



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/09.29.13.33-TDI

ESTUDO TEÓRICO E OBSERVACIONAL DOS EFEITOS DA NEBULOSIDADE NA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Hallan Souza de Jesus

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho, aprovada em 29 de outubro
de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KBAA9L>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/09.29.13.33-TDI

ESTUDO TEÓRICO E OBSERVACIONAL DOS EFEITOS DA NEBULOSIDADE NA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

Hallan Souza de Jesus

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho, aprovada em 29 de outubro
de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3KBAA9L>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Jesus, Hallan Souza de.

J499e Estudo teórico e observacional dos efeitos da nebulosidade na radiação ultravioleta / Hallan Souza de Jesus. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xx + 91 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/09.29.13.33-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadora : Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho.

1. Radiação ultravioleta. 2. Modelo atmosférico. 3. Nuvens.
I.Título.

CDU 551.576.2



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

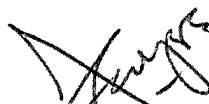
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Hallan Souza de Jesus**

Título: "ESTUDO TEÓRICO E OBSERVACIONAL DOS EFEITOS DA NEBULOSIDADE NA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA."

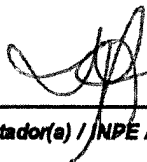
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Juan Carlos Ceballos



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcelo de Paula Corrêa



Convidado(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família, *Ronildo Neris de Jesus* (pai), *Ionice Oliveira de Souza* (mãe) e *Haylla Souza de Jesus* (irmã). Pessoas muito especiais para mim, as quais sempre me ensinam a acreditar em meus sonhos e a lutar por eles. Também, agradeço os conselhos e orientações, que me ajudaram a lidar em todas as circunstâncias pelas quais passei.

Meus sinceros agradecimentos a minha orientadora Dra. Simone M. Sievert Costa Coelho, que me ensina e contribui para meu crescimento profissional, como também a lidar com as adversidades da carreira acadêmica. Agradeço pela paciência nesse período, pelas discussões, pelos momentos de preocupação, alegrias e, em especial, pela amizade construída. Ao professor Dr. Juan Carlos Ceballos, que sempre esteve disposto para aquelas conversas inspiradoras que nos fazem pensar, questionar e aprender. Ao professor Dr. Nelson Jesus Ferreira, por estimular na pesquisa científica, seja através de seus questionamentos feitos olhando o campo experimental (*céu*), ou até mesmo em frente às imagens de satélites.

A todos pelo companheirismo, amizade e, principalmente, ajuda. Anthony Porfirio, Bianca Maske, Bruno Medina, Bruno Guimarães, Bruno Zanetti, Cristiano Eichholz, Diego Enoré, Enrique Vieira, Francisco Mesquita, Jhonatan Aguirre, José Dias, Jurandir Rodrigues, Leandro Macedo, Liviany Pereira, Marcio Brito, Rayonil Caneiro, Ramon Braga, Rômulo Augusto, Vinicius Sperling, Valesca Fernandes e Wagner Flauber. Houve contribuição de cada um por meio das discussões, aprendizados em programação, meteorologia, radiação etc. A todos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), em especial à Divisão de Satélite e Sistemas Ambientais (DSA).

Também, àquela que conheci por último, mas, desde então sempre está presente, me compreendendo, ensinando e ajudando. Agradeço a minha namorada, Carolina Daniel Gouveia, por fazer parte desse período muito importante para mim.

Agradeço ao Dr. Marcelo de Paula Corrêa, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI-MG), pelo fornecimento dos dados experimentais para a realização deste trabalho e pela participação na Banca avaliadora.

À Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) pelo fornecimento dos dados observacionais de radiação ultravioleta de São Paulo (SP).

À rede de fotômetros Aerosol Robotic Network (AERONET) pela disponibilidade eletrônica das informações de aerossol.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES) pelo fornecimento de auxílio financeiro durante o desenvolvimento da dissertação. Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudo.

Muito obrigado a todos os que direta e/ou indiretamente contribuíram para o aprendizado.

RESUMO

Os processos físicos atmosféricos responsáveis pela atenuação da radiação ultravioleta (UV) à superfície, principalmente associados às nuvens, são investigados na presente pesquisa. Adicionalmente, apresenta-se uma nova metodologia na estimativa de Índice Ultravioleta (IUV) em diferentes condições de nebulosidade. Tal metodologia pode ser considerada pioneira na combinação de informações de satélites geoestacionários e medidas à superfície na estimativa do parâmetro **CMF** (do inglês *Cloud Modification Factor*). Este parâmetro é utilizado na estimativa da radiação UV na presença de nebulosidade. As estimativas de IUV são realizadas pelo modelo de transferência radiativa UVSIM (do inglês *UltraViolet SIMplified Model*), o qual é acoplado com informações dos tipos de nuvem provenientes do *Classificador de Nuvens* da DSA/CPTEC. Conclui-se que as estimativas de IUV realizadas pelo UVSIM são bem representadas, conforme o $r^2 = 0,90$ e VIÉS = -0,33 obtidos por meio das observações. A parametrização desenvolvida está na determinação de valores de **CMF** a partir de refletância (R_{EF}) observada por satélites. Os resultados indicam que a parametrização de nuvens do tipo *cirrus* apresenta $r^2 = 0,80$, *cumulus* $r^2 = 0,79$, *stratus* $r^2 = 0,72$ e *convectiva* $r^2 = 0,89$. Através da avaliação da parametrização, observa-se que 65% da variação de IUV estimado na presença de nuvens *cirrus* é explicada pelas observações à superfície, enquanto a validação para *stratus*, *cumulus* e *convectiva* apresenta 65%, 64% e 56%, respectivamente. Portanto, a nova parametrização descreveu melhor as nuvens em comparação com os valores de **CMF** utilizados atualmente. Assim, este estudo contribui para a compreensão dos impactos realizados pelos constituintes atmosféricos e para uma melhor representação numérica nas estimativas do IUV com presença de nebulosidade. A importância de obter estimativas precisas está no fato da radiação UV ser apontada como a principal causa do surgimento de câncer do tipo não-melanoma (estimativa de 182 mil no ano de 2014), sendo este o tipo mais expressivo em números de casos de cânceres estimados todos os anos.

Palavras-chaves: Radiação Ultravioleta. Modelo Atmosférico. Nuvens.

THEORETICAL AND OBSERVATIONAL STUDY OF THE EFFECTS OF CLOUD COVER ON ULTRAVIOLET RADIATION

ABSTRACT

Atmospheric physical processes responsible for the attenuation of ultraviolet (UV) to the surface, mainly associated with clouds, are investigated in this research. In addition, it presents a new methodology in estimating Ultraviolet Index (UVI) in different cloudy conditions. This methodology can be considered a pioneer in the combination of geostationary satellite data and measures the surface to estimate the parameter **CMF** (**C**loud **M**odification **F**actor). This parameter is used to estimate the UV radiation in the presence of cloudiness. UVI estimates are performed by the radiative transfer model UVSIM (**U**ltra**V**iolet **S**implified **M**odel), which is coupled with cloud types of information from the classifier clouds DSA / CPTEC. This study concludes that the UVI estimates made by UVSIM are well represented, as $r^2 = 0.90$ and $\text{BIAS} = -0.33$ obtained through observations. The parameterization is developed in determining **CMF** values from reflectance (R_{EF}) observed satellites. The results indicate that the cloud parameterization of type *cirrus* presents $r^2 = 0.80$, *cumulus* $r^2 = 0.79$, *stratus* $r^2 = 0.72$ and *convective* $r^2 = 0.89$. By evaluating the parameter, it was observed that 65% of UVI variation estimated in the presence of *cirrus* clouds are explained by the comments to the surface, while the validation for *stratus*, *cumulus* and *convective* given 65%, 64% and 56%, respectively. Therefore, the new parameter best describe the cloud compared with **CMF** values currently used. This study contributes to the understanding of the impacts made by atmospheric constituents and better numerical representation in the UVI estimates presence of cloudiness. The importance of getting accurate estimates is the fact that UV radiation is considered the main cause of the type of cancer emergence non-melanoma (estimate 182 thousand in 2014), which is the most significant type in numbers of cases estimated cancers every year.

Keywords: Ultraviolet Radiation. Atmospheric Model. Clouds.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Irradiância solar espectral estimada através do SBDART para o topo da atmosfera (TOA) e à superfície em diferentes ângulos zenitais (sz_a). As estimativas foram realizadas para uma atmosfera padrão de regiões tropicais com concentração total de ozônio de 300 DU.....	6
Figura 2.2 – Esquema da distribuição angular da radiação por partículas esféricas para <i>a) x</i> << 1, <i>b) x</i> = 1 e <i>c) x</i> >> 1. <i>d)</i> Eficiência de extinção (Q_{ext}) em função do número de Mie para uma partícula não absorvedora com $m = 1,33$	11
Figura 2.3 - Comportamento espectral da seção de choque de absorção (σ_a) para as moléculas de O ₂ e O ₃ . 1Å equivale à 10 ⁻¹⁰ m.....	12
Figura 2.4 - Profundidade óptica de nuvens (linha contínua) com a contribuição individual de absorção e espalhamento (linhas tracejadas) para: <i>a)</i> nuvens baixas formadas por gotas de água líquida e <i>b)</i> nuvens altas formados por cristais de gelo. <i>c)</i> fator de assimetria e <i>d)</i> albedo simples.....	14
Figura 2.5 – Médias mensais da profundidade óptica do aerossol (τ_{550nm}) observadas na cidade de São Paulo (SP) no período entre 2003 e 2004.	16
Figura 2.6 - Estimativas de câncer no Brasil para o ano de 2014, sendo o câncer de pele não-melanoma o mais expressivo.	18
Figura 2.7 - Espectro de ação eritêmica utilizado pela OMS e OMM. Fonte: Corrêa (2003a), adaptado de McKinlay; Diffey (1987).....	20
Figura 4.1 - Localização dos instrumentos que monitoraram os dados utilizados neste trabalho: IUV (projeto FAPESP, azul), profundidade óptica do aerossol (AERONET, azul) e a UVA (CETESB, vermelho).....	27
Figura 4.2 - <i>Boxplot</i> das incidências do IUV na cidade de São Paulo para diferentes horários no período entre 2005 e 2009.	31
Figuras 4.3 – Distribuição espacial do IUV sobre o continente sul americano estimada pelo modelo UVSIM nas condições de céu claro (<i>a)</i> e na presença de nebulosidade (<i>b)</i>). A estimativa de IUV em condições de nebulosidade utiliza o IUV estimado para céu claro e pondera pelo parâmetro CMF (definido na Seção 4.2.3), de acordo com o tipo de nuvens indicado pelo produto <i>Classificador de Nuvens</i> (Figura 4.4).	33
Figura 4.4 - Classificador de nuvens obtido por meio do satélite GOES-10 para o dia 26/03/2008 às 16h30 UTC, disponibilizado na página eletrônica da DSA/CPTEC.....	34
Figura 4.5 – Refletância observada pelos sensores GOES-12 (à direita – 15/09/2006) e GOES-10 (à esquerda – 14/09/2008) às 15h00 UTC. Fonte: INPE. DSA. CPTEC (2015).....	35

Figura 4.6 – Fluxograma da metodologia adotada para a seleção do conjunto de dados utilizados neste estudo para determinar o efeito da nebulosidade no IUV. ..	38
Figura 4.7 - Esquema de classificação de nuvens baseado na altura e profundidade óptica de nuvens no visível.....	42
Figura 5.1– Distribuição espectral da transmitância atmosférica na radiação UV (em porcentagem), considerando os <i>casos</i> 1a, 1d e 1e, apresentados na Tabela 5.1.	55
Figura 5.2 - Distribuição espectral da transmitância atmosférica com variação na concentração total de O ₃	55
Figura 5.3 – Variação do IUV em termos de τ_{aer} para dois tipos de aerossóis (rural e urbano). O IUV é estimado através do SBDART para uma atmosfera tropical, sem nebulosidade e concentração total de O ₃ de 300 DU.....	57
Figura 5.4 – Ciclo diário da irradiância no espectro UVA. As estimativas foram realizadas considerando a presença de aerossóis com características rural (à esquerda) e urbana (à direita), ambos com τ_{aer} (para 550 nm) igual a 0,5 e 1.....	58
Figura 5.5 – Distribuição espectral da irradiância descendente à superfície: global (a), direta (b), difusa (c) e irradiância refletida no topo da atmosfera (d). As irradiâncias são estimadas nas condições de céu claro e na presença de nuvens altas com diferentes profundidades ópticas ($\tau_{nuvens}=1$ e $\tau_{nuvens}=10$).	59
Figura 5.6 – Variação da irradiância E _{GL} (a), E _{DIR} e E _{DIF} (b), e E _{UP} (c) em termos de τ_{nuvens} , altura (à direita) e raio efetivo de nuvens (à esquerda).....	61
Figura 6.1 – Relação teórica entre CMF e R _{EF} realizada em distintos comprimentos de onda.....	64
Figura 6.2 – Relação teórica entre o CMF e R _{EF} (650 nm). O CMF é calculado para todo o intervalo da radiação UV (200 – 400 nm).	65
Figura 6.3 – a) Variação anual da refletância no canal visível dos satélites GOES-12 e GOES-10 para as condições de céu claro no período e local de estudo. b) similar a (a), porém aplicando o fator de correção de 0,6896 (1/1,45) nas refletâncias do GOES-10, após o período de transição.	67
Figura 6.4 - Frequência relativa (%) da refletância do canal visível (R) dos satélites GOES-12 (a) e GOES 10 (b), sendo que para o último é apresentada a distribuição com correção na refletância de $f = 1,45$ (R _{EFc}). c) Representação gráfica do tipo <i>boxplot</i> das R _{EF} apresentadas em (a) e (b).....	68
Figura 6.5 - Distribuição da variância do IUV observado e da refletância do GOES-10 em termos do cosseno do ângulo zenital (μ_0). A variância foi determinada através do desvio padrão normalizado pela média dos valores de IUV observados no intervalo de 30 minutos, centrados em determinados horários de imageamento do satélite GOES.	69

Figura 6.6 – Relação entre o CMF e a refletância do canal visível do Imageador do satélite GOES. Barras indicam o desvio padrão. *a)* tendência linear e *b)* tendência potencial considerando a *rs*. 70

Figura 6.7 – Relação entre o CMF e a refletância do visível (650 nm) do GOES para quatro diferentes tipos de nuvens: *a)* *cirrus*, *b)* *cumulus*, *c)* *stratus* e *d)* *convectiva*. O CMF é determinado pela razão entre o IUV observado e aquele calculado pelo UVSIM nas condições de céu claro. Linha tracejada indica o CMF atualmente utilizado no UVSIM para cada tipo de nuvem..... 71

Figura 6.8 – Relação entre o CMF e a refletância do GOES normalizada pela refletância da superfície para quatro diferentes tipos de nuvens: *a)* *cirrus*, *b)* *cumulus*, *c)* *stratus* e *d)* *convectiva*. O CMF é determinado pela razão entre o IUV observado e aquele calculado pelo UVSIM nas condições de céu claro. Linha tracejada indica o CMF atualmente utilizado no UVSIM para cada tipo de nuvem. 72

Figura 6.9 – *a)* Dispersão entre IUV observado e estimado nas condições de céu claro, de acordo com as indicações do classificador de nuvens. *b)* Fração do IUV estimado pelo UVSIM e aquela observada em função da profundidade óptica do aerossol. 75

Figura 6.10 – Gráfico de dispersão entre os dados de IUV observados e estimados pelo UVSIM para nuvens do tipo *cirrus* e *cumulus*. UVSIM_OPER (*a*, *c*) indica as estimativas do IUV de céu nublado usando CMF constante (CMF- *cirrus* = 0,896 e CMF- *cumulus* = 0,726), versão operacional no CPTEC e UVSIM_PAR (*b*, *d*) indicam as estimativas usando as parametrizações definidas na Tabela 6.1. 76

Figura 6.11 – Gráfico de dispersão entre os dados de IUV observados e estimados pelo UVSIM para nuvens do tipo *stratus* e *convectiva*. UVSIM_OPER (*a*, *c*) indica as estimativas do IUV de céu nublado usando CMF constante (CMF-*stratus* = 0,5 e CMF- *convectiva* = 0,316), versão operacional no CPTEC e UVSIM_PAR (*b*, *d*) indicam as estimativas usando as parametrizações definidas na Tabela 6.1. 77

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 - Intervalos espectrais da radiação UV decomposta em três subdivisões: UVC, UVB e UVA.....	5
Tabela 2.2- Categorias do IUV.....	21
Tabela 4.1– Especificações do conjunto de dados utilizados neste trabalho.....	29
Tabela 4.2 – Informações sobre os testes de sensibilidade realizados neste trabalho.	40
Tabela 4.3 – Valores de CMF para quatro tipos de nuvens utilizados atualmente no UVSIM.	43
Tabela 4.4- Características das atmosferas padrão utilizadas no código do SBDART.	46
Tabela 5.1 – Análise dos impactos realizados pelos constituintes atmosféricos nas componentes da radiação UV. Descrição completa dos casos apresentados no texto ou na Seção 4.2.2. E_{GL} , E_{DIR} e E_{DIF} e E_{UP} representam, respectivamente, as irradiâncias descendentes globais, diretas e difusas à superfície e, ascendentes do topo da atmosfera (TOA).....	52
Tabela 6.1 – Comparações do CMF utilizado atualmente no UVSIM e a parametrização em relação à R_{EF} do GOES para quatro tipos de nuvens, de acordo com indicações do classificador de nuvem. Os valores atuais são constantes para cada tipo de nuvem e baseiam-se na metodologia de Long et al. (1996).....	73
Tabela 6.2 – Avaliação e comparação do IUV estimado com o CMF atualmente operacional na DSA/CPTEC (UVSIM_OPER) e desenvolvido neste trabalho (UVSIM_PAR). Min., Max., S^2_d e REMQ são as variáveis estatísticas mínimo, máximo, desvio padrão do VIÉS e Raiz do Erro Médio Quadrático, respectivamente.	79

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AERONET	- Aerosol Robotic Network
CEMTEC/MS	- Centro de Monitoramento de Tempo, do Clima e dos Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMF	- Cloud Modification Factor
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSA	- Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
DU	- Unidade Dobson
DNA	- Ácido desoxirribonucleico
EPAGRI/CIRAM	- Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
<i>f</i>	- Função de correção
FAPESP	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
E_{DIF}	- Irradiância Difuso
E_{DIR}	- Irradiância Direto
E_{GL}	- Irradiância Global
E_{UP}	- Irradiância Ascendente
<i>g</i>	- Parâmetro de assimetria
GOES	- Goestacionary Operational Environmental Satellite
IARC	- International Agency for Research on Cancer
ICNIRP	- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
INCA	- Instituto Nacional de Câncer
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISCCP	- International Satellite Cloud Climatology Project
IUV	- Índice Ultravioleta
IUV_{céuclaro}	- Índice Ultravioleta céu claro
IUV_{observado}	- Índice Ultravioleta observado
LWC	- Liquid Watter Content
MASTER/USP	- Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais
NCEP	- National Centers for Environmental Prediction
N_d	- Somatório de três observações diárias de octas
N₂	- Nitrogênio
NO₂	- Dióxido de Nitrogênio
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
OMS	- Organização Mundial de Saúde
O₃	- Ozônio
<i>p</i>	- Função de fase
Q_{ext}	- Fator de eficiência de extinção
R_{EF}	- Refletância
r²	- Coeficiente de Determinação
<i>re</i>	- Raio Efetivo
REMQ	- Raiz do Erro Médio Quadrático

<i>rs</i>	- refletância da superfície
RMSP	- Região Metropolitana de São Paulo
RUV_{ceuclo}	- Radiação Ultravioleta para céu claro
RUV_{nuvens}	- Radiação Ultravioleta na presença do parâmetro considerado
SBDART	- Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer
SBUV-2	- Solar Backscatter Ultraviolet Instrument
SEVIRI	- Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
<i>sza</i>	- ângulo zenital solar
TOA	- Topo da Atmosfera
TOMS	- Total ozone Mapping Spectrometer
UNCED	- United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	- United Nations Environment Programme
UV	- Ultravioleta
UVA	- Ultravioleta A
UVB	- Ultravioleta B
UVC	- Ultravioleta C
UVE	- Ultravioleta Eritêmica
UVGAME	- UltraViolet Global Atmospheric Model
UVSIM	- Ultraviolet Simplified Model
UVSIM_PAR	- UVSIM parametrização
UVSIM_OPER	- UVSIM operação
USP	- Universidade de São Paulo
VIS	- Visível
WHO	- World Health Organization
ω	- albedo simples
β	- coeficiente de extinção
β_e	- coeficiente de espalhamento
β_a	- coeficiente de absorção
σ	- seção de choque eficaz de extinção
τ	- Profundidade Óptica

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação e Justificativa	1
1.2. Objetivos.....	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1. Interação da radiação UV na Atmosfera.....	5
2.2. Propriedades ópticas dos gases e das nuvens no espectro UV	11
2.3. Fatores importantes na variação da radiação UV	15
2.4. Relação entre Radiação UV, Saúde Humana e Meteorologia	17
2.5. Índice Ultravioleta (IUV)	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4 DADOS E METODOLOGIA.....	27
4.1. Dados	27
4.2. Metodologia.....	36
4.2.1. Seleção e Análise da Qualidade do conjunto de dados.....	36
4.2.2. Impacto dos parâmetros meteorológicos na radiação UV	39
4.2.3. Adaptação da técnica CMF empregando informações de Satélites	42
4.2.4. Avaliação do produto IUV estimado na DSA/CPTEC	44
4.3. Modelos de Transferência Radiativa (TR)	45
4.3.1. SBDART.....	45
4.3.2. UVSIM.....	46
5 TESTES DE SENSIBILIDADE DOS EFEITOS DOS GASES, AEROSSÓIS E NUVENS NA RADIAÇÃO UV.....	51
5.1. Efeitos dos gases atmosféricos	51
5.2. Efeitos dos Aerossóis Atmosféricos	56
5.3. Impacto de Nuvens	58
6 ESTUDO DA RELAÇÃO EMPÍRICA ENTRE A RADIAÇÃO UV E A NEBULOSIDADE	63
6.1. Estudo Teórico.....	63
6.2. Estudo Observacional: Relação entre CMF e a Refletância no TOA.....	65

6.2.1. Análise da variação temporal de Refletância dos satélites GOES e observações de IUV.....	65
6.2.2. Relação entre CMF e a Refletância do Satélite GOES.....	70
6.3. Validação do IUV nas condições de céu claro e com nuvens.....	73
7 CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa visa compreender os processos físicos atmosféricos responsáveis pela atenuação da radiação ultravioleta incidente à superfície, assim como avaliar as estimativas do *Índice Ultravioleta* geradas no CPTEC. O presente capítulo apresenta as motivações e os objetivos do estudo, bem como a estrutura da dissertação.

1.1. Motivação e Justificativa

A radiação ultravioleta (UV) incidente à superfície, tema desta dissertação, tem papel fundamental nos seres humanos e nos ecossistemas terrestres e marinhos (PAUL et al., 1997; BJÖRN et al., 1999; HÄDER, 2000; CALDWELL et al., 2003; DIFFEY, 2004).

A radiação UV é importante na síntese de vitamina D, porém a exposição excessiva tem sido identificada globalmente como uma das principais causas do acréscimo nas taxas de câncer de pele (YOUL et al., 2006; RIEDER et al., 2010). Essa tendência também é observada no Brasil, conforme as estatísticas anuais divulgadas pelo Instituto Nacional de Câncer – José Alencar Gomes da Silva (INCA). Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), a mudança no comportamento e no estilo de vida pode reduzir essa tendência, como também, a conscientização da população sobre o tema é a ferramenta preventiva mais eficiente no combate de câncer de pele e de outras doenças associadas à exposição solar. Sendo assim, a OMS recomenda que os governos programem ações, a fim de informar e sensibilizar a população a respeito da temática. Entre as ações, destaca-se a divulgação do Índice Ultravioleta (IUV) através dos meios de comunicação. Esse índice é uma variável de padrão internacional que indica o grau de severidade da radiação solar em causar efeitos adversos à saúde humana (WHO, 2003).

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) incentiva a divulgação do IUV juntamente com as informações diárias da previsão de tempo. Assim como a temperatura e a precipitação, o IUV também tem o potencial de ser uma variável meteorológica relevante no planejamento da vida cotidiana.

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) divulga diariamente, em sua página eletrônica da previsão de tempo <<http://www.cptec.inpe.br/cidades/tempo/>>, o IUV para cada um dos municípios brasileiros nas condições de céu claro e com nuvens. O IUV gerado no CPTEC é utilizado por outras instituições, tais como EPAGRI/CIRAM, CEMTEC/MS, MASTER/USP e TV Vanguarda (emissora afiliada da Rede Globo na região do Vale do Paraíba - SP). Tal variável é estimada através do modelo UVSIM – *UltraViolet SImplified Model* – (CORRÊA, 2004) e utiliza dados auxiliares de conteúdo total de ozônio (O₃) e tipo de nuvem, provenientes de reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e satélites, respectivamente.

Corrêa (2004) validou o modelo UVSIM por meio de intercomparações com um modelo mais robusto, **UVGAME** – *UltraViolet Global Atmospheric Model*, mostrando que o UVSIM é teoricamente apto à estimar valores de IUV nas condições de céu claro e baixo conteúdo de aerossol. Adicionalmente, Costa et al. (2010) realizaram uma avaliação preliminar do UVSIM através de suas estimativas com os dados observados, encontrando um coeficiente de determinação $r^2 = 0,79$. Ambos os trabalhos apontam a necessidade de estudos mais detalhados sobre análise do desempenho do modelo para diferentes condições de nebulosidade. Portanto, este estudo visa dar continuidade à avaliação do UVSIM, tendo as seguintes perguntas formuladas:

- 1) Qual é a precisão do modelo UVSIM na estimativa do IUV para as condições de céu claro e com nuvens?
- 2) Quais os impactos do oxigênio (O₂) e O₃ (gases), espalhamento *Rayleigh* e aerossóis atmosféricos nas intensidades da radiação UV incidente à superfície?
- 3) Qual é o efeito dos diferentes tipos de nuvens na radiação UV?

1.2. Objetivos

Considerando as questões acima, os objetivos principais desta pesquisa são: *i*) avaliar as incertezas das estimativas de IUV do CPTEC, *ii*) estudar o impacto dos gases, aerossóis e nuvens na radiação UV, e *iii*) parametrizar o impacto da nebulosidade na estimativa do IUV utilizando dados de sensoriamento remoto.

Os objetivos específicos são:

- Estudar a influência da concentração total de O₃, dos aerossóis e das nuvens nas estimativas da radiação UV, através de testes de sensibilidade;
- Avaliar o modelo UVSIM através de comparações das estimativas de IUV com observações à superfície;
- Avaliar metodologias que estimam o efeito de nuvens no IUV através da combinação de medidas à superfície e informações de nebulosidade derivadas de satélites.

A presente dissertação é dividida em cinco capítulos: Fundamentação Teórica, Revisão Bibliográfica, Dados e Metodologia, Resultados e Conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, uma breve descrição dos processos de transferência radiativa no espectro do UV é introduzida, por ser informação relevante no âmbito da análise física e na avaliação dos resultados gerados no presente estudo.

2.1. Interação da radiação UV na Atmosfera

A radiação solar é a energia radiante emitida pelo Sol e transmitida na forma de ondas eletromagnéticas que se propagam com a velocidade da luz no vácuo (LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006). O espectro de radiação solar pode ser classificado por meio de intervalos de comprimentos de onda (λ) que compreendem raios-x e gama, UV, visível (VIS), infravermelho e micro-ondas.

Em particular, a radiação UV corresponde a aproximadamente 8% da radiação solar que incide no topo da atmosfera (FREDERICK et al., 1989; AMBACH et al., 1993) e se encontra no intervalo espectral entre 100 e 400 *nm* com três subdivisões (UVC, UVB e UVA). Na literatura não há uma única definição sobre os intervalos espectrais que as delimitam, especialmente na região de fronteira entre UVA e UVB, como mostra a **Tabela 2.1**. Neste trabalho são empregados os intervalos definidos pela “Comissão Internacional sobre Proteção contra Radiações Não-Ionizantes” (ICNIRP, 2007), os quais são recomendados pela OMS em estudos na temática de radiação UV e saúde humana (WHO, 2003).

