



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.04.12.50-TDI

**CONTRIBUIÇÃO DAS NUVENS PARA EVENTOS DE
AMPLIFICAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR
ULTRAVIOLETA MEDIDA EM SUPERFÍCIE**

Willian José Ferreira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Plínio Carlos Alvalá, e Abel Antônio da Silva, aprovada em 25 de agosto de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49P9NS5>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.04.12.50-TDI

**CONTRIBUIÇÃO DAS NUVENS PARA EVENTOS DE
AMPLIFICAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR
ULTRAVIOLETA MEDIDA EM SUPERFÍCIE**

Willian José Ferreira

Tese de Doutorado do Curso
de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências Atmosféricas,
orientada pelos Drs. Plínio Carlos
Alvalá, e Abel Antônio da Silva,
aprovada em 25 de agosto de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49P9NS5>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ferreira, Willian José.

F413c Contribuição das nuvens para eventos de amplificação da irradiância solar ultravioleta medida em superfície / Willian José Ferreira. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xxx + 136 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.04.12.50-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadores : Drs. Plínio Carlos Alvalá, e Abel Antônio da Silva.

1. Radiação ultravioleta. 2. Nuvens. 3. Óptica instrumental.
4. Sensoriamento remoto da atmosfera. I.Título.

CDU 551.521.17



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/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE WILLIAN JOSÉ FERREIRA
REG. 649893/2019, BANCA Nº 217/2023

No dia 25 de agosto de 2023, de modo virtual, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Geofísica Espacial / Ciências Atmosféricas, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo orientador Plínio Carlos Alvalá e pela presidente da Banca Maria Virgínia Alves.

Título: CONTRIBUIÇÃO DAS NUVENS PARA EVENTOS DE AMPLIFICAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR ULTRAVIOLETA MEDIDA EM SUPERFÍCIE

Membros da banca:

Dra. Maria Virginia Alves – Presidente – INPE
Dr. Plínio Carlos Alvalá – Orientador – INPE
Dr. Abel Antônio da Silva – Orientador – IEAv/DCTA
Dr. Ezequiel Echer – Membro Interno – INPE
Dr. Delano Gobbi – Membro Interno – INPE
Dra. Damaris Kirsch Pinheiro – Membro Externo – UFSM
Dr. Fernando Ramos Martins – Membro Externo – UNIFESP



Documento assinado eletronicamente por **Delano Gobbi, Pesquisador**, em 04/09/2023, às 08:25 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Plinio Carlos Alvala, Pesquisador Titular**, em 04/09/2023, às 08:39 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Virginia Alves (E), Usuário Externo**, em 04/09/2023, às 11:54 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Ramos Martins (E), Usuário Externo**, em 04/09/2023, às 11:57 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ezequiel Echer, Pesquisador**, em 04/09/2023, às 12:17 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Damaris Kirsch Pinheiro (E), Usuário Externo**, em 04/09/2023, às 15:03 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Abel Antônio da silva (E), Usuário Externo**, em 05/09/2023, às 12:06 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11337808** e o código CRC **95428756**.

“Porque se uniu a mim, eu o livrarei e o protegerei”.

Salmo 90, 14

*A Deus,
por ser essencial em minha vida,
meu guia e refúgio nas noites traiçoeiras.
Obrigado, Senhor, por não ter largado minhas mãos
durante toda esta longa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, namorada, amiga e melhor companheira, Graziela, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis nesta caminhada. Obrigado por permanecer ao meu lado, pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por me fazer feliz. Eu te amo!

A minha família, pelo suporte, pelo amor e pela confiança. Em especial aos meus pais, Ivanilo e Cidinha, meus pilares, e à minha irmã, Elisa. Por mais que eu tentasse não encontraria palavras para descrever todo sentimento de gratidão e amor que sinto por vocês.

Ao Dr. Plínio Carlos Alvalá, meu amigo, pelas orientações, pelo convívio e inúmeras oportunidades de aprendizado ao longo destes anos no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do INPE.

