

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

ANÁLISE ESPECTRAL DE DIFERENTES RESPOSTAS FOTOBIOLÓGICAS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Ana Letícia Campos Yamamoto

Itajubá, MG, Brasil

2017

ANÁLISE ESPECTRAL DE DIFERENTES RESPOSTAS FOTOBIOLÓGICAS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

por

Ana Letícia Campos Yamamoto

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

Orientador: Marcelo de Paula Corrêa

Itajubá, MG, Brasil 2017

Universidade Federal de Itajubá Instituto de Recursos Naturais Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

ANÁLISE ESPECTRAL DE DIFERENTES RESPOSTAS FOTOBIOLÓGICAS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

elaborada por

Ana Letícia Campos Yamamoto

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Marcelo de Payla Corrêa, Dr. (UNIFEI) (Presidente/Orientador)

Rero Marques Rubinger, Dr. (UNIFEI)

ne Vieno Mattion

Enrique Vieira Mattos, Dr. (UNIFEI)

Itajubá, 16 de novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da minha vida e por me dar força, coragem e entendimento durante minha caminhada.

Minha eterna gratidão aos meus pais pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa pela dedicação, confiança, oportunidade de crescimento, e por ter se tornado minha inspiração acadêmica. Meus agradecimentos também a todo corpo docente do curso de Ciências Atmosféricas, pelo auxílio e ensinamentos transmitidos.

Agradeço especialmente a amiga Ana Flávia pela amizade e convivência durante esses quatro anos. Você se tornou meu exemplo de determinação e fez com essa caminhada acadêmica se tornasse mais agradável e com certeza, mais alegre. Agradeço imensamente pelo companheirismo e apoio desde o início.

Agradeço aos colegas e a todos que direta, ou indiretamente, contribuíram para a minha formação.

Dedico a duas pessoas que mais admiro nesse mundo, meus pais Sergio e Claudete.

RESUMO

Monografia de Graduação Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

ANÁLISE ESPECTRAL DE DIFERENTES RESPOSTAS FOTOBIOLÓGICAS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

AUTOR(A): ANA LETÍCIA CAMPOS YAMAMOTO ORIENTADOR: MARCELO DE PAULA CORRÊA Local e Data da Defesa: Itajubá, 16 de novembro de 2017.

Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento do modelo de transferência radiativa (MTR) LibRadTran/UVSPEC, para cálculos espectrais de radiação ultravioleta (R-UV) ponderadas para diferentes respostas fotobiológicas (RF), em função das propriedades ópticas de aerossóis (POA). Foram avaliadas medidas espectrais de R-UV ponderadas pelas RF para síntese de vitamina D (VitD), desenvolvimento de câncer de pele não melanoma (NMSC), eritema (ERY), elastose (ELAST), imunossupressão (IMMSUP), conjuntivite (CONJ), fotoceratite (KERAT), danos generalizados às plantas (GPD), danos generalizados às plantas altas (GhPD) e inibição da fotossíntese (InP). Os resultados mostraram que, no intervalo espectral onde houve irradiância ponderada e ângulos zenitais solares inferiores a 30°, os desvios máximos (-8,4%) foram observados no espectro UVB. Nessa faixa do espectro, todos os desvios diminuíram ao se considerar as POA como parâmetro de entrada no MTR. Em geral, o MTR subestima (desvios negativos) os fluxos de R-UV. Por outro lado, no caso do espectro UVA, 87,5% das RF foram superestimadas. Além disso, os erros aumentam, de -3,4 a 4,4%, nas RF que dependem significativamente da banda UVA (ERY, NMSC, IMMSUP, ELAST, KERAT e GhPD). Nesse caso, a inserção das POA no MTR não indicou melhoria nas estimativas. Esse fato pode estar relacionado à dificuldade de reproduzir o espalhamento exercido pelos aerossóis e à fraca absorção pelo ozônio nessa banda espectral. É válido ressaltar que as escolhas de POA indicam melhor reprodução pelo MTR no intervalo espectral de maior relevância para as RF, ou seja, apontam erros mais representativos, de até -4,0% (inferior ao erro instrumental), se comparados a todo intervalo espectral. Contudo há necessidade de análises mais detalhadas em relação à sensibilidade dos MTR na região UV.

Palavras-chave: Radiação Ultravioleta. Respostas fotobiológicas. Modelo de Transferência radiativa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Eritema
Figura 2. Carcinoma Basocelular7
Figura 3. Carcinoma Espinocelular7
Figura 4. Melanoma Cutâneo8
Figura 5. Fotoenvelheciemento em região exposta ao sol8
Figura 6. Elastose solar9
Figura 7. Conjuntivite10
Figura 8. Fotoceratite10
Figura 9. Funções RF para: (a) desenvolvimento de câncer de pele não melanoma (NMSC) (de Gruijl e Van der Leun, 1994); (b) formação de eritema (ERY) (McKinlay e Diffey, 1986) e (c) síntese de vitamina D (VitD) (CIE, 2006)
Figura 10. Funções RF para: (a) elastose (ELAST) (Wulf et al., 1989) e (b) Imunossupressão (IMMSUP) (de Fabo et al., 1990)12
Figura 11. Funções RF para enfermidades nos olhos: (a) Conjuntivite (CONJ) (Steck, 1986) e (b) fotoceratite (KERAT) (Steck, 1986)13
Figura 12. Funções RF para: (a) danos generalizados às plantas (GPD) (Caldwell et al., 1986); (b) danos generalizados às plantas altas (GhPD) (Flint e Caldwell, 2003) e (c) inibição da fotossíntese (InP) (Caldwell, 1971)13
Figura 13. Localização do sítio experimental14
Figura 14. Espectrorradiômetro Bentham DMc150 Double Monochromator15
Figura 15. Série temporal de conteúdo total de ozônio (DU) entre os anos de 2004 e 2016 para a localidade de Granada
Figura 16. Boxplot de conteúdo total de ozônio (DU) para a localidade de Granada. 18
Figura 17. Série temporal de profundidades ópticas dos aerossóis entre os anos de 2008 e 2013 para a localidade de Granada19
Figura 18. Boxplot de profundidades ópticas dos aerossóis para a localidade de Granada

Figura 19. Boxplot da cobertura de nuvens (octas) mensal para a localidade de Granada20
Figura 20. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para síntese de vitamina D (VitD)21
Figura 21. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para eritema (ERY)21
Figura 22. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para câncer de pele não melanoma (NMSC)
Figura 23. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para imunossupressão (IMMSUP)21
Figura 24. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para elastose (ELAST)22
Figura 25. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para VitD
Figura 26. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para ERY23
Figura 27. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para NMSC
Figura 28. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para IMMSUP23
Figura 29. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para ELAST24
Figura 30. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para conjuntivite (CONJ)25
Figura 31. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para fotoceratite (KERAT)25
Figura 32. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para CONJ26
Figura 33. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para KERAT

Figura 34. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para danos generalizadaos às plantas (GPD)27	7
Figura 35. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para danos generalizados às plantas altas (GhPD)27	7
Figura 36. Irradiâncias espectrais UV (em Wm ⁻² nm ⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para inibição da fotossíntese (InP)27	7
Figura 37. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para GPD	3
Figura 38. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para GhPD29	9
Figura 39. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para InP29)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do tipo de pele humana conforme a susceptibilidade à formação do eritema.	6
Tabela 2. Desvios máximos observados nas bandas espectrais UVB e UVA, em função do ângulo zenital solar e POA, para cada RE estudada	30
Tabela 3. Desvios máximos observados nos intervalos espectrais de máxima irradiância ponderada pela RE, em função do ângulo zenital solar e POA	