Tabela 2.1 - Intervalos espectrais da radiação UV decomposta em três subdivisões: UVC, UVB e UVA

Nomenclatura	Chou e Lee (1996)	ICNIRP (2007) (adotada neste estudo)
UVC	100 – 280 <i>nm</i>	100 – 280 <i>nm</i>
UVB	280 – 320 <i>nm</i>	280 – 315 <i>nm</i>
UVA	320 – 400 <i>nm</i>	315 – 400 <i>nm</i>

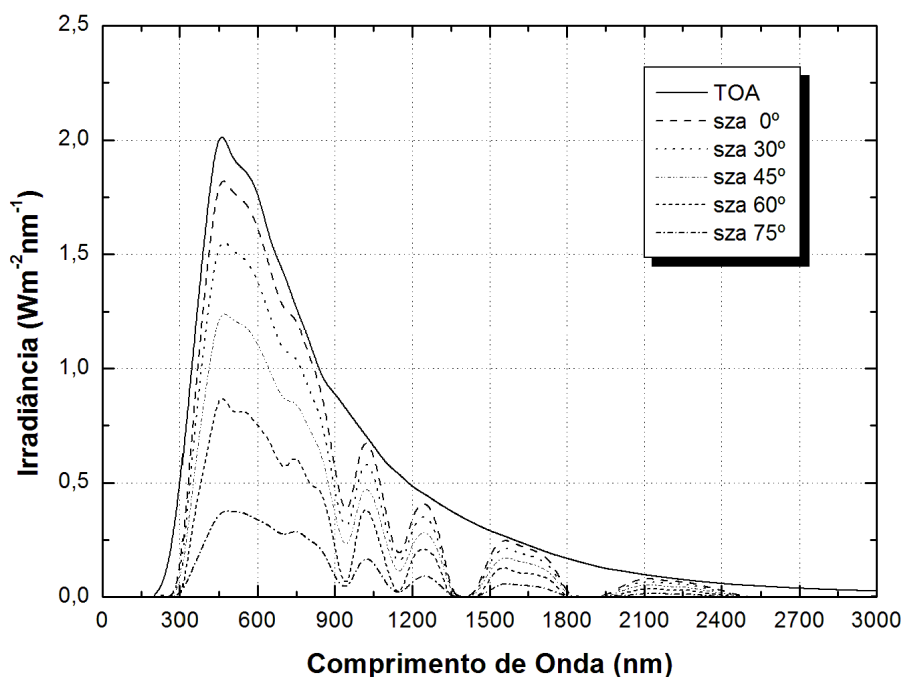


Figura 2.1 – Irradiância solar espectral estimada através do SBDART para o topo da atmosfera (TOA) e à superfície em diferentes ângulos zenitais (*sza*). As estimativas foram realizadas para uma atmosfera padrão de regiões tropicais com concentração total de ozônio de 300 DU.

A **Figura 2.1** mostra o espectro da irradiância solar incidente no topo da atmosfera (TOA) e à superfície para diferentes ângulos zenitais (*sza*). A irradiância solar no **TOA** (**Fig. 2.1**, linha contínua) apresenta valores espectralmente similares à radiação emitida por um corpo negro com temperatura de 5500K, mas com intensidade reduzida pela distância Terra-Sol. Parte da irradiância incidente é refletida para o espaço e o restante (**Fig. 2.1**, linhas pontilhadas) propaga-se pela atmosfera até a superfície, podendo ser atenuada através dos processos de absorção e/ou espalhamento. Considerando uma atmosfera estratificada em camadas plano-paralelas, a irradiância solar global descendente à superfície $E_{GL}(\lambda)$ pode ser descrita em termos das componentes direta $E_{DIR}(\lambda)$ e difusa $E_{DIF}(\lambda)$:

$$E_{GL}(\lambda) = E_{DIR}(\lambda) * \cos(\theta_o) + E_{DIF}(\lambda), \quad \text{Equação 2.1}$$

A **componente Direta** $E_{DIR}(\lambda)$ é a radiação transmitida na direção do feixe incidente e sua formulação matemática é descrita pela Lei de Beer:

$$E_{DIR}(\lambda) = S_o(\lambda) \exp\left[\frac{-\tau(\lambda)}{\mu_o}\right], \quad \text{Equação 2.2}$$

em que $S_o(\lambda)$ é a irradiância extraterrestre incidente no **TOA** (**Fig. 2.1**, linha contínua) e $\mu_o = \cos\theta_o$ é o cosseno do ângulo zenital. $\tau(\lambda)$ é a profundidade óptica total da camada atmosférica descrita pela soma das $\tau(\lambda)$ dos constituintes opticamente ativos na região espectral de interesse. Na radiação UV, $\tau(\lambda) = \tau_{Ray}(\lambda) + \tau_{O_3}(\lambda) + \tau_{aer}(\lambda) + \tau_{nuvens}(\lambda)$. Sendo $\tau_{Ray}(\lambda)$, $\tau_{O_3}(\lambda)$, $\tau_{aer}(\lambda)$ e $\tau_{nuvens}(\lambda)$ correspondentes às profundidades ópticas associadas ao espalhamento *Rayleigh*, absorção do O_3 , espalhamento/absorção pelos aerossóis e nuvens, respectivamente.

A **componente Difusa** $E_{DIF}(\lambda)$ é a radiação espalhada por moléculas e/ou partículas presentes na atmosfera. A distribuição espacial para uma atmosfera opticamente fina, ou seja, valores relativamente pequenos de τ , pode ser descrita pelas **radiâncias** $I_\lambda(\tau, -\mu, \varphi)$ que descrevem o efeito de uma única interação de fótons solares:

$$I_\lambda(\tau', -\mu_o, \varphi) = \frac{S_{o\lambda}}{4\pi\mu_o} \hat{\omega}_o(\lambda) \hat{p}(\lambda, \cos\Theta_o) \tau' e^{-\tau'/\mu_o}, \quad \text{Equação 2.3a}$$

$$I_\lambda(\tau', -\mu', \varphi) = \frac{S_{o\lambda}}{4\pi\mu'} e^{-\tau'/\mu'} \int_0^{\tau'} \omega_o(\lambda, \tau) e^{-\tau(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu'})} p(\lambda, \tau, \cos\Theta_o) d\tau, \quad \text{Equação 2.3b}$$

em que a primeira equação descreve a distribuição no almucântar solar (ângulos zenitais iguais ao do Sol, com cosseno μ_o), e a segunda para direções fora dele (YAMSOE, 2006; PETTY, 2004). A variável ω representa o albedo simples para dispersão, e $p(\lambda, \cos\Theta)$ a função de fase para ângulo de dispersão Θ dos raios solares. Note-se que mesmo se μ é constante o ângulo Θ deve mudar com a direção $(-\mu, \varphi)$ considerada (azimute φ variável). A irradiância $E_{DIF}(\lambda)$ é obtida mediante integração da radiância

sobre o hemisfério descendente. Este processo admite aproximações acuradas utilizando “métodos de dois fluxos” como o UVSIM, descrição na **Seção 4.3.2**.

No caso em que $\tau(\lambda)$ aumenta, o espalhamento múltiplo começa a predominar e, portanto, a radiação pode ser espalhada para outras direções no interior da camada atmosférica. Neste trabalho é avaliado, em maiores detalhes, o efeito do espalhamento (simple e múltiplo) na radiação UV por partículas de nuvens com distintos valores de $\tau_{nuvens}(\lambda)$.

Os parâmetros ópticos das **Equações 2.2** e **2.3** ($\tau(\lambda)$, $p(\lambda, \mu_0)$ e $\omega(\lambda)$) descrevem a atenuação da radiação incidente por partículas/moléculas atmosféricas (gases, aerossóis, gotas e cristais de gelo). A espessura óptica $\tau(\lambda)$ de uma camada atmosférica que espalha a radiação pode ser descrita através de (PETTY, 2004):

$$\tau(\lambda) = \int \beta(\lambda, s') ds', \quad \text{Equação 2.4}$$

em que $\beta(\lambda, s')$ representa o coeficiente de extinção na posição (s') do caminho óptico, sendo definido através da concentração numérica de partículas $N(s')$ e a seção de choque eficaz de extinção $\sigma(\lambda, s')$. O coeficiente de extinção pode ser decomposto pela soma dos coeficientes de espalhamento $\beta_e(\lambda, s')$ e absorção $\beta_a(\lambda, s')$, através:

$$\beta(\lambda, s') = \beta_e(\lambda, s') + \beta_a(\lambda, s'), \quad \text{Equação 2.5a}$$

$$\beta(\lambda, s') = \sigma(\lambda, s') N(s'), \quad \text{Equação 2.5b}$$

e $\sigma(\lambda, s')$ relaciona o fator de eficiência de extinção $Q_{ext}(x, n(\lambda, s'))$ e a seção transversal geométrica da partícula (πr^2) através:

$$\sigma(\lambda, s') = \pi r^2 Q_{ext}(x, n(\lambda, s')), \quad \text{Equação 2.6}$$

em que $n(\lambda, s')$ é o índice de refração complexo, e x é o número de Mie (parâmetro de tamanho), definido pela razão entre o tamanho da partícula espalhadora, dado pelo raio r , e o comprimento de onda da radiação incidente: $x = 2\pi r/\lambda$.

O albedo simples ($\omega(\lambda)$) de uma determinada partícula corresponde à fração de espalhamento em relação à atenuação, sendo:

$$\omega = \frac{\beta_e(\lambda, s')}{\beta(\lambda, s')}, \quad \text{Equação 2.7}$$

Partículas não espalhadoras da radiação apresentam $\omega = 0$, e partículas que apenas espalham, $\omega = 1$.

A função de fase $p(\lambda, \mu)$ representa a distribuição angular do espalhamento e pode ser descrita pela probabilidade da radiação incidente ser distribuída em diferentes orientações (μ) ao redor da partícula.

Outra variável geralmente utilizada para descrever direção preferencial de espalhamento é o *parâmetro de assimetria* $g(\lambda)$, que varia de -1 a 1. Valor $g \gg 0$ indica que o espalhamento ocorre predominantemente na direção de propagação da radiação incidente, ou seja, espalhamento é basicamente frontal; $g \ll 0$, o espalhamento predominante ocorre na direção inversa à propagação da radiação, ou seja, a radiação é retroespalhada; e $g = 0$, o espalhamento é simétrico em relação ao eixo transversal da partícula.

Verifica-se que os parâmetros $g(\lambda)$, $\omega(\lambda)$ e $p(\lambda, \mu)$ dependem, entre outros fatores, do *número de Mie* (x). Na atmosfera terrestre, o espalhamento pode ser avaliado através de três modelos em termos de x :

- Espalhamento Rayleigh ou molecular: ocorre quando as partículas são muito menores que o comprimento de onda da radiação incidente ($r \ll \lambda \rightarrow x \ll 1$). A função de fase é simétrica na direção frontal e na retaguarda da partícula (**Fig. 2.2a**). A maioria do espalhamento *Rayleigh* na atmosfera ocorre entre o nível da superfície e 8 km (JENSEN et al., 2005; SOUZA et al., 2008; THALMEN et al., 2014). A profundidade *Rayleigh* é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação incidente ($\tau_{Ray}(\lambda) \propto 1/\lambda^4$). Este tipo de espalhamento apresenta forte dependência espectral, ou seja, quanto menor o comprimento de onda incidente, maior é a radiação atenuada pela molécula espalhadora, como o caso no UV e VIS;
- Espalhamento Mie: quando as partículas possuem tamanhos comparáveis ao comprimento de onda da radiação incidente ($r \sim \lambda$). A **Figura 2.2 (b e c)** exemplifica a função de fase desse espalhamento. Esse tipo de espalhamento é geralmente ocasionado por partículas de nuvens e aerossóis no VIS e infravermelho próximo;
- Espalhamento não seletivo ou espalhamento geométrico: descreve o espalhamento por partículas que possuem tamanhos muito maiores que os comprimentos de onda da radiação incidente ($r \gg \lambda \rightarrow x \gg 1$). A **Figura 2.2d** mostra que para $x \gg 1$, $Q_{ext} \sim 2$ e o espalhamento não depende de comprimento de onda. Cristais de gelo ($r > 30 \mu\text{m}$) e aerossóis de *moda grossa* (r entre $1 \mu\text{m}$ e $5 \mu\text{m}$) ocasionam esse tipo de espalhamento no UV e visível.

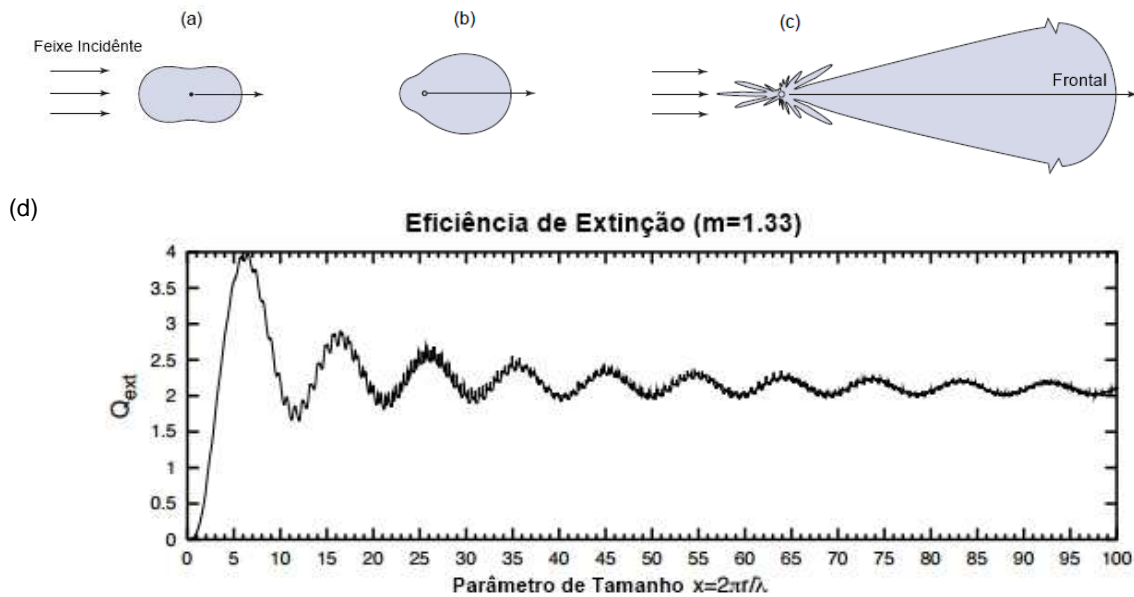


Figura 2.2 – Esquema da distribuição angular da radiação por partículas esféricas para *a*) $x \ll 1$, *b*) $x = 1$ e *c*) $x \gg 1$. *d*) Eficiência de extinção (Q_{ext}) em função do número de Mie para uma partícula não absorvedora com $m = 1,33$.

Fonte: Adaptado de Wallace; Hobbs (2006) e Petty (2004).

2.2. Propriedades ópticas dos gases e das nuvens no espectro UV

A **Figura 2.3** apresenta a distribuição espectral da seção de choque eficaz das bandas de absorção (σ_a) das moléculas de oxigênio (O_2) e O_3 . O O_2 apresenta forte absorção nos comprimentos de onda inferiores a 150 nm e fraca absorção na banda de Herzberg ($200 - 250 \text{ nm}$). Apesar da fraca absorção, esta banda é importante na formação da molécula de O_3 através do processo chamado fotodissociação (SCHINKE; MCBANE, 2010).

Por meio da fotodissociação, a molécula de O_2 absorve a radiação UV, principalmente nos comprimentos de onda $\lambda < 242 \text{ nm}$, e dissocia-se em dois átomos de oxigênio (O). Cada átomo de oxigênio reage com uma molécula de O_2 e outra molécula catalisadora disponível na atmosfera, denominada genericamente por M (O_2 ou N_2). Esta reação descreve a primeira parte do processo conhecido como “*Mecanismo de Chapman*”

(JACOBS, 1999; CORRÊA, 2003a) e resulta nas moléculas de O_3 e M , conforme o balanceamento químico abaixo.

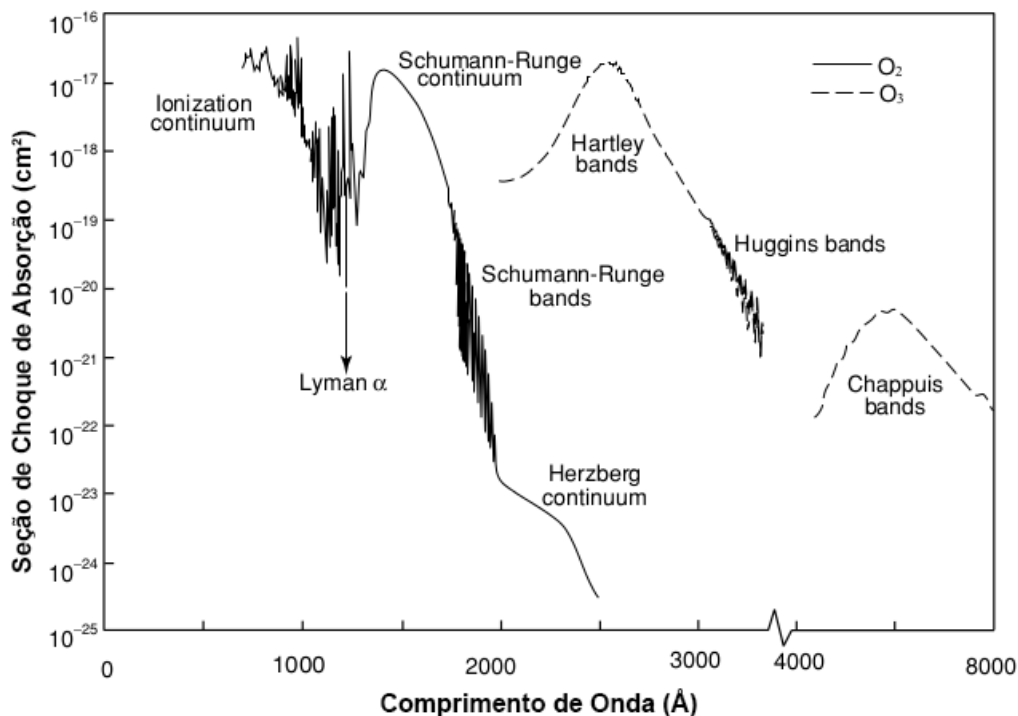


Figura 2.3 - Comportamento espectral da seção de choque de absorção (σ_a) para as moléculas de O_2 e O_3 . 1\AA equivale à $10^{-10} m$.

Fonte: Adaptado de Liou (2002).

A molécula de O_3 possui forte absorção principalmente entre 200 e 280 nm na banda de Hartley, e fraca para $\lambda > 280 nm$, nas bandas de Huggins e Chappuis (**Fig. 2.3**). Como resultado da sobreposição das bandas de absorção do O_2 e O_3 (*band overlap*) na região espectral com $\lambda < 250 nm$, a radiação é extinta na estratosfera.

O gás nitrogênio (N_2), embora seja a molécula em maior proporção na atmosfera (~78%), apresenta banda de absorção na radiação UV apenas nos comprimentos de onda inferiores a 200 nm (AJELHA, 1970). Quando o N_2 é oxidado origina-se o dióxido de nitrogênio (NO_2). Silva (2002) aponta que o NO_2 apresenta máxima absorção em 400

nm e sua seção de choque de absorção é maior que o O_3 , entretanto sua concentração é muito menor, resultando em pouca absorção da radiação.

As nuvens são outras componentes atmosféricas que atenuam a radiação solar, principalmente devido ao processo de espalhamento. A **Figura 2.4** mostra as propriedades ópticas em termos de comprimentos de onda para dois diferentes tipos de nuvens: nuvens baixas formadas por gotas de água (*a*) e nuvens altas formadas por partículas de gelo (*b*). Ressalta-se que a espessura óptica das nuvens baixas e altas consideradas correspondem à 4,7 e 2,2, respectivamente, ambas para $\lambda=0,6$.

Observa-se que os valores de g (*c*) e ω (*d*) são aproximadamente 0,8 e 1, respectivamente, nos espectros do UV e VIS. Estes parâmetros indicam que o espalhamento é majoritariamente para a direção frontal e a absorção por partículas das nuvens é praticamente nula. Os parâmetros ópticos são constantes com o comprimento de onda na região do UV e VIS, pois o tamanho das partículas de nuvens são maiores que o comprimento de onda.

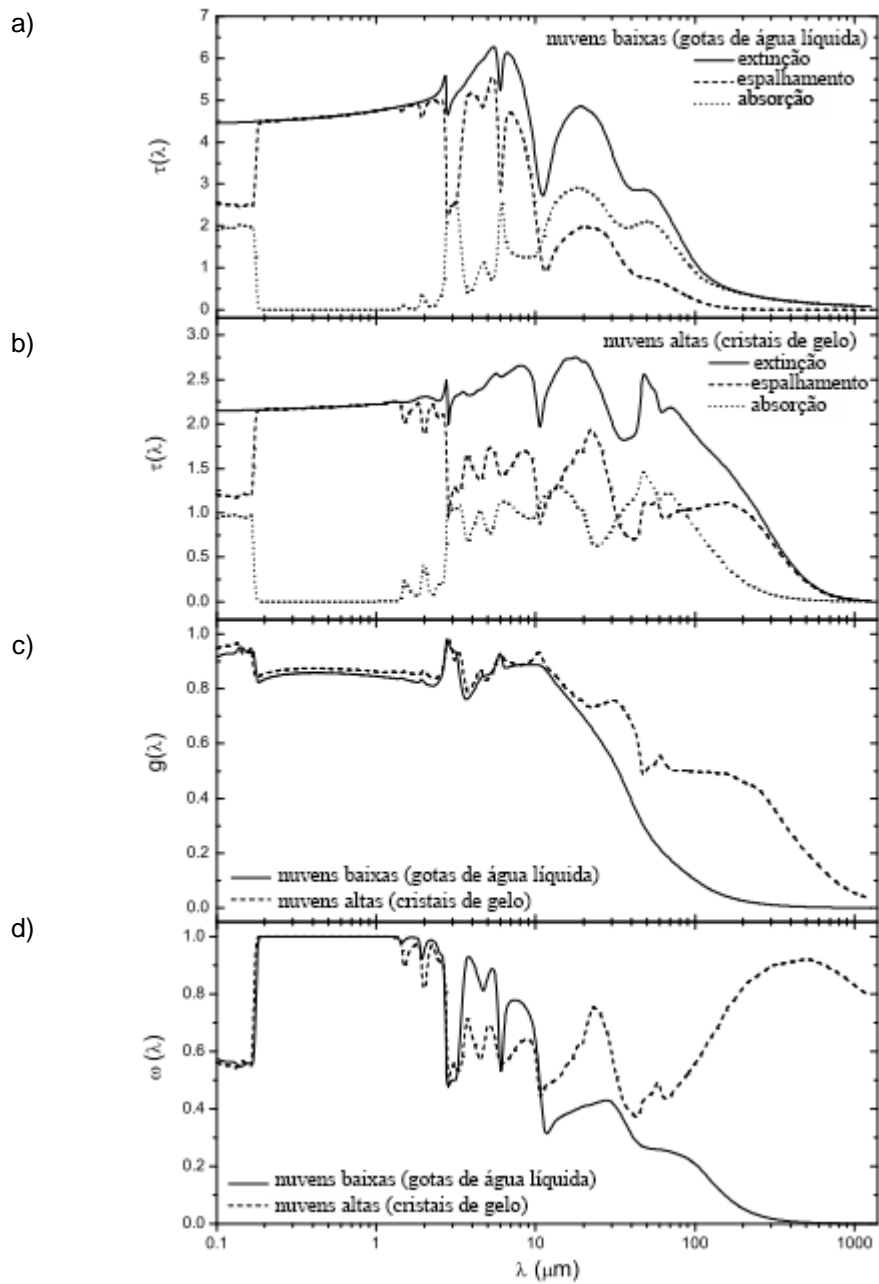


Figura 2.4 - Profundidade óptica de nuvens (linha contínua) com a contribuição individual de absorção e espalhamento (linhas tracejadas) para: *a)* nuvens baixas formadas por gotas de água líquida e *b)* nuvens altas formados por cristais de gelo. *c)* fator de assimetria e *d)* albedo simples.

Fonte: Adaptado de Kitzmann et al. (2010).

2.3. Fatores importantes na variação da radiação UV

Dentre as variáveis que modificam consideravelmente a incidência da radiação UV à superfície, a variação na **altura da superfície** resulta na diminuição da espessura óptica percorrida pelo feixe no espectro considerado. Assim, em altitudes maiores, a espessura óptica é menor, ocorrendo decréscimo da atenuação por conta dos constituintes atmosféricos, ou seja, a atenuação por conta do espalhamento *Rayleigh* diminui. Isto ocasiona maior intensidade da radiação à superfície. Estudos realizados na região dos Alpes Suíços indicam que a radiação UV aumenta aproximadamente 8% para cada 1000 metros de altitude (BLUMTHALER et al., 1997).

O **ângulo zenital** (θ), ângulo formado entre a posição do Sol e a vertical local, determina a espessura óptica $\tau(\lambda)$ a ser percorrida pela radiação. Tal espessura óptica diminui com a diminuição do ângulo zenital. Devido a esta dependência, a radiação UV varia de acordo com a latitude, estação do ano e hora do dia, sendo maior nos trópicos, no verão e ao meio dia solar.

Dependendo do **tipo de cobertura do solo**, a superfície pode refletir a radiação incidente. Segundo Chadyšiene e Girgždys (2008), superfícies compostas por água apresentam refletância no espectro UVB (UVB_{rs} ~5%) e UVA (UVA_{rs} ~7%), areia (UVB_{rs} ~13% - UVA_{rs} ~9%) e neve (UVB_{rs} ~88% - UVA_{rs} ~ 94%). Adicionalmente, Corrêa e Ceballos (2008) encontraram que superfícies compostas por gramas (verdes e amarelas) apresentam baixa refletância (UVB_{rs} < 1,1%), enquanto areia grossa molhada (UVB_{rs} ~2,4%) e areia grossa seca (UVB_{rs} ~ 4,2%) possuem refletância superior. Valores elevados de **refletância de superfícies** (r_s) aumentam a intensidade de energia UV disponível. Importante mencionar que praias, dependendo da condição e do tipo de areia, e pistas de esqui são exemplos de locais onde a superfície tem reflexão considerável na radiação UV, principalmente em dias com pouca nebulosidade.

A **concentração total de O₃** associada às propriedades ópticas de extinção determina a opacidade na camada atmosférica em relação à radiação UV. Na atmosfera, apresenta

variação vertical e sua maior concentração está localizada na parte inferior da estratosfera, entre 19 e 30 km acima da superfície, região conhecida como camada de O₃ (SIVASAKTHIVEL; REDDY, 2011). Dados inferidos por satélites indicam que a concentração média global do O₃ na coluna atmosférica é de, aproximadamente, 300 Unidades Dobson (DU)¹, com variações conforme a latitude e a sazonalidade (LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

A extinção da radiação UV ocasionada pelos **aerossóis** depende do seu tamanho e composição química. Estudo realizado por Kylling et al. (1998) em dois sítios na Grécia indica que os aerossóis produziram redução entre 5 e 35% no espectro UVB incidente à superfície, enquanto no UVA tal redução foi menor que 5%. Com relação à variabilidade da carga de aerossol em grandes cidades, Castanho (2005) encontrou que a τ_{550nm} (profundidade óptica em 550 nm) na região metropolitana de São Paulo (SP) tem valores de $\tau_{550nm} = 0,10$ no período de verão, $\tau_{550nm} = 0,20$ no inverno e máximo valor em $\tau_{550nm} = 0,30$ devido ao transporte dos particulados provenientes da intensificação das queimadas na Amazônia (**Figura 2.5**). A autora ressalta que valores extremos ($\tau_{550nm} = 3$) podem ocorrer através da combinação das queimadas com período de estiagem.

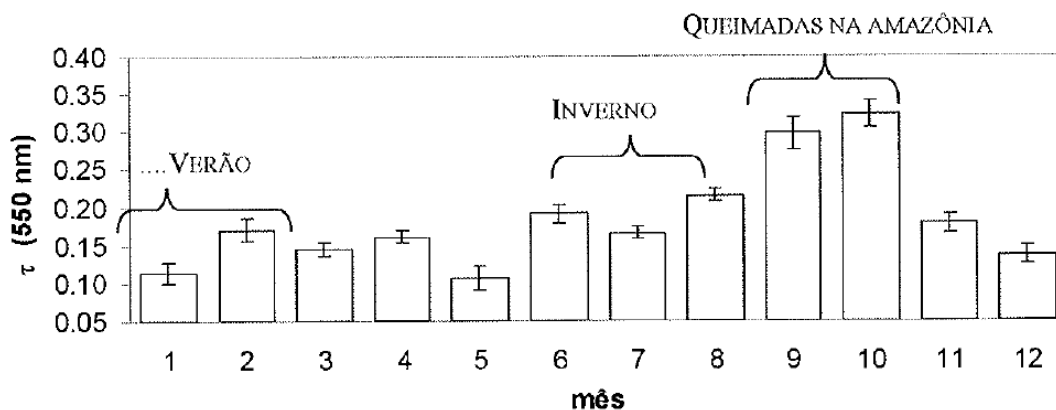


Figura 2.5 – Médias mensais da profundidade óptica do aerossol (τ_{550nm}) observadas na cidade de São Paulo (SP) no período entre 2003 e 2004.

Fonte: Castanho (2005).