Ao Dr. Abel Antônio da Silva, pela apresentação da ideia que deu origem a esta pesquisa e pelo compartilhamento do instrumento imageador.

Aos membros da banca examinadora, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta Tese de Doutorado.

Agradeço, especialmente, ao Prof. Tiago Sanches da Silva, pessoa essencial ao desenvolvimento computacional de grande parte deste trabalho, e à Dra. Mariza Pereira de Souza Echer, por ser uma constante fonte de motivação e de incentivo ao longo de toda a minha jornada científica.

Aos meus companheiros de INPE, de turma e a cada pessoa que de alguma forma contribuiu para a realização deste trabalho. Felizmente, encontrei muitos anjos pelo caminho, desde a instalação e condução do experimento, passando pelo aprendizado computacional e as inúmeras dúvidas sanadas durante a formulação dos códigos em Python, até o desenvolvimento final da pesquisa.

Obrigado a todos por alimentarem meu sonho e pelo apoio extremamente valioso.

Aos amigos que me acolheram nos períodos mais críticos da jornada, tanto durante a pandemia de Covid-19 (sim, houve uma pandemia no meio da Tese!) como na finalização do trabalho. Os dias teriam sido sensivelmente mais difíceis sem vocês!

Ao INPE, por fornecer o ambiente e o suporte necessário para que eu desenvolvesse o estudo aqui apresentado. Estendo meu agradecimento às coordenações da Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades (DIIAV) e da Divisão de Geofísica Espacial (DIDGE) pelo importante apoio institucional.

Aos amigos da DIBIB e SPG, cujo auxílio e colaboração se revelaram inestimáveis na concretização deste trabalho, expresso minha profunda gratidão e reconhecimento.

À Rádio e TV Canção Nova, cuja programação edificante, mensagens inspiradoras e música pacificadora frequentemente trouxeram conforto ao meu coração. Durante todo o período da pesquisa, suas transmissões tocaram minha alma, sendo uma companhia constante nos momentos de incerteza, reflexões e alegrias.

À petite Jolie, minha fiel companheira na elaboração deste trabalho, pela ternura, pelo amor incondicional e pelos inúmeros momentos vividos em todos esses anos de estudo. Talvez ela nunca saiba, mas foi fundamental tê-la ao meu lado.

RESUMO

A radiação ultravioleta (RUV, 100-400 nm) impulsiona numerosos processos fotoquímicos e fotobiológicos na superfície terrestre, cabendo às nuvens o papel de seu principal modulador atmosférico, em razão das variações de curto período que promovem na irradiância medida em superfície. No entanto, inúmeras vezes ao dia, Eventos de Amplificação da Radiação Solar (EARS) fazem com que a irradiância ultravioleta (UV) supere a irradiância medida em condição de céu não encoberto por nuvens. Neste trabalho, quantificou-se a contribuição das nuvens para EARS, em São José dos Campos (23,20° S, 45,86° W, 621 m), a partir de irradiâncias espectrais UV em seis comprimentos de onda (305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm, 395 nm) e banda PAR (Radiação Fotossintética Ativa, 400-700 nm) obtidas em superfície e imagens do céu. Os eventos foram detectados quando o fator de modificação das nuvens apresentou diferenças maiores que dois erros-padrão entre a irradiância espectral medida em condições de céus com nuvens e a irradiância de referência. A análise da ocorrência de EARS em várias bandas de RUV e PAR revelou um aumento no número de eventos à medida que o comprimento de onda aumenta, onde, de 1.735 EARS observados, a radiação UV-B (305nm) representa 6,0% do total, enquanto a UV-A (340 nm) e banda PAR representam 17,5% e 30,5%, respectivamente. Verificou-se que há 99,6% de chances dos EARS serem observados com duração de até 5 minutos, ocorrendo aumentos mais acentuados na primavera e no verão, e mais proeminentes na região do UV-A e PAR do que no UV-B. Identificou-se que EARS em ângulo solar de zênite (ASZ) de 30° a 35° ocorrem, principalmente, devido a nuvens Cumulus e Stratus, mas também por nuvens de média altitude, do tipo AltoCumulus e Altostratus. Para ASZ de 45° a 55°, as amplificações, em sua maioria, são associadas a Altostratus e Cirrus. Porém, no verão, quando associadas a Cumulus e Stratocumulus, essas nuvens são capazes de gerar aumentos de curta duração que podem chegar a 70% no caso do UV-B (305 nm). Também foi quantificado o número de pixels brilhantes das nuvens por meio da utilização do parâmetro de brilho do espaço de cores HSV, modelo que expressa as cores em termos do matiz, saturação e valor. Apesar da ausência de correlação entre irradiância e variação de brilho de nuvens durante os EARS nas diferentes faixas de comprimento de onda medidas em superfície, é crucial desenvolver algoritmos preditores para estudos futuros. Considerando os impactos dos EARS na dose diária de radiação, em geral, a radiação adicional em eventos prolongados equivale a cerca de 5% do total. Embora a contribuição dos eventos possa parecer insignificante, considerou-se que o aumento repentino do Índice Ultravioleta (IUV) ao longo do tempo tem o potencial de afetar o meio ambiente e agravar os indicadores de saúde em diversas regiões.

