



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

Mestrado em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço

Especialização em Física da Atmosfera e do Clima

Dissertação

**Simulações de Transferência Radiativa em Atmosferas com Nuvens:
Comparação entre diferentes aproximações**

Vanda Cristina Pires Salgueiro

Orientador:

Professora Doutora Maria João Costa

Co-Orientador:

Professora Doutora Ana Maria Silva

Setembro de 2011

Mestrado em Ciências da Terra, da Atmosfera e do Espaço

Especialização em Física da Atmosfera e do Clima

Dissertação

**Simulações de Transferência Radiativa em Atmosferas com Nuvens:
Comparação entre diferentes aproximações**

Vanda Cristina Pires Salgueiro

Orientador:

Professora Doutora Maria João Costa

Co-Orientador:

Professora Doutora Ana Maria Silva

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu irmão Hélio Salgueiro toda a amizade e compreensão dadas durante o meu percurso académico.

Gostaria de agradecer às professoras Maria João Costa e Ana Maria Silva a atenção e disponibilidade sempre prestadas.

Também gostaria de agradecer ao Mestre Miguel Potes pela ajuda prestada com o modelo SHDOM, assim como também gostaria de agradecer ao Mestre Sérgio Pereira pelo acompanhamento e recolha de dados do radiómetro espectral YES MFR-7.

A todas as pessoas que passaram na minha vida durante o meu percurso pela Universidade de Évora, especialmente aos meus colegas e amigos do grupo de Física da Atmosfera e do Clima e do grupo de Geofísica.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto FCOMP-01-0124-FEDER-007122 (PTDC / CTE-ATM / 65307 / 2006) financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, a quem exprimo a minha gratidão.

Simulações de Transferência Radiativa em Atmosferas com Nuvens: Comparação entre diferentes aproximações

Resumo

A quantidade de fluxo de radiação solar que atinge a superfície terrestre depende muito da existência de nuvens e conseqüentemente das suas propriedades ópticas, da estrutura geométrica e quantidade. Deste modo numa primeira parte do trabalho, utilizaram-se modelos de transferência radiativa, 3D (SHDOM) e 1D (SHDOMPP), para simular campos de irradiância solar global à superfície em condições de atmosferas com nuvens. Por outro lado, foi utilizado um modelo analítico que permitiu, a partir da combinação com o modelo 3D, obter valores do factor de forma que caracteriza a geometria das nuvens. Numa segunda parte do trabalho, verificou-se que a irradiância à superfície depende muito da espessura óptica das nuvens e da nebulosidade. Deste modo, a partir da comparação de valores de campos de irradiância simulados, com o modelo 1D (UVSPEC), com valores medidos pelo radiómetro espectral YES MFR-7 obtiveram-se valores de espessura óptica e de nebulosidade para alguns dias seleccionados.

Palavras-chave: transferência radiativa, nuvens, espessura óptica, nebulosidade, factor de forma

Radiative Transfer Simulations in Cloudy Atmospheres: Comparison between different approximations

Abstract

The amount of solar radiation flux that reaches the Earth's surface strongly depends on the existence of clouds and consequently on its optical properties, geometrical structure and amount. So in a first part of this work, 3D (SHDOM) and 1D (SHDOMPP) radiative transfer models were used to simulate solar irradiance fields at the surface for atmospheres with clouds. On the other hand, an analytical model was used that allowed, from the combination with the 3D (SHDOM) model, infer shape factor values that characterize cloud's geometry. In a second part of the work it was observed that the irradiance at the surface strongly depends on the cloud optical depth and cloudiness. So, from the comparison between simulated irradiance fields, with a 1D model (UVSPEC), and measured values, from a Multi-Filter Rotating Shadow Band Radiometer YES MFRSR-7, the cloud optical depth and cloudiness values for some selected days were inferred.

Keywords: radiative transfer, clouds, optical depth, cloudiness, shape factor

Índice

Lista de símbolos	vi
Lista de figuras e tabelas	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Natureza do problema	1
1.2. Objectivos	1
1.3. Estrutura da tese	2
2. Fundamentos de transferência radiativa na Atmosfera	4
2.1. Conceitos básicos.....	4
2.2. Conceito de irradiância	5
2.3. Dispersão e absorção	6
2.4. A Equação de transferência radiativa	9
2.4.1. Equação de transferência radiativa em atmosferas planas e paralelas.....	10
2.5. Parametrização das propriedades radiativas das nuvens.....	14
3. Metodologia e Simulações	16
3.1. SHDOM.....	17
3.1.1. Simulações com o modelo SHDOM	18
3.2. Modelo analítico de transferência radiativa para atmosferas com nuvens	20
3.3. UVSPEC	24
3.3.1. Simulações de irradiância com o modelo UVSPEC para a análise de sensibilidade a parâmetros que caracterizam as nuvens.....	27
3.3.2. Simulações de irradiância com o modelo UVSPEC e metodologia para a obtenção de propriedades das nuvens	28
4. Resultados e Discussão	33
4.1. Resultados das simulações de irradiância solar com o modelo SHDOM.....	33
4.2. Resultados dos cálculos com o modelo analítico de transferência radiativa ...	40
4.3. Análise de sensibilidade de parâmetros que caracterizam as nuvens	46

4.4. Análise estatística das nuvens em Évora	52
4.5. Resultados de valores inferidos de propriedades das nuvens	59
5. Conclusões	68
Referências	70
Anexo	73

Lista de símbolos

λ (μm)	Comprimento de onda (<i>Wavelength</i>)
UV	Ultravioleta (<i>Ultraviolet</i>)
VIS	Visível (<i>Visible</i>)
IV	Infravermelho (<i>Infrared</i>)
μm ; $1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm}$	Micrómetro (<i>Micrometer</i>)
W ; $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$	Watt
r_e (μm)	Raio eficaz (<i>Effective radius</i>)
F (W.m^{-2})	Irradiância ou densidade de fluxo (<i>Irradiance or flux density</i>)
$P(\cos\Theta)$	Função de fase (<i>Phase function</i>)
ϕ	Ângulo azimutal (<i>Azimuthal angle</i>)
θ	Ângulo zenital (<i>Zenital angle</i>)
$d\Omega$	Diferencial de ângulo sólido (<i>Differential solid angle</i>)
k_λ (m^2/kg)	Secção eficaz de extinção de massa (<i>Mass extinction cross section</i>)
P (kg/m^3)	Densidade (<i>Density</i>)
dS (m)	Espessura geométrica (<i>Geometric thickness</i>)
μ	Co-seno do ângulo zenital (<i>Cosine of zenital angle</i>)
μ_0	Co-seno do ângulo solar zenital (<i>Cosine of solar zenital angle</i>)
$I(\tau; \mu, \phi)$	Sumidouros (<i>Sinks</i>)
$J(\tau; \mu, \phi)$	Função fonte (<i>Source function</i>)
τ	Espessura Óptica (<i>Optical depth</i>)
$\tilde{\omega}$	Albedo de dispersão simples (<i>Single scattering albedo</i>)
σ_e (m^2)	Secção eficaz de extinção (<i>Extinction cross section</i>)
N (m^3)	Densidade de partículas (<i>Density of particles</i>)
β_e (m^{-1})	Coefficiente de extinção (<i>Extinction coefficient</i>)

$F_o (W.m^{-2})$	Fluxo solar directo (<i>Direct solar flux</i>)
Q_e	Factor de eficiência de extinção (<i>extinction efficiency factor</i>)
$F_{dif}^{\uparrow\downarrow} (W.m^{-2})$	Fluxo difuso ascendente (\uparrow) ou descendente (\downarrow) (<i>Upward diffuse flux \uparrow and downward diffuse flux \downarrow</i>)
$F_{dir}^{\downarrow} (W.m^{-2})$	Fluxo directo (<i>Direct flux</i>)
$LWC (g.cm^{-3})$	Conteúdo de água líquida (<i>Liquid water content</i>)
$LWP (g.cm^{-3})$	Quantidade de água líquida existente na nuvem integrada na vertical (<i>Liquid water path</i>)

Simbologia adoptada no modelo analítico de transferência radiativa (*adopted symbology in the analytical radiative transfer model*):

F	Factor geométrico de auto-iluminação ou factor de forma (<i>Geometric factor of auto illumination or form factor</i>)
$I_d' (W.m^{-2})$	Irradiância incidente numa camada no sentido descendente (<i>Downward incident irradiance on a layer</i>)
$I_d'' (W.m^{-2})$	Irradiância emergente numa camada no sentido descendente (<i>Downward emergent irradiance from a layer</i>)
$I_u' (W.m^{-2})$	Irradiância emergente numa camada no sentido ascendente (<i>Upward emergent irradiance from a layer</i>)
$I_u'' (W.m^{-2})$	Irradiância incidente numa camada no sentido ascendente (<i>Upward incident irradiance on a layer</i>)
Δr	Reflectância (<i>Reflectance</i>)
$\Delta \tau$	Transmitância (<i>Transmittance</i>)
$(RF)_{nx}$	Fracção de radiação que emerge de n e eventualmente incide em x (<i>Fraction of radiation that emerges from n and eventually reaches to x</i>)
χ	Espessura óptica (<i>Optical depth</i>)

f	Fracção de radiação dispersa na direcção de propagação (<i>Single forward fraction</i>)
$\Delta\alpha$	Absortância (<i>Absorptance</i>)
Δz (m)	Espessura geométrica (<i>Geometrical thickness</i>)
g	Parâmetro de assimetria (<i>Asymmetry parameter</i>)

Lista de figuras e tabelas

Figura 1 Espectros de radiação solar e terrestre..... 4

Figura 2 Representação do diferencial de ângulo sólido em coordenadas esféricas. Também é possível observar a esquematização de um feixe de radiação através de um elemento de área dA nas direcções confinadas a um ângulo sólido $d\Omega$ 6

Figura 3 Esquematização do processo de dispersão múltipla. 7

Figura 4 Bandas de absorção dos principais gases na Atmosfera. 9

Figura 5 Geometria para a atmosfera plana e paralela em que θ é o ângulo zenital e ϕ é o ângulo azimutal 11

Figura 6 Esquematização da transferência de radiação em camadas planas e paralelas da Atmosfera..... 13

Figura 7 Distribuição dos raios eficazes das gotículas e cristais de gelo das nuvens. 19

Figura 8 Espessura óptica total, em toda a coluna atmosférica em cada ponto, assumindo que na Atmosfera apenas existem nuvens do tipo *Cumulus* e nuvens do tipo *Cirrus*. 20

Figura 9 Esquematização de uma camada de nuvens caracterizadas geometricamente por contornos irregulares, na base e no topo, à qual se pode aplicar o modelo analítico de transferência radiativa. 21

Figura 10 Irradiância global à superfície, em função da espessura óptica das nuvens, simulada com os modelos numéricos 1D: SHDOMPP (linha a verde) e UVSPEC (linha azul). 34

Figura 11 Campos de irradiância solar global à superfície simulados com o SHDOM (a preto no eixo da esquerda) e com o SHDOMPP (a verde no eixo da esquerda) e a espessura óptica total das nuvens ao longo da extensão horizontal (a azul no eixo da direita). 35

Figura 12 Diferenças entre os campos de irradiâncias, simulados com o modelo SHDOM (3D) e com o SHDOMPP (1D), que se encontram representados na figura 11..... 36

Figura 13 Diferenças entre os campos de irradiância, simulados com os modelos 3D e 1D, para pixéis de céu limpo a partir do bordo das nuvens e até uma distância de 2.4 km para fora das nuvens. 37

Figura 14 Diferenças entre os campos de irradiâncias, simulados com os modelos 3D e 1D, para pixéis de céu limpo antes das nuvens para uma distância de 2.4 km antes do bordo da nuvem..... 38

Figura 15 Campos de irradiância solar global à superfície, simulados com o SHDOM (a preto no eixo da esquerda) e com o SHDOMPP (a verde no eixo da esquerda), para a Atmosfera constituída por uma camada de *Cirrus* contínua e uma camada de *Cumulus* descontínua. Os símbolos a vermelho indicam os locais onde existem *Cumulus*. A azul, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens..... 39

Figura 16 Campos de irradiâncias emergentes da base de uma nuvem do tipo *Cumulus*, para $\lambda=440\text{ nm}$, obtidos com o modelo analítico (a azul no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 3D (a vermelho no eixo da esquerda) e o respectivo factor de forma (F_{tt}) do topo da nuvem (a verde no eixo da esquerda). A preto, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens. 41

Figura 17 Campos de irradiâncias emergentes da base de uma nuvem do tipo *Cumulus*, para $\lambda=440\text{ nm}$, obtidos com o modelo analítico (a azul no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 1D (a vermelho no eixo da esquerda) e o respectivo factor de forma (F_{tt}) do topo da nuvem (a verde no eixo da esquerda). A preto, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens. 41

Figura 18 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440\text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 3D (a preto no eixo da esquerda). A azul, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens. 42

Figura 19 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440\text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 1D (a preto no eixo da esquerda). A azul, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens. 43

Figura 20 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440\text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 3D (a preto no eixo da esquerda) e a espessura óptica da camada (a azul no eixo da direita). Em baixo, encontra-se representado o factor de forma que caracteriza o topo (F_{tt}) da camada de *Cirrus*, obtido através do ajuste entre a irradiância analítica e a 3D. 44

Figura 21 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440\text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 1D (a preto no eixo da esquerda) e a espessura óptica da camada (a azul no eixo da direita). Em baixo, encontra-se representado o factor de forma que caracteriza o topo (F_{tt}) da camada de *Cirrus*, obtido através do ajuste entre a irradiância analítica e a 3D. 44

Figura 22 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda= 415\text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando vários raios eficazes das gotículas das nuvens que variam entre $6\ \mu\text{m}$ e $25\ \mu\text{m}$ 46

Figura 23 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda= 860\text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando vários raios eficazes das gotículas das nuvens que variam entre $6\ \mu\text{m}$ e $25\ \mu\text{m}$ 46

Figura 24 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda= 415\text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando várias situações de nebulosidade que variam entre 0.2 e 1. 48

Figura 25 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda= 860 \text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando várias situações de nebulosidade que variam entre 0.2 e 1.	48
Figura 26 Malha de simulações constituída pelas somas em função das diferenças das irradiâncias globais à superfície simuladas para os comprimentos de onda dos 415 nm e 860 nm . O albedo da superfície para os 415 nm é de 0.25 e para os 860 nm é de 0.28. Na figura C_{nuvens} representa a nebulosidade, τ_{nuvens} representa a espessura óptica das nuvens e sza o ângulo solar zenital; em (a) $\text{sza}=50^\circ$, em (b) $\text{sza}=60^\circ$, em (c) $\text{sza}=70^\circ$ e em (d) $\text{sza}=80^\circ$	51
Figura 27 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2006.	52
Figura 28 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2007.	52
Figura 29 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2008.	53
Figura 30 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2009.	53
Figura 31 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2010.	53
Figura 32 Nuvens baixas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.	55
Figura 33 Nuvens baixas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens nos anos de 2006 a 2010.	56
Figura 34 Nuvens baixas: diagrama dos valores médios das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.	57
Figura 35 Valores de espessura óptica: 28-12- 2005.	60
Figura 36 Valores de espessura óptica: 24-01-2006.	60
Figura 37 Valores de espessura óptica: 15-08-2006.	60
Figura 38 Valores de espessura óptica: 11-09-2006.	60
Figura 39 Valores de espessura óptica: 06-08- 2007.	60
Figura 40 Valores de espessura óptica: 21-09-2007.	60
Figura 41 Valores de espessura óptica: 15-10-2007.	61
Figura 42 Valores de espessura óptica: 13-01- 2008.	61
Figura 43 Valores de espessura óptica: 26-03-2008.	61
Figura 44 Valores de espessura óptica: 16-05-2008.	61
Figura 45 Valores de espessura óptica: 01-06- 2008.	61
Figura 46 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 28-12-2005.	64
Figura 47 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 24-01-2006.	64
Figura 48 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 15-08-2006.	65
Figura 49 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 11-09-2006.	65
Figura 50 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 06-08-2007.	65
Figura 51 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 21-09-2007.	66
Figura 52 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 15-10-2007.	66

Figura 53 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 13-01-2008.....	66
Figura 54 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 26-03-2008.....	67
Figura 55 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 16-05-2008.....	67
Figura 56 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 01-06-2008.....	67
Figura A.1 Nuvens médias: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.	73
Figura A.2 Nuvens altas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.	74
Figura A.3 Nuvens médias: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens nos anos de 2006 a 2010.	75
Figura A.4 Nuvens altas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens nos anos de 2006 a 2010.	76
Figura A.5 Nuvens médias: diagrama dos valores médios das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.	76
Figura A.6 Nuvens altas: diagrama dos valores médios das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.	77
Tabela 1 Métodos para resolver a equação de transferência radiativa implementados no uvspec. Retirado de Mayer et al., 2005.	26

1. Introdução

1.1.Natureza do problema

A transferência de fluxos energia sob a forma de radiação electromagnética constitui uma forma muito importante de transferência de energia na Atmosfera. Esta transferência de fluxos de energia depende dos constituintes da Atmosfera nomeadamente das nuvens, as quais desempenham um papel fundamental no balanço radiativo do sistema Terra – Atmosfera. A transferência de radiação através das camadas de nuvens depende da concentração, das distribuições de dimensões e formas das partículas e da espessura e geometria das nuvens (Liou, 2002). Pelo que, os fluxos de radiação solar que atingem a superfície, dependem da estrutura e composição das nuvens. Os fluxos de radiação solar dependem também da fracção de céu coberto por nuvens. A fracção e o tipo de nuvens são variáveis chave, que controlam a quantidade de radiação solar transmitida e reflectida e consequentemente o balanço de radiação à superfície (Kassianov et al., 2011). Deste modo, o conhecimento das propriedades, físicas e geométricas e da quantidade de nuvens na Atmosfera assim como o conhecimento da variabilidade espacial e temporal exibida pelas nuvens, é importante na determinação dos fluxos de radiação solar que atingem a superfície, os quais por sua vez são particularmente importantes porque determinam toda a dinâmica do Tempo e Clima. Para compreender melhor o papel das nuvens no balanço de energia, vários métodos têm sido desenvolvidos e melhorados, ao longo dos anos, a fim de simular e inferir as propriedades e os efeitos das nuvens nos fluxos de radiação. Na literatura existem vários métodos descritos que permitem determinar valores de propriedades das nuvens a partir de algoritmos e de metodologias baseadas em medidas de quantidades radiativas à superfície ou em medidas de detecção remota por satélite, de entre os quais Chiu et al., 2006, 2010; Kassianov et al., 2011.

1.2. Objectivos

Um dos objectivos deste trabalho consiste na comparação de campos de irradiância solar global à superfície obtidos através de diferentes modelos de transferência radiativa. Estes campos de irradiância são simulados, com o modelo numérico de transferência radiativa tridimensional Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method for Three-Dimensional Atmospheric Radiative Transfer (SHDOM) e com a sua versão

unidimensional SHDOMPP (Evans, 1998) assumindo atmosferas com nuvens. Pretende-se ainda, com este objectivo, testar um modelo analítico de transferência radiativa (Silva, 1987; Rosa, 1988) para atmosferas com nuvens, o qual depende, para além de outros parâmetros de um factor geométrico de auto-iluminação (ou factor de forma), que é também aqui determinado.

Por outro lado, um segundo objectivo do trabalho é a determinação de algumas variáveis que caracterizam o campo de nuvens, a partir da inversão de medidas da irradiância global espectral à superfície em Évora. Para tal foi necessário fazer-se uma análise de sensibilidade da irradiância solar global à superfície a diferentes parâmetros que caracterizam as nuvens, (nebulosidade, raio eficaz e espessura óptica), a partir da comparação entre diferentes simulações obtidas com o modelo numérico de transferência radiativa unidimensional UVSPEC (Mayer et al., 2005). Fez-se ainda a análise estatística da altura da base das nuvens em Évora, necessária para introduzir no algoritmo desenvolvido para a determinação de variáveis que caracterizam as nuvens.

1.3.Estrutura da tese

A presente tese encontra-se estruturada em cinco capítulos, dos quais é feita de seguida uma breve descrição, à excepção do presente capítulo (capítulo 1).

No capítulo 2 são apresentados alguns dos fundamentos teóricos básicos de transferência radiativa. Após uma pequena introdução é apresentado o conceito de irradiância, os processos físicos mais importantes de atenuação da radiação na atmosfera (dispersão e absorção), a equação geral de transferência radiativa assim como a sua simplificação para a radiação solar e, por fim, algumas propriedades radiativas das nuvens.

No capítulo 3 são descritos os métodos e simulações adoptados para cumprir os objectivos propostos. Deste modo, o capítulo 3 inicia-se com uma pequena introdução seguida, em 3.1, de uma breve descrição do modelo numérico SHDOM e das simulações realizadas com este modelo (3.1.1). Em 3.2 o modelo analítico de transferência radiativa é descrito assim como os cálculos efectuados com este modelo. Finalmente em 3.3 o modelo numérico UVSPEC é brevemente descrito, sendo esta descrição seguida, em 3.3.1, pelas simulações usadas para fazer a análise de sensibilidade a parâmetros que caracterizam as nuvens e por fim, em 3.3.2, são

abordadas as estatísticas da altitude da base das nuvens em Évora assim como as simulações e a metodologia usada para obter valores de propriedades das nuvens.

O capítulo 4 compreende a apresentação e discussão dos resultados obtidos e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

2. Fundamentos de transferência radiativa na Atmosfera

2.1. Conceitos básicos

A radiação electromagnética é o processo de transferência de energia mais importante na Atmosfera, pois são as trocas de energia sob a forma de radiação entre as diferentes camadas atmosféricas e a superfície terrestre e entre a Atmosfera e o espaço que conduzem e determinam o tempo e o clima do sistema Terra – Atmosfera. Estas trocas de energia, mediante diferentes processos físicos, são determinadas pela composição do sistema (gases, nuvens, aerossóis e cobertura da superfície). A energia radiante pode ser descrita em termos do comprimento de onda, λ , que a caracteriza. Na Atmosfera existem duas fontes principais de radiação electromagnética: a radiação solar, de pequeno comprimento de onda, e a radiação terrestre de grande comprimento de onda (ver figura 1). Os comprimentos de onda do espectro de radiação solar que são significativos para a transferência do fluxo solar na Atmosfera estão compreendidos entre aproximadamente $0.2 \mu m$ a $3.5 \mu m$, onde praticamente toda a energia irradiada pelo Sol se encontra localizada. De acordo com os comprimentos de onda atrás referidos, o espectro de radiação solar pode dividir-se nas gamas do ultravioleta ($\lambda < 0.4 \mu m$), do visível ($0.4 \mu m < \lambda < 0.76 \mu m$) e do infravermelho ($\lambda > 0.76 \mu m$). O espectro de radiação térmica da Terra encontra-se aproximadamente entre os $3.5 \mu m$ e os $100 \mu m$, pelo que os espectros de radiação solar e terrestre se podem separar em duas regiões distintas o que permite tratar a transferência de radiação solar independentemente da transferência de radiação térmica da Terra.

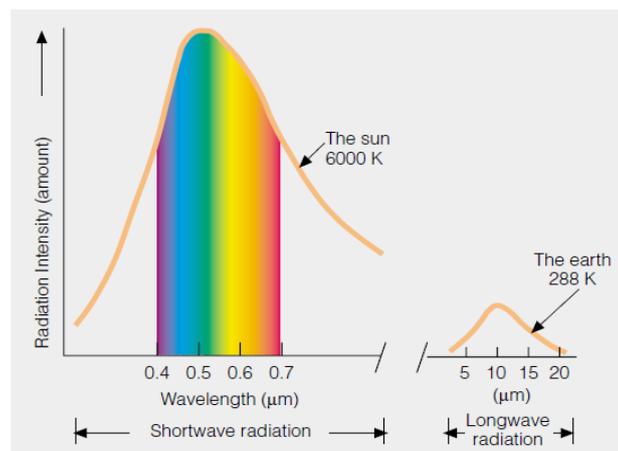


Figura 1 Espectros de radiação solar e terrestre. Retirado de Ahrens, 2000.

À medida que a radiação se propaga na atmosfera interage, mediante diferentes processos físicos, com os diferentes constituintes atmosféricos como é o caso das gotículas de água líquida que constituem as nuvens. A radiação durante o seu percurso pode ser absorvida e a sua energia é transferida para o absorvente que, posteriormente, a pode emitir para o meio de acordo com a sua temperatura absoluta (Lei de *Kirchoff*). Por outro lado, a radiação pode também ser dispersa o que significa que a sua direcção de propagação é alterada. O facto de a radiação ser absorvida, emitida e dispersa depende do comprimento de onda da radiação incidente assim como das propriedades físicas dos constituintes do meio em consideração. Estes processos físicos, que determinam a interacção da radiação com a matéria, são responsáveis pela variação dos fluxos de radiação que chegam à superfície.

2.2. Conceito de irradiância

A irradiância espectral ou densidade de fluxo espectral, F_λ , é uma quantidade física definida pela componente normal da intensidade monocromática (ou radiância), I_λ , integrada sobre todos os ângulos sólidos de um hemisfério. Sendo a intensidade monocromática I_λ , definida como a quantidade de energia, dE_λ , que nos chega por unidade de tempo, dt , por unidade de área, $\cos\theta dA$, por unidade de comprimento de onda, $d\lambda$, e por unidade de ângulo sólido $d\Omega$ (ver figura 2). Deste modo, a irradiância monocromática cujas unidades são $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ vem dada por,

$$F_\lambda = \int I_\lambda \cos(\theta) d\Omega \quad (1)$$

Na expressão (1) o diferencial do ângulo sólido, $d\Omega$, (ver figura 2) em coordenadas esféricas é definido por,

$$d\Omega = \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2)$$

Na expressão (2), θ e ϕ denotam respectivamente os ângulos zenital e azimutal. O ângulo zenital varia de 0 a $\pi/2$ e o ângulo azimutal varia de 0 a 2π .

