

Marcia Akemi Yamasoe
Marcelo de Paula Corrêa

Processos radiativos na atmosfera

FUNDAMENTOS

oficina de textos

Processos radiativos na atmosfera

FUNDAMENTOS

Marcia Akemi Yamasoe
Marcelo de Paula Corrêa

Copyright © 2016 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

CONSELHO EDITORIAL Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva;
Doris C. C. K. Kowaltowski; José Galizia Tundisi;
Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene;
Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

CAPA E PROJETO GRÁFICO Malu Vallim

DIAGRAMAÇÃO Alexandre Babadobulos

IMAGEM CAPA Diferentes visiones de la radiación, 2015. José López aka "Wallace"
(Barcelona, 1966) <<http://www.wallaceartlab.com> - <http://shop.wallaceartlab.com>> "Nada es invisible a los ojos de la imaginación"

PREPARAÇÃO DE FIGURAS Letícia Schneiater

PREPARAÇÃO DE TEXTO Hélio Hideki Iraha

REVISÃO DE TEXTO Carolina A. Messias

IMPRESSÃO E ACABAMENTO Rettec artes gráficas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Yamasoe, Marcia Akemi

Processos radiativos na atmosfera :
fundamentos / Marcia Akemi Yamasoe, Marcelo de
Paula Corrêa. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2016.

Bibliografia

ISBN 978-85-7975-229-2

1. Atmosfera 2. Ciências ambientais
 3. Meteorologia - Estudo e ensino 4. Radiação solar
 5. Radiação terrestre I. Yamasoe, Marcia Akemi.
- II. Título.

16-00693

CDD-551.5253

Índices para catálogo sistemático:

1. Processos radiativos na atmosfera : Ciências da Terra 551.5253

Todos os direitos reservados à OFICINA DE TEXTOS
Rua Cubatão, 798 CEP 04013-003 São Paulo-SP – Brasil
tel. (11) 3085 7933 fax (11) 3083 0849
site: www.ofitexto.com.br
e-mail: atend@ofitexto.com.br

Agradecimentos

Agradecemos o prefácio do Dr. Juan Carlos Ceballos e sua leitura criteriosa, com sugestões de modificações que sem dúvida aprimoraram a obra final, e à Editora Oficina de Textos, por aceitar o desafio de publicar este livro.

O material reunido neste livro é fruto dos meus quase 15 anos de docência. Nada mais justo que os primeiros agradecimentos sejam dedicados a todos os estudantes da disciplina Meteorologia Física II, oferecida anualmente no curso de Bacharelado em Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP). Monitores e estagiários da disciplina em diferentes anos contribuíram para a elaboração e o aprimoramento da apostila que serviu de base ao livro. Agradeço particularmente à Clara Iwabe, pelo árduo trabalho de transformar as notas de aula em arquivo digital, o que incluiu textos e figuras. Ao professor Artemio Plana-Fattori, ex-colega de trabalho e hoje grande amigo, responsável pelos primeiros conhecimentos adquiridos sobre o tema quando fui aluna de disciplina de pós-graduação sob sua responsabilidade nos idos de 1990, meus sinceros agradecimentos. Sou grata também a todo o apoio institucional do IAG-USP. Não posso deixar de agradecer ao próprio Marcelo Corrêa, por aceitar o desafio de publicar comigo esta obra, sempre muito bem-humorado e incansável colaborador.

Marcia Akemi Yamasoe

Estou em salas de aulas como professor desde os 19 anos de idade. Do ensino fundamental ao magistério, do ensino médio à graduação, do

supletivo à pós-graduação. Em todos esses anos, fui muito mais aluno do que educador e este livro é o resultado desse aprendizado.

Meus agradecimentos são dirigidos primeiramente a todos os meus alunos. Dos atuais, na Unifei, aos primeiros, lá na década de 1990, no Colégio Eco e na EEPSG Carlos Maximiliano Pereira dos Santos. Eu também não posso deixar de estender meus agradecimentos aos professores e diretores desses dois colégios. Eles são os responsáveis pelo meu “vício” na docência.

Quanto aos meus caminhos no estudo e pesquisa em Radiação Atmosférica, meu especial muito obrigado a Artemio Plana-Fattori, mestre, orientador e amigo-irmão que a vida ofereceu. Em se tratando do tema Radiação, agradeço aos amigos Juan Carlos Ceballos, não apenas pelo prefácio, mas pela estima, ensinamentos e horas e horas de boa conversa; a Emico Okuno, pelo exemplo de alegria, bom humor e profissionalismo; e, é claro, a Marcia Yamasoe, por essa parceria harmoniosa e muito gratificante. Agradeço também à Universidade Federal de Itajubá, por ter proporcionado condições para meu trabalho e pesquisa e por ter aberto as portas para a criação do curso de graduação em Ciências Atmosféricas, o primeiro do gênero em Minas Gerais. Aproveito aqui para agradecer ao fantástico grupo de docentes desse curso, pela dedicação, pelo profissionalismo e principalmente pela amizade. Por fim, agradeço aos meus amigos e à minha família, que fazem dessa vida um passeio belo e alegre.

Esta obra é dedicada, com muito amor, aos meus pais, Dona Varli e Seu De Paula.

Marcelo de Paula Corrêa

Prefácio

Caminhamos para o fim da segunda década do século XXI. Há 40 anos existia no Brasil um número apreciável de profissionais trabalhando ativamente na medição de radiação solar e terrestre, concentrando-se mais em aspectos de fluxos totais e balanços de energia, de interesse para Agrometeorologia, Micrometeorologia, Ciências Ambientais e Engenharia. Livros em português abordando temas de radiação solar e terrestre não eram raros, mas também não eram numerosos. Textos clássicos e detalhados sobre propagação de radiação, em inglês, francês e alemão, mais algumas traduções do russo, eram leitura de uma fração menor de profissionais.

Desde então, o tema da propagação e medida de radiação inundou o cotidiano meteorológico e ambiental com necessidades crescentes de detalhamento conceitual. O espectro solar não é mais apenas um tema referente ao arco-íris, mas também objeto de estudos de ultravioleta e saúde, de poluição ambiental e aerossol interagindo com radiação visível absorvida por vegetação e afetando a formação e a dinâmica de nuvens; no infravermelho, o estudo do clima inclui análise de bandas de emissão/absorção por nuvens e por gases minoritários. As imagens de satélite viraram instrumento cotidiano de informação sobre o tempo, de monitoramento de vegetação e poluição e de detecção de fogos. Instrumentos modernos de sondagem da atmosfera e de nuvens utilizam propriedades espectrais de micro-ondas. Um profissional das Ciências Atmosféricas e Ambientais não pode mais se furtar a essa informação e às ferramentas conceituais para sua interpretação.