Palavras-chave: Radiação Ultravioleta. Nuvens. Óptica instrumental. Sensoriamento remoto da atmosfera.

CONTRIBUTION OF CLOUDINESS TO SOLAR ULTRAVIOLET IRRADIANCE ENHANCEMENT EVENTS MEASURED AT THE SURFACE

ABSTRACT

Ultraviolet radiation (RUV, 100-400 nm) drives numerous photochemical and photobiological processes at the Earth's surface, with clouds playing the role of the main atmospheric modulator due to the short-term variations in surface irradiance they induce. However, many times a day, radiation enhancement events (REE) cause ultraviolet (UV) irradiance to exceed that measured under clear-sky conditions. This study quantified the cloud contribution to REE at São José dos Campos (23.20° S, 45.86° W, 621 m) using UV spectral irradiances at six wavelengths (305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm, 395 nm) and the PAR band (Photosynthetically Active Radiation, 400-700 nm) obtained at the surface, as well as sky images. Events were detected when the cloud modification factor showed differences greater than two standard errors between the spectral irradiance measured under cloudy conditions and the reference irradiance. Evaluation of the occurrence of REE in different RUV and PAR bands showed an increase in the number of events with longer wavelengths, with UV-B radiation (305 nm) making up 6.0% of the 1,735 REE observed, while UV-A (340 nm) and PAR bands accounted for 17.5% and 30.5%, respectively. It was found that there is a 99.6% chance of observing REE up to 5 minutes in duration, with more pronounced increases in spring and summer, and more pronounced increases in the UV-A and PAR regions than in the UV-B region. REE with a solar zenith angle (SZA) of 30° to 35° are mainly caused by cumulus and stratus clouds, but also by mid-level clouds such as altocumulus and altostratus. For SZA of 45° to 55°, most enhancements are associated with altostratus and cirrus clouds. However, in summer, when associated with cumulus and stratocumulus clouds, these clouds can produce short term enhancements that can reach up to 70% in the case of UV-B (305 nm). The number of bright cloud pixels was also quantified using the brightness parameter in the HSV color space model, which expresses colors in terms of hue, saturation, and value. Although no statistical correlation was found between surface spectral irradiance and cloud brightness variation during REE for any of the wavelengths evaluated, it was considered critical to develop predictive algorithms for spectral irradiance and reference brightness under cloudy sky conditions for future research. The effect of the extended REE on the daily radiation dose is about 5% of the total. Despite the apparent insignificance, a sustained increase in the UV index could have an impact on the environment and worsen health indicators in different regions.