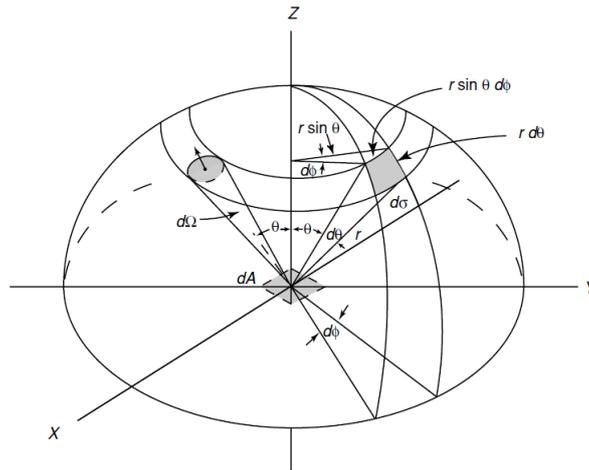


Figura 2 Representação do diferencial de ângulo sólido em coordenadas esféricas. Também é possível observar a esquematização de um feixe de radiação através de um elemento de área dA nas direções confinadas a um ângulo sólido $d\Omega$. Retirado de Liou, 2002.

A irradiância ou densidade de fluxo total, em $W.m^{-2}$, para todos os comprimentos de onda dentro de uma banda espectral de interesse ou para todo o espectro electromagnético é dada por,

$$F = \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} F_{\lambda} d\lambda \quad (3)$$

Na expressão (3) λ_i e λ_f representam, respectivamente, os comprimentos de onda inicial e final da banda espectral, no caso de se integrar numa banda, ou 0 e ∞ no caso de integrar em relação a todo o espectro electromagnético.

2.3. Dispersão e absorção

Quando um constituinte atmosférico se encontra no caminho de uma onda electromagnética pode remover energia dessa onda redireccionando-a numa direcção diferente da direcção inicial de propagação. Este processo de remoção de energia designa-se por dispersão. A dispersão mais do que uma vez, de um mesmo feixe de radiação, é designada por dispersão múltipla e encontra-se esquematizada na figura 3. A radiação que é sujeita ao processo físico de dispersão (simples ou/ e múltipla) também

pode ser chamada de radiação difusa. Na Atmosfera, geralmente assume-se que a radiação que é dispersa pelas partículas e moléculas tem o mesmo comprimento de onda da radiação incidente.

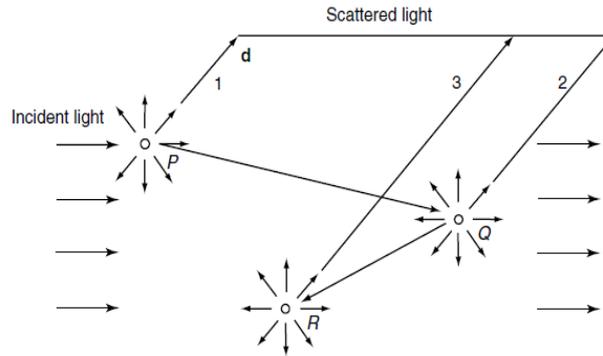


Figura 3 Esquemática do processo de dispersão múltipla. Retirado de Liou, 2002.

A radiação dispersa por um determinado constituinte atmosférico depende do inverso do quadrado da distância entre o constituinte e o ponto de observação, do comprimento de onda da radiação incidente e do índice de refração do constituinte em questão. O índice de refração é composto por uma parte real e por uma parte imaginária que correspondem, respectivamente, às propriedades de dispersão e absorção dos constituintes atmosféricos. Na gama do visível a parte imaginária é em geral muito pequena, pelo que pode ser negligenciada quando se trata a dispersão nestes comprimentos de onda. Há ainda um outro parâmetro a ter em conta quando se trata a dispersão. Este parâmetro é a função de fase, $P(\cos\Theta)$, que descreve a distribuição angular da radiação dispersa; é um parâmetro adimensional. A função de fase normalizada à unidade, é definida por,

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{P(\cos\Theta)}{4\pi} \sin\Theta d\Theta d\phi = 1 \quad (4)$$

Onde Θ é o ângulo de dispersão, sendo definido como ângulo entre a onda incidente e a onda dispersa.

A dimensão dos constituintes atmosférico, com os quais a radiação interactua, influencia o regime de dispersão que permite caracterizar o efeito da dispersão de um determinado evento. O efeito da dimensão dos constituintes pode ser inferido a partir de um parâmetro que exprime a relação entre a sua área e o comprimento de onda da radiação incidente; considerando a geometria esférica de raio a , este parâmetro é dado por $x = 2\pi a/\lambda$. Se a dimensão do constituinte atmosférico é muito menor que o comprimento de onda então $x \ll 1$ e a dispersão é designada por dispersão de *Rayleigh*; para aqueles cujas dimensões são comparáveis ou superiores ao comprimento de onda incidente então $x \gtrsim 1$ a dispersão é referida como dispersão de *Lorenz-Mie*. Os padrões angulares de dispersão exibidos, isto é, as direcções em que a dispersão é máxima e mínima dependem destes regimes. O regime de *Lorenz-Mie* aplica-se por exemplo a comprimentos de onda da radiação solar na gama do visível considerando gotículas de nuvem com dimensões típicas entre $1\mu m$ e $10\mu m$; o regime de *Rayleigh* aplica-se por exemplo a comprimentos de onda da radiação solar na gama do visível, mas considerando moléculas de ar com dimensões na ordem de $10^{-3}\mu m$.

A radiação pode também sofrer absorção por parte dos gases, aerossóis e nuvens presentes na Atmosfera. A absorção constitui outro processo de remoção de energia e depende do comprimento de onda da radiação incidente, da natureza e da distribuição dos constituintes presentes nas diferentes camadas da Atmosfera. Na figura 4, estão representadas as regiões espectrais onde os principais gases (N_2O , CH_4 , O_3 , H_2O e CO_2) absorvem a radiação. De notar que na gama do visível a Atmosfera é praticamente transparente à radiação. Contudo existem outras regiões do espectro onde a Atmosfera é praticamente opaca à passagem da radiação devido à absorção pelos gases; neste caso temos o exemplo do vapor de água (H_2O) e do dióxido de carbono (CO_2) que são os gases absorventes mais importantes na gama do IV e por outro lado temos o exemplo do ozono (O_3) que é muito importante na absorção de radiação UV.

A absorção e dispersão da radiação constituem ambos mecanismos de extinção da radiação na Atmosfera. O processo de dispersão múltipla é muito importante quando se está na presença de nuvens e ao mesmo tempo na gama do visível do espectro, uma vez que as nuvens são meios muito dispersores e absorvem muito pouco nestes comprimentos de onda. Por outro lado, as nuvens também podem ser meios muito absorventes se estivermos a considerar a gama do infravermelho.

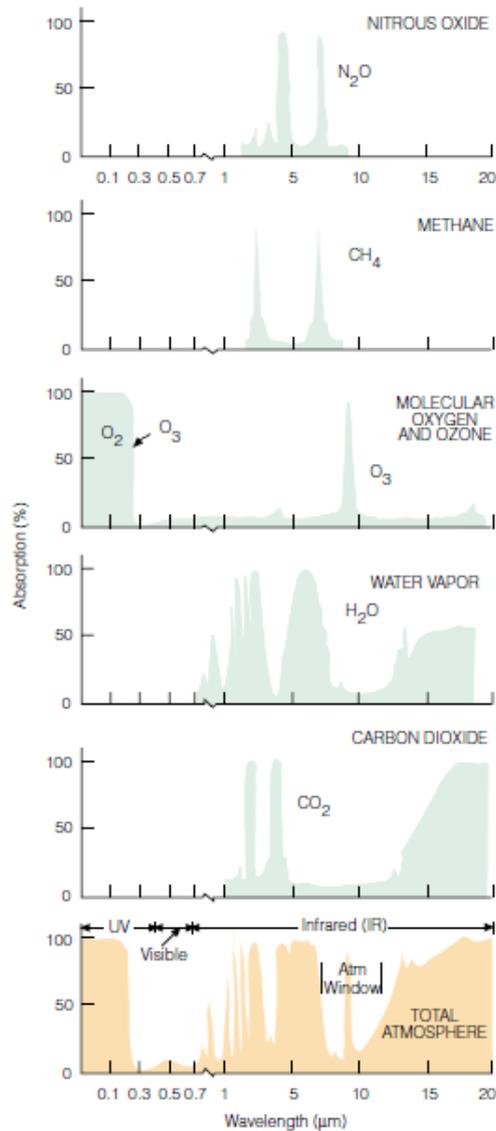


Figura 4 Bandas de absorção dos principais gases na Atmosfera. Retirado de Ahrens, 2000.

2.4. A Equação de transferência radiativa

Quando um feixe de radiação percorre um meio, como é por exemplo o caso das nuvens, vai sofrer variações na sua intensidade, I_λ (dispersão e absorção), devido à interacção com os constituintes do meio, o que já anteriormente foi referido. Por um lado, o feixe sofre uma redução na intensidade ao longo da direcção de propagação do feixe devido à absorção e à dispersão simples pelas partículas e moléculas constituintes do meio. Por outro lado, o feixe pode ser fortalecido na direcção do feixe em consideração, quer pela dispersão múltipla, quer pela emissão por parte dos

constituintes do meio, de acordo com a sua temperatura, considerando o mesmo comprimento de onda. Deste modo, a interação de um feixe de radiação com um dado meio, mediante os diferentes processos físicos, pode ser descrita pela equação geral de transferência radiativa que, sem sistema de coordenadas imposto, se exprime por,

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho dS} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (5)$$

Na expressão (5), k_λ é a secção eficaz de extinção mássica (m^2/kg) devido à absorção e à dispersão simples, ρ é a massa volúmica do meio (kg/m^3) e dS é a espessura geométrica elementar do meio atravessada pelo feixe na direcção de propagação (m). Os termos $-I_\lambda$ e J_λ do lado direito da equação representam, respectivamente, os sumidouros e as fontes de radiação ao longo da direcção de propagação do feixe e dI_λ a variação da intensidade do feixe monocromático à medida que vai penetrando no meio. Os sumidouros referem-se aos mecanismos responsáveis pela atenuação do feixe e as fontes aos mecanismos responsáveis pelo fortalecimento do feixe ao longo da direcção da sua propagação.

2.4.1. Equação de transferência radiativa em atmosferas planas e paralelas

A equação geral de transferência de radiativa (5) pode reescrever-se assumindo que a geometria da atmosfera é plana e paralela (ver figura 5). Esta aproximação considera que a atmosfera em porções localizadas é plana e paralela tal que as variações na intensidade dos parâmetros atmosféricos são apenas permitidas na direcção vertical. Deste modo a equação de transferência radiativa vem dada por,

$$\mu \frac{dI(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau; \mu, \phi) - J(\tau; \mu, \phi) \quad (6)$$

Na expressão (6), $\mu = \cos \theta$ é o co-seno do ângulo zenital, $d\tau$ representa a espessura óptica elementar do meio e ϕ é o ângulo azimutal. A espessura óptica traduz o poder de

atenuação do meio relativamente à radiação incidente. A espessura óptica elementar é definida por,

$$\frac{d\tau_\lambda}{\mu} = -k_\lambda \rho dS = -\frac{k_\lambda \rho dz}{\cos\theta} = -\frac{\sigma_e N dz}{\cos\theta} = -\frac{\beta_e dz}{\cos\theta} \quad (7)$$

E a espessura óptica de uma camada limitada inferiormente pelo nível z é dada por,

$$\tau_\lambda(z, 0) = \int_z^\infty \sigma_e(\lambda, z) N dz' = \int_z^\infty \beta_e dz' \quad (8)$$

Na expressão (8), β_e é o coeficiente de extinção (m^{-1}) que é dado pelo produto da secção eficaz de extinção, $\sigma_e (m^2)$, com a densidade de partículas $N (m^{-3})$. A secção eficaz de extinção é análoga à área geométrica da partícula e é utilizada para descrever a quantidade de energia removida do feixe original pela partícula. A secção eficaz de extinção é dada pela soma das secções eficazes de dispersão σ_s e de absorção σ_a .

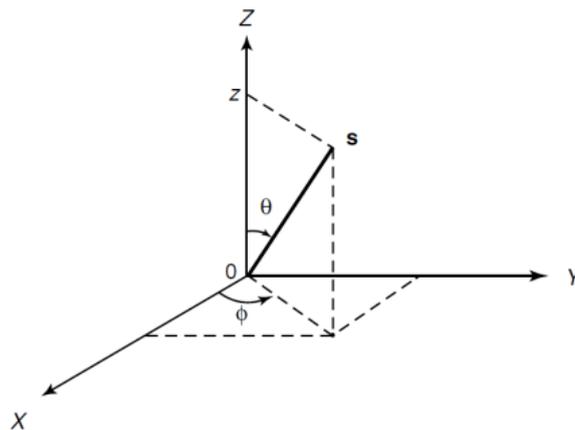


Figura 5 Geometria para a atmosfera plana e paralela em que θ é o ângulo zenital e ϕ é o ângulo azimutal. Retirado de Liou, 2002.

A função de fonte $J(\tau; \mu, \phi)$, na expressão (6), é dada por,

$$J(\tau; \mu, \phi) = \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 I(\tau; \mu', \phi') P(\mu, \phi; \mu', \phi') d\mu' d\phi' + \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} F_0 P(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\tau}{\mu_0}} + (1 - \tilde{\omega}) B[T(\tau)] \quad (9)$$

Na expressão (9) o primeiro e o segundo termos, do lado direito, representam respectivamente as contribuições da dispersão múltipla e da dispersão simples do fluxo solar directo (F_0) o qual é atenuado num nível τ . O terceiro termo, também do lado direito da equação, diz respeito à contribuição da emissão pelo meio que se encontra à temperatura T no nível vertical τ ; a emissão é igual à absorção pelo meio e este termo é calculado a partir das leis de *Kirchhoff* e de *Planck*. Os sinais atribuídos a μ indicam a direcção associada ao feixe o que se pode observar na figura 6; se $\mu > 0$ a direcção é ascendente e se $\mu < 0$ a direcção é descendente. A posição do Sol é definida por $(-\mu_0, \phi_0)$ em que $\mu_0 = \cos \theta_0$ sendo θ_0 e ϕ_0 os ângulos solares zenital e azimutal respectivamente. Também na expressão (9), $P(\mu, \phi; \mu', \phi')$ é a função de fase e representa o redireccionamento um feixe de radiação incidente na direcção (μ', ϕ') para a direcção (μ, ϕ) . Os integrais, com limites de integração de 0 a 2π e de -1 a 1, têm em consideração todos os eventos de dispersão possíveis dentro de um ângulo sólido de 4π . Ainda na expressão (9), o albedo de dispersão simples, $\tilde{\omega}$, é a razão entre o coeficiente de dispersão e o coeficiente de extinção; representa a importância da dispersão simples de um determinado evento e vem dado pela seguinte expressão:

$$\tilde{\omega} = \frac{\beta_s}{\beta_e} = \frac{\beta_s}{\beta_s + \beta_a} \quad (10)$$

Quando o meio é totalmente absorvente esta grandeza vale 0; quando é totalmente dispersor $\tilde{\omega} = 1$. Na prática para o caso das nuvens do tipo *Cumulus* e para o caso dos *Estratos*, cujos resultados são similares, para comprimentos de onda compreendidos entre $0.1 \mu m$ e $1 \mu m$ este parâmetro varia entre 0.9 e 1. No caso dos *Cirrus*,

comprimentos de onda entre $0.55 \mu m$ e $1 \mu m$, o albedo de dispersão varia entre aproximadamente 0.9997 e 0.9999 (Liou, 1992).

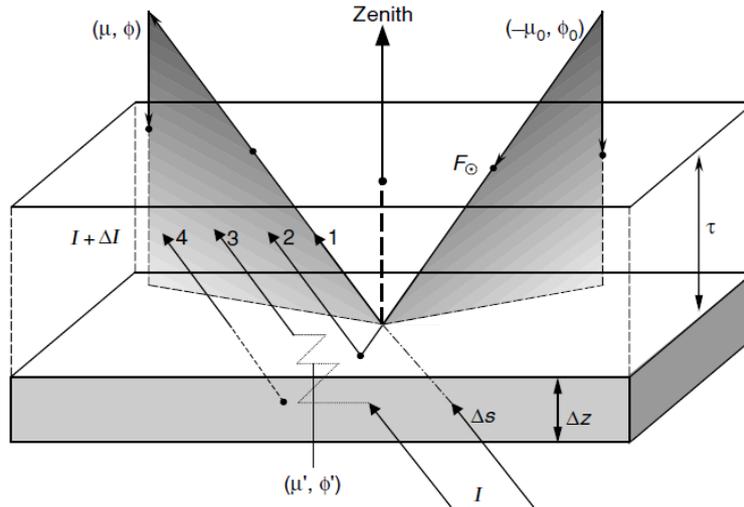


Figura 6 Esquemática da transferência de radiação em camadas planas e paralelas da Atmosfera. Retirado de Liou 2002.

Quando se trata a transferência de radiação solar na atmosfera podemos omitir o termo relativo à emissão pelo meio, na expressão (9). Isto porque, como já foi referido no subcapítulo 2.1, os espectros de radiação solar e terrestre podem ser tratados separadamente porque o valor da emissão de energia radiante (função da temperatura) é desprezável face ao valor da energia radiante na banda espectral solar. Deste modo, quando se trata a transferência de radiação solar na atmosfera há que ter em conta apenas a componente directa do fluxo solar e a componente difusa da radiação (simplex e múltipla) e a equação de transferência radiativa vem então dada por,

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = & I(\tau; \mu, \phi) \\ & - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 I(\tau; \mu', \phi') P(\mu, \phi; \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\ & - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} F_0 P(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) e^{-\frac{\tau}{\mu_0}} \end{aligned} \quad (11)$$

a que se deve adicionar a componente directa do fluxo solar. Esta está associada à atenuação exponencial do feixe solar directo (F_0); esta atenuação, num dado nível τ , é traduzida pela lei de *Beer–Bouguer–Lambert* que, em termos de fluxos (radiâncias integradas sobre todos os ângulos sólidos de um hemisfério), pode ser expressa por,

$$F_{dir}^{\downarrow}(\tau) = \mu_0 F_0 e^{-\tau/\mu_0} \quad (12)$$

Considerando um determinado nível τ as densidades de fluxo de radiação solar ascendente e descendente são dadas por,

$$F^{\uparrow}(\tau) = F_{dif}^{\uparrow}(\tau) \quad (13)$$

$$F^{\downarrow}(\tau) = F_{dif}^{\downarrow}(\tau) + F_{dir}^{\downarrow}(\tau) \quad (14)$$

2.5. Parametrização das propriedades radiativas das nuvens

As nuvens são meios cujas propriedades básicas de absorção e dispersão são determinadas pela distribuição de dimensões, $n(r)$, das partículas que as constituem (gotículas de água, cristais de gelo, aerossóis intersticiais, etc.). O primeiro parâmetro que descreve a distribuição de dimensões das gotículas é uma medida do seu tamanho médio. Desde que as gotículas esféricas dispersem uma quantidade de energia proporcional à sua área de secção eficaz pode-se definir um raio eficaz médio r_e da forma (Liou 1992),

$$r_e = \frac{\int r \pi r^2 n(r) dr}{\int \pi r^2 n(r) dr} \quad (15)$$

Onde $n(r)dr$ representa o número de gotículas por unidade de volume com raio no intervalo $[r, r+dr]$.

Este parâmetro médio (r_e) relaciona-se com a quantidade de água líquida existente na nuvem, integrada na vertical, (LWP) em $g.cm^{-2}$ e com a espessura óptica da nuvem.

$$LWP = LWC \cdot \Delta z \quad (16)$$

Em que,

$$LWC = \frac{4\pi}{3} \rho \int r^3 n(r) dr \quad (17)$$

Onde LWC em $g.cm^{-3}$ é o conteúdo de água líquida para gotículas esféricas.

A espessura óptica para uma dada distribuição de tamanhos de gotículas é definida por,

$$\tau = \Delta z \int \sigma_e n(r) dr = \Delta z \int Q_e \pi r^2 n(r) dr \quad (18)$$

Onde Q_e é o factor de eficiência de extinção. Para comprimentos de onda na gama do visível o factor de eficiência $Q_e \cong 2$ para gotículas de nuvem. Deste modo, substituindo $Q_e \cong 2$ na equação (18) e substituindo as equações (17) e (18) na equação (16), o raio eficaz médio pode relacionar-se com LWP e com τ da seguinte forma,

$$r_e \cong \frac{3}{2\rho} LWP/\tau \quad (19)$$

3. Metodologia e Simulações

Os modelos numéricos de transferência radiativa são uma ferramenta muito útil no cálculo do campo de radiação na atmosfera, pois para determinadas condições atmosféricas e da superfície permitem resolver a equação de transferência radiativa (equação 6, ou a correspondente expressa em termos da irradiância F_λ) a partir da aplicação de métodos numéricos. Neste trabalho foi utilizado o modelo numérico de transferência radiativa tridimensional (3D) - Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method for Three-Dimensional Atmospheric Radiative Transfer (SHDOM) (Evans, 1998) – para o cálculo dos campos de irradiância solar global. Ao mesmo tempo, para efeitos de comparação, foi utilizada uma opção do SHDOM que se baseia na hipótese da atmosfera plana e paralela, isto é, uma versão unidimensional (1D) do modelo 3D - Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method for Plane-Parallel Atmospheric Radiative Transfer (SHDOMPP) (Evans, 1998). Por outro lado, foi também utilizado, para o cálculo de campo de irradiância global à superfície, o modelo numérico de transferência radiativa unidimensional (1D) - UVSPEC (Mayer et al., 2005). Ambos os modelos, SHDOM e UVSPEC, são de distribuição gratuita e podem ser descarregados respectivamente nos endereços de internet <http://nit.colorado.edu/shdom.html> e <http://www.libradtran.org>.

O modelo numérico 3D, SHDOM, é brevemente apresentado no subcapítulo 3.1. Depois, em 3.1.1, é feita a descrição das condições das simulações, de irradiância global à superfície, realizadas com o SHDOM e com a sua versão 1D o SHDOMPP. O subcapítulo 3.2 inicia-se com a descrição do modelo analítico de transferência radiativa para atmosferas com nuvens que tem em consideração um factor de forma que caracteriza a rugosidade das nuvens. De seguida, ainda em 3.2, são descritos os cálculos realizados, com o modelo analítico, nos quais se tiveram em conta as irradiâncias simuladas com o modelo 3D e com a sua versão 1D; estes cálculos permitiram determinar as irradiâncias emergentes da base de nuvens assim como o factor de forma do topo que as caracteriza.

O modelo numérico UVSPEC é brevemente apresentado no subcapítulo 3.3, sendo seguido pela descrição das condições das simulações de irradiância realizadas com o modelo em questão, secção 3.3.1, para a análise de sensibilidade da irradiância à superfície a parâmetros que caracterizam as nuvens. Depois, na secção 3.3.2, são

descritas as condições das simulações realizadas para a aplicação de um método de inversão, o qual também é descrito, e que visa a determinação de algumas propriedades das nuvens; as simulações descritas nesta secção têm em conta os resultados da análise estatística da altitude da base das nuvens em Évora, cuja metodologia é também apresentada na secção 3.3.2, e os resultados da análise de sensibilidade resultantes das simulações descritas na secção 3.3.1.

3.1.SHDOM

O SHDOM é um programa computacional, escrito em FORTRAN, que permite reproduzir o campo radiativo atmosférico. Além de ser o nome dado ao programa computacional o SHDOM consiste numa distribuição que contém exemplos de scripts em UNIX de como usar o modelo, ficheiros de documentação e programas em IDL (Interactive Data Language) que permitem a representação dos dados de saída do SHDOM. Este modelo permite calcular radiâncias ou irradiâncias monocromáticas não polarizadas ou integradas em bandas espectrais, tanto para a radiação solar como para a radiação térmica ou considerando ambas as gamas do espectro. É um modelo multidimensional, pois permite fazer os cálculos para as aproximações 1D, 2D e 3D. O SHDOM permite fazer cálculos para um pixel independente, isto é, permite fazer os cálculos para colunas independentes (1D) (secção 2.4.1) ou para planos separados (2D), em qualquer direcção XZ e YZ, em que cada coluna ou plano é um domínio separado dos restantes (Evans, 1998). A versão 1D (plana e paralela) do SHDOM é conhecida por SHDOMPP e é também escrita em FORTRAN; permite calcular fluxos hemisféricos ascendentes e descendentes, fluxos actínicos nos limites das camadas e radiâncias em altitudes e direcções específicas.