Uma geração de físicos e meteorologistas que trabalha ativamente em Ciências Atmosféricas tem-se formado nos últimos 20 anos, acumulando experiência no país e no exterior e abrangendo esse leque sofisticado de conhecimentos. É natural e desejável que esse *know-how*, ou *savoir-faire*, ou simplesmente “saber-fazer” na atividade profissional e acadêmica, plasme textos na língua nacional,

com padrões adequados para as necessidades locais. Um sinal promissor de maturidade intelectual.

Os doutores e professores Yamasoe e Corrêa participam dessa geração, e parece-me ouvir os ecos de um querido amigo, veemente mestre e colega no IAG-USP. O livro que eles apresentam está destinado a servir de texto básico a novas gerações de estudantes universitários e introduzi-los a aspectos conceituais clássicos com um olhar moderno sobre a radiação solar e terrestre, sua propagação e sua interação com matéria e clima. Uma vantagem adicional é que fornece ferramentas matemáticas para iniciar a lida com esses temas, desde um patamar que permite assimilar leituras de nível mais avançado. Só cabe um caloroso parabéns pela ideia e pela realização.

Juan Carlos Ceballos

Sumário

Introdução	11
1. Grandezas radiométricas	13
1.1 Radiação e o espectro eletromagnético	13
1.2 Ângulo sólido	15
1.3 Fluxo, intensidade, irradiância e radiância	16
1.4 Densidades espectrais	18
1.5 Absortância, refletância e transmitância	20
2. Radiação de corpo negro	29
2.1 Lei de Kirchoff	30
2.2 Lei de Planck	32
2.3 Lei de Wien	34
2.4 Lei de Stefan-Boltzmann	35
3. Radiação solar	37
3.1 O Sol	37
3.2 Posição do disco solar acima do horizonte	40
3.3 Ciclos anuais	49
3.4 Irradiação solar (dose) no topo da atmosfera	53
4. Medição de irradiância	57
4.1 Principais grandezas medidas	58
4.2 Princípios físicos da medição de radiação	61
4.3 Calibração	63
4.4 Algumas aplicações	63
4.5 Instrumentos convencionais	64

5. Absorção e espalhamento	69
5.1 Constituintes atmosféricos relevantes.....	71
5.2 Absorção molecular	75
5.3 Espalhamento	83
5.4 O papel das nuvens.....	98
6. Equação de transferência radiativa (ETR)	103
6.1 Lei de Beer	103
6.2 Forma diferencial da ETR na ausência de espalhamento – equação de Schwarzschild.....	107
6.3 Forma diferencial da ETR na ausência de absorção/emissão.....	108
6.4 Equação geral de transferência radiativa	110
6.5 Aproximação de atmosfera plano-paralela.....	111
6.6 Propagação de radiação solar	115
6.7 Propagação de radiação terrestre	118
7. Balanços radiativos	121
7.1 Equilíbrio radiativo do planeta.....	121
7.2 Taxa de aquecimento/resfriamento radiativo	131
7.3 Balanço de energia à superfície	136
Referências bibliográficas	141

Introdução

A principal fonte de energia do sistema Terra-atmosfera é a radiação eletromagnética proveniente do Sol. A radiação solar é utilizada nos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem tanto na superfície quanto na atmosfera. Qualquer alteração no fluxo incidente dessa radiação resultará em diferentes respostas e cenários para a atmosfera e a superfície, podendo promover alterações em vários processos meteorológicos e climáticos na Terra. Além de fatores externos, como o movimento de rotação terrestre e os ciclos de atividades solares, a radiação solar que atinge a superfície sofre vários processos de interação com os gases e as partículas de aerossol que compõem a atmosfera do planeta. As nuvens, assim como as características físicas da superfície sobre a qual a radiação solar incide, também desempenham um papel importante no balanço de radiação do sistema.

Dessa forma, alterações na composição química, na concentração, na quantidade e em outras propriedades de gases, aerossóis e nuvens que interagem com a radiação eletromagnética podem afetar o perfil de temperatura e, por conseguinte, o perfil de pressão da atmosfera. Um exemplo muito comentado na atualidade a respeito do impacto que essas alterações podem causar no clima da Terra tem relação com o efeito estufa. O aumento da concentração dos chamados gases estufa promove, numa visão simplificada, o aumento da absorção da radiação e a consequente elevação da temperatura do planeta. Além disso, a alteração da distribuição vertical e horizontal da pressão atmosférica afeta a velocidade e a direção dos ventos. No que diz respeito aos processos que ocorrem na superfície, um exemplo é a fotossíntese, realizada pela vegetação a partir da absorção da radiação solar na região espectral do visível, denominada fotossinteticamente ativa. A radiação solar afeta também a concentração de alguns gases na atmosfera a partir de reações fotoquímicas.

É importante lembrar que, assim como o meio afeta o campo de radiação, o campo de radiação pode alterar o meio, e assim por diante. Tais processos são

denominados processos de realimentação do sistema (do inglês *feedback processes*). Um exemplo é o aquecimento da superfície e da atmosfera terrestre devido à incidência de radiação solar durante o dia, o qual resulta em instabilidade, gerando movimentos convectivos do ar próximo à superfície. Algumas parcelas de ar sofrem movimentos ascendentes, e outras, descendentes. O movimento ascendente da parcela de ar causa resfriamento adiabático. Caso a atmosfera esteja suficientemente úmida e na presença de núcleos de condensação, as nuvens podem se formar. Estas, por sua vez, alteram a distribuição de radiação solar incidente e emitem e absorvem radiação infravermelha (Thomas; Stamnes, 1999).

Um dos objetivos deste livro é fornecer ao leitor fundamentos para a compreensão dos principais processos de interação da radiação solar e terrestre com os constituintes da atmosfera e com a superfície, discutindo-se as possíveis consequências oriundas dessa interação. Para tanto, serão estudados os fundamentos da transferência radiativa na atmosfera, sua terminologia, definições das grandezas físicas, leis físicas envolvidas e sua formulação matemática baseada no desenvolvimento da equação de transferência radiativa. O Cap. 1 aborda o espectro eletromagnético e as regiões nas quais se costuma dividi-lo. No capítulo seguinte, são discutidos os conceitos físicos envolvidos, iniciando com as leis de radiação. Na sequência, são debatidos os principais processos que determinam a variação do fluxo de radiação solar no topo da atmosfera. O Cap. 4 é destinado à instrumentação utilizada para medir a radiação e a seus princípios físicos de funcionamento. Em seguida, no Cap. 5, são apresentados os principais processos de interação da radiação com a matéria, absorção, emissão e espalhamento. A partir daí, o leitor terá os fundamentos teóricos necessários para compreender as discussões envolvendo a dedução e as aplicações da equação de transferência radiativa, que será feita no Cap. 6. Finalmente, no Cap. 7, será discutido como o balanço de radiação na atmosfera e as taxas de aquecimento ou resfriamento radiativo são estimados.