Keywords: Ultraviolet Radiation. Clouds. Instrumental Optics. Remote Sensing of the Atmosphere.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1. Principais bandas de absorção da RUV na atmosfera, em relação à altitude e ao comprimento de onda (λ).	7
Figura 2.2. Caminho óptico (s): a distância efetivamente percorrida por um feixe de radiação ao atravessar um meio opticamente ativo.	9
Figura 2.3. Distribuição da função de fase (P) (normalizada), em coordenadas polares, para o (a) espalhamento isotrópico e (b) espalhamento Rayleigh.....	12
Figura 2.4. Simulação do padrão angular de espalhamento da radiação ($\lambda = 550 \text{ nm}$) sobre partículas de diferentes diâmetros ($m = 1,52 + 0,008i$).	14
Figura 2.5. Variação diurna (relativa) da irradiância global UV-A e UV-B na latitude 50°	16
Figura 2.6. Variação relativa (%) da irradiância UV-A (360 nm) e UV-B (310 nm) em função da latitude no período de um ano.	17
Figura 2.7. Classificação das nuvens segundo altura e aparência na atmosfera.	20
Figura 2.8. Espectro de ação de eritema de McKinlay e Diffey normalizado a 297 nm.	22
Figura 2.9. Intervalos do IUV em escala de cores.....	24
Figura 2.10. Distribuição do IUV em um dia típico de céu não encoberto por nuvens.....	24
Figura 3.1. Irradiância UV (UV-A + UV-B) medida em Recife, PE, em 09/10/2011. As setas indicam possíveis eventos EARS.	25
Figura 3.1. Representação do Gradiente de Cores no RGB (Cubo) e no HSV (Cone).	35
Figura 4.1. O radiômetro multiespectral GUV-2511 (a) e seu diagrama interno (b).	38
Figura 4.2. a) Em primeiro plano, o imageador LSV; b) visão da área experimental com os instrumentos instalados, também em primeiro plano, no cavalete.	40
Figura 4.3. Fluxograma das atividades executadas neste estudo de EARS. ...	52
Figura 5.1. Perfis da irradiância espectral em um dia típico de céu não encoberto por nuvens: a) RUV e b) PAR, em SJC, em 01/06/2020; e perfis médios sazonais da irradiância em c) 305 nm e d) PAR.	54
Figura 5.2. Variação mensal da irradiância espectral (RUV e PAR) medida em SJC, entre 2019 e 2020. (a) 305 nm, (b) 380 nm e (c) PAR.	54
Figura 5.3. Obtenção da irradiância de referência a partir de imagens do LSV e medidas do GUV em 305 nm: (a) 01/06/2020; b) 27/12/2019.	56