¹ DU é uma medida de espessura vertical determinada em milésimos de centímetro para um único composto disperso na atmosférica quando compactado às condições normais de temperatura e pressão. DU é comumente utilizado para o ozônio, e $1DU = 10^{-3} \text{ atm.cm} \cong 2,69 \times 10^{16} \text{ moléculas/cm}^2$.

Resumidamente, a **variação temporal** da radiação UV na atmosfera depende principalmente de fatores astronômicos (movimentos de translação e rotação da Terra e atividade solar), enquanto que a distribuição espacial depende de fatores geográficos (latitude, altitude e albedo da superfície). A interação da radiação UV com os gases, aerossóis e nuvens são responsáveis pelas variações espaço-temporais de pequena escala. Neste contexto, o presente trabalho estuda os impactos destas componentes atmosféricas na transferência de radiação UV através de testes de sensibilidade.

2.4. Relação entre Radiação UV, Saúde Humana e Meteorologia

O objetivo deste trabalho não está associado ao impacto da radiação UV na saúde, porém uma breve descrição desta temática é apresentada para contextualizar o papel da meteorologia no monitoramento dos níveis de radiação UV.

O impacto da radiação UV é considerável, pois é um dos principais fatores atmosféricos causadores dos efeitos benéficos e nocivos à saúde humana (CORRÊA, 2003a). A radiação UV sintetiza a vitamina D, a qual tem a função de manter o metabolismo de cálcio no sangue (WEBB; HOLICK, 1988). Dentre os efeitos nocivos, ocasionados pela exposição em excesso à radiação UV, podem ser citados o eritema, envelhecimento precoce, imunossupressão, edema e lesões aos olhos, como cataratas e degeneração da mácula (DIFFEY, 1991; LINCOLN, 2012). A radiação UV também pode causar danos às células epiteliais, alterando a função imunológica e, até mesmo, lesionando o DNA. Pode ainda ocasionar o surgimento de cânceres de pele do tipo melanoma, os quais são mais agressivos porém menos frequentes, e não-melanoma, que representam a maioria dos casos e são de menor letalidade (NARAYANAN et al., 2010).

As estimativas das taxas de câncer de pele do tipo “não-melanoma” têm crescido globalmente a cada ano. No Brasil, o número de casos estimados no ano de 2002 foi 62 mil, aumentando para 134 mil em 2013 (KLIGERMAN, 2002; FACINA, 2011). Para o ano de 2014 (**Figura 2.6**), o INCA estimou em 182 mil os novos casos de câncer não-melanoma, seguidos de 69 mil de tumores de próstata, 57 mil de mama feminina, 33

mil de cólon e reto, 27 mil de pulmão, 20 mil de estômago e 15 mil no colo do útero (INCA, 2014). Observa-se que o câncer de pele é o mais expressivo, devido, principalmente, à falta de conhecimento da população em relação a esta problemática.

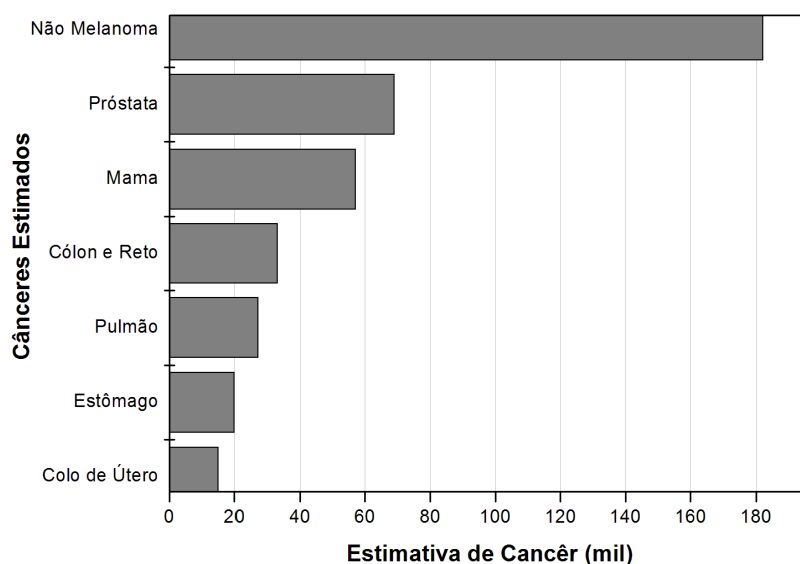


Figura 2.6 - Estimativas de câncer no Brasil para o ano de 2014, sendo o câncer de pele não-melanoma o mais expressivo.

Fonte: INCA (2014).

A OMS, em parceria com diversos programas e agências (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - UNEP, OMM, Agência Internacional de Pesquisas em Câncer - IARC e a ICNIRP), desenvolveu o projeto internacional chamado *INTERSUN* (WHO, 2003). O projeto, acordado na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) e aprovado no âmbito da “Agenda 21”, tem por objetivo elevar o conhecimento científico e social dos fatores que influenciam o surgimento de câncer de pele, tendo, assim, metas propostas, algumas das quais estão elencadas a seguir:

- i. Identificar e quantificar os riscos da radiação UV na saúde humana;

- ii. Desenvolver previsões confiáveis da radiação UV e metodologias para monitoramento do O₃ estratosférico;
- iii. Fornecer conselhos práticos e informações às autoridades nacionais de saúde sobre os níveis de radiação UV e informar medidas de proteção ao público geral (trabalhadores, turistas etc.) através dos meios de comunicação;
- iv. Desenvolver campanhas educacionais nas escolas, promovendo o índice UV como ferramenta de apoio.

Nos itens citados, a meteorologia tem papel fundamental, principalmente no monitoramento de radiação UV e da concentração total de O₃, assim como informar à população sobre o IUV. Detalhes sobre estimativa deste índice são apresentados na **Seção 2.5**.

2.5. Índice Ultravioleta (IUV)

O IUV é determinado através de modelos computacionais, os quais consideram todos os processos físicos que ocorrem na transferência da radiação na atmosfera. Esses modelos estimam o IUV através da integral da irradiância monocromática solar incidente à superfície ($E_{GL}(\lambda)$ – $Wm^{-2}nm^{-1}$ – **Equação 2.9**), ponderada pelo espectro de ação eritêmica $\epsilon_{(\lambda)}$ no intervalo espectral de 280 a 400 nm, padronizado pelo fator de conversão (C) que corresponde a 40 W/m² (WILSON, 1993 apud LONG et al., 1996). No Brasil, em específico no CPTEC, o UVSIM é o modelo computacional que realiza as estimativas de IUV para todo o território nacional. A descrição em detalhes do UVSIM encontra-se no **Capítulo 4**.

$$IUV = C \int_{280nm}^{400nm} E_{GL}(\lambda) \epsilon_{(\lambda)} d\lambda \quad \text{Equação 2.9}$$

O $E_{GL}(\lambda)$ é determinado por meio da consideração dos processos físicos existentes na transferência da radiação UV, conforme descrito anteriormente. Por sua vez, o $\epsilon_{(\lambda)}$ é um fator medido em laboratório que indica a resposta de diferentes tipos de pele humana à

radiação UV e não é representativo para um tipo de pele apenas (LONG et al., 1996). As observações de McKinlay e Diffey (1987 apud CORRÊA, 2003a) de $\epsilon_{(\lambda)}$ são internacionalmente aceitas e recomendadas pelo OMM e OMS, sendo utilizadas neste estudo. A **Figura 2.7** apresenta a curva do $\epsilon_{(\lambda)}$ em termos dos comprimentos de onda medidos por McKinlay e Diffey (1987 apud CORRÊA, 2003a). Observa-se que, em menores comprimentos de onda, o $\epsilon_{(\lambda)}$ é mais representativo, expressando que nessa região espectral a radiação é mais nociva à pele humana. Para os cálculos de IUV, utilizam-se as seguintes formulações de $\epsilon_{(\lambda)}$:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{(\lambda)} &= 1,0 & 250nm < \lambda \leq 298nm \\
 \epsilon_{(\lambda)} &= 10^{0,094(298-\lambda)} & 298nm < \lambda \leq 328nm \\
 \epsilon_{(\lambda)} &= 10^{0,015(140-\lambda)} & 328nm < \lambda \leq 400nm
 \end{aligned}
 \tag{Equação 2.10}$$

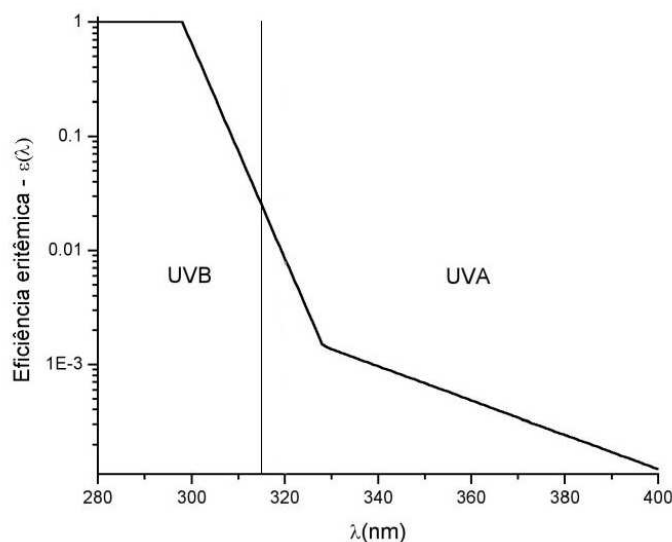


Figura 2.7 - Espectro de ação eritêmica utilizado pela OMS e OMM.
 Fonte: Corrêa (2003a), adaptado de McKinlay; Diffey (1987).

Na divulgação, o valor de IUV gerado a partir da **Equação 2.9** é arredondado para o número inteiro mais próximo e pode variar de 1 à valores maiores que 11. Estes índices são ainda agrupados em categorias de intensidades (baixo, moderado, alto, muito alto e extremo), conforme limiares mostrados na **Tabela 2.2**. Valores de IUV elevados correspondem aos maiores cuidados em relação à exposição solar.

Tabela 2.2- Categorias do IUUV.

CATEGORIA	ÍNDICE ULTRAVIOLETA
BAIXO	< 2
MODERADO	3 a 5
ALTO	6 a 7
MUITO ALTO	8 a 10
EXTREMO	> 11

Fonte: CPTEC (2014)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O monitoramento e a estimativa da radiação UV é imprescindível para alertar a população quanto ao aumento da incidência à superfície, devido às importâncias apontadas nos capítulos anteriores. Assim, há, em diversos países, trabalhos que descrevem a sazonalidade desta variável, bem como validações das inferências dos sensores a bordo de satélites e desenvolvimento de modelos estimativos.

Existem diversos métodos propostos para estimar valores de IUV a partir de dados de O_3 medidos à superfície ou inferidos via sensoriamento remoto (HERMAN et al., 1999). Os métodos de estimativa de radiação podem ser classificados em dois grupos. O primeiro é baseado na análise de regressão, onde a radiação UV é parametrizada em termos de outras variáveis observadas (ALLAART et al., 2004; BERTAGNOLLI et al., 2007). A exemplo, o modelo proposto por Allaart et al. (2004), que relaciona empiricamente o IUV de céu claro com o ângulo zenital e a concentração total de O_3 , apresentou incertezas de 8% associadas aos erros observacionais da concentração de O_3 . Modelos empíricos são computacionalmente simples, porém geralmente aplicáveis apenas para as localidades em que foram calibrados.

O segundo método, baseado em processos físicos, descreve a interação radiação/sistema terrestre através da solução da equação de transferência radiativa (LONG et al., 1996; LEMUS-DESCHAMPS; RIKUS, 1999; CORRÊA, 2004). O modelo de estimativa do IUV, o qual tem por objetivo ser validado neste trabalho, é um exemplo deste método. Ao contrário dos métodos empíricos, os modelos físicos podem ser empregados em diferentes localidades.

Também, a técnica de sensoriamento remoto é uma importante alternativa no monitoramento das variáveis (radiação UV e concentração total de O_3). Os produtos derivados de sensores a bordo de satélites devem ser validados com medidas à superfície (BUCHARD et al., 2008). Esta validação é necessária, visto que dados de

satélite são afetados por erros instrumentais e pelas incertezas associadas aos métodos de inferência (BERNHARD; SECKMEYER, 1999).

Avaliações da concentração total de O_3 derivada do sensor TOMS foram constantemente realizadas por diversos estudos em diferentes localidades, indicando que suas estimativas são acuradas, tendo erros inferiores a 5% para céu claro (KALLISKOTA et al., 2000; KAZANTZIDIS et al., 2006). Este resultado concorda com aqueles encontrados por Buchard et al. (2008) e Levelt et al. (2002), ambos para o sensor OMI, sucessor do TOMS.

No Brasil, Porfírio et al. (2012) monitoraram a irradiância UV (290 a 400 nm, parte do UVB e UVA) na cidade de Maceió (Alagoas) no ano de 2008. A avaliação da incidência foi realizada para três condições determinadas através da transmitância atmosférica global (K_T). O K_T foi obtido pela razão entre a irradiância global e irradiância extraterrestre, ambas à superfície. A irradiância extraterrestre foi calculada pela constante solar (1367 W/m^2) e variações da distância Terra-Sol e ângulo zenital. O valor máximo observado em condição de céu claro ($K_T \leq 0,3$) no período seco foi de $33,6 \text{ W/m}^2$, enquanto na estação chuvosa $22,9 \text{ W/m}^2$. Em condição parcialmente nublada ($0,3 \geq K_T \geq 0,7$), as maiores incidências no período seco e na estação chuvosa foram de $37,8 \text{ W/m}^2$ e $28,2 \text{ W/m}^2$, respectivamente. Os autores observaram que os máximos valores foram maiores que aqueles monitorados na condição de céu claro. Em condição totalmente nublada ($K_T \geq 0,7$) a incidência máxima foi de aproximadamente 25 W/m^2 no período seco e aproximadamente 15 W/m^2 no período chuvoso.

A incidência da radiação UVB eritêmica foi objeto de estudo de Kirchhoff et al. (2000), os quais realizaram observações nas cidades de Blumenau (SC), Cachoeira Paulista (SP), Campo Grande (MS), Natal (RN), Porto Alegre (RS), Ribeirão Preto (SP) e, ainda, compararam os resultados com medidas de La Paz (Bolívia) e Punta Arenas (Chile). Utilizando uma rede de biômetros operada pelo INPE, a sazonalidade dessas cidades foi acompanhada. Assim, calculando-se o IUV das respectivas cidades, observaram grande variabilidade espacial e sazonal, tendo os maiores valores em La Paz, Campo Grande e

Natal. Dentre os fatores responsáveis por essas diferenças, estão associados a variação temporal e a concentração total de O₃, conforme apresentados na **Seção 2.3**.

Por outro lado, no período entre 2005 e 2008, Corrêa e Ceballos (2010) observaram os níveis de IUV na cidade de São Paulo. Os resultados indicaram que 65% dos IUV medidos em torno de 2 horas do meio dia solar correspondem às categorias de “Muito Alto” e “Extremo” durante o verão (**Tabela 2.3**), enquanto 40% dos casos eram “Alto” e “Muito alto” no inverno. Isto mostra que mesmo no inverno, os cuidados quanto à exposição solar devem ser tomados.

Como já dito, modelos computacionais são ferramentas importantes nas estimativas do IUV para extensa região. Nesse sentido, Corrêa (2004) propôs um modelo físico de transferência radiativa, conhecido como UVSIM – *UltraViolet SIMplified Model*, baseado em métodos de dois fluxos (**Seção 4.3.2**). A fim de mensurar a concordância das estimativas do UVSIM com as observações à superfície, Costa et al. (2010) utilizaram dados monitorados na cidade de São Paulo (SP) durante o ano de 2006. Os resultados apresentam $r^2 = 0,79$. No entanto, os autores indicam que estes resultados são preliminares e que investigações detalhadas do desempenho do modelo devem ser realizadas. Adicionalmente, eles sugerem a combinação de dados de satélite e dados observacionais à superfície para inferir o impacto dos diferentes tipos de nuvens no IUV.

De acordo com os indicativos descritos, as nuvens têm importante impacto na atenuação ou, até mesmo, no aumento da incidência à superfície da radiação UV. Neste contexto, a descrição dos impactos causados pelas nuvens é representada pelas informações do **CMF** – *Cloud Modification Factor*, onde aproximam as estimativas ao estado real de eventos com ocorrência de nebulosidade. Trabalhos realizados em outros países utilizam diferentes métodos e parametrizações na obtenção do CMF.

Através de estudos realizados na Suíça, Josefsson (1986) desenvolveu um modelo simples para determinar valores de CMF em três condições de tempo. A partir de três

observações diárias da quantidade de cobertura de nuvens N_d ⁽²⁾, sem discriminar os tipos de nuvens, o valor de 0,98 foi atribuído para condição de céu claro (caracterizada por cobertura menor que seis octas, $N_d < 6$), 0,84 para cobertura entre $6 < N_d \leq 18$ octas, e 0,5 para condição de cobertura de nuvens maior que 18 octas ($N_d \geq 18$). Por sua vez, em observações únicas na Austrália, Paltridge e Barton (1978) determinaram valores de 1,0 para condição de céu claro (zero octas), variação de 0,5 a 0,9 para cobertura de 6 octas e 0,2 para condição nublada.

A inclusão de mais informações na caracterização do CMF foi realizada por Blumthaler et al. (1994). Tipo e altura das nuvens, monitoramento da radiação UVA e radiação eritêmica (UVE) foram inclusos no novo método. Os autores notaram uma melhor representatividade, onde a média do CMF para condição nublada era de 0,7, na presença de nuvens médias esse valor reduzia a 0,65, enquanto que nuvens altas ficavam em 0,9. Este resultado sugere que nuvens altas possuem menor influência nos fluxos de radiação do UV. Rossow e Schiffer (1999) ressaltam a dificuldade na obtenção de informações mais detalhadas de nuvens (profundidade óptica, distribuição do tamanho da gota e medidas de alta resolução) para determinado sítio de estudo. Por isto, muitas parametrizações são realizadas, a fim de atribuir conformidade física aos valores obtidos.

Até o presente momento nenhum estudo detalhado foi realizado com o objetivo de mensurar os reais valores do CMF no território brasileiro.

² N_d – corresponde ao somatório das três observações diárias de octas.

4 DADOS E METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta os dados, a metodologia e os modelos de transferência radiativa (UVSIM e SBDART) empregados no âmbito desta pesquisa.

4.1. Dados

A área de estudo está centrada na localização geográfica do instrumento de radiação UV (23,56 °S, 46,73 °W, 865 m altitude – **Figura 4.1**) instalado na **Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**, Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP). O estudo compreende o período entre Junho/2005 e Maio/2009. O conjunto de dados utilizado neste estudo provém de diferentes fontes: observações à superfície, modelagem numérica da transferência radiativa e sensoriamento remoto. A **Tabela 4.1** apresenta algumas especificações do conjunto de dados utilizados no âmbito deste estudo.

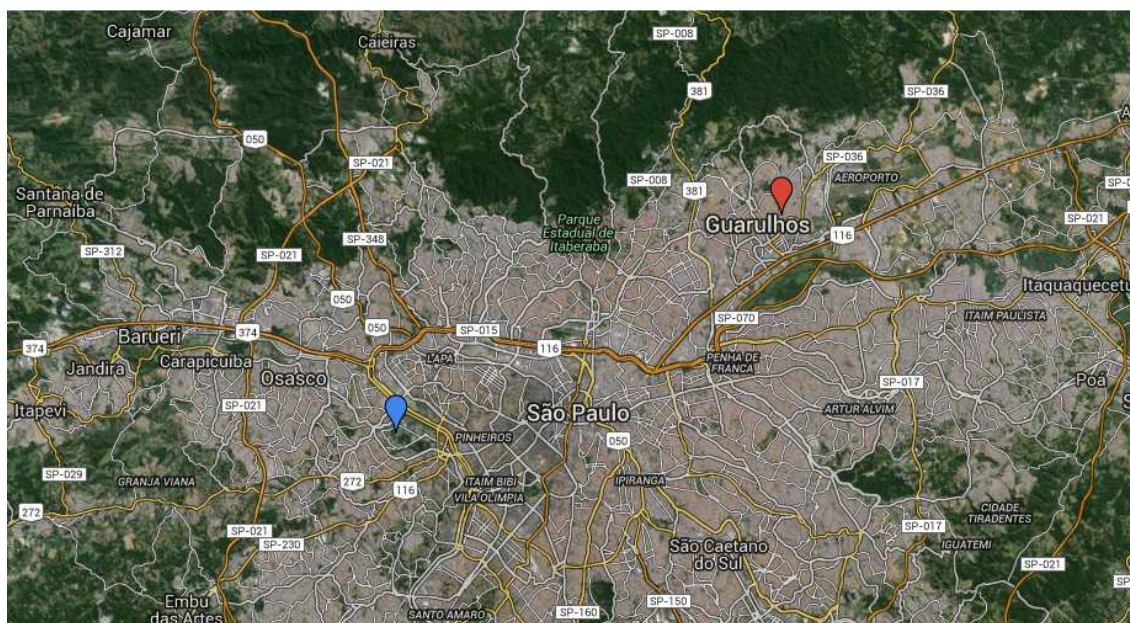


Figura 4.1 - Localização dos instrumentos que monitoraram os dados utilizados neste trabalho: IUV (projeto FAPESP, azul), profundidade óptica do aerossol (AERONET, azul) e a UVA (CETESB, vermelho).

Fonte: Google Maps. Acesso: 06 de Outubro de 2015 às 18h21.

Tabela 4.1– Especificações do conjunto de dados utilizados neste trabalho.

	Variáveis (grandezas)	Instrumentos/modelos	Fonte de dados	Resolução (Temporal/Espacial)	Período de dados
Observações à superfície	$IUV_{observado}$ (<i>adimensional</i>)	<i>Biômetro Solar Ligh.</i>	Projeto FAPESP (2004/00937-3)	10 min.	Ago/2005 à Mai/2009
	UVA (W/m ²)	Fotômetro solar	CETESB	Médias horárias	Desde Fev/2012
	Profundidade óptica do aerossol (τ_{aer})	Fotômetro solar CE318A	AERONET/NASA	10 min.	Nov/2000 à Jun/2011
Modelagem	$IUV_{céu\ claro}$ (<i>adimensional</i>)	UVSIM (CORRÊA, 2004)	DSA/CPTEC	30 min. e 4x4 km	Desde Ago/2005
Sensoriamento Remoto	Tipo de Nuvens	Classificador de Nuvens (BOTTINO; CEBALLOS, 2014)	DSA/CPTEC	30 min. e 4x4 km	2005 - Presente
	Refletância (R_{EF})	Imageador (canal 1) GOES-12 GOES-10	DSA/CPTEC	30 min. e 4x4 km	2000 à Mar/2007 Abr/2007 à 2009

Observações à superfície – Observações de IUV são originárias do projeto de pesquisa intitulado “*Estudo da influência de fatores atmosféricos e geográficos sobre os níveis de radiação ultravioleta em regiões de alta densidade populacional do Estado de São Paulo*”, (FAPESP #2004/00937-3). Esse projeto teve como um dos objetivos a aquisição do sensor *biômetro* – Solar Light Co., o qual monitora os $E_{GL}(\lambda)$ eritêmicos na banda UVB e UVA a cada segundo. Essa irradiância eritêmica foi multiplicada pelo fator 40 para transformar no IUV, sendo representados pelas médias nos intervalos de 10 minutos. O instrumento, montado em um prédio sem obstrução do campo de visada e constantemente calibrado (CORRÊA; CEBALLOS, 2010), operou de Junho/2005 a Maio/2009.

A **Figura 4.2** mostra o diagrama tipo *boxplot* das observações de IUV para diferentes horários (10h00-11h50, 12h00-13h50, 14h00-15h50, 16h00-17h50 e 18h00-19h50 UTC). Nos horários de menores ângulos zenitais (*sza*), observa-se um número menor de extremos estatísticos, possivelmente devido à diminuição da espessura óptica da camada atmosférica com menor produção de radiação difusa. Nenhuma análise foi realizada para entender essa característica, mas é sugerido que parte deve-se à precisão instrumental, que pode ser menor para valores maiores de *sza* (aceitável até 70°). Para melhor descrição é sugerido que trabalhos futuros avaliem esses casos individualmente, pois este trabalho não visa analisar casos extremos.

De modo geral, a maior incidência da radiação UV ocorre no verão e no período próximo ao meio dia local. Entre 14h00-15h50 UTC, metade dos dados (indicado pela mediana) em cada mês apresentam valores de IUV referentes às categorias de “Moderado” e “Muito Alto” no inverno, chegando à “Extremo” no verão. Nos três períodos de maior intensidade é observada a variação solar anual. Possíveis mudanças dessa variação podem estar associadas à presença de nuvens. As observações apontadas sobre os níveis de incidência do IUV ressaltam a importância dos cuidados apresentados na **Seção 2.5**.

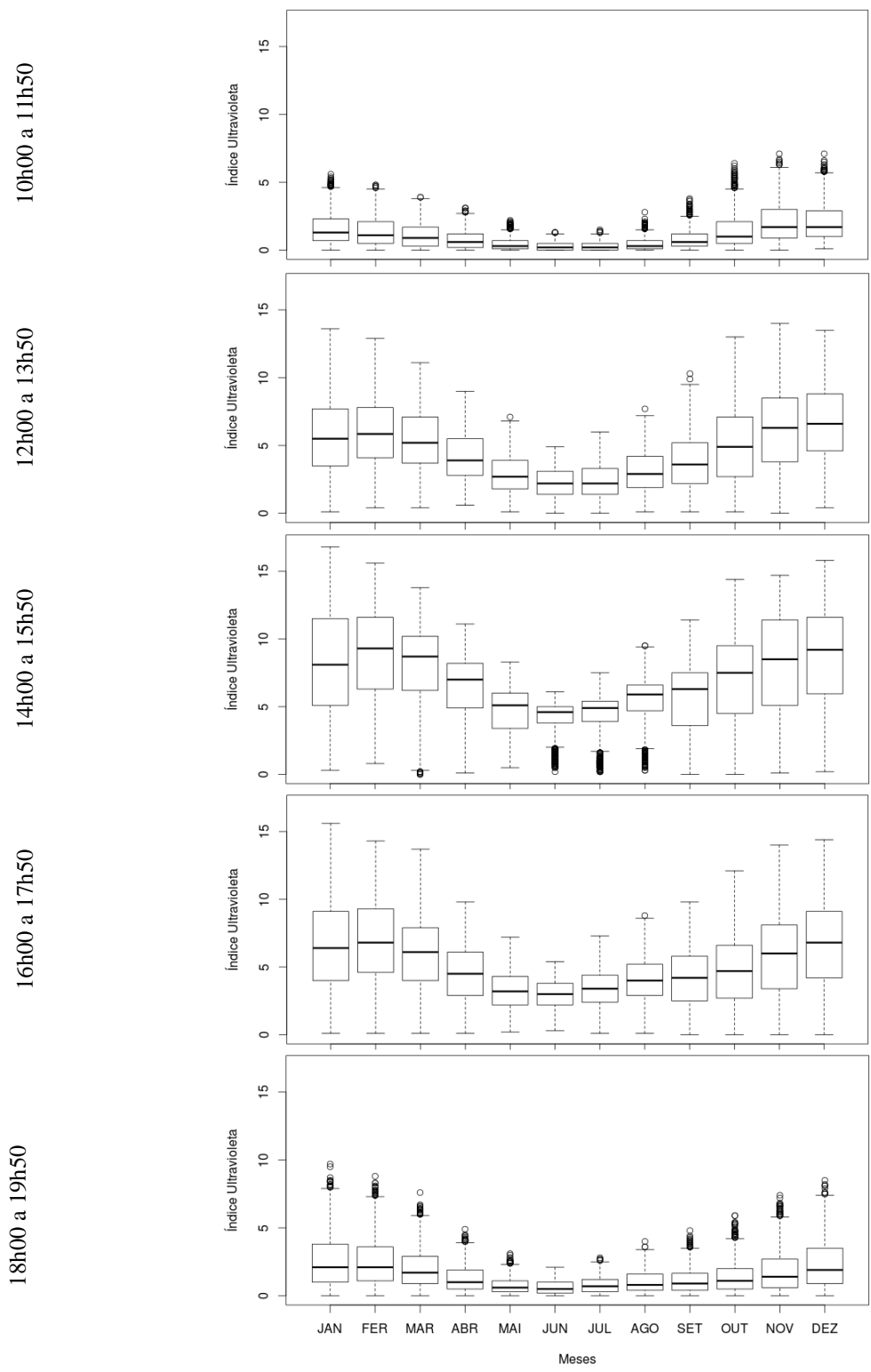


Figura 4.2 - *Boxplot* das incidências do IUUV na cidade de São Paulo para diferentes horários no período entre 2005 e 2009.

