$, ou seja, em média, cerca de 15% da irradiância que atinge directamente a superfície.

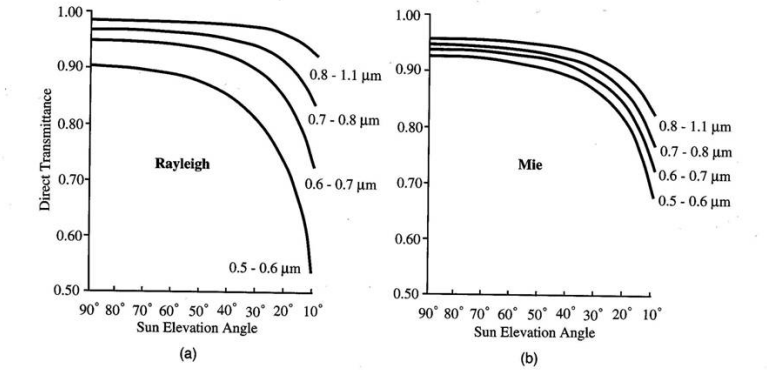


Figure 6-2 (a) Effects of molecular (Rayleigh) scattering and sun angle on incident radiation transmitted to Earth's surface; (b) Effects of aerosol (Mie) scattering and sun angle on radiation transmitted to Earth's surface.

Figura 1.22: Os efeitos de dispersão de Rayleigh e de Mie atenuam-se com o aumento do comprimento de onda.

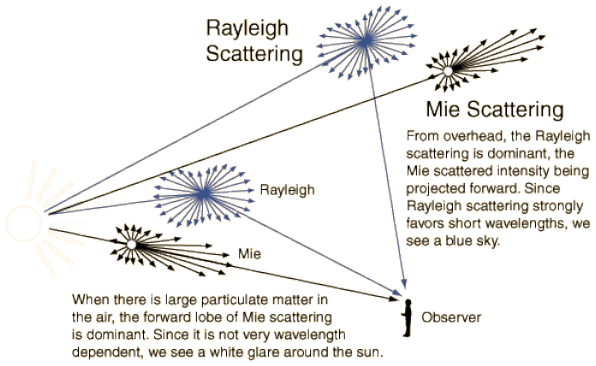
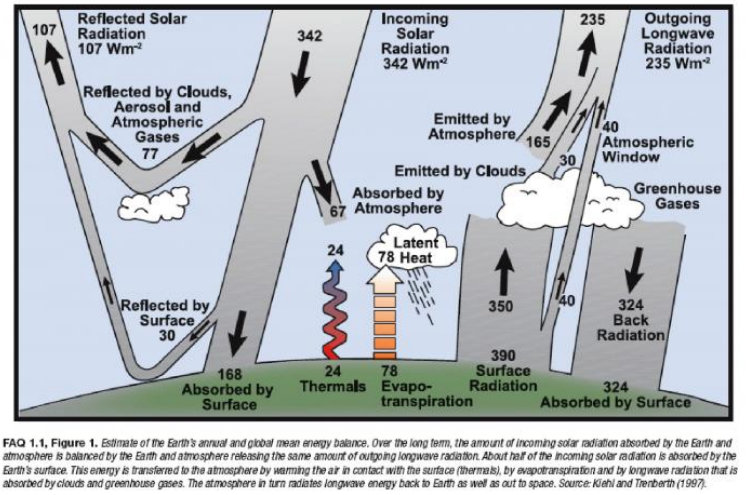


Figura 1.23: Ilustração do efeito de Rayleigh e do efeito de Mie na radiação incidente sobre a atmosfera, `http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/-hbase/atmos/blusky.html` 20.04.2011.



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 1.24: Balanço anual de energia referido nas avaliação de alterações climáticas do IPCC. O valor de 342Wm^{-2} corresponde à irradiância solar média (por unidade de área total) para a superfície do globo e é igual a $\frac{1}{4}$ da constante solar $S_o = 1367\text{Wm}^{-2}$ (por unidade da área seccional do globo). `http://icestories.exploratorium.edu`, 20.04.2011 (fonte: Kiehl and Trenberth, 1997: Earth's Annual Global Mean Energy Budget, Bull. Am. Met. Soc. 78, 197-208).

Capítulo 2

Sistemas de detecção remota

□ *Nesta secção faz-se uma apresentação dos principais tipos de satélites e sensores, entre os quais se destacam os sistemas passivos com detectores ópticos e detectores térmicos e os sistemas activos como o RADAR ou o LIDAR. Definem-se diferentes tipos de resolução para sistemas passivos e referem-se algumas aplicações dos diversos sistemas de detecção remota.*

Detecção remota pode ser feita essencialmente de três formas, dependendo das gamas de comprimento de onda e dos objectivos da análise [2]. Os sensores designados por *detectores ópticos* registam a radiação solar de comprimentos de onda correspondentes ao visível ou infra-vermelha próximo ou médio que reflectida pela superfície. Os *detectores térmicos* registam a radiação de longo comprimento de onda emitida pela superfície. Nestes dois casos diz-se que a detecção remota é *passiva*, dado que o sensor necessita de uma fonte de energia exterior para obter informação. O terceiro caso corresponde a detecção remota *activa*, em que o próprio sensor gera o fluxo de radiação que interage com a superfície. Os principais sistemas de detecção remota deste último tipo são o RADAR e o LIDAR– ver Secção 2.4.

Estão em operação um grande número de sistemas de detecção remota e estão planeados lançamentos de novos satélites de observação da Terra transportando sensores para obter informação remota de diferente natureza. As entidades que gerem os satélites (públicas ou privadas) mantém em geral actualizado o estado dos sensores dado que estes têm um tempo de vida útil a partir do qual pode haver uma perda ou degradação do sinal. Para além dessa evolução esperada, ocorrem problemas técnicos que podem conduzir a uma perda ou degradação do sinal antes do final do periodo de utilização

prevista. Existem repositórios de informação[1] sobre os satélites já lançados ou cujo lançamento está previsto onde todas essas informações podem ser obtidas.

2.1 Satélites geossíncronos e heliossíncronos

Os satélites podem ser classificados segundo o 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 periodo da órbita seja de 24 h. Exemplos: satélites de observação meteorológica METEOSAT e GEOS (ver Figura 2.1).

- Heliossíncronos, com orbita 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 (usados por exemplo em meteorologia) obtêm informação com uma grande frequência temporal (por exemplo todos os 15 minutos) da mesma região do globo.

A órbita heliossíncrona permite em contrapartida maximizar a quantidade de radiação disponível para realizar detecção remota. Um satélite com órbita heliossíncrona passa pelo mesmo mesmo paralelo à mesma hora como ilustrado na Figura 2.2. Assim, em cada passagem do satélite sobre um local, a condições de iluminação são homogéneas. A aquisição de imagens por satélites heliossíncronos é ilustrada na Figura 2.3. Por exemplo as observações do sensor VIIRS correspondem às fiadas de imagens ilustradas na Figura 2.4.

2.2 Sensores passivos

Os sensores passivos podem ser classificados quanto à tecnologia de aquisição de imagens nas seguintes categorias

- câmaras fotográficas (analógicas), em desuso;

[1] Por exemplo, `http://www.itc.nl/research/products/sensordb/searchsat.aspx`

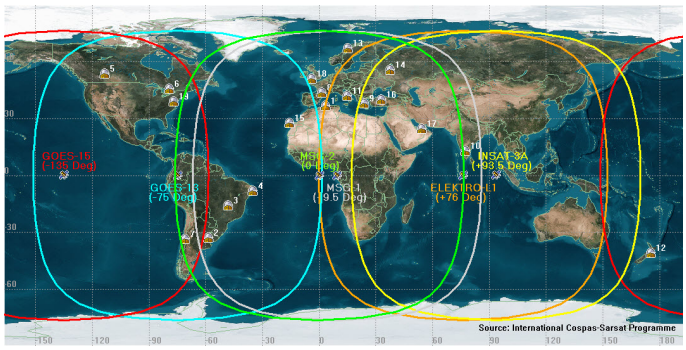


Figura 2.1: Áreas observadas por alguns satélites geoestacionários. `http://www.cospas-sarsat.org/images/`, 20.04.2012.

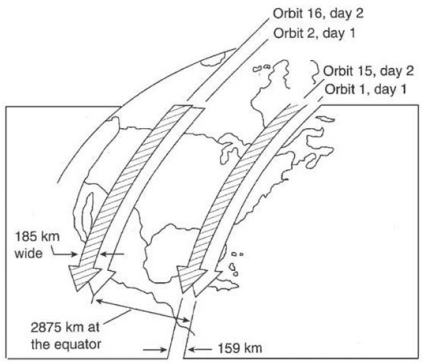


Figura 2.2: Ilustração de uma órbita quase polar e sincronizada com a posição do sol. `http://what-when-how.com/`, 20.04.2012.

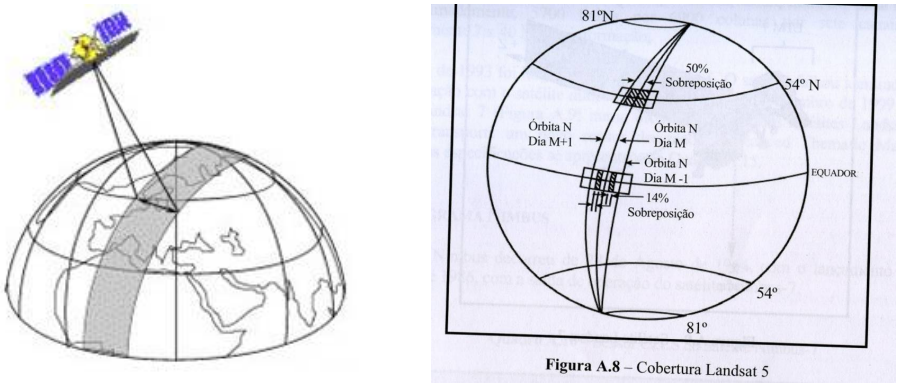


Figura 2.3: Ilustração da aquisição de imagens por um sensor instalado a bordo de um satélite com órbita heliossíncrona. As faixas de observação têm uma maior sobreposição para latitudes elevadas.

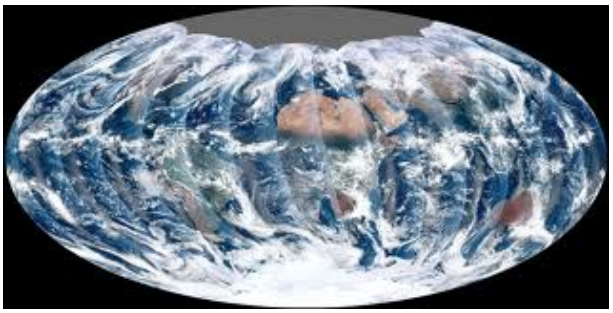


Figura 2.4: Composição de faixas de observação do sensor VIIRS. Cada faixa mede aproximadamente 3000km. `http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/`, 20.04.2012

- sensores digitais de varrimento: o detector tem um espelho oscilante de varrimento. Exemplo: sensores TM e ETM$^+$ dos satélites Landsat 5 e 7, 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 do satélite Landsat 8 (2013), sensor MSI do futuro satélite Sentinel-2;
- radiómetros de microondas.

A Figura 2.5 ilustra a distinção na forma de aquisição da imagem entre sensores de varrimento e sensores de matriz linear. Dado que os sensores de matriz linear dispõe de um muito maior número de detectores independentes, este tipo de sensores é usado quando se pretende obter imagens com grande detalhe espacial. Em contrapartida, os sensores de varrimento obtêm informação da mesma região em geral com uma maior gama de ângulos de varrimento, o que é importante para a detecção de propriedades da superfície que dependem da geometria de observação e iluminação (ver Secção 1.2).

Abaixo, definem-se alguns conceitos geométricos fundamentais para poder definir a resolução espacial de imagens. O campo de visão FOV é o ângulo de observação do sensor que corresponde à distância GFOV projectada no terreno. Por exemplo, as faixas de observação da Figura 2.4 têm GFOV ≈3000 km; o seu FOV é o ângulo associado. O campo de visão instantâneo IFOV diz respeito a cada elemento da imagem, ou seja, a cada célula (ou pixel) da imagem adquirida pelo sensor, e o GIFOV é a dimensão correspondente no terreno. Por exemplo, para o sensor MODIS o elemento do centro da imagem tem aproximadamente 250m de lado para as bandas com melhor resolução espacial. Para sensores com muito boa resolução espacial, o GIFOV pode ser inferior a 1m. Em conjunto, existem então as seguintes quatro medidas de campo de visão do sensor que são ilustradas na Figura 2.6.

- 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 (*ground*) correspondentes aos ângulos FOV e GFOV respectivamente. O GFOV é geralmente referido na literatura pela expressão *swath width*.

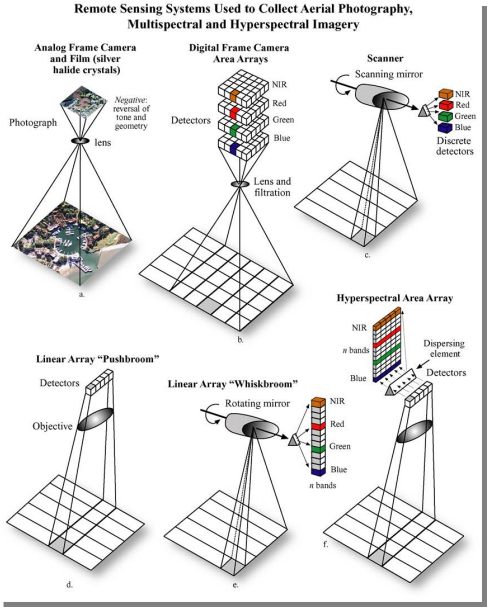


Figura 2.5: Um sensor de matriz linear "pushbroom" está associado a menores distorções nas imagens e a um intervalo de tempo mais elevado para a aquisição de informação sobre cada elemento do terreno do que um sensor de varrimento "whiskbroom" `https://www.e-education.psu.edu/`, 23.04.2011.

Para uma superfície horizontal, a conversão do FOV (um ângulo) em GFOV (distância correspondente no terreno) é dada pela relação

$$\text{GFOV} = 2\,H \times \tan \frac{\text{FOV}}{2},$$

em que H é a altitude da plataforma. No entanto , para sensores com FOV elevado é necessário ter em consideração a curvatura da Terra, o que conduz a maiores valores para o GFOV. Para IFOV e GIFOV a relação é análoga mas depende do ângulo de varrimento (ver Equação 2.1 na página 40 e exercícios na Secção 2.5).

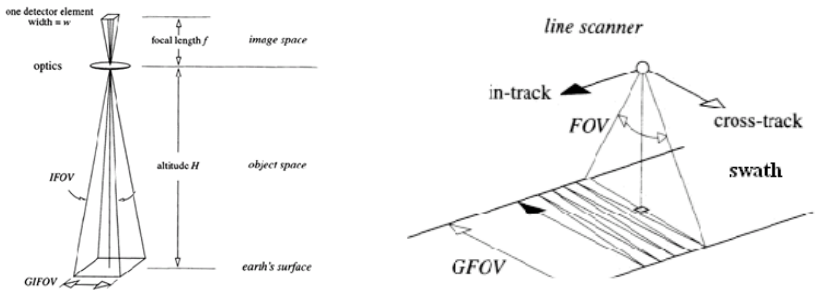


Figura 2.6: Ilustração de FOV, IFOV, GFOV e GIFOV. `http://milo.infobyte.it`, 12.05.2011.

2.3 Tipos de resolução para sensores passivos

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, entre os quais se destacam os seguintes.

- 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 caracterizar a dimensão (linear) do mais pequeno objecto que pode ser detectado numa imagem. No entanto, 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, e em particular da altitude do sensor H e do campo de visão instantâneo IFOV. Consequentemente, resolução espacial é geralmente definida

como sendo o GIFOV (campo de visão instantâneo projectado no terreno) para um ângulo de varrimento de 0º (observação no nadir), isto é,

$$\text{GIFOV}_0 = 2\,H \times \tan\frac{\text{IFOV}}{2} \quad \text{(m)} \tag{2.1}$$

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. Os diversos sensores podem ser classificados quanto à resolução espacial nas seguintes categorias.

- 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 (pancromático) e 8m (multiespectral).
- Boa ou média resolução: resolução espacial entre 4 a 30 m. Exemplos: SPOT 4 e 5; Landsat 5, 7 e 8 (este último lançado em 2013); o futuro Sentinel-2 (ESA); TERRA/ASTER (NASA); Hyperion (EO-1/NASA).
- Resolução grosseira: resolução espacial de 30 m a 1 km aproximadamente. Exemplos: Aqua e Terra MODIS e NPP/VIIRS (NASA); ENVISAT/MERIS (ESA), NOAA/AVHRR; SPOT/VGT.

Resolução espectral. Esta medida de resolução 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:

1. *Modo pancromático*: obtenção do sinal numa única banda do espectro (um único intervalo de comprimento de onda); Essa banda cobre tipicamente a região do visível e parte da região do infravermelho próximo (ver Figura 2.9);
2. *Modo multiespectral*: obtenção de uma colecção multiespectral de imagens em bandas de 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: 0.43-0.47μm (azul), 0.61-0.68μm (vermelho), 0.78-0.89μm (infravermelho próximo) e 1.58-1.75μm (infravermelho médio).

As imagens multiespectrais podem ser classificadas quanto à resolução espectral nas seguintes categorias.

- Alta resolução espectral: de 15 a 220 bandas. Exemplos: EO-1/Hyperion (220 bandas, até 2.5μm); MODIS (36 bandas, até 14.385 μm); VIIRS (22 bandas, até 12 μm).
- Média resolução espectral: de 5 a 15 bandas. Exemplos: Landsat 5, 7, 8; NOAA/AVHRR, MSI/ESA Sentinel-2 (13 bandas, até 2.4 μm).
- Baixa resolução espectral: menos de 5 bandas. Exemplos: SPOT-5 (4 bandas multiespectrais); sensores DigitalGlobe.

Relação entre resolução espacial e resolução espectral. Em geral, o aumento de comprimento de onda está associado a uma degradação da resolução espacial das imagens que é explicada pelo facto da radiação de maior comprimento de onda ser menos energética (ver Lei de Plank na Secção 1.1). No entanto, os progressos tecnológicos têm permitido uma melhoria de ambas. Por exemplo, a Figura 2.7 ilustra as diferenças de resolução espacial em função dos comprimentos de onda das bandas para o sensor Landsat TM lançado em 1984 e para o sensor Aster em funcionamento desde 1999 e mostra que o sensor Aster tem melhor resolução espacial e espectral do que o sensor TM. A Figura 2.8 ilustra a deterioração de resolução espacial que normalmente está associada à mudança de aquisição de imagens em modo pancromático e multiespectral. Dado que a amplitude de comprimentos de onda no modo pancromático é em geral maior (ver Figura 2.9), o sensor dispõe no modo pancromático de um maior fluxo de radiação para realizar detecção remota. Em consequência disso, é possível reduzir a resolução espacial obtendo-se imagens com mais detalhe espacial. A Figura 2.8 também ilustra a técnica de fusão de imagens pancromáticas e multiespectrais usadas em diversas aplicações (Google Earth, Bing) que permite aumentar o contraste espacial das composições coloridas de imagens multiespectrais incorporando informação da banda pancromática (brilho da imagem por exemplo).