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- I_λ- Irradiância espectral
- ε_λ Função resposta fotobiológica
- S Irradiância biologicamente ativa
- AOD Aerosol optical depth (Profundidade óptica do aerossol)
- AZS Ângulo zenital solar
- CIE Commission Internationale de l'Éclairage (Comissão Internacional de Iluminação)
- CPNM/NMSC Câncer de pele não melanoma (Non-melanoma skin cancer)
- CTO Conteúdo total de ozônio
- MC Melanoma cutâneo
- MTR Modelo de transferência radiativa
- PAR Photosynthetically active radiation (radiação fotossinteticamente ativa)
- POA Propriedades ópticas dos aerossóis
- RF Resposta fotobiológica
- RF CONJ Resposta fotobiológica para conjuntivite
- RF ELAST Resposta fotobiológica para a elastose
- RF ERY Resposta fotobiológica para formação do eritema
- RF GhPD Resposta fotobiológica para danos generalizadas às plantas altas
- RF GPD Resposta fotobiológica para danos generalizados às plantas
- RF IMMSUP Resposta fotobiológica para a imunossupressão
- RF InP Resposta fotobiológica para a inibição da fotossíntese
- RF KERAT Resposta fotobiológica para a fotoceratite
- RF NMSC Resposta fotobiológica para o desenvolvimento do câncer de pele não melanoma
- RF VitD Resposta fotobiológica para a síntese de vitamina D
- R-IV Radiação infravermelha
- R-UV Radiação ultravioleta
- R-UVA Radiação ultravioleta banda "A"
- R-UVB Radiação ultravioleta banda "B"
- R-UVC Radiação ultravioleta banda "C"
- R-VIS Radiação visível

LISTA DE FIGURASVI	
LISTA DE TABELASIX LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOSX	
1. INTRODUÇÃO	.1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	.3
2.1. R-UV E SUAS INTERAÇÕES 2.2. EFEITOS DA R-UV SOBRE A SAÚDE 2.3. EFEITOS DA R-UV SOBRE AS PLANTAS 2.4. RADIAÇÃO PONDERADA PELA RESPOSTA FOTOBIOLÓGICA (RF) .1	.3 .4 0 1
3. MATERIAL E MÉTODOS1	4
3.1. INSTRUMENTAÇÃO E MODELAGEM1 3.2. AVALIAÇÃO DO CONTEÚDO TOTAL DE OZÔNIO, PROFUNDIDADE ÓPTICA DOS AEROSSÓIS E COBERTURA DE NUVENS1	4 6
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO1	17
4.1. RF PARA A SÍNTESE DE VITAMINA D, DANOS À PELE E IMUNOSSUPRESSÃO	20 25 27
5. CONCLUSÃO	32
6. REFERÊNCIAS	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

O Sol é o principal emissor da radiação eletromagnética que atinge a superfície terrestre, sendo a fonte de energia do sistema Terra-atmosfera. Apesar de o Sol emitir energia em praticamente todo o espectro eletromagnético, a radiação solar consiste basicamente de radiação infravermelha (R-IV), visível (R-VIS) e ultravioleta (R-UV).

A R-IV corresponde ao intervalo espectral de 780 a 10⁶ nm (1 mm) e concentra aproximadamente 50% da emissão solar total. É fundamental para os balanços de energia, uma vez é fortemente absorvida e emitida por diversos gases presentes na atmosfera terrestre (YAMASOE e CORRÊA, 2016).

A R-VIS representa cerca de 40 a 45% da emissão solar e compreende a banda espectral de 400 a 780 nm. Dentro do intervalo de R-VIS, encontra-se o subintervalo denominado de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês, *photosynthetically active radiation*) – 400 a 700 nm. Esta é a região espectral da radiação solar utilizada pelas plantas para a realização da fotossíntese (CEN e BORNMAN, 1990).

A R-UV compreende a faixa espectral entre 100 a 400 nm e corresponde cerca de 7 a 8% da emissão solar (CORRÊA e PIRES, 2013). Apesar de constituir uma pequena fração de radiação eletromagnética que atinge a superfície terrestre, a R-UV é responsável por desencadear processos fotoquímicos e fotobiológicos nos seres humanos, como queimaduras solares (eritemas), cânceres de pele não-melanoma, envelhecimento precoce da pele, doenças nos olhos, como a catarata e o pterígio (WALSH, 2009) e a supressão do sistema imunológico. Por outro lado, em níveis adequados, a R-UV é responsável pela síntese de vitamina D (PETERS et al., 2009). A R-UV também exerce influência nas plantas. A exposição a níveis elevados pode provocar danos em diferentes fases do desenvolvimento e crescimento, morfologia, fechamento de estômatos, inibição da fotossíntese e até alterar a atratividade de insetos (NEGASH e BJÖRN, 1986; BALLARÉ et al., 1996; FLINT e CALDWELL, 2003; CHEN et al., 2016).

Uma vez que a R-UV exerce influência sobre a maioria dos seres vivos, é de suma importância a avaliação do impacto da exposição a esse tipo de radiação, mensurado de modo espectral, por meio da resposta fotobiológica (RF) exercida por cada comprimento de onda. Para tanto, é necessária a utilização de radiômetros que meçam radiação espectral na banda de R-UV, entre 280 e 400 nm. Porém, esses instrumentos têm custo elevado de aquisição e manutenção. Desse modo, modelos de transferência radiativa (MTR) são utilizados como alternativa para simular a R-UV. O problema é que as estimativas podem ter erros significativos, pois a R-UV é fortemente atenuada pela atmosfera, principalmente pelo ozônio, aerossóis e nuvens. No caso do ozônio, o processo de absorção é bem representado em MTR e as medições realizadas por satélites são confiáveis. Por outro lado, aerossóis e nuvens, possuem grande variabilidade temporal e espacial, além de geometria e composição complexas. Além disso, aerossóis promovem espalhamento e absorção da R-UV. Portanto, somente as simulações para condições de céu claro, com baixas concentrações de aerossóis e ausência de nuvens, fornecem resultados bastante precisos. Por outro lado, na presença de aerossóis e nuvens essas simulações tendem a apresentar erros significativos.

Partindo dessa problemática, o presente trabalho visa comparar medidas espectrais de R-UV realizadas por um espectrorradiômetro instalado no *Centro Andaluz de Medioambiente, Universidad de Granada,* Espanha - *CEAMA/UGr* (37°09' N, 3°36' W, 662 m) e simulações numéricas. Desta forma, o estudo tem como finalidade o aprimoramento de MTR para cálculos espectrais de R-UV, a avaliação do efeito fotobiológico da R-UV em diferentes bandas e a estimativa do impacto de propriedades ópticas de aerossóis (POA) sobre os fluxos espectrais ponderados pelas RF. Por fim, é importante ressaltar que esse trabalho possibilitará a ampliação de estudos relacionados às áreas importantes da medicina, biologia e agricultura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. R-UV e suas interações

A R-UV faz parte do espectro de radiação eletromagnética emitida pelo Sol e é subdividida em três bandas, conforme recomendação da Comissão Internacional de Iluminação (*Commission Internationale de l'Éclairage - CIE*): UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) e UVA (315-400 nm) (ICNIRP, 2004).

A R-UVC não atinge a superfície da Terra, sendo completamente absorvida pelo ozônio e oxigênio existentes na estratosfera. Grande parte da R-UVB é absorvida pelo ozônio estratosférico (HERMAN et al., 1996) e espalhada por moléculas e aerossóis, atingindo a superfície em níveis muito tênues, mas suficientes para acarretar efeitos nocivos aos seres humanos (KUDISH et al., 2003; BERNICK e KESLER, 2005). Já a R-UVA constitui a maior fração de R-UV que atinge a superfície terrestre, sendo pouco absorvida e atenuada pelos componentes atmosféricos (LUCAS et al., 2006). Radiação nessas bandas do espectro eletromagnético também sofre forte espalhamento molecular, que se intensifica quanto menor for o comprimento de onda.

A incidência de R-UV na superfície da Terra é afetada principalmente por fatores atmosféricos, temporais e geográficos. Ambos fazem com que a distribuição da R-UV não seja homogênea no globo.