Grandezas radiométricas

1.1 Radiação e o espectro eletromagnético

Todo corpo com temperatura maior que o zero absoluto (0 K) emite radiação em diferentes comprimentos de onda. Define-se como radiação a emissão ou propagação de energia na forma de onda eletromagnética. Essa energia é transferida por meio de unidades discretas denominadas *quanta* ou fótons. A energia (Q) de um fóton está relacionada com seu comprimento de onda (λ) ou sua frequência de oscilação (ν) por:

$$Q = hc / \lambda = h\nu \quad (1.1)$$

em que h é a constante de Planck ($= 6,626 \times 10^{-34}$ J s), e c , a velocidade da luz ($\approx 2,998 \times 10^8$ ms⁻¹ no vácuo), sendo Q expresso em joules (J) (o Sistema Internacional, SI, é utilizado para indicar as unidades das grandezas radiométricas, exceto nas definições de grandezas espectrais).

O Sol emite energia em praticamente todo o conjunto do espectro eletromagnético (Fig. 1.1). No entanto, a Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) considera como radiação óptica a radiação eletromagnética entre as regiões de transição dos raios X ($\lambda \approx 1$ nm) e das ondas de rádio ($\lambda \approx 1$ mm) (as unidades de comprimento de onda comumente utilizadas são o nanômetro, em que 1 nm = 10^{-9} m, e o micrômetro, em que 1 μ m = 10^{-6} m; em Astrofísica, também se utiliza o ångström, sendo 1 Å = 10^{-10} m). A luz, ou *radiação visível*, é a denominação dada para a radiação percebida pelos seres humanos. O termo *luz* muitas vezes é usado para radiação em outros comprimentos de onda, o que não é recomendado pela CIE. Sendo assim, a luz, ou radiação visível, é definida como qualquer radiação capaz de causar diretamente uma sensação visual.

Não existem limites precisos para o intervalo espectral da radiação visível, uma vez que dependem da potência radiante que atinge a retina e também da sensibilidade do observador. Geralmente, o limite inferior do intervalo está

ao número de onda:

$$L_{\tilde{\nu}} = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}] \quad (1.14)$$

ou à frequência:

$$L_{\nu} = \frac{dL}{d\nu} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}] \quad (1.15)$$

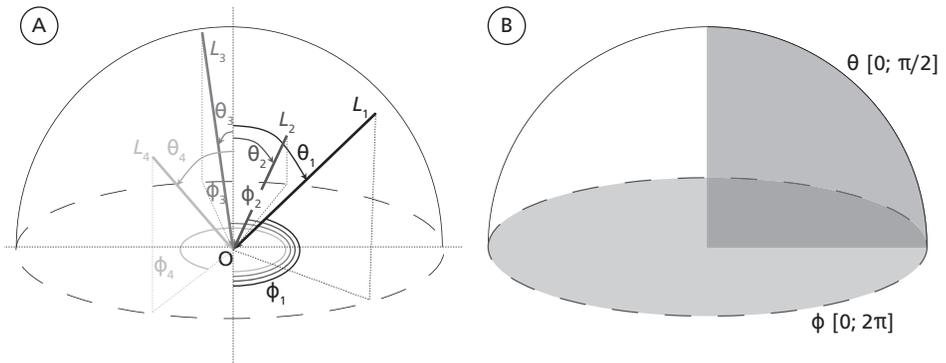


Fig. 1.4 (A) Radiâncias provenientes de diversas direções atingindo o alvo (O) em superfície e (B) limites de integração para cálculos de irradiâncias com base nas radiâncias provenientes de todo o hemisfério superior, considerando uma superfície plana horizontal

As conversões entre L_{λ} , L_{ν} e $L_{\tilde{\nu}}$ envolvem a velocidade da luz e suas relações. Da Eq. 1.1, tem-se que $c = \lambda \nu$, então:

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \Rightarrow \frac{d\tilde{\nu}}{d\nu} = \frac{1}{c} \quad (1.16A)$$

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\tilde{\nu}}{d\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2} \quad (1.16B)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\nu}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \quad (1.16C)$$

Por exemplo, substituindo a Eq. 1.16B na Eq. 1.13, tem-se:

$$L_{\lambda} = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \left| \frac{d\tilde{\nu}}{d\lambda} \right| = \frac{dL}{d\tilde{\nu}} \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{dL}{d\tilde{\nu}} = \frac{1}{\lambda^2} L_{\tilde{\nu}} \quad (1.17)$$

De maneira análoga, podem-se obter as demais relações para as Eqs. 1.14 e 1.15, ou, ainda, relações semelhantes para irradiância, fluxo ou energia radiante.

Com base na grandeza espectral, valores integrados em determinados intervalos espectrais podem ser obtidos, visto que $dL = L_\lambda d\lambda = L_\nu d\nu = L_{\tilde{\nu}} d\tilde{\nu}$ e, portanto:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) d\lambda = \int_{\tilde{\nu}_1}^{\tilde{\nu}_2} L_{\tilde{\nu}}(\tilde{\nu}) d\tilde{\nu} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} L_\nu(\nu) d\nu$$

Quando a grandeza é expressa em termos de comprimento de onda, é comum denominá-la monocromática.

Exercício 1.3: Um instrumento é capaz de medir radiâncias espectrais de até $10 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}$. A partir desse limite, há a queima do sensor. Verificar a possibilidade de utilizar esse sensor para medir a radiação emitida por uma fonte de radiâncias monocromáticas em 500 nm cujo valor máximo é $2.000 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$.

1.5 Absortância, refletância e transmitância

A radiação eletromagnética interage com a matéria por espalhamento, por absorção ou por emissão. A atenuação (ou extinção, do inglês *extinction*) inclui os processos que diminuem a energia radiante, tais como a absorção e o espalhamento da radiação ao atravessar um meio qualquer. Já a emissão aumenta a intensidade radiante numa determinada orientação. O espalhamento proveniente de outras direções também pode adicionar fótons ao feixe incidente. No decorrer deste livro, tais processos serão abordados de maneira mais aprofundada.