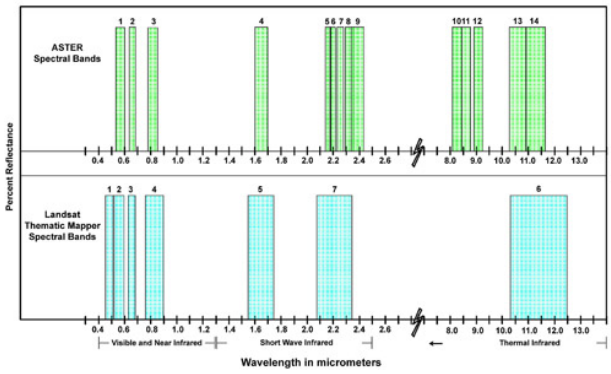


Figura 2.7: Comparação da resolução espectral do sensor Aster, em funcionamento desde 1999, com resolução espacial de 15m (visível e IVP), 30m (IVM) e 90m (IV térmico) e do sensor Landsat-TM com resolução espacial de 30m e 120m (IV térmico), em funcionamento desde 1984. Com o desenvolvimento tecnológico ambas as resoluções podem melhorar. `http://news.satimagingcorp.com/`, 20.04.2012

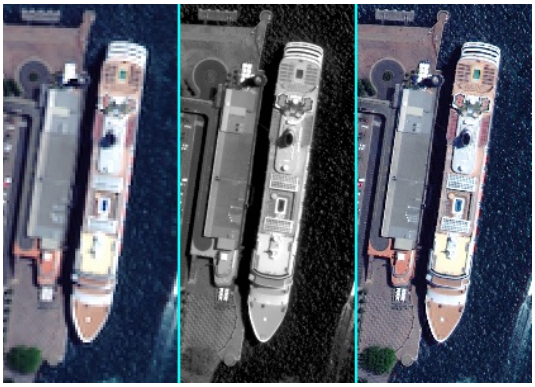


Figura 2.8: A resolução espacial das imagens multiespectrais Worldview é 1.84m (à esquerda). A resolução espacial das imagens pancromátricas Worldview é 46cm (ao centro). À direita está representada uma composição colorida usando um algoritmo de fusão da imagem pancromática com as imagens multiespectrais. `http://www.geoimage.com.au/`, 16.05.2012.

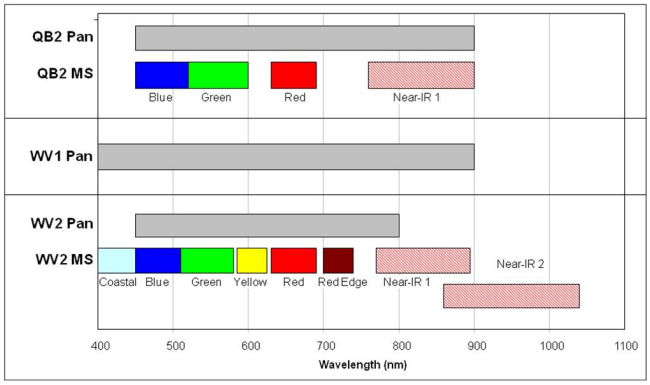


Figura 2.9: Resolução espectral dos sensores Quickbird, Worldview-1 e Worldview-2. Para imagens pancromáticas e multiespectrais as resoluções espaciais para Quickbird são 61cm e 2.44m e para Worldview são 46cm e 1.84m. `http://www.scanex.ru/imgs/`, 16.05.2012.

Resolução 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. Define-se *resolução temporal* (medida em dias ou horas) de um sensor como sendo o intervalo de tempo entre observações sucessivas no mesmo local, mesmo que realizadas com ângulos de observação distintos. Dada a geometria de observação, a resolução temporal varia com a latitude (porque há maior sobreposição das faixas de observação para latitudes elevadas – ver Figura 2.3) e com o campo de visão FOV. Para a mesma latitude, um sensor com um maior campo de visão FOV tem a uma resolução temporal mais curta. No entanto, a geometria de observação de alguns sensores pode ser alterada em órbita. Assim é possível "apontar" o sensor para um determinado lugar ao longo de sucessivas passagens e assim reduzir a resolução temporal para um dado local. Nesse caso, as observações sucessivas são realizadas com diferentes ângulos de observação. No gráfico da Figura 2.10 pode observar-se como a resolução temporal do sensor IKONOS pode ser melhorada à custa da utilização de ângulos de varrimento maiores. Observa-se também no mesmo gráfico o efeito da latitude na resolução temporal.

A resolução temporal é em geral pior para sensores com uma boa resolução espacial (ver Figura 2.13). No entanto, os sensores de boa resolução espacial com geometria de observação variável podem ter uma boa resolução temporal. Os sensores podem ser classificados da seguinte forma em função da sua resolução temporal, sendo os valores indicativos para o Equador (o pior caso).

- Boa resolução temporal: até 1-2 dias. Exemplos: NOAA/AVHRR (6 horas); TERRA/AQUA MODIS (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.

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 é radiométrica é n. A resolução radiométrica mais comum é de 8 bits mas pode ir até 12 bits (e.g. MODIS). Para 8 bits por exemplo, os níveis radiométricos são numerados de 0 a 255. Na Figura 2.11 é ilustrado o efeito da resolução radiométrica para valores baixos de n. Por análise visual, o olho humano não consegue em geral distinguir mais do que $2^6 = 64$ níveis radiométricos. No entanto, as técnicas de processamento automático de imagens podem tirar partido de resoluções radiométricas mais elevadas.

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, dependendo da resolução temporal do sensor. Alguns programas de observação permitem observações quase simultâneas segundo ângulos diferentes como o ATRS 2 (1995), POLDER (1997), MISR (1999) ou os sensores ASTER e SPOT5, como ilustrado na Figura 2.12. A medição de radiâncias sob ângulos distintos é necessária para corrigir as imagens relativamente ao efeito do BRDF e obter medições de algumas grandezas como o *albedo*

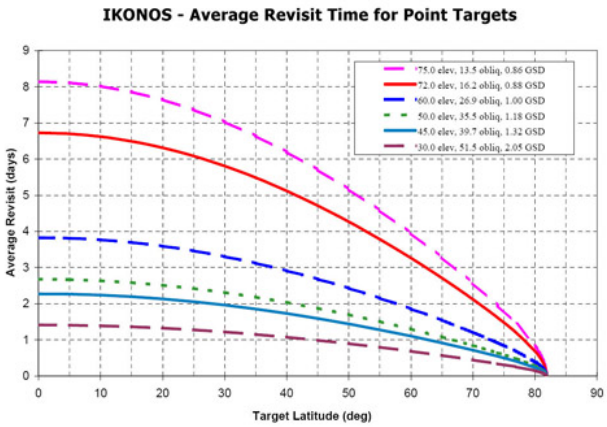


Figura 2.10: O eixo vertical indica a resoluçã temporal (em dias) e o eixo horizontal a latitude do lugar (em graus). O sensor de muito boa resolução espacial IKONOS tem um ciclo orbital com duração de 144 dias. No entanto pode adquirir imagens em intervalos de tempo mais curtos com ângulos de observação distintos. As linhas inferiores correspondem a maiores ângulos de varrimento. A resolução temporal depende também da latitude do lugar. `http://news.satimagingcorp.com`, 20.04.2012

(ver Secção 1.3). A aquisição de estereo pares pelos sensores ASTER e SPOT5 possibilita a obtenção de modelos digitais de elevação.

2.4 Breve apresentação de sistemas activos de detecção remota

Os dois principais tipos de sistemas activos são os sistemas RADAR e LIDAR. Tipicamente estes sistemas têm uma fonte própria de radiação e por isso não dependem da radiação solar para o seu funcionamento. Em consequência, as imagens podem ser obtidas de dia ou de noite. Estes sistemas podem ser classificados em função do tipo de informação que adquirem que pode ser radiância ou distância aos objectos a detectar.

1. Radar de imagens: tecnologia para obtenção de radiância da superfície. Embora as imagens têm um aspecto semelhante a imagens de detectores

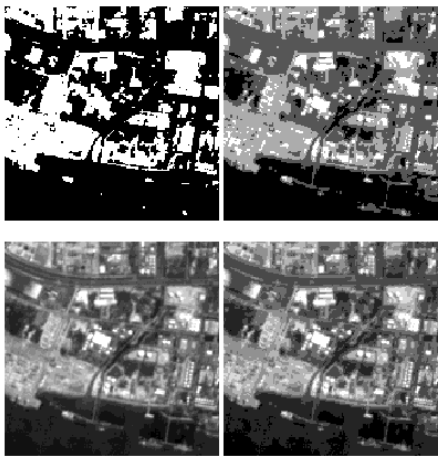


Figura 2.11: A mesma zona representada por imagens com resoluções radiométricas de 1, 2, 3, e 4 bits e a mesma resolução espacial. `http://rst.gsfc.nasa.gov/Intro/Part2_5a.html`, 16.5.2011.

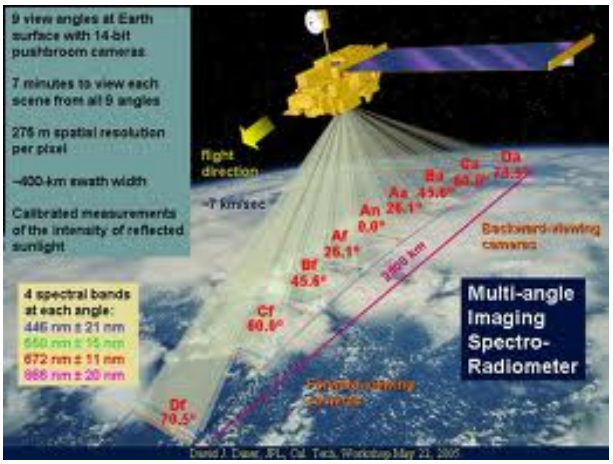


Figura 2.12: O sensor MISR faz observações quase simultâneas com diferentes ângulos de varrimento. `http://eosweb.larc.nasa.gov`, 16.05.2011.

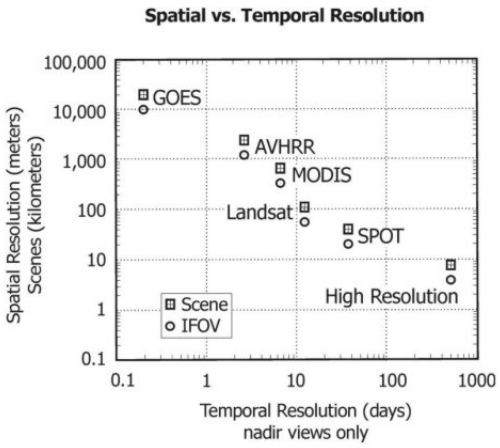


Figura 2.13: Comparação de resolução espacial e resolução temporal para alguns sensores. `http://www.geog.ucsb.edu/`, 20.04.2012.

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. Exemplos de aplicação: medição do nível dos oceanos e da espessura do gelo em áreas geladas; construção de modelos digitais de elevações, modelação 3D dos objectos à superfície.

Na presente secção serão apresentados algumas características das imagens RADAR que as distinguem das imagens obtidas por detectores ópticos. Em sistemas RADAR o transmissor envia na direcção da superfície impulsos

de microondas com um certo comprimento de onda e uma certa duração. A geometria de iluminação e observação é distinta da dos detectores ópticos. Em sistemas RADAR, a radiação incidente e a observação são realizadas numa direcção oblíqua afastada da vertical como ilustrado na Figura 2.14.

Tal como nos sistemas passivos, os sistemas RADAR são caracterizados pela sua resolução espectral. As bandas mais importantes são descritas na Figura 2.15.

Os impulsos de energia electromagnética ondulam em planos com inclinações variáveis. Em detecção remota por RADAR, pode tirar-se partido do facto de ser possível filtrar os impulsos para que a ondulação seja feita num único plano. Cada plano corresponde então a um *modo de polarização*. Para aumentar o conteúdo de informação dos sinais de radar, vários modos de polarização podem ser considerados na emissão e recepção do sinal (ver Figura 2.16). 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.

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 ao facto da gama de comprimentos de onda usada corresponder a ondas mais longas e a outros aspectos técnicos como a geometria de iluminação e observação. 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.

Tal como foi discutido na Secção 1.2, a rugosidade da superfície é um conceito relativo. 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 seria "escura" numa imagem de radar como ilustrado na Figura 2.14. Um exemplo conhecido

da utilização dessa característica das imagens RADAR é a monitorização de derrames de petróleo em oceanos, como ilustrado na Figura 2.17. Nessa imagem, e dado que a mancha de crude sobre a superfície da água é mais "lisa" do que a superfície do oceano (em condições de vento fraco), a radiação é reflectida na direcção oposta ao sensor, e por isso a imagem RADAR sobre o mancha de crude é mais escura do que sobre a zona envolvente de água limpa.

A análise de rugosidade através de imagens de RADAR também tem aplicações no estudo da vegetação e, em particular, na estrutura das copas da árvores. 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 reflexão de volume nas imagens obtidas, como ilustrado na Figura 2.18.

Uma das características mais interessantes das imagens radar é o facto das nuvens e da precipitação serem permeáveis à radiação de muito longo comprimento de onda. Mais uma vez, essa propriedade deve-se ao facto de as partículas que constituem o vapor de água e as gotículas de precipitação terem dimensões menores do que algumas gamas de comprimento de onda usadas em sistemas de RADAR. Assim, é possível observar a superfície através das nuvens como ilustrado na Figura 2.19.

A estrutura das camadas superiores do solo podem também ser analisadas através de imagens RADAR. De facto, a radiação de longo comprimento de onda 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. A Figura 2.20 ilustra esse fenómeno.

Em resumo, as imagens RADAR podem constituir uma alternativa ou uma fonte de informação complementar às imagens obtidas por sistemas passivos pelos aspectos seguintes.

- A interaccção 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 dos objectos à superfície ao nível molécular, as imagens de radar dependem de características macroscópicas da superfície como a rugosidade e o volume (por exemplo, das copas);

- Imagens de radar têm boa resolução espacial, 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.

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 como ilustrado na Figura 2.21. Em particular a técnica InSAR foi usada para obter um modelo digital da superfície à escala global de utilização muito generalizada: o SRTM (2000). A missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) foi realizada através de um *shuttle* transportando duas antenas afastadas de aproximadamente 60 m. 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). Para além do SRTM estão também disponíveis os modelos digitais de elevação à escala global ASTER-GDEM versão 1 (2009) e versão 2 (2011) e ACE2 (EAPRS/ESA). Este último combina o modelo digital da superfície SRTM com medições de altímetros para originar um modelo digital de elevações (removendo o efeito das copas das árvores no SRTM). Embora a resolução espacial nominal do modelo digital de elevações ASTER seja de 30m a resolução efectiva é considerada semelhante à do modelo SRTM.

LIDAR (*Light Detection and Ranging*) é uma tecnologia semelhante ao RADAR com duas diferenças principais. A primeira está relacionada com o facto de o LIDAR usar radiação da região do visível ou do infravermelho próximo em vez de radiação da gama do RADAR que corresponde a maior comprimento de onda. Uma consequência da diferença de gamas de comprimento de onda utilizadas é que 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. Outra diferença importante está relacionada com a geometria de observação: 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. 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. A tecnologia LIDAR permite obter medições de distâncias para diversos níveis de profundidade no coberto, permitindo assim a elaboração de *perfis verticais* (ver Figura 2.22). A aplicação dessa técnica a uma área florestada com uma amostragem densa de sinais permite obter uma descrição detalhada sobre a localização das copas das árvores, da estrutura interna das copas, e do subcoberto (ver Figura 2.23).

A resolução espacial de dados LIDAR depende da altura da plataforma e do arranjo espacial das áreas amostradas. A detecção por lidar pode ser feita numa área aproximadamente circular (*footprint*) de maior ou menor raio. No interior dessa área circular são obtidos diversos sinais que podem ser combinados para a obtenção de um perfil (relativamente contínuo) do material à superfície. Em alternativa, a amostragem pode ser pontual, obtando-se uma medição por ponto que é convertida numa posição tridimensional. O colecção desses pontos tridimensionais caracteriza então o perfil do material à superfície. Nesse caso, os pontos amostrados podem ser espacialmente distribuídos de forma homogénea ou serem obtidos apenas numa direcção (um transecto) seguindo a rota linear de observação. As várias situações descritas atrás estão ilustradas na Figura 2.24.

2.5 Exercícios

1. Considere um sensor a uma altitude de $a = 705$ km observando com um ângulo de varrimento $\theta = 20^{\text{o}}$ um lugar L no terreno sobre uma superfície horizontal. Considerando que a Terra é esférica com centro C e raio $r = 6371$ km, determine o ângulo de observação zenital θ_v do sensor relativamente a esse lugar.

   Resolução. Considere o triângulo CLS, em que S é a posição do

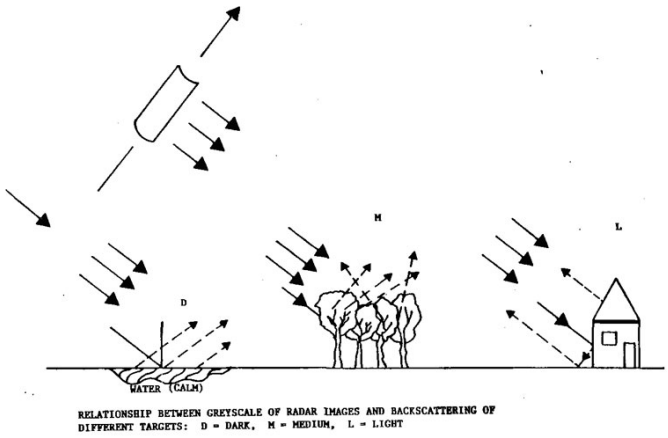


Figura 2.14: O transmissor de microondas incide sobre a superfície numa direcção oblíqua ao plano terrestre e é reflectido de acordo com a geometria e a rugosidade dos objectos à superfície. A superfície "suave" é mais escura na imagem, e a superfície artificial vertical na direcção perpendicular à direcção de observação é a mais brilhante. `http://galathea3.emu.dk/`, 23.04.2012

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 2.15: Gamas de comprimento de onda usuais em bandas em sensores de microondas. `http://www.eetimes.com/`, 23.04.2012

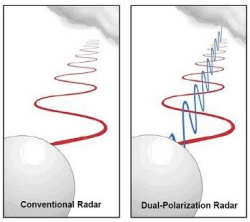


Figura 2.16: Ilustração de polarização horizontal e vertical em impulsos de RADAR. `http://www.roc.noaa.gov/`, 23.04.2012.

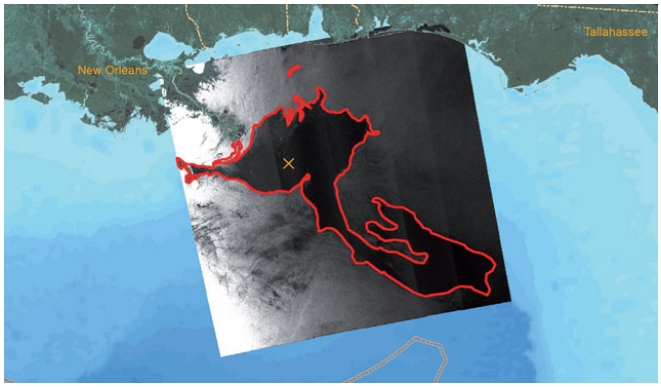


Figura 2.17: Imagem Envisat do Golfo do México para monitorização da evolução da mancha de petróleo resultante do derrame de petróleo causado pela explosão na plataforma *Deepwater Horizon* em 20 de Abril de 2010. Como a mancha de petróleo é mais "lisa" do que a água, a zona afectada aparece mais escura na imagem. `http://www.astrium.eads.net/`, 23.04.2012.

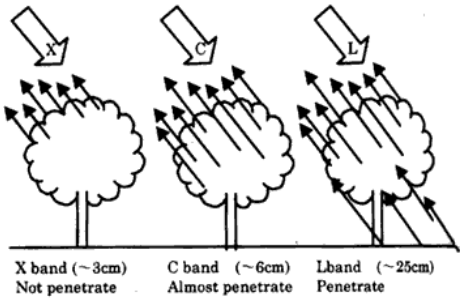


Figura 2.18: A radiação de maior comprimento de onda penetra mais nas copas. As características do coberto de que depende o sinal variam com o comprimento de onda: para comprimento de onda mais curto (imagem da esquerda) o sinal é afectado apenas pela parte superficial das copas e para comprimento de onda mais longo (imagem da direita) toda a copa e mesmo o sub-copado contribui para o sinal adquirido pelo sensor. `http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS1999/Papers/PS299`, 14.05.2012.

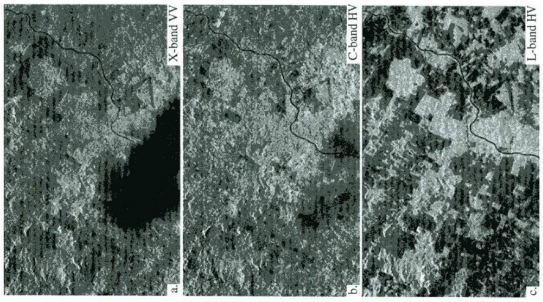


Figura 2.19: Imagens simultâneas na região amazónica para monitorização de deflorestação. O comprimento de onda cresce da esquerda para a direita e a polarização varia. Na imagem da esquerda (banda X, menor comprimento de onda) nota-se claramente a presença de uma nuvem e de precipitação que não é visível na imagem da direita (banda L, maior comprimento de onda). Retirado de [5].