Os fatores atmosféricos dizem respeito às interações que a R-UV irá sofrer com nuvens, gases e aerossóis presentes na atmosfera (CALBÓ et al., 2005). As nuvens são agentes moduladores da R-UV, pois geralmente tendem a reduzir a R-UVA e R-UVB que chegam à superfície terrestre (BORKOWSKI et al., 1977; SILVA, 2011). O efeito da cobertura de nuvens depende da quantidade, morfologia, distribuição de tamanho e de partículas das nuvens (KEER, 2005).

O ozônio estratosférico protege a Terra da maior parte dos comprimentos de onda de R-UV nocivos, pois é um importante absorvedor desse tipo de radiação. Estima-se que uma redução de 1% no conteúdo total de ozônio (CTO) poderia ocasionar um aumento de 1,2% na R-UV biologicamente ativa (KIRCHHOFF, 2000; COARITTI, 2011). Os aerossóis são partículas sólidas e/ou líquidas suspensas na atmosfera, em geral, responsáveis pela atenuação da R-UV incidente sobre os particulados (SILVA, 2006). Essa atenuação se dá majoritariamente por espalhamento, uma vez que apenas aerossóis ricos em carbono negro absorvem parte da radiação incidente.

Os parâmetros geográficos como o ângulo zenital solar (AZS), latitude e altitude também exercem influência na quantidade de R-UV que atinge a superfície terrestre (CORRÊA, 2015). O AZS é dado pela inclinação dos raios solares em relação a uma superfície horizontal perpendicular; ou seja, é a posição angular do Sol, em relação ao zênite, para um observador em superfície. A variação do AZS é responsável pela variação horária da R-UV. Para ângulos zenitais pequenos, os raios solares incidem mais próximo à vertical, sendo assim tem-se maior intensidade sobre a superfície. Por outro lado, quanto mais próximo o Sol está do horizonte, maior é o valor de AZS, e o caminho óptico a ser atravessado é maior. Por essa razão, menor quantidade de radiação chega à superfície.

A latitude e altitude possibilitam o entendimento da variação da R-UV no globo. Latitudes próximas à Linha do Equador recebem a radiação solar em maior intensidade devido ao menor ângulo de incidência entre os raios solares e a superfície (PIRES, 2011). No caso da altitude, a dependência da R-UV ocorre devido a diminuição de dispersores de radiação e, em menor grau, da redução do conteúdo de ozônio na troposfera (CABROL et al., 2014). Estudos mostram que acima de 1000 m de altitude, os níveis de R-UV aumentam entre 5 e 10 % a cada quilômetro de altura (RIVAS et al, 2002; ZARATTI et al., 2003).

Por fim, os parâmetros temporais, como a hora do dia e a estação do ano. Ambos os movimentos de rotação (movimento do planeta em torno do seu próprio eixo) e translação (trajetória ao redor do Sol) exercem influência na quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra, visto que intensidade da radiação depende da elevação solar e inclinação do planeta em relação ao Sol.

2.2. Efeitos da R-UV sobre a saúde

A exposição à R-UV em níveis adequados induz benefícios psicológicos e físicos para os seres humanos, como a síntese de vitamina D (PONSONBY, 2005). Por outro, a exposição excessiva é responsável por desencadear efeitos nocivos à

pele, olhos e sistema imunológico (CORRÊA, 2015), podendo ser agudos e crônicos. Os danos agudos são classificados como efeitos imediatos, como o eritema (vermelhidão da pele) e pigmentação melânica (bronzeamento). Já os danos crônicos são àqueles resultantes do acúmulo de R-UV por grande período de tempo (DIFFEY, 1980), como câncer de pele, envelhecimento precoce da pele e catarata. A seguir, são apresentados os efeitos fotobiológicos mais relevantes aos seres humanos.

Síntese de Vitamina D3

A principal função benéfica da R-UV sobre a saúde humana é a capacidade de sintetizar a vitamina D₃ (colecalciferol) através da ação da R-UVB, especialmente entre os comprimentos de onda de 290 a 310 nm (PIRES, 2011). A vitamina D₃ é responsável por manter a concentração de fósforo e cálcio no sangue, ambos significativos para estrutura óssea e metabolismo celular (GALLAGHER e LEE, 2006; HOLICK, 2007; PETERS et al., 2009).

Eritema

O eritema ou queimadura solar (Figura 1) é uma inflamação cutânea que origina uma vasodilatação, fazendo com que haja aumento do fluxo sanguíneo local (JUCHEM et al, 1998). Pode ser desencadeado por exposição à radiação UVA e ondas curtas de UVB, que acarretam danos no DNA. Os fatores que influenciam a formação do eritema são o tempo de exposição e o fenótipo. Indivíduos com a pele clara são mais sensíveis, ou seja, necessitam de menores doses de R-UV para desencadear queimaduras solares, se comparados aos indivíduos de pele negra (Tabela 1) (CORRÊA, 2003).



Figura 1. Eritema. Fonte: http://www.dermatologia.net

Tabela 1. Classificação do tipo de pele humana conforme a susceptibilidade à formação do eritema.

Tipo de Pele	Características fenotípicas	Susceptibilidade à formação do eritema	
I	Pele pálida, muito clara	Alta	
П	Pele, cabelo e olhos claros	Alta	
Ш	Pele clara, tipicamente caucasiana	Moderada	
IV	Pele branca a morena, cabelos e olhos escuros	Baixa	
V	Pele mulata	Muito baixa	
VI	Pele negra	Muito baixa	

Fonte: Adaptado de Fitzpatrick (1988)

Câncer de pele

As neoplasias cutâneas, comumente conhecidas como cânceres de pele, podem ser classificadas em não melanoma e melanoma cutâneo.

O câncer de pele não melanoma (CPNM) se origina nas células basais ou escamosas (camadas externas da epiderme) e pode ser classificado em carcinoma basocelular e espinocelular. O carcinoma basocelular (Figura 2) é o tumor maligno mais frequente que atinge preferencialmente indivíduos de meia-idade e idosos e

geralmente aparecem em áreas mais expostas ao sol, como rosto e pescoço. Já o carcinoma espinocelular (Figura 3) tem maior incidência no rosto, orelha, lábios, pescoço e dorso da mão, e apresenta maior gravidade se comparado ao carcinoma basocelular (INCA, 2015; A.C.CAMARGO, 2017).



Figura 2. Carcinoma Basocelular Fonte: http://www.dermatologia.net



Figura 3. Carcinoma Espinocelular. Fonte: http://www.dermatologia.net

O melanoma cutâneo (MC) (Figura 4) tem origem nos melanócitos, células produtoras da melanina, e afeta comumente os adultos de pele clara, podendo se originar a partir de mudanças na cor, formato e tamanho de pintas ou manchas préexistentes. É o mais grave dos tumores de pele, com maior índice de mortalidade. (FMUSP, 2006).



Figura 4. Melanoma Cutâneo. Fonte: http://www.dermatologia.net

Fotoenvelhecimento

O fotoenvelhecimento (Figura 5) está associado aos danos cumulativos da exposição à R-UVA e R-UVB, contudo, a R-UVA contribui de forma mais representativa por penetrar mais profundamente na derme (camada subjacente à epiderme, extensamente vascularizada) (MONTAGNER e COSTA, 2009). A elastose solar (Figura 6) é a principal característica de pele que exibe fotoenvelhecimento, sendo uma degeneração de fibras elásticas e colágenas da pele (SIMIS e SIMIS, 2006).



Figura 5. Fotoenvelheciemento em região exposta ao sol. Fonte: http://www.dermatologia.net apud Pires (2011).



Figura 6. Elastose solar. Fonte: https://revistas.pucsp.br

Imunossupressão

A imunossupressão é uma consequência biológica desencadeada devido à fotodanos no DNA. Os danos no DNA podem induzir a produção de mediadores imunossupressores que inibem o funcionamento das células imunoprotetoras (células de Langerhans, localizadas na epiderme), provocando a neutralização de anticorpos, e posteriormente, ocasionando enfraquecimento do sistema imunológico (MARRIOT e MEUNIER, 2008).