No processo de absorção, parte ou toda a energia radiante é transferida para o meio no qual ela incide ou atravessa. Sendo assim, define-se *absortância* como a fração da radiação incidente que foi absorvida, ou, em outras palavras, como a razão entre a quantidade de energia absorvida e o total de energia que incide sobre um volume de matéria para um dado comprimento de onda. Em termos de fluxo radiativo, a absortância pode ser escrita como:

$$a_\lambda = \frac{\Phi_{a\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \quad (1.18)$$

em que a_λ é a absortância, $\Phi_{a\lambda}$, o fluxo de radiação espectral absorvido pelo meio, e $\Phi_{i\lambda}$, o fluxo incidente. A mesma relação, assim como as seguintes

Define-se como corpo negro o meio ou substância que absorve toda a radiação incidente sobre si, independentemente do comprimento de onda, direção de incidência ou estado de polarização. Nenhuma parte da radiação incidente é refletida ou transmitida pelo corpo negro.

A fim de compreender a polarização, considere-se que a radiação constitui uma grandeza vetorial com quatro componentes. Apenas a radiância L está associada à transferência de energia através de um meio. Os demais componentes descrevem o estado de polarização do feixe de radiação. Uma onda eletromagnética é dita polarizada quando os vetores dos campos elétrico e magnético oscilarem no tempo de forma coerente. Assim, observando-se sua oscilação no tempo, o vetor percorre figuras geométricas bem definidas, como uma reta, um círculo ou uma elipse. Quando o vetor oscila sobre uma reta, diz-se que a onda é linearmente polarizada. Quando oscila sobre um círculo, diz-se que ela apresenta polarização circular esquerda ou direita, de acordo com o sentido de percurso do vetor sobre o círculo (anti-horário ou horário) (Nussenzweig, 1996). A radiação solar não é polarizada.

Para entender o conceito de corpo negro, é possível fazer uma analogia com um corpo isolado do seu meio externo, com paredes isolantes. Como não há trocas com o meio externo, diz-se que o corpo se encontra em equilíbrio termodinâmico, ou seja, em:

- 1) *equilíbrio térmico*: não há gradientes de temperatura, sendo esta constante e homogênea no corpo;
- 2) *equilíbrio mecânico*: não há forças líquidas ou tensões, isto é, a pressão é constante em todas as partes do corpo;
- 3) *equilíbrio radiativo*: o campo de radiação dentro do corpo é constante;
- 4) *equilíbrio químico*: as taxas de todas as reações químicas são balanceadas por suas reações inversas, tal que a composição química é a mesma em todo o corpo.

Para contornar esse problema, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1918, postulou que a energia radiativa é emitida em pacotes finitos, ou *quanta*, e que a energia de um *quantum* é dada por $h\nu$, como visto na Eq. 1.1. Com essa condição, conclui-se que a radiância espectral emitida por um corpo negro é descrita matematicamente pela função de Planck:

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2 [\exp(h\nu / kT) - 1]} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}] \quad (2.6)$$

em que h é a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js). Essa função é limitada matematicamente em ambos os extremos:

- para $h\nu/kT \gg 1 \Rightarrow B_\nu \cong \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT}$, denominado limite de Wien, para altas energias;
- para $h\nu/kT \ll 1 \Rightarrow B_\nu \cong \frac{2\nu^2 kT}{c^2}$, denominado limite de Rayleigh-Jeans, útil na região espectral das micro-ondas ($\lambda > 1$ mm) e que está de acordo com o modelo clássico.

A função de Planck também pode ser reescrita, em função do comprimento de onda λ , como:

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc / \lambda kT) - 1]} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.7)$$

A Fig. 2.1 ilustra gráficos da função de Planck obtida utilizando-se diferentes valores de temperatura. A função tende a zero para comprimento de onda muito pequeno, contornando a limitação do modelo clássico proposto por Rayleigh-Jeans.

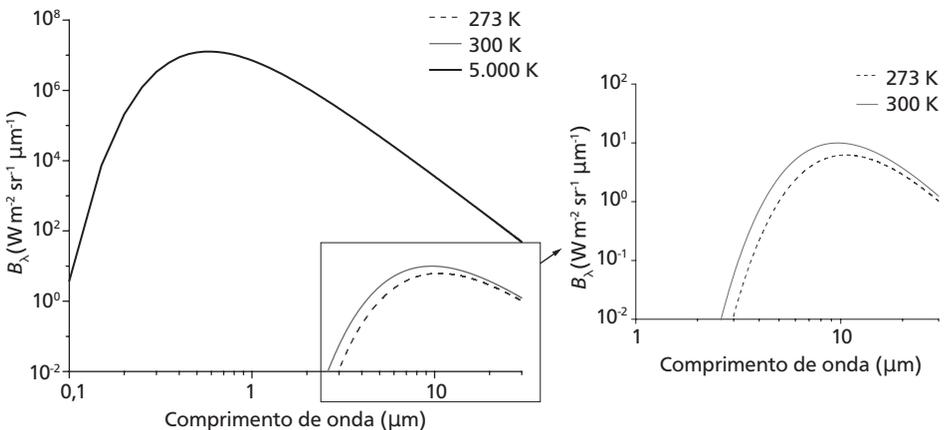


Fig. 2.1 Função de Planck calculada para diferentes valores de temperatura

3.1 O Sol

Sendo a estrela mais próxima da Terra, o Sol constitui a principal fonte de energia do planeta. Para se ter uma ideia de sua proximidade da Terra, o Sol está cerca de 300.000 vezes mais perto do que a segunda estrela mais próxima. A distância média Terra-Sol (\bar{d}) é denominada unidade astronômica (UA) e vale:

$$\bar{d} = 149.597.870 \pm 2 \text{ km} = 1 \text{ UA}$$

Na maioria das aplicações, é suficiente aproximar esse valor para $1,496 \times 10^{11}$ m. Devido à órbita elíptica da Terra ao redor do Sol, a distância solar varia em aproximadamente 3%. Isto é, entre $1,471 \times 10^{11}$ m no periélio, em janeiro, e $1,521 \times 10^{11}$ m no afélio, em julho.

O Sol é um esferoide com raio de $6,9626 (\pm 0,0007) \times 10^8$ m e massa da ordem de $1,9891 (\pm 0,0012) \times 10^{30}$ kg. Constitui-se basicamente de hidrogênio (75% de sua massa) e hélio, além de alguns elementos mais pesados, como ferro, silício, neônio e carbono. Sua temperatura decresce de aproximadamente 5×10^6 K em sua parte central para 5.780 K na superfície. Sua densidade também diminui rapidamente com o aumento da distância ao centro, passando de cerca de 150 g cm^{-3} na parte central a $10^{-7} \text{ g cm}^{-3}$ na superfície. Em média, a densidade é de aproximadamente $1,4 \text{ g cm}^{-3}$.