O SHDOM usa os harmónicos esféricos e as ordenadas discretas na representação do campo de radiação durante as diferentes fases em que procede à resolução da equação de transferência radiativa. As ordenadas discretas são utilizadas para integrar a equação de transferência radiativa no espaço e os harmónicos esféricos são utilizados porque são mais eficientes no cálculo do integral, da equação de transferência radiativa, relativo à dispersão. As propriedades físicas e ópticas que caracterizam o meio (temperatura, extinção, albedo de dispersão simples e os coeficientes das séries de Legendre que representam a função de fase) podem ser especificadas em cada ponto da grelha como parâmetros de entrada do modelo (Evans, 1998; Marshak, 2005). O

SHDOM usa o conceito de níveis assumindo que as propriedades ópticas variam linearmente entre níveis (Mayer et al., 2005). As condições fronteira inferiores podem ser representadas por uma superfície Lambertiana, que é especificada pelo albedo da superfície, ou por funções de reflectância bidireccionais existentes na base de dados do modelo. As condições fronteira horizontais podem ser periódicas ou abertas; a principal diferença entre ambas as condições é que no caso de condições fronteira abertas não há reflexão nas fronteiras. As resoluções espaciais e angulares devem ser especificadas, sendo a grelha que representa a variação espacial dos campos adaptativa.

3.1.1. Simulações com o modelo SHDOM

Um dos objectivos da presente tese consiste na comparação de campos de irradiância solar global à superfície, em condições de atmosferas com nuvens simulados com modelos numéricos 1D e 3D, e de se estimarem os efeitos de se considerar apenas a aproximação de atmosfera plana e paralela. No início do presente capítulo foi referido que neste trabalho se utilizaram dois modelos numéricos de transferência radiativa 1D: o SHDOMPP (subcapítulo 3.1) e o UVSPEC (subcapítulo 3.3). Para verificar como ambos os modelos 1D se comportam com o objectivo de posteriormente se fazer a comparação entre os modelos 1D e 3D, a partir dos campos de irradiâncias, foram feitas simulações considerando as mesmas condições atmosféricas e de superfície com ambos os modelos 1D. Foi verificado (subcapítulo 4.1 – Figura 10) que ambos os modelos, (UVSPEC e SHDOMPP), se comportam de forma semelhante. Pelo que para efeitos de comparação dos modelos 1D e 3D foram utilizados os modelos SHDOM e a sua versão 1D (SHDOMPP) (atmosfera plana e paralela – secção 2.4.1).

Assim, considerando o que anteriormente foi referido, foram realizadas simulações, com o SHDOM e com o SHDOMPP, tendo em conta as mesmas condições atmosféricas para ambas as aproximações 3D e 1D. Nestas simulações assumiu-se que na Atmosfera existiam apenas nuvens, pelo que todos os outros constituintes atmosféricos (aerossóis e gases) foram ignorados. Esta condição foi tida em conta de modo a considerar apenas com o efeito das nuvens na atenuação da radiação. Foram feitas duas simulações distintas com base no tipo de nuvens existentes na atmosfera. Por um lado, consideraram-se apenas nuvens de água líquida, do tipo *Cumulus*, como constituintes atmosféricos e por outro lado consideraram-se nuvens de água líquida, do tipo *Cumulus*, e simultaneamente nuvens de gelo do tipo *Cirrus*. A distribuição das

propriedades das nuvens, (raio eficaz e conteúdo de água e de gelo), utilizada refere-se a uma camada descontínua de *Cumulus* compreendidos entre 0.59 km e 2.03 km de altitude e uma camada contínua de *Cirrus* compreendida entre aproximadamente os 9 km e os 15 km de altitude. Esta distribuição ocupa uma extensão horizontal total de cerca de 50 km com espaçamento de 200 metros, isto é, cada pixel representa 200 metros ao qual estão associados valores das propriedades das nuvens. A distribuição de raios eficazes das nuvens utilizada é mostrada na figura 7 e está incluída na base de dados do SHDOM.

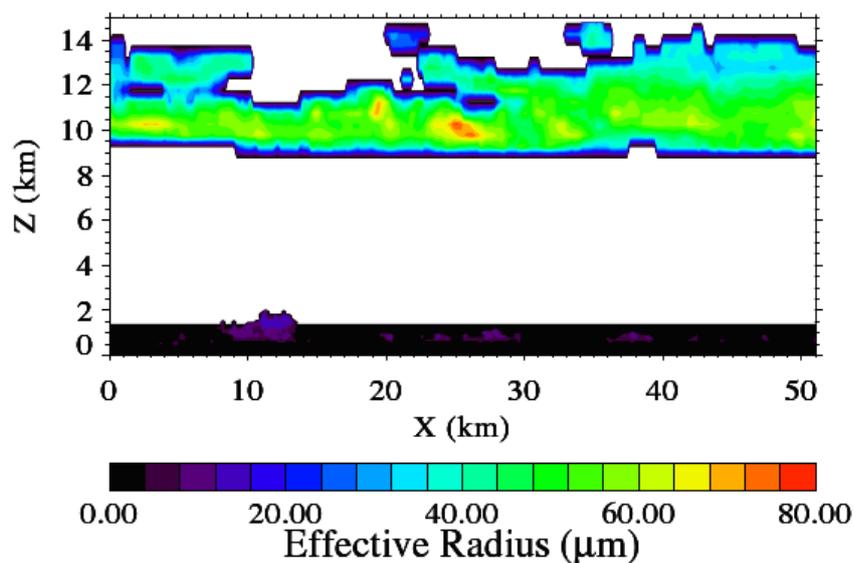


Figura 7 Distribuição dos raios eficazes das gotículas e cristais de gelo das nuvens (*Cumulus* e *Cirrus*).

As simulações foram realizadas para o comprimento de onda dos 440 nm, para um ângulo solar zenital de 45° e um ângulo azimutal igual a 0°. A superfície foi considerada Lambertiana, isto é, a superfície reflecte a radiação igualmente em todas as direcções e foi caracterizada por um albedo igual a 0.09 (Santos, 2010). Os valores de espessura óptica das nuvens consideradas em ambas as simulações encontram-se representados na figura 8. Estes valores de espessura óptica correspondem à espessura óptica total da coluna atmosférica, para os dois tipos de nuvens, em cada ponto e ao longo da extensão horizontal.

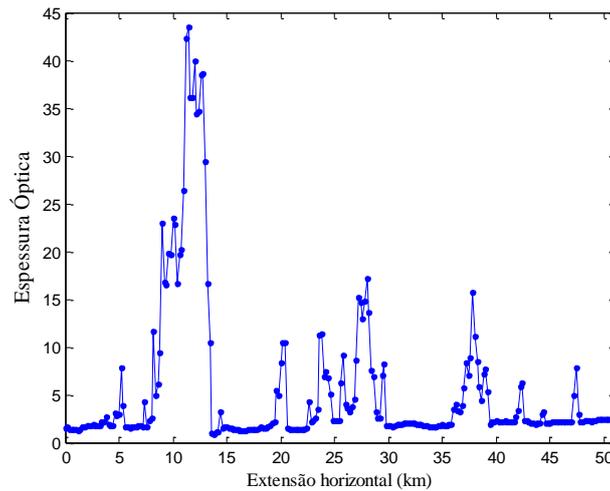


Figura 8 Espessura óptica total, em toda a coluna atmosférica em cada ponto, assumindo que na Atmosfera apenas existem nuvens do tipo *Cumulus* e nuvens do tipo *Cirrus*.

3.2. Modelo analítico de transferência radiativa para atmosferas com nuvens

O modelo analítico é um modelo de transferência radiativa para a radiação solar que se aplica a atmosferas com nuvens, onde apenas se considera a componente difusa dos fluxos de radiação e em que a absorptância, a transmitância e a reflectância são puramente difusas (não especulares). As nuvens devem ser horizontalmente extensas relativamente à sua espessura e à altitude a que se encontram, de contornos irregulares onde pode ocorrer auto iluminação. Consideram-se as nuvens homogêneas, isto é, sem variabilidade horizontal das suas propriedades ópticas e microfísicas e unicamada, ou seja, caracterizada por uma única reflectância e uma única transmitância em toda a camada. Este modelo permite calcular as irradiâncias emergentes na base e no topo das nuvens em função das irradiâncias incidentes no topo e na base das nuvens, das suas propriedades físicas e ópticas e dos factores de auto iluminação que se podem exprimir através de factores de forma; as irradiâncias emergentes são puramente difusas. Na figura 9 encontra-se uma esquematização da Atmosfera, com uma camada extensa de nuvens de contornos irregulares tanto na base como no topo, à qual o modelo analítico se pode aplicar. Na figura, I'_d , I''_u , I''_d e I'_u representam as irradiâncias incidentes e emergentes na camada de nuvens; os índices u e d representam, respectivamente, o sentido ascendente e descendente das irradiâncias.

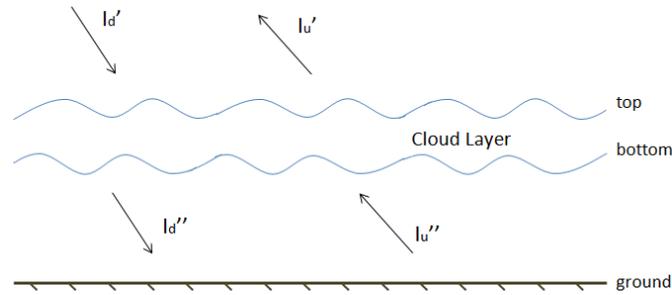


Figura 9 Esquemática de uma camada de nuvens caracterizadas geometricamente por contornos irregulares, na base e no topo, à qual se pode aplicar o modelo analítico de transferência radiativa.

Como já foi anteriormente referido o modelo analítico tem em conta os contornos irregulares de uma camada de nuvens, ou seja, tem em conta a rugosidade da camada. Esta propriedade das nuvens é traduzida por um factor geométrico de auto-iluminação ou factor de forma F (Silva, 1987; Rosa, 1988) que se relaciona com a rugosidade da camada de nuvens. Este factor geométrico, representa a fracção da radiação que saindo de uma parte do contorno da nuvem (base ou topo) atinge directamente a outra parte do contorno, e é uma quantidade adimensional que assume valores compreendidos entre 0 e 1; se F for igual a zero a camada é lisa e se F for diferente de zero a camada apresenta rugosidade, pois há sempre uma fracção da radiação que saindo de uma parte do contorno atinge directamente outra parte desse contorno.

A expressão (20) é a equação do modelo analítico que permite determinar a irradiância emergente da base da nuvem,

$$I_d'' = I_d' [\Delta\tau(RF)_{bg} + \Delta r(RF)_{tg}] + I_u'' [\Delta r(RF)_{bg} + \Delta\tau(RF)_{tg}] \quad (20)$$

Onde I_d' e I_u'' representam respectivamente as irradiâncias incidentes no topo e na base da camada de nuvens (ver figura 9), $\Delta\tau$ representa a transmitância da nuvem, Δr representa a reflectância da nuvem e $(RF)_{bg}$ e $(RF)_{tg}$ representam as fracções de radiação que emergindo da base (b) ou do topo (t) da nuvem eventualmente atingem a superfície (g) do globo quer directamente quer indirectamente após um número

arbitrário de reflexões e/ou transmissões através dos contornos. A transmitância, $\Delta\tau$, e a reflectância, Δr , da camada de nuvens podem ser expressas em função das propriedades ópticas da nuvem tais como a espessura óptica χ , o albedo de dispersão simples $\tilde{\omega}$ e de um parâmetro f que representa a fracção de radiação que é dispersa para a frente, com ângulo de dispersão igual a 0° , devido à dispersão simples. Após algumas manipulações matemáticas e admitindo que na camada da nuvem há conservação da energia radiante ($\Delta\tau + \Delta r + \Delta\alpha$) e que a sua espessura geométrica Δz é superior à espessura real ($\Delta z = 5/3 \Delta z'$ - Houghton, 1997), uma que é atravessada por um feixe oriundo de várias direcções e não apenas de uma, pode relacionar-se a transmitância $\Delta\tau$ e reflectância Δr da camada de nuvem com as propriedades ópticas. Estas quantidades, transmitância e reflectância, são definidas por,

$$\Delta\tau = 1 - \Delta\chi + f \frac{\Delta r}{1 - f} \quad (21)$$

$$\Delta r = \tilde{\omega}(1 - f)\Delta\chi \quad (22)$$

As fracções de radiação $(RF)_{bg}$ e $(RF)_{tg}$ dependem da reflectância, da transmitância e do factor de forma, F , do topo (F_{tt}) e da base (F_{bb}) da camada de nuvens. Vai admitir-se que nos contornos da nuvem (topo ou base) $\Delta\tau \approx \tau_t \approx \tau_b$ e $\Delta r \approx r_t \approx r_b$, ou seja, que os contornos têm espessura infinitesimal dz . Após algumas manipulações matemáticas as fracções de radiação podem ser calculadas do seguinte modo:

$$(RF)_{bg} = \frac{(1 - F_{tt}r_t)(1 - F_{bb})}{(1 - F_{tt}r_t)(1 - F_{bb}r_b) - F_{tt}F_{bb}\tau_t\tau_b} \quad (23)$$

$$(RF)_{tg} = \frac{F_{tt}\tau_t(1 - F_{bb})}{(1 - F_{tt}r_t)(1 - F_{bb}r_b) - F_{tt}F_{bb}\tau_t\tau_b} \quad (24)$$

De modo a calcular o campo de irradiância difusa emergente ao nível da base das nuvens I_d'' , a partir da expressão 20, considerou-se uma nuvem do tipo *Cumulus* e uma camada de nuvens do tipo *Cirrus*. Estes cálculos também permitiram determinar, de forma aproximada, o factor de forma que caracteriza o topo das nuvens, F_{tt} , em consideração. As irradiâncias incidentes, no topo e na base da nuvem, assim como as propriedades das nuvens necessárias aos cálculos foram obtidas a partir de simulações nas quais se assumiram apenas as nuvens como constituintes atmosféricos. Estas simulações foram realizadas com o modelo numérico 3D (SHDOM) e com a sua versão 1D (SHDOMPP); as propriedades das nuvens foram obtidas de ficheiros gerados nas simulações. As nuvens consideradas assim como a sua localização na atmosfera e a sua extensão vertical foram descritas na secção anterior (3.1.1) e podem ser observadas em termos de espessura óptica na figura 8 e em termos dos raios eficazes na figura 7.

Admitiu-se que a base de ambos os tipos de nuvens, *Cumulus* e *Cirrus*, é caracterizada por uma rugosidade pequena e uniforme. Deste modo, assumiu-se um factor de forma para a base, F_{bb} , constante e igual a 0.3 no caso da nuvem *Cumulus* e igual a 0 no caso da camada de nuvens do tipo *Cirrus* e em ambos os casos a rugosidade do topo foi considerada superior e mais variável relativamente à rugosidade da base. Os valores das propriedades ópticas das nuvens, (espessura óptica e albedo de dispersão simples), e da fracção de radiação na direcção de propagação necessários aos cálculos com o modelo analítico foram determinados da seguinte forma:

- 1) A espessura óptica foi obtida a partir da integração entre os níveis verticais da coluna atmosférica, nos quais existiam nuvens, em cada pixel e para toda a extensão horizontal em questão;
- 2) O albedo de dispersão simples foi obtido a partir da média aritmética dos albedos de dispersão dos diferentes níveis da coluna atmosférica onde existem nuvens, isto é, nos mesmos níveis de espessura óptica e para a mesma extensão horizontal.
- 3) A fracção de radiação na direcção de propagação (single forward fraction) f determinou-se da mesma forma que o albedo de dispersão simples, isto é, fazendo a média aritmética entre os diferentes níveis verticais. No entanto, a fracção de radiação na direcção de propagação f não se obteve directamente dos ficheiros gerados pelo SHDOM, pelo que foi necessário determiná-la através da sua relação com o factor de

assimetria g e com o primeiro coeficiente da função de fase das séries de Legendre. Este coeficiente já é obtido dos ficheiros gerados pelo SHDOM e a relação entre f e g (Liou, 1992) exprime-se por,

$$f = g^2 = \left(\frac{1^{\text{º}} \text{coeficiente}}{3} \right)^2 \quad (25)$$

A determinação do factor de forma no topo das nuvens, F_{tt} , foi efectuada a partir da minimização das diferenças entre os valores das irradiâncias globais difusas emergentes da base das nuvens, obtidas com o modelo analítico, e os valores da mesma quantidade física obtidos com o modelo numérico tridimensional SHDOM. Esta minimização de valores foi efectuada a partir da atribuição de valores a F_{tt} que se fizeram variar em cada pixel e ao longo de toda a extensão horizontal considerada.

Foram ainda calculadas irradiâncias emergentes na base da camada das nuvens do tipo *Cirrus* assumindo factores de forma constantes, em toda a extensão horizontal, tanto para a base como para o topo da camada; os valores assumidos foram $F_{bb}=0$ e $F_{tt}=0.35$. Estes cálculos serviram para a comparação dos valores de irradiância obtidos com o modelo analítico e os valores da mesma grandeza obtidos com o modelo numérico 3D e com a sua versão 1D.

3.3.UVSPEC

O modelo numérico UVSPEC está incluído no LibRadtran que é um pacote de software que contém funções e subrotinas, em C e em Fortran, bases de dados nas quais estão contidos perfis verticais de pressão, de temperatura, de densidade do ozono, de densidade de vapor de água e de outros gases que caracterizam a atmosfera, exemplos e documentação úteis nos cálculos de transferência radiativa na atmosfera terrestre. Este modelo permite calcular radiâncias e irradiâncias na atmosfera terrestre assumindo várias condições atmosféricas e de superfície, as quais são definidas nos parâmetros de entrada. Foi originalmente concebido para o cálculo de irradiância espectral nas gamas do UV e do visível do espectro electromagnético daí o seu nome. No entanto, ao longo dos anos o UVSPEC evoluiu sendo estendido às gamas espectrais completas dos espectros de radiação solar e terrestre. O UVSPEC encontra-se estruturado em três partes principais que permitem fazer os cálculos das quantidades radiativas desejadas. Numa primeira parte as propriedades que caracterizam a Atmosfera, tais como as

propriedades microfísicas das nuvens, são convertidas em propriedades ópticas. Estas propriedades ópticas são requeridas como parâmetros de entrada numa segunda parte na qual a partir da resolução da equação de transferência radiativa são calculadas as várias quantidades radiativas, como por exemplo as irradiâncias. Na terceira parte há um pós-processamento dos dados calculados, como por exemplo a sua integração sobre o comprimento de onda. Este pós-processamento dos dados depende das escolhas indicadas pelo utilizador nos parâmetros de entrada (Mayer et al., 2005).

Os parâmetros atmosféricos (moléculas, aerossóis e nuvens de água líquida e de gelo) podem ser definidos individualmente, nos ficheiros de entrada, usando uma variedade de opções existentes no LibRadtran. A resolução vertical pode ser diferente para todos os componentes, uma vez que o UVSPEC internamente reúne todas as resoluções verticais numa grelha comum a ser utilizada pelo método de resolução da equação de transferência radiativa. Existem basicamente duas formas de definir verticalmente as propriedades que caracterizam a atmosfera: para um dado nível ou numa dada camada. Um nível refere-se apenas a uma altitude; perfis de temperatura e de pressão são geralmente definidos em níveis. Uma camada é definida por uma base e um topo ambos a determinada altitude. Todos os métodos de resolver a equação de transferência radiativa contidos no Libradtran usam o conceito de camada o que tem implicações importantes na interpretação dos dados de entrada; perfis de temperatura, pressão e concentrações de gases traçadores, por exemplo, são interpretados como propriedades em níveis e interpoladas, linearmente ou logaritmicamente, para obter propriedades médias na camada. No caso das nuvens, estas podem ser definidas por níveis ou por camadas. No entanto, o conceito de camada é mais significativo neste caso, uma vez que as nuvens geralmente têm fronteiras definidas. Quando as propriedades ópticas das nuvens, tais como espessura óptica, albedo de dispersão simples ou função de fase de dispersão são definidas nos ficheiros de entrada geralmente são referidas como propriedades das camadas. As nuvens de água líquida ou de gelo são definidas especificando, num ficheiro de entrada, os perfis verticais do conteúdo de água líquida ou gelo e o raio eficaz da gotícula ou partícula de gelo. Este ficheiro contém três colunas nas quais são especificados os níveis verticais, em *km*, que limitam as camadas, o conteúdo de água líquida ou de gelo, em $g.m^{-3}$, e o raio eficaz da gotícula ou partícula, em μm , que caracterizam cada camada de nuvens (Mayer et al., 2005).

O UVSPEC não é baseado apenas num único método para resolver a equação de transferência radiativa. Este modelo permite ao utilizador escolher de entre vários métodos, o método mais conveniente de resolver a equação de transferência radiativa de acordo com as quantidades radiativas que se querem calcular. Por exemplo, um dos métodos contidos no LibRadtran é o *disort2.0* (ver tabela 1). Todos os métodos de resolução da equação de transferência radiativa, incluídos no LibRadtran, podem considerar a superfície Lambertiana, isto é, a reflexão pela superfície é isotrópica sendo definida pelo albedo. No entanto, condições de reflectância para superfícies não Lambertianas também podem ser definidas. Outras informações sobre a superfície, constituintes atmosféricos, métodos de resolução da equação de transferência radiativa, entre outras, e alguns exemplos de aplicações do UVSPEC podem ser encontrados em Mayer et al., 2005.

Tabela 1 Métodos para resolver a equação de transferência radiativa implementados no uvspec. Retirado de Mayer et al., 2005.

RTE solver	Geometry	Radiation quantities	Reference	Comments
DISORT 1.3	1-D, PP	E, F, L	Stamnes et al. (1988)	discrete ordinate
DISORT 2.0	1-D, PP	E, F, L	Stamnes et al. (2000)	discrete ordinate
POLRADTRAN	1-D, PP	E, F, L	Evans and Stephens (1991)	polarization included
twostr	1-D, PS	E, F	Kylling et al. (1995)	two stream;
sdisort	1-D, PS	E, F, L	Dahlback and Stamnes (1991)	pseudo-spherical correction for low sun angles;
spsdisort	1-D, PS	E, F, L	Dahlback and Stamnes (1991)	pseudo-spherical correction for low sun angles; double precision, customized for airmass calculations
tzs	1-D, PP	L(TOA)		pseudo-spherical correction for low sun angles; single precision, not suitable for cloudy conditions
sss	1-D, PP	L(TOA)		thermal, zero scattering
mystic	3-D, PP	E, F, L	Mayer (1999, 2000)	solar, single scattering Monte Carlo ^(a)
^(a) not included in the free package; available in joint projects				
Explanation:	PP, plane-parallel	E, irradiance		
	PS, pseudo-spherical	F, actinic flux		
	1-D, one-dimensional	L, radiance		
	3-D, three-dimensional	L(TOA), radiance at top of atmosphere		
Bold face E, F, and L indicate vector quantities.				

3.3.1. Simulações de irradiância com o modelo UVSPEC para a análise de sensibilidade a parâmetros que caracterizam as nuvens

A fim de se fazer uma análise de sensibilidade a parâmetros que caracterizam as nuvens, (raio eficaz, espessura óptica e nebulosidade), realizaram-se simulações com o modelo UVSPEC, nas quais foram assumidos como constituintes atmosféricos apenas nuvens de água líquida. Nestas simulações não se considerou o efeito de dispersão de *Rayleigh* nem o efeito da absorção gasosa. As nuvens consideradas caracterizaram-se por uma espessura geométrica de 500 metros e com a base situada a 2500 metros de altitude. Foi assumido um perfil atmosférico (pressão, temperatura e composição gasosa) característico das latitudes médias no Inverno. Considerou-se a superfície Lambertiana caracterizada por um albedo igual a 0.15 e assumiu-se um ângulo solar zenital igual a 30° e um ângulo azimutal igual a 0°. As simulações foram efectuadas para os comprimentos de onda 415 nm e 870 nm. Numa primeira parte, a irradiância global à superfície foi simulada a fim de analisar a variação desta grandeza com a espessura óptica e com o raio eficaz das gotículas que constituem as nuvens em estudo. As nuvens consideradas caracterizaram-se pelos seguintes valores de espessura óptica e de raio eficaz, em μm , atendendo à gama real de valores:

$$\tau = \{0.1, 0.5, 1, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30\}$$

$$r_{eff} = \{6, 10, 13, 16, 19, 22, 25\}$$

Numa segunda parte, foram também simulados valores de irradiância global à superfície a fim de obter a variação desta com a espessura óptica das nuvens e com a nebulosidade. Para tal assumiu-se um raio eficaz das gotículas constante e igual a 6 μm , que faz parte da gama de raios anteriormente referida e ao mesmo tempo tiveram-se em conta as funções de distribuição de tamanhos das gotículas das nuvens (Liou, 1992), e os seguintes valores espessura óptica e de nebulosidade:

$$\tau = \{0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 40\}$$

$$\text{Nebulosidade} = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$$

A nebulosidade corresponde à fracção de céu coberto por nuvens e varia entre 0 e 1. Nebulosidade igual a 0 indica céu limpo e nebulosidade igual a 1 indica que o céu está totalmente coberto.

3.3.2. Simulações de irradiância com o modelo UVSPEC e metodologia para a obtenção de propriedades das nuvens

As simulações de irradiância global à superfície, a seguir descritas, foram efectuadas a fim de serem comparadas com os valores medidos à superfície da mesma grandeza física e a partir desta comparação fazer a inversão das irradiâncias medidas para valores de espessura óptica das nuvens e de nebulosidade. Nestas simulações, ao contrário das anteriores descritas em 3.3.1, além do efeito das nuvens na Atmosfera também foram considerados os efeitos dos aerossóis, da dispersão de *Rayleigh* e da absorção por gases. Assumiu-se que os aerossóis presentes na Atmosfera tinham uma distribuição de acordo com Shettle (1989) com espessura óptica igual a 0.1. Estas simulações foram efectuadas assumindo:

1. Um perfil da Atmosfera característico das latitudes médias no Inverno. Neste caso, consideraram-se nuvens com uma extensão vertical de 900 metros e com a base fixa aos 1100 metros de altitude.
2. Um perfil da Atmosfera característico das latitudes médias no Verão. Neste caso, considerou-se o mesmo tipo de nuvens que em 1., mas com base fixa aos 900 metros de altitude e com uma extensão vertical de 1100 metros.