Conjuntivite e Fotoceratite

Além de danos à pele, a intensa exposição à R-UV também ocasiona ou intensifica problemas e doenças nos olhos, como a conjuntivite e a fotoceratite (CORRÊA, 2003). A conjuntivite (Figura 7) é caracterizada como inflamação da conjuntiva e interior da pálpebra. Tem-se como sintomas o lacrimejamento, vermelhidão e ardor. A fotoceratite (Figura 8) é a inflamação da córnea e íris. Ambos os efeitos são temporários em virtude da capacidade de regeneração do epitélio ocular (PIRES, 2011).



Figura 7. Conjuntivite. Fonte: https://www.tuasaude.com



Figura 8. Fotoceratite. Fonte: http://www.solamigo.org

2.3. Efeitos da R-UV sobre as plantas

Em geral, os danos biológicos provocados pela R-UV são mais acentuados quanto menor é o comprimento de onda da radiação incidente. Por essa razão, a R-UVB é capaz de induzir variados efeitos nocivos sobre as plantas, mesmo representando menos de 1,5% do total de energia solar (HOLLÓSY, 2002). A exposição a níveis elevados de R-UVB acarreta efeitos diretos e indiretos nas plantas, incluindo danos ao DNA, proteínas e membranas, alterações na transpiração e fotossíntese, e mudanças no crescimento, desenvolvimento e morfologia (ROZEMA et al., 1997; LU et al., 2009; HASSAN et al., 2013; FENG et al., 2014).

Um dos impactos biológicos relevantes, no que se refere à interação da R-UV com as plantas, é a redução da capacidade fotossintética. A exposição excessiva à R-UVB é responsável pela redução do teor de clorofila e da taxa fotossintética líquida das folhas, uma vez que impede o crescimento e a acumulação de biomassa (CYBULSKI III e PETERJOHN, 1999; ALBERT et al., 2010; CHEN et al., 2016).

2.4. Radiação ponderada pela resposta fotobiológica (RF)

Irradiância é o termo utilizado para descrever o fluxo radiante que atinge uma superfície, sendo definida como o quociente entre a potência incidente sobre um elemento de superfície e sua área (YAMASOE e CORRÊA, 2016). As irradiâncias ponderadas pelas RF são denominadas de irradiâncias biologicamente ativas (S). Matematicamente é representada pela integral no espectro UV (280 a 400 nm) do produto entre as irradiâncias espectrais (I_{λ}) e as funções RF (ε_{λ}) (Equação 1).

$$S = \int_{280 nm}^{400 nm} I_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} d_{\lambda}$$
(1)

As irradiâncias biologicamente ativas podem ser relacionadas a estudos dos efeitos benéficos e nocivos à saúde humana e plantas. Para tanto, é necessário a ponderação à diferentes RF, que diz respeito ao desenvolvimento de câncer de pele não melanoma (NMSC), eritema (ERY), síntese de vitamina D (VitD), elastose (ELAST), imunossupressão (IMMSUP), conjuntivite (CONJ), fotoceratite (KERAT), danos generalizados às plantas (GPD), danos generalizados às plantas altas (GhPD) e inibição da fotossínte (InP), apresentadas nas Figuras 9 a 12, respectivamente.



Figura 9. Funções RF para: (a) desenvolvimento de câncer de pele não melanoma (NMSC) (de Gruijl e Van der Leun, 1994); (b) formação de eritema (ERY) (McKinlay e Diffey, 1986) e (c) síntese de vitamina D (VitD) (CIE, 2006).



Figura 10. Funções RF para: (a) elastose (ELAST) (Wulf et al., 1989) e (b) Imunossupressão (IMMSUP) (de Fabo et al., 1990).



Figura 11. Funções RF para enfermidades nos olhos: (a) Conjuntivite (CONJ) (Steck, 1986) e (b) fotoceratite (KERAT) (Steck, 1986).



Figura 12. Funções RF para: (a) danos generalizados às plantas (GPD) (Caldwell et al., 1986); (b) danos generalizados às plantas altas (GhPD) (Flint e Caldwell, 2003) e (c) inibição da fotossíntese (InP) (Caldwell, 1971).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Instrumentação e Modelagem

O estudo consistiu da análise dos dados espectrais de R-UV coletados por um espectrorradiômetro Bentham (http://www.bentham.co.uk/spectroradiometers.htm), instalado no sítio experimental do *Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía* (37°09'N, 3°36'W, 675 m), Granada, Espanha, (Figura 13) entre os anos de 2008 e 2013.



Figura 13. Localização do sítio experimental.

O espectrorradiômetro Bentham (Figura 14) pode medir intervalos espectrais entre 200 e 600 nm, com uma resolução espectral de 0,5 nm. A resposta angular da entrada óptica no detector de medição de irradiação é próxima de uma resposta cosseno (ZAINI et al., 2016). Dependendo do comprimento de onda e das POA, os fatores de correção de resposta ao cosseno variam de 2% a 7%, com incertezas relativamente pequenas, entre 0,2 e 2% (BAIS et al., 1998).

Neste estudo, foram computadas medidas de R-UV entre os comprimentos de onda de 280 e 400 nm, em intervalos espectrais de 0,5 nm, a cada 15 minutos. Em seguida, foram calculados os valores médios de irradiâncias espectrais em intervalos de 5 nm e AZS de 5°.



Figura 14. Espectrorradiômetro Bentham DMc150 Double Monochromator. Fonte: https://www.bentham.co.uk

Para utilizado MTR LibRadTran/UVSPEC а modelagem foi 0 (http://www.libradtran.org). O modelo foi alimentado com perfis atmosféricos para a localidade, conteúdo de ozônio fornecidos pelo sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI/NASA), a bordo do satélite Aura (https://earthdata.nasa.gov/earth-observationdata), propriedades ópticas de aerossóis, medidas por um fotômetro Cimel/Aeronet (https://aeronet.gsfc.nasa.gov) e cobertura de nuvens inferidas a partir de imagens de um All-Sky Imager, uma adaptação de uma câmera digital para uso científico com uma lente "olho de peixe" apontando no zênite. A câmera registra uma imagem do céu a cada cinco minutos e é usada para a caracterização de cobertura de nuvens e, em situações de céu claro, para avaliação de carga de aerossol atmosférico.

Devido à complexidade da modelagem numérica da nebulosidade, esse estudo se restringiu à avaliação do efeito da carga de aerossóis em dias de céu sem nuvens. As imagens do *All-Sky Imager* foram utilizadas apenas para a seleção dos dias de céu claro. Da série de dados coletadas pelo fotômetro Cimel/Aeronet foram extraídos os valores da profundidade óptica dos aerossóis (AOD), do albedo simples (ω_0) e do parâmetro de assimetria (g). Essas grandezas foram utilizadas como dados de entrada no MTR. Todas as informações referentes aos aerossóis são de Nível 2. Isto é, aquelas com qualidade assegurada pelos algoritmos de tratamento de dados da Aeronet.

Por fim, foram analisados o comportamento das RF em função das irradiâncias medidas, e os desvios médios entre dados medidos e simulados em

condições de céu claro (sem nuvens) em função das propriedades ópticas dos aerossóis.

3.2. Avaliação do conteúdo total de ozônio, profundidade óptica dos aerossóis e cobertura de nuvens

A fim de caracterizar o local das medições de R-UV, foram realizadas análises quantitativas do conteúdo total de ozônio (CTO), profundidade óptica dos aerossóis (AOD) e cobertura de nuvens, em períodos distintos entre os anos de 2004 e 2016. As séries temporais de CTO e AOD foram fornecidas pelo sensor OMI/NASA e extraídas dos dados coletadas pelo fotômetro Cimel/Aeronet, respectivamente. Já a cobertura de nuvens foi extraída de imagens do *All-Sky Imager* e avaliada em termos de fração (oitavos) de nebulosidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 15 e 16 mostram, respectivamente, a série temporal e o boxplot de CTO, para a localidade de Granada. A sazonalidade observada na Figura 15 é esperada para a distribuição do gás ozônio, que apresenta maiores concentrações na primavera (março, abril e maio) e menores no outono (setembro, outubro e novembro) (VÁZQUEZ e HANSLMEIER, 2006).