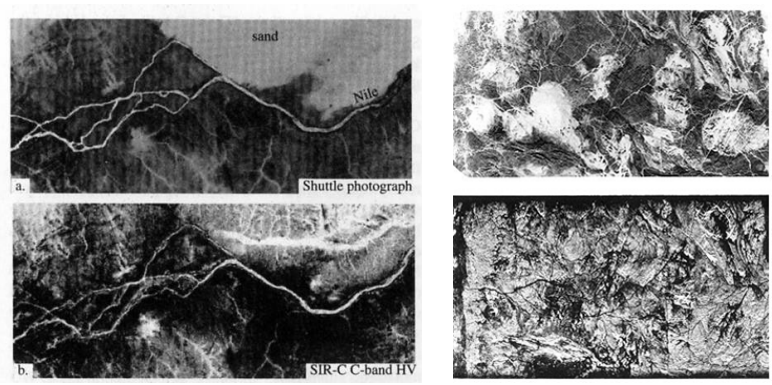


Figura 2.20: À esquerda, uma imagem de uma região junto ao rio Nilo. A imagem superior é uma fotografia tirada do espaço e a imagem inferior é uma imagem radar que revela a marca do leito abandonado do rio Nilo. Do lado direito, está outro par de imagens obtidas simultaneamente sobre uma zona do Egipto: 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. Retirado de [5].

sensor; então $\widehat{CLS} = 180^{\text{o}} - \theta_v$. Usando a lei dos senos, conclui-se que $\frac{a+r}{\sin(180^{\text{o}}-\theta_v)} = \frac{r}{\sin\theta}$. Finalmente, $\theta_v = \arcsin(\frac{a+r}{r}\,\sin\theta) = \arcsin(\frac{7076}{6371}\,0.342)$ $= \arcsin(0.379) = 22.32^{\text{o}}$. □

2. 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 correspondente aos maiores comprimentos de onda (10.4 a 12.5 μm).

   (a) Por que motivo a banda 6 é designada por *banda térmica*?

   (b) As resoluções espaciais das bandas 5 e 6 são, respectivamente, 30m e 60m para este sensor. Indique uma justificação para essa diferença.

   (c) Dado que a resolução radiométrica do sensor é 8 bits, quantos níveis de cinzento distintos podem ser observados numa imagem pancromática?

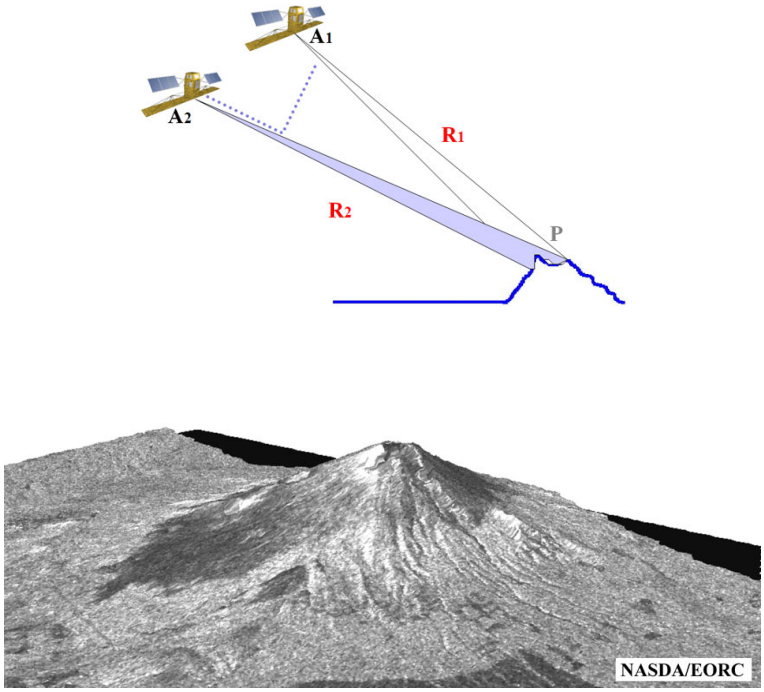


Figura 2.21: Ilustração da técnica de interferometria radar: são necessários dois sinais simultâneos de radar para obter uma medição precisa da diferença entre as distâncias R_1 e R_2 por forma a poder derivar a elevação do ponto P. Na figura da direita está representado o modelo digital de elevações resultante: os erros podem ser inferiores a 1 metro. `http://mundogeo.com/` e `http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/`, 23.04.2012.

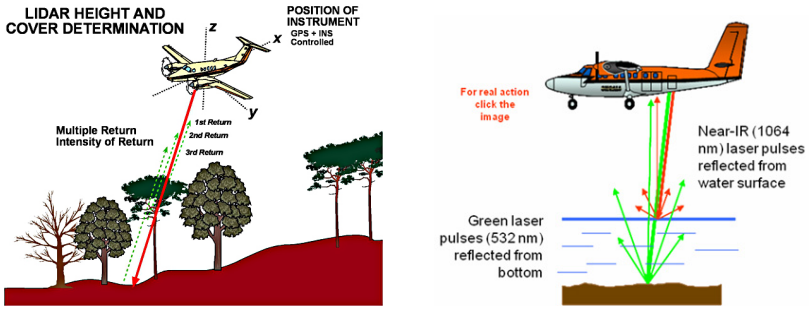


Figura 2.22: Diversos níveis de profundidade do coberto podem ser analisados em medições de LIDAR, em função da densidade da amostragem e do comprimento de onda. `http://usda.gov` e `http://geoeasy.com.br`, 23.04.2013

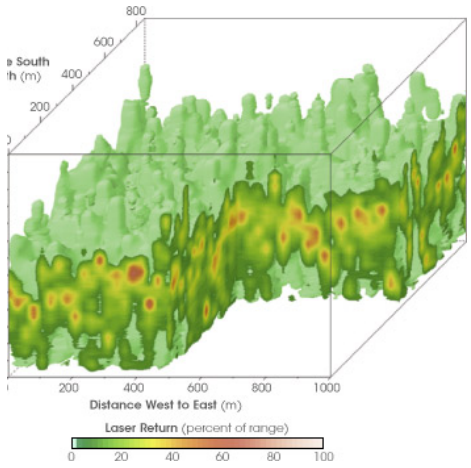


Figura 2.23: Estrutura de floresta tropical (Costa Rica) determinada a partir de imagens LIDAR. A quantidade de sinal reflectido para cada elevação é proporcional à densidade do copado. `http://earthobservatory.nasa.gov/`, 15.05.2012.

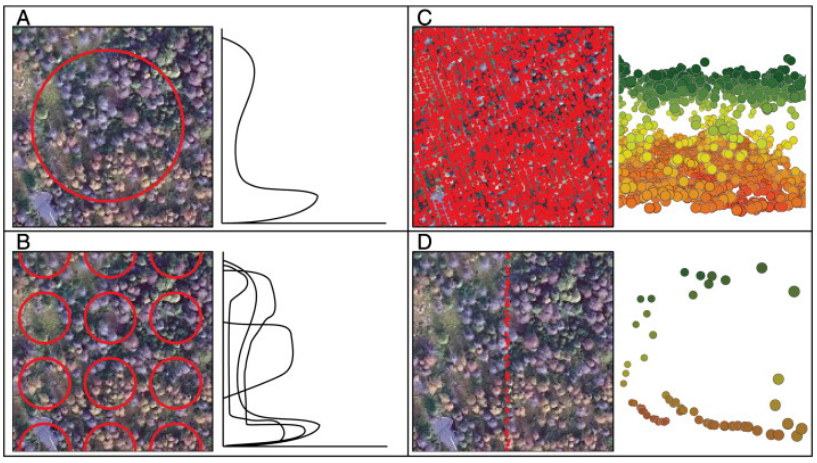


Figura 2.24: Várias observações LIDAR sobre uma zona florestal. (A) e (B) têm uma resolução de 60m e 20m e uma resposta contínua (perfil de vegetação); (C) e (D) têm menor resolução espacial e uma resposta discreta que consiste numa nuvem de pontos de coordenadas (x,y,z). RSE 121 (2012) 196–209

3. 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 μm e os 0.9 μm).

   (a) Defina *resolução espacial* e *modo pancromático*.

   (b) Indique uma justificação para a diferença de resolução das imagens Quickbird no modo pancromático e no modo multiespectral.

   (c) 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.

   (d) 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.

4. 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 a noção de campo de visão do sensor (FOV e GFOV).

5. Cada satélite do futuro par de satélites Sentinel-2 (ESA) transportará o sensor MSI que tem entre outras as seguintes características: 13 bandas espectrais (ver Figura 2.25) entre 443 nm e 2190 nm, resolução espacial de 10m (4 bandas) , 20m (6 bandas) ou 60m (3 bandas para correcções atmosféricas e detecção de nuvens), GFOV de 290 km e resolução radiométrica de 12 bits. Prevê-se que as imagens sejam disponibilizadas gratuitamente. A resolução temporal será de 5 dias no Equador usando os dois satélites.

   (a) A resolução temporal para regiões afastadas do Equador será superior ou inferior a 5 dias? Justifique.

   (b) 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). Relacione a amplitude das bandas B11 e B12 (ambas com resolução espacial de 20m).

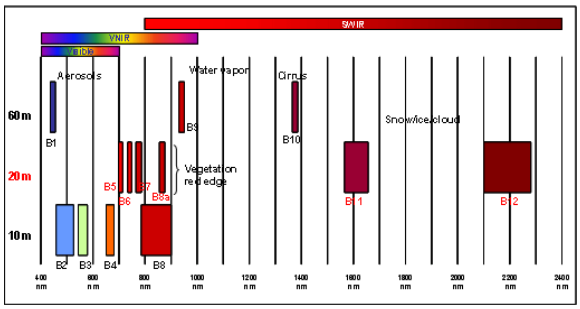


Figura 2.25: Resolução espectral do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2 (ESA) com lançamento previsto em 2014. `http://www.cesbio.ups-tlse.fr/`, 15.05.2012.

(c) Indique uma razão para o sensor não ter uma banda com 10m de resolução espacial para a região do espectro entre 400 e os 500 nm.

(d) Indique uma razão para a banda para avaliação do efeito dos aerossóis ter valores baixos de comprimento de onda.

(e) Será que este satélite é adequado para monitorizar a evolução estado vegetativo de culturas agrícolas de inverno (cereais por exemplo) no centro da Europa? Suponha que para realizar a monitorização é necessário dispor de pelo menos uma medição por semana.

6. Considere um sensor a uma altitude H=705 km e com um campo de visão com IFOV = 0.01878^o a observar uma superfície horizontal. Determine:

(a) o GIFOV do sensor na vertical do lugar (nadir), i.e. para um ângulo de varrimento de 0^o;

(b) o GIFOV do mesmo sensor para observar um ponto no terreno com um ângulo de varrimento de $\theta = 20^o$.

Resolução.

(a) O GIFOV no nadir (ângulo de varrimento igual a 0) é dado pela

expressão

$$\text{GIFOV}_0 = 2\,H \times \tan\frac{\text{IFOV}}{2},$$

isto é, $\text{GIFOV}_0 = 231.1\text{m}$.

(b) Dado que a observação não é realizada na vertical, é necessário em primeiro lugar calcular a distância do sensor ao ponto observado P através da relação

$$\cos\theta = \frac{705}{H_\theta}.$$

O resultado é $H_{20} = 750.24$ km, em que o índice indica o ângulo de varrimento do sensor. Em seguida, pode determinar-se o valor de GIFOV para um ângulo de varrimento θ, denotado por GIFOV_θ, em particular para $\theta = 20^\text{o}$. Considere-se que metade do campo de visão instantâneo define o triângulo STP, em T é o ponto no terreno mais afastado do nadir que ainda pertence a esse campo de visão e que $\bar{\text{TP}} = \text{GIFOV}_\theta/2$. Então $\text{GIFOV}_\theta/2$ satisfaz a relação

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

Para $\theta = 20^\text{o}$, o resultado é $\text{GIFOV}_{20} = 261.7\text{m}$, ou seja uma parcela no terreno 30.6m mais larga do que o lado da parcela observada com um ângulo de varrimento nulo.

□

Capítulo 3

Pré-processamento de imagens de sensores passivos e determinação de grandezas físicas da superfície

As imagens de detecção remota são disponibilizadas aos utilizadores sob vários níveis de pré-processamento. Os níveis de pré-processamento mais baixos correspondem a imagens brutas (sinal registado nos detectores) e não georreferenciadas, que os próprios utilizadores devem corrigir com base nos parâmetros fornecidos com as imagens (e.g. hora de obtenção da imagem, posição do sensor, ângulos de observação entre outros). Por exemplo, as imagens Landsat 5 e 7 são disponibilizadas num nível de pré-processamento L1T, i.e. *Level 1 Terrain Corrected*, que já inclui o que se designa por *pré-processamento geométrico*, sendo as imagens sujeitas a uma adequada georreferenciação, incluindo ortorrectificação em função da altimetria do local, e associadas a um sistema de coordenadas de referência. Essas mesmas imagens (L1T) sofrem um *pré-processamento radiométrico* básico que inclui correcções relacionados com características do sensor como, por exemplo, o alinhamento dos detectores ou imperfeições nos sistemas ópticos. No entanto, os valores dos pixels das imagens não têm unidades físicas (como unidades de radiância), tendo um valor numa escala fixa arbitrária, dependente apenas do número de bits disponíveis para registar a informação. Essa escala pode ser por exemplo entre 0 e 255 se a imagem é de 8 bits (pois $2^8 = 256$ valores distintos).

O valor de cada pixel da imagem (entre 0 e 2^n, para n bits) é designado por *número digital*. O número digital de um píxel pode ser convertido em radiância no sensor, que por sua vez depende 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. Se o objectivo da análise das imagens é inferir propriedades da superfície, é necessário então reduzir o efeito dos factores extrínsecos à superfície. Esse processo é designado por *correcção radiométrica*.

Realizar correcções radiométricas de imagens de detecção remota é um processo complexo, que exige um conhecimento preciso das condições de aquisição da imagem, e das condições atmosféricas na altura da sua obtenção. Para além disso pode ser necessário conhecer características da superfície como o relevo, BRDF ou a emissividade. Na Secção 3.2 é apresentado um modelo simplificado de conversão de números digitais em reflectâncias para superfícies lambertianas, cujo objectivo é essencialmente indicar as factores de correcção que devem ser considerados. Em geral, é preferível usar imagens já pré-processadas pela entidade que as produz, desde que a qualidade desse processo seja fiável; de facto, estão disponíveis produtos de detecção remota correspondentes a variáveis biofísicas que já incorporam correcções radiométricas (ver página 75). O utilizador pode no entanto preferir fazer as correcções necessárias caso disponha de informação detalhada sobre as condições atmosféricas e características da superfície na região de interesse na altura da obtenção das imagens, ou caso não haja imagens disponíveis já corrigidas para a área de estudo com a resolução espacial necessária.

3.1 Correcções geométricas

□ *Nesta secção será descrita a técnica de georreferenciação com pontos de controlo e será feita uma breve referência à técnica de ortorrectificação de imagens.*

As imagens adquiridas por sensores instalados em satélites sofrem deformações geométricas (ilustradas pela Figura 3.1) 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 para NE.

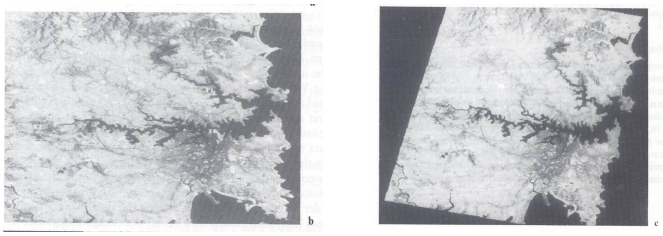


Figura 3.1: Imagem de satélite original e imagem após correcção geométrica.

A Figura 3.2 mostra a posição das imagens Landsat sobre Portugal Continental evidenciando a orientação SW-NE das mesmas.

- 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 – medida pelo GIFOV – muito variável. Este efeito afecta sensores com elevado FOV como o sensor MODIS (resolução espacial entre 250m e 1km), o sensor SPOT-VGT (1 km), o sensor AVHRR (1.1 km), entre outros.

- A curvatura da Terra causa distorções, principalmente em sensores com grande FOV.

- Erros instrumentais.

As técnicas mais usadas – isoladamente ou em combinação – para corrigir as distorções geométricas das imagens 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. Esta técnica é conhecida por *georreferenciação com pontos de controlo*.

- 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 da datas distintas.

As imagens de satélite são normalmente comercializadas em diferentes níveis de pré-processamento. Por exemplo, para o satélite SPOT os níveis são:

1. níveis que não envolvem o 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;

2. níveis que envolvem correcções com pontos de controlo: [2B] georreferenciação da imagem com pontos de controlo; [3] imagem georreferenciada e ortorrectificada usando um modelo de elevações.

O problema da georreferenciação de imagens usando pontos de controlo pode ser ilustrado com um exemplo em que se pretende integrar num SIG uma imagem de alta resolução não georreferenciada como ilustrado na Figura 3.3. Para georreferenciar a imagem pode seguir-se o seguinte processo.

1. Identificar pontos na imagem de coordenadas conhecidas (pontos de controlo);

2. Definir uma transformação de coordenadas para a imagem;

3. "Projectar" a imagem no novo sistema de coordenadas (re-amostragem);

4. Avaliar a qualidade da transformação realizada.

Em seguida detalham-se os vários aspectos da técnica de georreferenciação com pontos de controlo.

Pontos de controlo. São pontos com coordenadas conhecidas que podem ser identificados na imagem. Para pontos de controlo devem ser escolhido objectos com fronteiras bem definidas na imagem para os quais são conhecidas as coordenadas no sistema cartográfico de referência. Os pontos de controlo podem ser por exemplo intersecções de estradas, zonas de água de contorno fixo (tanques, piscinas), edifícios ou outras

construções com contornos bem definidos. Para cada ponto de controlo é necessário identificar as suas coordenadas na imagem (número de linha e número de coluna) e as suas coordenadas no sistema de referência (que pode ser obtido num mapa, ou por levantamento de coordenadas GPS no terreno). No SIG, essa correspondência pode ser realizada com auxílio das ferramentas de georreferenciação disponíveis, que permitem associar cada ponto da imagem à localização correspondente no mapa, como ilustrado na Figura 3.4. Os pontos de controle devem estar bem distribuidos na zona da imagem a georreferenciar. Caso contrário, a transformação de coordenadas só dependerá da zona da imagem com pontos de controle, não se generalizando bem às outras zonas.

Definir uma transformação de coordenadas. A transformação de cordenadas é uma função de $\mathbb{R}^2$ para $\mathbb{R}^2$ e é definida como uma função das coordenadas no sistema de referência para as coordenadas na imagem original. Mais precisamente, sejam as coordenadas do i-ésimo ponto de controlo representadas por:

- (u_i, v_i), na imagem original a georreferenciar, em que u_i é o número da coluna da imagem, e v_i é o número da linha da imagem;
- (x_i, y_i), no sistema de coordenadas de referência.

A tranformação $f : \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}^2$ a definir será então da forma

$$\begin{cases} u'_i &= f_1(x_i, y_i) \\ v'_i &= f_2(x_i, y_i), \end{cases}$$

em que (u'_i, v'_i) define uma posição na imagem original resultante da transformação do i-ésimo ponto de controlo. A função $f = (f_1, f_2)$ é escolhida por forma a que as diferenças entre as localizações definidas pela transformação (u'_i, v'_i) e as localizações (u_i, v_i) observadas na imagem original sejam pequenas. Dado que existem inúmeras funções que podem ser utilizadas para fazer a transformação de coordenadas, é usual fixar uma família de funções e estimar os parâmetros dessas funções com base nas observações. Em geral, as funções consideradas são polinómios de primeiro ($p(x, y) = a + bx + cy$), segundo ($p(x, y) = a+bx+cy+dxy+ex^2+fy^2$) ou terceiro grau, e os parâmetros são por isso os coeficientes desses polinómios. Como um polinómio de

grau N tem $(N+1)(N+2)/2$ parâmetros então, para esses polinómios, o número de parâmetros é respectivamente 3, 6 e 10.