A fonte de energia solar está associada à fusão termonuclear de átomos de hidrogênio para hélio, que acontece no interior do Sol. Esse processo de fusão envolve quatro átomos de hidrogênio que se “transformam” em átomos de hélio. Como a massa dos átomos de hidrogênio é maior do que a do átomo de hélio, essa diferença de massa é convertida em energia (dada pela famosa equação $E = mc^2$). Nesse processo, são emitidos fótons altamente energéticos, de forma que a transferência de energia da parte mais interna até a superfície é realizada basicamente por meio de radiação eletromagnética. Essa radiação é absorvida

dianos e aos paralelos. Tais posições são denominadas latitude (ϕ) e longitude (λ), respectivamente (Fig. 3.4). A latitude é utilizada para localizar um ponto na orientação norte-sul e é computada da linha do equador até o paralelo do ponto de interesse, variando entre -90° e $+90^\circ$ e sendo positiva no hemisfério norte. A longitude localiza um ponto na orientação leste-oeste e é computada do meridiano principal, também conhecido como de Greenwich, até o meridiano do ponto de interesse, variando de -180° a $+180^\circ$ e apresentando valores positivos a leste de Greenwich.

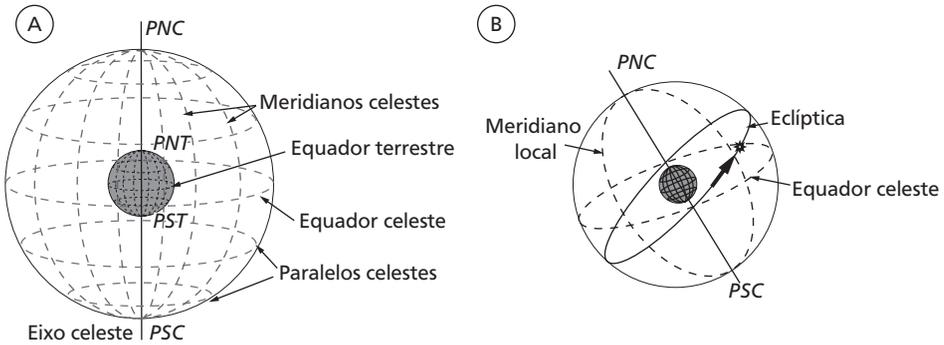


Fig. 3.3 (A) A esfera celeste, seus meridianos e paralelos e (B) o deslocamento aparente do Sol. Nota: PNC – polo norte celeste, PSC – polo sul celeste, PNT – polo norte terrestre e PST – polo sul terrestre

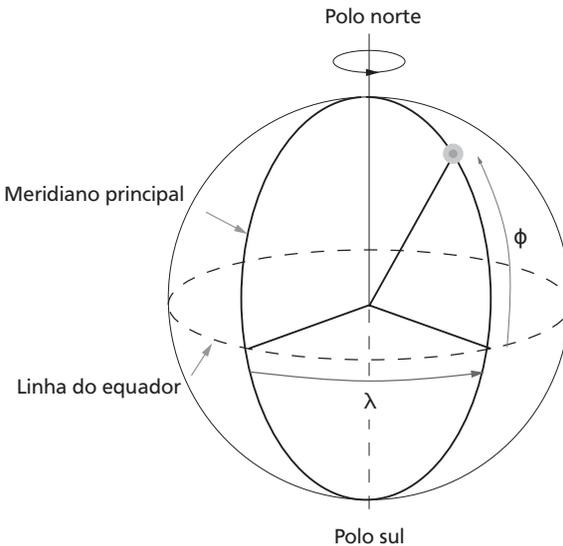


Fig. 3.4 O sistema de coordenadas geográficas e suas coordenadas latitude (ϕ) e longitude (λ)

Os instrumentos convencionais utilizados em estudos envolvendo processos radiativos na atmosfera foram desenvolvidos para medir irradiâncias, tanto em incidência normal quanto sobre uma superfície horizontal, isto é, considerando a radiação proveniente de todo um hemisfério. Em geral, tais instrumentos registram valores em intervalos espectrais definidos, em bandas espectrais largas ou estreitas. Em alguns instrumentos, é possível adaptar um colimador, de forma que o campo de visão (ou ângulo sólido) seja pequeno o suficiente para que a grandeza medida possa ser convertida em radiância. Neste capítulo serão estudados os princípios físicos de funcionamento dos principais instrumentos utilizados nas Ciências Atmosféricas para medição de irradiâncias. Tais instrumentos são genericamente denominados radiômetros, e, como será visto, um radiômetro apresenta um nome mais específico de acordo com a região espectral medida. Com base na irradiância medida em vários níveis, desde a superfície até o topo da atmosfera, é possível estudar vários aspectos do sistema Terra-atmosfera, tais como:

- a transformação de energia dentro do sistema Terra-atmosfera e de sua variação no espaço e no tempo;
- a análise das propriedades e a distribuição espaciotemporal de constituintes da atmosfera, tais como partículas de aerossol, nuvens e gases, como O_3 , CO_2 e vapor d'água;
- a obtenção de propriedades físicas da superfície (albedo, emissividade);
- a avaliação do balanço de radiação na superfície e ao longo da atmosfera;
- o monitoramento do sistema Terra-atmosfera via sensoriamento remoto a bordo de satélites artificiais;
- a avaliação de medições de radiação realizadas a bordo de satélites artificiais e seus algoritmos.

- Piranômetro (Figs. 4.2 e 4.3A): mede a irradiância solar global incidente ou refletida, proveniente de todo o hemisfério, sobre uma superfície plana horizontal. Em geral, o intervalo espectral de medidas de um piranômetro encontra-se entre $0,2 \mu\text{m}$ e $2,8 \mu\text{m}$. Com o auxílio de um disco ou anel de sombreamento, é possível medir o componente difuso da irradiância solar (Fig. 4.3B).



Fig. 4.2 Piranômetro modelo CMP21, fabricado por Kipp & Zonen
Foto: <<http://www.kippzonen.com/Product/14/CMP-21-Pyranometer>>.