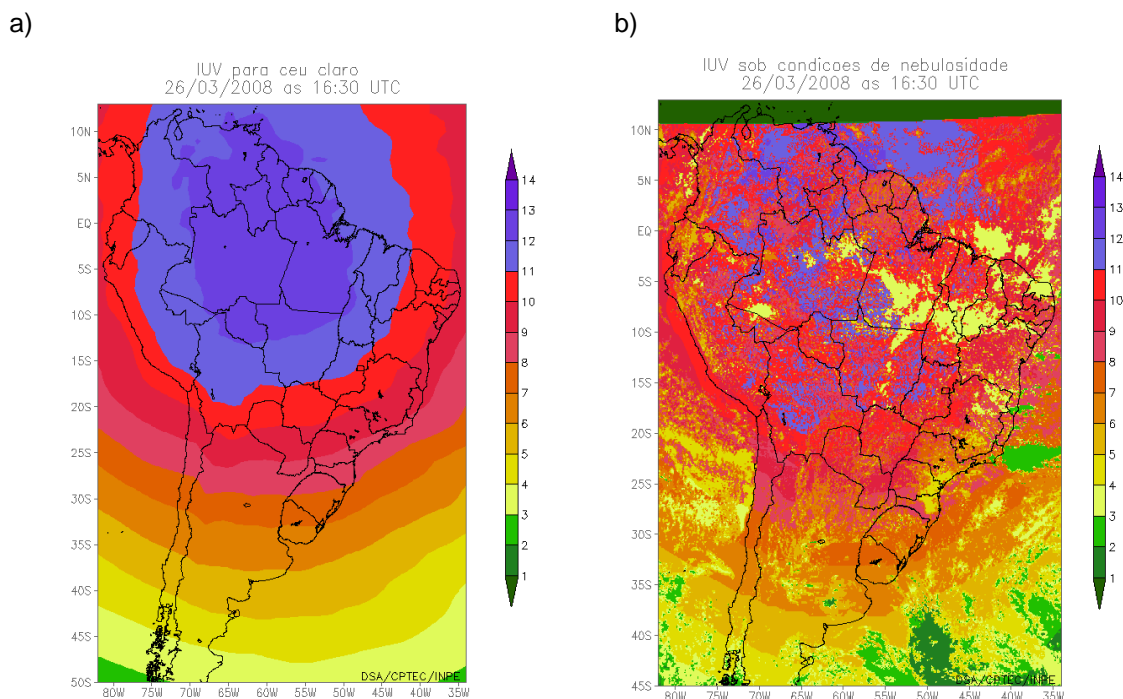
Adicionalmente, **medidas de fluxos UVA** proveniente da rede de estações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (**CETESB**) foram utilizadas, mais especificamente, as da estação radiométrica localizada no Paço-Municipal na cidade de Guarulhos (SP; 23,45 °S e 46,51 °W, **RMSP**). Essa estação monitora o UVA (W/m^2) com resolução temporal de 5 segundos, porém o banco de dados da CETESB apenas arquiva em seu sistema médias horárias. O monitoramento da R-UVA na estação é realizado desde Fevereiro de 2012.

Os dados de **profundidade óptica de aerossol em 550 nm** (τ_{aer}) são provenientes da rede de fotômetros operada pela Aerosol Robotic Network (**AERONET**), mais especificamente foi utilizado o fotômetro da estação localizada em São Paulo. O fotômetro esteve instalado na mesma coordenada geográfica das observações de IUUV na Cidade Universitária de São Paulo (23,56 °S, 46,74 °W), funcionando no período de Novembro de 2000 a Junho de 2011.

Modelagem numérica – Dados de **IUV** em condições de céu claro estimados pelo modelo UVSIM foram avaliados neste estudo. Esses índices apresentam resolução espacial de 4x4 km e temporal de 30 minutos. Os dados são provenientes do banco de dados da DSA/CPTEC e estão disponíveis desde Agosto de 2005. As **Figuras 4.3** ilustram as estimativas do IUUV para a América do Sul em condições de céu claro (*a*) e na presença de nebulosidade (*b*).

Sensoriamento remoto – Informação do **tipo de nuvem** é originário do produto denominado *Classificador de Nuvens*, o qual encontra-se operacional na DSA/CPTEC desde 2005. Este produto consiste na determinação de nuvens *cirrus*, *multicamadas* (referida neste trabalho de convectiva), *stratus* e *cúmulos*. A classificação se fundamenta na análise de componentes principais dos centroides determinados por 13 variáveis obtidas nos imageadores GOES. São elas: refletância (canal 1), temperatura de brilho (canal 2 a 5), diferenças dos canais de temperatura de brilho em relação ao canal 4 e análise da textura em cada canal por meio do logaritmo da variância de um conjunto de 3x3 elementos em torno do pixel central. Essa análise permitiu reduzir o número de

variáveis à apenas quatro: refletância, temperatura de brilho no canal 4 e textura em ambos os canais (BOTTINO; CEBALLOS, 2014). A **Figura 4.4** ilustra um exemplo do produto de classificação de nuvens para o mesmo dia e horário da **Fig. 4.3**.



Figuras 4.3 – Distribuição espacial do IUV sobre o continente sul americano estimada pelo modelo UVSIM nas condições de céu claro (a) e na presença de nebulosidade (b). A estimativa de IUV em condições de nebulosidade utiliza o IUV estimado para céu claro e pondera pelo parâmetro CMF (definido na Seção 4.2.3), de acordo com o tipo de nuvens indicado pelo produto *Classificador de Nuvens* (Figura 4.4).

Fonte: CPTEC (2015).

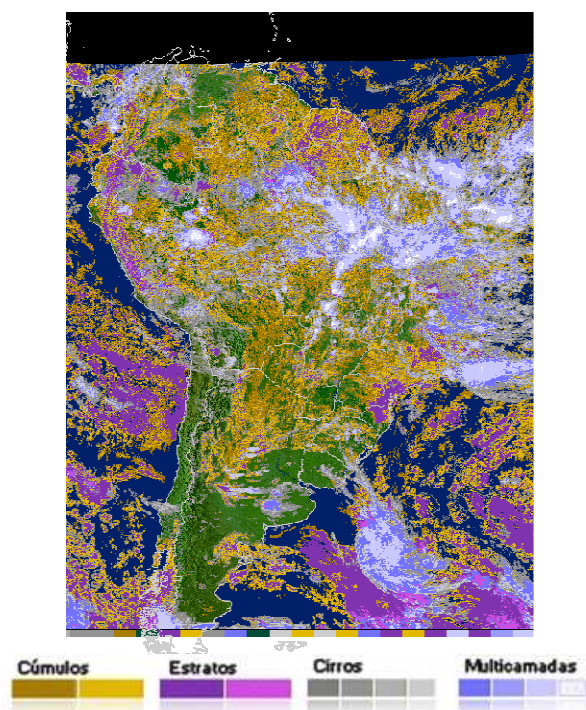


Figura 4.4 - Classificador de nuvens obtido por meio do satélite GOES-10 para o dia 26/03/2008 às 16h30 UTC, disponibilizado na página eletrônica da DSA/CPTEC.

Fonte: INPE. DSA (2014).

Informações de refletâncias do VIS são provenientes do canal 1 do imageador a bordo dos satélites **GOES-12** e **GOES-10**. A refletância (R_{EF}) de ambos os sensores possui resolução espacial de 4x4 km e temporal de 30 minutos. **Figuras 4.5** ilustram a distribuição espacial da refletância observada pelos satélites GOES-12 e GOES-10.

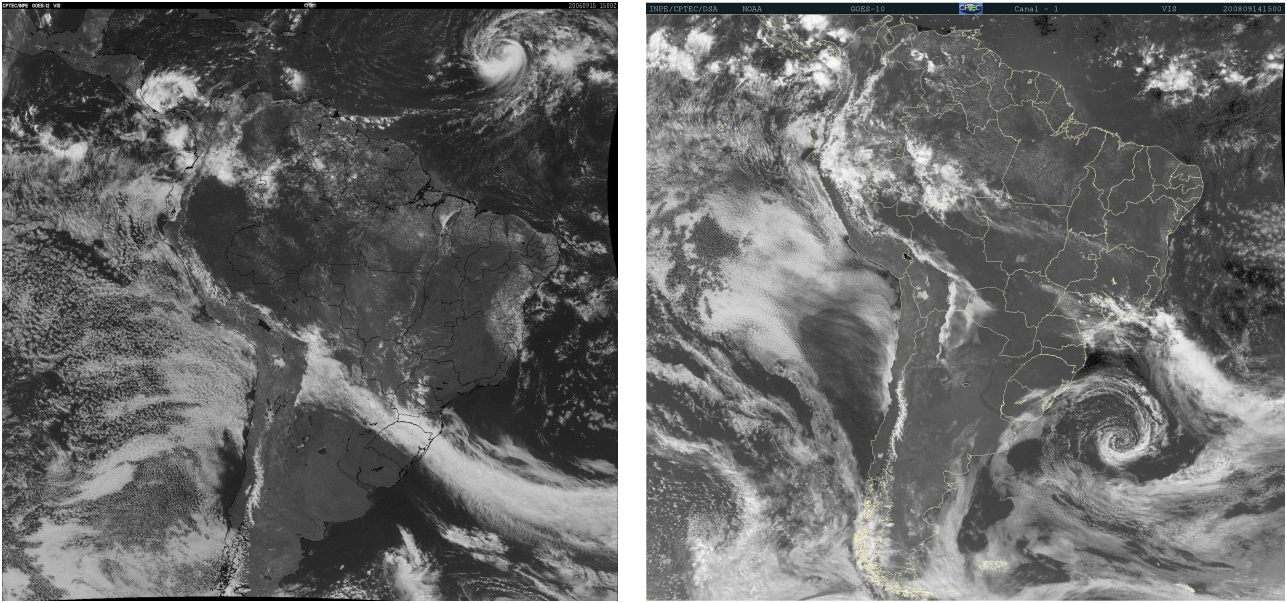


Figura 4.5 – Refletância observada pelos sensores GOES-12 (à direita – 15/09/2006) e GOES-10 (à esquerda – 14/09/2008) às 15h00 UTC.
Fonte: INPE. DSA. CPTEC (2015)

Metodologia

Nesta seção são apresentadas a metodologia e considerações aplicadas no desenvolvimento da dissertação.

4.1.1. Seleção e Análise da Qualidade do conjunto de dados

O presente estudo é baseado em dados de diferentes fontes com distintas resoluções espaciais e temporais. Na **Tabela 4.1 (Seção 4.1)** foram apresentadas as especificações dos dados, principalmente sobre resolução temporal, fonte, tipo de instrumentação e período disponível de dados. Verifica-se que os dados de modelagem e sensoriamento remoto apresentam resolução espacial de 4x4 km e temporal de 30 minutos. Por outro lado, os dados observacionais à superfície são pontuais e apresentam resolução temporal maior. Considerando que este estudo envolve combinações e comparações entre os dados, os mesmos precisaram ser reamostrados. A reamostragem consistiu na organização de um conjunto de dados formados pelas seguintes variáveis: $IUV_{observação}$, $IUV_{céu\ claro}$ estimado pelo UVSIM, refletância (R_{EF}) e tipos de nuvens. Esse conjunto, ainda passou por critérios de seleção para serem finalmente utilizados no presente estudo.

A **Figura 4.6** mostra o fluxograma da metodologia composta por três fases e utilizada para reamostrar e selecionar os dados de interesse. Na primeira fase, os dados observacionais de IUV eram compostos por três observações centradas nos horários correspondentes ao imageamentos dos satélites GOES (30 minutos de observação). Por outro lado, dados de sensoriamento remoto e do modelo UVSIM foram organizados a partir da amostragem de 3x3 pixels centrados na localização geográfica da observação de IUV. Assim, o conjunto de dados era formado por três observações de IUV, nove informações sobre os dados de modelagem e sensoriamento remoto.

Na segunda fase, foram aplicados três critérios para a construção da média de cada uma das variáveis:

- **IUV observado** – critério de homogeneidade temporal. Inicialmente, a variabilidade temporal das três observações de IUV foi estimada para todo o conjunto de dados na condição de céu claro. A variabilidade foi representada pelo desvio padrão normalizado pela média. O conjunto de dados selecionados para o estudo foi aquele em que a variabilidade apresenta um limite inferior à 15%. Acredita-se que a variação do ângulo zenital nas três observações corresponda à variabilidade menor que 15% e que, acima deste limiar, a variabilidade esteja associada a nuvens que possivelmente não foram detectadas pelo classificador de nuvens (por exemplo, nuvens com dimensões de subpixel). No **capítulo 6**, os resultados associados à escolha deste limiar são apresentados.
- **R_{EF} observada por satélite** – critério de homogeneidade temporal. Analisou-se a variação anual das **R_{EF}** observadas pelos satélites GOES-10 e GOES-12. Na **Seção 6.2.1.**, mostra-se que a refletância do GOES-10 é superior às do GOES-12. Sendo assim, os dados de **R_{EF}** do GOES-10 foram corrigidos empregando o *fator de correção (f)* de Ceballos e Macedo (2009). Mais detalhes são apresentados no **capítulo 6**.
- **Tipo de nuvens** – critérios de homogeneidade espacial. Como mencionado na **Fase 1**, os dados de sensoriamento remoto e modelagem foram extraídos a partir de 9 pixels centrados no ponto das observações de IUV. Inicialmente, considerou-se válido o conjunto de dados que, no mínimo, apresentasse 6 dos 9 pixels com o mesmo tipo de nuvem. As médias finais de **IUV_{céu claro}** e **R_{EF}** foram estimadas para os N pixels homogêneos ($N \geq 6$) em termos do tipo de nuvem.

O critério de homogeneidade espacial e temporal das variáveis é essencial, pois contribuiu para que apenas variações físicas associadas ao mesmo tipo de nuvens sejam consideradas.

Na terceira fase, realizou-se a separação do conjunto de dados formados pelas médias de $IUV_{observado}$, $IUV_{céu\ claro}$ e R_{EF} dos diferentes tipos de nuvens: *cirrus*, *stratus*, *cumulus* e *convectiva*, além de *céu claro*. Estes dados são utilizados na construção da nova parametrização de CMF (Seção 4.2.3) e na validação das estimativas de IUV (Seção 4.2.4).

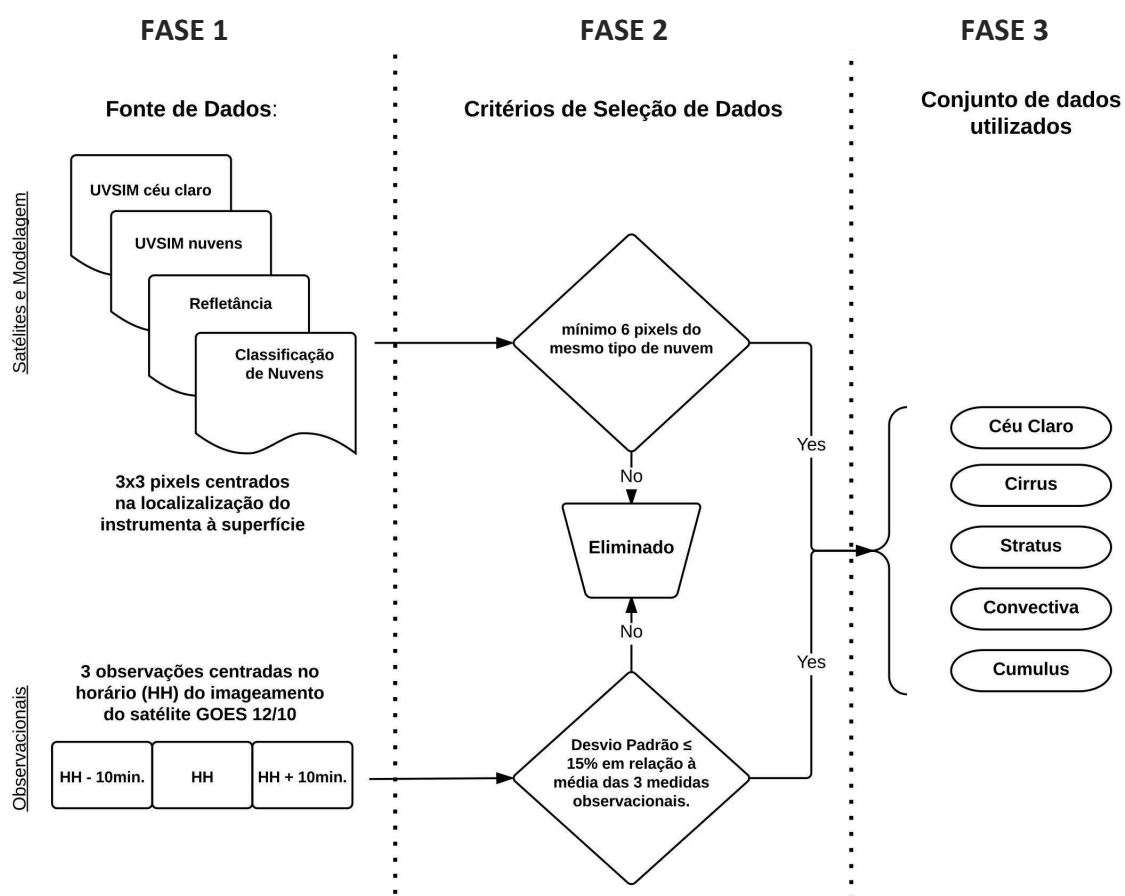


Figura 4.6 – Fluxograma da metodologia adotada para a seleção do conjunto de dados utilizados neste estudo para determinar o efeito da nebulosidade no IUV.

4.1.2. Impacto dos parâmetros meteorológicos na radiação UV

Diversos testes de sensibilidade foram realizados, objetivando determinar a importância de cada um dos constituintes atmosféricos (gases atmosféricos, aerossóis e nuvens) na transferência de radiação UV na atmosfera. A **Tabela 4.2** apresenta um resumo dos testes de sensibilidade.

A motivação para esses estudos de sensibilidade está na determinação do grau de importância e na incerteza que cada um dos parâmetros meteorológicos introduz nas estimativas de radiação. Os resultados obtidos nessa etapa são essenciais na avaliação do modelo UVSIM (**Seção 6.3**) para identificar os fatores nominais responsáveis pelas diferenças entre os resultados simulados e observados. Adicionalmente, estes testes permitem melhor compreender a física da transferência da radiação UV na atmosfera para diversas condições meteorológicas.

As simulações foram realizadas através do código radiativo SBDART e foi considerado o perfil atmosférico característico de regiões tropicais na condição sem nebulosidade, concentração total de O₃ de 300 DU e ângulo zenital de 0°, exceto quando mencionadas configurações distintas. O valor empregado para a concentração total de O₃ corresponde à média global apresentada na **Seção 2.3**. A escolha do modelo SBDART (**Seção 4.3.1.**) deve-se à capacidade de incluir todos os parâmetros de interesse, além de ser um código amplamente usado como referência pela comunidade científica. Ressalta-se que o SBDART realiza simulações no espectro entre 0,200 e 300 μ m, tendo a inclusão de informações de superfície apenas para os comprimentos de onda maiores que 400 nm. Assim sendo, não foi possível analisar a influência ocasionada pela refletância da superfície nas estimativas da radiação UV.

Tabela 4.2 – Informações sobre os testes de sensibilidade realizados neste trabalho.

Teste de sensibilidade	Variáveis analisadas	Especificações	Figura e Tabela
<i>Efeito de Gases (Seção 5.1)</i>			
caso 1	E_{GL} , E_{DIR} , E_{DIF} e E_{UP}	<i>Ia</i> – espalhamento <i>Rayleigh</i> (<i>Ray</i>) <i>Ib</i> – atenuação do O_2 <i>Ic</i> – atenuação do O_3 (300 DU) <i>Id</i> – atenuação do <i>Ray</i> + O_2 <i>Ie</i> – atenuação do <i>Ray</i> + O_2 + O_3 (300 DU)	Tab. 5.1 e Fig. 5.1
caso 2	Transmitância espectral em termo de comprimento de onda	- diferentes concentrações de O_3 (0 a 400DU)	Fig. 5.2
<i>Efeito dos Aerossóis (Seção 5.2)</i>			
caso 3	IUV	- aerossóis rural e urbano	Fig. 5.3
caso 4	UVA	4a- comparação entre observações (CETESB) e estimativas simuladas pelo SBDART. 4b- atmosfera contendo aerossóis <i>rural</i> e <i>urbano</i> com $\tau_{aer} = 0,5$ e 1	Fig. 5.4
<i>Impacto das Nuvens (Seção 5.3)</i>			
caso 5	E_{GL} , E_{DIR} , E_{DIF} e E_{UP}	- nuvens altas (10 - 12 km) $\tau_{nuvem} = 1$ e 10	Fig. 5.5
caso 6	E_{GL} , E_{DIR} , E_{DIF} e E_{UP}	6a- τ_{nuvem} variando de 0 a 100 em diferentes alturas; Baixa (1 - 2 km) Média (3,5 - 4 km) Alta (10 - 12 km) 6b- τ_{nuvem} variando de 0 a 100 em diferentes raios efetivos; $r_e = 5, 10, 30, 60, 100 \mu m$	Fig. 5.5

O primeiro conjunto de testes (*casos 1 e 2*) buscou analisar o impacto dos gases atmosféricos em diversas variáveis no UV (irradiância e transmitância). O *caso 1* foi dividido em 5 análises, que avaliaram individualmente os efeitos do espalhamento *Rayleigh*, absorção do O_2 e O_3 . Adicionalmente, foi avaliado o efeito combinado dos processos (*casos 1d e 1e*). Considerando que uma das possíveis incertezas nas simulações é a concentração total de O_3 , diferentes testes foram considerados (*caso 2*). Estes testes avaliam o efeito do O_3 nas estimativas da transmitância espectral.

O segundo conjunto de testes de sensibilidade (*casos 3 e 4*) consistiu em avaliar o impacto dos aerossóis na radiação UV. Dois tipos de aerossóis (*rural, urbano*) e diferentes τ_{aer} são considerados. A atual versão do modelo UVSIM utiliza informações de aerossol com τ_{aer} igual 0,2, sem assumir variações espaciais e temporais. Segundo observações à superfície, em São Paulo (SP), a τ_{aer} varia entre 0,1 e 0,3 (CASTANHO, 2005).

O terceiro teste de sensibilidade consiste em estudar o impacto das nuvens na radiação UV. Os testes realizados estimam as irradiâncias globais (E_{GL}), diretas (E_{DIR}), difusas (E_{DIF}) e ascendentes no TOA (E_{UP}) na presença de nuvens com diferentes alturas (*caso 6a*), raio efetivo (*re*) de gotas e cristais de gelo (*caso 6b*), e profundidade óptica. Para determinar o tipo de nuvem em termos de profundidade óptica, utilizou-se como referência o trabalho de Rossow e Schiffer (1999). Estes autores classificaram as nuvens em termos da pressão em seu topo e da profundidade óptica (τ_{nuvens}) na região espectral do VIS (**Figura 4.7**), através de dados climáticos do projeto ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Project*).

Observa-se que as nuvens *cumulus* são classificadas como nuvens de topos baixos, com τ_{nuvens} típica variando entre 0 e 3,6, enquanto que nuvens *cirrus* possuem a mesma configuração em termos da profundidade óptica, mas localizam-se na parte superior da atmosfera (acima de 400mb).

Distribuição da Profundidade de Nuvens

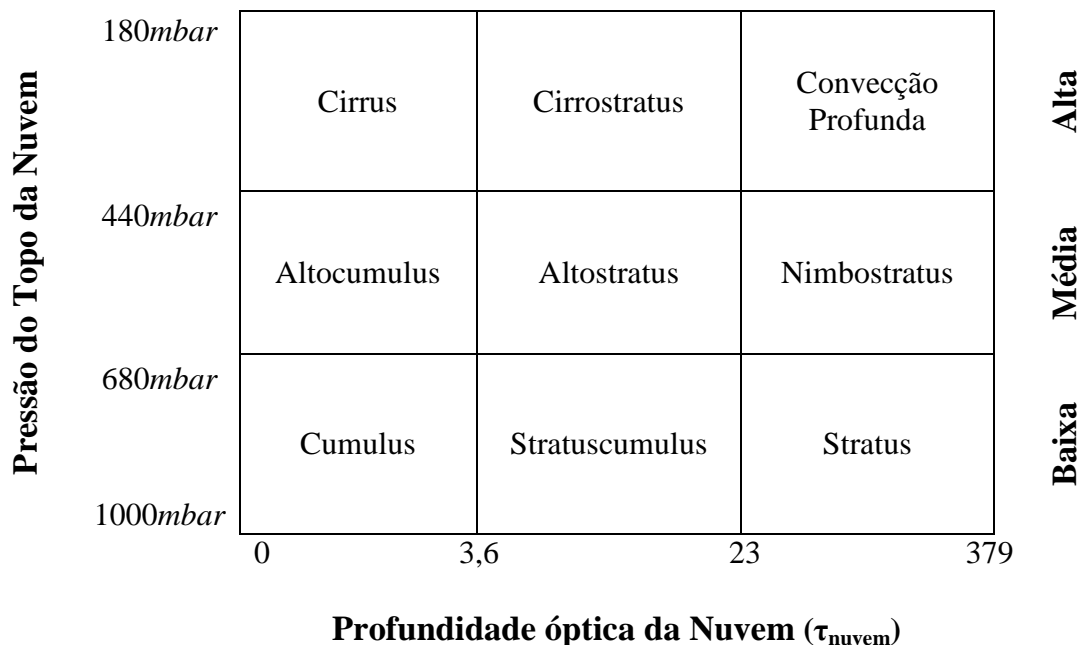


Figura 4.7 - Esquema de classificação de nuvens baseado na altura e profundidade óptica de nuvens no visível.

Fonte: Adaptado de Rossow; Schiffer (1999).

4.1.3. Adaptação da técnica CMF empregando informações de Satélites

Os métodos utilizados para determinar o efeito radiativo de nuvens no espectro UV são, em sua maioria, baseados no parâmetro **CMF** (**C**loud **M**odification **F**actor), sendo descrito por meio do seguinte equacionamento:

$$RUV_{\text{nuvens}} = CMF * RUV_{\text{céuclaro}} \tag{Equação 4.1}$$

em que $RUV_{\text{céuclaro}}$ e RUV_{nuvens} são, respectivamente, a radiação UV nas condições de céu claro e com nuvens. Geralmente estas duas variáveis são expressas em unidade de irradiância. **CMF** é o termo que descreve a fração da radiação transmitida através de nuvens e tem sido determinado por diversos estudos. Porém, a maioria dos resultados é

para as condições de nebulosidade na Europa e utilizando basicamente duas ferramentas: modelos radiativos e observações visuais sobre nebulosidade (CALBÓ et al., 2005). Entre as observações visuais destacam-se fração de cobertura de nuvens, índice de claridade e tipo de nuvem. Poucos trabalhos utilizam dados de sensoriamento remoto, mas, quando utilizados, as informações são provenientes de satélites polares. Este estudo visa estimar o fator **CMF** para condições de nebulosidade na América do Sul, especificamente para a capital Paulista, utilizando informações de satélite geoestacionário.

Long et al. (1996) estimaram valores de **CMF** para três tipos de nuvens, combinando informações de observações visuais e dados radiométricos de sete estações meteorológicas distribuídas nos Estados Unidos e Alasca (**Tabela 4.3**). Importante mencionar que esta metodologia é usada na DSA/CPTEC, porém adaptada ao produto de *Classificação de Nuvens*. Apesar dessa adaptação, nenhum estudo avaliou se os valores de **CMF** são apropriados para as condições de nebulosidade no Brasil.

Tabela 4.3 – Valores de CMF para quatro tipos de nuvens utilizados atualmente no UVSIM.

Tipos de Nuvens <i>Long et al. (1996)</i>	Tipos de Nuvens <i>(Classificador de Nuvens)</i>	CMF
<i>“Scatter Clouds”</i> <i>(nuvens espalhadas)</i>	<i>Cirrus</i>	<i>0,896</i>
<i>“Broken Clouds”</i> <i>(nuvens quebradas)</i>	<i>Cumulus</i>	<i>0,726</i>
-----	<i>Stratus</i>	<i>0,500</i>
<i>“Overcast”</i> <i>(total//nublado)</i>	<i>Convectiva</i>	<i>0,316</i>

Neste estudo, uma nova metodologia para a determinação de **CMF** é proposta. Esta metodologia utiliza informações do Classificador de Nuvens e R_{EF} do canal 1 (VIS) do imageador a bordo do satélite GOES. A proposta baseia-se nos seguintes equacionamentos:

$$CMF = a + b * R_{EF}, \quad \text{Equação 4.2a}$$

$$CMF = c * \left[\frac{(1 - R_{EF})}{(1 - rs)} \right]^n, \quad \text{Equação 4.2b}$$

em que rs representa a refletância da superfície, a qual é descrita pela análise de *quantis*. É empregado o valor do 1º quantil da R_{EF} em condição classificada como céu claro. Os parâmetros a , b , c e n são obtidos para cada tipo de nuvem através de ajustes linear (**Equação 4.2a**) e potencial (**Equação 4.2b**). A variável **CMF** é analisada teórica e observacionalmente por meio da **Equação 4.3**, a qual é semelhante a **Equação 4.1**, porém em termos de IUV:

$$CMF = \frac{IUV_{observado}}{IUV_{céuclaro}}, \quad \text{Equação 4.3}$$

Para o estudo teórico, o $IUV_{observado}$ e $IUV_{céuclaro}$ são estimados pelo modelo SBDART. Entretanto, na análise observacional, é utilizado o **IUV** observado pelo biômetro e o **IUV** estimado pelo modelo UVSIM, respectivamente.