Geometricamente, as transformações realizadas por esses polinómios incluem rotações, translações e mudanças de escala (todas essas transformações podem ser definidas por um polinómio de primeiro grau), e também transformações mais complexas para as quais é necessário usar polinómios de grau superior a 1 (ver ilustração na Figura 3.5). Escolhido o grau do polinómio, é então necessário estimar os seus coeficientes a partir das observações – os pares de coordenadas dos pontos de controlo. Essa estimativa é realizada em geral por um método de mínimos quadrados. Se a transformação é definida por

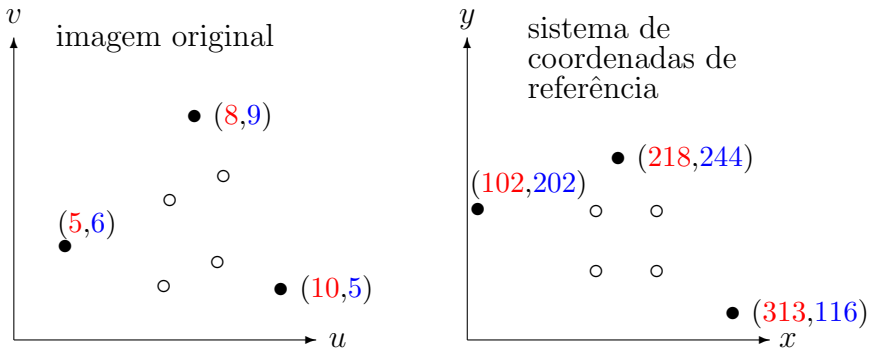
$$\begin{cases} u &= p_1(x,y) \\ v &= p_2(x,y), \end{cases}$$

em que p_1 e p_2 são os polinómios da transformação, o método dos *mínimos quadrados* consiste em escolher os coeficientes de p_1 e p_2 para os quais a soma dos quadrados dos resíduos

$$\sum_{i \in S} \left([u_i - p_1(x_i, y_i)]^2 + [v_i - p_2(x_i, y_i)]^2 \right) \tag{3.1}$$

seja mínima. Na expressão acima, S representa o conjunto de pontos de controlo.

Para ilustrar a técnica de estimação considere-se o caso mais simples, em que há apenas 3 pontos de controle não colineares e o polinómio da transformação é de primeiro grau. Considere-se que as coordenadas desses pontos são (5,6), (8,9) e (10,5) na imagem original e (102,202), (218,244) e (313,116) no sistema de coordenadas de referência.



O sistema a resolver é o seguinte.

$$\left\{\begin{array}{lcccccc} 5 & = & a_x & +102\,b_x & +202\,c_x & & \\ 8 & = & a_x & +218\,b_x & +244\,c_x & & \\ 10 & = & a_x & +313\,b_x & +116\,c_x & & \\ 6 & = & & & & a_y & +102\,b_y & +202\,c_y \\ 9 & = & & & & a_y & +218\,b_y & +244\,c_y \\ 5 & = & & & & a_y & +313\,b_y & +116\,c_y. \end{array}\right.$$

Neste caso o número de pontos é igual ao número de coeficientes e a matriz do sistema é invertível. A solução deste sistema ($a_x = 1.8977$, $b_x = 0.0248$, $c_x = 0.0028$, $a_y = -3.2011$, $b_y = 0.0115$, $c_y = 0.0398$) define a transformação de coordenadas seguinte.

$$\left\{\begin{array}{lcl} u & = & 1.8977 + 0.0248\,x + 0.0028\,y \\ v & = & -3.2011 + 0.0115\,x + 0.0398\,y \end{array}\right. \tag{3.2}$$

O efeito dessa transformação está ilustrado pelos pontos $\circ$ na figura acima: o quadrado no referencial (x, y) é transformado no paralelogramo no referencial (u, v). Dado que o sistema é possível e determinado, os resíduos para cada ponto são nulos e o valor da expressão (3.1) é nula também. Nesse caso, a transformação ajusta perfeitamente os três pontos de controle da imagem às suas coordenadas no sistema de referencia, independentemente da validade das coordenadas utilizadas.

Por essa razão é conveniente aplicar a técnica com um número de pontos de controlo superior ao número de parâmetros do polinómio. Suponha-se que no exemplo tratado há um 4º ponto de controle de coordenadas respectivamente (7,5) e (190,150). A este ponto correspondem duas novas equações no sistema:

$$\left\{\begin{array}{lcccccc} 7 & = & a_x & +190\,b_x & +150\,c_x & & \\ 5 & = & & & & a_y & +190\,b_y & +150\,c_y. \end{array}\right.$$

O sistema resultante, com 8 equações e 6 incógnitas é um sistema impossível. Existe no entanto uma solução de mínimos quadrados, i.e. um conjunto de coeficientes para os quais o valor da expressão (3.1) é mínimo. Esta nova solução tem a si associados resíduos $(u_i - p_1(x_i, y_i))$ e $(v_i - p_2(x_i, y_i))$ em geral não nulos.

Re-amostragem. Dada a transformação definida como atrás, pode estabelecer-se no sistema de coordenadas de referência uma quadrícula (*quadrícula de referência*) que é mapeada pelo polinómio p na quadrícula da imagem (ver Figura 3.6). Seja $(\bar{x}, \bar{y})$ o centro de uma célula na quadrícula de referência e $\bar{u}' = p_1(\bar{x}, \bar{y})$ e $\bar{v}' = p_2(\bar{x}, \bar{y})$ as suas coordenadas na imagem original resultantes da transformação. Em geral não existe uma concordância entre $(\bar{u}', \bar{v}')$ e o centro $(\bar{u}, \bar{v})$ de algum pixel na imagem original. Chama-se *re-amostragem* à afectação de um valor a cada célula da quadrícula de referência a partir dos valores da imagem original. O valor atribuído à célula de centro $(\bar{x}, \bar{y})$ pode ser definido de uma das seguintes formas (ver Figura 3.6).

- *critério do vizinho mais próximo*: é o valor do pixel da imagem original com coordenadas mais próximas de $(\bar{u}', \bar{v}')$. Este critério não altera o domínio de valores da imagem. Se por exemplo os níveis radiométricos pertencerem ao conjunto $\{0, 1, \ldots, 255\}$ a imagem georreferenciada terá igualmente valores nesse conjunto.
- *critério de interpolação*: é uma combinação dos valores dos pixels da imagem original com centros mais próximos de $(\bar{u}', \bar{v}')$. Neste caso, o domínio de valores pode ser alterado. O critério de interpolação pode ser por exemplo bilinear (se depender apenas dos valores dos 4 pixels mais próximos) ou cúbico.

Avaliar a qualidade da transformação realizada. Se a transformação é adequada, os resíduos (ou desvios) entre as coordenadas originais e as coordenadas obtidas pela transformação são baixos.

O *erro posicional médio* da transformação pode ser calculado (1) ou sobre a imagem original, (2) ou relativamente ao sistema de referência. No primeiro caso, o erro é expresso em pixels da imagem original. No segundo caso, o erro posicional em pixels é convertido na unidade do sistema de coordenadas de referência (tipicamente em metros). Em qualquer um dos casos o erro médio é dado pela expressão abaixo (RMS é a notação para *root mean square*, ou seja, erro quadrático médio)

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\sum_{i \in S} \frac{e_{i_1}^2 + e_{i_2}^2}{n}} \tag{3.3}$$

na qual e_{i_1} e e_{i_2} são os resíduos para o ponto de controle i nas duas direcções coordenadas.

Podem ser construídos dois tipos de indicadores para a qualidade da transformação:

(a) desvio "real": em que RMS é calculado com um conjunto adicional de pontos de controlo que não foi usado para estimar os coeficientes da transformação;

(b) desvio "aparente": em que o RMS é calculado sobre o conjunto de pontos usados para definir a transformação.

Embora a alternativa (a) seja uma melhor forma de obter uma estimativa da precisão posicional da imagem georreferenciada, as aplicações de SIG tipicamente determinam o desvio aparente.

A técnica de georreferenciação com pontos de controlo deve ser portanto aferida em função do valor estimado de precisão posicional. O processo é iterativo e pode ser descrito pelo algoritmo seguinte.

(a) identificar um conjunto de n pontos de controlo S;

(b) determinar os coeficientes do polinómio da transformação por forma a minimizar RMS;

(c) Se RMS é aceitável, i.e. se é menor do que (idealmente, metade de) um pixel na imagem original, então realizar a transformação das coordenadas pelo critério escolhido (vizinho mais próximo ou interpolação);

(d) Caso, contrário, remover pontos de S com elevado desvio e/ou adicionar a S novos pontos de controlo e voltar a (b).

Na Figura 3.7 mostra-se o resultado da aplicação da técnica aos dados descritos na Figura 3.3.

Ortorrectificação. As transformações polinomiais de coordenadas não permitem corrigir as imagens para as irregularidades do relevo (ver Figura 3.9). Para tal, é necessário proceder à *ortorrectificação* da imagem com base na altimetria do terreno (através de um modelo digital de elevações) e na geometria de aquisição da imagem. 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:

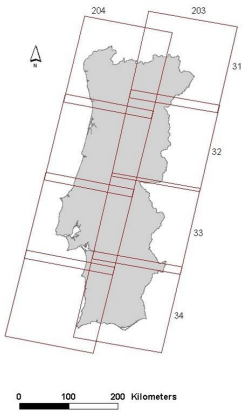


Figura 3.2: Conjunto de imagens Landsat que cobrem Portugal Continental. O GFOV destas imagens é de 185 km.

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.

Este procedimento é ilustrado pela Figura 3.8. O efeito da ortorrectificação numa área com um relevo moderado (diferença de cotas até 60 m) é ilustrado na Figura 3.9.

Em resumo, a técnica de georreferenciação com pontos de controlo é uma técnica empírica aceitável 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 deve ser corrigida usando modelos de geometria de aquisição da imagem e a técnica de georreferenciação com pontos de controlo deve ser usada complementarmente.

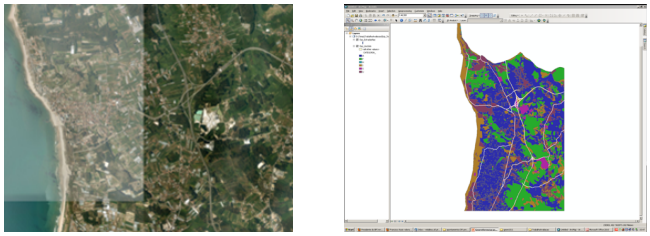


Figura 3.3: Imagem a integrar no conjunto de informação disponível no SIG.

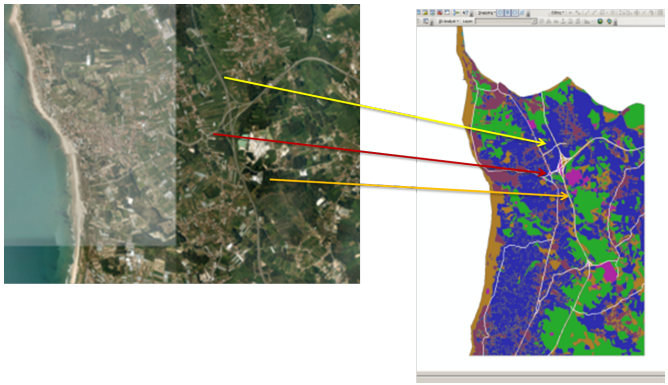


Figura 3.4: A técnica de georreferenciação com pontos de controlo baseia-se nos pares de coordenadas dos pontos na imagem a georreferenciar e no sistemas de coordenadas de referência.

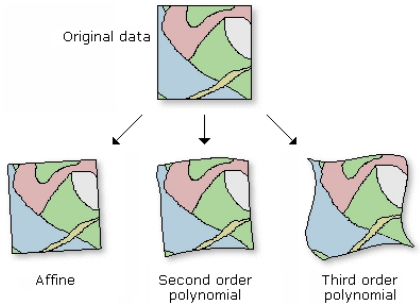


Figura 3.5: O tipo de transformação que pode ser realizada depende do grau do polinómio. `http://resources.esri.com/`, 24.04.2012.

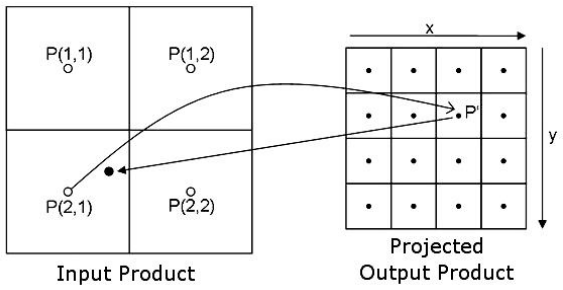


Figura 3.6: Ilustração da técnica de reamostrgem. À esquerda está a imagem original e à direita a quadrícula no sistema de coordenadas de referência. O ponto (•) de coordenadas $(\bar{u}', \bar{v}')$ é o resultado da transformação de $P' = (\bar{x}, \bar{y})$. Como esse ponto (•) está na célula $P(2,1)$ da imagem original, então pelo *critério do vizinho mais próximo* o valor dessa célula é atribuido à célula de P'. Pelo *critério de interpolação* o valor atribuído a P' seria uma média ponderada de $P(1,1)$, $P(1,2)$, $P(2,1)$ e $P(2,2)$. `http://brockmann-consult.de`, 16.04.2011

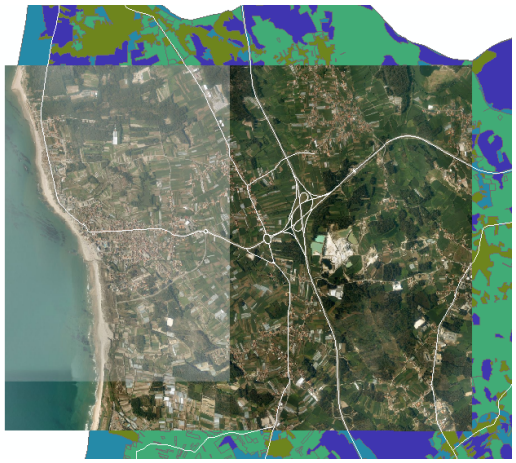


Figura 3.7: A imagem de alta resolução depois de georreferenciada com 10 pontos de controlo e uma transformação linear (polinómio de grau 1) de coordenadas. A re-amostragem é pelo critério do vizinho mais próximo.

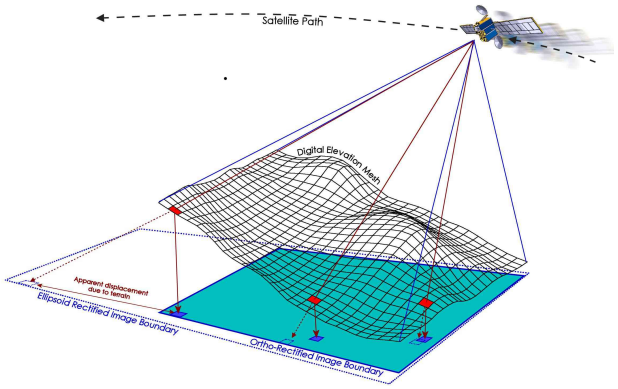


Figura 3.8: Ilustração do efeito combinado da geometria de aquisição da imagem e do relevo nas distorções sofridas pela imagem. Cada pixel deveria ser projectado verticalmente mas sofre um *deslocamento horizontal*. Se a elevação do pixel é h e o ângulo de observação zenital é θ então o deslocamento horizontal é aproximadamente $h \times \cot(\pi/2 - \theta)$ e cresce portanto com h. (`http://geoimage.com.au`).

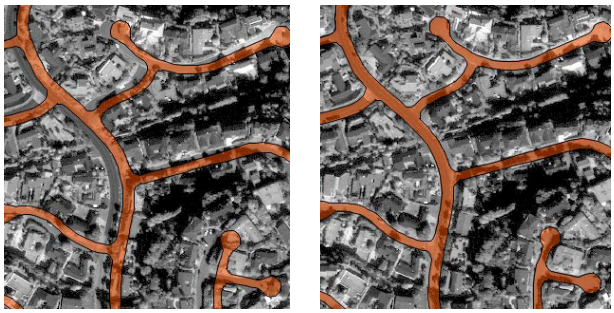


Figura 3.9: Esta imagem com resolução espacial de 1 m representa um terreno com variação de altitude da ordem de 60 m. Em colorido representa-se a localização correcta da rede viária. é esquerda está representada a imagem georreferenciada mas não ortorrectificada e é direita a mesma imagem ortorrectificada.

3.2 Correcções radiométricas e estimação de reflectâncias à superfície

□ *Nesta secção descreve-se um modelo simplificado que permite converter as imagens de detectores ópticos em grandezas físicas à superfície tais como radiância ou reflectância. Chama-se a atenção para as fontes de erro que esse processo pode conter, nomeadamente do que respeita ao efeito da atmosfera, recomendando-se a utilização de produtos de detecção remota pré-processados de forma rigorosa. (Cf. UC de Climatologia e Recursos Hídricos).*

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

O *histograma* de uma imagem é a distribuição das frequências dos valores dos pixels da imagem (ver exercício na página 88). Em modo multiespectral, o sensor adquire uma colecção de imagens, em bandas de comprimento de onda diferentes.

O objectivo da realização de correcções radiométricas é transformar os números digitais da imagem original em grandezas físicas tais como radiância, reflectância (em cada banda espectral) ou temperatura. Converter números digitais em grandezas físicas permite, em particular:

- 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.

As correcções radiométricas que serão descritas nesta secção são necessárias quando se usam imagens de valores digitais, não pré-processados radiometricamente. No entanto, estão disponíveis produtos de detecção remota já pré-processados de forma rigorosa, e validados, que fornecem estimativas de diversas grandezas biofísicas. Diversas organizações de diversos continentes

produzem e distribuem produtos desse tipo. Um dos conjuntos de produtos mais usados são os que são derivados do sensor MODIS, instalado em dois satélites de observação da terra, cuja descrição e acesso está disponível em

`https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table.`

Por exemplo, estão disponíveis produtos tais como as reflectâncias (valores diários ou compositos de 8 dias, em resoluções espaciais a partir de 250m), reflectâncias corrigidas para o efeito do BRDF (resolução $\geq$ 500m) temperatura e emissividade da superfície (resolução $\geq$ 1000m), albedo (resolução $\geq$ 500m), e ainda diversas variáveis biofísicas da superfície tais como índices de vegetação (ver Secção 4), produção primária bruta, cobertura do solo, densidade de vegetação, índice de área foliar ou áreas ardidas. Prevê-se que ainda em 2014 estejam disponíveis produtos de reflectância derivados de imagens Landsat 8 (com resolução de 30m).

Como foi discutido na Secção 1, a radiação solar que é medida pelo sensor sofre um conjunto de interações com a atmosfera e com a superfície. Para radiação de comprimento de onda inferior ao infravermelho médio a atmosfera tem influência na radiação no sentido descendente e no sentido ascendente. O sinal que atinge o sensor é portanto uma mistura de sinais da superfície e da atmosfera. Para isolar a contribuição da superfície é necessário modelar o efeito da atmosfera, o que é idealmente realizado através de um modelo de transferência radiativa. É comum distinguir os modelos para bandas de baixo comprimento de onda dos modelos para radiação térmica de maior comprimento de onda [6]. Estes tópico ultrapassa o programa do curso e por isso não é aprofundado neste texto.

Em seguida apresentam-se técnicas simples para pré-processamento de imagens de satélite cujo objectivo é ilustrar a sequência de efeitos a que a radiação está sujeita até ser captada pelo sensor. As operações de pré-processamento mencionadas visam corrigir as imagens para os seguintes efeitos: a calibração do sensor; a radiância de percurso e outros efeitos atmosféricos; os efeitos da geometria de aquisição das imagens; e o efeito da topografia na iluminação do terreno. O processo de conversão de números digitais em cada banda das regiões espectrais do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho médio em valores de radiância e finalmente de reflectância à superfície pode ser decomposto numa série de passos que se descrevem em seguida e que são ilustrados na Figura 3.10. A abordagem é semelhante a [4, Secção 6.6.2.3].