Estes valores que caracterizam geometricamente a altitude das nuvens, de acordo com as estações do ano, assim como o facto de se terem considerado apenas nuvens baixas, nas simulações, foram assumidos de acordo com alguns dos resultados da análise estatística, (subcapítulo 4.4), da altitude da base das nuvens em Évora. Esta análise consistiu em determinar a média mensal da altitude da base das nuvens, equação (26), e o número de ocorrências mensais de cada tipo de nuvem. Aqui o tipo de nuvens refere-se à classificação das nuvens segundo a sua posição na Atmosfera em nuvens altas, médias e baixas. Nas latitudes médias as nuvens com bases acima dos 6 km de altitude designam-se por nuvens altas, as que tem bases abaixo de aproximadamente 2 km de altitude designam-se por nuvens baixas e as que tem as bases a altitudes intermédias às altitudes das bases das nuvens altas e das nuvens baixas designam-se por nuvens médias (Liou, 2002).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

A análise estatística foi efectuada a séries de dados, de altitude da base dos diferentes tipos de nuvens, obtidas com o Ceilómetro Vaisala CL31 que se encontra instalado no observatório do Centro de Geofísica de Évora - CGE (38°34' N, 7°54' W, 300 m acima do nível médio do mar). O CL31 emprega um laser de díodo pulsado, (díodo InGaAs a 910 nm), LIDAR (light detection and ranging) enviando impulsos laser para a direcção vertical ou para a direcção próxima da vertical o que permite a partir da reflexão da luz causada pelas nuvens (*backscatter*) determinar a altitude da sua base. Este instrumento, a funcionar desde o inicio de Maio de 2006, permite medir a altitude da base das nuvens, até três camadas de nuvens simultaneamente, e a visibilidade vertical; mede desde os 0 km até aos 7.5 km com uma resolução máxima de 5 m e com uma frequência de impulso programável de 2 até 120 segundos (Costa et al., 2007). As séries de dados utilizadas correspondem aos anos 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010. As médias assim como o número de ocorrências foram determinados apenas para as altitudes relativas à primeira camada de nuvens medida pelo instrumento.

As nuvens consideradas nas simulações caracterizaram-se pelos seguintes valores de espessura óptica e de nebulosidade:

$$\tau = \{0.1, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 100\}$$

$$Nebulosidade = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$$

O raio eficaz das gotículas, que constituem as nuvens, foi considerado constante e igual a 6 μm . Esta propriedade foi considerada constante porque os resultados da análise de sensibilidade, (subcapítulo 4.3 figuras 22 e 23), mostraram que a irradiância global à superfície varia muito pouco com esta propriedade das nuvens na gama de

comprimentos de onda considerada. Além disto também se tiveram em conta as funções de distribuição de tamanhos das gotículas das nuvens baixas (Liou, 1992).

Os comprimentos de onda assumidos, nas simulações, foram os 415 nm, 672 nm, e 868 nm. Estes comprimentos de onda coincidem com alguns dos canais do radiómetro espectral YES MFR-7 (Multi-filter Rotating Shadowband), cujas medições de irradiância serão comparadas com as simulações. O YES MFR-7 está instalado no observatório do CGE (38°34' N, 7°54' W, 300 m acima do nível médio do mar), encontrando-se em funcionamento desde Janeiro de 2002. Este instrumento tem 6 canais nas bandas do visível e infravermelho próximo centradas nos comprimentos de onda 415, 500, 615, 673, 870 e 940 nm com 10 nm de largura de banda e um canal de banda larga (300 – 1100nm); permite medir, com amostragem temporal de 1 minuto, a componente global, directa e difusa da irradiância solar (W.m^{-2}) e permite obter também as componentes espectrais global, directa e difusa da irradiância solar ($\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$).

A superfície foi considerada Lambertiana, mas com reflectividade variável de acordo com o comprimento de onda (Santos, 2010). Esta reflectividade é traduzida pelo albedo da superfície que assumiu os seguintes valores,

$$\alpha_{415 \text{ nm}} = 0.25$$

$$\alpha_{672 \text{ nm}} = 0.30$$

$$\alpha_{868 \text{ nm}} = 0.28$$

Relativamente à geometria de observação, considerou-se o ângulo solar zenital, θ , a variar no intervalo $\theta_i = 10^\circ$ a $\theta_f = 80^\circ$ com $\Delta\theta = 2^\circ$ e um ângulo azimutal constante e igual a 0° .

Para a inversão das irradiâncias seleccionaram-se alguns dias de medições. Estes dias foram seleccionados de acordo com os dados de observação de nebulosidade do Instituto de Meteorologia (IM), considerando os dias em que se registaram maiores valores de nebulosidade. Por outro lado, também se teve em conta a existência de medições efectuadas pelo radiómetro espectral YES MFR-7 nesses dias. Deste modo, os dias seleccionados para o estudo foram os seguintes: 28 de Dezembro de 2005, 24 de Janeiro de 2006, 15 de Agosto de 2006, 11 de Setembro de 2006, 06 de Agosto de 2007, 21 de Setembro de 2007, 15 de Outubro de 2007, 13 de Janeiro de 2008, 26 de Março

de 2008, 16 de Maio de 2008 e 01 de Junho de 2008. Na inversão das simulações teve ainda de se ter em conta a altura do ano (Verão ou Inverno). Pelo que, os dias de meses de Verão foram comparados com as simulações relativas ao perfil da atmosfera característico das latitudes médias no Verão e os dias de meses de Inverno foram comparados com as simulações relativas ao perfil da atmosfera característico das latitudes médias no Inverno.

A inversão dos valores de irradiâncias medidas à superfície foi realizada utilizando o método de "Interpolação do Vizinho Natural" (Natural Neighbor Interpolation) (Watson, 1992, 2002) que é um método de interpolação espacial desenvolvido por Sibson (1981). O algoritmo, implementado através de um programa em linguagem C, utiliza a triangulação de Delaunay e o diagrama de Voronoi para determinar a vizinhança mais apropriada de um conjunto de pontos discretos no espaço a um ponto principal e aplica-lhes pesos baseados em áreas proporcionais. Esta técnica aplica-se a malhas regulares e irregulares e não extrapola valores, resolvendo a interpolação somente para o interior do domínio dos dados. O método permite obter, para cada valor de irradiância global medido pelo radiómetro, um valor de espessura óptica e um valor de nebulosidade, a partir de interpolações na malha de irradiâncias da mesma grandeza física, obtida para diferentes valores de espessura óptica das nuvens e nebulosidade.

Este método de interpolação foi aplicado de duas formas distintas:

1. Aplicado a valores de irradiância solar global para o comprimento de onda dos 670 nm considerando uma nebulosidade constante e igual a 1. Este comprimento de onda foi escolhido porque é o comprimento de onda mais central na gama do visível; $\lambda=415 \text{ nm}$ encontra-se muito perto da gama UV e $\lambda=860 \text{ nm}$ fica na gama do IV próximo. O programa recebe como parâmetros de entrada a irradiância simulada, os respectivos valores de espessura óptica e os valores de irradiância medida à superfície. Neste caso apenas se obtiveram valores de espessura óptica das nuvens, uma vez que a nebulosidade foi assumida constante.
2. Aplicado à soma dos valores das irradiâncias solares globais para o comprimento de onda dos 415 nm com os valores de irradiâncias solares globais para o comprimento de onda dos 860 nm considerando todos os valores de

espessuras ópticas e de nebulosidades assumidos nas simulações. Neste caso o programa recebeu como parâmetros de entrada a soma das irradiâncias simuladas, os respectivos valores de espessura óptica e de nebulosidade e os valores das somas das irradiâncias medidas à superfície. Esta aplicação do método de interpolação permitiu obter valores de espessura óptica e de nebulosidade.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados, obtidos com a metodologia e simulações descritas no capítulo anterior e é feita a discussão dos mesmos. No subcapítulo 4.1, começa por ser apresentada a comparação entre os dois modelos 1D: o UVSPEC e o SHDOMPP. De seguida, também em 4.1, os campos de irradiância global à superfície obtidos através de simulações com o modelo 3D, SHDOM, e com a sua versão 1D, o SHDOMPP, permitiram verificar a importância do efeito das nuvens na atenuação da radiação que atinge a superfície. Por outro lado, estes resultados também permitiram observar as diferenças entre os campos de irradiância simulados com as aproximações 3D e 1D. Depois, no subcapítulo 4.2, são apresentados os valores de irradiância global emergente da base das nuvens calculados com o modelo analítico de transferência radiativa, (equação 20), tendo em conta alguns resultados do modelo 3D e da sua versão 1D, assim como também são apresentados valores para o factor de forma que caracteriza geometricamente o topo das nuvens em estudo. No subcapítulo 4.3 são apresentados valores de irradiâncias simulados com o modelo UVSPEC, que visam a análise de sensibilidade a parâmetros que caracterizam as nuvens (raio eficaz, espessura óptica e nebulosidade). Esta análise permitiu verificar que a espessura óptica e a nebulosidade influenciam muito os fluxos de radiação que atingem a superfície, nos comprimentos de onda considerados, e que o raio eficaz, que caracteriza as gotículas, tem muito pouca influência. No subcapítulo 4.4 são apresentados os resultados da análise estatística realizada da altitude da base das nuvens. Os resultados obtidos nos subcapítulos 4.3 e 4.4 foram tidos em conta nas condições simuladas com o modelo UVSPEC que serviram para a obtenção de espessura óptica das nuvens e de nebulosidade e cujos valores são apresentados no capítulo 4.5.

4.1. Resultados das simulações de irradiância solar com o modelo SHDOM

Os valores de irradiância solar global à superfície simulados, figura 10, com os modelos numéricos 1D, (UVSPEC e SHDOMPP), mostram que os modelos se comportam de forma semelhante quando se simulam as mesmas condições. Isto é traduzido pelo comportamento das curvas de irradiância que são praticamente coincidentes tanto para os 440 nm como para os 870 nm. Deste modo, a comparação entre os modelos 3D e 1D a seguir é feita apenas entre o SHDOM e o SHDOMPP, uma vez que o UVSPEC tem um comportamento semelhante a este último.

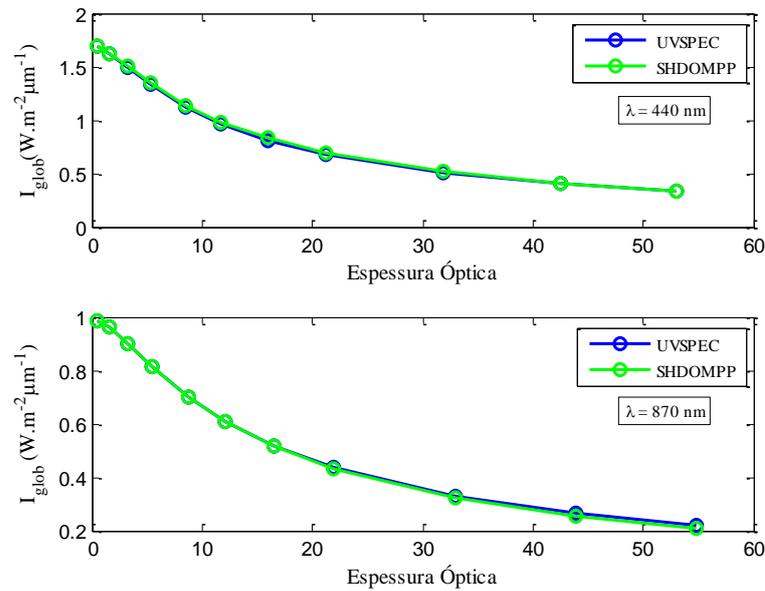


Figura 10 Irradiância global à superfície, em função da espessura óptica das nuvens, simulada com os modelos numéricos 1D: SHDOMPP (linha a verde) e UVSPEC (linha azul).

Os campos de irradiância solar global à superfície, para os 440 nm , simulados com o modelo 3D (SHDOM) e com a sua versão 1D (SHDOMPP) encontram-se representados na figura 11. A azul está representada a espessura óptica total na coluna atmosférica em cada ponto ao longo da extensão horizontal considerada e que corresponde apenas à espessura óptica das nuvens do tipo *Cumulus*. Os valores do campo de irradiância solar global à superfície correspondem à soma dos valores do campo de irradiância solar directa com os valores do campo de irradiância solar difusa (secção 2.4.1 – equação 14). Observa-se, na figura 11, que a irradiância é fortemente atenuada nas regiões onde existem nuvens; as regiões onde ocorre maior atenuação coincidem com as regiões de maior espessura óptica como seria de esperar.

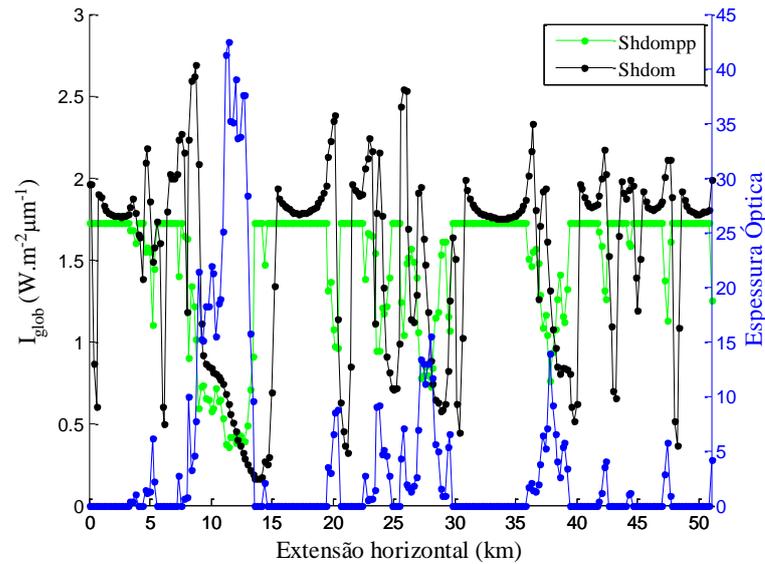


Figura 11 Campos de irradiância solar global à superfície simulados com o SHDOM (a preto no eixo da esquerda) e com o SHDOMPP (a verde no eixo da esquerda) e a espessura óptica total das nuvens ao longo da extensão horizontal (a azul no eixo da direita).

Os campos de irradiâncias solares globais simulados para a distribuição de partículas representadas na figura 7, com as aproximações 3D e 1D e que estão representados na figura 11, apresentam diferenças cujos valores maiores se localizam nas regiões onde existem nuvens; os valores mais elevados destas diferenças situam-se nas regiões correspondentes aos bordos das nuvens. Nas regiões onde não existem nuvens, traduzidas por uma espessura óptica igual a zero, os valores dos campos de irradiâncias, de ambos os modelos, aproximam-se o que se observa principalmente nas regiões de céu limpo que mais se distanciam das nuvens (15 a 20 km e 30 a 35 km), indicando que nestes casos a aproximação de atmosfera plana e paralela é suficiente. Em geral, observa-se também que o campo de irradiância obtido com a aproximação 3D parece apresentar valores superiores ao campo obtido com a aproximação 1D ao longo de toda a extensão horizontal considerada. No entanto, por vezes observa-se também que os valores obtidos com o modelo 3D são inferiores aos do modelo 1D, especialmente em algumas zonas próximas dos bordos da nuvem. Estas diferenças entre os campos de irradiâncias, obtidos com os modelos 3D e 1D podem ser observadas com mais pormenor na figura 12. Também aqui se observa, na figura 12, que as diferenças são maiores nas regiões onde há nuvens apresentando uma grande variabilidade que é reduzida para valores próximos de zero nas regiões onde não há nuvens.

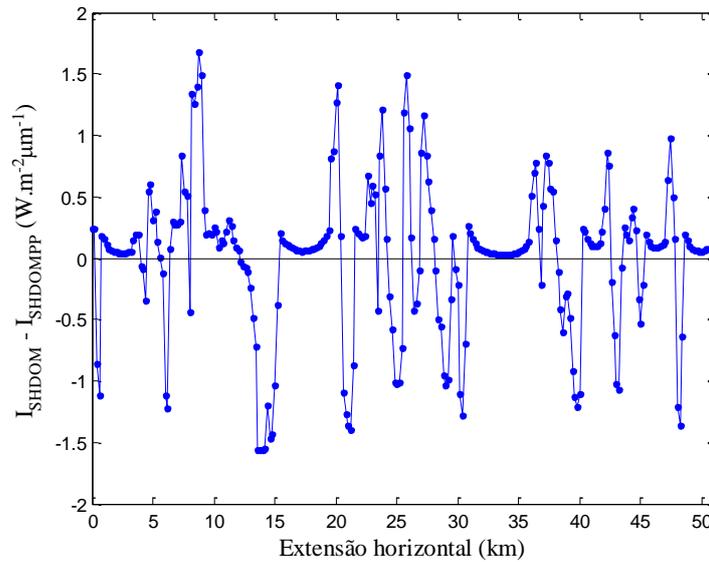


Figura 12 Diferenças entre os campos de irradiâncias, simulados com o modelo SHDOM (3D) e com o SHDOMPP (1D), que se encontram representados na figura 11.

Na aproximação 1D os cálculos são feitos para colunas independentes em que cada coluna é um domínio separado dos restantes, isto é, cada pixel é tratado independentemente dos pixels vizinhos. Já na aproximação 3D há a considerar a contribuição dos pixels vizinhos para o pixel em análise. Isto poderá ser uma das razões que justifica as diferenças encontradas nos campos de irradiância nas regiões onde existem nuvens, uma vez que nestas regiões há muita dispersão da radiação pelas gotículas constituintes das nuvens. A aproximação 3D, neste caso, vai contar com a componente difusa dos pixels vizinhos para o pixel em consideração enquanto a aproximação 1D vai contar apenas com a atenuação do feixe directo. Nas regiões onde não há nuvens e dado que apenas se consideraram estas como constituintes atmosféricos, não há uma contribuição de radiação difusa como nas regiões ocupadas por nuvens. Isto justifica o facto, de nestas regiões, os campos de irradiâncias serem muito próximos o que é traduzido pelos valores das diferenças, na figura 12, mais próximos de zero. Por outro lado e ainda neste caso (sem nuvens) a radiação que chega à superfície é praticamente igual à que chega ao topo da atmosfera visto que não há constituintes que atenuem a radiação.

As diferenças entre as irradiâncias simuladas, na figura 13, com os modelos 3D e 1D estão representadas deste os pixéis que correspondem aos bordos das nuvens, 0 no eixo da distância, até uma distância de 2.4 km para fora das nuvens no sentido positivo da extensão horizontal. Estas diferenças estão representadas para duas nuvens, que integram o perfil horizontal representado na figura 12, e que correspondem às duas curvas representadas na figura 13. Os símbolos (triângulos e círculos) da figura 13 são apenas para distinguir as duas curvas.

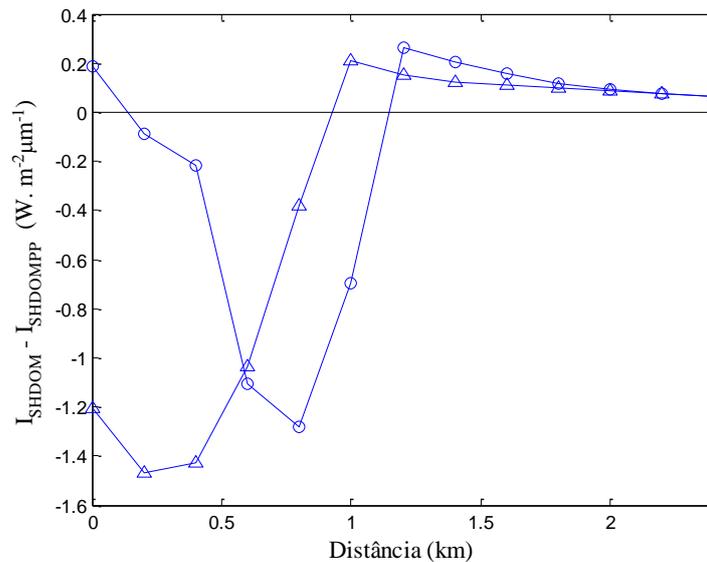


Figura 13 Diferenças entre os campos de irradiância, simulados com os modelos 3D e 1D, para pixéis de céu limpo a partir do bordo das nuvens e até uma distância de 2.4 km para fora das nuvens.

As diferenças negativas encontradas nos pixéis de céu limpo, exactamente a seguir ao bordo da nuvem podem dever-se ao facto de o modelo 3D ter em conta a contribuição dos pixéis vizinhos e, a uma distância pequena dos bordos da nuvem, a irradiância directa ser ainda afectada pela nuvem sendo atenuada devido à dispersão simples (Salgueiro et al., 2011). Pelo contrário a aproximação 1D considera apenas o pixel de céu limpo pelo que a irradiância é menos atenuada. Deste modo, a aproximação 1D apresenta valores maiores de irradiâncias o que pode justificar as diferenças negativas encontradas entre as aproximações 3D e 1D. À medida que a distância à nuvem aumenta a irradiância directa obtida com o modelo 3D deixa de ser afectada, no entanto a irradiância difusa é amplificada devido à dispersão múltipla pela nuvem. Este efeito resulta em valores superiores de irradiância global relativamente aos valores da mesma grandeza obtidos com o modelo 1D, uma vez que a aproximação 1D não tem em

conta este efeito de dispersão pela nuvem. Isto pode justificar as diferenças positivas observadas nos pixéis de céu limpo (Salgueiro et al., 2011).

Segundo o estudo de Guoyong, et al. (2006) é observado que, à medida que nos afastamos das nuvens os efeitos negativos extremos diminuem resultando numa redução da variabilidade dos efeitos 3D. Este facto vai ao encontro de alguns dos resultados apresentados nomeadamente no que diz respeito à redução da variabilidade dos efeitos 3D; por outro lado os efeitos negativos observados próximo dos bordos das nuvens cessam à medida que a distância à nuvem aumenta. Verifica-se aqui que para uma distância acima de aproximadamente 2 km do bordo da nuvem, os efeitos desta são já desprezáveis. Ainda segundo o mesmo estudo acima referido os efeitos 3D são mais pronunciados e variados nos pixéis vizinhos das nuvens, onde são encontrados efeitos negativos nas regiões de sombra e efeitos positivos perto dos bordos da nuvem iluminados pelo Sol. Deste modo, as diferenças negativas observadas nos pixéis de céu limpo exactamente a seguir aos bordos das nuvens também poderão dever-se aos efeitos de sombra das nuvens. Para observar se nos pixéis de céu limpo, exactamente antes do início da nuvem, as diferenças são positivas representaram-se essas diferenças, na figura 14, para as mesmas nuvens consideradas na figura 13. Os símbolos (triângulos e círculos) da figura 14 são apenas para distinguir as duas curvas.

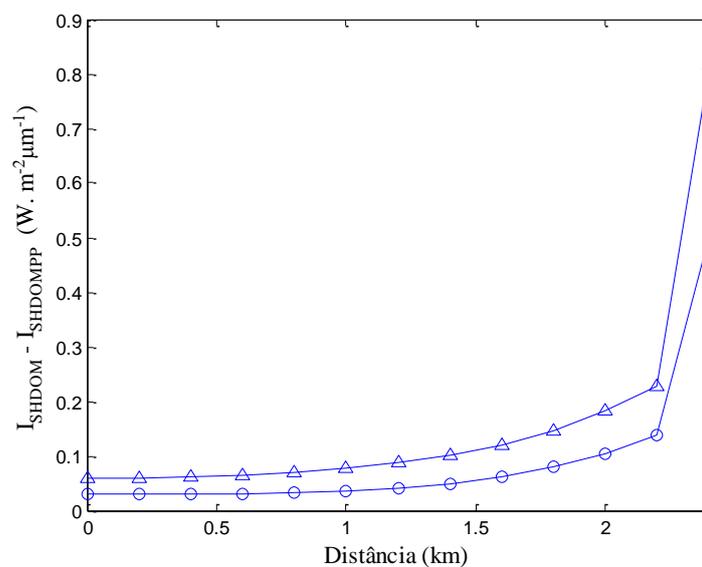


Figura 14 Diferenças entre os campos de irradiâncias, simulados com os modelos 3D e 1D, para pixéis de céu limpo antes das nuvens para uma distância de 2.4 km antes do bordo da nuvem.

Na figura 14 o pixel de céu limpo que se encontra exactamente antes do bordo da nuvem corresponde à distância 2.2 km. Aqui as diferenças também estão representadas no sentido positivo da extensão horizontal. Observa-se que as diferenças entre as aproximações 3D e 1D, antes das nuvens, são positivas e à medida que a distância à nuvem diminui essas diferenças aumentam. Estes resultados vão ao encontro do que foi anteriormente referido tanto ao nível da variabilidade das diferenças, devido aos efeitos das nuvens, como ao facto de se encontrarem efeitos positivos do lado iluminado pelo Sol. Por outro lado, a irradiância directa, obtida com a aproximação 3D, não é neste caso afectada pela nuvem e há a contribuição da componente difusa, devido à dispersão pela nuvem, para a irradiância global. A aproximação 1D não tem em conta este efeito, o que anteriormente já foi discutido, pelo que apresenta valores de irradiância global menores face à aproximação 3D. Isto também justifica as diferenças positivas encontradas, entre as aproximações 3D e 1D, antes de as nuvens começarem.