4.1.4. Avaliação do produto IUV estimado na DSA/CPTEC

A avaliação do desempenho do produto de radiação UV da DSA/CPTEC consiste na comparação dos dados estimados de IUV com aqueles observados à superfície utilizando métricas estatísticas padrão, tais como: desvio padrão (S^2_d), Erro Médio (ou VIÉS), Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) e Coeficiente de determinação (r^2).

A avaliação é realizada em duas etapas. Inicialmente, o UVSIM é avaliado para condições de céu claro, pois a estimativa de $IUV_{\text{céuclaro}}$ do referido modelo é uma das variáveis fundamentais na adaptação da técnica CMF. Na segunda etapa, as técnicas do CMF operacional na DSA/CPTEC e aquelas construídas no presente trabalho são avaliadas em termos do IUV. Neste caso, aplicam-se os valores de CMF nos $IUV_{\text{céuclaro}}$ estimados pelo UVSIM, e este é comparado, então, com observações de IUV à superfície.

4.2. Modelos de Transferência Radiativa (TR)

Nesta seção são descritos os modelos utilizados neste estudo: SBDART e UVSIM.

4.2.1. SBDART

O SBDART - *Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer* (RICCHIAZZI et al., 1998) é um código computacional de transferência radiativa, desenvolvido pelo Institute for Computational Earth System Science da Universidade da Califórnia, Santa Barbara. O SBDART é utilizado pela comunidade científica como referência para analisar novos conceitos da transferência radiativa (GAUTIER; LANDSFELD, 1997; MARSHAK et al., 2011). O código calcula diversas grandezas radiométricas para uma ampla variedade de condições atmosféricas possíveis. Especificamente, ele possui seis atmosferas padrão pré-estabelecidas (**Tabela 4.4**). No entanto, permite incluir perfis de radiossondagem, assim como inserir propriedades ópticas de nuvens e aerossóis. Ressalta-se que informações de aerossóis utilizadas no SBDART são provenientes do modelo desenvolvido por Shettle e Fenn (1975), o qual é dependente da umidade relativa. Neste estudo, utilizaram-se apenas informações de aerossóis urbano e rural, conforme descrito na metodologia.

Tabela 4.4- Características das atmosferas padrão utilizadas no código do SBDART.

	Vapor d'água [g/cm ²]	Ozônio total [atm-cm]	Ozônio entre 0 e 10 km [atm-cm]
Tropical	4.117	0.253	0.0216
Latitudes Médias no Verão	2.924	0.324	0.0325
Latitudes Médias no Inverno	0.854	0.403	0.0336
Subartico no Verão	2.085	0.350	0.0346
Subartico no Inverno	0.418	0.486	0.0340
US 62	1.418	0.349	0.0252

Fonte: Ricchiazzi et al. (1998).

4.2.2. UVSIM

O cálculo da irradiância espectral no modelo UVSIM é realizado pelo método de dois fluxos “Two-Flux”, desenvolvido por Corrêa (2004) para condição de céu claro. O método de dois fluxos é uma aproximação para a resolução da transferência radiativa, a fim de estimar a irradiância monocromática e/ou integrada espectralmente à superfície. Informações detalhadas sobre o método de dois fluxos são encontradas em King e Harshvardhan (1986). Devido à importância do modelo UVSIM no CPTEC/INPE, o presente trabalho faz uma revisão das formulações físicas do modelo utilizando informações de diversas fontes: algoritmo computacional, tese de Corrêa (2003a) e manual do UVSIM (CORRÊA, 2003b), entre outros artigos científicos citados.

No caso específico do modelo UVSIM, a irradiância espectral global $E_{GL}(\lambda)$ incidente à superfície é descrita conforme a **Equação 2.1**. Com o intuito de simplificar a notação matemática, os termos espectrais entre parênteses são desconsiderados a partir daqui. Sendo assim, $E_{DIR}(\lambda) = E_{DIR}$. O modelo UVSIM estima E_{DIR} e E_{GL} separadamente e, através da diferença entre ambos, estima o E_{DIF} . Apesar do cálculo dos três termos, apenas o E_{GL} é usado para a determinação do IUUV.

Irradiância Direta

A radiação direta é determinada por:

$$E_{DIR} = S_o(\lambda) T_{Ray} T_{aer} T_{O_3}, \quad \text{Equação 4.4}$$

em que T_{Ray} , T_{aer} e T_{O_3} são as funções de transmitância associadas, respectivamente, ao espalhamento molecular *Rayleigh*, à atenuação do aerossol e à absorção pelo O_3 . Essas transmitâncias são funções do coeficiente de extinção e do caminho percorrido pela radiação na atmosfera, sendo o caminho óptico descrito em termos de massa relativa e expresso em termos da secante do ângulo zenital ($m_o = \sec \theta$). Esta relação é acurada, exceto para ângulos zenitais grandes, onde correções são necessárias.

A transmitância *Rayleigh* é descrita por:

$$T_{ray} = \exp\left(-\frac{\tau_{Ray}}{\mu_o}\right), \quad \text{Equação 4.5}$$

em que τ_{Ray} é a profundidade óptica do espalhamento *Rayleigh*, sendo estimada através da parametrização de Bucholtz (1995). A transmitância do aerossol é descrita por:

$$T_{aer} = \exp\left(-\frac{\tau_{aer}}{\mu_o}\right), \quad \text{Equação 4.6}$$

em que τ_{aer} é a profundidade óptica do aerossol. Conforme já mencionado, no modelo UVSIM τ_{aer} é constante e igual a 0,2. A transmitância do O_3 é descrita por:

$$T_{O_3} = \exp\left(-\frac{k_{O_3} N}{\mu_o}\right), \quad \text{Equação 4.7}$$

em que k_{O_3} é a secção de choque de absorção do O_3 (em $\text{cm}^2 \text{ molec}^{-1}$), dada por Bird e Riordan (1986), e o N é o número de moléculas de O_3 em uma coluna de atmosfera (moléculas cm^{-2}). No modelo UVSIM, N é proveniente dos dados de reanálise do NCEP.

Irradiância Global

A E_{GL} é descrita através do produto das transmitâncias globais associadas ao espalhamento *Rayleigh*, absorção do O_3 e atenuação do aerossol:

$$E_{GL} = S_o(\lambda) T_{GL(Ray)} T_{GL(aer)} T_{GL(O_3)} \left[\frac{1}{1 - R_{GL(spf)} R_{GL(Atm)}} \right], \quad \text{Equação 4.8}$$

O último termo da equação acima é conhecido como fator de amplificação e é devido à múltipla reflexão do sistema superfície e atmosfera (LENOBLE, 1998). Nesta múltipla reflexão, a superfície pode refletir a radiação UV descendente na direção da atmosfera, que, por sua vez, pode retroespalhar na direção da superfície. Neste contexto, o fator de amplificação depende apenas do produto da refletância global da superfície $R_{GL(spf)}$ e da refletância global da atmosfera $R_{GL(Atm)}$. No UVSIM, $R_{GL(spf)}$ é igual a 0,03 e $R_{GL(Atm)}$ é composto pela contribuição das extinções *Rayleigh* e de aerossol: $R_{GL(Atm)} = R_{GL(Ray)} + R_{GL(aer)}$.

As transmitâncias e refletâncias globais da superfície e da atmosfera são estimadas através das parametrizações de King e Harshvardhan (1986) e Harshvardhan e King (1993):

$$T_{GL(aer)} = e^{-\tau m_o} \left\{ 1 - \frac{\omega_o}{(1 - k^2 \mu_o^2) [(k + \gamma_1) e^{k\tau} + (k - \gamma_1) e^{-k\tau}]} \times \right. \\ \left. \left[(1 + k \mu_o) (\alpha_1 + k \gamma_4) e^{k\tau} - (1 - k \mu_o) (\alpha_1 - k \gamma_4) e^{-k\tau} - 2k (\gamma_4 + \alpha_1 \mu_o) e^{\tau m_o} \right] \right\} \quad \text{Equação 4.9}$$

em que,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \gamma_1 \gamma_4 + \gamma_2 \gamma_3 \\ \alpha_2 &= \gamma_1 \gamma_3 + \gamma_2 \gamma_4 \\ k &= (\gamma_1^2 - \gamma_2^2)^{1/2} \end{aligned} \quad \text{Equação 4.10}$$

Os coeficientes (γ_i) surgem da aproximação de delta-Eddington (JOSEPH; WISCOMBE, 1976) e são descritos por:

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{1}{4}[7 - \omega'_o(4 + 3g')] \\ \gamma_2 &= -\frac{1}{4}[1 - \omega'_o(4 - 3g')] \\ \gamma_3 &= \frac{1}{4}[(2 - 3g'\mu_o)]\end{aligned}\quad \text{Equação 4.11}$$

Os coeficientes ω'_o e g' são os parâmetros de espalhamento, respectivamente, albedo simples e fator de assimetria, conforme descrição apresentada no **capítulo 2**. No UVSIM, estes parâmetros para o aerossol são fixos e valem, respectivamente, 0,94 e 0,66. No caso do espalhamento *Rayleigh*, em que os parâmetros de espalhamento são $g' = 0$ e $\omega'_o = 1$, a transmitância se reduz a:

$$T_{GL(Ray)} = \left(\frac{2}{3} + \mu_o\right) + \left[\left(\frac{2}{3} - \mu_o\right) \exp\left(-\frac{\tau_{Ray}}{\mu_o}\right)\right] / \left(\frac{4}{3} + \tau_{Ray}\right) \quad \text{Equação 4.12}$$

Considerando que $\mathbf{R}_{EF} + \mathbf{T} = \mathbf{1}$, $\mathbf{R}_{GL(Ray)}$ e $\mathbf{R}_{GL(aer)}$ são determinados através das seguintes equações:

$$R_{Glob(Ray)} = \tau_{Ray} \left[\frac{1 - \exp(-2\tau_{Ray})}{2 + \tau_{Ray}} \right] \quad \text{Equação 4.13}$$

$$R_{GL(aer)} = \frac{\omega_o}{(1 - k^2\mu_o^2) \left[(k + \gamma_1)e^{k\tau} + (k - \gamma_1)e^{-k\tau} \right]} \times \left[(1 - k\mu_o)(\alpha_2 + k\gamma_3)e^{k\tau} - (1 + k\mu_o)(\alpha_2 + k\gamma_3)e^{-k\tau} - 2k(\gamma_3 + \alpha_2\mu_o)e^{-\tau m_o} \right] \quad \text{Equação 4.14}$$

Através da irradiância global e direta, é possível obter a **irradiância difusa**. Portanto, por meio do método acima, o cálculo da irradiância espectral no modelo UVSIM é realizado a partir da irradiância global incidente à superfície.

Parâmetros de entrada do modelo: Corrêa (2004) destaca a necessidade do modelo ser alimentado com dados precisos de informações temporais (hora local, minutos, dia, mês, ano e diferença UTC), geográficas (latitude, longitude, pressão atmosférica e albedo de superfície), conteúdo total de O₃, informações de aerossóis (propriedades ópticas de populações típicas de aerossóis) e nebulosidade.

Importante ressaltar que o UVSIM estima o IUV de céu claro ($IUV_{\text{céu claro}}$). Já o IUV em condições de nebulosidade na DSA/CPTEC é estimado através do $IUV_{\text{céu claro}}$ ponderado pelo fator CMF. Cada tipo de nuvem proveniente do produto classificador de nuvens tem seu valor de CMF (**Tabela 4.3**).

5 TESTES DE SENSIBILIDADE DOS EFEITOS DOS GASES, AEROSSÓIS E NUVENS NA RADIAÇÃO UV

No **capítulo 2** foram introduzidos os conceitos básicos associados à atenuação da radiação pelos gases atmosféricos, aerossóis e nuvens. Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados decorrentes de testes de sensibilidade que avaliam os efeitos individuais dessas componentes atmosféricas nas estimativas de radiação UV. A **Tabela 4.2** resume as suposições adotadas nos testes de sensibilidade.

5.1. Efeitos dos gases atmosféricos

O primeiro conjunto de testes de sensibilidade mensura a influência dos processos de absorção e espalhamento dos gases atmosféricos nos E_{GL} , E_{DIR} e E_{DIF} à superfície e emergentes no **TOA** (E_{UP}), para os três intervalos espectrais do UV (UVC, UVB e UVA). Verifica-se que as irradiâncias diretas incidentes no topo da atmosfera (**TOA**) possuem valores de 5,46, 18,94 e 85,49 W/m² no UVC, UVB e UVA, respectivamente. Na atmosfera, essas irradiâncias são atenuadas pelos processos físicos de absorção e espalhamento. A avaliação inicial dos gases assumiu os efeitos individuais dos processos de espalhamento molecular *Rayleigh* e absorção (O₂ e O₃) (**casos 1a** ao **1c**, **Tabela 5.1**). Posteriormente, foram avaliadas as atenuações resultantes da combinação desses casos (**casos 1d** e **1e**).

Tabela 5.1 – Análise dos impactos realizados pelos constituintes atmosféricos nas componentes da radiação UV. Descrição completa dos casos apresentados no texto ou na Seção 4.2.2. E_{GL} , E_{DIR} e E_{DIF} e E_{UP} representam, respectivamente, as irradiâncias descendentes globais, diretas e difusas à superfície e, ascendentes do topo da atmosfera (TOA).

Irradiâncias	UVC				UVB				UVA			
	E_{GL}	E_{DIR}	E_{DIF}	E_{UP}	E_{GL}	E_{DIR}	E_{DIF}	E_{UP}	E_{GL}	E_{DIR}	E_{DIF}	E_{UP}
TOA	5,46	5,46	00,00	00,00	18,94	18,94	00,00	00,00	85,49	85,49	00,00	00,00
Ray (<i>caso 1a</i>)	2,30 (-57,9%) ¹	0,52	1,78	3,16	11,64 (-38,5%) ²	5,72	5,92	7,30	66,41 (-22,3%) ³	48,85	17,56	19,08
O₂ (<i>caso 1b</i>)	2,66 (-51,3%) ⁴	2,66	00,00	0,00	18,94 (00,0%)	18,94	00,00	00,00	85,44 (-0,06%)	85,44	00,00	00,00
O₃ (<i>caso 1c</i>)	0,005 (-99,9%) ⁵	0,005	00,00	00,00	4,41 (-76,7%) ⁶	4,41	00,00	00,00	84,06 (-1,7%) ⁷	84,06	00,00	00,00
Ray+O₂ (<i>caso 1d</i>)	1,12 (-79,5%) ⁸	0,39	0,73	1,45	11,64 (-38,5%)	5,72	5,92	7,30	66,41 (-22,3%)	48,85	17,56	19,02
Ray+O₂+O₃ (<i>caso 1e</i>)	0,00 (-100%)	0,00	00,00	0,00	2,69 (-85,8%) ⁹	1,55	1,14	0,63	65,37 (-23,5%)	48,28	17,09	17,93

*Os superescritos de 1 a 9 são referências às indicações no texto.

No **caso 1a**, em que somente o espalhamento *Rayleigh* é considerado, observa-se que a atenuação é de ~58%¹ no UVC, ~38%² no UVB e ~22%³ no UVA. Esses resultados estão de acordo com a teoria molecular, que descreve que a intensidade do espalhamento é maior para comprimentos de onda menores. O espalhamento *Rayleigh* é responsável pelas irradiâncias ascendentes no **TOA** (E_{UP}) e as E_{DIF} à superfície. A função de fase do espalhamento *Rayleigh* tem simetria $g = 0$ (**Seção 2.1**), indicando que a radiação, ao interagir com moléculas de ar, tem probabilidade similar de ser espalhada na direção frontal e retroespalhada na direção oposta ao feixe incidente. Adicionalmente, próximo à superfície se encontra a maior parte dos constituintes atmosféricos que interagem com a radiação. Esta é a explicação para a componente E_{DIF} ser menor que E_{UP} , conforme observada no **caso 1a** da Tabela 5.1.

No **caso 1b**, a absorção do O_2 é de ~51%⁴ no UVC e está associada ao *Mecanismo de Chapman* (**Seção 2.2**), em que o referido gás, ao absorver a radiação UV, produz o O_3 . O O_2 não apresenta impacto significativo nas demais regiões do espectro UV. No **caso 1c**, o O_3 absorve em maior proporção no espectro do UVC (~99%)⁵ e UVB (~77%)⁶. A absorção da radiação UVA pelo O_3 é menor do que 2%⁷. Na análise da combinação do espalhamento *Rayleigh* e absorção do O_2 (**caso 1d**), atenuação de 80%⁸ ocorre no espectro UVC.

O **caso 1e** apresenta uma condição mais realista, por incluir todos os gases presentes na atmosfera. Observa-se, através das avaliações individuais realizadas, que o espectro UVA é predominantemente atenuado pelo espalhamento *Rayleigh*. O espectro UVB possui incidência à superfície de aproximadamente 15%⁹ (E_{GL}) da irradiância incidente no **TOA**, tendo como principal constituinte atenuador o O_3 . No UVC, mostra-se que o O_3 tem maior influência, onde extingue os fluxos à superfície.

Em condição de céu claro e sem presença de aerossóis, as E_{DIF} e E_{UP} são produzidas exclusivamente pelo espalhamento *Rayleigh*. No entanto, o O_3 também tem papel importante nas magnitudes desses fluxos, principalmente no espectro UVB e UVC. O impacto do O_3 em ambas as irradiâncias pode ser avaliado constatando os **casos 1c**, **1d** e **1e**. Na ausência do O_3 (**caso 1d**), a magnitude das irradiâncias E_{DIF} e E_{UP} no UVB é 5,9 e 7,30 W/m², respectivamente, e reduz para 1,14 e 0,63 W/m² devido ao O_3 (**caso 1e**).

A explicação para essa redução expressiva de E_{DIF} e E_{UP} é que é devida à ordem de ocorrência dos processos. A E_{DIR} percorre primeiramente a camada de O_3 , localizada entre 19 e 30 km acima da superfície (**Seção 2.4**). Ao atravessar essa camada, a irradiância é absorvida em ~76% (**caso 1c**) e o restante é transferido para as camadas inferiores. Parte dessa irradiância transmitida é atenuada por espalhamento *Rayleigh*, produzindo E_{DIF} na direção da superfície e E_{UP} na direção do **TOA**, mas com magnitudes diferentes, de acordo com a explicação no **caso 1a**. Posteriormente, a E_{UP} pode ainda ser absorvida novamente pela camada de O_3 , o que reduz significativamente a irradiância ascendente no **TOA**. Os resultados observados apontam que a absorção nas E_{UP} pelo O_3 é aproximadamente 1,45 W/m², 6,67 W/m² e 1,09 W/m² no UVC, UVB e UVA, respectivamente.

No espectro UVC, a camada de O_3 praticamente extingue as irradiâncias descendentes e a probabilidade de fótons serem transmitidos é pequena. Sendo assim, mesmo que o espalhamento *Rayleigh* seja maior em comprimento de onda menor, a camada de O_3 é responsável pela extinção da E_{DIR} no UVC.

A **Figura 5.1** apresenta a distribuição espectral da transmitância atmosférica estimada para as mesmas condições dos **casos 1a, 1d e 1e (Tabela 5.1)**. Observa-se que a atmosfera é opaca no **caso 1e (Ray + O₂ + O₃)** para comprimentos de onda inferiores a 290 nm, devido ao espalhamento *Rayleigh* e localização das bandas de absorção do O_2 e O_3 (*Herzberg continuum* e *Hartley*, **Fig. 2.3**). Na ausência do O_3 (**caso 1d**), a opacidade da atmosfera é até 250 nm.

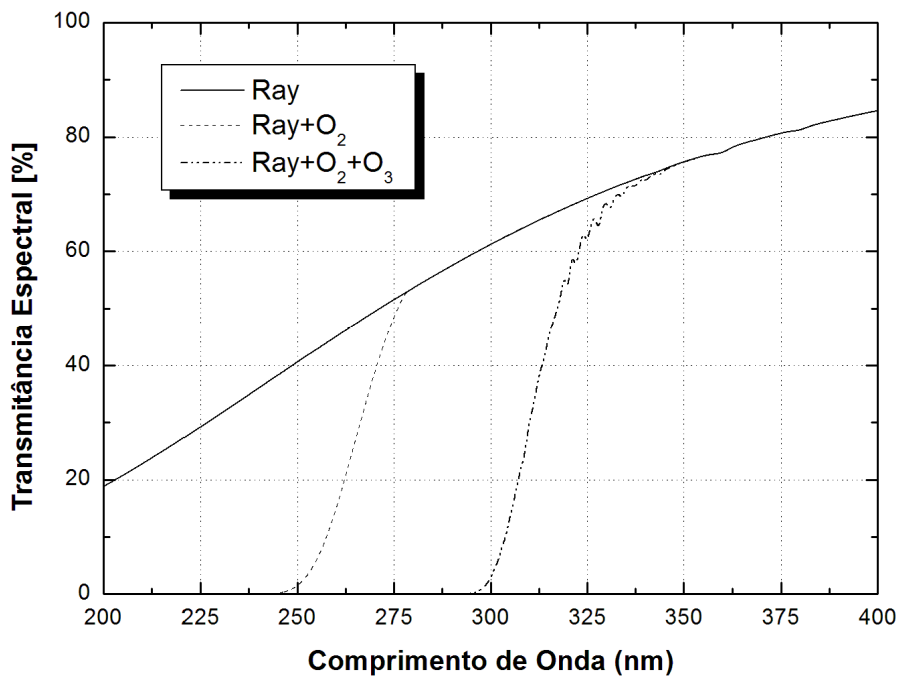


Figura 5.1– Distribuição espectral da transmitância atmosférica na radiação UV (em porcentagem), considerando os *casos 1a, 1d e 1e*, apresentados na Tabela 5.1.

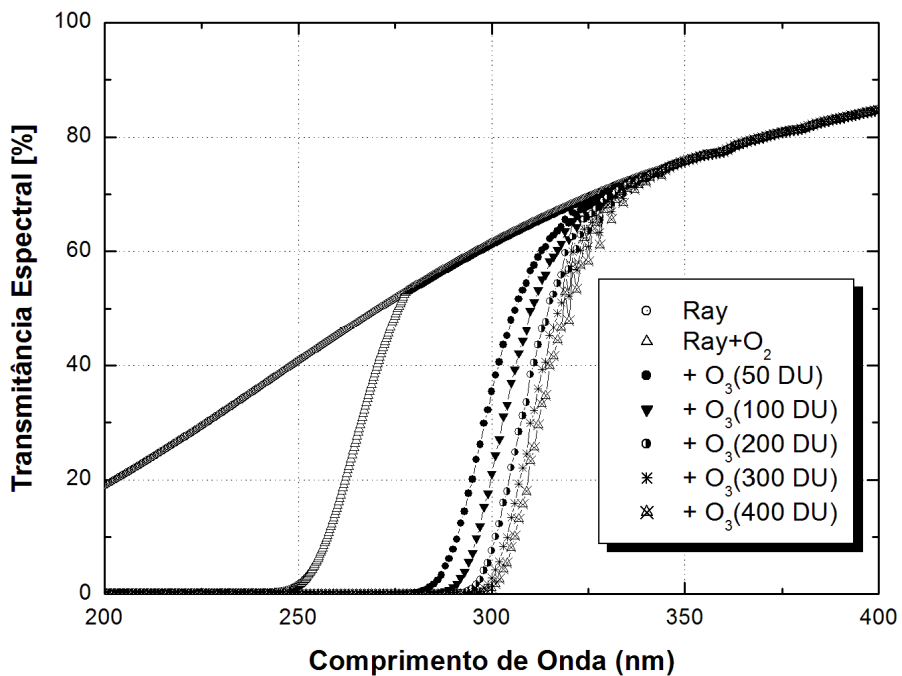


Figura 5.2 - Distribuição espectral da transmitância atmosférica com variação na concentração total de O₃.

Com o intuito de investigar como a concentração total de O_3 pode afetar a incidência da radiação UV à superfície, foram estimadas as transmitâncias para as mesmas condições atmosféricas na **Figura 5.1**. Porém, no **caso 1e**, as concentrações totais de O_3 foram configuradas em 50, 100, 200, 300 e 400 DU (**Figura 5.2**). É possível notar que a absorção de O_3 é considerável mesmo em baixas concentrações, por exemplo em 50 e 100 DU. O intervalo espectral associado à radiação extinta corresponde aos maiores valores no espectro eritêmico, resultando na redução significativa nos valores de IUV.

5.2. Efeitos dos Aerossóis Atmosféricos

Na seção anterior, verificou-se que a radiação incidente no topo de uma atmosfera tropical é totalmente extinta para comprimentos de onda menores que 290 *nm*. Sendo assim, apenas a radiação UV para comprimentos de ondas maiores está disponível para interagir com os aerossóis que estão localizados nas camadas mais próximas à superfície. Nesta seção é estudado o impacto dos aerossóis nas estimativas do IUV e no espectro UVA.

A **Figura 5.3** apresenta a variação do IUV em termos da profundidade óptica de aerossóis (τ_{aer}) com características rurais e urbanas. O IUV diminui com τ_{aer} , tendo maior impacto para o aerossol urbano. De acordo com o algoritmo SBDART, o aerossol urbano é mais absorvedor no espectro UV do que o aerossol rural. Para ilustrar, as propriedades ópticas em 330 *nm* são $\omega_{urbano} = 0,78$ e $g_{urbano} = 0,76$ para o aerossol urbano e $\omega_{rural} = 0,96$ e $g_{rural} = 0,71$ para o rural. De acordo com Castanho (2005, **Seção 2.3**), a média mensal de τ_{aer} na cidade de São Paulo é menor que 0,3. A **Figura 5.3** indica que o IUV de magnitude $\sim 12,5$ para céu limpo pode diminuir em até 2,5 unidades para $\tau_{aer} \leq 0,3$. Apesar dos E_{GL} na região UVB ser pequena (2,69 W/m², **caso 1e** da **Tabela 5.1**), qualquer interação dos gases e aerossóis tem impacto significativo no IUV. Ressalta-se que o valor de ω_{urbano} é raro de ser obtido.

Na seção anterior (**caso 1e**) mostrou-se que E_{GL} em condições de céu claro e ausência de aerossol é de aproximadamente 68 W/m², sendo distribuída em 65,4 e 2,6 W/m², respectivamente, no UVA e UVB. Apesar da pequena porção no UVB, qualquer mudança com relação ao aerossol resulta em impacto significativo no IUV.

A maior disponibilidade de radiação para interação com os aerossóis está no espectro UVA. Nesse contexto, avaliou-se o impacto dos aerossóis em termos da E_{GL} nessa região espectral. A **Figura 5.4** mostra o ciclo diário da irradiância no espectro UVA em condições de céu claro observado na cidade de Guarulhos – SP, **RMSP**, para o dia 04 de Maio de 2013. Adicionalmente, a figura apresenta simulações com o SBDART em condições de céu limpo (ausência de aerossol) e com aerossóis. Nas estimativas com aerossóis foram testados os tipos de aerossóis rural e urbano, ambos com τ_{aer} (em 550 nm) igual a 0,5 e 1. A simulação na presença de aerossol urbano com $\tau_{aer} = 1$ apresentou melhor ajuste com as observações. Importante mencionar que não foram obtidas informações sobre o instrumento em que é analisada a irradiância no espectro do UVA.

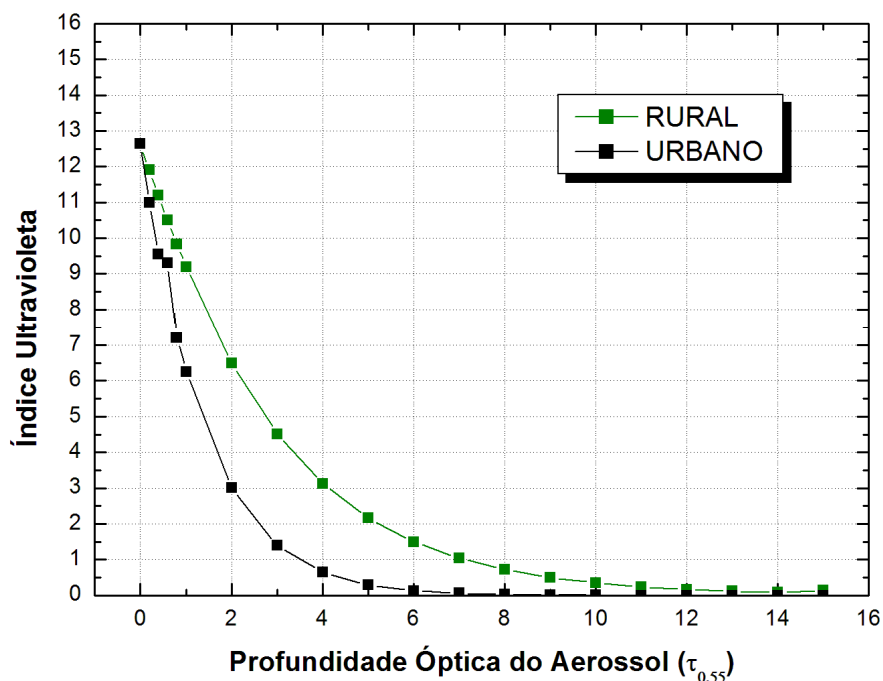


Figura 5.3 – Variação do IUV em termos da τ_{aer} para dois tipos de aerossóis (rural e urbano). O IUV é estimado através do SBDART para uma atmosfera tropical, sem nebulosidade e concentração total de O_3 de 300 DU.