Foram observadas duas condições anômalas, evidenciadas como outliers, uma vez que os dados estão abaixo do percentil 1 (P1) e acima do percentil 99 (P99), respectivamente (Figura 16). A primeira se refere ao dia 20 de dezembro de 2012, equivalente à 228,9 DU e a segunda, ao dia 29 de abril de 2013, com CTO correspondente à 456,6 DU. A concentração média de ozônio na localidade de Granada, para o período de 2004 a 2016, foi de 309,2 ± 23,9 DU, provavelmente associada à sua altitude de 738 m.



Figura 15. Série temporal de conteúdo total de ozônio (DU) entre os anos de 2004 e 2016 para a localidade de Granada.



Figura 16. Boxplot de conteúdo total de ozônio (DU) para a localidade de Granada.

A série temporal e o boxplot de AOD, são apresentadas nas Figuras 17 e 18, respectivamente. A profundidade óptica do aerossol é um indicativo da quantidade de aerossóis na coluna vertical da atmosfera (RODRIGUES, 2016), desta forma, a fim de caracterizar a eficiência da extinção da radiação solar pela matéria opticamente ativa, os dados de AOD foram coletados em quatro comprimentos de onda distintos, referentes a 340, 380, 440 e 870 nm, entre os anos de 2008 e 2013, como mostra a Figura 17.

Apesar da semelhança entre as séries temporais, a distribuição dos dados de AOD indica a diminuição dos valores médios com o aumento do comprimento de onda (Figura 18). Esse comportamento é esperado no caso dos aerossóis, já que a eficiência do espalhamento é inversamente proporcional ao comprimento de onda (espalhamento Mie). As médias variam entre 0,22 (±0,09) e 0,09 (±0,06) para os comprimentos de onda de 340 e 870 nm, respectivamente.



Figura 17. Série temporal de profundidades ópticas dos aerossóis entre os anos de 2008 e 2013 para a localidade de Granada.



Figura 18. Boxplot de profundidades ópticas dos aerossóis para a localidade de Granada.

A Figura 19 mostra a distribuição da cobertura de nuvens mensal coletadas entre os anos de 2008 e 2013. Observa-se a sazonalidade no comportamento da nebulosidade, onde os mínimos são encontrados nos meses de junho, julho e agosto (verão), e os máximos nos meses de março e abril (primavera). Os meses de abril e julho apresentam medianas de 4,6 e 0,7 octas, respectivamente, indicando que metade dos dias da série apresentam nebulosidade acima desses valores.



Figura 19. Boxplot da cobertura de nuvens (octas) mensal para a localidade de Granada.

4.1. RF para a Síntese de Vitamina D, danos à pele e Imunossupressão

As Figuras 20 a 23 mostram, respectivamente, as médias das irradiâncias espectrais UV ponderadas pelas RF para síntese de vitamina D (VitD), eritema (ERY), câncer de pele não melanoma (NMSC), e imunossupressão (IMMSUP), em função do ângulo zenital solar.



Irradiâncias espectrais UV (em Wm⁻²nm⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para: **Fig. 20)** síntese de vitamina D (VitD) (superior esquerdo); **Fig. 21)** eritema (ERY) (superior direito); **Fig. 22)** câncer de pele não melanoma (NMSC) (inferior esquerdo); e, **Fig. 23)** imunossupressão (IMMSUP) (inferior direito).

A RF VitD é sensível para os comprimentos de onda entre 280 e 330 nm. No entanto, após 315 nm essa RF é muito fraca e, portanto, praticamente extingue a R-UV biologicamente ativa. Na Figura 20, apenas os comprimentos de onda entre 298 e 318 nm e ângulos zenitais solares inferiores à 65° apresentam irradiâncias ponderas pela RF. Em ângulos zenitais acima de 65°, a R-UV é muito tênue e os sensores não são capazes de captar tais quantidades de energia.

A semelhança entre as RF ERY e NMSC são observadas nas Figuras 21 e 22. Esse comportamento faz com que a RF ERY seja usada como referência para os efeitos danosos ao ser humano. Ambas as RF são dependentes de parte do espectro UVB e UVA, contudo, somente irradiâncias ponderadas entre as bandas espectrais de 297,5 e 324 nm e ângulos zenitais solares inferiores a 65° indicam valores significativos a esse tipo de RF.

Quanto à RF IMMSUP (Figura 23), as irradiâncias ponderadas abaixo de 299 e acima de 349 nm e ângulos zenitais solares superiores a 80° são insignificantes no que se refere à indução à imunossupressão.



Figura 24. Irradiâncias espectrais UV (em Wm⁻²nm⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para elastose (ELAST).

Por fim, a RF ELAST (Figura 24) é influenciada pela radiação UVA podendo induzir o fotoenvelhecimento precoce da pele, uma vez que é mais significativa por penetrar mais profundamente nas camadas subjacentes.

As Figuras 25 a 29 retratam as diferenças espectrais entre o conjunto de dados simulados e medidos sob condições de céu claro (sem nuvens) considerando a ausência ou presença de aerossóis na atmosfera, para as RF VitD, ERY, NMSC, ELAST e IMMSUP, respectivamente.



Figura 25. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para VitD.



Figura 26. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para ERY.



Figura 27. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para NMSC



Figura 28. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para IMMSUP.



Figura 29. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para ELAST.

Pelo fato da RF VitD ser dependente de parte do espectro UVB e uma pequena fração do espectro UVA (vide Figura 20), os gráficos mostram apenas desvios entre 298 e 330 nm (Figura 25a e 25b). Para comprimentos de onda entre 306 e 310 nm, faixa espectral de maior influência sobre a síntese de vitamina D, e ângulos zenitais abaixo de 35°, o MTR apresenta desvios entre -1,5% e -3%. Para o caso em que as POA são consideradas, os desvios variam até 3%, passando de subestimativa (desvios negativos) para superestimativa (desvios positivos).

No que se refere às RF ERY, NMSC, IMMSUP e ELAST, que se estendem até 397,5 nm, resultados evidenciam semelhanças quanto ao comportamento dos desvios médios (Figuras 26, 27, 28 e 29, a-b). No espectro UVA ($315 \le \lambda \le 400$ nm), os desvios passaram de subestimativa para superestimativa quando o MTR é alimentado com as POA. Esse comportamento dos desvios na faixa UVA do espectro se deve ao forte espalhamento de R-UV exercido pelos aerossóis e à fraca absorção pelo ozônio. Na faixa UVB, a absorção do ozônio é dominante e melhor representada pelo MTR. Na faixa espectral entre 305 e 355 nm, de maior relevância para essas RF, e ângulos zenitais solares inferiores à 35°, as diferenças variam entre ±4,5%, quando as POA são consideradas.

4.2. RF para danos aos olhos

As médias das irradiâncias espectrais UV ponderadas pelas RF para as enfermidades nos olhos: Conjuntivite (CONJ) e Fotoceratite (KERAT), em função do ângulo zenital solar, são apresentadas nas Figuras 30 e 31, respectivamente.



Irradiâncias espectrais UV (em Wm⁻²nm⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para: **Fig. 30)** conjuntivite (CONJ); e, **Fig. 31)** fotocerattite (KERAT).

Para a função RF CONJ (Figura 30), ângulos zenitais superiores a 60° e irradiâncias ponderadas abaixo de 294 nm e acima de 313 nm não exercem influências sobre o desenvolvimento desse tipo de enfermidade, ou seja, somente o espectro UVB apresenta irradiâncias ponderadas significativas.