Na figura 15 observa-se o campo de irradiância solar global à superfície, para os 440 nm, assumindo a atmosfera constituída por uma camada descontínua de *Cumulus* e pela camada contínua de *Cirrus* (figura 7 da secção 3.1.1), pelo que a espessura óptica representada corresponde à soma das espessuras ópticas dos dois tipos de nuvens.

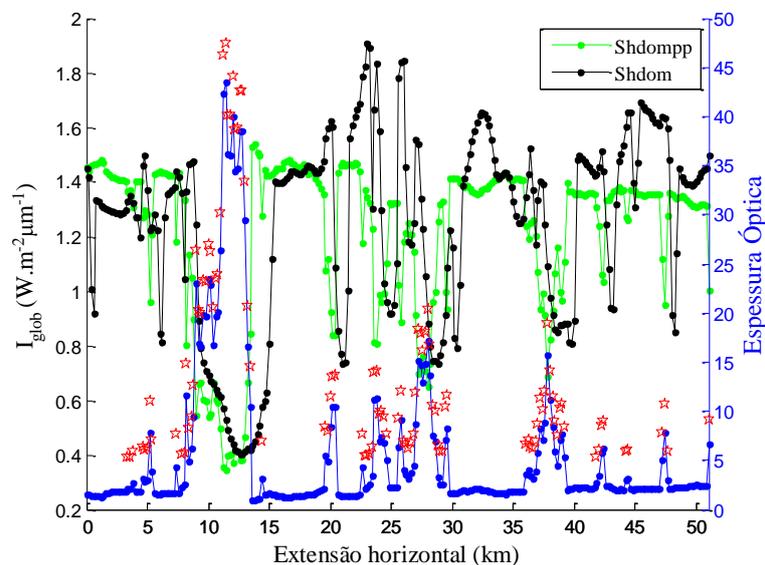


Figura 15 Campos de irradiância solar global à superfície, simulados com o SHDOM (a preto no eixo da esquerda) e com o SHDOMPP (a verde no eixo da esquerda), para a Atmosfera constituída por uma camada de *Cirrus* contínua e uma camada de *Cumulus* descontínua. Os símbolos a vermelho indicam os locais onde existem *Cumulus*. A azul, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens.

Tal como na figura 11, também se observa na figura 15 que a irradiância solar global que chega à superfície é fortemente atenuada nas regiões onde existem nuvens, principalmente onde existem simultaneamente os dois tipos de nuvens. Neste caso, nas regiões onde apenas existem *Cirrus* as diferenças entre as irradiâncias, obtidas com os modelos 3D e 1D, parecem ser maiores. Em geral, também se observa que nas regiões onde apenas existem *Cirrus* as irradiâncias obtidas com a aproximação 3D apresentam valores superiores às irradiâncias obtidas com a aproximação 1D. Isto permite verificar, mais uma vez, que o efeito da dispersão na irradiância global, obtida com a aproximação 3D, é muito importante nas regiões com nuvens.

Face à análise dos resultados obtidos, a aproximação 3D parece descrever melhor as situações reais relativamente à aproximação 1D, em condições de atmosferas com nuvens onde os efeitos da dispersão múltipla, para o comprimento de onda assumido (visível), são muito importantes.

4.2. Resultados dos cálculos com o modelo analítico de transferência radiativa

Nas figuras 16 e 17 encontram-se representados os campos de irradiância solar global, para o comprimento de onda de 440 nm, emergentes da base de uma nuvem do tipo *Cumulus* (figura 7 da secção 3.1.1), obtidos com o modelo analítico de transferência radiativa (subcapítulo 3.2), assim como com o modelo numérico 3D (SHDOM), na figura 16, e com a sua versão 1D (SHDOMPP) na figura 17. Também se encontra representado, em ambas as figuras, o factor de forma que caracteriza o topo da nuvem em estudo e a respectiva espessura óptica (linha a preto). O factor de forma que caracteriza o topo das nuvens, F_{tt} , foi obtido a partir do ajuste entre a irradiância obtida com o modelo 3D e a irradiância calculada com o modelo analítico (figura 16); o ajuste destas foi feito a partir da variação iterativa do factor de forma em cada ponto ao longo da extensão horizontal ocupada pela nuvem. Estes valores do factor de forma do topo foram depois utilizados para calcular a irradiância analítica tendo em conta alguns resultados do modelo 1D (figura 17). Em ambos os casos, (figuras 16 e 17), a espessura óptica é apenas de carácter informativo, ou seja, a sua representação serve apenas para ter uma ideia da nuvem que se está a considerar no cálculo dos fluxos e na determinação do factor de forma, pois não se pretende com esta análise discutir esta quantidade das nuvens. O factor de forma que caracteriza a base da nuvem foi assumido constante e igual a 0.3.

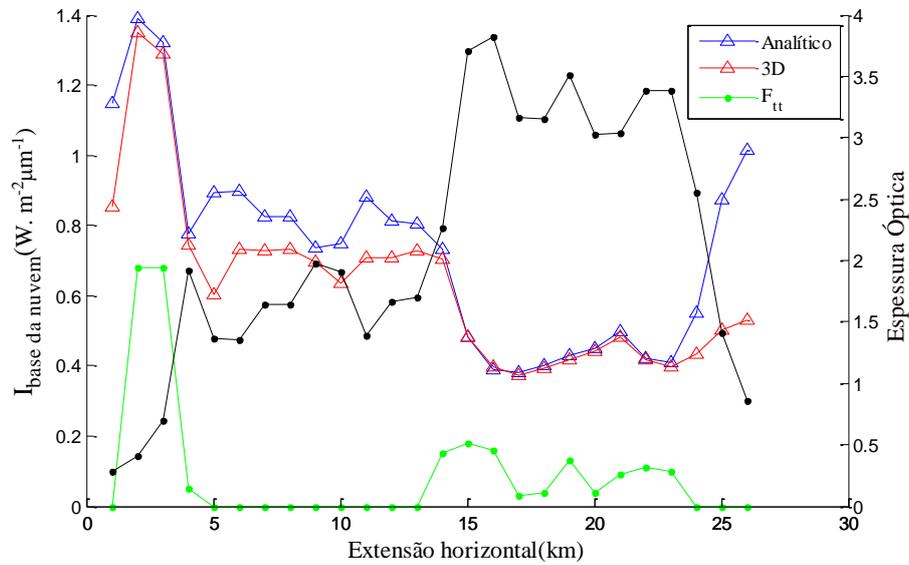


Figura 16 Campos de irradiâncias emergentes da base de uma nuvem do tipo *Cumulus*, para $\lambda=440\text{ nm}$, obtidos com o modelo analítico (a azul no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 3D (a vermelho no eixo da esquerda) e o respectivo factor de forma (F_{tt}) do topo da nuvem (a verde no eixo da esquerda). A preto, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens.

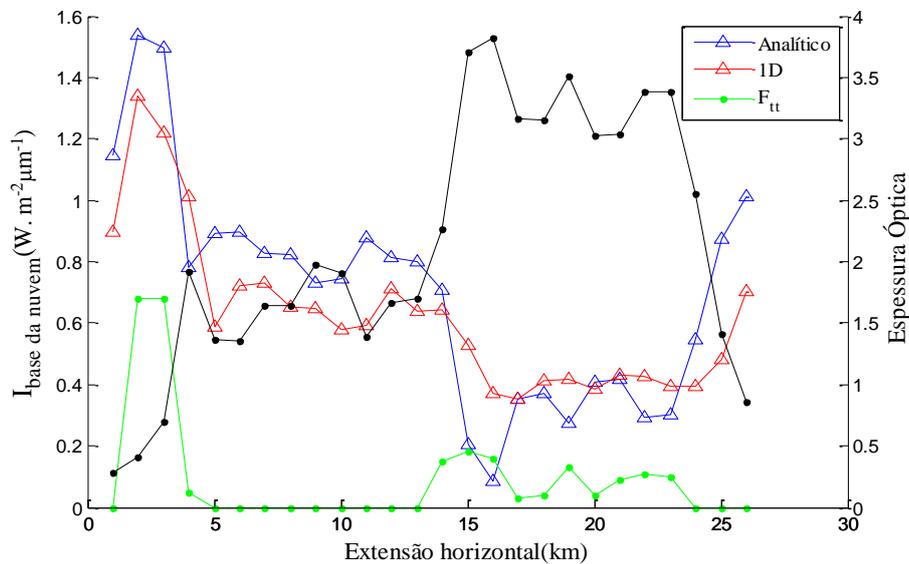


Figura 17 Campos de irradiâncias emergentes da base de uma nuvem do tipo *Cumulus*, para $\lambda=440\text{ nm}$, obtidos com o modelo analítico (a azul no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 1D (a vermelho no eixo da esquerda) e o respectivo factor de forma (F_{tt}) do topo da nuvem (a verde no eixo da esquerda). A preto, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens.

O ajuste das irradiâncias permitiu obter o perfil horizontal do factor de forma que caracteriza o topo da nuvem tendo em conta as aproximações efectuadas. Isto permite verificar que o factor de forma, ou seja, a rugosidade das nuvens é um parâmetro importante na determinação das irradiâncias emergentes das suas bases.

Os campos de irradiância solar global emergente base da camada de nuvens do tipo *Cirrus* (figura 7 da secção 3.1.1), calculados com o modelo analítico e simulados com os modelos numéricos 3D e 1D encontram-se representados respectivamente nas figuras 18 e 19. Em ambos os casos foi assumida uma rugosidade constante na base e no topo da camada das nuvens, ao longo de toda a extensão horizontal, sendo o topo mais rugoso relativamente à base que foi assumida lisa. Isto é traduzido respectivamente pelos factores de forma $F_{tt}=0.35$ e $F_{bb}=0$. A espessura óptica das nuvens é também aqui apenas de carácter informativo. Nestas figuras, 18 e 19, observa-se que ao longo de toda a extensão horizontal, da camada de *Cirrus*, o ajuste entre o modelo analítico e o modelo 3D parece ligeiramente melhor do que o ajuste entre o modelo analítico e o modelo 1D.

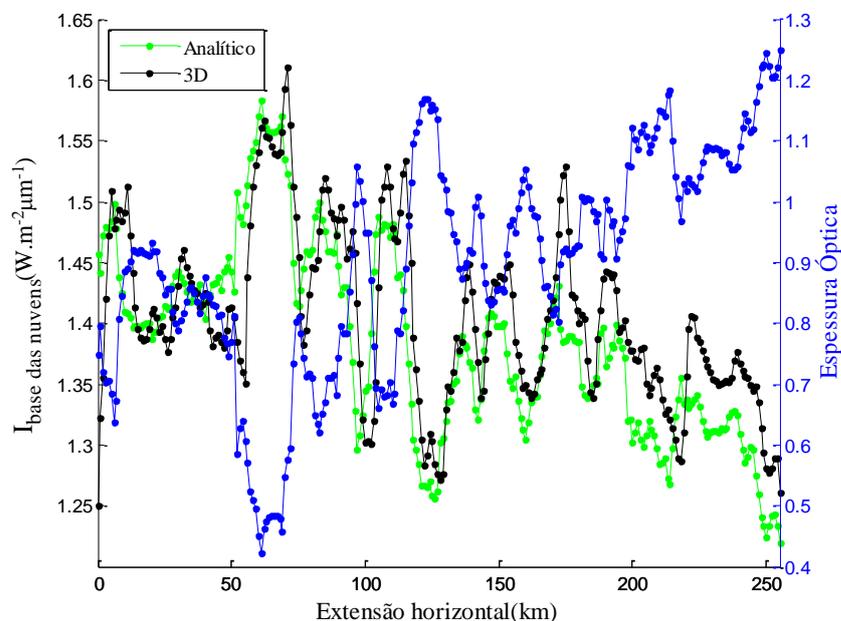


Figura 18 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440\text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 3D (a preto no eixo da esquerda). A azul, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens.

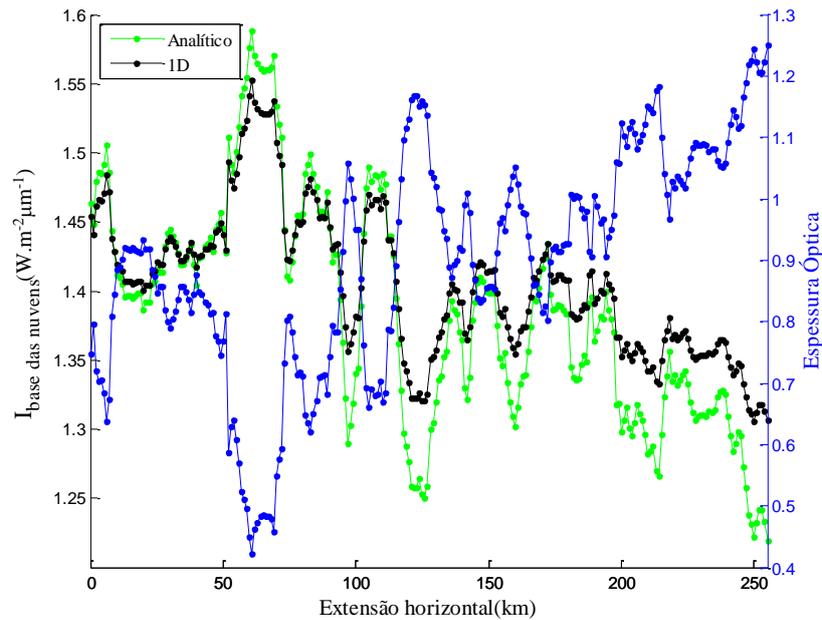


Figura 19 Campos de irradiancias, para $\lambda=440\text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 1D (a preto no eixo da esquerda). A azul, no eixo da direita pode ver-se a espessura óptica das nuvens.

Nas figuras 20 e 21 apresentam-se os campos de irradiancia solar global emergente também na base da camada de nuvens do tipo *Cirrus* (figura 7 da secção 3.1.1). A diferença destes casos relativamente aos anteriores, (figuras 18 e 19), reside no facto de aqui apenas se manter constante o factor de forma que caracteriza a base das nuvens, a qual se considerou completamente lisa ($F_{bb}=0$). Deste modo, os fluxos foram obtidos, tal como nos casos representados nas figuras 16 e 17, a partir do ajuste dos valores das irradiancias analítica e 3D com a variação, em cada ponto ao longo da horizontal, do factor de forma que caracteriza o topo da camada (F_{tt}). Assim, também neste caso, foi possível obter um perfil horizontal do factor de forma para a camada de *Cirrus* e com estes valores do factor de forma e com alguns resultados do modelo 1D foi calculada a irradiancia analítica representada na figura 21. As irradiancias obtidas com o modelo analítico parecem ajustar-se melhor às irradiancias obtidas com o modelo 3D relativamente ao modelo 1D o que se poderá dever aos valores do factor de forma (F_{tt}) assumidos no cálculo da irradiancia analítica com o modelo 1D.

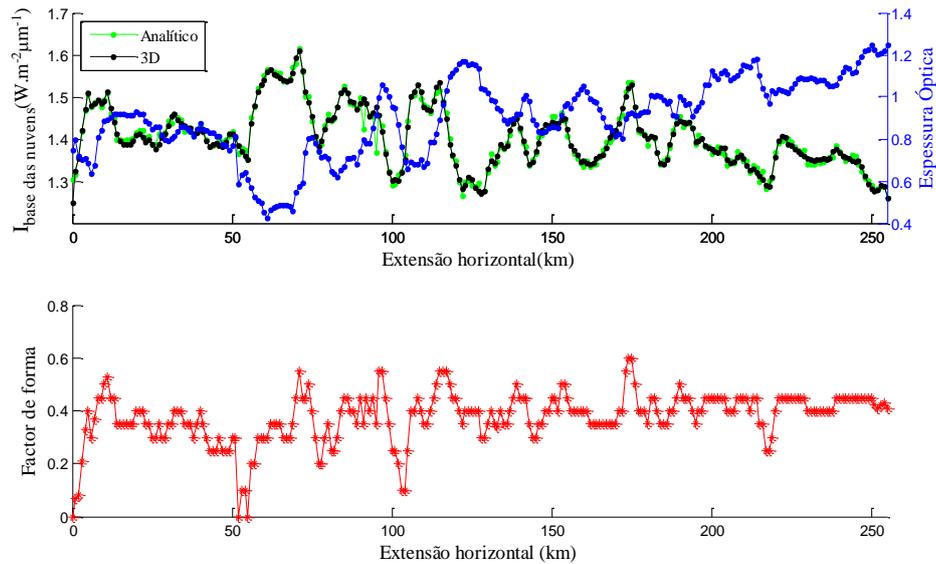


Figura 20 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440 \text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 3D (a preto no eixo da esquerda) e a espessura óptica da camada (a azul no eixo da direita). Em baixo, encontra-se representado o factor de forma que caracteriza o topo (F_{tt}) da camada de *Cirrus*, obtido através do ajuste entre a irradiância analítica e a 3D.

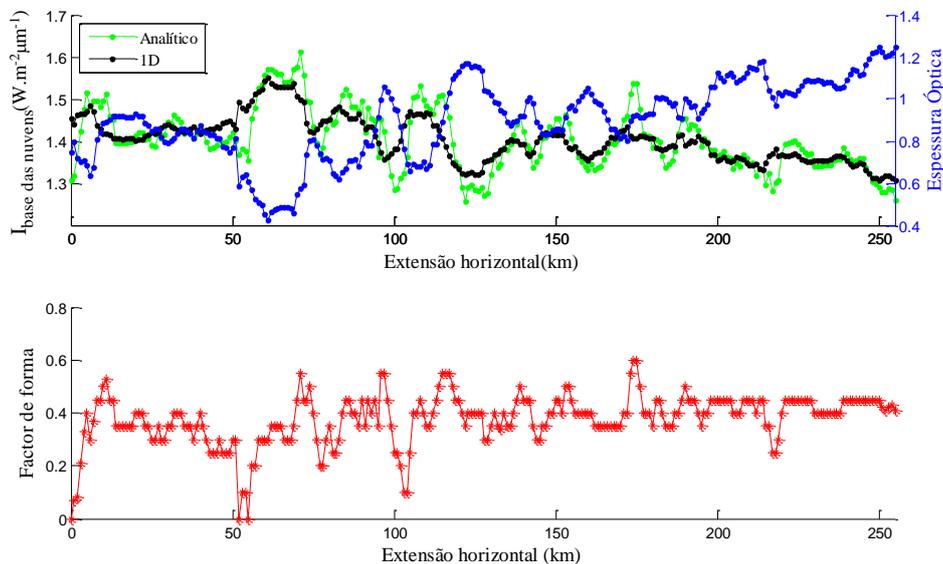


Figura 21 Campos de irradiâncias, para $\lambda=440 \text{ nm}$, emergentes da base de uma camada de nuvens do tipo *Cirrus* obtidos com o modelo analítico (a verde no eixo da esquerda) e com o modelo numérico 1D (a preto no eixo da esquerda) e a espessura óptica da camada (a azul no eixo da direita). Em baixo, encontra-se representado o factor de forma que caracteriza o topo (F_{tt}) da camada de *Cirrus*, obtido através do ajuste entre a irradiância analítica e a 3D.

A partir da observação dos perfis dos factores de forma obtidos verifica-se que a rugosidade das nuvens é muito variável de ponto para ponto e ao longo de toda a extensão horizontal considerada tanto no caso da nuvem *Cumulus*, na figura 16, como no caso da camada de *Cirrus*, na figura 20. Em geral, tendo em conta o ajuste das curvas de irradiâncias obtidas com o modelo analítico e com a aproximação 3D, este parece ser melhor no caso dos *Cirrus* do que no caso dos *Cumulus*. No entanto, há que ter em conta que a extensão horizontal ocupada pela camada de *Cirrus* é superior à extensão ocupada pela nuvem *Cumulus*.

O modelo analítico assume a nuvem como sendo uma camada de pequena espessura geométrica, caracterizada por um único valor da reflectância e outro da transmitância (e não por diferentes valores que variam ao longo da espessura da mesma, se fosse considerada com uma distribuição heterogénea de gotículas/cristais), o que só poderá eventualmente acontecer em nuvens verticalmente pouco extensas, como será o caso de alguns *Cirrus* mas nunca o caso dos *Cumulus*. As irradiâncias incidentes na base e no topo das nuvens necessárias aos cálculos com o modelo analítico foram obtidas do modelo numérico que não considera as nuvens como camadas infinitesimais. Deste modo, as diferenças no ajuste das curvas de irradiâncias dos modelos numéricos, 3D e 1D, e do modelo analítico poderão dever-se a estas aproximações. Por outro lado, um dos parâmetros chave do modelo analítico é o factor de forma que caracteriza os contornos das nuvens tanto ao nível da base como do topo e que, de uma maneira geral, não é possível aferir se traduzem efectivamente a rugosidade de ambos os contornos, dado estes serem normalmente muito irregulares e de formas complexas (sobretudo o topo da nuvem). Neste sentido, não é possível no caso em concreto aferir dos valores dos factores de forma do topo da nuvem que foram determinados a partir do melhor ajuste das irradiâncias calculadas pelo modelo analítico e pelas aproximações 1D e 3D. Quanto à hipótese de considerar o factor de forma constante na base da nuvem ou até mesmo com o valor nulo, baseou-se na observação que, em muitas nuvens (*Estratos*, *Cirrus* e em alguns *Cumulus*) a sua base é muitas vezes quase lisa ou com uma rugosidade ligeira e uniforme em toda a sua extensão. Mas tal como a rugosidade do topo, a rugosidade da base também pode variar ao longo da extensão horizontal e neste caso as irradiâncias calculadas com o modelo analítico já seriam diferentes. Estas aproximações relativas aos factores de forma também são responsáveis pelos ajustes das curvas de irradiâncias.

4.3. Análise de sensibilidade de parâmetros que caracterizam as nuvens

Os valores de irradiância global à superfície simulados com o modelo UVSPEC e que visam a análise de sensibilidade da irradiância à espessura óptica, raio eficaz e nebulosidade estão representados nas figuras a seguir. As irradiâncias simuladas estão representadas em função da espessura óptica das nuvens, para vários raios eficazes das gotículas, figuras 22 e 23, e para várias situações de nebulosidade, figuras 24 e 25.

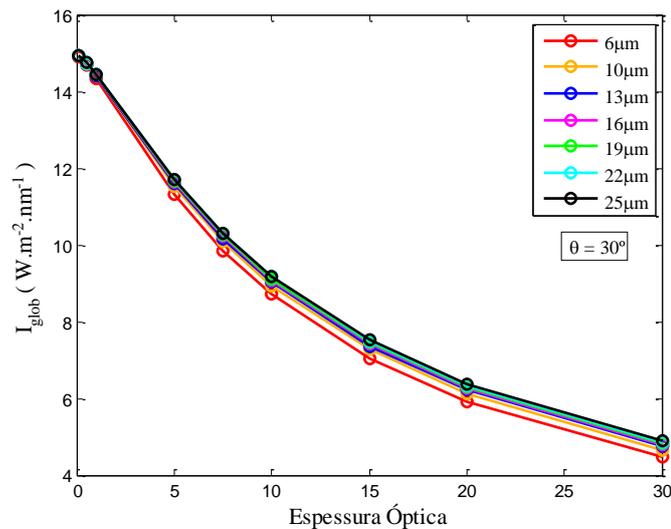


Figura 22 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda = 415 \text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando vários raios eficazes das gotículas das nuvens que variam entre $6 \mu\text{m}$ e $25 \mu\text{m}$.

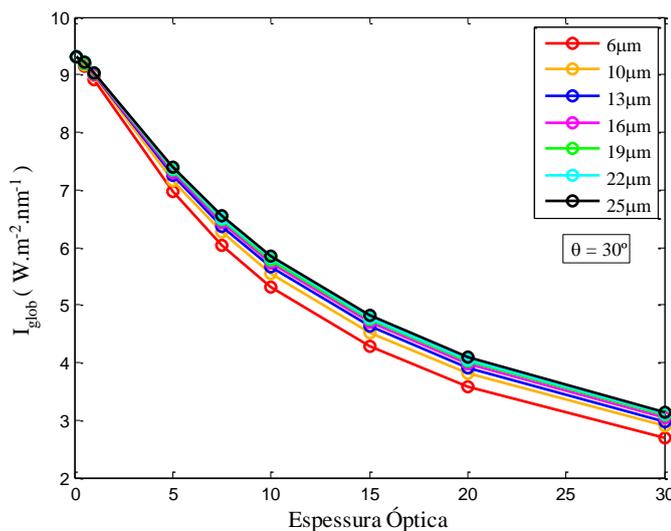


Figura 23 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda = 860 \text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando vários raios eficazes das gotículas das nuvens que variam entre $6 \mu\text{m}$ e $25 \mu\text{m}$.

Observa-se, nas figuras 22 e 23, que a irradiância global que chega à superfície apresenta uma variação maior com a espessura óptica das nuvens do que com o raio eficaz das gotículas. Por exemplo, considerando o valor de espessura óptica constante e igual a 15 é possível observar que a irradiância varia muito pouco com a variação do raio eficaz das gotículas considerando toda a gama de valores, de $6 \mu\text{m}$ a $25 \mu\text{m}$, assumida para esta propriedade; esta variação é traduzida por um aumento ligeiro da irradiância com o aumento do raio eficaz. No entanto, se for considerado um valor de raio constante, por exemplo $25 \mu\text{m}$, verifica-se que a irradiância global varia muito ao longo de toda a gama de valores de espessura óptica assumidos. Esta variação é traduzida pelo decréscimo acentuado de irradiância com o aumento de espessura óptica.