1. $L^{\text{sensor}} = \text{G} \times \text{ND} + \text{B}$;
2. $L^{\text{sensor}} = L^{\text{superficie}}\,\tau_v + L^{\text{percurso}}$;
3. $E^{\text{TOA}} = \frac{E^{\text{sol}}}{d^2}$;
4. $E^{\text{superficie}} = E^{\text{TOA}}\,\tau_s\,\cos\theta_s + E^{\text{difusa}}$ (se a superfície é plana); ou
   $E^{\text{superficie}} = E^{\text{TOA}}\,\tau_s\,\cos\theta_i + E^{\text{difusa}}$ (no caso geral);
5. $\rho = \pi\,\dfrac{L^{\text{superficie}}}{E^{\text{superficie}}}$ (válido apenas para superfícies lambertianas).

Conversão de números digitais em radiância "no sensor" L^{sensor} . A relação entre números digitais ND e L^{sensor} é linear. As constantes podem ser fornecidas alternativamente de duas formas:

1. ganho (G)e *bias* (B) para cada banda:

$$L_\lambda^{\text{sensor}} = \text{G} \times \text{ND} + \text{B} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}). \tag{3.4}$$

   Estas constantes estão tabeladas para cada sensor – ver por exemplo a Figura 3.11 que indica os valores dos parâmetros para as sete bandas espectrais do sensor ETM$^+$ e para a banda pancromática do mesmo sensor.

2. constantes de calibração L_{max}, L_{min}, $Q_{\text{cal}}^{\text{max}}$, $Q_{\text{cal}}^{\text{min}}$, sendo

$$L_\lambda^{\text{sensor}} = L_{\text{min}} + \frac{\text{ND} - Q_{\text{cal}}^{\text{min}}}{Q_{\text{cal}}^{\text{max}} - Q_{\text{cal}}^{\text{min}}}\,(L_{\text{max}} - L_{\text{min}}), (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$$

   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 (ver exercício na página 89).

Estimação da radiância de percurso L^{percurso}. Radiância de percurso (cujas unidades são $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) designa a componente da radiância que atinge o sensor e que corresponde a radiação que não é reflectida pela superfície. 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 como ilustrado pela Figura 1.22. As técnicas usadas para a estimação de L^{percurso} são as seguintes.

- 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), como por exemplo LOWTRAN, MODTRAN, 5S ou 6S.

O último grupo fornece, potencialmente, as estimativas mais precisas. No entanto, o estudo de modelos de transferência não está no âmbito deste texto. Assim, será apenas descrita a técnica do objecto escuro que é de aplicação mais simples, embora só seja aplicável quando existem na imagem objectos com grande absorção (por exemplo uma zona de água suficientemente profunda). Para tal é suficiente conhecer o valor mínimo de radiância no sensor em cada banda: o pressuposto é que o "objecto escuro" absorve toda a radiação que o atinge e não reflecte por isso radiação na direcção do sensor. Assim, o valor mínimo de radiância no sensor corresponde ao fluxo de radiação que não atinge a superfície e que é dispersa na atmosfera na direcção do sensor, correspondendo assim à "radiância de percurso". A Figura 3.12 e o Exercício 6 na página 90 descrevem a aplicação da técnica.

Estimativa da radiância "à superfície" $L^{\text{superficie}}$**.** A radiância "à superfície" pode ser estimada a partir da relação

$$L^{\text{sensor}} = L^{\text{superficie}}\,\tau_v + L^{\text{percurso}} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$$

em que τ_v é a transmitância atmosférica (adimensional) na direcção do sensor que depende das condições atmosféricas, da posição do sensor e do comprimento de onda. τ_v pode ser definido em cada banda da forma seguinte [4, Equação 6.27].

$$\tau_v = \exp(-\frac{\tau_{\text{ozono}} + \tau_{\text{aerossois}} + \tau_{\text{Rayleigh}}}{\cos\theta_v}), \tag{3.5}$$

em que θ_v é o ângulo zenital do sensor que determina o comprimento do trajecto da radiação na atmosfera.

Estimativa da irradiância no "topo da atmosfera" E^{TOA} **.** Para converter a radiância à superfície em reflectância é necessário conhecer a

irradiância à superfície. O primeiro passo é determinar a irradiância espectral "no topo da atmosfera" E^{TOA} para cada banda do sensor, que se calcula como

$$E^{\text{TOA}} = \frac{E^{\text{solar}}}{d^2} \quad (\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1})$$

em que E^{solar} é a irradiância espectral exoatmosférica tabelada para cada banda do sensor e d é a distância da terra ao sol em unidades astronómicas. Essa distância varia ao longo do ano e a sua variação máxima é aproximadamente 2%. Os valores de d para alguns dias do ano (numerados a partir do dia 1 de Janeiro – DOY) são indicados na Figura 3.13 e estão listados em [3]. Por exemplo, os valores de irradiância exoatmosférica para as bandas 1 a 5 e 7 do sensor Landsat-ETM$^+$ são, respectivamente 1997, 1812, 1533, 1039, 230.8, e 84.9 $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ [3]. Para a gama de comprimentos de onda da banda pancromática do mesmo sensor a irradiância espectral exoatmosférica é 1362 $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$.

Irradiância em superfícies horizontais $E^{\text{superficie horizontal}}$. 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 $E^{\text{superficie horizontal}}$ é semelhante para qualquer pixel da imagem, mas depende da banda. A transformação é então definida por

$$E^{\text{superficie horizontal}} = E^{\text{TOA}}\,\tau_s\,\cos\theta_s + E^{\text{difusa}} \quad (\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}), \qquad (3.6)$$

em que θ_s é o ângulo zenital solar que depende em particular da hora da aquisição da imagem e que condiciona o fluxo 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 espectral difusa que atinge a superfície. A transmitância τ_s pode ser descrita como na Equação 3.5, substituindo o ângulo zenital do sensor (θ_v) pelo ângulo zenital do sol (θ_s). E^{difusa} é maior para comprimentos de onda mais curtos. Para todo o espectro, varia em média entre 60 e 80W m^{-2}, ou seja, é aproximadamente 5% da irradiância exosférica para o conjunto do espectro (ver [8] para dados anuais recolhidos em Madrid).

Irradiância em superfícies não horizontais $E^{\text{superficie}}$. Se a superfície não é horizontal, a orientação da superfície relativamente é posição do sol

no momento da aquisição da imagem determina o fluxo de radiação que atinge uma parcela da superfície. Uma área com uma elevada exposição solar é mais iluminada e por isso reflecte um maior fluxo de radiação do que uma área com a mesma reflectância mas menos iluminada. A Figura 3.14 ilustra essa diferença. A grandeza que é usada para medir a geometria de iluminação é o ângulo de incidência zenital θ_i, isto é o ângulo formado pela direcção do sol e pela normal ao terreno no local (ver Tabela 1.3 na página 11). O ângulo de incidência pode ser estimado em cada local a partir do declive (θ_{local}), da orientação do local (ϕ_{local}), da posição do sol definida pelo ângulo zenital solar (θ_s) e pelo ângulo azimutal solar (ϕ_s) descritos nos metadados das imagens:

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

A Figura 3.15 compara as elevações e os cosenos dos ângulos de incidência numa determinada região para uma dada posição do sol. Para uma superfície perfeitamente lambertiana, $E^{\text{superficie}}$ é então dado pela expressão

$$E^{\text{superficie}} = E^{\text{TOA}}\,\tau_s\,\cos\theta_i + E^{\text{difusa}} \quad (\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}) \tag{3.7}$$

que difere da Equação 3.6 por substituição do ângulo zenital solar θ_s pelo ângulo de incidência zenital θ_i. Para superfícies não lambertianas, a Equação 3.7 tipicamente sobrecorrige $E^{\text{superficie}}$, principalmente quando o sol está baixo no horizonte.

Estimativa da reflectância em cada banda (adimensional). Para uma superfície lambertiana, uma única observação "cónica" de radiância L_λ é suficiente para inferir a emitância M_λ pois, como foi discutido na Secção 1.3,

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

Assim, a reflectância para superfícies lambertianas é dada pela Equação 1.4, ou seja,

$$\rho_\lambda = \frac{\pi\, L_\lambda^{\text{superficie}}}{E_\lambda^{\text{superficie}}}.$$

É importante observar que a generalidade das superfícies não são lambertianas. No caso em que o comportamento da superfície se afasta sensivelmente desse padrão, uma única observação do sensor (numa determinada

direcção) não é suficiente para obter uma boa estimativa da reflectância. A solução é dispor de observações de diferentes ângulos (ver discussão de resolução angular na página 44) ou dispor de um modelo de BRDF da superfície (ver Secção 1.2). Como foi referido anterormente, existem produtos de detecção remota – como o produto NBAR (*Nadir BRDF-Adjusted Reflectance*) do sensor MODIS com uma resolução espacial de 500m ou 1 km e que agrega observações de 16 dias do mesmo local segundo ângulos de observação distintos – que fornecem estimativas de reflectância para superfícies não lambertianas.

Em resumo, as manipulações efectuadas para converter números digitais em valores de reflectância nas bandas (assumindo que a superfície é lambertiana) correspondem a uma calibração de *números digitais* em valores de *radiância*, seguida por uma conversão de *radiâncias* em *reflectâncias*. Combinando as expressões discutidas atrás, obtem-se para cada banda de comprimento de onda (λ) a seguinte relação entre radiância no sensor ($L_\lambda^{\text{sensor}}$) e reflectância ($\rho_\lambda$)

$$\rho_\lambda = \frac{\pi}{\tau_{v,\lambda} \times \left(E_\lambda^{\text{TOA}}\, \tau_{s,\lambda}\, \cos\theta_i + E_\lambda^{\text{difusa}}\right)} \times (L_\lambda^{\text{sensor}} - L_\lambda^{\text{percurso}}) \qquad (3.8)$$

Em particular, para uma região de extensão reduzida com idênticas condições atmosféricas, a conversão de radiância no sensor $L_\lambda^{\text{sensor}}$ em reflectância ρ_λ é uma função de

- $L_\lambda^{\text{percurso}}$, E_λ^{TOA}, $E_\lambda^{\text{difusa}}$, $\tau_{v,\lambda}$ e $\tau_{s,\lambda}$, que só dependem da banda,
- $\cos\theta_i$, que só depende do pixel.

A Figura 3.16 faz uma comparação dos padrões de números digitais e das assinaturas espectrais determinadas a partir das reflectâncias estimadas para uma imagem multiespectral para quatro tipos de materiais à superfície. É visível que as assinaturas espectrais assim obtidas assemelham-se mais aos padrões obtidos em situações controladas (ver Figura 1.17 na página 26) do que os padrões de números digitais (não pré-processados).

3.3 Estimação da temperatura da superfície

□ *Os sensores que possuem uma ou mais bandas térmicas adquirem informação que pode ser usada para estimar a temperatura à superfície. Nesta*

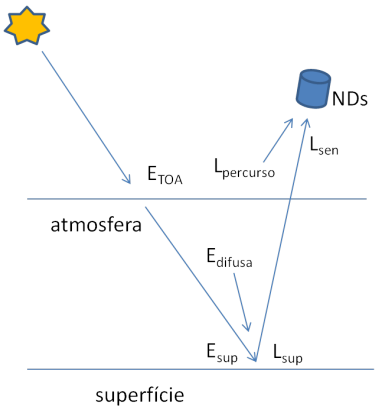


Figura 3.10: Sequência de grandezas envolvidas no percurso da radiação solar até ao sensor. Conhecendo L^{sup} e E^{sup} para cada banda, é possível então estimar a reflectância da superfície, supondo que a superfície é lambertiana.

$G_{rescale}$	$B_{rescale}$
(W/m² sr µm)/DN	W/(m² sr µm)
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 3.11: Coeficientes de ganho (G) e de *bias* (B) para as bandas 1 a 7 do sensor ETM$^+$; a última linha corresponde ao modo pancromático [3].

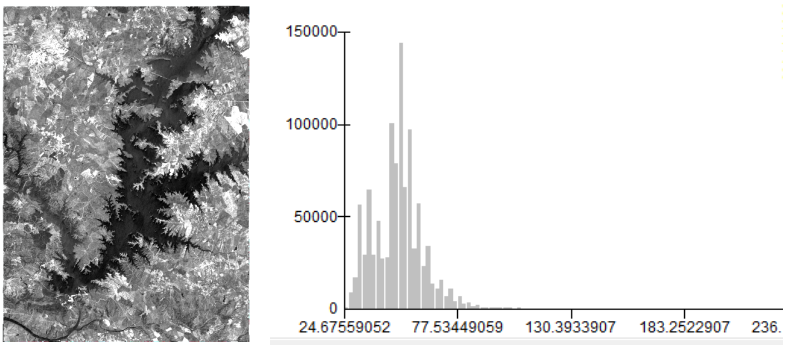


Figura 3.12: À esquerda está uma imagem da radiância "no sensor" da região espectral do verde. A imagem contém um "objecto escuro" que deveria ter uma radiância espectral próxima de zero. À direita está o histograma dessa imagem. O valor mínimo da banda (24.67 $\mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}}$) é a estimativa da radiância de percurso para essa banda.

DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	DOY	d	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 3.13: Alguns valores de d em unidades astronómicas em função do dia do ano DOY.

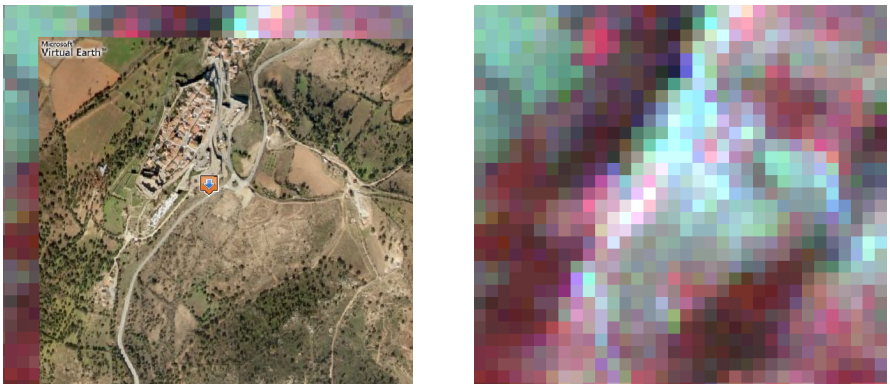


Figura 3.14: Na figura da esquerda observa-se Monsaraz, situado numa elevação. Na composição colorida de bandas de satélite do mesmo local, observa-se que as zonas orientadas para SE, mais iluminadas pelo sol, têm maiores valores na imagem do que as zonas viradas para NW. Neste caso, a orientação das encostas condiciona mais o sinal do que a ocupação do solo.

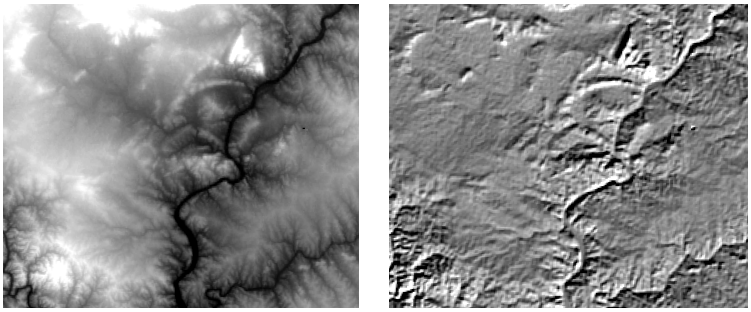


Figura 3.15: À esquerda o modelo digital de elevações de uma região. À direita o valor do coseno do ângulo de incidência zenital (θ_i) para a posição do sol definida por $\theta_s = 26.6^o$ e $\phi_s = 129^o$.

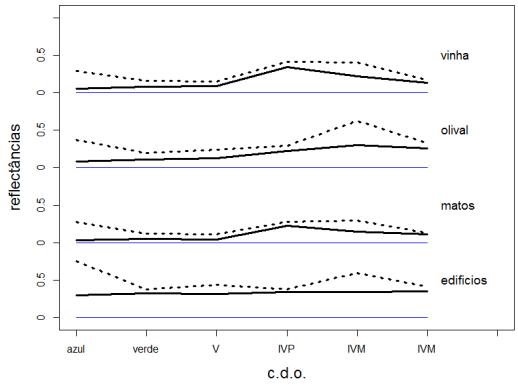


Figura 3.16: A traço contínuo estão representadas as assinaturas espectrais de 4 pixels de uma imagem Landsat TM. A traço descontínuo estão representados os padrões de números digitais. As assinaturas espectrais têm o padrão típico dos materiais enquanto que os números digitais incorporam outros efeitos (atmosfera, relevo, etc).

secção descreve-se um modelo simples para estimação da temperatura da superfície aplicável a uma única banda térmica e referem-se limitações e restrições práticas que esse tipo de técnicas têm.

Existem diversos procedimentos para estimar a temperatura da superfície a partir de imagens de satélite. Com uma única banda térmica (e.g. Landsat TM) é necessário conhecer a emissividade da superfície e as características da atmosfera através de outras fontes de informação. Com duas bandas térmicas (e.g. AVHRR e GOES) é necessário conhecer a emissividade da superfície mas já é possível determinar as características relevantes da atmosfera a partir das imagens. Finalmente, sensores com multiplas bandas térmicas (e.g. MODIS e ASTER) permitem obter simultaneamente estimativas de emissividade e de temperatura da superfície unicamente através das imagens (com erro $\approx 1^{o}$C numa resolução espacial de 1km) [6].

O princípio geral que permite estimar temperaturas a partir do sinal em bandas térmicas do sensor tem como base a Lei de Planck (ver Equação 1.2) e modelos de transferência de radiação na atmosfera para longos comprimentos de onda.

Para a região do infravermelho térmico, o sinal adquirido pelo sensor pode ser escrito (ver [1, Equação 1]) como a soma de três componentes: a radiação emitida pela superfície (que depende da sua temperatura), a radiação proveniente da atmosfera que é reflectida pela superfície e, finalmente, a radiação atmosférica na direcção do sensor. Esta última componente ($L_\lambda^\uparrow$), que não depende da temperatura da superfície, afecta de forma relevante o sinal no sensor. A principal dificuldade na estimação da temperatura da superfície através de detecção remota consite precisamente em obter uma boa estimativa de $L_\lambda^\uparrow$ para o momento de aquisição da imagem. Formalmente, a soma das três componentes da radiância no sensor pode ser escrita como:

$$L_\lambda^{\text{sensor}} = \left(\varepsilon_\lambda \, L_\lambda^{\text{corpo negro}}(T) + (1-\varepsilon_\lambda)\, L_\lambda^\downarrow\right) \tau_\lambda + L_\lambda^\uparrow \tag{3.9}$$

em que

- $L_\lambda^{\text{sensor}}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) é a radiância espectral no sensor
- ε_λ é a *emissividade* da superfície para o comprimento de onda λ (ver secção 1.1),
- $L_\lambda^{\text{corpo negro}}(T)$ é radiância espectral de um corpo negro à temperatura T,
- $L_\lambda^\downarrow$ é a radiância espectral devida à emissão e dispersão atmosférica na direcção da superfície,
- τ_λ é a transmitância atmosférica, e
- $L_\lambda^\uparrow$ é a radiância espectral devida à emissão e dispersão atmosférica na direcção do sensor.

Dado que os valores de emissividade para a região do infravermelho térmico são muitos próximos de 1 para cobertos naturais (ver Tabela 1.2), o termo $(1-\varepsilon_\lambda)\, L_\lambda^\downarrow$ tem uma influência reduzida sobre o valor da radiância no sensor $L_\lambda^{\text{sensor}}$.

Para uma banda térmica de um sensor correspondente ao intervalo de comprimentos de onda $[\lambda_1, \lambda_2]$, a radiância é dada aproximadamente[1] pelo

[1] A resposta do sensor em cada banda é descrita pela *função de resposta espectral* que não é perfeitamente uniforme sobre o intervalo de comprimentos de onda que caracteriza a banda.

integral

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

que depende da temperatura T (em graus K) da superfície.

Invertendo a relação anterior pode calcular-se a temperatura T de uma superfície a partir da radiação emitida pela mesma. Por exemplo, para a banda térmica do sensor Landsat-TM, obtem-se a relação seguinte (ver [3, Equação 3]).

$$T = \frac{c_2}{\ln(1 + \frac{c_1\,\varepsilon_\lambda}{L_\lambda^{\text{superficie}}})} - 273.15 \quad (^oC) \tag{3.10}$$

em que c_1 e c_2 são constantes (tabeladas) que dependem da banda. Note-se que para o mesmo $L_\lambda^{\text{superficie}}$, o aumento de ε_λ corresponde a uma diminuição de T.