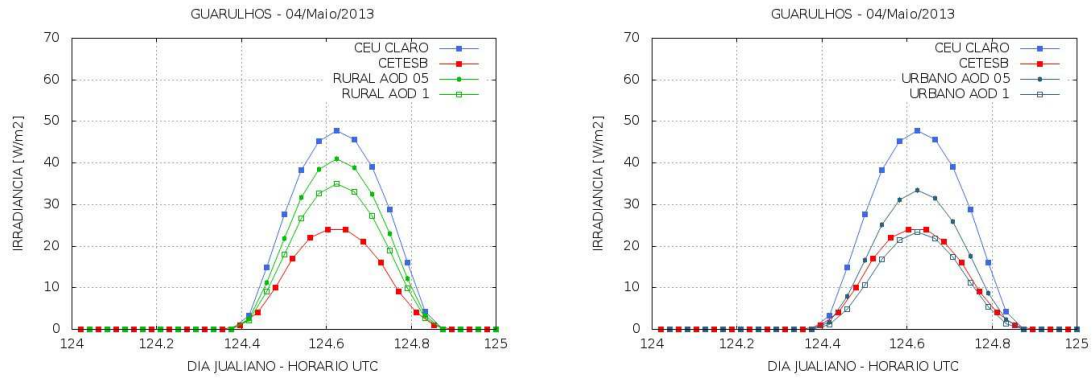


Figura 5.4 – Ciclo diário da irradiância no espectro UVA. As estimativas foram realizadas considerando a presença de aerossóis com características rural (à esquerda) e urbana (à direita), ambos com τ_{aer} (para 550 nm) igual a 0,5 e 1.

5.3. Impacto de Nuvens

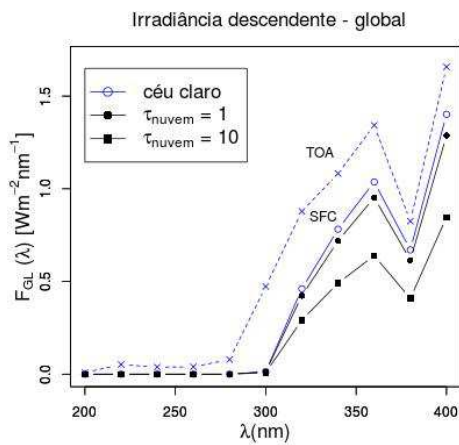
As **Figuras 5.5** apresentam as irradiâncias espectrais do UV nas condições de céu claro e na presença de nuvens altas, configuradas entre 10 e 12 km de altitude em relação à superfície, e para duas diferentes profundidades ópticas: $\tau_{nuvens} = 1$ e 10. Segundo Rossow e Schiffer (1999), essas configurações representam os tipos de nuvens *cirrus* e *cirrustratus*, respectivamente. A irradiância incidente no **TOA** apresenta em 380 nm a linha K de Fraunhofer, que é conhecida por representar a absorção realizada pelo cálcio ionizado na superfície solar (LIOU, 2002).

Para nuvens opticamente finas, tais como *cirrus* ($\tau_{nuvens} = 1$), as E_{GL} à superfície possuem basicamente o mesmo comportamento das E_{GL} de céu claro (**Fig. 5.5a**). Porém, a radiação global para esse tipo de nuvem é descrita basicamente pela componente difusa (**Fig. 5.5c**) associada ao espalhamento simples na mesma direção do feixe incidente. Para céu claro a E_{GL} deve-se a componente direta (**Fig. 5.5b**), a E_{UP} deve-se ao espalhamento molecular *Rayleigh*.

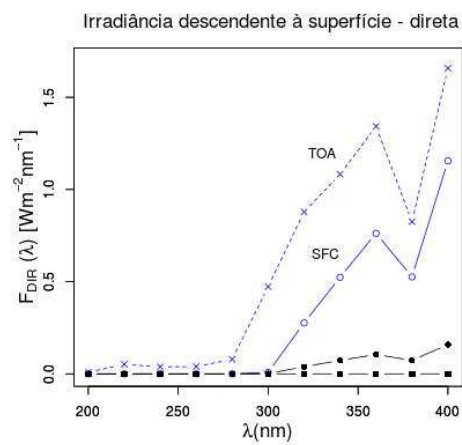
Em nuvens opticamente espessas, como o caso de $\tau_{nuvens} = 10$ (*cirrustratus*), a atenuação é devida ao espalhamento múltiplo que extingue totalmente as E_{DIR} . Por outro lado, o espalhamento múltiplo aumenta a probabilidade de fótons serem espalhados para outras direções, incluindo o hemisfério superior. Isto explica o aumento da radiação UV refletida no **TOA**, de acordo com o aumento de τ_{nuvens} (**Fig. 5.5d**).

Sendo assim, apesar de nuvens tipo *cirrus* e *cirrustratus* apresentarem os mesmos valores de fator de assimetria ($g \sim 0,8$) e albedo simples ($\omega \sim 1$), os quais são constantes em todo o espectro do UV e VIS (Fig. 2.4), a profundidade óptica determina a complexidade do espalhamento, simples ou múltiplo, no interior das nuvens. Verifica-se que, mesmo para ω elevado, as nuvens absorvem a radiação, pois o espalhamento aumenta o caminho óptico percorrido pelos fótons. Resultados ainda mostram que, de acordo com o aumento de τ_{nuvens} , o espalhamento múltiplo predomina e redireciona a radiação, sendo parcialmente absorvida no interior da nuvem e espalhada na direção do topo.

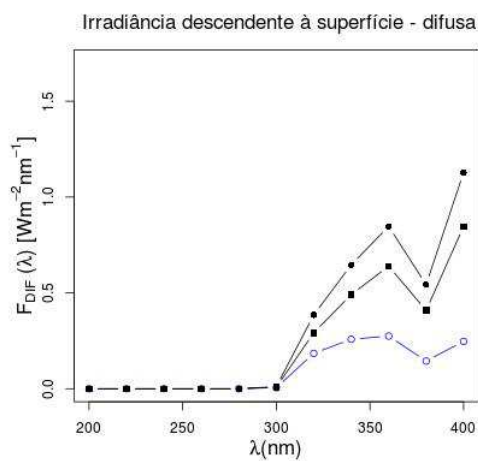
a)



b)



c)



d)

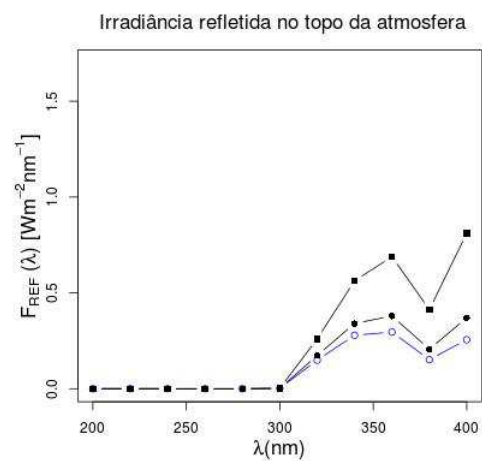


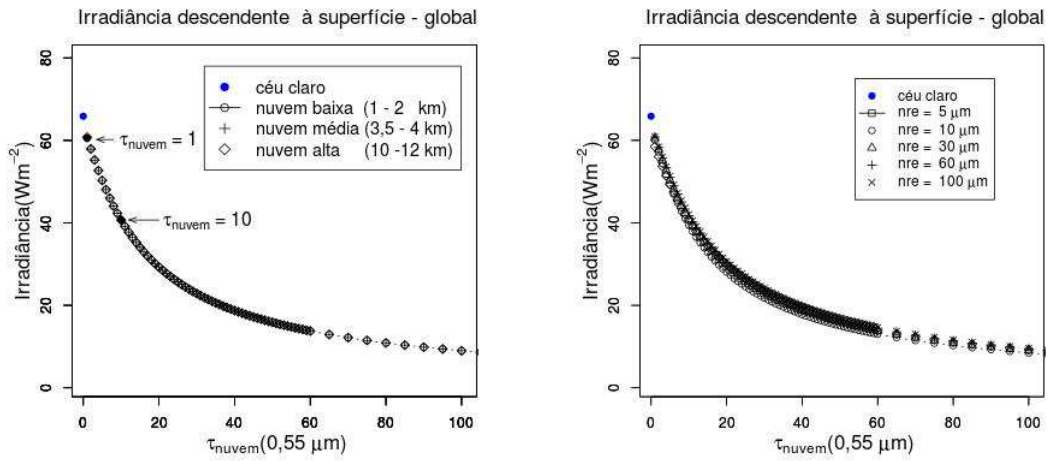
Figura 5.5 – Distribuição espectral da irradiância descendente à superfície: global (a), direta (b), difusa (c) e irradiância refletida no topo da atmosfera (d). As irradiâncias são estimadas nas condições de céu claro e na presença de nuvens altas com diferentes profundidades ópticas ($\tau_{nuvens}=1$ e $\tau_{nuvens}=10$).

Com o intuito de estudar a influência de outras propriedades físicas e microfísicas de nuvens no comportamento da radiação UV, foram avaliadas as variações dos fluxos espectralmente integrados em termos de τ_{nuvens} , altitude, raio efetivo de gotas e cristais de gelo (*re*). Verificou-se que as variações dos fluxos em relação à altura e ao *re* das partículas de nuvens são insignificantes no espectro UV, apresentando dependência em τ_{nuvens} . Importante mencionar que τ_{nuvens} é também descrita em termos do conteúdo de água líquida (*Liquid Water Content*) e densidade. Entretanto, analisa-se o impacto óptico apenas em termo da τ_{nuvens} . Assim, observa-se que as E_{GL} à superfície diminuem, e àquelas refletidas no TOA aumentam à medida que valores de τ_{nuvens} crescem (**Figura 5.6a e c**). Basicamente, o processo para explicar as maiores irradiâncias refletidas no TOA é o espalhamento múltiplo, como mencionado anteriormente.

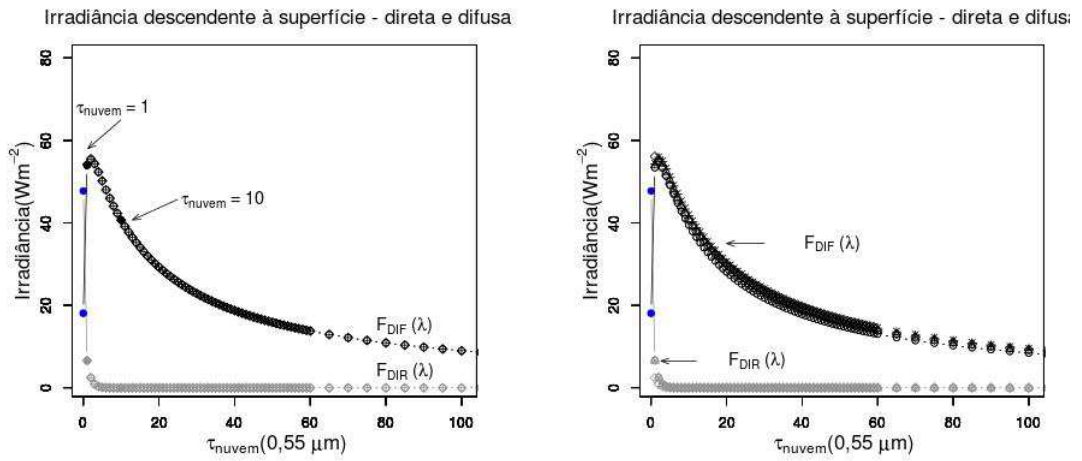
Adicionalmente, observa-se que a componente direta e difusa apresentam comportamentos distintos em termos de τ_{nuvens} . A primeira é atenuada drasticamente pelas nuvens, sendo basicamente extinta para valores altos de τ_{nuvens} . Por outro lado, a componente difusa aumenta rapidamente até um determinado τ_{nuvens} e depois diminui exponencialmente.

No caso estudado, o E_{DIF} para céu claro equivale a $\sim 20 \text{ W/m}^2$ e deve-se ao espalhamento *Rayleigh*. Na presença de nuvens, τ_{nuvens} , E_{DIF} alcança valor máximo de $\sim 55 \text{ W/m}^2$ em $\tau_{nuvens} = 2$, e posteriormente diminui rapidamente, alcançando valores de $\sim 10 \text{ W/m}^2$ em $\tau_{nuvens} = 100$. A E_{DIR} para céu claro é aproximadamente 50 W/m^2 e diminui drasticamente com a presença de nuvens até ser quase extinta, mesmo para valores pequenos de τ_{nuvens} . Em termos gerais, as nuvens reduzem a componente direta e aumentam a componente difusa da radiação global até um determinado limiar. O interessante é que os E_{UP} aumentam com τ_{nuvens} . No caso estudado, a E_{UP} é três vezes maior do que céu claro.

a)



b)



c)

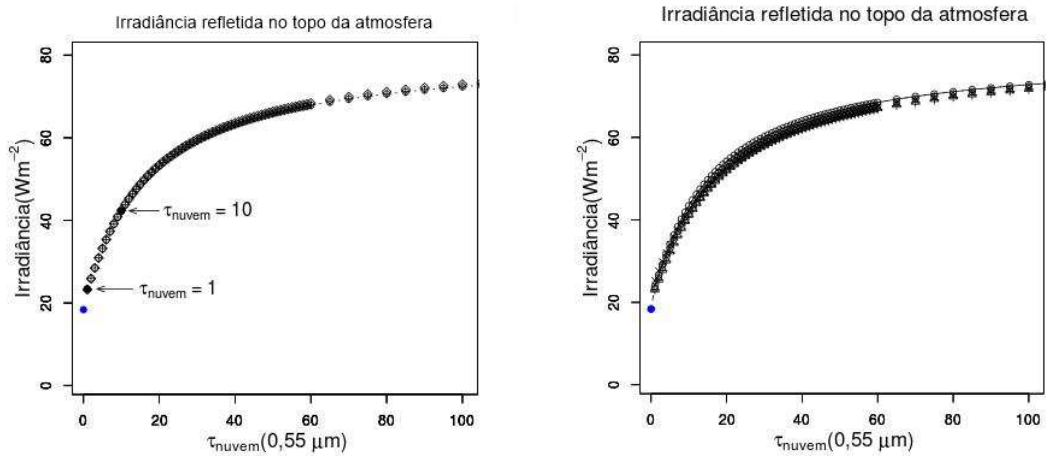


Figura 5.6 – Variação da irradiância E_{GL} (a), E_{DIR} e E_{DIF} (b), e E_{UP} (c) em termos de τ_{nuvens} , altura (à direita) e raio efetivo de nuvens (à esquerda).

6 ESTUDO DA RELAÇÃO EMPÍRICA ENTRE A RADIAÇÃO UV E A NEBULOSIDADE

Este capítulo tem o objetivo de propor um método empírico de estimativa do efeito da nebulosidade no IUV. O método é baseado na técnica de Long et al. (1996) e adaptado para a América do Sul utilizando informações de sensoriamento remoto. Especificamente, o método visa estimar o **CMF** utilizando dados de nebulosidade e **R_{EF}**, ambos provenientes de observações do imageador à bordo dos satélites geoestacionários da série GOES.

Para atingir o objetivo proposto, este capítulo é dividido em três partes. Inicialmente, a relação entre a radiação UV transmitida à superfície e aquela refletida no **TOA** em condições de nebulosidade é analisada teoricamente (**Seção 6.1**) e experimentalmente (**Seção 6.2**). Essas análises visam determinar o comportamento do **CMF** em relação à **R_{EF}** no **TOA** para diferentes tipos de nuvens: *cirrus*, *cumulus*, *stratus* e *convectiva*. Na última etapa, o método empírico de **CMF** proposto será avaliado através de informações à superfície.

6.1. Estudo Teórico

No capítulo anterior, verificou-se que as irradiâncias **E_{GL}** e as **E_{UP}** são moduladas pelas nuvens, principalmente em termos de τ_{nuvens} . Nesse contexto, o efeito da nebulosidade é avaliado através da relação entre a transmitância da radiação UV à superfície e a **R_{EF}**. A transmitância nesta seção é representada pela variável **CMF**, a qual é descrita pela razão entre as **E_{GL}** à superfície nas condições de céu claro e com nuvens ($CMF = E_{GL, nuvens} / E_{GL, céu\ claro}$ – Eq. 4.3). A **R_{EF}** é dada pela razão entre **E_{UP}** e **E_{DIR}** no **TOA**. As referidas irradiâncias foram estimadas teoricamente através do código de transferência radiativa SBDART para céu claro e com nuvens em diferentes τ_{nuvens} .

A **Figura 6.1** mostra a relação entre **CMF** e **R_{EF}** para diferentes valores de τ_{nuvens} nos comprimentos de onda correspondentes ao UV (340, 380, 400 nm) e VIS (650 nm). As nuvens são mais transparentes no UV devido ao espalhamento molecular ser ligeiramente maior do que no VIS, conforme observado na **R_{EF}**, apresentando maiores valores de **CMF** no UV. Estes resultados estão de acordo com López et al. (2009), onde, utilizando dados observacionais à superfície em Córdoba (Argentina), concluíram que o

CMF no UV pode atingir valores mais altos do que no VIS. Especificamente, os autores encontram valores de CMF variando entre 0,1 e 0,7 no UV e, de 0,1 a 0,5 no VIS para nuvens do tipo *stratus-cumulus*.

A **Figura 6.2** é similar a **Fig. 6.1**, porém o CMF é estimado a partir dos fluxos integrados de 200 a 400 nm. Verifica-se que existe uma relação linear entre o CMF e a R_{EF} , a qual pode ser parametrizada. Observa-se que o imageador a bordo do satélite da série GOES apresenta um canal centrado em 650 nm (canal 1, VIS).

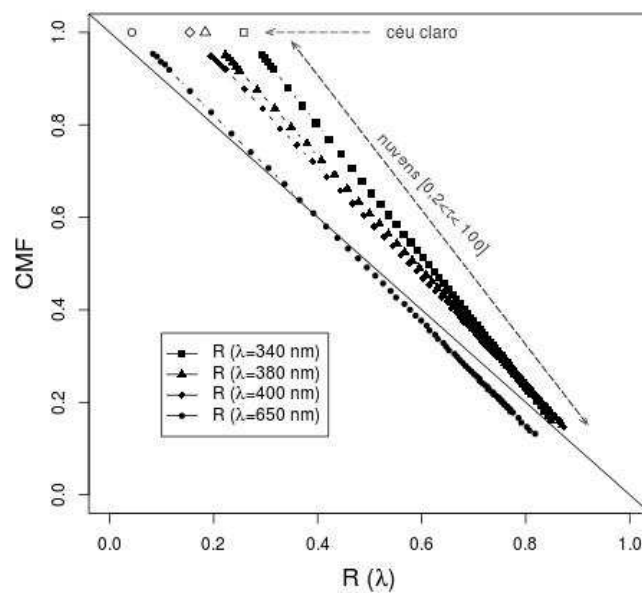


Figura 6.1 – Relação teórica entre CMF e R_{EF} realizada em distintos comprimentos de onda.

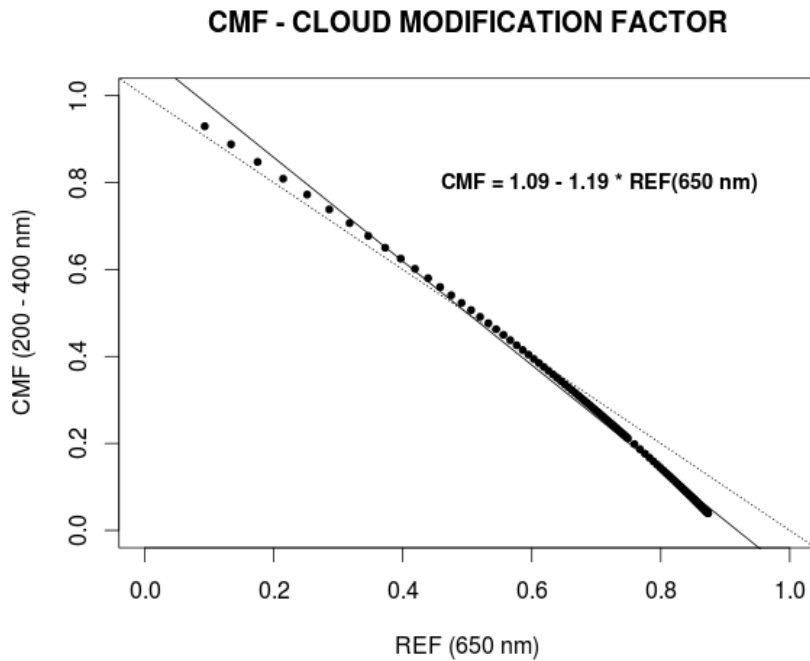


Figura 6.2 – Relação teórica entre o CMF e R_{EF} (650 nm). O CMF é calculado para todo o intervalo da radiação UV (200 – 400 nm).

6.2. Estudo Observacional: Relação entre CMF e a Refletância no TOA

Os resultados teóricos da seção anterior indicam que existe uma forte relação entre **CMF** e R_{EF} no TOA. Nesta seção, esta relação é avaliada acoplando dados observacionais à superfície e de sensoriamento remoto. Na ocasião, o **CMF** foi estimado pela razão entre o IUV observado à superfície e o IUV estimado pelo UVSIM nas condições de céu claro. R_{EF} é proveniente das observações do canal visível dos satélites GOES. Inicialmente, a variação temporal do IUV observado e R_{EF} são analisadas separadamente. Essa análise permite avaliar a qualidade e homogeneidade dos dados.

6.2.1. Análise da variação temporal de Refletância dos satélites GOES e observações de IUV

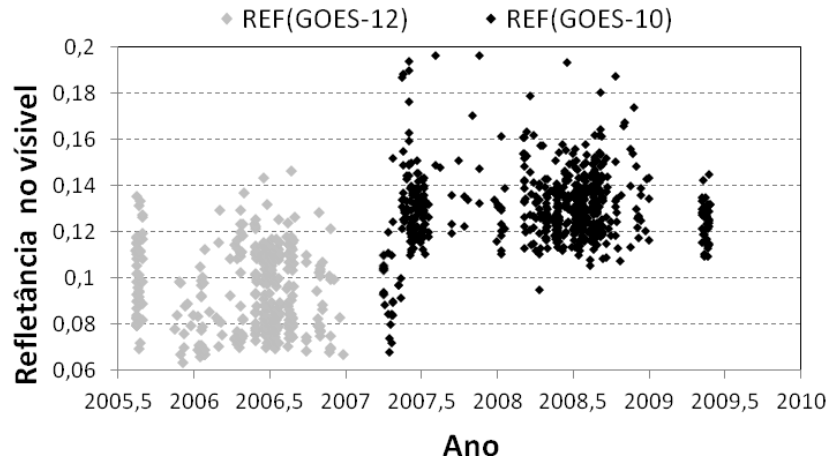
Considerando a utilização de diferentes fontes de dados na análise observacional e na relação de **CMF** vs R_{EF} , os pares de dados (tipos de nuvem, IUV observado, IUV estimado pelo UVSIM e a R_{EF}) foram organizados em termos de amostragem espaço-temporal, a fim de serem aplicados os critérios apresentados em detalhes na

metodologia. Abaixo são apresentados alguns resultados que ajudam na identificação dos critérios de homogeneidade dos dados. A variabilidade temporal de R_{EF} foi analisada, pois dois satélites da série GOES (GOES-12 e GOES-10) operaram durante o período de estudo. Posteriormente, avaliou-se a homogeneidade nas observações de IUV à superfície.

As **Figuras 6.3** mostram a variação anual da R_{EF} do GOES-12 e GOES-10 para a condição de céu claro (sem nebulosidade, de acordo com o *classificador de nuvens*) no período de estudo. O valor médio da R_{EF} (**Fig. 6.3a**) obtida pelo satélite GOES-12 é $0,095 \pm 0,020$, enquanto o satélite GOES-10 é $0,139 \pm 0,063$. A razão entre a R_{EF} do GOES-10 e GOES-12 é de 1,46, que corresponde aproximadamente ao **fator de correção** ($f = 1,45$) aplicado nas calibrações do GOES-10 e obtido em termos do canal 1 (VIS) do SEVIRI/MSG pela DSA/CPTEC (CEBALLOS; MACEDO, 2009). Verifica-se que, no período de transição dos satélites, área em retângulo representada na **Fig. 6.3a**, os valores do GOES-10 são similares àqueles observados pelo GOES-12. Deste modo, foram recalculados utilizando o f (**Fig. 6.3b**).

A frequência relativa da R_{EF} de ambos os satélites são apresentadas nas **Figuras 6.4**. Apesar do GOES-12 ter maior distribuição em torno da mediana do que o GOES-10 corrigido, as R_{EF} dos respectivos satélites possuem valores mínimos e máximos análogos.

a)



b)

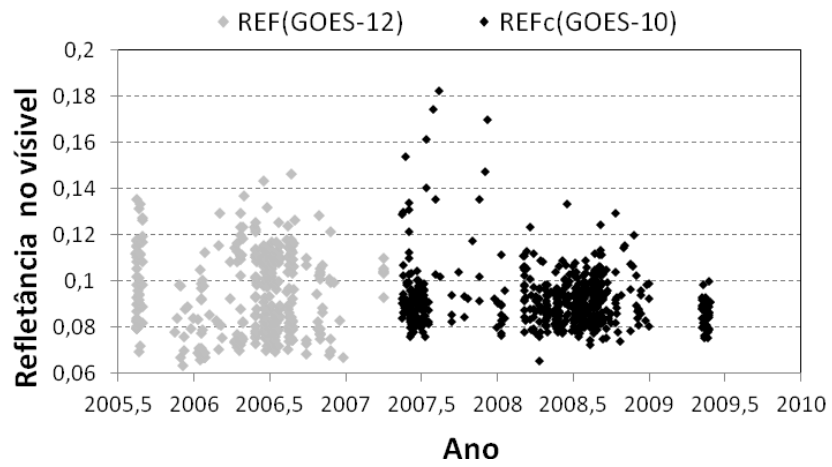
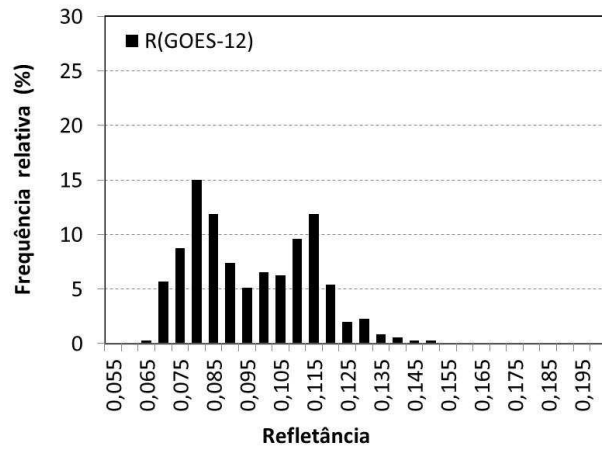
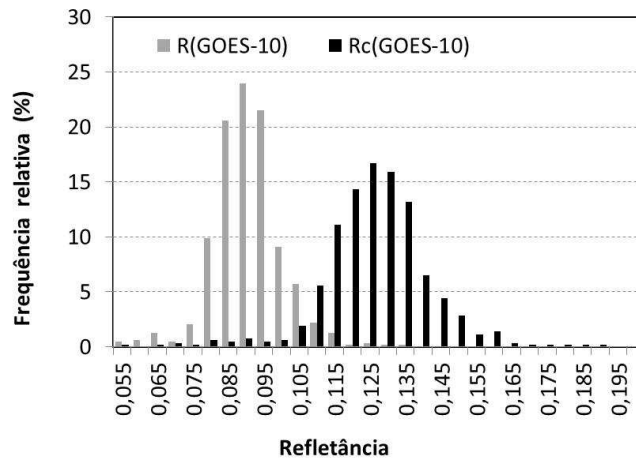


Figura 6.3 – a) Variação anual da refletância no canal visível dos satélites GOES-12 e GOES-10 para as condições de céu claro no período e local de estudo. b) similar a (a), porém aplicando o fator de correção de 0,6896 (1/1,45) nas refletâncias do GOES-10, após o período de transição.

a)



b)



c)

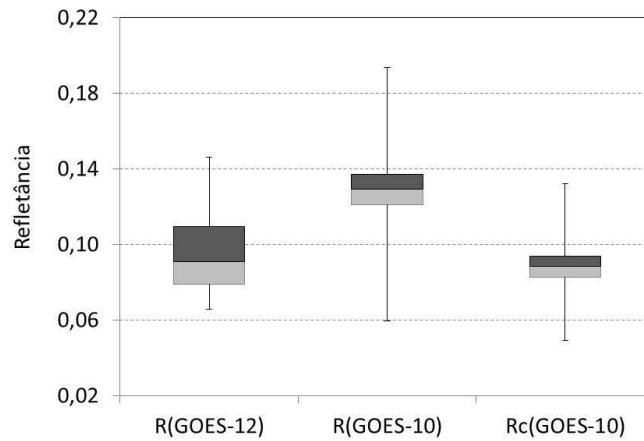


Figura 6.4 - Frequência relativa (%) da refletância do canal visível (R) dos satélites GOES-12 (a) e GOES 10 (b), sendo que para o último é apresentada a distribuição com correção na refletância de $f = 1,45$ (R_{EFC}). c) Representação gráfica do tipo *boxplot* das R_{EF} apresentadas em (a) e (b).