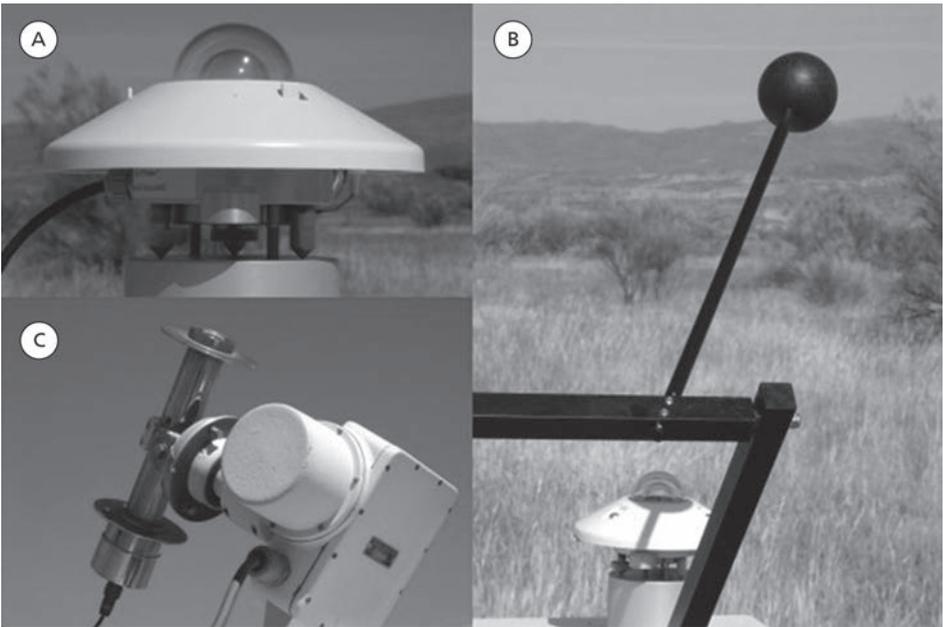


Fig. 4.3 (A) Parque instrumental com piranômetro, (B) piranômetro com bola de sombreamento e (C) pireliômetro
Foto: <<http://www.volker-quaschnig.de>>.

Absorção e espalhamento



Em capítulos anteriores, viu-se que o processo de absorção remove energia radiativa do feixe incidente, transformando-a em outras formas de energia, principalmente energia térmica. Por outro lado, no espalhamento da radiação, a energia que incide em uma direção é espalhada ou desviada para outras direções, havendo a produção de radiação difusa.

Tais processos são promovidos por alguns constituintes atmosféricos e dependem tanto de suas características físicas, como formato e tamanho da partícula com relação ao comprimento de onda da radiação incidente, quanto de sua composição química, baseada no arranjo dos átomos que compõem as moléculas. Neste capítulo são apresentados os principais constituintes atmosféricos que interagem com a radiação eletromagnética. Antes, um exemplo do papel dos processos radiativos na atmosfera é discutido.

O perfil vertical de temperatura da atmosfera tem relação estreita com os processos radiativos. A Fig. 5.1 ilustra perfis verticais de temperaturas médias em diferentes regiões da Terra, em que é possível observar que, próximo à superfície, a temperatura apresenta um declínio praticamente linear com a altura. Essa região é denominada troposfera e seu perfil de temperatura decorre do aquecimento radiativo da superfície, que transfere calor às camadas mais inferiores da atmosfera. Devido à diminuição da densidade com a altura, a temperatura decresce, permitindo que o ar se expanda e se resfrie. É necessário salientar que essa é uma visão simplista dessa relação causa-efeito, uma vez que a atmosfera não é autoconvectiva. Por outro lado, é importante ressaltar que o aquecimento dessa camada se dá pela transferência de calor por turbulência a partir da superfície, e não por absorção da radiação. Na troposfera ocorrem quase todos os fenômenos meteorológicos e de grande turbulência e concentram-se 75% de toda a massa de gases, além de praticamente todo o conteúdo de aerossóis e de vapor d'água.

O limite superior dessa região, denominado tropopausa, é detectado por uma pausa do perfil decrescente de temperatura e localiza-se a cerca de

em que n é um número inteiro, e R , a constante de Rydberg ($= 1,092 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ para o hidrogênio). Portanto, só ocorre absorção de radiação por um átomo de hidrogênio se a radiação incidente apresentar número de onda igual a:

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{j^2} \right) \quad (5.3)$$

em que j e k são números inteiros definindo os níveis de energia mais baixo e mais alto, respectivamente. Da mesma forma, o átomo de hidrogênio também só emite radiação cujo número de onda é calculado com a Eq. 5.3.

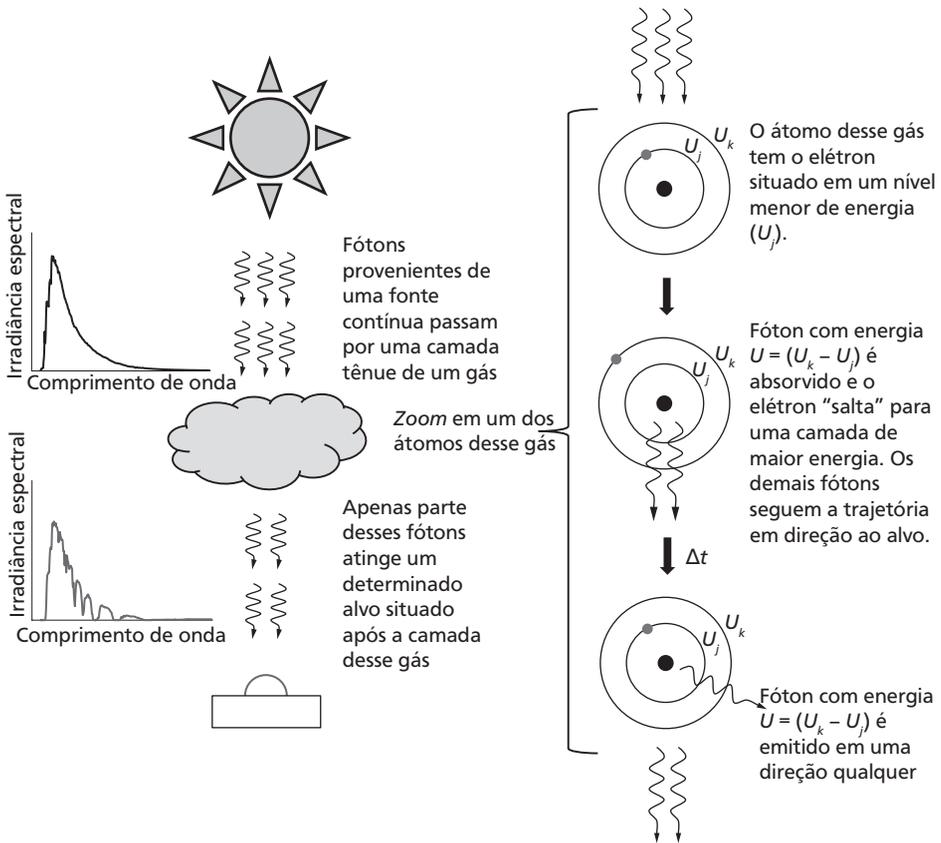


Fig. 5.2 Esquema do processo de absorção e emissão de radiação eletromagnética por um átomo

5.2.2 Espectro de emissão/absorção molecular

O espectro de absorção molecular é mais complexo do que o de um átomo porque as moléculas possuem várias formas de energia interna. Dessa

partículas de aerossol pouco absorvedoras de radiação visível torna o céu esbranquiçado e as nuvens apresentam cor branca, como será visto na próxima seção.