Os termos τ, $L_\lambda^{\uparrow}$ e $L_\lambda^{\downarrow}$ na Equação 3.9 dependem das condições atmosféricas na altura de aquisição da imagem. A determinação desses parâmetros para imagens Landsat pode ser realizado através de uma ferramenta disponível em

`http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/`.

Os valores assim obtidos para τ, $L^{\uparrow}$ e $L^{\downarrow}$ permitem então estimar a temperatura da superfície com um erro em média inferior a 2 ^{o}C quando a emissividade é conhecida e quando as condições atmosféricas são de céu limpo [1]. A sensibilidade das técnicas baseadas numa única banda térmica como a referida acima aos parâmetros atmosféricos e à emissividade são ilustrados na Figura 3.17, em que é nítida a grande influência de uma incorrecta estimativa de $L_\lambda^{\text{superficie}}$ no cálculo da temperatura da superfície.

A Figura 3.18 mostra uma estimativa de temperaturas da superfície realizada a partir da banda 6 do sensor Landsat5-TM. Note-se que a *temperatura da superfície* é diferente da *temperatura do ar*, que é medida a uma altura entre 1.25 e 2 m do solo. As temperaturas da superfície podem tomar valores muito superiores à temperatura do ar, especialmente em zonas de solo descoberto ou zonas artificiais.

3.4 Exercícios

1. Considere que dispõe de um conjunto de temas num SIG com coordenadas "militares" (Hayford-Gauss-IGeoE) para uma dada região, entre

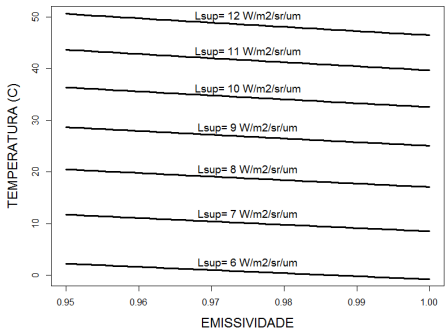


Figura 3.17: Ilustração da variação da estimativa de temperatura com o valor da emissividade (ε) e da radiância à superfície ($L^{\text{superficie}}$) para a banda térmica do sensor Landsat TM de acordo com a Equação 3.10 com $c_1 = 607.76$ e $c_2 = 1260.56$ [3]. Dado que a conversão de radiância no sensor (L^{sensor}) para radiância à superfície ($L^{\text{superficie}}$) depende das condições atmosféricas, a figura ilustra que erros na avaliação dos parâmetros da atmosfera ou da emissividade conduzem a erros significativos na estimativa de temperatura à superfície.

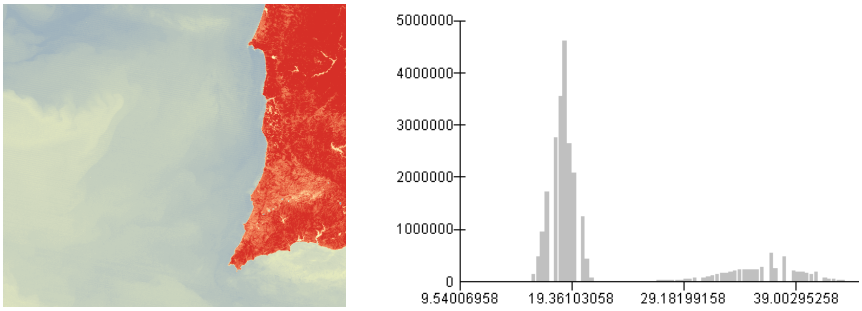


Figura 3.18: Para a banda térmica do sensor Landsat 5, as constantes da Equação 3.10 são $c_1 = 607.76$ e $c_2 = 1260.56$ [3]. O mapa de temperaturas (^oC) é derivado da banda 6 do sensor Landsat 5 TM na região sudoeste de Portugal para o dia 23 de Agosto de 2007. À direita mostra-se o respectivo histograma em que são evidentes as duas gamas de temperaturas correspondentes ao oceano e à região continental. Neste caso considerou-se $\varepsilon = 0.98$.

os quais se inclui um tema da rede viária e um tema de linhas de água. dispõe igualmente de uma imagem multiespectral de satélite com resolução espacial de 10 m da zona em questão. Pretende georreferenciar a imagem usando a técnica dos pontos de controlo.

(a) Qual informação necessita obter relativamente a cada ponto de controlo?

(b) Se realizar uma transformação das coordenadas da imagem $u = p_1(x, y)$, $v = p_2(x, y)$, em que p_1 e p_2 são polinómios de segundo grau, quantos pontos de controlo bem distribuidos pela imagem deve usar?

(c) Suponha que depois de aplicar a técnica, o erro quadrático médio (RMS) para os pontos utilizados é de 8.34 metros. Considera que esse erro é aceitável? Justifique.

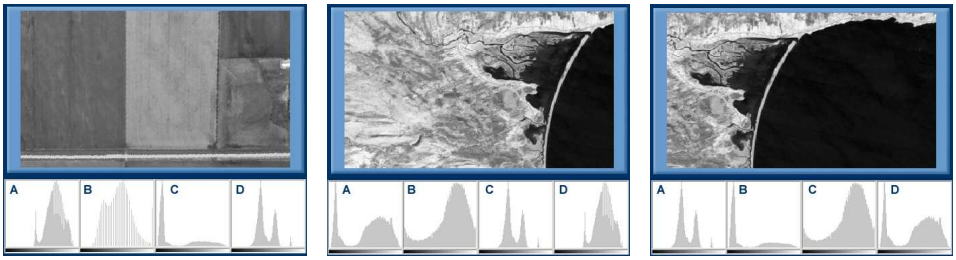
2. Suponha que pretende integrar uma imagem num SIG realizando uma georreferenciação com pontos de controlo.

(a) Qual é a principal dificuldade prática usualmente encontrada na aplicação dessa técnica?

(b) Que papel pode ter a recolha de coordenadas por um aparelho de posicionamento global (GPS) na aplicação da técnica referida?

(c) Suponha que a deformação que a imagem original tem que sofrer para ficar correctamente georreferenciada *não* pode ser aproximadamente representada por uma rotação, uma translação de coordenadas e mudanças de escala (por exemplo é uma imagem obtida segundo uma direcção de observação oblíqua acentuada). Que consequências tem tal facto na transformação de coordenadas a realizar e no número de pontos de controlo a escolher? Justifique.

3. Escolha o histograma correcto para as seguintes imagens. No eixo horizontal está indicada a intensidade dos pixels da imagem, dos valores mais baixos (mais escuros) à esquerda, para o valores mais altos (mais claros) à direita. No eixo vertical é indicado o número de pixels da imagem em cada intensidade. Assim a área de uma região do histograma é proporcional ao número de pixels com a correspondente gama de intensidades.



Solução: 1:D; 2:A; 3:B

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

banda	$L_{\max}$	$L_{\min}$	$Q_{\text{cal}}^{\max}$	$Q_{\text{cal}}^{\min}$
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	15.303	1.238	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. As resoluções são calculadas de acordo com o quadro abaixo.

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	$L_7 = -0.15 + \frac{54-1}{255-1}(16.5 + 0.15) = 3.3$

□

5. Considere um pixel de imagem Landsat 5 TM com números digitais 43 para a banda 3 (região do vermelho) e 112 para a banda 4 (IVP). Suponha que nessas bandas a radiância de percurso estimada é 12 $\mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}}\mu\mathrm{m^{-1}}$ e 2 $\mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}}\mu\mathrm{m^{-1}}$, e que a irradiância difusa é 15 $\mathrm{Wm^{-2}}\mu\mathrm{m^{-1}}$ 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 $23^{\mathrm{o}} = 0.401\mathrm{rad}$. Finalmente considere que $E^{\mathrm{TOA}} = 1536\mathrm{Wm^{-2}}\mu\mathrm{m^{-1}}$ para a banda 3 e $E^{\mathrm{TOA}} = 1031\mathrm{Wm^{-2}}\mu\mathrm{m^{-1}}$ para a banda 4 e que as transmitância 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.

6. Suponha que numa imagem SPOT-HRVIR de valores de radiância espectral no "sensor" para um região costeira têm as seguintes características:

   - o valor mínimo na banda $0.50 - 0.59\mu$m é 24 $\mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}}\mu\mathrm{m^{-1}}$, e
   - o valor mínimo na banda $0.61 - 0.68\mu$m é 12 $\mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}}\mu\mathrm{m^{-1}}$.

   (a) Indique uma justificação para essa diferença.

   (b) Que tipo de correcção sobre as imagens poderia realizar com base nesses valores?

7. 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 dispondo 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^{o}.

   (a) 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 20º é 0.3288. (Nota: *cos* 20º = 0.939).

(b) 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

$$\rho_B = M_B / E_B^{\text{superficie}},$$

em que M_B e $E_B^{\text{superficie}}$ são respectivamente a emitância e a irradiância em B.

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

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

Em seguida é necessário calcular M_B. Sabemos que as reflectâncias em A e B são iguais e por isso, admitindo que $E^{\text{difusa}} = 0$, e considerando os ângulos de incidência zenitais são $\theta_{i,A} = 0^{\text{o}}$ e $\theta_{i,B} = 20^{\text{o}}$,

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

Finalmente, a reflectância estimada pelo modelo simplificado para B é

$$\rho_B = \frac{0.939\, M_A}{E^{\text{TOA}}\, \tau_s\, \cos\theta_s} = 0.939 \times \frac{M_A}{E^{\text{TOA}}\, \tau_s\, \cos\theta_s}$$

ou seja 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 entre o verdadeiro valor de reflectância ($\rho = 0.35$) e a reflectância estimada pelo modelo simplificado para B ($\rho = 0.3288$) resulta de ser atribuido o mesmo ângulo de incidência zenital a A e B. □

Capítulo 4

Interpretação de imagens multiespectrais

□ *Nesta secção apresentam-se algumas formas simples de combinar os valores estimados de reflectância em cada banda do sensor. Por um lado podem ser criadas imagens que sintetizam informação de várias bandas tais como as composições coloridas ou os índices de vegetação. Por outro lado as assinaturas espectrais podem ser representadas no espaço das bandas. Aqui será apenas considerado o caso em que os espaço tem dimensão 2 e que as bandas são o* V *e o* IVP*.*

Como o seu nome indica, as imagens multiespectrais são representações multidimensionais dos pixels da imagem. A interpretação de imagens no espaço multiespectral não é tão imediata como a interpretação de imagens no espaço geográfico a duas dimensões e, por isso, requer técnicas de representação adequadas. A forma mais simples de interpretar imagens multiespectrais é por observação de *composições coloridas* dessas imagens, que permitem representar a informação de três bandas numa única imagem. As outras formas de representar imagens multiespectrais que serão abordadas sucintamente nesta secção consistem em (1) representar os pixels no espaço das bandas, e em particular no espaço das bandas correspondentes às regiões espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, com perda da representação no espaço geográfico, e (2) usar índices de bandas que permitem, tal como no caso das composições coloridas, combinar numa única representação geográfica a informação referente a diferentes bandas espectrais. Nos exemplos apresentados serão sempre usados valores de reflectância esti-

mados com base nas correcções descrita na Secção 3.2, ou seja serão usadas as assinaturas espectrais estimadas dos pixels.

4.1 Composições coloridas

Um composição colorida de bandas é uma associação de três bandas espectrais aos canais RGB de uma imagem colorida. É habitual distiguir um composição em *cor verdadeira*, que apenas combina informação da região espectral do visível, das composições em *falsa cor*, que tiram partido de informação de outras bandas, e que por isso contém em geral mais informação relevante para a interpretação das imagens. Especificamente,

- a composição é em cor verdadeira quando os canais RGB correspondem às regiões espectrais da radiação visível no vermelho, verde e azul. Por exemplo, uma composição RGB=321 para o sensor Landsat 5 TM é uma composição colorida composta pela banda 1 (azul) associado ao canal B da composição, pela banda 2 (verde) associado ao canal G da composição e pela banda 3 (vermelho) associado ao canal R da composição.

- a composição é em falsa cor caso contrário. As composições coloridas em falsa cor permitem incluir na composição colorida informação espectral de outras bandas e, em particular, da banda espectral do infravermelho próximo. Exemplos: composições RGB=432 ou RGB=742 do sensor Landsat 5 TM. Note que a notação "RGB=..." depende do sensor. Por exemplo, a composição em falsa cor RGB=432 do sensor Landsat TM corresponde aproximadamente à composição RGB=543 do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8, dado que este sensor tem uma banda adicional na região do azul.

Numa composição em falsa cor RGB=(IVP,Vermelho,Verde), exemplificada pela figura 4.1, 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.

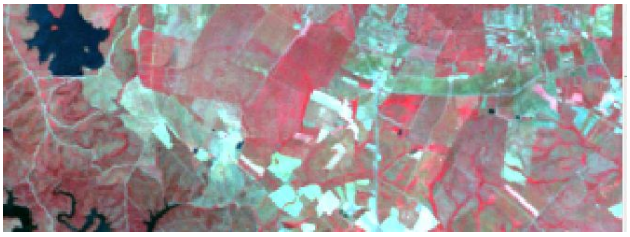


Figura 4.1: Composição colorida RGB=432 derivada de imagens de reflectância para as bandas do sensor Landsat 5 TM. Reguengos de Monsaraz, 20/05/2010.

4.2 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 $0.6 - 0.7$ μm) e do infravermelho próximo (aproximadamente $0.7 - 1.3$ μm) pois essas duas bandas fornecem uma grande quantidade de informação sobre o coberto (ver Secção 1.5). Um conjunto de pixels da imagem pode ser então representado com uma nuvem de pontos num referencial a duas dimensões (V,IVP), em que cada eixo corresponde a uma das duas bandas. Nesse caso, não é tida em consideração na representação a proximidade geográfica entre os pixels representados. Esse tipo de representação é ilustrado na Figura 4.2.

Os dados de satélite têm em geral uma boa resolução temporal e por isso é possível usar essas imagens para monitorizar a evolução de culturas ao longo do ciclo vegetativo. O tipo de representação descrito atrás pode ser usado para analisar a evolução temporal das assinaturas espectrais nas bandas consideradas. Por exemplo, na Figura 4.3, pode verificar-se que os dois tipos de coberto considerados (vinha e montado) descrevem uma determinada trajectória no plano V/IVP no decurso de um periodo de aproximadamente um ano. Essas trajectórias descrevem a evolução do ciclo vegetativo dessas culturas.

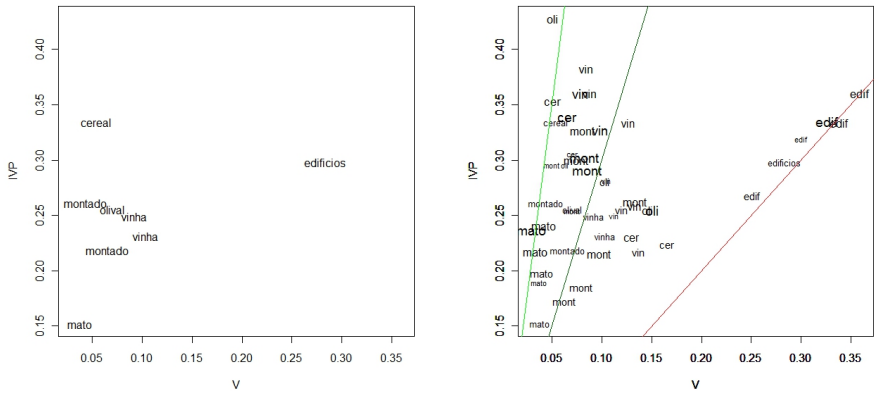


Figura 4.2: Representação de assinaturas espectrais de um conjunto de pixels correspondentes a diferentes ocupações do solo no plano V/IVP. Na figura da esquerda, as observações correspondem a uma única data. Na figura da direita as observações correspondem a diferentes datas do ano, e estão indicados alguns eixos para os quais a razão V/IVP é constante. Nessa figura *oli* represent olival, *cer* representa uma cultura cerealífera, *mont* representa montado, *vin* representa vinha e *edif* representa edifícios. Reguengos de Monsaraz, 20/05/2010.

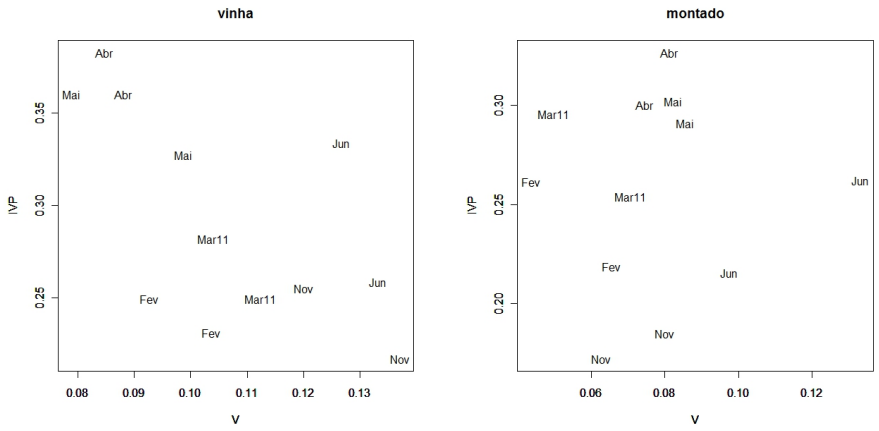


Figura 4.3: Evolução das reflectâncias nas duas bandas ao longo do periodo entre Fevereiro de 2010 e Março de 2011 para dois pixels de cada tipo de coberto na região de Reguengos de Monsaraz. Cada observação (V,IVP) é representada pela data da aquisição da imagem.

4.3 Índices de vegetação

No plano $(\mathrm{V}, \mathrm{IVP})$ podemos considerar as direcções radiais definidas pela relação $\mathrm{IVP} = c \times \mathrm{V}$ que correspondem por isso a razões constantes entre as reflectâncias nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo. A razão V/IVP designa-se por *índice de vegetação*. Pode verificar-se por observação da Figura 4.2 que alguns tipos de ocupação do solo localizam-se junto a rectas em que a razão V/IVP é constante. Nessa figura, distinguem-se tipos de ocupação do solo como "edifícios" que têm um razão V/IVP aproximadamente constante, e outros tipos de ocupação do solo, e em particular as culturas cerealífica e a vinha, em que existem variações importantes ao longo do ano.

Dado que a razão V/IVP pode tomar qualquer valor positivo, é habitual considerar índices que tomam valores num intervalo pré-determinado. Entre esses índices de vegetação, o mais divulgado é o índice NDVI (*normalized difference vegetation index*). Este índice é definido por

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

em que IVP e V são, respectivamente, as reflectâncias na região do infravermelho próximo e do vermelho. O índice NDVI tem várias propriedades entre as quais se destacam as seguintes.

1. NDVI toma sempre um valor entre -1 e 1. Esta propriedade deriva-se do facto de ambas as reflectâncias V e IVP serem não negativas.

2. Se V é proporcional a IVP então NDVI é constante. Por exemplo, se V = IVP então NDVI = 0. Esta propriedade resulta do facto de NDVI = k se e só se IVP = $\frac{-k-1}{k-1}$ V;

3. NDVI não está definido quando V =IVP =0. Dado que o NDVI não é prolongável por continuidade ao ponto V =IVP =0 então o índice é muito instável quando ambas as reflectâncias são próximas de zero;

4. Se se multiplicar V e IVP pela mesma constante, NDVI não é alterado.

A propriedade 2 implica que as rectas indicadas na Figura 4.2 correspondem a valores constantes de NDVI. De facto, a recta IVP = V corresponde a um valor NDVI = 0, a segunda recta mais inclinada de equação IVP = 3V corresponde a um valor NDVI = 0.5, e a recta mais inclinada de equação IVP = 7V corresponde a um valor NDVI = 0.75. Note-se que valores negativos de NDVI são pouco comuns dado que em geral a reflectância no infravermelho próximo é superior à reflectância na região espectral do vermelho. Alguns autores sugerem que valores de NDVI superiores a 0.5 correspondem a um coberto vegetal denso. A propriedade 3 significa que o índice é muito instável para pixels cujos valores em V e IVP estão muito próximos de 0, como acontece por exemplo numa zona inundada. A propriedade 4 justifica que na generalidade dos casos a correcção das imagens para o coseno do ângulo de incidência (ver Secção 3.2 e em particular a Equação 3.8 na página 80) é menos necessária para estimar o NDVI do que para estimar a reflectância de cada banda individual. Isto é explicado pelo facto de o factor de correcção $\cos\theta_i$, que depende do pixel, ser igual para as bandas V e IVP. Na Equação 3.8 da página 80 pode observar-se que $\cos\theta_i$ seria uma constante multiplicativa (independente da banda) se os termos $L_\lambda^{\text{percurso}}$ e $E_\lambda^{\text{difusa}}$ fossem nulos (o que é admissível para bandas de comprimento de onda não muito baixo, como a banda V e, principalmente, para a banda IVP). Assim, o uso do índice de vegetação pode ser na prática usado mesmo quando não se dispõe de um modelo digital de elevações da região a analisar.