A **Figura 6.5** mostra a variância de 30 minutos das observações de IUV de céu claro (em porcentagem) em termos do μ_0 para diferentes horários (em UTC). Mostra-se uma tendência do IUV diminuir suavemente com o μ_0 . Essa tendência deve-se ao fato de que, no início da manhã e no final da tarde, no nascer e no pôr do sol, os ângulos zenitais solares são maiores e variam rapidamente com o tempo. A variância do IUV é praticamente menor do que 10 %, exceto para os horários das 13 e 17 UTC, tendo a mesma magnitude das incertezas instrumentais apresentadas por Seckmeyer et al. (2001). Baseando-se nas análises de homogeneidade temporal, as variações do IUV observadas nos 30 minutos deveriam ser inferiores ou iguais a 15%.

Portanto, os critérios associados aos dados utilizados neste estudo (tipo de nuvem, IUV observado e a R_{EF}) são resumidamente apresentados a seguir:

- **tipo de nuvens** – critério homogeneidade espacial: pelo menos 6 dos 9 pixels, centrados no ponto das observações do *biômetro* deve apresentar o mesmo tipo de nuvem.
- **IUV observado** – critério homogeneidade temporal: variância dos IUV centrados em 30 minutos no horário da passagem de satélite deve ser inferior ou igual a 15%.
- **R_{EF} observada por satélite** – critério de coerência entre GOES-10 e GOES-12: as R_{EF} do GOES-10 foram recalculadas utilizando o fator de correção $f = 1,45$.

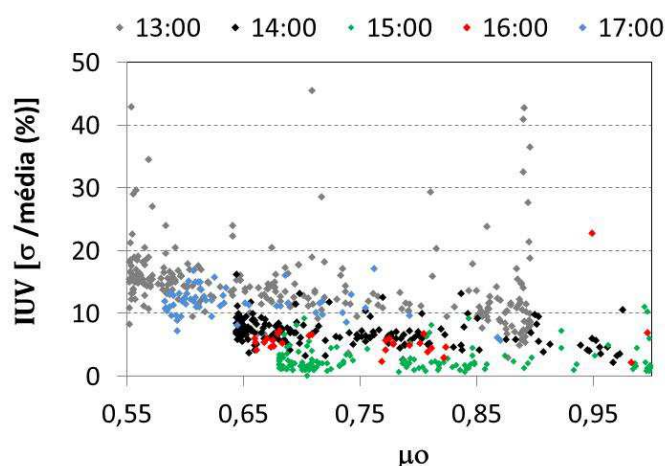


Figura 6.5 - Distribuição da variância do IUV observado e da refletância do GOES-10 em termos do cosseno do ângulo zenital (μ_0). A variância foi determinada através do desvio padrão normalizado pela média dos valores de IUV observados no intervalo de 30 minutos, centrados em determinados horários de imageamento do satélite GOES.

6.2.2. Relação entre CMF e a Refletância do Satélite GOES

Após a aplicação dos critérios e seleção do conjunto de dados, estes foram separados em dois grandes grupos. O primeiro grupo foi usado para parametrizar o CMF em termos da R_{EF} e o segundo, para validar a parametrização. Na ocasião, o CMF foi estimado pela razão entre o IUV observado à superfície e o IUV estimado pelo UVSIM nas condições de céu claro. E a R_{EF} é proveniente das observações do canal visível dos satélites GOES.

As Figuras 6.6 mostram que a relação entre o CMF e a R_{EF} obtidas através de dados observacionais à superfície e satélite, são similares àquelas encontradas teoricamente (Fig. 6.2). Porém, a relação observacional apresenta maior dispersão dos dados. Esta dispersão é esperada, pois as linhas de tendência foram obtidas por dados de fontes independentes (satélite, observação à superfície, estimativas do UVSIM). A tendência obtida teoricamente apresenta maior linearidade, porque é baseada nos fluxos que estão em balanço radiativo e calculada através de uma mesma ferramenta, o SBDART. Importante ressaltar que ambas são as mesmas análises aplicadas, apenas diferindo o tipo de tendência. Na Figura 6.6a é aplicado uma tendência linear, enquanto na Figura 6.6b foi utilizada uma tendência potencial em conjunto com informações de refletância da superfície.

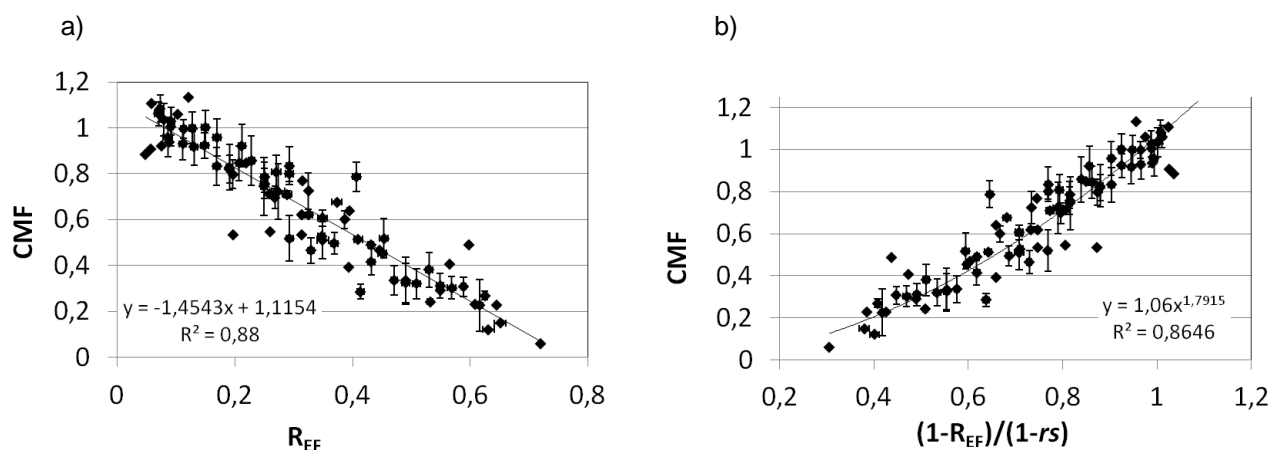


Figura 6.6 – Relação entre o CMF e a refletância do canal visível do Imageador do satélite GOES. Barras indicam o desvio padrão. a) tendência linear e b) tendência potencial considerando a r_s .

A **Figura 6.7** apresenta a relação (**CMF vs R_{EF}**), a qual foi ampliada para os diferentes tipos de nuvens (*cirrus*, *stratus*, *convectiva* e *cumulus*), conforme indicação do *Classificador de Nuvens*. As **Figuras 6.8** são similares às **Fig. 6.7**, porém o **CMF** é determinado utilizando a **Eq. 4.2b**. Desse modo, as parametrizações adquiridas entre **CMF vs R_{EF}** para os quatro tipos de nuvens mostraram que os valores de **CMF** encontrados neste trabalho diferem dos atualmente utilizados no UVSIM (linhas tracejadas). Verifica-se que os valores de **R_{EF}** para nuvens *cirrus* são inferiores a 0,3, enquanto que nuvens *convectivas* podem variar de 0,1 a 0,7. Por outro lado, nuvens do tipo *stratus* apresentam valores superiores a 0,3, atingindo valores próximos aos de nuvens *convectivas*. As equações que descrevem as linhas de tendências encontradas para cada tipo de nuvens são apresentadas na **Tabela 6.1** e, posteriormente, testadas como a nova parametrização para as estimativas do **CMF**. Apesar dos coeficientes de determinação (r^2), referentes às parametrizações, serem superiores a 0,7, verifica-se grande dispersão dos valores de **CMF** para uma mesma **R_{EF}** .

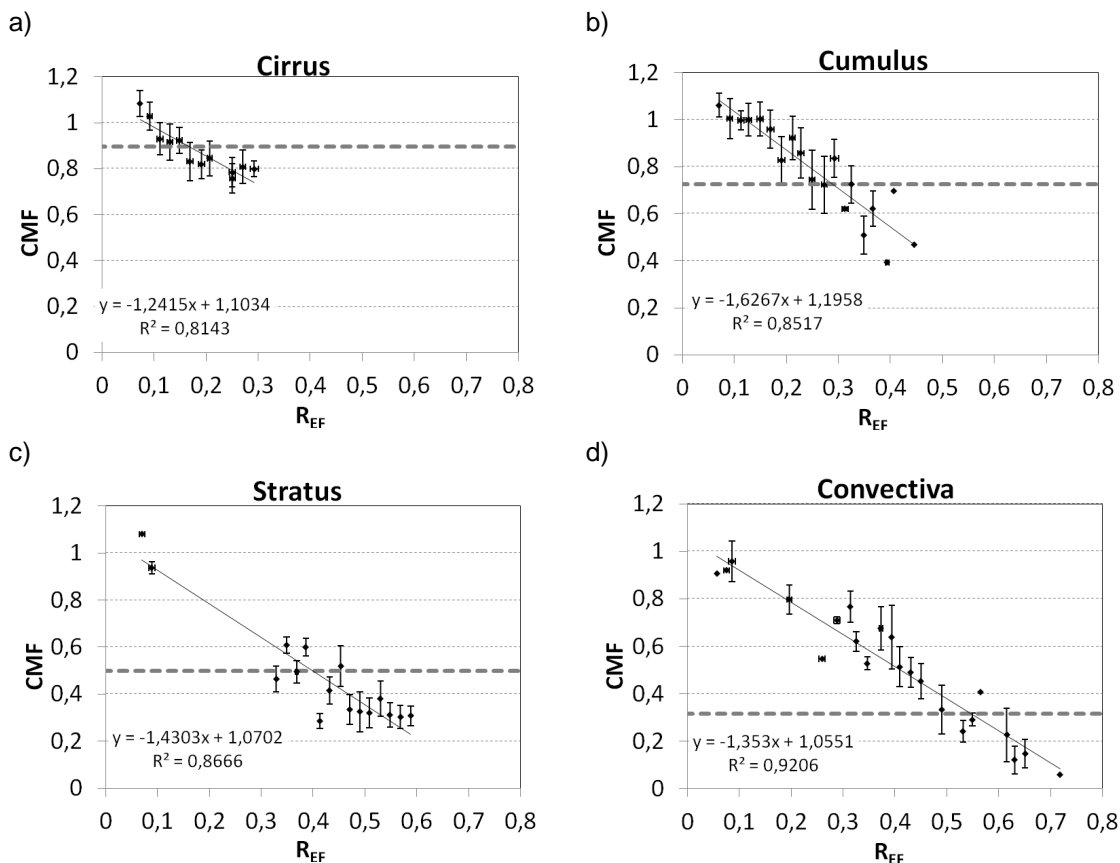


Figura 6.7 – Relação entre o CMF e a refletância do visível (650 nm) do GOES para quatro diferentes tipos de nuvens: a) *cirrus*, b) *cumulus*, c) *stratus* e d) *convectiva*. O CMF é determinado pela razão entre o IUV observado e aquele calculado pelo UVSIM nas condições de céu claro. Linha tracejada indica o CMF atualmente utilizado no UVSIM para cada tipo de nuvem.

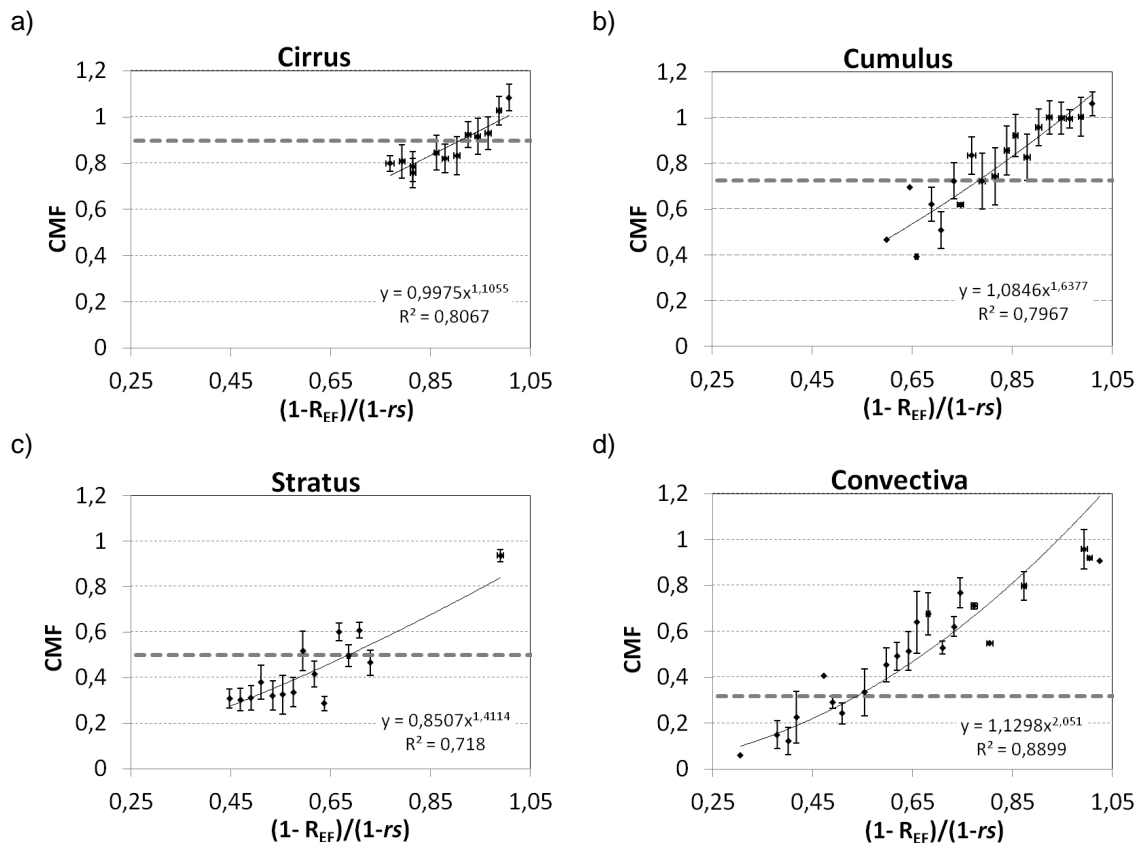


Figura 6.8 – Relação entre o CMF e a refletância do GOES normalizada pela refletância da superfície para quatro diferentes tipos de nuvens: a) *cirrus*, b) *cumulus*, c) *stratus* e d) *convectiva*. O CMF é determinado pela razão entre o IUV observado e aquele calculado pelo UVSIM nas condições de céu claro. Linha tracejada indica o CMF atualmente utilizado no UVSIM para cada tipo de nuvem.

Tabela 6.1 – Comparações do CMF utilizado atualmente no UVSIM e a parametrização em relação à R_{EF} do GOES para quatro tipos de nuvens, de acordo com indicações do classificador de nuvem. Os valores atuais são constantes para cada tipo de nuvem e baseiam-se na metodologia de Long et al. (1996).

<i>Tipo de Nuvem</i>	<i>Long et al. (1996)</i> CMF _{constante}	<i>Parametrização</i> CMF = $a + b \cdot R_{EF}$	r^2	<i>Parametrização</i> CMF $[(1 - R_{EF}) / (1 - r_s)]$	r^2	<i>N</i>
<i>Cirrus</i>	0,896	CMF = $-1,2415 R_{EF} + 1,1034$	0,8143	CMF = $0,9975 R_{EF}^{1,1055}$	0,8067	181
<i>Cumulus</i>	0,726	CMF = $-1,6267 R_{EF} + 1,1958$	0,8517	CMF = $1,0846 R_{EF}^{1,6377}$	0,7967	180
<i>Stratus</i>	0,50	CMF = $-1,4303 R_{EF} + 1,0702$	0,8666	CMF = $0,8507 R_{EF}^{1,4114}$	0,718	100
<i>Convectiva</i>	0,36	CMF = $-1,3530 R_{EF} + 1,0551$	0,9206	CMF = $1,1298 R_{EF}^{2,0510}$	0,8899	72
<i>Todos Tipos</i>	----	CMF = $-1,4540 R_{EF} + 1,1154$	0,8800	CMF = $1,0600 R_{EF}^{1,7915}$	0,8646	533

6.3. Validação do IUV nas condições de céu claro e com nuvens

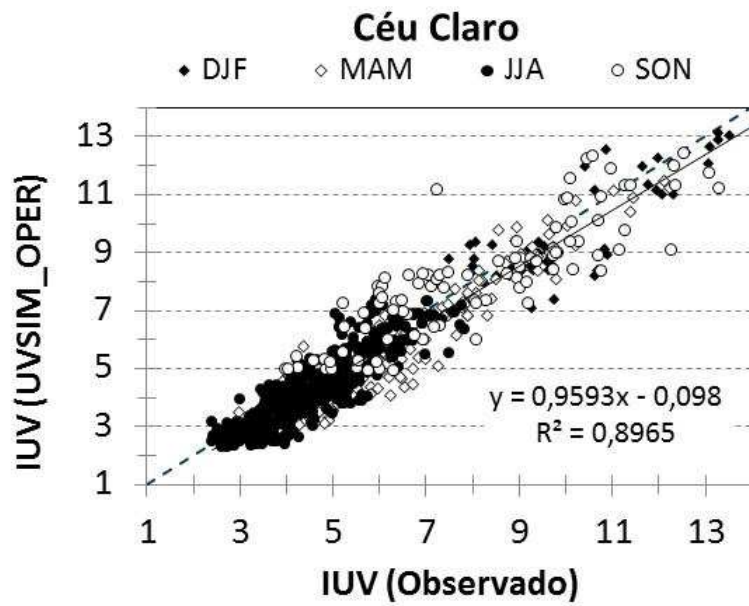
Nesta seção, o desempenho do modelo UVSIM é avaliado através da comparação dos IUV estimados nas condições de céu claro com aqueles observados à superfície. Posteriormente, os IUV em condições de nebulosidade empregando os valores de CMF constantes de Long et al. (1996) e aqueles obtidos neste trabalho (**Tabela 6.1**) são avaliados. Esta avaliação é realizada em termos do IUV, pois é a variável de interesse na DSA/CPTEC. Ressalta-se que o conjunto de dados utilizado na validação é distinto do empregado na construção da parametrização, mas passou pelos mesmos critérios de seleção descritos na metodologia.

O gráfico da **Figura 6.9a** apresenta a dispersão dos dados de IUV em condições de céu claro estimado pelo UVSIM e observado à superfície. O resultado indica bom acordo entre os dados ($r^2 = 0,8965$), certificando observacionalmente os resultados teóricos de Corrêa (2004). Adicionalmente, mostram que o desempenho do UVSIM é superior à estimativa de Costa et al. (2010), os quais encontraram valores de r^2 equivalentes a 0,65 em todas as condições de nebulosidade, sem discretização.

Adicionalmente, verificou-se por meio de estudo de sensibilidade que os aerossóis têm impacto significativo nos valores de IUV. Neste contexto, a relação entre IUV estimado e observado (UVSIM/OBS) para condições de céu claro foi analisada em termos da τ_{aer} . Ressalta-se que os dados de aerossol são provenientes de observações realizadas pela AERONET, através do fotômetro (23,56 °S e 46,74 °W) instalado próximo à localização do *biômetro*. Verifica-se que UVSIM/OBS tem tendência de diminuir com o aumento de τ_{aer} . A versão atual do UVSIM considera $\tau_{aer} = 0,2$ (*constante*), explicando parcialmente a razão dos IUV serem maiores (menores) do que as observações para baixos (altos) valores de τ_{aer} .

As **Figuras 6.10** e **6.11** apresentam a validação do IUV para os quatro tipos de nuvens. Os gráficos à esquerda utilizam o CMF constante na estimativa do IUV, sendo esta a metodologia operacional no CPTEC (UVSIM_OPER) atualmente. Gráficos à direita empregam o método empírico (UVSIM_PAR) na estimativa do IUV. A análise estatística de ambas as avaliações são apresentadas na **Tabela 6.2**.

a)



b)

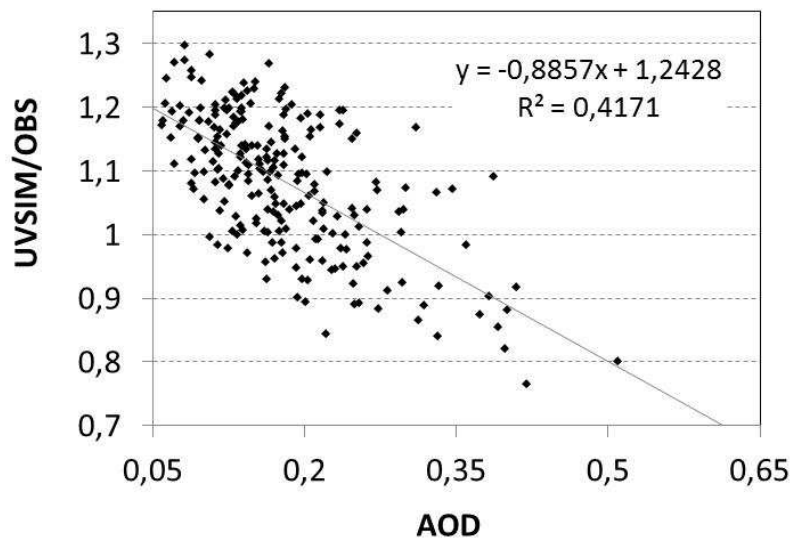


Figura 6.9 – *a)* Dispersão entre IUV observado e estimado nas condições de céu claro, de acordo com as indicações do classificador de nuvens. *b)* Fração do IUV estimado pelo UVSIM e aquela observada em função da profundidade óptica do aerossol.

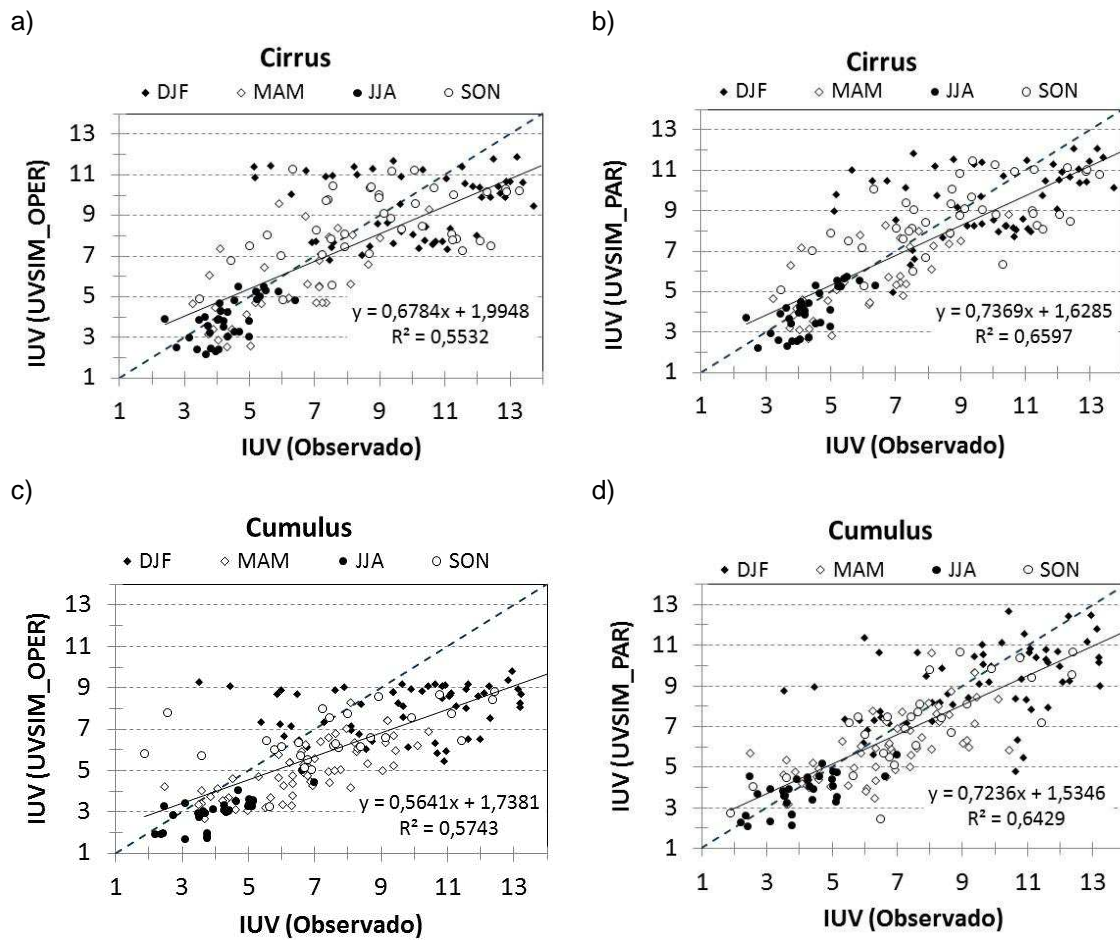


Figura 6.10 – Gráfico de dispersão entre os dados de IUV observados e estimados pelo UVSIM para nuvens do tipo *cirrus* e *cumulus*. UVSIM_OPER (a, c) indica as estimativas do IUV de céu nublado usando CMF constante (CMF- cirrus = 0,896 e CMF- cumulus = 0,726), versão operacional no CPTEC e UVSIM_PAR (b, d) indicam as estimativas usando as parametrizações definidas na Tabela 6.1.

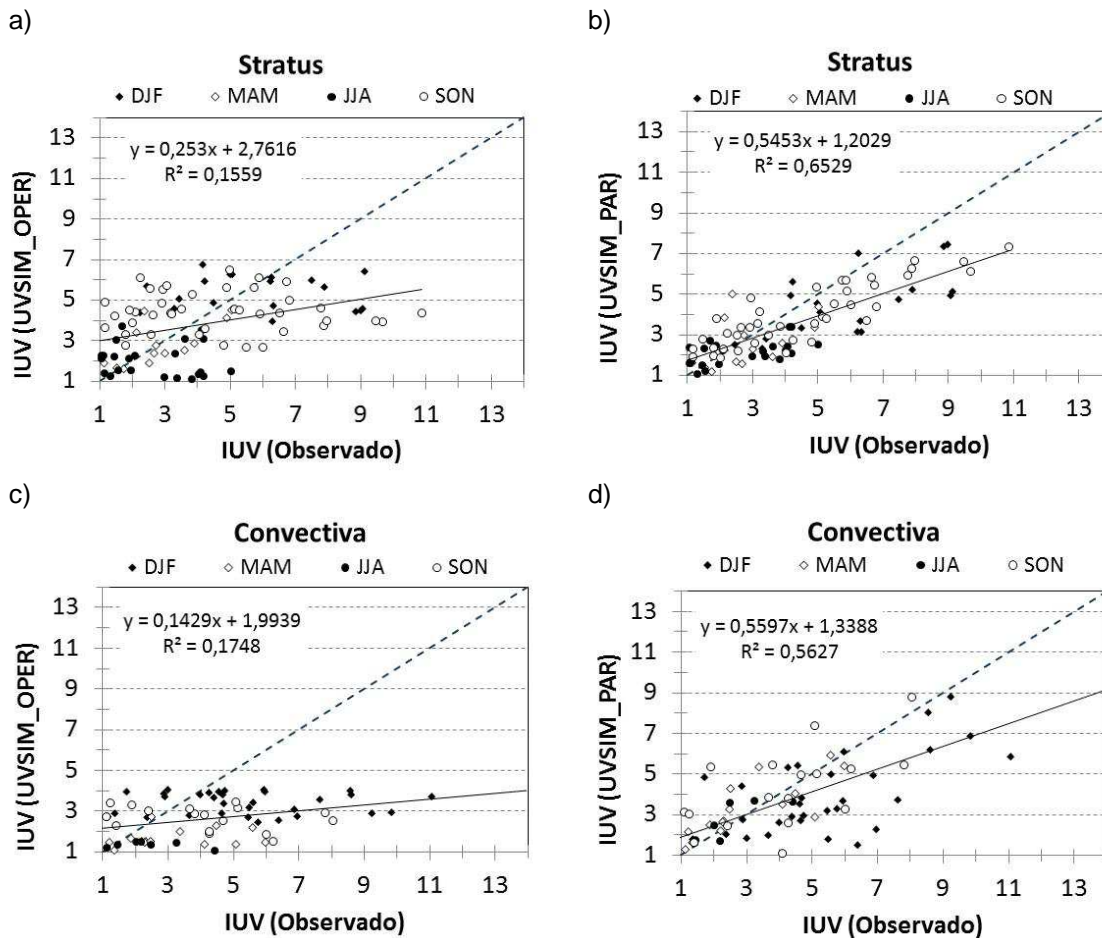


Figura 6.11 – Gráfico de dispersão entre os dados de IUV observados e estimados pelo UVSIM para nuvens do tipo *stratus* e *convectiva*. UVSIM_OPER (a, c) indica as estimativas do IUV de céu nublado usando CMF constante (CMF-*stratus* = 0,5 e CMF- *convectiva* = 0,316), versão operacional no CPTEC e UVSIM_PAR (b, d) indicam as estimativas usando as parametrizações definidas na Tabela 6.1.