Na figuras 24 e 25, tal como se observa nas figuras 22 e 23, verifica-se que a irradiância global que chega à superfície varia muito com a espessura óptica das nuvens. Nestes casos, a irradiância também varia muito com a variação da nebulosidade; esta relação é traduzida pela diminuição da irradiância à superfície com o aumento da nebulosidade e vice-versa. É possível observar que para valores muito pequenos de espessura óptica a variação de nebulosidade influencia pouco a irradiância que chega à superfície e para pequenos valores de nebulosidade, sensivelmente iguais a 0.2, a irradiância também varia pouco com a variação da espessura óptica das nuvens. Contudo, se for assumido um valor superior e constante de nebulosidade, por exemplo 0.4, a irradiância global já varia mais diminuindo à medida que a espessura óptica aumenta como seria de esperar. Este efeito é amplificado para valores grandes de nebulosidade como é o caso de termos o céu completamente coberto por nuvens em que a nebulosidade é igual a 1.

Estes resultados eram espectáveis e devem-se sobretudo aos processos físicos de dispersão e absorção da radiação pelas partículas constituintes das nuvens, sendo a dispersão o processo de extinção da radiação mais importante na gama de comprimentos de onda na qual foram efectuadas as simulações. Deste modo, verifica-se que a espessura óptica e a nebulosidade são quantidades muito importantes na caracterização das nuvens e na interacção destas com os fluxos de radiação solar e consequentemente na determinação dos fluxos de radiação solar que atingem a superfície. A análise das figuras 22, 23, 24 e 25 permite verificar também que a irradiância varia mais com a nebulosidade e com a espessura óptica do que com o raio eficaz das gotículas das

nuvens para os comprimentos de onda em questão. Deste modo, como o raio eficaz tem pouca influência nas irradiâncias pode assumir-se um valor típico para as condições das simulações da secção 3.3.2.

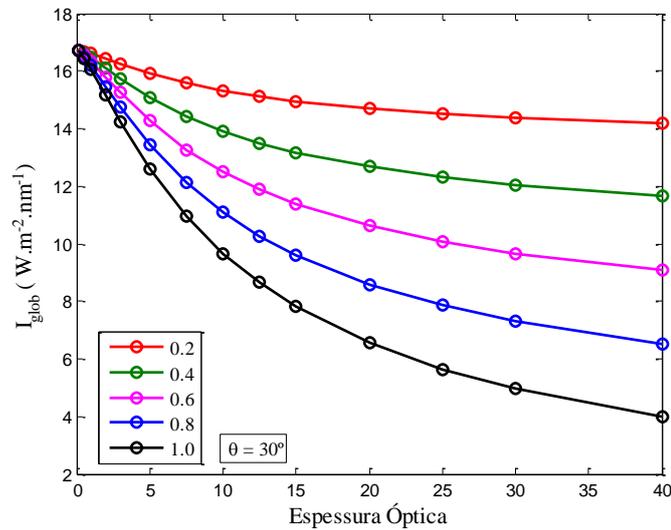


Figura 24 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda = 415 \text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando várias situações de nebulosidade que variam entre 0.2 e 1.

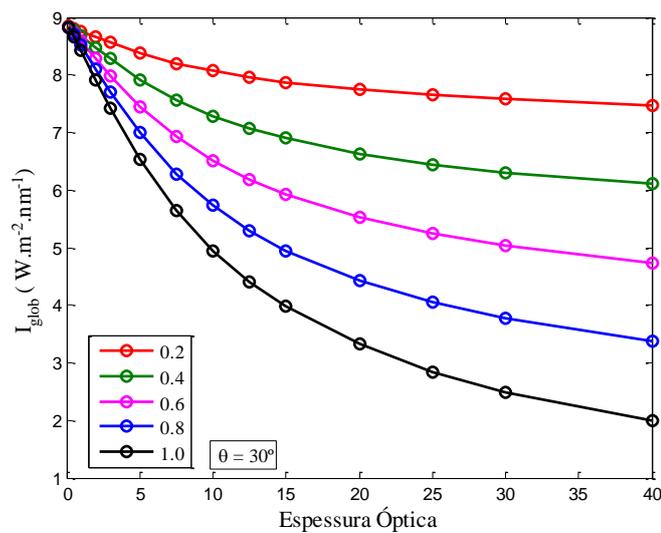
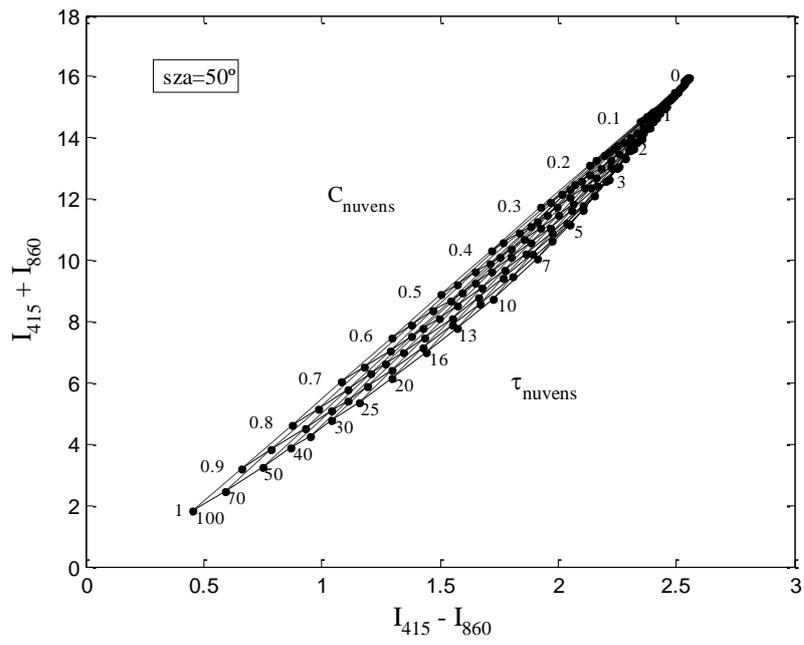


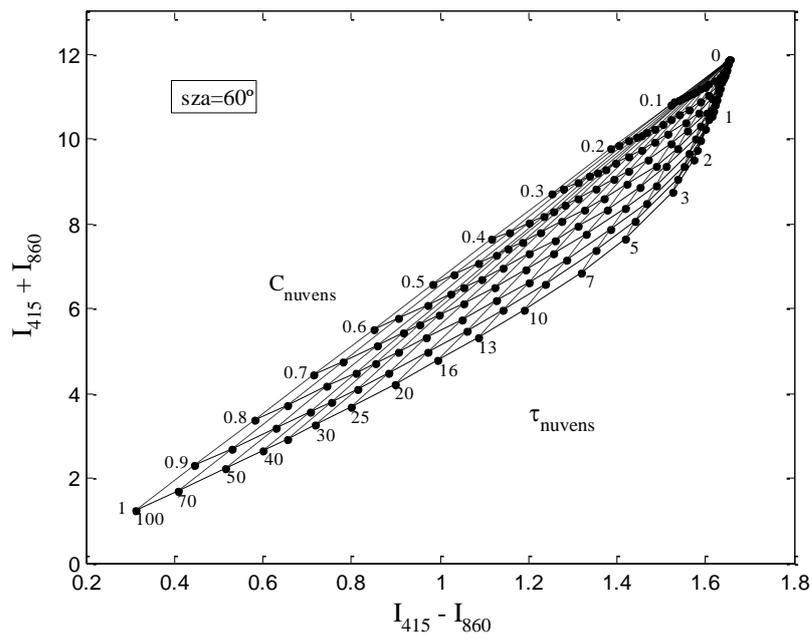
Figura 25 Irradiância solar global à superfície, para $\lambda = 860 \text{ nm}$, em função da espessura óptica das nuvens considerando várias situações de nebulosidade que variam entre 0.2 e 1.

Na figura 26 estão representadas as somas em função das diferenças dos campos de irradiâncias, globais à superfície, simuladas para os comprimentos de onda dos 415 *nm* e 860 *nm* para quatro casos diferentes de acordo com a variação do ângulo solar zenital. Esta representação constitui uma malha de valores de espessura óptica e nebulosidade, ao longo da qual os valores das somas em função das diferenças das irradiâncias variam. A observação desta figura permite verificar que os valores de irradiâncias à superfície diminuem à medida que o ângulo solar zenital aumenta. Considere-se, por exemplo, o valor de espessura óptica igual a 20 e o valor de nebulosidade igual a 1. Neste caso, à medida que o ângulo solar zenital aumenta, (figura 26 de (a) até (d)), há uma redução dos valores das somas e das diferenças das irradiâncias que atingem a superfície. Isto deve-se ao facto de que à medida que o ângulo solar zenital aumenta um dado feixe de radiação tem de percorrer uma maior distância na Atmosfera, uma vez que o ângulo solar zenital constitui o ângulo que o feixe faz com a vertical do lugar (ver figura 5). Deste modo, o feixe é sujeito a maior extinção por parte dos constituintes atmosféricos o que leva à redução da sua intensidade.

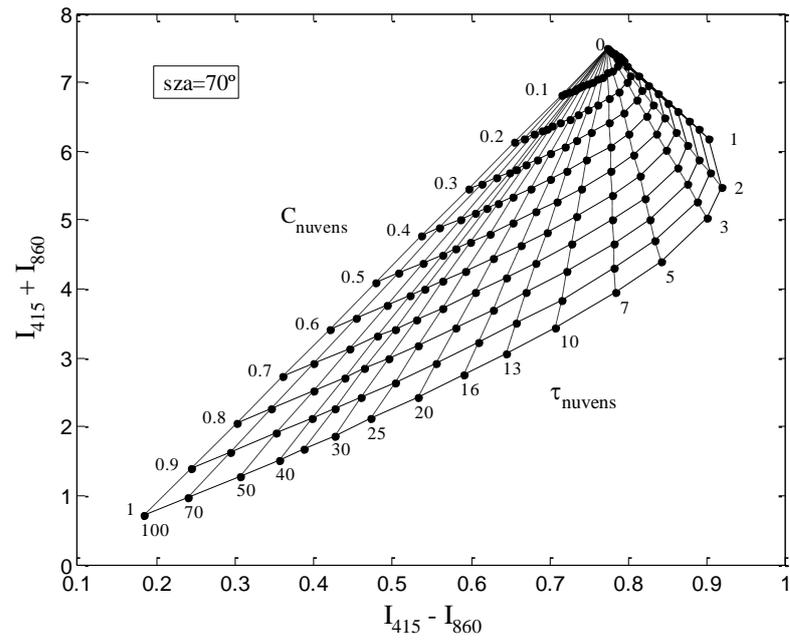
Ainda na figura 26, é possível observar o que anteriormente foi verificado relativamente à variação da irradiância à superfície com a variação da espessura óptica e da nebulosidade, ou seja, o aumento do valor da espessura óptica acompanhado de valores elevados de nebulosidade e de ângulos solares zenitais maiores resulta em valores menores de irradiância à superfície. Pelos resultados obtidos podemos constatar que os ângulos solares zenitais são um parâmetro importante a ter em consideração na obtenção de propriedades de nuvens a partir da comparação de fluxos à superfície. A obtenção destas propriedades é mais favorável para ângulos zenitais mais pequenos, uma vez que um feixe de radiação percorre um caminho menor na Atmosfera, sofrendo portanto menor atenuação pelos outros constituintes atmosféricos como é o caso dos aerossóis, relativamente a ângulos solares zenitais maiores.



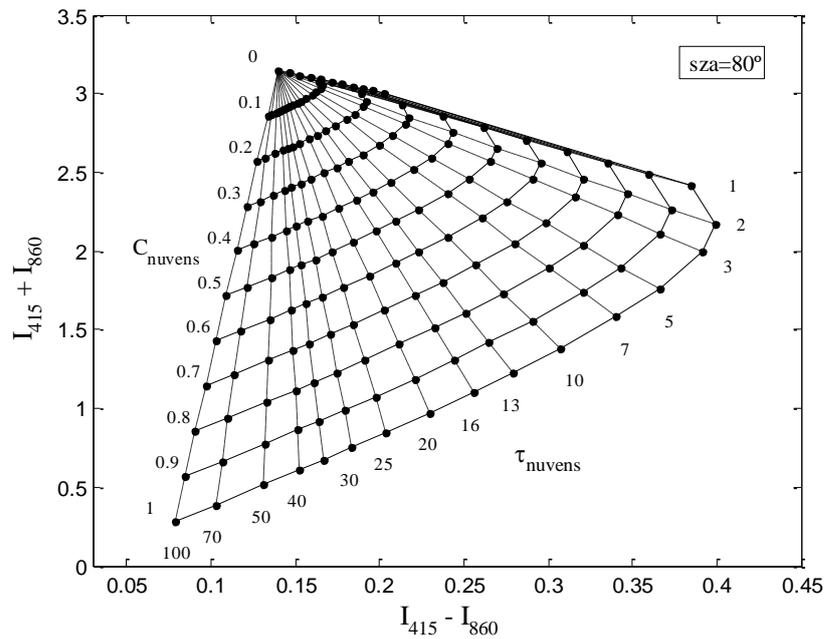
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26 Malha de simulações constituída pelas somas em função das diferenças das irradiâncias globais à superfície simuladas para os comprimentos de onda dos 415 nm e 860 nm. O albedo da superfície para os 415 nm é de 0.25 e para os 860 nm é de 0.28. Na figura C_{nuvens} representa a nebulosidade, τ_{nuvens} representa a espessura óptica das nuvens e sza o ângulo solar zenital; em (a) $sza=50^\circ$, em (b) $sza=60^\circ$, em (c) $sza=70^\circ$ e em (d) $sza=80^\circ$.

4.4. Análise estatística das nuvens em Évora

Os números de ocorrências mensais dos vários tipos de nuvens, (baixas, médias e altas), nos anos de 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010 observadas em Évora encontram-se representados das figuras 27 até 31; os meses que não apresentam nenhuma ocorrência devem-no à ausência de dados.

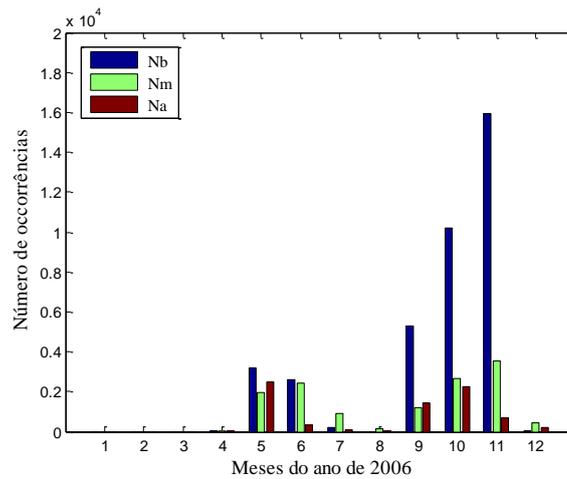


Figura 27 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2006.

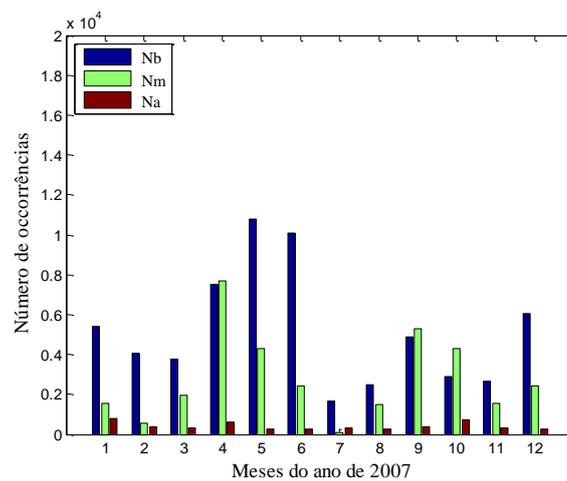


Figura 28 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2007.

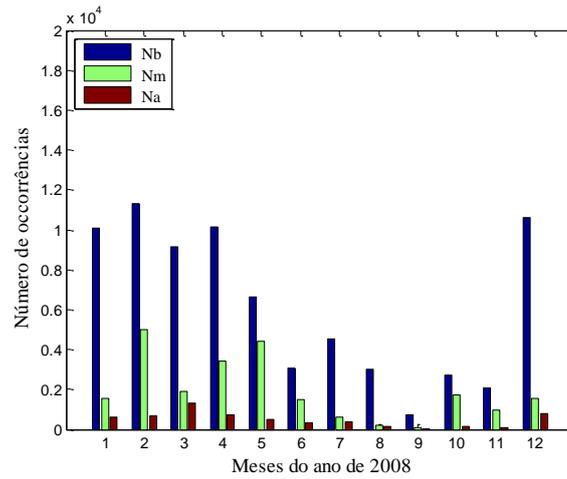


Figura 29 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2008.

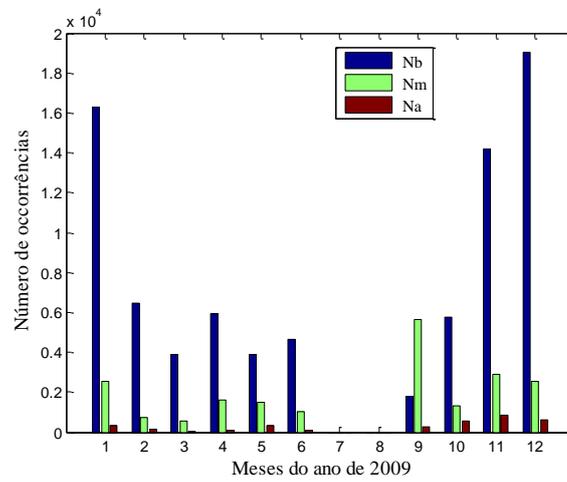


Figura 30 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2009

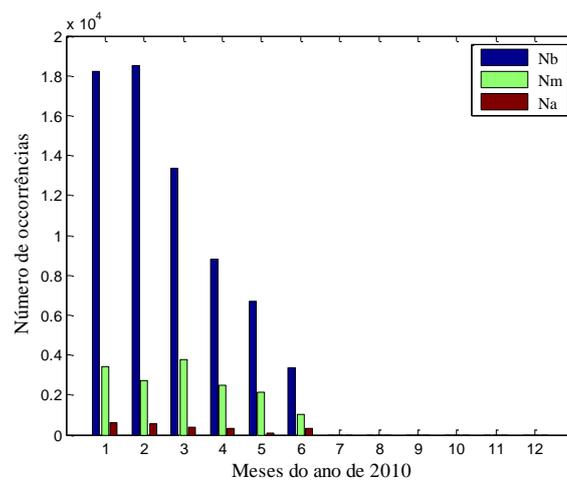


Figura 31 Número de ocorrências de nuvens baixas (Nb), médias (Nm) e altas (Na): 2010.

No ano de 2006 observa-se, na figura 27, que nos meses de Verão, Julho e Agosto e no mês de Dezembro há muito poucas ocorrências e as que existem nestes três meses são na maioria relativas a nuvens médias; no mês de Dezembro quase não ocorrem nuvens baixas e em Agosto este tipo de nuvens não ocorre e além disto em Agosto também quase não ocorrem nuvens altas. Nos restantes meses de 2006, o maior número de ocorrências é de nuvens baixas. No ano de 2007, figura 28, observa-se que em geral as nuvens baixas são as que ocorrem com maior frequência à excepção dos meses de Abril, Setembro e Outubro nos quais há mais ocorrência de nuvens médias. No ano de 2008, figura 29, as nuvens baixas apresentam o maior número de ocorrência em todos os meses. No ano de 2009, figura 30, o maior número de ocorrências também diz respeito às nuvens baixas à excepção do mês de Setembro em que são as nuvens médias que ocorrem em maior número; no mês de Março quase não há ocorrência de nuvens altas. No ano de 2010, figura 31, em todos os meses em que há dados, o maior número de ocorrências é de nuvens baixas. Também é possível observar, nomeadamente nas figuras 29, 30 e 31, que o número de ocorrências de nuvens baixas parece variar ao longo do ano apresentando normalmente maiores valores nos meses de Inverno que vão decrescendo à medida que nos aproximamos dos meses de Verão.

Resumindo, da figura 27 até à figura 31, observa-se que o número de ocorrências de nuvens baixas é, em geral, superior ao número de ocorrências de nuvens médias e altas ao longo dos anos e para cada ano. Isto poderá justificar-se pelo facto de que este número de ocorrências se refere à primeira base de nuvens, medida pelo instrumento, e como se sabe podem co-existir outras nuvens cujas bases se apresentem a altitudes superiores às altitudes das bases das nuvens baixas. Observa-se também, em todas as figuras, que o número de ocorrências de nuvens altas é sempre muito baixo, relativamente aos outros tipos de nuvens, à excepção dos meses de Maio e Outubro de 2006. Isto poderá dever-se a uma limitação instrumental do Ceilómetro, que apenas consegue detectar nuvens até uma altitude de 7.5 km, e não à inexistência real deste tipo de nuvens, pois muitas nuvens altas ocorrem a altitudes superiores aos 7.5 km. Por outro lado, o baixo número de ocorrências de nuvens altas também se pode dever ao facto de o número de ocorrências só ter em conta a primeira camada de nuvens. Deste modo, as nuvens altas só são registadas como primeira camada se não existirem nuvens baixas ou médias. Isto vai ao encontro do que foi referido acima para justificar o elevado número de ocorrências de nuvens baixas. Esta análise permite concluir que para a primeira

camada de nuvens, observadas em Évora, o número de ocorrências de nuvens baixas é, em geral, superior ao número de ocorrências de nuvens médias e de nuvens altas.

Os valores das médias mensais da altitude das bases dos vários tipos de nuvens, (baixas, médias e altas), estão representados em diagramas de extremos e quartis. Cada um dos valores médios representa um valor para cada mês de cada ano. Neste subcapítulo são apresentados os diagramas relativos às nuvens baixas, pois foi anteriormente verificado que o maior número de ocorrências corresponde a este tipo de nuvens; os diagramas relativos às nuvens médias e altas encontram-se no Anexo A. Nos vários diagramas estão representados a mediana (linha a vermelho), dos valores médios, assim como o primeiro e terceiro quartis, o mínimo e o máximo.

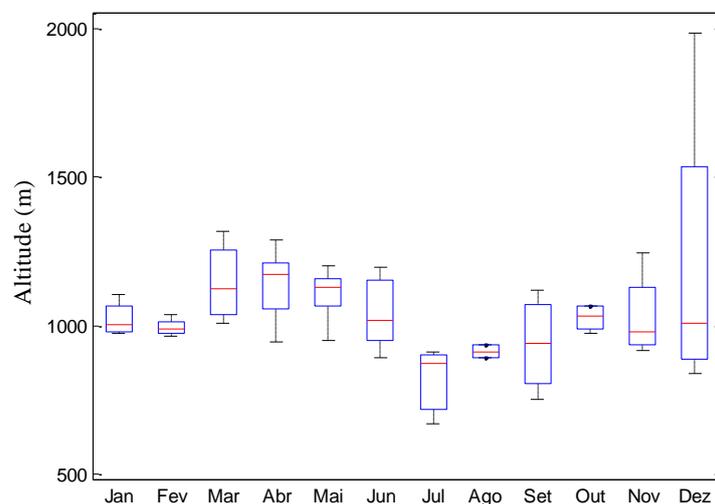


Figura 32 Nuvens baixas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.

Na figura 32 estão representados os diagramas relativos aos valores médios mensais das nuvens baixas, cujas altitudes das bases são inferiores a 2000 m. Observa-se, que o mês de Dezembro é aquele em que ocorre maior dispersão de valores, pois é o mês que apresenta o maior intervalo entre o valor mínimo e o valor máximo sendo intervalo de variação superior a 1000 m; o valor mínimo situa-se abaixo dos 1000 m e o valor máximo situa-se aproximadamente aos 2000 m de altitude. O máximo do mês de Dezembro é também máximo relativamente aos valores de todos os outros meses e os

valores médios das altitudes das bases que se situam acima da mediana apresentam-se mais dispersos o que é traduzido pela assimetria da distribuição. Os meses de Agosto e de Fevereiro são os que apresentam as menores dispersões de valores e no mês de Julho é onde se regista o valor mínimo que é mínimo relativamente a todos os outros meses. Há que ter em conta que o diagrama, por exemplo relativamente ao mês de Dezembro apenas diz respeito aos anos de 2006, 2007, 2008 e 2009, uma vez que em 2010 não existem dados para este mês (figura 31). O mesmo acontece relativamente a outros meses em que não há dados.

Na figura 33 encontram-se representados para cada um dos anos em análise os diagramas relativos aos valores médios mensais, de todos os meses, das altitudes das nuvens baixas.

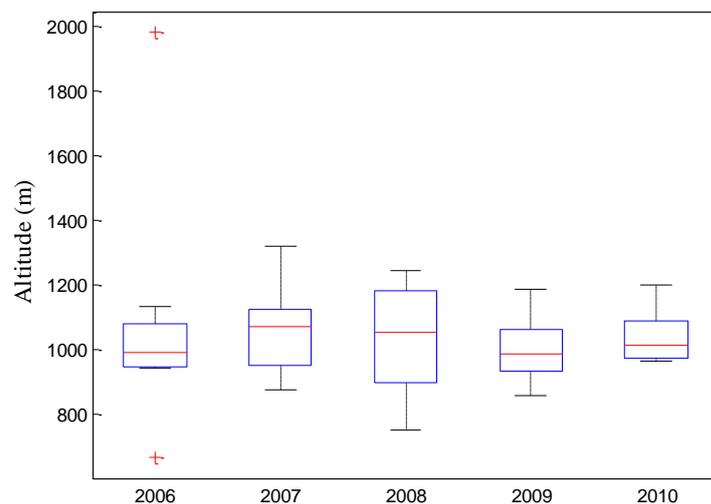


Figura 33 Nuvens baixas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens nos anos de 2006 a 2010.