Exercício 5.2: Provar que a função de fase do espalhamento Rayleigh é normalizada para 1 quando integrada em todas as orientações.

Exercício 5.3: Provar que o espalhamento Rayleigh é simétrico com relação à direção incidente, isto é, 50% do feixe é espalhado para o hemisfério/região frontal e 50% é espalhado para trás (para o hemisfério oposto ao sentido de incidência). Dica: integrar a função de fase em um hemisfério e mostrar que a integral não depende da orientação de incidência e que o resultado da integral é sempre igual a $1/2$.

5.3.2 Espalhamento Mie

O espalhamento causado por uma partícula esférica de tamanho arbitrário foi descrito analiticamente pelo físico alemão Gustav Mie (1868-1957) em 1908. Ele se baseou nas equações de Maxwell (James Clerk Maxwell, 1831-1879, foi um físico e matemático inglês conhecido pelas suas importantes contribuições à teoria do eletromagnetismo), tendo deduzido como ondas eletromagnéticas de comprimento λ são perturbadas ao interagir com esferas homogêneas de raio r (Mie, 1908). Tal teoria é utilizada para descrever a interação das partículas de aerossol e gotas de nuvens com a radiação eletromagnética, em particular, no espectro solar.

A radiação que atinge e atravessa a partícula gera fenômenos distintos, genericamente denominados espalhamento:

- *Reflexão e refração:* as ondas eletromagnéticas que atingem a superfície da partícula podem ser parcialmente refletidas e parcialmente refratadas. A distribuição angular da luz espalhada depende fortemente da forma (esférica, cúbica), da composição química e das condições da superfície da partícula (homogênea ou rugosa). Na reflexão, a onda retorna ao meio com o mesmo ângulo da onda incidente com relação à normal à superfície da partícula. A refração é causada pela diferença entre os índices de refração do ar e da partícula.
- *Difração:* desvio da trajetória retilínea da radiação eletromagnética ao interagir com um obstáculo (fenda ou partícula). A radiação emergente, que possui o mesmo comprimento de onda da radiação incidente, pode interferir nesta construtivamente ou não, gerando

Equação de transferência radiativa (ETR)

6

A equação de transferência radiativa (ETR) é a equação fundamental para a avaliação de qualquer processo radiativo que ocorre na atmosfera. Grosso modo, a ETR determina a resultante da soma dos processos de atenuação e incremento à radiância espectral em determinada direção de propagação. Portanto, ela depende dos processos de espalhamento, absorção e emissão e é função das propriedades ópticas do meio atravessado, assim como das fontes de radiação. Dessa forma:

$$\underbrace{\text{Saldo de radiância}}_{\substack{\text{radiância emergente} \\ \text{radiância incidente}}} = \underbrace{\text{absorção}}_{<0} + \underbrace{\text{emissão}}_{>0} + \underbrace{\text{remoção por espalhamento}}_{<0} + \underbrace{\text{adição por espalhamento proveniente de outras fontes}}_{>0} \quad (6.1)$$

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento matemático da ETR com base em diferentes considerações acerca dos processos envolvidos.

6.1 Lei de Beer

A Fig. 6.1 representa um feixe de radiância espectral L_λ à orientação de propagação Ω ($\theta = \cos \zeta, \phi$) que atravessa um determinado caminho óptico e sofre atenuação por absorção, espalhamento ou ambos os processos. Considere-se nesse meio atravessado um volume elementar de matéria (ds) situado à posição s do caminho óptico, que contém partículas, gotículas ou moléculas de mesmas características (tamanho, forma, natureza etc.).

O elemento diferencial de radiância espectral depende das propriedades ópticas do meio e da radiância espectral incidente e é obtido como:

$$dL_\lambda(\Omega, s) = -L_\lambda(\Omega, s) \beta_\lambda(s) ds \quad (6.2)$$

em que $\beta_\lambda(s)$ é o coeficiente linear de atenuação à posição s e representa as propriedades ópticas do meio atravessado para o comprimento de onda λ . Isto é,

Balancos radiativos

Diz-se que o balanço radiativo de um sistema está em equilíbrio quando o seu saldo de radiação é nulo, isto é:

$$q^* = E_{c_{inc}} - E_{c_{eme}} + E_{l_{inc}} - E_{l_{eme}} = E_C^* + E_L^* = 0 \quad (7.1)$$

em que q^* é o saldo total de radiação, e E_C^* e E_L^* , os saldos parciais de onda curta (radiação solar) e onda longa (radiação terrestre), respectivamente, e o subscrito *inc* refere-se ao componente que incide no sistema, e *eme*, ao componente emergente.

No caso da Terra, não é possível admitir que, local e instantaneamente, o sistema se encontre em equilíbrio radiativo. Porém, considerando o planeta como um todo e em períodos de alguns anos, pode-se estabelecer um modelo simplificado que auxilie na compreensão do conceito de equilíbrio radiativo, dos parâmetros envolvidos e das consequências das alterações em tais parâmetros. Vale lembrar que, na realidade, o balanço ou equilíbrio energético do planeta requer troca de energia em suas várias formas, e não apenas na forma de radiação eletromagnética. Por exemplo, uma parcela significativa da energia radiativa acumulada nas regiões tropicais é transferida para as regiões polares com o movimento das massas de ar, isto é, na forma de energia cinética, resultante dos gradientes de temperatura entre o equador e os polos. Essa é a origem da circulação conhecida como célula de Hadley (Liou, 2002). Em escala reduzida ou microescala, pode-se também verificar a não ocorrência do balanço radiativo. É nessa situação que a energia radiativa absorvida pela superfície, por exemplo, pode ser convertida em calor latente e calor sensível, ou seja, fornecendo a energia para a ocorrência da evapotranspiração e da fotossíntese e para gerar os movimentos convectivos.

7.1 Equilíbrio radiativo do planeta

Considerando apenas a energia na forma de radiação eletromagnética e relembando também a definição de equilíbrio termodinâmico, no qual

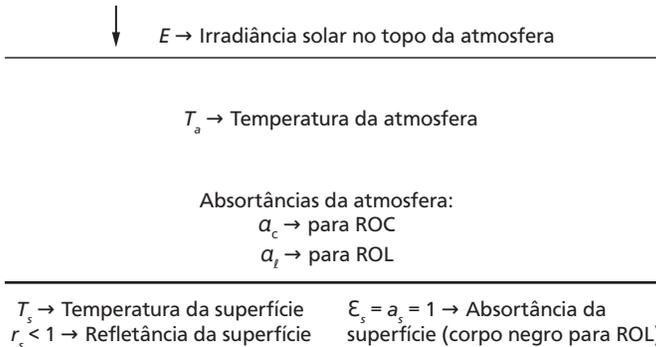


Fig. 7.2 Modelo simplificado de um planeta constituído por uma atmosfera homogênea e isotérmica capaz de absorver radiação eletromagnética sem promover espalhamento. A superfície do planeta atua como um corpo negro na região espectral de onda longa e, no topo da atmosfera, incide irradiância solar igual a E

Com as propriedades apresentadas nessa figura, é possível estimar diferentes grandezas nos espectros solar e terrestre, conforme mostra a Fig. 7.3.