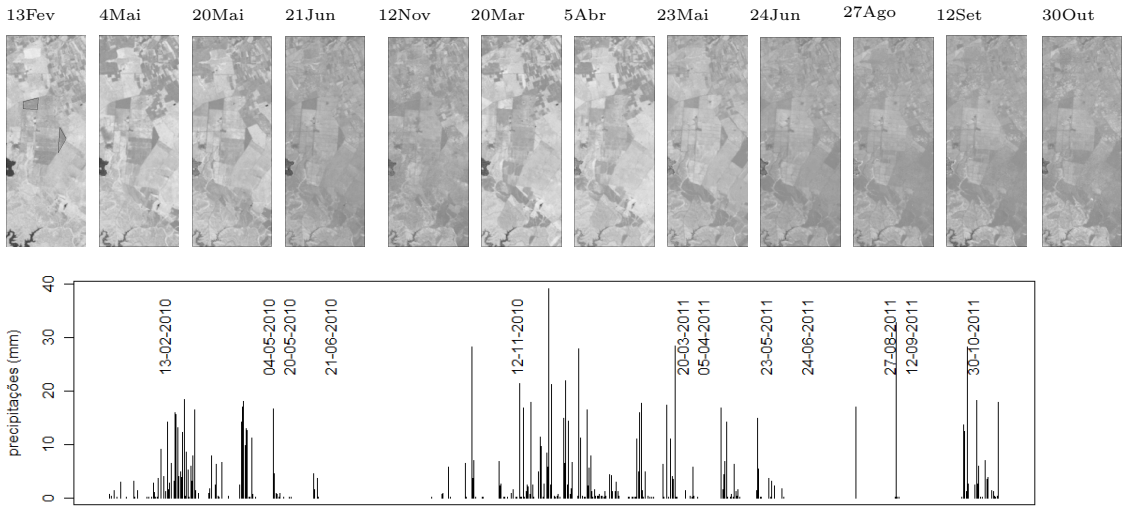


Figura 4.4: Série temporal de imagens de NDVI para os anos 2010 e 2011 numa zona próxima de Reguengos de Monsaraz (as cores mais claras representam valores mais elevados de NDVI). O gráfico de barras representa a precipitação diária medidos na Herdade do Esporão. As duas zonas assinaladas na imagem de 13 de Fevereiro são de vinha recentemente instalada e não exibem por isso o mesmo padrão temporal de outras parcelas agrícolas.

A construção de imagens de NDVI é usada para monitorizar a evolução temporal do coberto, especialmente em zonas cultivadas ou florestadas. Na Figura 4.4 mostra-se a evolução desse índice ao longo de um ano para uma zona próxima de Reguengos de Monsaraz, entre Fevereiro 2010 e Outubro de 2011. Nessa figura também é representado o padrão de precipitação dado que a evolução dos índices de vegetação em áreas não cultivadas ou de culturas de sequeiro tem em geral uma forte dependência da precipitação.

4.4 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, um pixel com assinatura espectral $\mathbf{x} = (.08, .12, .10, .32, .25, .22)$ pode ser representado num espaço de dimensão 6: o espaço das reflectâncias nas 6 bandas do sensor. Os pixels da imagem formam então uma nuvem de pontos nesse espaço. É natural supor que pixels correspondentes à mesma ocupação do solo no terreno estejam concentrados numa determinada região 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, i.e. que têm assinaturas espectrais semelhantes. O resultado é uma regra de afectação de cada pixel da imagem a uma classe, sendo assim definida uma carta de ocupação do solo. Há uma grande diversidade de técnicas de classificação (também conhecido por 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 o próprio agrupamento dos pixels que determina as classes.

Uma 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. Como ilustração considere-se por exemplo que uma imagem multiespectral com 6 bandas cobre uma zona com dois tipos de ocupação do solo: "floresta" e "matos". Suponha que para essa zona a assinatura espectral média para a classe "floresta" é $\mathbf{x}_{\text{floresta}} = (.08, .12, .10, .32, .25, .22)$ e que a assinatura espectral média da classe "matos" é $\mathbf{x}_{\text{matos}} = (.10, .14, .25, .25, .23, .25)$. Cada pixel da imagem, com assinatura espectral $\mathbf{x}$, pode então ser associado à classe cuja distância $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{floresta}}) = ||\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{floresta}}||$ ou $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{\text{matos}}) = ||\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{matos}}||$ for menor.

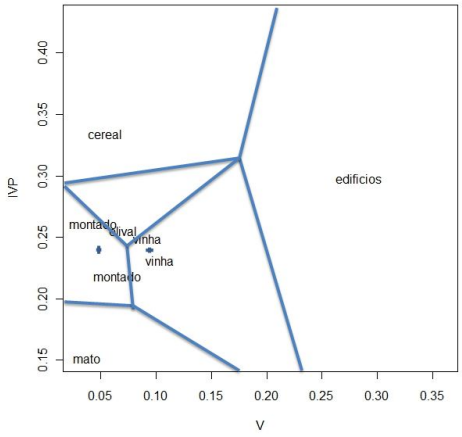


Figura 4.5: Exemplo hipotético de regiões de decisão no espaço das assinaturas espectrais (neste caso as assinaturas consistem apenas nas reflectâncias em duas bandas: vermelho e infravermelho próximo). Cada pixel da imagem corresponde a um ponto no referencial e é classificado pelo critério da *distância mínima às médias* a uma das classes indicadas na figura.

Para aplicar a técnica basta poder estimar a assinatura espectral média para cada classe. Para tal é necessário dispor de uma amostra representativa de pixels das classes , recolher as assinaturas desses pixels e calcular a sua assinatura média em cada classe. Para duas bandas, é fácil entender como é que os pixels são associados a cada classe. Na Figura 4.5 mostra-se como o espaço das assinaturas espectrais pode ser dividido em regiões, cada qual associada a uma classe de ocupação do solo.

Todas as técnicas de classificação permitem obter de forma relativamente expedita cartas de ocupação do solo. No entanto, contém na generalidade dos casos erros de classificação. Esses erros devem ser avaliados por forma a obter medidas precisão para cada classe considerada. Este tópico não é desenvolvido aqui por ultrapassar o âmbito do programa da UC.

4.5 Exercícios

1. 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

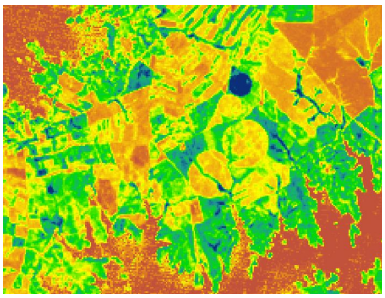
e 7 (infravermelho médio) de dois pixels de uma imagem Landsat TM do final do verão de uma região onde existe pinhal, e culturas anuais de sequeiro.

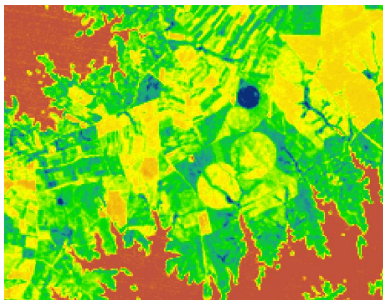
(a) Qual das assinaturas espectrais deverá corresponder a uma parcela de terreno coberta pela cultura anual de sequeiro e qual deverá corresponder a uma parcela de pinhal? Justifique.

(b) 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.

(c) Determine os valores do índice de vegetação NDVI para as assinaturas a e b.

2. As seguintes imagens correspondem à razão $\frac{\text{IVP}-\text{V}}{\text{IVP}+\text{V}}$. Numa das imagens, IVP eV correspondem às bandas originais do sensor (números digitais) e na outra correspondem a reflectâncias. A zonas mais avermelhadas (canto superior esquerdo e parte inferior direita da imagem) correspondem a zona inundada. Indique, justificando, a correspondência correcta.

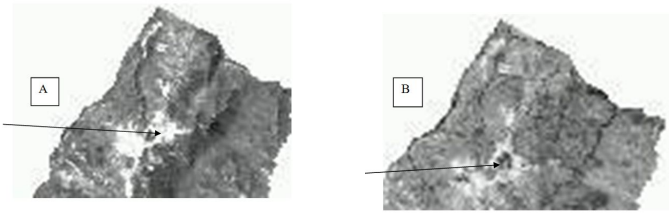




3. A imagem A abaixo representa os valores de números digitais no IVP para uma região montanhosa em Portugal (no verão). A imagem B representa a razão $\frac{\text{IVP}-\text{V}}{\text{IVP}+\text{V}}$ em que V e IVP são os números digitais das bandas respectivas para a mesma região.

(a) Que tipo de ocupação do solo poderá ocorrer na região assinalada nas imagens (com valores elevados em A e valores baixos em B)? Justifique.

(b) Na imagem B o efeito do relevo é mais atenuado do que na imagem A. Como explica esse facto?



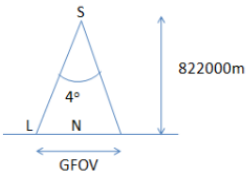
Capítulo 5

Exercícios resolvidos

1. (Exame de 24 de Junho de 2011) Considere um sensor com as seguintes características: resolução espacial de 20m no modo multiespectral, altitude da órbita de 822km, campo de visão (FOV) de 4 graus em observação vertical.

   (a) Considerando, como simplificação, que a superfície é horizontal, determine a largura da imagem (GFOV) adquirida pelo sensor.

   Resolução. Considere-se o triângulo rectângulo SNL da figura abaixo. Para esse triângulo verifica-se a relação $\tan(2^o) = (\text{GFOV}/2)/822000$. Assim, GFOV = 57409.75m.

   □

   (b) Considere que uma parcela de terreno de uma zona agrícola no Ribatejo, em Maio, correspondente a um pixel de uma imagem do sensor, tem assinatura espectral com valor 0.14 na banda 2 (0.61-0.68μm) e com valor 0.35 na banda 3 (0.79-0.89μm). Suponha ainda que a irradiância espectral à superfície nessa parcela no

momento de aquisição da imagem é de 1150 $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ na banda 2 e de 810 $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ na banda 3 e que a superfície é horizontal e lambertiana.

i. Estime o valor da radiância espectral à superfície na banda 2 e na banda 3 para a parcela? Indique as unidades na resposta.

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

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

em que $L^{\text{superficie}}$ representa a radiância espectral à superfície ($\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$) e $E^{\text{superficie}}$ representa a irradiância solar espectral à superfície ($\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$). Então, para a banda 2, $L^{\text{superficie}} = 0.14 \times 1150/\pi = 51.248\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$ e, para a banda 3, $L^{\text{superficie}} = 0.35 \times 810/\pi = 90.24\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$. □

ii. Determine o valor do índice de vegetação NDVI para essa parcela e interprete o seu valor.

Resolução. O índice de vegetação NDVI é definido pela expressão NDVI =(IVP-V)/(IVP +V), em que IVP é a reflectância na região espectral do infravermelho próximo e V é a reflectância na região espectral do vermelho. Para o sensor em causa, IVP corresponde à reflectância na banda 3 e V corresponde à reflectância na banda 2. Assim, NDVI =(0.35-0.14)/(0.35+0.14)=0.4285. Dado que o valor é próximo de 0.5 (é sabido que o valor de NDVI varia em geral entre um valor próximo de 0 que corresponde a um coberto sem vegetação verde, até um valor máximo de 1), é aceitável concluir que a parcela tem cobertura vegetal em bom estado vegetativo, sendo por exemplo uma cultura anual em conforto hídrico não muito densa, ou um povoamento florestal denso. □

(c) Suponha que é construída uma composição colorida RGB=321 da imagem do Ribatejo com as duas bandas indicadas atrás e ainda

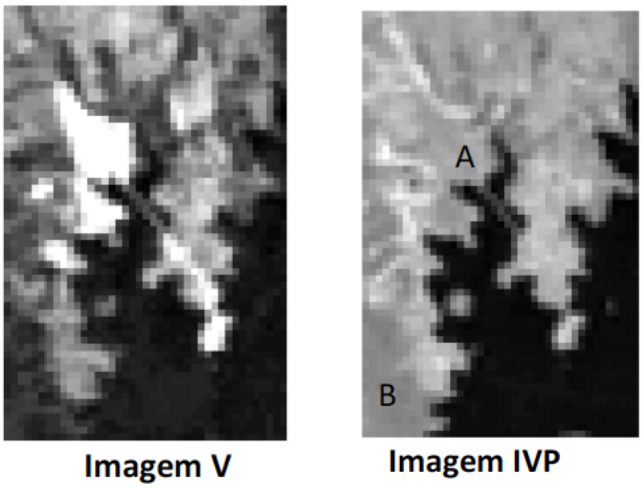
com a banda 1 (0.50-0.59 μm). Qual a coloração que essa parcela deve ter nessa composição colorida? Justifique a sua resposta.

Resolução. A banda 1 corresponde à região espectral do verde. Se a parcela for de vegetação como os comentários anteriores indicam, então a sua assinatura espectral típica (padrão de reflectâncias) deverá ter um valor moderado ou baixo na banda 1 (um pouco superior a 0.14) , o valor de 0.14 indicado acima para a banda 2, e o valor indicado acima de 0.35 na banda 3. Assim, a composição colorida será dominada pela banda 3 associada ao canal R da composição (cor vermelha), devendo ter portanto uma coloração avermelhada. □

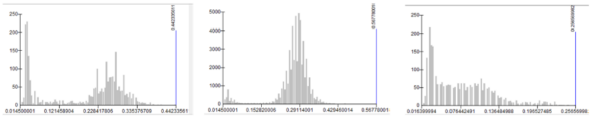
2. (Exame de 8 de Julho de 2011) Considere as imagens seguintes que representam a reflectância da superfície e que foram determinadas a partir de uma imagem de satélite obtidas no final da primavera numa região do Alentejo por um sensor com resolução espacial de 30 m para essas imagens. A imagem da esquerda representa a reflectância na gama de comprimentos de onda de 0.63 a 0.69 μm e a imagem da direita representa a reflectância na gama de 0.76 a 0.90 μm. Os valores num pixel na zona assinalada por A são respectivamente 0.213 e 0.258 e os valores num pixel na zona assinalada por B são respectivamente 0.056 e 0.229.

Observação 1: nos dois casos a cor branca corresponde a valores de reflectância mais elevados.

Observação 2: a mesma tonalidade de cinzento não corresponde ao mesmo valor de reflectância nas duas imagens dado que cada imagem é apresentada por forma a maximizar o seu contraste.



(a) Associe cada uma das duas bandas a um dos histogramas indicados abaixo. Justifique a sua escolha.



Resolução. A imagem V tem um grande número de pixels com valores muito baixos (escuros), e um grande número de pixels com valores altos (a claro), tendo um número reduzido de valores intermédios e está por isso associada ao histograma da esquerda. A imagem IVP tem igualmente um elevado número de pixels escuros, mas uma maior gradação de tons de cinzento, de escuro para claro, correspondendo por isso ao histograma da direita. □

(b) Diga qual das zonas assinaladas, A ou B, estará associada a maiores valores do índice de vegetação NDVI. Justifique apresentando os cálculos que tem que efectuar.

Resolução. Para o pixel da zona A, o valor do índice é (0.258-0.213)/ (0.258+0.213) que é aproximadamente 0.1, ou seja um valor baixo de NDVI. Para a zona B, o valor do índice é (0.229-0.056)/(0.229+0.056) que é aproximadamente 0.6. Assim, a região

B está associada a maiores valores de NDVI. □

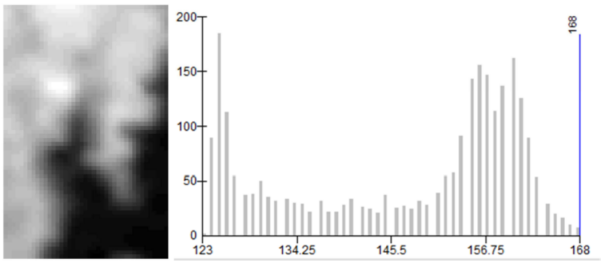
(c) Associe as zonas indicadas por A e B nas imagens a um dos seguintes tipos de coberto: solo descoberto, água, cultura anual de regadio, zona de mato denso. Justifique a sua resposta.

Resolução. Pela alínea anterior, pode concluir-se que a zona A terá uma cobertura com pouca vegetação. Das duas escolhas possíveis, pode excluir-se "água" que teria valores próximos de 0 de reflectância no IVP. Sendo assim, a resposta para A é "solo descoberto". A zona B terá vegetação. É mais provável que seja "mato denso" pois se fosse uma parcela de uma "cultura anual de regadio" nessa época do ano, esperar-se-ia observar valores maiores de reflectância no IVP do que os valores observados (que estão essencialmente abaixo de 0.20 de acordo com o histograma da direita). □

(d) Sabendo que o satélite observa a superfície a uma altitude de 705 km, determine o valor do campo de visão instantâneo (IFOV) do sensor para as imagens V e IVP.

Resolução. O campo de visão (IFOV) é duas vezes o (menor) ângulo definido pelo triângulo rectângulo cuja altura é 705000m e cuja base é 15m (metade do GIFOV). Assim, IFOV $= 2 \times \arctan(15/705000) = 0.002438118^{\circ}$. □

(e) O mesmo sensor adquire informação na banda 10.4 a 12.5 μm. Para a mesma região, são representados na figura abaixo os números digitais da imagem nessa banda espectral e o respectivo histograma. A que se deve a diferença de resolução espacial relativamente às imagens anteriores? Que tipo de informação da superfície pode ser derivada dessa banda? Responda a essas questões fazendo referência às variáveis relacionadas pela Lei de Planck.



Resolução. A Lei de Planck relaciona o fluxo de radiação emitida por um corpo negro com a temperatura do corpo e com o comprimento de onda dessa radiação. Quanto maior o comprimento de onda, menor é a emitância (Wm^{-2}). Quanto maior a temperatura, maior é a emitância. Na banda 10.4 a 12.5 μm (banda térmica) o sensor capta essencialmente radiação de longo comprimento de onda emitida pela superfície, ao contrário do que ocorre nas bandas de menor comprimento de onda, em que o sensor capta essencialmente radiação de baixo comprimento de onda reflectida pela superfície. Dado o menor fluxo de energia disponível, à radiação de longo comprimento de onda está portanto associada uma pior resolução espacial, como é visível na comparação das imagens no enunciado com a imagem acima correspondente à banda térmica. A informação que pode ser derivada a partir dessa banda (térmica) por inversão da lei de Planck é a temperatura da superfície. □

3. (Exame de 14 de Junho de 2012) O seguinte quadro, obtido em

   `http://www.itc.nl/research/products/sensordb/`

   descreve algmas características do sensor HRG (high resolution geometric) a bordo do satélite SPOT-5.

Band	Wavelength (μm)	Bandwidth (μm)	Resolution (m)	Swath width (km)	Revisit time (days)
Band 1 (VIS)	0.5 to 0.59		10	60	5
Band 2 (VIS)	0.61 to 0.68		10	60	5
Band 3 (NIR)	0.79 to 0.89		10	60	5
Band 4 (SWIR)	1.58 to 1.75		20	60	5
Band PAN (VIS)	0.48 to 0.71		5 (2.5)	60	5

(a) Indique os dois modos de obtenção de imagens desse sensor e caracterize a sua resolução espectral.