Da observação da figura verifica-se que os anos de 2006 e de 2010 são os que apresentam a menor dispersão de valores. O ano de 2006 caracteriza-se por um valor mínimo quase coincidente com o primeiro quartil, o que significa que os 25% de valores médios se encontram todos muito próximos; no ano de 2010 o mínimo é quase coincidente com o primeiro quartil. O ano de 2006 destaca-se dos restantes anos, uma vez que apresenta dois valores extremos, um inferior ao mínimo e o outro superior ao máximo da distribuição, os quais indicam que em 2006 existem dois meses em que os

valores médios se afastam muito dos valores médios dos restantes meses (outliers). Os anos de 2007 e de 2008 são os que apresentam maior variabilidade de valores, traduzida pelo intervalo de valores entre os mínimos e os máximos da distribuição. Os valores mínimos, em todos os anos, andam aproximadamente entre os 800 m e os 1000 m, à excepção do ano de 2008 em que o valor mínimo é um pouco inferior a 800 m, e os valores máximos são sempre superiores a 1000 m e inferiores a 1400 m.

Na figura 34 estão representados os diagramas relativos aos valores médios da altitude das nuvens baixas para todos os meses dos anos de 2006 a 2010. Neste caso existem dois valores extremos, um superior ao máximo da distribuição e um inferior ao mínimo da distribuição. Estes dois extremos parecem coincidir com os já observados, na figura 33, para o ano de 2006. Observa-se ainda que o intervalo de variação toma o valor máximo aproximadamente a 1400 m de altitude e o mínimo a menos de 800 m de altitude.

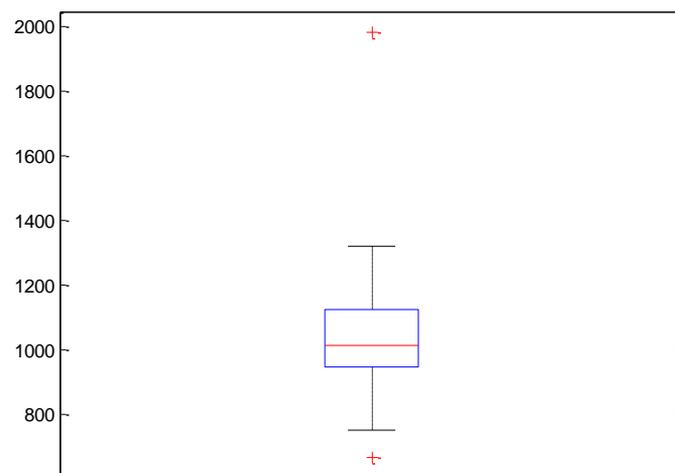


Figura 34 Nuvens baixas: diagrama dos valores médios das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010

Ainda com base nos diagramas, relativos às nuvens baixas, verificou-se que em geral nos meses de Verão, Outono e início do Inverno as nuvens apresentam as bases a altitudes mais baixas relativamente aos meses de fim do Inverno e Primavera (figura 32). Além disto na figura 33 verificou-se que o máximo da altitude das bases é sempre

superior a 1100 m e inferior a 1400 m e que o mínimo é sempre inferior a 1000 m e superior a 800 m à excepção do ano de 2008. Face a isto e considerando o que atrás foi dito relativamente ao intervalo de variação entre os valores mínimo e máximo, na figura 34, e como as nuvens médias iniciam a sua base aos 2000 m de altitude assumiram-se, nas simulações da secção 3.3.2, nuvens baixas com as bases aos 1100 m no Inverno e com extensão vertical igual a 900 m e nuvens baixas com a base aos 900 m e com extensão vertical de 1100 m nos meses de Verão.

4.5. Resultados de valores inferidos de propriedades das nuvens

Neste subcapítulo são apresentados os valores de espessuras ópticas das nuvens e de nebulosidade obtidos, a partir da aplicação do método de interpolação às irradiâncias medidas à superfície com o radiómetro espectral YES MFR-7 (secção 3.3.2). Primeiro são apresentados valores de espessura óptica, nas figuras 35 até 45, obtidos com a aplicação do método de interpolação à irradiância espectral global, dos 670 nm. Por fim são apresentados os resultados de espessura óptica e de nebulosidade, nas figuras 46 até 56, ambos obtidos com a aplicação do método à soma das irradiâncias espectrais globais dos 415 nm e 860 nm (secção 3.3.2).

Os valores de espessura óptica das nuvens são comparados com a mesma grandeza obtida do produto de nuvens fornecido pelo Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), instalado a bordo dos satélites Terra e Aqua (http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD06_L2/index.html, acessado a 22 de Agosto de 2011). Nas figuras onde estão representados os valores de espessura óptica (figuras 35 a 45 e figuras 46 a 56) estão também representados, em ambos os casos, valores de espessura óptica obtidos por satélite (MODIS), (símbolos a azul), para áreas de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ em algumas horas do dia correspondentes à passagem do satélite sobre a área de estudo. Nas figuras relativas aos resultados de nebulosidade (figuras 46 a 56), também se encontram representados os valores de nebulosidade total observados, (símbolos a vermelho), pelo Instituto de Meteorologia. Estas representações de valores obtidos com a aplicação das metodologias referidas versus valores inferidos dos produtos de nuvens fornecidos por satélite ou valores observados pelo IM permitem fazer uma comparação qualitativa dos dados que a seguir é descrita.

Da observação das figuras 35, 36, 37 e 38 verifica-se que nos casos do ano de 2006 e no caso do ano de 2005 os valores de espessura óptica obtidos, com método de interpolação, em geral subestimam os valores estimados por satélite. No entanto, existem dois casos nos quais se consegue uma boa aproximação entre os valores obtidos e os valores estimados por satélite. Estas aproximações ocorrem para o dia 11 de Setembro de 2006, figura 38, e para o dia 24 de Janeiro de 2006, figura 36. Em geral, consegue-se uma boa aproximação entre os valores obtidos, nas figuras 39, 40 e 41, e os valores estimados por satélite para o ano de 2007. Nos casos em que isto não se verifica, os valores obtidos parecem subestimar os valores de satélite. Relativamente ao ano de

2008, figuras 42, 43, 44 e 45, verifica-se que os valores obtidos apresentam muita variabilidade e que em geral parece existir uma boa aproximação entre estes valores e os de satélite à exceção de uma situação no mês de Janeiro.

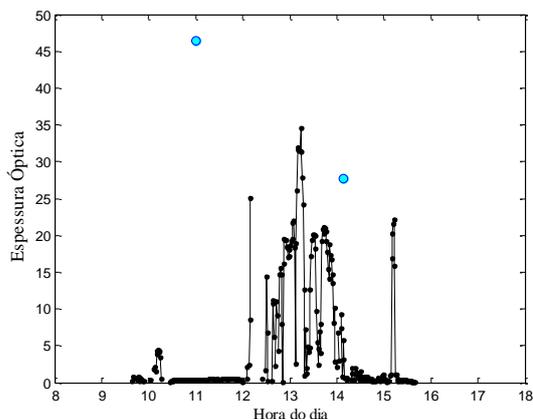


Figura 35 Valores de espessura óptica: 28-12- 2005

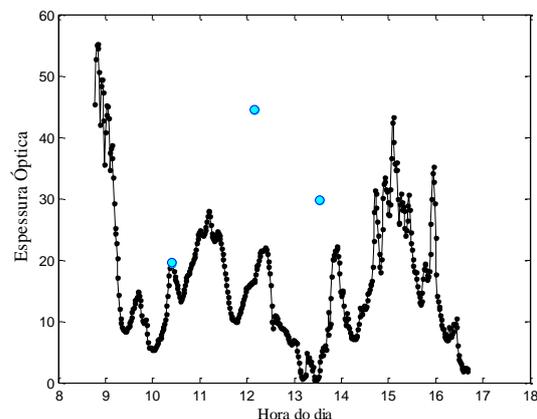


Figura 36 Valores de espessura óptica: 24-01-2006

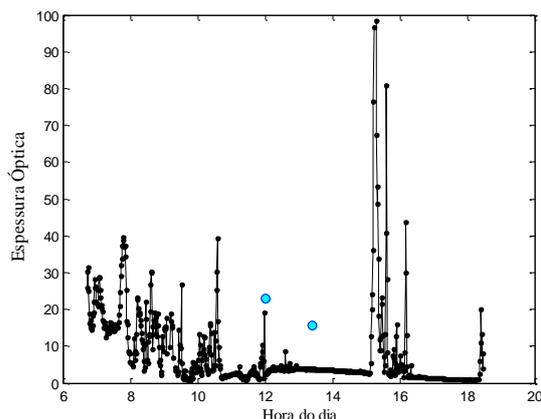


Figura 37 Valores de espessura óptica: 15-08-2006

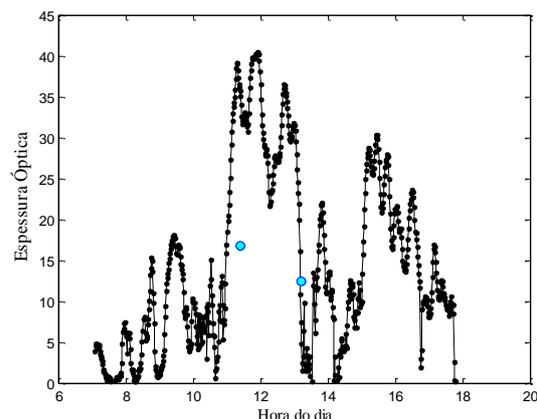


Figura 38 Valores de espessura óptica: 11-09-2006

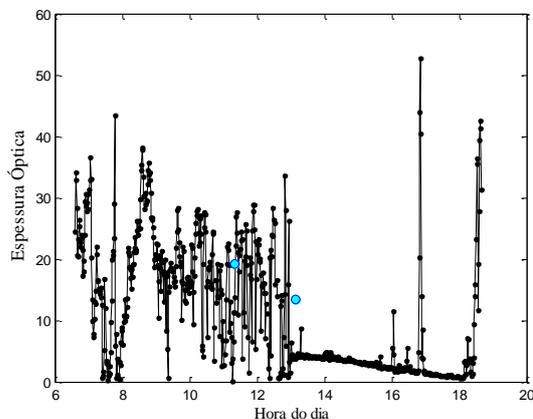


Figura 39 Valores de espessura óptica: 06-08- 2007

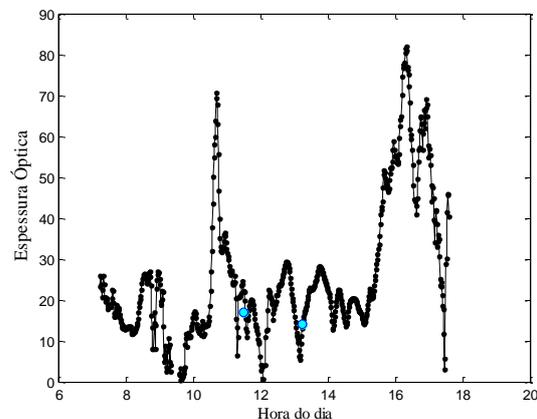


Figura 40 Valores de espessura óptica: 21-09-2007

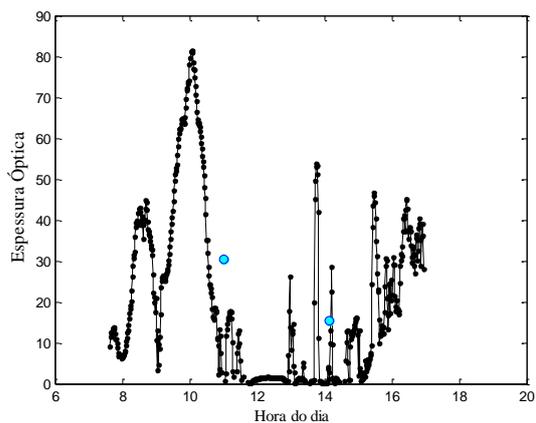


Figura 41 Valores de espessura óptica: 15-10-2007

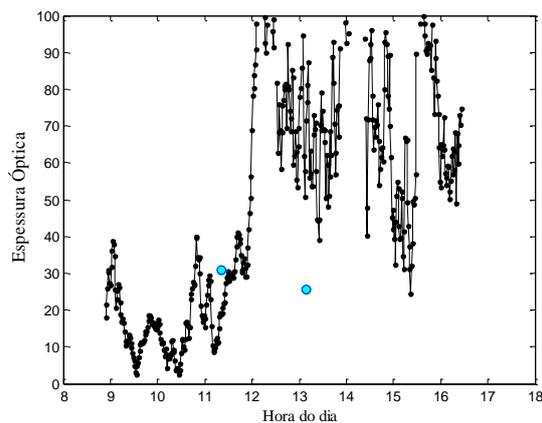


Figura 42 Valores de espessura óptica: 13-01-2008

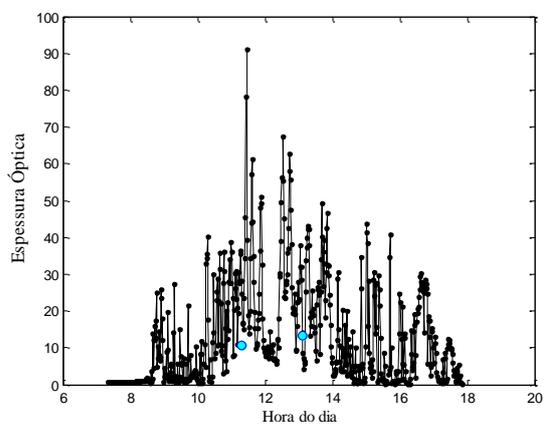


Figura 43 Valores de espessura óptica: 26-03-2008

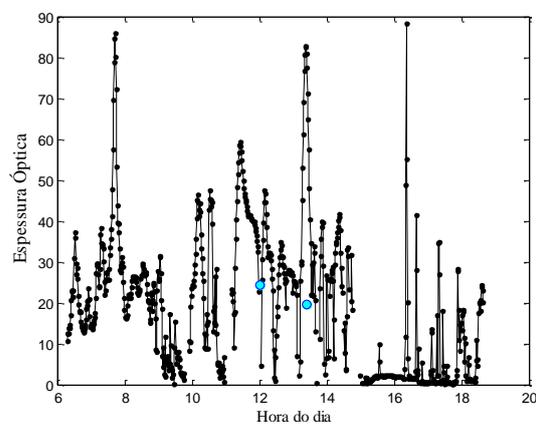


Figura 44 Valores de espessura óptica: 16-05-2008

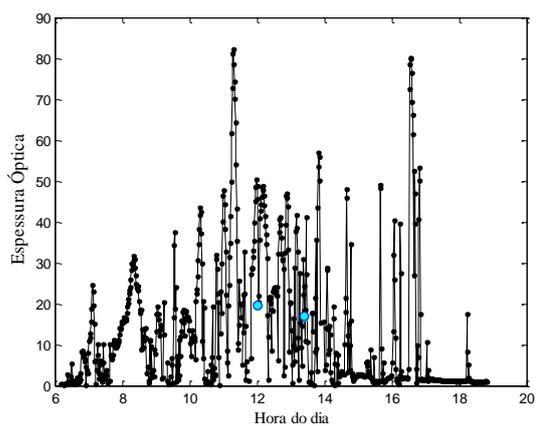


Figura 45 Valores de espessura óptica: 01-06-2008

Da figura 46 até à figura 56, observa-se que em geral a espessura óptica e a nebulosidade têm o mesmo comportamento ao longo do dia, isto é, valores de espessura óptica elevados, em geral, são acompanhados por valores altos de nebulosidade. Também é possível observar que em determinados casos, nomeadamente nos casos relativos aos meses do ano de 2008, existe muita variabilidade dos valores obtidos, ao longo de cada dia, tanto ao nível da espessura óptica como ao nível da nebulosidade.

Os valores de nebulosidade obtidos por interpolação encontram-se, em geral, próximos dos valores observados pelo IM. No entanto, existem vários casos em que isto não se verifica nomeadamente em Dezembro de 2005 (figura 46), em Agosto de 2006 (figura 48) as observações das 12, 15 e 18 horas, em Agosto de 2007 (figura 50) a observação das 18 horas e em Janeiro de 2008 (figura 53), onde nenhum dos valores obtidos se aproxima dos valores observados. De uma forma geral não é possível determinar se os valores, de nebulosidade, obtidos sobrestimam ou subestimam os valores observados pelo IM apenas pela observação das figuras, uma vez que há casos em que os valores obtidos sobrestimam os valores observados, como por exemplo em Agosto de 2006, e outros casos em que os valores obtidos subestimam os valores observados como por exemplo em Dezembro de 2005. Há ainda o caso de Setembro de 2006 em que para o mesmo dia os valores obtidos subestimam a observação das 9 horas e sobrestimam a observação das 12 horas, apesar dos valores obtidos e dos valores observados se encontrarem muito próximos. Por outro lado, o número de observações existentes é muito reduzido para proceder a este tipo de análise.

As diferenças observadas entre os valores de nebulosidade obtidos e os valores observados, pelo IM, podem ficar a dever-se ao facto das observações terem sido realizadas numa localização geográfica diferente da localização geográfica onde se encontra o instrumento, que mede as irradiâncias a partir das quais se inferiram os valores de nebulosidade, a cerca de 5 km de distância. Sendo a nebulosidade um parâmetro que apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal, é possível que algumas das diferenças encontradas estejam relacionadas com isto. Por outro lado, as aproximações assumidas nas simulações também podem afectar os valores de nebulosidade inferidos, uma vez que nas simulações, realizadas sob a hipótese da atmosfera plana e paralela (1D), se assumiu apenas uma camada de nuvens baixas com conteúdo de água líquida. No entanto, também com base nos dados de nebulosidade do

IM, há várias situações, para os dias seleccionados, em que existe mais do que uma camada de nuvens. E a estas camadas estão associados vários tipos de nuvens, caracterizadas por diferentes propriedades, que influenciam a irradiância global que chega à superfície. Deste modo, as diferenças observadas nos valores de nebulosidade, em parte, também se podem justificar por se compararem irradiâncias simuladas e observadas para condições atmosféricas diferentes.

Os valores de espessura óptica obtidos, representados nas figuras 46 até 56, apresentam alguns casos que se encontram muito próximos dos valores estimados por satélite. Por exemplo no mês de Outubro de 2007, (figura 52), os valores obtidos parecem coincidir com os valores de satélite. No entanto, existem vários casos em que os valores obtidos e os valores estimados por satélite se afastam muito, como por exemplo Janeiro e Março de 2008 (figuras 53 e 54), Setembro de 2007 (figura 51) e Setembro de 2006 (figura 49). Nesta situação, em que os valores se afastam, na maioria dos casos os valores de espessura óptica obtidos sobrestimam os valores estimados pelo satélite. Contudo apenas a partir da comparação, entre os valores de espessura óptica obtidos e os valores estimados por satélite, não é possível dizer que a aplicação do método de interpolação à soma das irradiâncias, dos 415 nm e dos 860 nm, é melhor relativamente à aplicação do método à irradiância dos 670 nm. Isto porque há casos em que os valores obtidos se aproximam mais dos valores de satélite com a aplicação do método às somas das irradiâncias e outros casos em que esta aproximação é melhor se o método for aplicado à irradiância dos 670 nm. Considere-se o mês de Dezembro de 2005, figuras 35 e 46, em que se consegue uma melhor aproximação, dos valores obtidos aos valores de satélite, com a aplicação do método de interpolação à soma das irradiâncias relativamente à aplicação do mesmo à irradiância dos 670 nm. Por outro lado, se for considerado o mês de Setembro de 2007, figuras 40 e 51, a melhor aproximação aos valores de satélite já é obtida com a aplicação do método à irradiância dos 670 nm. No entanto, na aplicação do método de interpolação à irradiância dos 670 nm assumiu-se nebulosidade constante e igual a 1 enquanto que na aplicação do método às somas das irradiâncias foram assumidos valores de nebulosidade a variar entre 0 e 1. Este facto, possivelmente, também tem implicações nos valores de espessura óptica obtidos, uma vez que, foi verificado na análise de sensibilidade que a nebulosidade tem muita influencia nas irradiâncias que chegam à superfície a partir das quais foram determinados os valores de espessura óptica das nuvens (figuras 24 e 25). Os valores de

espessura óptica determinados a partir das medições de irradiância à superfície, são representativos de uma espessura óptica hemisférica, enquanto que os valores obtidos por satélite representam áreas (pixéis) de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, sendo depois feitas médias de regiões de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ centradas no local de medições à superfície, consideradas representativas da área hemisférica representada pelas medições de superfície, o que pode não ser exacto. Assim, as discrepâncias encontradas entre os valores de espessuras ópticas de superfície e de satélite podem também estar relacionadas com o facto de possivelmente representarem áreas ligeiramente diferentes.

Com base no que foi referido anteriormente a aplicação do método de interpolação à soma das irradiâncias, para a obtenção de parâmetros das nuvens, parece ser mais promissora relativamente à aplicação do mesmo à irradiância dos 670 nm , uma vez que permite determinar simultaneamente a espessura óptica das nuvens e a nebulosidade.

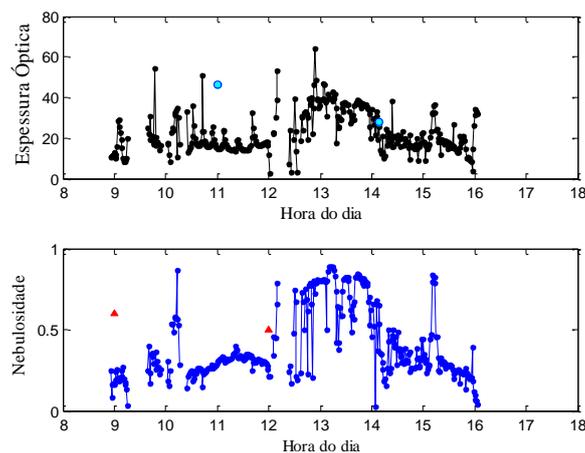


Figura 46 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 28-12-2005.

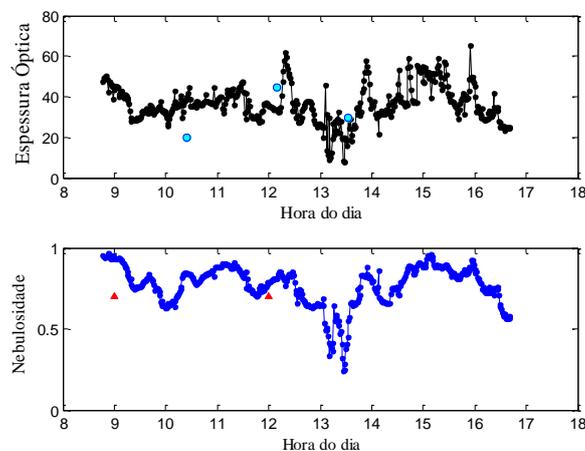


Figura 47 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 24-01-2006.

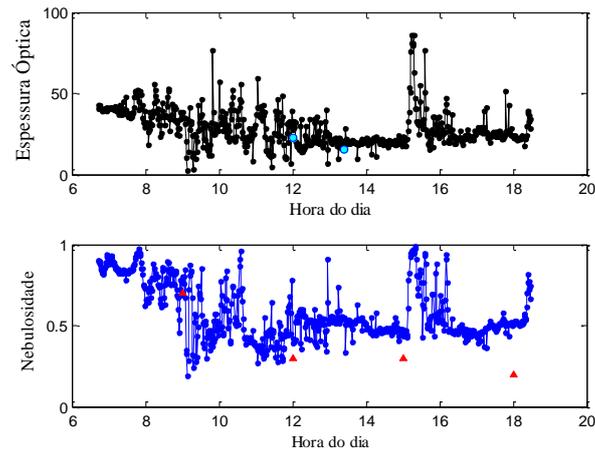


Figura 48 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 15-08-2006.

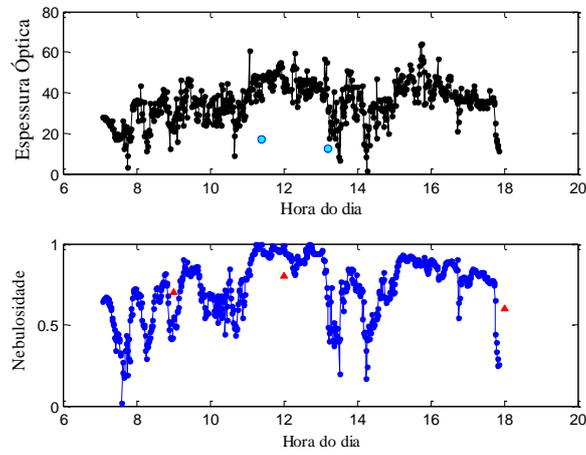


Figura 49 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 11-09-2006.