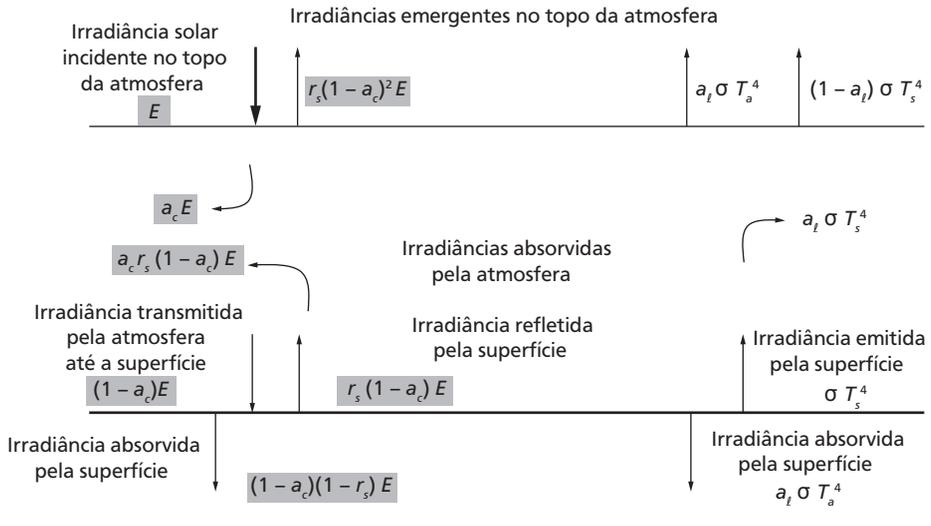


Fig. 7.3 Grandezas relacionadas aos espectros solar (com destaque) e terrestre (sem destaque) em função do modelo simplificado de um planeta constituído por uma atmosfera homogênea e isotérmica capaz de absorver radiação eletromagnética sem promover espalhamento

Dessa forma, para que o sistema se encontre em equilíbrio radiativo (Eq. 7.1), é necessário satisfazer o seguinte sistema de equações:

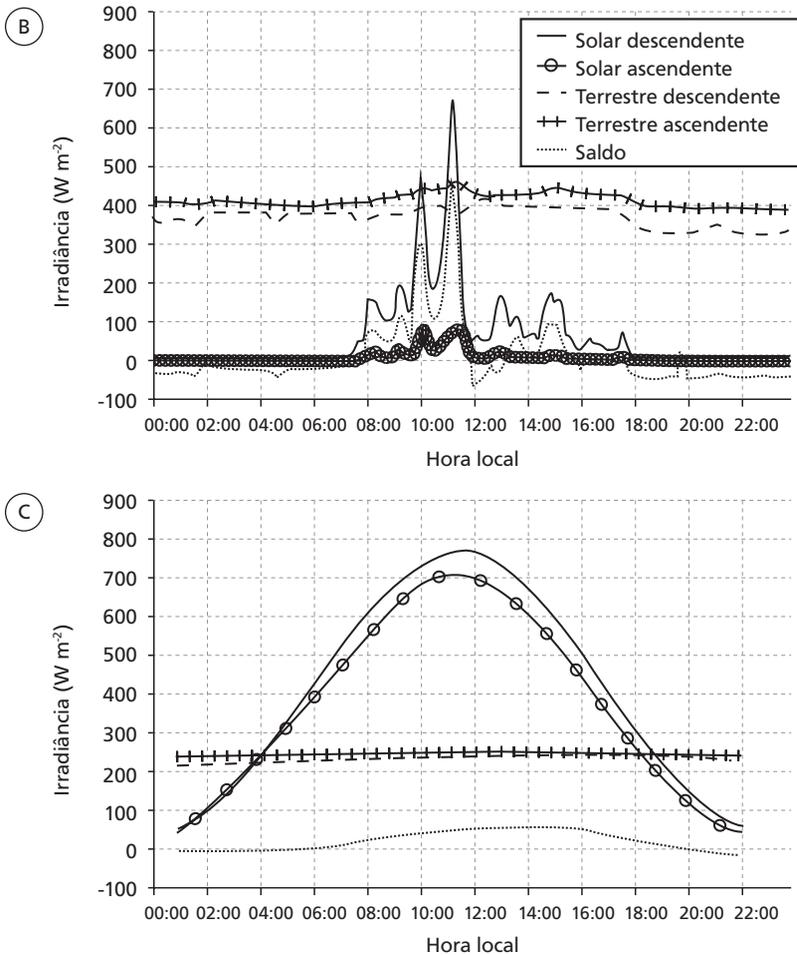


Fig. 7.7 Exemplos do ciclo diurno dos componentes do balanço de radiação em superfície: medidos sobre plantação de cana-de-açúcar em Santa Rita do Passa Quatro (SP) (A) no dia 3 de agosto de 2003, sem nuvens, e (B) no dia 7 de agosto de 2003, na presença de nuvens; (C) simulados numericamente para a Antártica, estação Georg von Neumayer, em 15 de dezembro de 2014

Exercício 7.6: Com base nos gráficos apresentados na Fig. 7.7 e no conhecimento adquirido ao longo dos capítulos deste livro, responder às seguintes questões:

- Qual a importância do albedo de superfície no balanço de radiação em superfície? Basear a resposta na observação de que, na Antártica, tanto a duração do dia solar quanto a irradiância solar instantânea incidente em superfície próximo ao meio-dia foram maiores do que

Do efeito estufa e fotossíntese às aplicações em sensoriamento remoto e estudo do clima, as radiações solar e terrestre têm grandes reflexos em nosso cotidiano. *Processos radiativos na atmosfera* fornece os subsídios para que o leitor compreenda a interação da radiação eletromagnética com a atmosfera e a superfície terrestre, assim como suas consequências.

A obra aborda desde grandezas radiométricas, radiação de corpo negro, radiação solar e medição da irradiância até absorção, emissão e espalhamento, equação de transferência radiativa e balanços radiativos.

Processos radiativos na atmosfera preenche uma lacuna de livros didáticos sobre o tema em português para estudantes de graduação e pós-graduação de Meteorologia e Ciências Atmosféricas, bem como para profissionais de áreas como Sensoriamento Remoto, Engenharia Ambiental e Energia.

ISBN 978-85-7975-229-2



9 788579 752292