Resolução. Os dois modos de obtenção de imagens são o modo pancromático e o modo multiespectral. A resolução espectral é de 1 banda de c.d.o. entre .48 e .71μm para o modo pancromático e é de 4 bandas com gamas de c.d.o respectivamente 0.5-0.59μm, .61-.68μm, .79-.89μm e 1.58-1.75μm para o modo multiespectral. □

(b) Indique, justificando, que bandas do sensor deveria usar se o objectivo da análise dos dados sobre uma determinada área rural fosse: (a) Construir, por digitalização sobre a imagem, um cdg com a localização de edifícios; (b) Monitorizar o estado vegetativo de culturas anuais instaladas nessa área.

Resolução. Para digitalização dos edifícios seria melhor usar a banda com a melhor resolução espacial, ou seja, usar a banda pancromática. Para monitorização do estado vegetativo das culturas anuais, as bandas mais úteis são a banda 2 correspondente à região do "vermelho" no espectro electromagnético em que há elevada absorção da radiação pelos pigmentos vegetais, e a banda 3 correspondente à região do infravermelho próximo que é reflectida pelas folhas. Estas bandas podem ser usadas por exemplo para cálculo de um índice de vegetação (e.g. NDVI) que pode ser útil para realizar a monitorização pretendida. □

(c) Suponha que um determinado pixel da banda 3 tem um valor de radiância espectral no sensor de 90 $\mathrm{Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}}$ e que a irradiância espectral à superfície nessa banda na altura de aquisição da imagem é de 900 $\mathrm{Wm^{-2}\mu m^{-1}}$. Suponha ainda que a transmitância atmosférica na direcção do sensor nessa banda do espectro é de 0.91. Com base na informação de que dispõe estime a reflectância da parcela de terreno correspondente a esse pixel da imagem.

Resolução. Dada a informação disponível a estimativa da reflectância que pode ser feita é simplesmente

$$\pi\, L^{\text{superficie}} / E^{\text{superficie}},$$

em que $L^{\text{superficie}}$ é a radiância à superfície e $E^{\text{superficie}}$ é a irradiância à superfície. Esta expressão é válida para superfícies lambertianas. A radiância à superfície pode ser estimada a partir da relação

$$L^{\text{sensor}} = \tau\, L^{\text{superficie}} + L^{\text{percurso}}$$

em que $\tau = 0.91$ é a transmitância atmosférica na direcção do sensor. Como a banda corresponde à região do infravermelho próximo, de comprimento de onda maior do que na região do visível, é razoável considerar que a radiânca de percurso L^{percurso} é nula e que, portanto

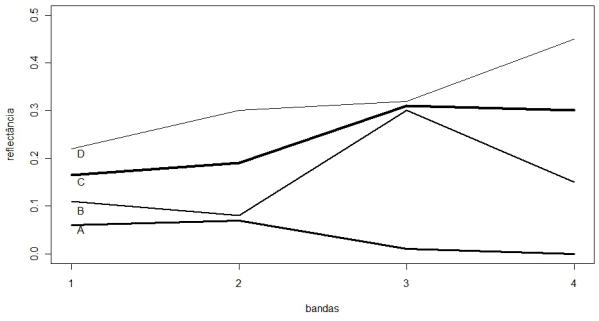
$$L^{\text{superficie}} = L^{\text{sensor}}/\tau = 90/0.91 = 98.9\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}.$$

Assim, a reflectância é

$$\rho = \pi \times 98.9/900 = 0.3452.$$

Esta estimativa é baseada no pressuposto de que a superfície é lambertiana e de que não há radiância de percurso na banda 3. □

(d) Considere as seguintes assinaturas espectrais (A, B, C e D) nas bandas 1 a 4 do sensor. Sugira, justificando, qual das assinaturas espectrais deverá corresponder a um pixel de (1) solo descoberto, (2) água profunda, (3) cultura anual de regadio e (4) olival no verão.



Resolução. Para interpretar as curvas é importante ter presente

que as bandas 1 e 2 correspondem à região do visível (verde e vermelho), a banda 3 corresponde ao infravermelho próximo (IVP), e a banda 4 corresponde ao infravermelho médio. A curva A é tipicamente a curva de reflectância de água (2) que absorve a maior parte da radiação que a atinge. A curva B corresponde à assinatura espectral de vegetação em bom estado vegetativo (3) com uma elevada absorção na região do vermelho e uma elevada reflectância na região do IVP. A curva D, em que a reflectância cresce com o comprimento de onda poderá corresponder a uma assinatura de solo descoberto (1). Finalmente a curva C é uma situação intermédia entre B e D, o que pode corresponder a uma mistura de solo descoberto e vegetação. Essa situação é consistente com a ocupação de olival no verão (4) à resolução espacial das imagens (10m a 20m). □

(e) Que coloração terá um pixel com assinatura B da figura da alínea anterior numa composição colorida RGB=432 para as imagens deste sensor? Justifique.

Resolução. Numa composição RGB=432 para o pixel com assinatura espectral correspondente à curva B, o canal G (green) será o que tem maior sinal (corresponde à banda 3), o canal B (blue) terá o sinal mais fraco, e o canal R (red) terá também um sinal intermédio mas fraco também. Assim a coloração do pixel será dominada pela cor verde. □

4. (Exame de 28 de Junho de 2012) No quadro abaixo indicam-se algumas características do sensor GeoEye 1. Esse sensor adquire as imagens de muito boa resolução que são usadas para definir as composições coloridas em cor verdadeira que estão disponíveis em `http://maps.google.com/`.

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) Defina a composição colorida das bandas do sensor nas imagens disponíveis em `http://maps.google.com/`. Responda usando a notação "RGB= ´´ apresentada nas aulas.

Resolução. A composicao é em cor verdadeira, ou seja, os canais da composição colorida estão associados às bandas das regiões espectrais respectivas. Assim a composição é RGB=321. □

(b) Defina o significado do valor 1.65m para a resolução espacial.

Resolução. Resolução espacial é a dimensão da projecção vertical sobre a superfície do campo de visão instantâneo (IFOV) do sensor. O seu valor é aproximadamente o comprimento do lado de uma parcela do terreno que corresponde a um pixel da imagem quando a observação do sensor é vertical (i.e. na direcção do nadir). □

(c) Defina o significado do valor 15.2 km para o campo de visão projectado (GFOV ou "swath width").

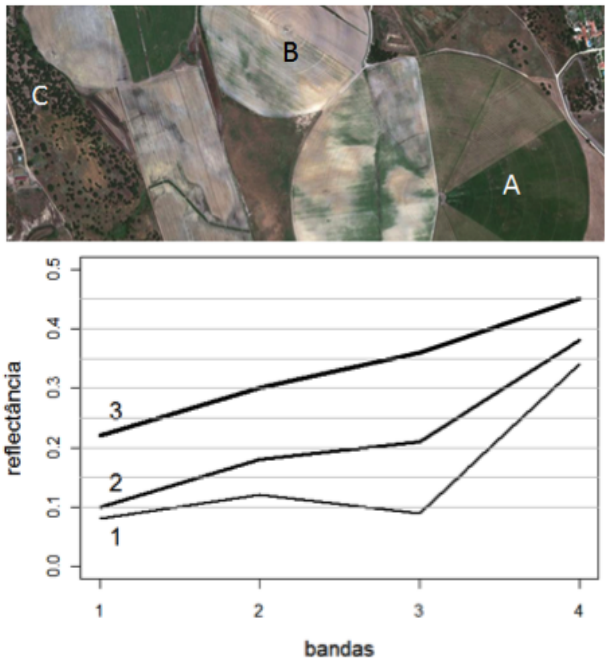
Resolução. Este valor corresponde à largura da imagem à superfície captada pelo sensor ao longo da sua órbita. □

(d) Considera que este sensor é adequado para realizar uma monitorização da evolução de culturas anuais ao longo do seu ciclo vegetativo com uma elevada frequência temporal? Justifique.

Resolução. Dado que a largura de imagem é apenas 15.2km, a resolução temporal do sensor, i.e. o número de dias entre observações sucessivas do mesmo local, é elevada. Por essa razão, este tipo de imagens não é adequado para a monitorização de plantas com um ciclo vegetativo curto. □

(e) Considere a impressão abaixo (em tons de cinzento) de uma imagem extraída de `http://maps.google.com/` e o gráfico à direita de assinaturas espectrais para o sensor GeoEye1. Determine aproximadamente o valor do índice de vegetação NDVI para cada assinatura espectral (1, 2 e 3). Estabeleça uma associação entre cada um dos pontos assinalados (A,B,C) e as três assinaturas espec-

trais. Justifique.



Resolução. O índice NDVI é calculado a partir da banda do infravermelho próximo (banda 4) e da banda do vermelho (banda 3). Para as 3 assinaturas espectrais representadas, os valores aproximados de reflectância nessas bandas e o correspondente NDVI são

assinatura	banda 3 (V)	banda 4 (IVP)	NDVI
1	0.09	0.34	$\frac{.34-.09}{.34+.09} = 0.581$
2	0.21	0.38	$\frac{.38-.21}{.38+.21} = 0.29$
3	0.36	0.45	$\frac{.45-.36}{.45+.36} = 0.11$

O local A corresponde a agricultura de regadio em bom estado vegetativo e deve por isso corresponder à assinatura 1 (com um elevado valor de NDVI). O local B está no momento de aquisição da imagem com pouca vegetação e deverá por isso ter a assinatura com os maiores valores de refectância e com um NDVI mais baixo, o que corresponde à assinatura espectral 3. O local C é uma situação intermédia entre A e B (uma mistura de vegetação e de

solo descoberto) ao qual pode corresponder a assinatura espectral 2. □

5. (Exame de 11 de Junho de 2013) O seguinte quadro, obtido em

   `http://www.itc.nl/research/products/sensordb/`

   descreve 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 passado. 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	

   Considere

   (a) 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"?

   Resolução. O primeiro sensor tem 9 bandas nas regiões espectrais do visível (bandas 1 a 4, e 8), do infravermelho próximo (banda 5), e do infravermelho médio (6, 7 e 9). Os intervalos de comprimento de onda de cada banda estão indicadas na tabela. O modo pancromático do sensor corresponde à banda 8 que cobre a maior parte do intervalo de comprimento de onda da região do

visível. As restantes 8 bandas compõem o modo multiespectral do sensor. O segundo sensor tem duas bandas na região do infravermelho térmico. O termo "detector óptico" está a ssociado ao primeiro sensor pois este é que obtém informação na região espectral do visível. □

(b) Sabendo que a irradiância espectral no topo da atmosfera é em média de 1031 $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ 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).

Resolução. O fluxo de radiação que atinge a superfície pode estar associado a radiação directa ou difusa. Dado que a irradiância difusa é nula, a irradiância espectral à superfície na direcção de incidência da radiação é apenas a irradiância espectral no topo da atmosfera multiplicada pela transmitância atmosférica, isto é $1031\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1} \times 0.91 = 938.21\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$. A irradiância para a banda 5, cujas unidades são Wm^{-2}, é então dada aproximadamente pelo produto da irradiância espectral pela amplitude da banda 5 (0.88 μm- 0.85 μm =0.03 μm), isto é $938.21\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1} \times 0.03\mu\mathrm{m} = 28.1463\mathrm{Wm}^{-2}$. □

(c) 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.

Resolução. Para digitalizar a localização dos edifícios sobre a imagem deveria ser usada a banda com melhor resolução espacial que é a banda pancromática (banda 8). Para monitorizar a temperatura do solo, devem ser usadas as bandas térmicas (bandas 10 e 11). □

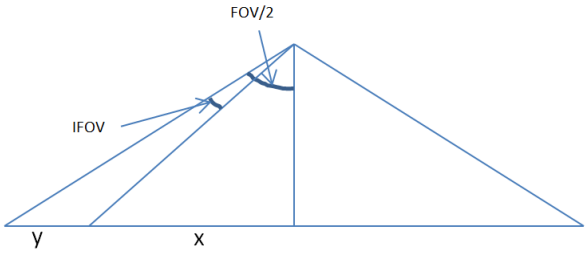
(d) Considere uma região com ocupação do solo que pode ser eucaliptal ou então zonas de solo descoberto. Suponha que as assi-

naturas 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.

Resolução. O índice de vegetação NDVI é definido pela razão (IVP-V)/(IVP+V), em que IVP é a reflectância na banda do infravermelho próximo (banda 5) e V é a reflectância na banda da região do vermelho (banda 4). Assim, para o pixel A o valor do índice é (0.26-0.20)/(0.26+0.20)=0.1304, e para o pixel B é (0.33-0.12)/(0.33+0.12)=0.47. Dado o padrão de reflectâncias e o valor de NDVI de cada pixel, conclui-se que o pixel A deve corresponder a "solo descoberto" e o pixel B a "eucaliptal". □

(e) 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.

Resolução. A relação entre FOV (ângulo) e GFOV (distância projectada) é facilmente deduzida da geometria de observação e é FOV $= 2 \times \arctan(GFOV/2H)$, onde H é a altitude do sensor e GFOV é a largura da imagem. Assim, FOV $= 2 \times \arctan((185/2)/705)) = 14.94967^{o}$. Analogamente, para o campo de visão instantâneo, associado a um pixel da imagem (15m) observado na vertical, IFOV $= 2 \times \arctan((15/2)/705000)) = 0.001219^{o}$. Para determinar a área projectada associada a um pixel na margem da imagem pode calcular-se as distâncias x e y no esquema abaixo, em que $x+y = 92500m$. Como FOV$/2-$IFOV $= 7.473615^{o}$, então $x = 705000 \times \tan(7.473615^{o}) = 92484.74m$. Então, o valor pedido é $y = 92500 - 92484.74 = 15.258m$, ou seja, um pixel na margem da imagem da banda 8 tem uma resolução praticamente igual à resolução de um pixel na vertical do sensor que é de 15m.



□

6. (Exame de 26 de Junho de 2013) O quadro seguinte, obtido em

   `http://www.itc.nl/research/products/sensordb/`

   descreve algumas características do sensor AATSR, um dos sensores a bordo do satélite geossíncrono ENVISAT (da Agência Espacial Europeia) que esteve em serviço entre 2002 e 2012. A altitude do satélite é 783km, a largura da imagem é 512km, e a duração do seu ciclo orbitral é de 35 dias. As amplitudes das bandas ("bandwidth"), em torno do seu valor médio de comprimento de onda ("wavelength") são 0.3 μm (banda 1 e 7) 1 μm (bandas 2 e 3), e 0.02 μm (bandas 4 a 6). A resolução temporal é de 3 dias na linha do Equador.

Sensor Bands

Band	Wavelength (µm)	Bandwidth (µm)	Resolution (m)	Swath width (km)	Revisit time (days)
Band 1 (MWIR)	3.7		1000	512	
Band 2 (TIR)	10.8		1000	512	
Band 3 (TIR)	12		1000	512	
Band 4 (VIS)	0.555		1000	512	
Band 5 (VIS)	0.659		1000	512	
Band 6 (NIR)	0.865		1000	512	
Band 7 (SWIR)	1.61		1000	512	

   (a) Defina resolução temporal. A resolução temporal deste sensor é inferior ou superior a 3 dias para regiões afastadas da linha do Equador?

   Resolução. Resolução temporal é o período de tempo entre duas

observações sucessivas do mesmo local pelo sensor. Dado que o perímetro das paralelas diminui à medida que as observações se afastam da linha do Equador e que a largura da imagem se mantem constante, há um acréscimo da sobreposição das imagens com o aumento da latitude. Em consequência, verifica-se uma redução da resolução temporal quando as imagens correspondem a localizações mais afastadas do Equador. Assim, a resolução temporal é inferior a 3 dias para regiões afastadas do Equador. □

(b) Determine o campo de visão (FOV) do sensor. Sabendo que o campo de visão instântaneo (IFOV) é de 0.07317468º, mostre que o número de pixels que correspondem à largura da imagem é 495.

Resolução. O campo de visão é obtido pela expressão $FOV = 2 \times atan((512/2)/783) = 36.21007º$. Sendo o campo de visão instantâneo IFOV = 0.07317468º, então o número de observações distintas é de FOV/IFOV=36.21007/0.07317468 que é aproximadamente 495. [Nota: estes cálculos mostram que apesar da largura da imagem ser 512km e a resolução espacial ser de 1km, o número de pixels correspondentes à largura da imagem é inferior a 512. Isto deve-se ao facto de a resolução espacial ser definida para a situação óptima em que a observação é feita na vertical (nadir) e degradar-se quando a área observada se afasta do nadir do sensor.] □

(c) Uma das principais finalidades do sensor AATRS é a determinação da temperatura à superfície pois fornece estimativas dessa grandeza com erros da ordem de 1º C. Quais são as bandas do sensor em que se baseiam essas estimativas? Pensa que outra finalidade do sensor é a obtenção de imagens pancromáticas da superfície? Justifique.

Resolução. As bandas em que se baseia a estimativa da temperatura à superfície são as bandas do infravermelho térmico (bandas 2 e 3, de elevado comprimento de onda). Não faz sentido produzir uma imagem pancromática da superfície a partir das bandas

do sensor pois não existe nenhuma banda associada a uma larga gama de comprimentos de onda na região do visível/infravermelho próximo. Todas as bandas do sensor têm uma resolução espacial idêntica e grosseira (1km), não havendo por isso nenhuma banda com melhor resolução para produzir uma imagem pancromática de boa resolução espacial. □

(d) Considere que a irradiância espectral à superfície numa parcela de terreno é de 1300 $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ para a banda 5. Suponha que a reflectância da parcela é 0.22, que a transmitância atmosférica na direcção do sensor é de 0.85 e que a radiância de percurso espectral nessa banda é $12\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$. Estime o valor da radiância espectral "no sensor" se a parcela for lambertiana. Apresente os cálculos e indique as unidades.

Resolução. Para superfícies lambertianas, a emitância espectral é igual a $\pi \times L$, em que L é a radiância espectral. Como é conhecida a irradiância espectral (1300 $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$) e a reflectância ($\rho = 0.22$), a emitância espectral é $1300 \times 0.22 = 286\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$. A radiância à superfície é, consequentemente $286/\pi = 91.036\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$. Desse fluxo de radiação, apenas 85%, i.e. 77.38113 $\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$ atravessa a atmosfera na direcção do sensor segundo o enunciado do problema. A esse valor é necessário adicionar a radiância de percurso ($12\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$) para obter a radiância espectral "no sensor" que é portanto 89.38113 $\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}\mu\mathrm{m}^{-1}$. □

(e) Numa composição colorida RGB=654 das bandas do sensor, qual coloração deverá corresponder a uma zona de vegetação em bom estado vegetativo? Justifique.

Resolução. A vegetação verde em bom estado vegetativo caracteriza-se por uma reflectância moderada na região espectral do verde (0.5-0.6 μm, correspondente à banda 4 do sensor), uma reflectância baixa na região do vermelho (0.6-0.7 μm, correspondente à banda 5 do sensor) e uma elevada reflectância na região do infravermelho próximo (0.7-1.3 μm, correspondente à banda 6 do sensor).

Assim, espera-se que na composição colorida RGB=654, o sinal no canal R ("red") domine a composição colorida, originando uma cor avermelhada para a vegetação em bom estado vegetativo. □

Bibliografia

[1] J. A. Barsi, J. R. Schottb, F. D. Palluconic, and Simon J. Hook. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. In James J. Butler, editor, *Earth Observing Systems X, Proceedings of SPIE Vol. 5882*. SPIE, 2005.

[2] J.B. Campbell. *Introduction to Remote Sensing*. Gildford Press, 4th edition, 2007.

[3] G. Chander, B.L. Markham, and D. L. Helder. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113:893 – 903, 2009.

[4] E. Chuvieco and A. Huete. *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. CRC Press, 2010. Cota BISA U40-138.

[5] J.R. Jensen. *Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective*. Prentice-Hall, 2nd edition, 2000. Cota BISA U40-86.

[6] S. Liang. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Wiley, 2004.

[7] T. Lillesand and R. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, 4th edition, 2000. Cota BISA U40-88.

[8] L. Robledo and A. Soler. Modelling irradiance on inclined planes with an anisotropic model. *Energy*, 23(3):193 – 201, 1998.

[9] G. Schaepman-Strub, M.E. Shapman, J. Martonchik, T. Painter, and S. Dangel. Radiometry and reflectance: From terminology concepts to measured quantities. In M.D. Nellis T.A Warner and G.M. Foody, editors, *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. SAGE publications, 2009.