No caso da RF KERAT (Figura 31), parte do espectro UVA, especificamente entre os comprimentos de onda de 297,5 a 334 nm e ângulos zenitais inferiores a 70°, indicam irradiâncias espectrais relevantes no que se refere ao desenvolvimento da fotoceratite, sendo mais significativos entre as bandas espectrais de 307 e 315 nm e ângulos zenitais inferiores à 30°.

As diferenças espectrais entre a série de dados simulados e medidos, para casos de céu sem nuvens, sob condições de ausência ou presença de aerossóis na atmosfera, em função das RF CONJ e KERAT são apresentadas nas Figuras 32 e 33, respectivamente.



Figura 32. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para CONJ.



Figura 33. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para KERAT.

A faixa espectral de maior influência da RF CONJ, comprimentos de onda entre 301 e 305 nm, apresenta desvios máximos de até -7,5% (Figura 32a), para ângulos zenitais inferiores a 30°. Já, no caso em que o MTR é alimentado com as POA (Figura 32b), os desvios encontrados variam entre -1,5% e -4,5%, inferiores ao erro instrumental (±5%). Para comprimentos de onda entre 315 e 337,5 nm (UVA) e ângulos zenitais abaixo de 50°, os desvios são de ±3% para condições próximas àquelas da atmosfera, o que indica uma boa reprodução pelo MTR.

Em relação à RF KERAT (Figuras 33a e 33b), os resultados são análogos às RF ERY, NMSC, IMMSUP e ELAST no que diz respeito ao comportamento dos desvios (Figuras 26, 27, 28 e 29, a-b), uma vez que parte do espectro UVA também exerce influência significativa à essas RF. Na parte UVB, onde os fluxos espectrais

são mais tênues, os desvios tendem a diminuir com a inserção das POA no modelo. O oposto ocorre no espectro UVA, em que os desvios aumentam quando o MTR é alimentado com as POA, devido à dificuldade de reproduzir o espalhamento pelo aerossol. Na banda espectral entre 305 e 315 nm (UVB), que se refere àquela de maior influência no desenvolvimento da fotoceratite, os desvios encontrados foram de ±3%, o que caracteriza boas estimativas para ângulos zenitais inferiores à 30°.

4.3. RF para danos às plantas

As Figuras 34, 35 e 36 mostram as médias das irradiâncias espectrais UV ponderadas pelas RF para danos generalizados às plantas (GPD), danos generalizados às plantas altas (GhPD) e inibição da fotossíntese (InP), respectivamente, em função do ângulo zenital solar.



Irradiâncias espectrais UV (em Wm⁻²nm⁻¹) ponderadas pela resposta fotobiológica para: **Fig. 34)** danos generalizados às plantas (GPD) (superior esquerdo); **Fig. 35)** danos generalizados às plantas altas (GhPD) (superior direito); e **Fig. 36)** inibição da fotossíntese (InP) (inferior).

A semelhança entre as RF GPD e InP reflete-se nas Figuras 34 e 36. Como essas funções são dependentes de parte do espectro UVB, as irradiâncias ponderadas abaixo de 297,5 nm e acima de 316 nm não exercem influências sobre o desenvolvimento das plantas, nem inibem a capacidade de fotossíntese. O mesmo pode-se afirmar quando a posição do sol é superior a ângulos zenitais de 65°, pois as quantidades de energia nessas bandas e horários são muito tênues.

Por outro lado, no caso de GhPD (Figura 35), a porção UVA ($315 \le \lambda \le 400$ nm) do espectro também exerce efeitos relevantes. Em algumas bandas específicas, tais como 328-336, 350-354, 364-372 e 374-378 nm, e ângulos zenitais solares inferiores à 35°, esses efeitos são significativos.

As Figuras 37, 38 e 39 apresentam as diferenças espectrais entre o conjunto de dados simulados e medidos sob condições de céu claro (sem nuvens) considerando a ausência ou presença de aerossóis na atmosfera, para as RF GPD, GhPD e InP, respectivamente.



Figura 37. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para GPD.



Figura 38. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para GhPD.



Figura 39. Desvios médios entre os dados simulados e medidos, para condições de céu claro sob condições de (a) ausência e (b) presença de aerossóis, para InP.

Pelo fato das RF GPD e InP serem dependentes apenas em parte do espectro UVB (vide Figuras 34 e 36), os gráficos mostram apenas os desvios entre 297,5 e 307,5 nm (Figuras 37 e 39). Abaixo de 297,5 nm, praticamente não há R-UV atingindo a superfície. Ambas as RF, GPD e InP, apresentam características semelhantes em relação ao comportamento dos desvios médios. Para comprimentos de onda entre 305 e 309 nm, faixa espectral de maior influência sobre o desenvolvimento das plantas e inibição da capacidade de fotossíntese, e ângulos zenitais inferiores à 30°, o MTR apresenta diferenças entre -1,5% e -3,0% em relação às medidas (Figuras 37a e 39a). Já, para o caso em que o MTR é alimentado com as POA (Figuras 37b e 39b), tem-se que as diferenças não ultrapassam 3,0%. Estes resultados indicam boa reprodução pelo MTR das condições próximas àquelas da atmosfera.

Em relação à RF GhPD, que se estende até 397,5 nm (Figura 38), houve comportamento similar aos desvios encontrados para as RF ERY, NMSC, IMMSUP ELAST e KERAT (Figuras 26, 27, 28, 29 e 33, a-b). Resultados indicam que o MTR reproduz melhores simulações quando as POA são consideradas. Nas bandas espectrais entre 302 e 311 nm, os desvios máximos são de -7,5% para ângulos zenitais inferiores à 35°. Em contrapartida, quando as POA são consideradas, os desvios não excedem -4,5%, ainda inferiores ao erro instrumental.

A Tabela 2 apresenta os desvios máximos observados nas bandas espectrais UVB e UVA, para cada uma das RF avaliadas. No intervalo espectral onde houve irradiância ponderada e ângulo zenital solar inferior à 30°, os desvios máximos (-8,6%) para todas as RF, foram observados na parte UVB, onde os fluxos espectrais são mais tênues. Nessa faixa espectral, todos os desvios diminuíram ao se considerar as POA, contudo, permanecem com a mesma característica de subestimativa. Já, no caso do espectro UVA, 87,5% das RF passaram de subestimativa para superestimativa. A única situação em que os erros aumentam, de -3,4 a 4,4%, são nas RF que dependem significativamente da banda UVA (ERY, NMSC, ELAST, IMMSUP, KERAT e GhPD) e, nesse caso, a inserção das POA no MTR não indicou melhoria na estimativa. Esse fato se deve à dificuldade de reproduzir o espalhamento exercido pelos aerossóis e à fraca absorção pelo ozônio.

	DESVIO MÁXIMO OBSERVADO				
DE		UVB		UV	'A
ΝF	AZS	MTR sem POA	MTR com POA	MTR sem POA	MTR com POA
VitD	<35°	-8,6%	-4,8%	-3,4%	1,5%
ERY NMSC ELAST IMMSUP KERAT GhPD	<30°	-8,6%	-4,8%	-3,4%	4,4%
CONJ	<35°	-8,6%	-4,8%	-3,4%	-2,5%
GPD InP	<30°	-8,6%	-4,8%	-	-

Tabela 2. Desvios máximos observados nas bandas espectrais UVB e UVA, em função do ângulo zenital solar e POA, para cada RF estudada.

Os desvios máximos observados nos intervalos de maior intensidade de irradiância ponderada pela RF, em função do ângulo zenital solar e POA são

apresentados na Tabela 3. É válido ressaltar que as máximas irradiâncias são encontradas, principalmente, em ângulos zenitais inferiores a 35° e comprimentos de onda referentes ao espectro UVB. No que diz respeito aos desvios, tem-se que 60% dos casos passaram de subestimativa para superestimativa quando as POA são consideradas. Nota-se que os maiores desvios relativos, equivalente à -7,4%, se referem às RF com máximas irradiâncias entre 301 e 312 nm, o que aponta a concentração de maiores erros para comprimentos de onda menores (UVB).