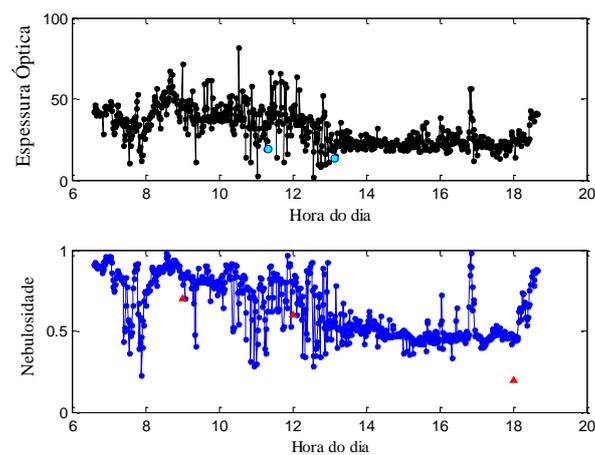


Figura 50 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 06-08-2007.

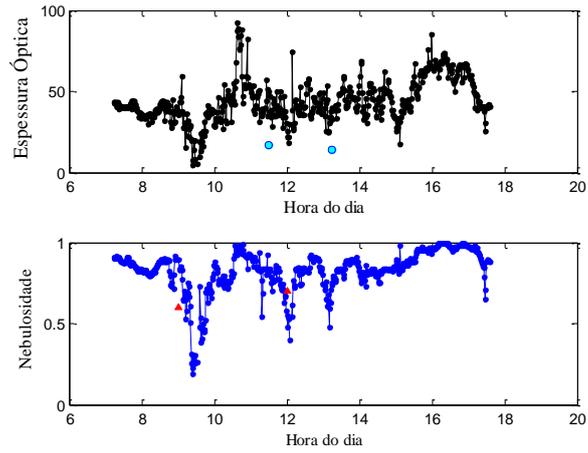


Figura 51 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 21-09-2007.

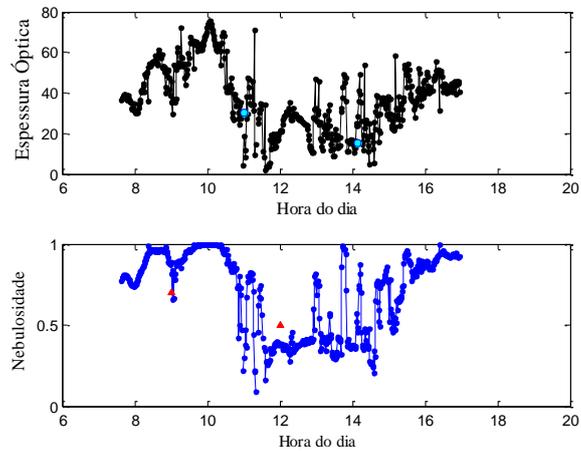


Figura 52 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 15-10-2007.

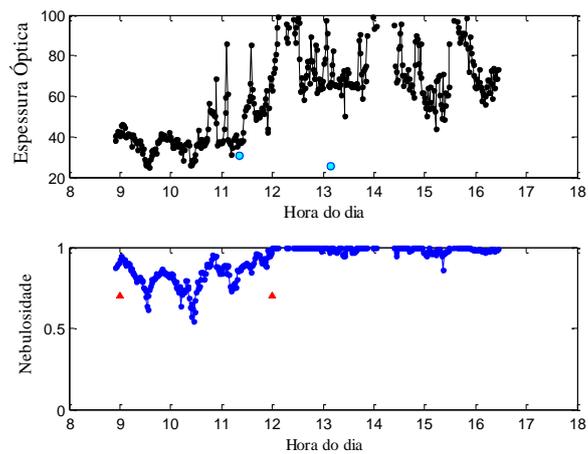


Figura 53 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 13-01-2008

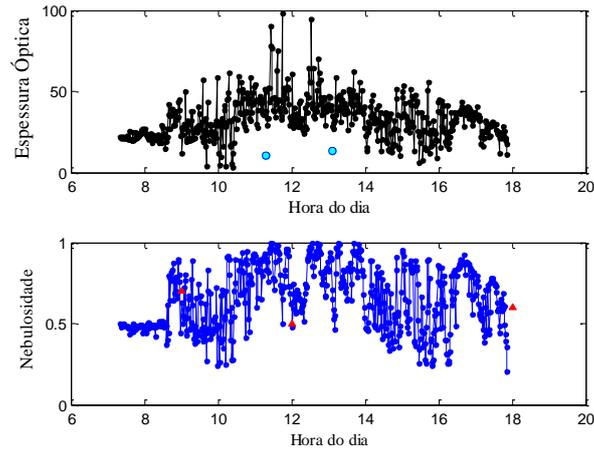


Figura 54 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 26-03-2008.

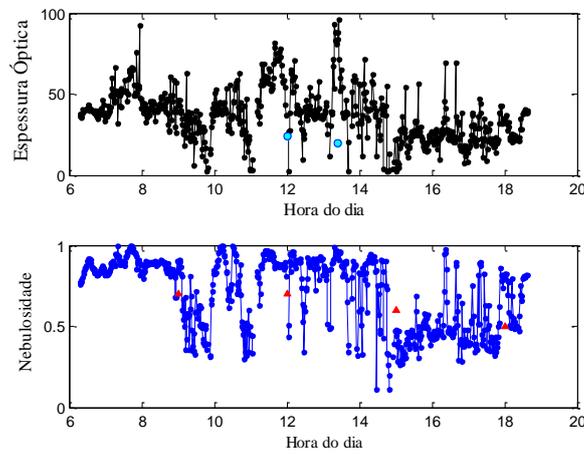


Figura 55 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 16-05-2008

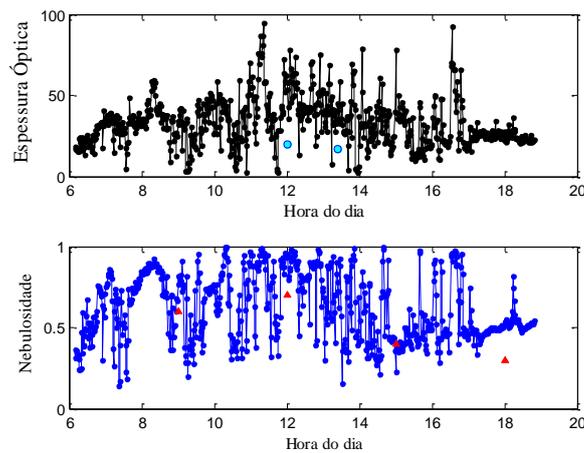


Figura 56 Valores de espessura óptica e de nebulosidade: 01-06-2008

5. Conclusões

Os resultados obtidos, no subcapítulo 4.1, permitiram concluir que a aproximação 3D constitui uma melhor representação da realidade relativamente à aproximação 1D, em condições de atmosferas com nuvens onde os efeitos de dispersão múltipla para os comprimentos de onda no visível (no caso apresentado $\lambda = 440 \text{ nm}$) são muito importantes. A aproximação 3D permite:

1. Simular melhor os efeitos junto aos bordos das nuvens em que simultaneamente pixéis de nuvens e pixéis de céu limpo exercem efeitos radiativos importantes nos fluxos de radiação que chegam à superfície.
2. Ter em conta a influência dos efeitos de dispersão, exercidos pelas nuvens nos locais onde as nuvens já não estão presentes, na irradiância global que chega à superfície.

Ainda no subcapítulo 4.1 foi possível verificar que a espessura óptica é uma propriedade das nuvens muito importante na atenuação dos fluxos de radiação solar que atingem a superfície.

Os resultados obtidos no subcapítulo 4.2 permitiram concluir que com o modelo analítico, e tendo em conta as aproximações assumidas, consegue-se em geral um bom ajuste das curvas de irradiâncias, emergentes da base das nuvens, o que permitiu determinar o factor de forma que caracteriza a rugosidade do topo das nuvens (ou seja muito associada ao tipo de nuvens) de forma aproximada. Os resultados dos cálculos com este modelo também permitiram verificar que o factor de forma, e portanto a forma geométrica dos contornos das nuvens, é um parâmetro muito importante na determinação dos fluxos de radiação que emergem das nuvens.

Da análise de sensibilidade, do subcapítulo 4.3, concluiu-se que para os comprimentos de onda assumidos, ($\lambda = 415 \text{ nm}$ e $\lambda = 860 \text{ nm}$), o raio eficaz das gotículas constituintes das nuvens é uma propriedade que tem pouca influência nos fluxos de radiação solar global que chegam à superfície. Ao contrário, a espessura óptica e a nebulosidade são parâmetros determinantes para quantificar estes fluxos. Concluiu-se ainda, neste subcapítulo, que os fluxos de radiação solar à superfície variam

com o ângulo solar zenital e que ângulos solares zenitais menores são mais favoráveis à obtenção de propriedades das nuvens.

A análise estatística realizada no subcapítulo 4.4 permitiu concluir que para a primeira camada de nuvens, observadas em Évora, o número de ocorrências de nuvens baixas é, em geral, superior ao número de ocorrências de nuvens médias e de nuvens altas. Face a estes resultados foram assumidas nuvens baixas nas simulações descritas na secção 3.3.2. Ainda, neste subcapítulo, com base nos diagramas de extremos e quartis, relativos aos valores médios da altitude das bases das nuvens baixas, verificou-se que em geral nos meses de Verão, Outono e início do Inverno as nuvens apresentam as bases a altitudes mais baixas relativamente aos meses de fim do Inverno e Primavera. E que, em geral, o máximo da altitude das bases é sempre superior a 1100 m e inferior a 1400 m e que o mínimo é sempre inferior a 1000 m e superior a 800 m à excepção do ano de 2008.

No subcapítulo 4.5 verificou-se que o método de interpolação aplicado permite determinar valores de espessura óptica tanto no caso da sua aplicação à irradiância dos 670 *nm* como no caso da sua aplicação à soma das irradiâncias dos 415 *nm* e dos 860 *nm*. No caso da aplicação à soma das irradiâncias também se verificou que permite determinar valores de nebulosidade. Conclui-se que a aplicação deste método parece ser mais promissora ao nível da soma das irradiâncias porque considera a variação da nebulosidade permitindo determinar simultaneamente dois parâmetros que caracterizam as nuvens: a espessura óptica e a nebulosidade.

Referências

Ahrens, C. D., 2000: *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. Third Edition, Brooks Cole

Chiu, J. Christine, Marshak, Alexander, Knyazikhin, Yuri, Wiscombe, Warren J., Barker, Howard W., Barnard, James C., Luo, Yi, 2006: Remote Sensing of cloud properties using ground-based measurements of zenith radiance. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, D16201, doi: 10.1029/2005JD006843, pp. 1029-2005.

Chiu, J. Christine, Huang, Chiung-Huei, Marshak, Alexander, Slutsker, Ilya, Giles, David M., Holben, Brent N., Knyazikhin, Yuri, Wiscombe, Warren J., 2010: Cloud optical depth retrievals from the Aerosol Robotic Network (AERONET) cloud mode observations. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, D14202, doi: 10.1029/2009JD013121, pp. 0148-0227.

Costa, M. J., D. Bortoli, S. Pereira, A. M. Silva, F. Wagner, N. Belo, J. L. Guerrero-Rascado, F. Navas-Guzman, L. Alados-Arboledas, 2007: Analysis of the measurements taken by a Ceilometer installed in the south of Portugal. In *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XII*, edited by Adolfo Camerón, Klaus Schäfer, James R. Slusser, Richard H. Picard, Aldo Amodeo, *Proceedings of SPIE*, Vol. (SPIE Bellingham, WA, 2007), 674523-1 - 674523-12.

Evans, K. F., 1998: The Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method (SHDOM) for Three-Dimensional Atmospheric Radiative Transfer. *American Meteorological Society, Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol. 55, pp. 429-446.

Guoyong Wen, Alexander Marshak, Robert F. Cahalan, 2006: Impact of 3-D Clouds on Clear-Sky Reflectance and Aerosol Retrieval in a Biomass Burning Region of Brazil. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp. 169-172.

Houghton, J. T., 1997: *The Physics of Atmospheres*. Cambridge University Press.

Kassianov, E., Barnard, J. Berg, L. K., Flynn, C, Long, C. N., 2011: Sky cover from MFRSR observations: cumulus clouds. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. pp. 715-735.

Liou, K. N., 2002: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. California: Academic Press.

- Liou, K. N., 1992: Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere. New York: Oxford University Press.
- Marshak, A., Davis, A. B., 2005: 3D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres. Berlin: Springer. pp. 153-212.
- Mayer, B., Kylling, A., 2005: Technical note: The LibRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. Atmospheric Chemistry and Physics. pp. 1855-1873.
- Rosa, R., 1988: Solar and Thermal Radiation inside a Multispan Greenhouse. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol.40, pp. 285-295.
- Salgueiro, V., Potes, M., Costa, M. J., Silva, A. M., 2011: Simulações de Transferência Radiativa para Nuvens Quentes: Comparação entre modelos 1D e 3D. pp. 1-4.
- Salgueiro, V., Costa, M. J., Silva, A. M., Potes, M., Rosa, R. N., 2011: Warm cloud study from ground-based remote sensing using different radiative transfer approaches. pp. 1-4.
- Santos, J, Efeito das Características da Superfície no Balanço Radiativo, Tese de Mestrado, Universidade de Évora, 2010, 78 p.
- Shettle E. P., 1989: Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies, in AGARD Conference Proceedings No. 454, Atmospheric propagation in the uv, visible, ir and mm-region and related system aspects.
- Sibson, R., 1981: A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). In V. Barnett. Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley. pp. 21–36.
- Silva, A.M., R. Rosa (1987). Radiative Heat Loss inside a Greenhouse. Journal of Agricultural Engineering Research, 37, 155-162.
- Watson, D. F., 1992, Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data: Pergamon Press, New York, 321 p.
- Watson, D. F. unpublished manuscript: Compound signed decomposition, the core of natural neighbor interpolation in n-dimensional space.

Watson, D., 2002, Natural Neighbor Interpolation. International Association for Mathematical Geosciences. Acedido em 5 de Julho de 2011: <http://www.iamg.org/documents/oldftp/Watson/naturalneighbour.html>

Evans, F., 2010, Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method (SHDOM) for Atmospheric Radiative Transfer. Acedido em 3 de Maio de 2010: <http://nit.colorado.edu/shdom.html>.

Anexo

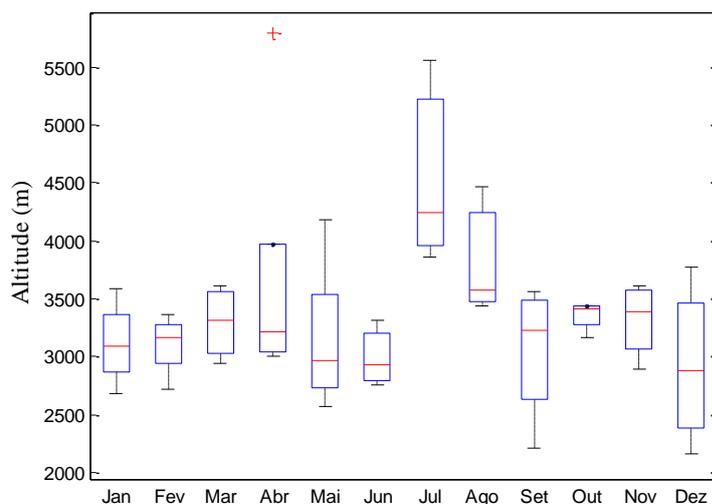


Figura A.1 Nuvens médias: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.

Na figura A.1 estão representados os diagramas relativos aos valores médios mensais das nuvens médias, cujas altitudes se situam entre os 2000 m e os 6000 m. Observa-se que o mês de Julho é o mês que apresenta o intervalo de variação para altitudes maiores em que o valor central, traduzido pela mediana, é superior a 4000 m. O máximo do mês de Julho, aproximadamente aos 5500 m, é também máximo relativamente a todos os outros meses. Os meses de Maio, Setembro e Dezembro apresentam igualmente intervalos de variação grandes, sendo nos meses de Setembro e Dezembro que se registam os valores mínimos que também são mínimos relativamente a todos os outros meses. Os meses de Maio, Julho, Setembro e Dezembro são os meses em que há maior dispersão o que é traduzido pelos respectivos intervalos de variação. Por outro lado, o mês de Outubro é o que apresenta a menor dispersão de valores e os valores superiores à mediana são todos muito próximos indicando que, neste caso, 50% dos valores são muito próximos e inferiores a 3500 m. No mês de Abril regista-se um valor extremo (outlier), pois apresenta um grande afastamento de todos os outros valores sendo superior ao máximo; este valor corresponde a uma altitude superior a 5500 m. Neste caso como os valores médios das altitudes das bases das nuvens, são relativos aos meses de Abril de todos os anos, este valor extremo indica que

eventualmente há um ano em que o valor médio da altitude da base das nuvens no mês de Abril é superior aos valores médios relativos aos meses de Abril dos outros anos.

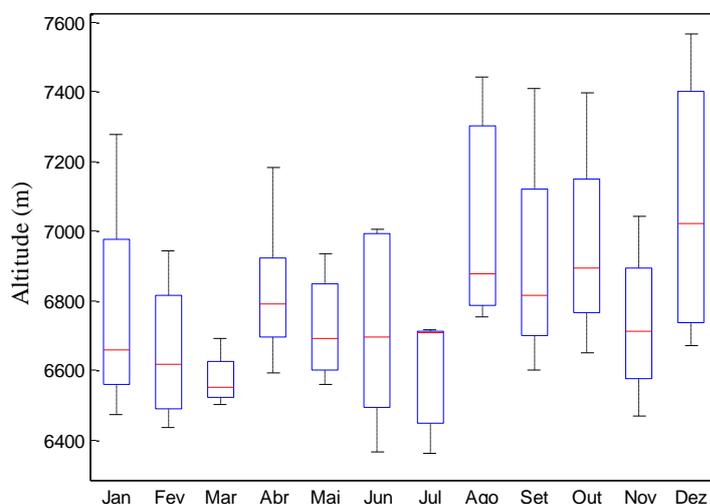


Figura A.2 Nuvens altas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.

Na figura A.2 estão representados os diagramas dos valores médios mensais das nuvens altas, cujas altitudes são superiores a 6000 m. Neste caso, verifica-se que há muita dispersão de valores em todos os meses, à exceção do mês de Março. O máximo registado no mês de Dezembro é também máximo relativamente a todos os outros meses; nos meses de Verão, Junho e Julho, é quando se registam os valores mínimos que também são mínimos relativamente a todos os outros meses. O mês de Julho, em particular, caracteriza-se por uma distribuição muito assimétrica em que os valores superiores à mediana se encontram todos muito próximos, inclusive da mediana, indicando que 50% dos valores médios das altitudes das bases das nuvens se situam aproximadamente aos 6700 m de altitude.

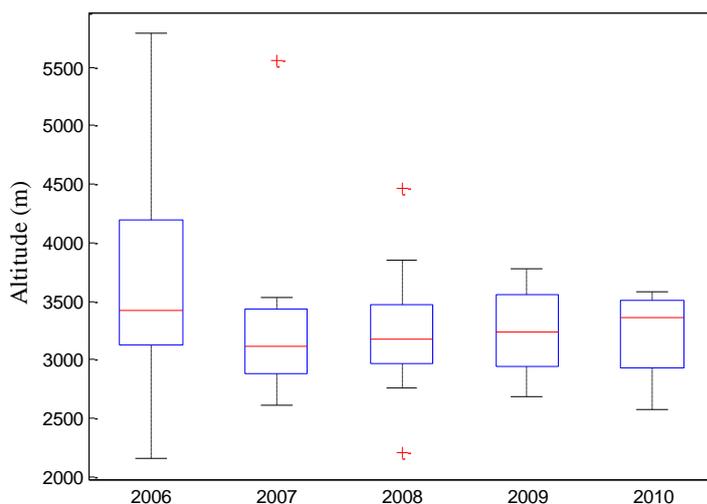


Figura A.3 Nuvens médias: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens nos anos de 2006 a 2010.

Na figura A.3 encontram-se representados os diagramas dos valores médios mensais das nuvens médias em cada ano. Observa-se que o ano de 2006 é o que apresenta maior dispersão de valores com o valor mínimo inferior a 2500 m e com o máximo superior a 5500 m, ocupando praticamente toda a gama de altitudes que define as nuvens médias. Os anos de 2007 e 2008 também se destacam, pois ambos apresentam valores extremos (outliers); o caso do ano de 2007 é o que apresenta o valor extremo mais elevado, aos 5500 m aproximadamente, afastando-se muito do máximo que é de, aproximadamente, 3500 m; no caso do ano de 2008 existem dois valores extremos, um valor inferior ao mínimo da distribuição e um valor superior ao máximo da distribuição. Estes valores extremos correspondem a meses cujos valores médios são muito diferentes dos valores médios dos restantes meses do ano em questão.

Na figura A.4 encontram-se representados os diagramas dos valores médios mensais das nuvens altas em cada ano. Observa-se que os anos de 2006 e 2007 são os que apresentam maior dispersão de valores; no ano de 2006 é quando se regista o máximo relativamente a todos os outros anos. Nos anos de 2007 e 2009 registam-se os valores mínimos relativamente a todos os outros anos. No ano de 2010 é o onde se regista menor dispersão de valores e neste caso há que ter em conta que há apenas 6 meses de dados.

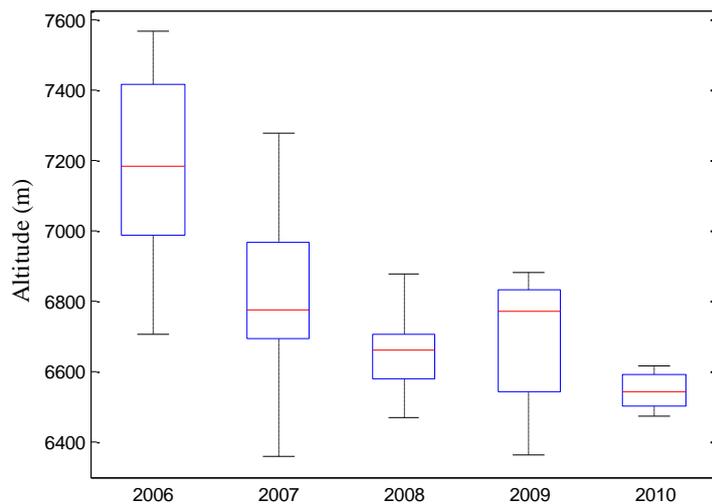


Figura A.4 Nuvens altas: diagramas dos valores médios mensais das altitudes das bases das nuvens nos anos de 2006 a 2010.

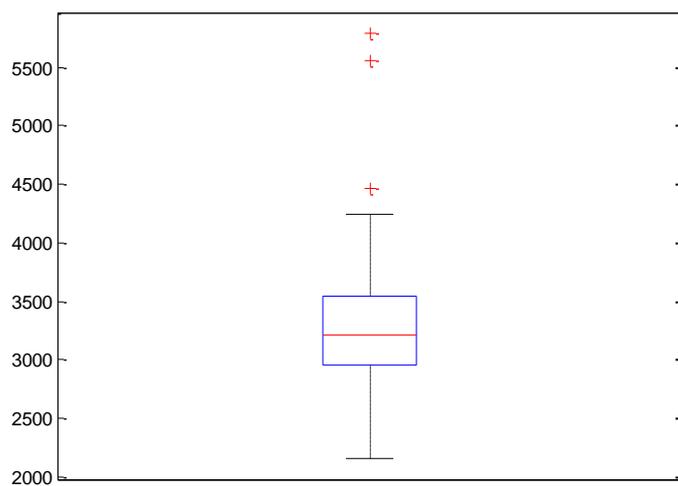


Figura A.5 Nuvens médias: diagrama dos valores médios das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.

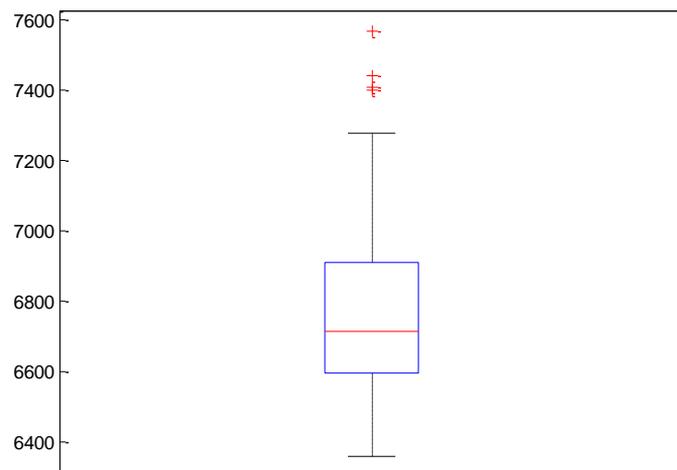


Figura A.6 Nuvens altas: diagrama dos valores médios das altitudes das bases das nuvens de todos os meses de 2006 a 2010.

Nas figuras A.5 e A.6 estão representados os diagramas relativos aos valores médios das altitudes das bases de cada tipo de nuvens, médias e altas, para todos os meses dos anos de 2006 a 2010. Observa-se que há valores extremos em ambos os casos. Os resultados relativos às nuvens médias, figura A.5, também apresentam três valores extremos os quais são todos superiores ao máximo da distribuição. Neste caso, o intervalo de variação tem o mínimo um pouco acima dos 2000 m e o máximo abaixo dos 4500 m. No caso das nuvens altas, figura A.6, também se registam valores extremos, que tal como no caso das nuvens médias, são superiores aos máximos da distribuição; neste caso os valores do máximo e do mínimo situam-se, respectivamente, aos aproximadamente 7300 m e aos 6300 m.