Os valores de **CMF** atualmente utilizados (UVSIM_OPER) subestimam em todos os tipos de nuvens considerados. Os maiores valores de VIÉS são apresentados para nuvens do tipo *cumulus* e *convectivas*, -1,47 e -1,57, respectivamente. *Stratus* é o tipo de nuvem com menor VIÉS (= -0,29), entretanto possuem maior dispersão em torno do erro médio, resultando em baixa correlação ($r = 0,39$). A maior acurácia para o **CMF** em operação corresponde ao empregado em nuvens *cirrus*, ou seja, é o coeficiente com maior representação da transmitância do IUV na presença de nuvens, o qual é confirmado pela REMQ, sendo o menor entre os tipos de nuvens considerados e igual a 2,15.

Assim sendo, mostra-se que os valores de **CMF** atualmente utilizados nas ponderações de todos os tipos de nuvens possuem discrepâncias significativas e necessitavam de ajustes. A partir da parametrização apresentada neste trabalho, observa-se que, para certos tipos de nuvens, houve melhoras significativas. As melhores representações de nuvens obtidas com a parametrização foram em *stratus* ($r_{UVSIM_PAR} = 0,81$) e *convectivas* ($r_{UVSIM_PAR} = 0,75$). Entretanto, *convectiva* é o tipo de nuvem com menor acurácia após a parametrização RMSE=1,85.

Portanto, o **CMF** determinado pela parametrização continua subestimando as observações, porém introduz melhorias nas representações dos IUV. As médias e valores extremos (Min. e Max.) foram melhor simulados. A aplicação da parametrização mostra correlação em todos os tipos de nuvens maior que 0,75. Pelo teste de hipótese formal para correlação, a estatística do teste mostrou-se maior que o valor crítico.

Tabela 6.2 – Avaliação e comparação do IUV estimado com o CMF atualmente operacional na DSA/CPTEC (UVSIM_OPER) e desenvolvido neste trabalho (UVSIM_PAR). Min., Max., S^2_d e REMQ são as variáveis estatísticas mínimo, máximo, desvio padrão do VIÉS e Raiz do Erro Médio Quadrático, respectivamente.

	Min.	Max.	Média	VIÉS	S^2_d	REMQ	R
<i>Nuvem:</i> Céu Claro						<i>Nº Amostral:</i> 858	
<i>Observação:</i>	2,40	14,38	6,14				
<i>UVSIM_OPER:</i>	2,28	13,11	5,27	-0,33	0,73	0,64	0,95
<i>Nuvem:</i> Cirrus						<i>Nº Amostral:</i> 161	
<i>Observação:</i>	1,17	14,07	7,69				
<i>UVSIM_OPER:</i>	2,14	11,80	7,21	-0,48	1,62	2,15	0,75
<i>UVSIM_PAR:</i>	1,44	12,00	7,29	-0,40	1,42	1,84	0,82
<i>Nuvem:</i> Cumulus						<i>Nº Amostral:</i> 178	
<i>Observação:</i>	1,87	14,13	7,36				
<i>UVSIM_OPER:</i>	1,65	9,80	5,89	-1,47	1,37	2,39	0,76
<i>UVSIM_PAR:</i>	2,04	12,63	6,86	-0,50	1,29	1,82	0,80
<i>Nuvem:</i> Stratus						<i>Nº Amostral:</i> 97	
<i>Observação:</i>	0,87	10,87	4,10				
<i>UVSIM_OPER:</i>	1,09	6,70	3,82	-0,29	1,84	2,29	0,39
<i>UVSIM_PAR:</i>	0,79	7,36	3,42	-0,69	1,17	1,60	0,81
<i>Nuvem:</i> Convectiva						<i>Nº Amostral:</i> 78	
<i>Observação:</i>	0,53	14,47	4,09				
<i>UVSIM_OPER:</i>	1,02	4,02	2,58	-1,57	1,94	2,89	0,42
<i>UVSIM_PAR:</i>	0,53	11,07	3,63	-0,46	1,41	1,85	0,75

7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa visou estudar os processos físicos atmosféricos responsáveis pela atenuação da radiação UV à superfície, principalmente associados à nuvens. Uma nova metodologia de estimativa do Índice Ultravioleta (IUV) em diferentes condições de nebulosidade foi apresentada. Esta metodologia pode ser considerada pioneira na combinação de informações de satélites geostacionários e medidas de superfície na estimativa do parâmetro **CMF** (do inglês, **C**loud **M**odification **F**actor). Adicionalmente, os níveis de incidência do IUV na cidade de São Paulo (SP) foram conferidos. Os valores apresentados se assemelham àqueles que Corrêa e Ceballos (2010) analisaram para o mesmo período.

Posteriormente, foi examinada a atenuação realizada pelos principais componentes atmosféricos com influência nas irradiâncias do espectro da radiação UV (E_{GL} , E_{DIR} , E_{DIF} e E_{UP}). Nas análises individuais consideradas na **Tabela 5.1**, verificou-se que o espalhamento *Rayleigh* é o principal processo atenuador da radiação no UVA (~22%).

As simulações mostram que o O_3 é o composto atmosférico com maior impacto no UVB, sendo explicado pela localização da banda de absorção *Hartley*. Nas características consideradas (região tropical, concentração total de O_3 de 300 DU e ausência de aerossóis), este trabalho indica a incidência de 15% à superfície da irradiância no **TOA** para o UVB. No UVC, as sobreposições de efeitos resultam em extinção das irradiâncias à superfície. Essa afirmação é observada e explicada pelas análises dos efeitos individuais em que observaram a atenuação de ~58% do espalhamento *Rayleigh*, ~51% da absorção de O_2 e ~99% da absorção do O_3 nesse espectro.

Simulações sobre a influência dos aerossóis indicam que as interações no espectro do UV ocorrem em maior proporção no UVA. A formulação de tal hipótese surge pelo fato do UVA ser a região espectral que possui menor impacto dos constituintes atmosféricos (somente espalhamento *Rayleigh*) e dos aerossóis se localizarem, em sua maioria, nas camadas mais próximas à superfície. A verificação ocorreu através de observações no espectro UVA (CETESB) e simulações considerando aerossóis de regiões rurais e urbanas. A simulação na presença de aerossol característica de região urbana e $\tau_{aer} = 1$

em 550 nm descreveu o mesmo comportamento das observações à superfície. Deve-se ressaltar que, esta carga de aerossol é muito elevada, e não estavam disponíveis informações sobre calibração do instrumento de superfície.

Por meio do estudo teórico, observou-se que os aerossóis têm impactos na atenuação do IUV e, conforme Castanho (2005) apresenta, as variações de τ_{aer} na cidade de São Paulo (SP) resultam em atenuação de $\sim 2,5$ IUV. Adicionalmente, a avaliação entre as estimativas do modelo UVSIM de céu claro e observações com relação às informações da AERONET exhibe uma tendência de diminuição à medida que τ_{aer} aumenta. Conclui-se que o modelo tende a superestimar o IUV para situações em que $\tau_{aer} < 0,2$, e subestimar para $\tau_{aer} > 0,2$. Estes resultados sugerem que o efeito dos aerossóis deve ser incomparados no modelo UVSIM utilizando informações de satélites. Importante mencionar que a nova geração de satélites da série GOES-R terá sensores com a capacidade de monitorar os aerossóis atmosféricos, sendo uma oportunidade para a modelagem de transferência radiativa.

Os estudos teóricos apresentados nesta pesquisa sobre a interação da radiação UV com diferentes parâmetros de nuvens concluíram que a modificação da altura e raio efetivo de nuvens não altera o comportamento nas irradiâncias analisados, pois as maiores modificações são observadas analisando a τ_{nuvens} . Neste contexto, as análises realizadas nas irradiâncias com presença de nuvens concluíram que nuvens opticamente finas interagem na transformação da E_{DIR} em E_{DIF} e nuvens mais espessas, por apresentarem maior intensidade de espalhamento caracterizado pelo espalhamento múltiplo, extinguem as irradiâncias à superfície e aumentam as E_{UP} .

Baseando-se nas observações teóricas sobre o comportamento das irradiâncias em diferentes τ_{nuvens} , a avaliação entre o CMF e a R_{EF} foi estudada. Na análise desta relação em comprimentos de onda específicos, observou-se que os menores comprimentos de onda apresentam pequeno acréscimo nas R_{EF} em determinação do CMF . Isto é devido a amplitude do espalhamento molecular ser maior para comprimentos de onda menores. Na parte experimental, o grau de determinação (r^2) na consideração de todos os casos é 0,88, apresentando linearidade entre os dados.

Os satélites GOES-12 e GOES-10 operavam no período do estudo. Ambos imageadores possuíam valores distintos de fator de correção f , que é aplicado pelo DSA/CPTEC. Portanto, realizou-se a correção de f nas \mathbf{R}_{EF} referentes ao GOES-10. Posteriormente, as \mathbf{R}_{EF} obtidas pelos sensores a bordo dos satélites foram ponderadas em termos da rs (refletância da superfície), para melhor descrever as variações causadas pela nebulosidade. Assim sendo, a $rs = 0,08$ foi obtida através do 1º quartil dos dados de refletância na condição de céu claro de ambos os satélites.

O método mostrou que a variação do CMF pode ser explicada pela \mathbf{R}_{EF} através de uma tendência linear para cada tipo de nuvem, que difere dos valores constantes geralmente indicados na literatura. Na comparação entre os valores de CMF encontrados neste estudo (CMF parametrizado, $\mathbf{CMF_PAR}$) com aqueles atualmente empregados na DSA/CPTEC (CMF operacional, $\mathbf{CMF_OPER}$, Long et al., 1996), foram obtidos os seguintes resultados:

- *cumulus* ($0,4 < \mathbf{CMF_PAR} < 1,1$, $\mathbf{CMF_OPER} = 0,726$);
- *stratus* ($0,3 < \mathbf{CMF_PAR} < 1$, $\mathbf{CMF_OPER} = 0,5$);
- *convectiva* ($0,1 < \mathbf{CMF_PAR} < 0,9$, $\mathbf{CMF_OPER} = 0,36$);
- *cirrus* ($0,8 < \mathbf{CMF_PAR} < 1$, $\mathbf{CMF_OPER} = 0,89$).

As parametrizações para os tipos de nuvens *cirrus*, *cumulus*, *stratus* e *convectivas* apresentam grau de determinação (r^2) igual a 0,80, 0,79, 0,71, 0,88, respectivamente. A fim de analisar a relação entre observações à superfície e estimativas do UVSIM, os dados foram reprocessados utilizando os CMF atualmente acoplados ao modelo. Nessa avaliação, a utilização de ambos valores de CMF para cada tipo de nuvem subestima as observações em todas as considerações de nuvens. Entretanto, a parametrização apresenta melhorias, as quais podem ser observadas pelo r^2 . Nuvens do tipo *stratus* (r^2 atual 0,15 para 0,65) e *convectiva* (r^2 atual 0,17 para 0,56) são os tipos de nuvens que apresentaram as melhores modificações em suas representações.

Os valores de IUUV de céu claro estimados pelo UVSIM também foram avaliados e indicam que o modelo apresenta excelente acordo com os dados observacionais de $r^2 =$

0,90 e REMQ = 0,64. Ressalta-se que em todas as análises realizadas, há 95% de confiança para apoiar as correlações estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROSOL ROBOTIC NETWORK – AERONET. **Dados de profundidade óptica do aerossol**. Disponível em: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_one_station_opera_v2_new?site=Sao_Paulo&nachal=2&level=3&place_code=10>. Acesso em: 15 set. 2015.

AJELLA, J. M. Emission cross sections of N₂ in the vacuum ultraviolet by electron impact. **The Journal of Chemical Physics**, v. 53, n. 3, p. 1156-1165, 1970.

ALLAART, M.; VAN-WEELE, M.; FORTUIN, P.; KELDER, H. An empirical model to predict the UV-index based on solar zenith angles and total ozone. **Meteorological Applications**, v. 11, n. 1, p. 59-65, 2004.

AMBACH, W.; BLUMTHALER, M.; SHÖPF, T. Increase of biologically effective ultraviolet radiation with altitude. **Journal of Wilderness Medicine**, v. 4, n. 2, p. 189-197, 1993.

BERNHARD, G.; SECKMEYER, G. Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. 12, p. 14321-14345, 1999.

BERTAGNOLLI, C.; PERES, R. S.; CARBONE, S.; MANFRO, R.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, A. A. M. P.; NOZAWA, H.; YAMAMOTO, H.; SCHUCH, N. J. Estimativa para cálculo de ozônio total usando dados de UVB e UVA do Observatório Espacial do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 2, p. 9-15, 2007.

BIRD, R.; RIORDAN, C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. **American Meteorological Society**, v.25, n. 1, p. 87-97, 1986.

BJÖRN, L. O.; CALLAGHAN, T. V.; GEHRKE, C.; JOHANSON, U.; SONESSON, M. Ozone depletion, ultraviolet radiation and plant life. **Chemosphere: Global Change Science**, v. 1, n. 4, p. 449-454, 1999.

BLUMTHALER, M.; AMBACH, W.; SALZBERG, M. Effects of cloudiness on global and diffuse UV irradiance in a high-mountain area. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 50, n. 1-2, p. 23-30, 1994.

BLUMTHALER, M.; AMBACH, W.; ELLIGER, R. Increase in solar UV radiation with altitude. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 39, n. 2, p. 130-134, 1997.

BOTTINO, M. J.; CEBALLOS, J. C. Daytime cloud classification over South American region using multispectral GOES-8 imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 1, p. 1-19, 2014.

BUCHARD, V.; BROGNIEZ, C.; AURIOL, F.; BONNEL, B.; LENOBLE, J.; TANSKANEN, A.; BOJKOV, B.; VEEFKIND, P. Comparison of OMI ozone and UV

irradiance data with ground-based measurements at two French sites. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, n. 16, p. 4517-4528, 2008.

BUCHOLTZ, A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. **Applied Optics**, v. 34, n. 15, p. 2765-2773, 1995.

CALBÓ, J.; PAGÈS, D.; GONZÁLEZ, J.A. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. **Reviews of Geophysics**, v. 43, n. 2, p. 1-28, 2005.

CALDWELL, M. M.; BALLARÉ, C. L.; BORNMAN, J. F.; FLINT, S. D.; BJÖRN, L. O.; TERAMURA, A. H.; KULANDAIVELU, G.; TEVINI, M. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors. **Photochem. Photobiol. Sci**, v. 2, p.29-38, 2003.

CASTANHO, A. D. A. **Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo**. 2005. 250 f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CEBALLOS, J. C. ; MACEDO, L. O. Uma calibração preliminar do canal VIS do sensor GOES 10 Imager. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 6821-6828. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15852-PRE/10462). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.07.39>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Dados de radiação ultravioleta A (UVA)**. Disponível em: <<http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

CHADYŠIENE, R.; GIRGŽDYS, A. Ultraviolet radiation albedo of natural surfaces. **Journal of Environmental Engineering and Landscape**. v. 16, n. 2, p. 83-88, 2008.

CHOU, M. D.; LEE, K. T. Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, n. 8, p. 1203-1208, 1996.

CORRÊA, M. P. **Índice ultravioleta: avaliações e aplicações**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003a.

CORRÊA, M. P. **Guia do usuário: projeto de monitoramento do IUV e Ozônio – UVSIM e OFP**. Cachoeira Paulista: Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, CPTEC/INPE, 2003b. 14 p.

CORRÊA, M. P. Algoritmos para cálculos de transferência radiativa na região ultravioleta do espectro eletromagnético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004. p. 1-17. (INPE-11867-PRE/7214).

CORRÊA, M. P.; CEBALLOS, J. C. UVB Surface Albedo Measurements using Biometers. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 4, p. 411-416, 2008.

CORRÊA, M. P.; CEBALLOS, J. C. Solar ultraviolet radiation measurements in one of the most populous cities of the world: Aspects related to skin cancer cases and vitamin D availability. **Photochemistry and Photobiology**, v. 86, n. 2, p. 438-444, 2010.

COSTA, S. M. S.; RODRIGUES, M. L.; CEBALLOS, J. C.; CORRÊA, M. P. Índices de radiação ultravioleta: Estudo comparativo entre modelo de transferência radiativa e observações à superfície. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. **Anais...** Belém: SBMET, 2010.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC.

Categorias e distribuição espacial do IUV. Disponível em:

<<http://satelite.cptec.inpe.br/uv/>>. Acesso em: 18 set. 2014.

DIFFEY, B. L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. **Physics in Medicine and Biology**, v. 36, n. 3, p. 299-328, 1991.

DIFFEY, B. Climate change, ozone depletion and the impact on ultraviolet exposure of human skin. **Physics in Medicine and Biology**, v. 49, n. 1, p. 1-11, 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. DIVISÃO DE SATÉLITES E SISTEMAS AMBIENTAIS - DSA. **Dados de índice ultravioleta para céu claro, refletância e classificador de nuvens.** Disponível em:

<<http://satelite.cptec.inpe.br/home>>. Acesso em: 16 fev. 2015.

FACINA, T. Estimativas 2012 – Incidência de câncer no Brasil. **Revista Brasileira de Cancerologia**, v. 57, n. 4, p. 557, 2011.

FREDERICK, J. E.; SNELL, H. E.; HAYWOOD, E. K. Solar ultraviolet radiation at the Earth's surface. **Photochemistry and Photobiology**, v. 50, p. 443 – 450, 1989.

GAUTIER, C.; LANDSFELD, M. Surface solar radiation flux and cloud radiative forcing for the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Southern Great Plains (SGP): A satellite, surface observations, and radiative transfer model study. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 54, n. 10, p. 1289-1307, 1997.

HÄDER, D. P. Effects of solar UV-B radiation on aquatic ecosystems. **Advances in Space Research**, v. 26, n. 12, p. 2029-2040, 2000.

HARSHVARDHAN; KING, M. D. Comparative accuracy of diffuse radiative properties computed using selected multiple scattering approximations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 50, n. 2, p. 247-259, 1993.

HERMAN, J. R.; KROTKON, N.; CELARIER, E.; LARKO, D.; LABOW, G. Distribution of UV radiation at the Earth's surface from TOMS-measured UV-backscattered radiances. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. 10, p. 12059-12076, 1999.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION - ICNIRP. VECCHIA, P.; HIETANEN, M.; STUCK, B. E.;

DEVENTER, E.; NIU, S. (Ed.). **Protecting workers from ultraviolet radiation**. Meckenheim: DCM, 2007. 110 p.

Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes de Silva – INCA. GUIMARÃES, B. N.; DA SILVA, C.; NORONHA, C. P.; SILVA, G. S.; OLIVEIRA, J. F. P.; PEREIRA, K. A.; SANTOS, M. O.; REBELO, M. S.; ARABORI, M. V. K.; REIS, R. S.; TAVARES NETO, R.; DUCA, V. E. L. A. (Ed.). **Estimativa 2014: incidência de câncer no Brasil**. Rio de Janeiro: INCA, 2014. 126 p.

JACOBS, D. J. **Introduction to atmospheric chemistry**. New Jersey: Princeton University Press, 1999.

JENSEN, L.; ZHAO, L. L.; AUTSCHBAH, J.; SCHATZ, G. C. Theory and method for calculating resonance Raman scattering from resonance polarizability derivatives. **The Journal of Chemical Physics**, v. 123, n. 17, p. 174110, 2005.

JOSEFSSON, W. **Solar ultraviolet radiation in Sweden**. Sweden: SMHI, 1986. v. 53, 71 p.

JOSEPH, J. H.; WISCOMBE, W. J. The Delta-Eddington Approximation for radiative flux transfer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 12, p. 2452-2459, 1976.

KALLISKOTA, S.; KAUROLA, J.; TAALAS, P.; HERMAN, J. R.; CELARIER, E. A.; KROTKOV, N. A. Comparison of daily UV doses estimated from Nimbus 7/TOMS measurements and ground-based spectroradiometric data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. 4, p. 5059-5067, 2000.

KAZANTZIDIS, A.; BAIS, A. F.; GRÖBNER, J.; HERMAN, J. R.; KAZADZIS, S.; KROTKOV, N.; KYRÖ, E.; DEN OUTER, P. N.; GARANE, K.; GÖRTS, P.; LAKKALA, K.; MELETI, C.; SLAPER, H.; TAX, R. B.; TURUNEN, T.; ZEREFOS, C. S. Comparison of satellite-derived UV irradiances with ground-based measurements at four European stations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. 13, p. 1-7, 2006.

KING, M. D.; HARSHVARDHAN. Comparative accuracy of selected multiple scattering approximations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 8, p. 784-801, 1986.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E.; LEME, N. P.; SILVA, A. A. A Variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 1, p. 63-74, 2000.

KITZMANN, D.; PATZER, A. B. C.; VON PARIS, P.; GODOLT, M.; STRACKE, B.; GEBAUER, S.; GRENFELL, J. L.; RAUER, H. Clouds in the atmospheres of extrasolar planets. Climatic effects of multi-layered clouds for Earth-like planets and implications for habitable zones. **Astronomy & Astrophysics Manuscript**, v. 511, n. 66, p. 1-14, 2010.

KLIGERMAN, J. Estimativas sobre a incidência e mortalidade por câncer no Brasil – 2002. **Revista Brasileira de Cancerologia**, v. 48, n. 2, p. 175-179, 2002.

KYLLING, A.; BAIS, A. F.; BLUMTHALER, M.; SCHREDER, J.; ZEREFOS, C. S.; KOSMIDIS, E. Effect of aerosols on solar UV irradiances during the Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation campaign. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 20, p. 26051-26060, 1998.

LEMUS-DESCHAMPS, L; RIKUS, L. The operational Australian ultraviolet index forecast 1997. **Meteorological Applications**, v. 6, n. 3, p. 241-251, 1999.

LENOBLE, J. Modeling of the influence of snow reflectance on ultraviolet irradiance for cloudless sky. **Applied Optics**, v. 37, n.12, p. 2441-2447, 1998.

LEVELT, P. F.; VAN DEN OORD, G. H. J.; HILSENATH, E.; LEPPELMEIER, G. W.; BHARTIA, P. K. (Ed.). **OMI algorithm theoretical basis document – volume II. OMI ozone products**. Washington: NASA-OMI, 2002.

LINCOLN, V. A. C. **Avaliação da radiação UV na córnea humana em procedimentos oftalmológicos**. 2012. 192 f. Tese (Doutorado em Direito) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LIU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2002. 583 p.

LONG, C. S.; MILLER, A. J.; LEE, H. T.; WILD, J. D.; PRYWARTY, R. C.; HUFFORD, D. Ultraviolet Index Forecast Issued by the National Weather Service. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 4, p. 729-748, 1996.

LÓPEZ, M. L.; PALANCAR, G. G.; TOSELLI, B. M. Effect of different type of cloud on surface UV-B and total solar irradiance at southern mid-latitudes: CMF determinations at Córdoba, Argentina. **Atmospheric Environmental**. v. 43, n. 19. p. 3130-3136. 2009.

MARSHAK, A.; KNYAZIKHIN, Y.; CHOU, J. C.; WISCOMBE, W. J. Spectrally invariant approximation within atmospheric radiative transfer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 68, n. 12, p. 3094-3111, 2011.

NARAYANAN, D. L.; SALADI, R. N.; FOX, J. L. Review Ultraviolet radiation and skin cancer. **International Journal of Dermatology**, v. 49, p. 978–986, 2010.

PALTRIDGE, G. W.; BARTON, I. J. **Erythmal ultraviolet radiation distribution over Australia : the calculations, detailed results and input data** : including frequency analysis of observed Australian cloud cover. Melbourne: C.S.I.R.O., 1978. 48 p.

PAUL, N.; RASANAYAGAM, S.; MOODY, S. A.; HATCHER, P. E., AYRES, P. G. The role of interaction between trophic level in determining the effects of UV-B on terrestrial ecosystems. ROZEMA, J.; GIESKES, W.W. C.; VAN DE GEIJN, S. C.; NOLAN, C.; DE BOOIS, H. (Ed.). **UV-B and Biosphere**. Amsterdã: Springer Netherlands, 1997. v. 128, cap. 5, p. 297-308.

PETTY, G.W. **A first course in atmospheric radiation**. 2. ed. Wisconsin: Sundog Publishing Madison, 2004. 454 p.

PORFÍRIO, A. C. S.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; LEMES, M. A. M.; An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil. **Energy**, v. 44, p. 584-592, 2012.

RICCHIAZZI, P.; YANG, S.; GAUTIER, C.; SOWLE, D. SBDART: A Research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, p. 2101-2114, 1998.

RIEDER, H. E.; STAEHELIN, J.; WEIHS, P.; VUILLEUMIER, L.; MAEDER, J. A.; HOLAWE, F.; BLUMTHALER, M.; LINDFORS, A.; PETER, T.; SIMIC, S.; SPICHTINGER, P.; WAGNER, J. E.; WALKER, D.; RIBATET, M. Relationship between high daily erythemal UV doses, total ozone, surface albedo and cloudiness: An analysis of 30 years of data from Switzerland and Austria. **Atmospheric Research**, v. 98, n. 1, p. 9-20, 2010.

ROSSOW, W. B.; SCHIFFER, R. A. Advances in understanding clouds from ISCCP. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, n. 11, p. 2261-2287, 1999.

SCHINKE, R.; MCBANE, G. C. Photodissociation of ozone in the Hartley band: Potential energy surfaces, nonadiabatic couplings, and singlet/triplet branching ratio. **The Journal of Chemical Physics**, v. 132, n. 4, p. 44305, 2010.

SECKMEYER, G.; BAIS, A.; BERNHARD, G.; BLUMTHALER, M.; BOOTH, C. R.; DISTERHOFT, P.; ERIKSEN, P.; MCKENZIE, R.L.; MIYAUCHI, M.; ROY, C. **Instruments to measure solar ultraviolet irradiance, Part I: spectral instruments**. World Meteorological Organization, Global Atmosphere Watch, Report 125, 30 p. 2001.

SHETTLE, E. P.; FENN, R. W. Models of the atmospheric aerosols and their optical properties. In: AGARD CONFERENCE PROCEEDINGS, OPTICAL PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE, 1975, Lyngby, Denmark. **Proceedings...** Lyngby, 1975. 16 p.

SILVA, A. A. **A espessura óptica de aerossóis na banda do UV-B**. 2001. 129 p. (INPE-8754-TDI/797). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.02.22.02.57>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

SIVASAKTHIVEL, T.; REDDY, K. K. S. K. Ozone layer depletion and its effects: A Review. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 2, n. 1, p. 30, 2011.

SOUZA, J. D.; SILVA, B. B.; CEBALLOS, J. C.; Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 1, p. 31-44, 2008.

THALMEN, R.; ZARZANA, K. J.; TOLBERT, M. A.; VOLKAMER, R. Rayleigh scattering cross-section measurements of nitrogen, argon, oxygen and air. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 147, p. 171-177, 2014.

WALLACE, J.; HOBBS, P.V. **Atmospheric science: an introduction survey**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006. 505 p.

WEBB, A. R.; HOLICK, M. F. The Role of Sunlight in the Cutaneous Production of Vitamin D3. **Annual Review of Nutrition**, v. 8, n. 1, p. 375-399, 1988.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Índice UV solar mundial** – guía práctica. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD; ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL; PROGRAMA DE LÁS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE; COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN NO IONIZANTE (Org.). Ginebra: OMS, 2003. 34 p. Disponível em: < <http://www.who.int/uv/publications/globalindex/es/>>. Acesso em: 19 maio 2014.

YAMASOE, M. A. **Apostila da disciplina meteorologia física II** – ACA 0326. 2006. 110 f. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2006.

YOUL, P. H.; JANDA, M.; ELWOOD, M.; LOWE, J. B.; RING, I. T.; AITKEN, J. F. Who attends skin cancer clinics within a randomized melanoma screening program?. **Cancer Detection and Prevention**, v. 30, n. 1, p. 44-51, 2006.