Para todos os casos, as escolhas de POA indicam melhor reprodução pelo MTR (menores desvios relativos) no intervalo espectral de máxima irradiância ponderada pela RF se comparada a todo intervalo espectral.

	DESVIO MÁXIMO OBSERVADO				
RF	Intervalo espectral de máxima irradiância ponderada pela RF	AZS	MTR sem POA	MTR com POA	
VitD	306-310 (UVB)	<35°	-2,4%	1,6%	
ERY e NMSC	303-312 (UVB)	<35°	-7,4%	-4,0%	
ELAST	310-322 (UVB-UVA)	<35°	-3,5%	1,6%	
IMMSUP	311-324 (UVB-UVA)	<30°	-3,5%	1,5%	
CONJ	301-305 (UVB)	<30°	-7,4%	-4,0%	
KERAT	307-315 (UVB)	<30°	-3,5%	1,6%	
GPD e InP	305-309 (UVB)	<30°	-2,4%	1,6%	
GhPD	302-311 (UVB)	<35°	-7,4%	-4,0%	

Tabela 3. Desvios máximos observados nos intervalos espectrais de máxima irradiância ponderada pela RF, em função do ângulo zenital solar e POA.

5. CONCLUSÃO

A análise espectral das RF indica que o MTR reproduz melhores estimativas quando as POA são consideradas. O comportamento dos desvios no UVB ocorre pelo fato da absorção do ozônio ser dominante e melhor representada pelo modelo, o que explica a diminuição dos erros, ao se considerar as POA, para todas as RF. Contudo, no intervalo espectral onde houve irradiância ponderada, os desvios máximos (-8,6%) foram observados na parte UVB do espectro, em ângulos zenitais inferiores a 30°, para todas as RF estudadas, devido à atenuação dos fluxos espectrais nessa banda do espectro.

Para o caso em que o espectro UVA também exerce efeitos relevantes nas RF, os desvios passaram de subestimativa para superestimativa, em 87,5% dos casos. Em RF específicas, tais como ERY, NMSC, IMMSUP, ELAST, KERAT e GhPD os desvios aumentaram cerca de 8% com a inserção das POA no MTR, devido à dificuldade de reproduzir o espalhamento executado pelos aerossóis e à fraca absorção pelo ozônio. Supõe-se que, como os índices de radiação são significativamente mais elevados na banda UVA, o processo de espalhamento se torna preponderante, ou seja, se torna mais relevante do que o processo de absorção. Isso faz com que os erros se propaguem para essa parte do espectro ao adicionar as POA no modelo. Vale ressaltar que os erros são pouco significativos, uma vez que são poucos maiores do que a magnitude dos erros instrumentais. Entretanto, há necessidade de conhecimento mais aprofundado das POA e da modelagem nessa banda do espectro.

No que se refere ao intervalo espectral de máxima irradiância ponderada, tem-se que 60% dos casos passaram de subestimativa para superestimativa quando as POA são consideradas no MTR. Os maiores desvios relativos foram encontrados para RF que apresentam maior intensidade de irradiância entre comprimentos de onda entre 301 e 312 mn, o que aponta a concentração de maiores erros para comprimentos de onda menores (UVB).

Como perspectiva, esse trabalho sugere a realização de análises mais detalhadas em relação à sensibilidade dos MTR na região UV. Para tanto, recomenda-se a realização de testes de sensibilidade das POA, tais como o parâmetro de simetria e o albedo simples, que são difíceis de se estimar experimentalmente. Para o caso das simulações sob condições de nebulosidade, é

sugerido a aplicação de técnicas de determinação da cobertura de nuvens por meio de fotográficas digitais, a fim de aprimorar a reprodução de medidas por meio da modelagem numérica.

6. REFERÊNCIAS

A.C. CAMARGO Cancer Center – Centro Integrado e Diagnóstico, Tratamento, Ensino e Pesquisa. **Pele Melanoma**, 2017. Disponível em: <u>http://www.accamargo.org.br/tudo-sobre-o-cancer/pele-melanoma/31/</u>. Acessado em: 30 de Outubro de 2017.

ALBERT, K.R.; MIKKELSEN, T.N.; RO-POULSEN, H.; MICHELSEN, A.; ARNDAL, M.F.; BREDAHL, L.; HÅKANSSONB, K.B.; BOESGAARDA, K.; SCHMIDTD, N.M. Improved UV-B screening capacity does not prevent negative effects of ambient UV irradiance on PSII performance in High Arctic plants Results from a six year UV exclusion study. **Journal of Plant Physiology**, v.167, p.1542-1549, 2010.

BAIS, A.F.; KAZADZIS, S.; BALIS, D.; ZEREFOS, C.S.; BLUMTHALER, M. Correcting global solar ultraviolet spectra recorded by a Brewer spectroradiometer for its angular response error. **Applied Optics**, v.37, p.6339-6344, 1998.

BALLARÉ, C.L.; SCOPEL, A.L.; STAPLETON, A.E.; YANOVSKY, M.J. Solar Ultraviolet-B Radiation Affects Seedling Emergence, DNA Integrity, Plant morphology, Growth Rate, and Attractiveness to Herbivore Insects in *Datura ferox*, **Plant Physiology**, n.112, p.161-170, 1996.

BERWICK, M.; KESLER, D. Ultraviolet exposure, vitamin D, and câncer. **Photochemistry and. Photobiology**, v.81, p.1261-1266, 2005.

BORKOWSKI, J.L.; CHAI, A-T.; MO, T.; GREEN, A.E.O. Cloud effects on middle ultraviolet global radiation. **Acta Geophysica Polonica**, v.25, p.287-301, 1977.

CABROL N.A.; FEISTER U.; HÄDER D-P.; PIAZENA H.; GRIN E.A.; KLEIN A. Record solar UV irradiance in the tropical Andes. **Frontiers in Environmental Science**, v.2, p.1-6, 2014.

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

CALDWELL, M.M. Solar ultraviolet radiation and the growth and development of higher plants. **Photophysiology**, v.6, p.131-177, 1971.

CALDWELL, M.M.; CAMP, L.B.; WARNER, C.W.; FLINT, S.D. Action spectra and their key role in assessing biological consequences of solar UV-B radiation change. In: WORREST, R.C.; CALDWELL, M.M. (Eds): Stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life. Springer, Berlin, p.87-111, 1986.

CEN, Y-P.; BORNMAN, J.F. The response of bean plants to UV-B radiation under different iradiances of background visible light. **Journal of Experimental Botany**, v.41, p.1489-1495, 1990.

CHEN, M.; HUANGA, Y.; LIU G.; QIN, F.; YANG, S.; XU, X. Effects of enhanced UV-B radiation on morphology, physiology, biomass, leaf anatomy and ultrastructure in male and female mulberry (Morus alba) saplings, **Environmental and Experimental Botany**, v. 29, p.85-93, 2016.

CIE - Commission Internationale de l'Éclairage. Action spectrum for the production of previtamin D3 in human skin, **CIE 174**, 2006.

CYBULSKI III, W.J.; PETERJOHN, W.T. Effects of ambient UV-B radiation on the above-ground biomass of seven temperate-zone plant species. **Plant Ecology**, v.145, p. 175-181, 1999.

COARITTI, J.R. **Análise dos efeitos da radiação solar ultravioleta (R-UV) em populações habitantes a diferentes altitudes.** 2011. 88f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

CORRÊA, M.P. Índice Ultravioleta: Avaliações e Aplicações. 2003. 243f. Tese (Doutor em Ciências, Área de concentração: Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

CORRÊA, M.P. and PIRES, L.C.M. Doses of erythemal ultraviolet radiation observed in Brazil. International Journal of. Dermatology, v.52, n.8, p.966-973, 2013.

CORRÊA, M.P. Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v.90, n.3. p. 297-313, 2015.

DE FABO, E.C.; NOONAN, F.P.; FREDERICK, J.E. Biologically effective doses of sunlight for imune suppression at various latitudes and their relationship to changes in stratospheric ozone. **Photochemistry and Photobiology**, v.52, p.811-817, 1990.

DE GRUIJL, F.R.; STERENBORG, H.J.; FORBES, P.D.; DAVIES, R.E.; COLE, C.; KELFKENS, G.; VAN WEELDEN, H.; SLAPER, H.; VAN DER LEUN. Wavelength dependence of skin cancer induction by ultravioleta irradiation of albino hairless mice. **Cancer Research**, v.53, p.53-60, 1993.

DIFFEY, B.L. Ultraviolet radiation physics and the skin. **Physics in Medicine and Biology**, v.25, n.3, p.405-426, 1980.

FENG, L.; JIANG, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, S. Sexual differences in defensive and protective mechanisms of *Populus cathayana* exposed to high UV-B radiation and low soil nutrient status. **Physiologia Plantarum**, v.151, p.434-445, 2014.

FITZPATRICK, T. The validity and practically of sun reactive skin types I throught VI. **Archives of Dermatology**, v.124, p.869-871, 1988

FLINT, S.D.; CALDWELL, M.M. A biological spectral weighting function for ozone depletion research with higher plants, **Physiologia Plantarum**, v.117, p.137-144, 2003.

FMUSP – Faculdade de Medicina Universidade de São Paulo. Disciplina de Telemedicina. Câncer de pele, 17 de maio de 2006. Disponível em:

<u>http://www.saudetotal.com.br/artigos/dermatologia/tvescola_cancerpele.asp</u>. Acessado em 30 de Outubro de 2017.

GALLAGHER, R. P.; LEE, T. K. Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, v.92, n.1, p.119–131, 2006.

HASSAN I.A.; BASAHI, J.M; HAIBA, N.S.; KADI, M.W. Investigation of Climate Changes on Metabolic Response of Plants: Interactive Effects of Drought Stress and Excess UV-B. **Journal of Earth Science & Climatic Change**, v.4, p. 1-6, 2013.

HERMAN, J.R.; BHARTIA, P.K.; ZIEMKE, J.; AHMAD, Z.; LARKO, D. UV-B increases (1976-1992) from decreases in total ozone. **Geophysical Research Letters**, v.23, p.2117-2120, 1996.

HOLICK, M.F. Vitamin D Deficiency. **The New England Journal of Medicine**, v.357, p.226-281, 2007.

HOLLÓSY, F. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. **Micron**, v.33, n.2, 179-197, 2002.

ICNIRP - International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelength between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). **Health Physics**, v.87, p.171-1866, 2004.

INCA – Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva. Tipos de câncer, pele não melanoma, 2015. Disponível em: http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/tiposdecancer/site/home/pele_nao_melan oma. Acessado em: 30 de Outubro de 2017.

INE – Instituto Nacional de Estadística. **Cifras oficiales de población de los municípios españoles. Revisión del Padrón Municipal (2016).** Disponível em: <u>http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=12547361</u> 77011&menu=resultados&idp=1254734710990. Acessado em: 7 de Julho de 2017.

JUCHEM, P.P.; HOCHBERG, J.; WINOGRON, A.; ARDENGHY, M.R. Riscos à saúde da radiação ultravioleta. **Revista Brasileira de Cirurgia Plástica**, v.13, n.2, 1998.

KERR, J. B. Understanding the factors that affect Surface Ultraviolet radiation. **Optical Engineering**, v.44, p.1-9, 2005.

KUDISH, A. I.; ABELS, D.; HARARI, M. Ultraviolet radiation properties as applied to photoclimatherapy at the Dead Sea. **International Journal of Dermatology**, v.42, p.359-365, 2003.

LU, Y.; DUAN, B.; ZHANG, X.; KORPELAINEN, H.; LI, C. Differences in growth and physiological traits of Populus cathayana populations as affected by enhanced UV-B radiation and exogenous ABA. **Environmental and Experimental Botany**, v.66, p.100-109, 2009.

LUCAS, R.; MCMICHAEL, T.; SMITH, W.; ARMSTRONG, B. Solar Ultraviolet Radiation: Global burden of disease from solar ultraviolet radiation. Geneva: World Health Organization. **Environmental Burden of Disease Series**, n.13, 2006.

MCKINLAY, A.F.; DIFFEY, B.L. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. **CIE Journal**, v.6, p.17-22, 1986.

MARROT, L.; MEUNIER, J.-R. Skin DNA photodamage and its biological consequences. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v.58, p. 139-148, 2008.

MONTAGNER, S.; COSTA, A. Bases biomoleculares do fotoenvelhecimento. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v.84, n.3, p.263-269, 2009.

NEGASH, L.; BJÖRN, L.O. Stomatal closure by ultraviolet radiation, **Physiologia Plantarum**, v.66, p. 360-364, 1986.

PETERS, B. S. M.; SANTOS, L. C.; FISBERG, M.; WOOD R. J. and MARTINI L. A. Prevalence of vitamin D insufficiency in Brazilian adolescentes. **Annals of Nutrition and Metabolism**, v.54, p.15-21, 2009.

PIRES, L. Análise de medidas de exposição diária à radiação ultravioleta (R-UV). 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) -Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

PONSONBY A.L.; LUCAS, R.M; VAN DER MEI, I.A. UVR, Vitamin D and Three Autoimmune Diseases-Multiple Sclerosis, Type 1 Diabetes, Rheumatoid Arthritis. **Photochemistry and. Photobiology,** v.81, p.1267-75, 2005.

RIVAS, M.; ROJAS, E.; CORTÉS, J.N.; SANTANDER E.G. Efecto de la altura en la radiación solar ultravioleta en Arica norte de Chile. **Revista Faculdad de Ingeniería**, v.10, p.59-62, 2002.

RODRIGUES, F. Análise da profundidade óptica do aerossol obtida a partir de distintas plataformas na região de Campo Grande/MS. 2016. 99f. Dissertação (Mestre em Ciências, Área de concentração: Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROZEMA, J.; STAAIJ, J.; BJÖRN, L.O.; CALDWEALL, M. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. **Trends in Ecology & Evolution**, v.12, p. 22-28, 1997.

SILVA, A.A. Calmness of the aerosol layer in the atmosphere during biomass burning episodes. **Journal of Geophysical Research**, v.111, p.1-11, 2006.

SILVA, A.A. Local cloud cover, ground-based and satellite measurements of erythemal dose rate for an urban, tropical site in Southern Hemisphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.73, p.2474-248, 2011.

SIMIS, T.; SIMIS, D.R.C. Doenças da Pele Relacionadas à Radiação Solar. Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba, v.8, n.1, p.1-8, 2006.

STECK, B. Photoconjunctivitis. CIE Research Note, CIE-Journal, v.5, p.19-23, 1986.

STECK, B. Photokeratitis. CIE Research Note, CIE-Journal, v.5, p.19-23, 1986.

VÁZQUEZ, M.; HANSLMEIER, A. **Ultraviolet radiation in the solar system**. Netherlands: Springer, 2006. 380 p.

WALSH, K. UV Radiation and the Eye. Optician, v.237, p.26-33, 2009.

WULF, H.C.; POULSEN, T.; DAVIES, R.E; URBACH, F. Narrow-band UV radiation and introduction of dermal elastosis and skin câncer. **Photodermatology**, v.6, p.44-51, 1989.

YAMASOE, M.A; CORRÊA, M.P. **Processos radiativos na atmosfera** (Fundamentos). São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 142 p.

ZAINI, H.; YOO, J-K.; PARK, S.; LEE, D-H. Indoor calibration method for UV index meters with a solar simulator and reference spectroradiometer. **International Journal of Metrology and Quality Engineering**, v.7, p.101-p1-101-p8, 2016.

ZARATTI, F.; FORNO, R.; GARCIA, J.; ANDRADE, M. Erythemally weighted UV-B variations at two high altitude locations. **Journal of Geophysical Research**, v.108, p.1-6, 2003.