.....	56
Figura 5.4. Variação diária percentual do fator de modificação da nuvem (CMF%) sobre a RUV e PAR: (a, c, e) 27/12/2019; (b, d, f) 09/02/2020.	57
Figura 5.5. Distribuição do intervalo contínuo de ocorrências dos EARS em SJC: UV-B (a, b, c); UV-A (d, e, f); PAR (g).	60
Figura 5.6. O gráfico de barras ilustra a distribuição mensal dos EARS: (a) UV-B (305 nm), (d) UV-A (380 nm) e (g) PAR. Os gráficos <i>boxplot</i> mostram o número de eventos e radiação extra por estação do ano: 305 nm (b, c), 380 nm (e, f) e PAR (h, i).	63
Figura 5.7. Número de EARS e CMF% em relação ao ASZ no UV-B (305 nm): (a) e (c): primavera e verão; (b) e (d) outono e inverno.....	64
Figura 5.8. Nuvens Altostratus e Altostratus observadas em ASZ de 34° durante EARS no UV-B (305 nm), em 01/12/2019.....	65
Figura 5.9. Nuvens do tipo Altostratus captadas em ASZ de 54°, durante EARS no UV-B (305 nm), em 23/06/2019.....	66
Figura 5.10. Nuvens Cumulus e Stratocumulus captadas em ângulo solar de 46°, durante EARS no UV-B (305 nm), em 09/02/2020.....	67
Figura 5.11. Número de EARS e CMF% em relação ao ASZ no UV-A (380 nm): (a) e (c): primavera e verão; (b) e (d) outono e inverno.....	69
Figura 5.12. Número de EARS e CMF% em relação ao ASZ na PAR: (a) e (c): primavera e verão; (b) e (d) outono e inverno.	69
Figura 5.13. Nuvens Cumulus e Stratocumulus em ASZ de 51° durante EARS no UV-A (380 nm) e PAR, em 09/02/2020.	71
Figura 5.14. Imagens originais mostradas na linha superior, a distribuição da intensidade RGB na linha do meio e de brilho no HSV na linha inferior, para o céu sem nuvens aparentes (a, d, g); parcialmente nublado (b, e, h); encoberto (c, f, i).	72
Figura 5.15. Imagem do céu sem nuvens aparentes (a) e seu histograma de brilho HSV (b). As linhas vermelhas mostram os limiares testados na segmentação.....	73
Figura 5.16. Imagem do céu sem nuvens aparentes e a mesma imagem onde os pixels com os diferentes limites de integração foram tingidos de vermelho (à direita):a (B > 180), b (B > 200), (B > 230) e d (B > 245).	74
Figura 5.17. Imagem do céu com nuvens e a mesma imagem onde os pixels com os diferentes níveis de integração foram tingidos de vermelho (à direita): a (B > 180), b (B > 200), (B > 230) e d (B > 245).	74
Figura 5.18. Variação sazonal do brilho em imagens captadas em condições de céu sem nuvens aparentes, segundo parâmetros: a) B > 180; b) B > 200; c) B > 230; d) B > 245.	75

Figura 5.19. EARS com maior variabilidade de brilho das nuvens no experimento (191%, em 09/02/2020, às 17h27 UT). A Figura mostra o céu com nuvens (a) e a mesma, onde os pixels brilhantes de mesma intensidade do disco solar ($B > 245$) foram tingidos de vermelho (b).	77
Figura 5.20. Correlação linear entre CMF% e VB% em EARS no UV-B (305 nm) ao longo do ano. As retas indicam o ajuste linear aplicada à cada estação do ano.	78
Figura 5.21. Correlação entre CMF% e VB% ao longo das estações do ano em EARS em 305 nm: a) em $ASZ < 40^\circ$; b) $ASZ > 40^\circ$ (b).	79
Figura 5.22. Radiação espectral extra (%) dos EARS em superfície. Valores máximos apresentados nas barras e médios representados nas linhas. Os números nas barras indicam os eventos dentro do mês.	87
Figura 5.23. Variação do IUV em 09/02/2020 (a): em azul, o IUV calculado, em vermelho, IUV de referência; b) variação durante o período mais longo de exposição contínua ao UV-B e c) aumento do IUV às 15h36 (UT).	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1. Classificação de fototipos cutâneos de Fitzpatrick (1988).....	22
Tabela 3.1. EARS na região do UV: localização, instrumentação e resolução das medidas, amplificação percentual em relação a um valor de referência e respectivas publicações científicas.	27
Tabela 5.1. Estatística descritiva dos EARS em SJC.....	58
Tabela 5.2. Radiação extra em superfície obtida para os maiores intervalos contínuos de EARS durante o experimento em SJC.....	88

LISTA DE SIGLAS

a_1	coeficiente para cálculo do IUV com o GUV
a_2	coeficiente para cálculo do IUV com o GUV
a_3	coeficiente para cálculo do IUV com o GUV
a_4	coeficiente para cálculo do IUV com o GUV
a_n	coeficiente das funções esféricas de Bessel
B	intensidade de brilho; parâmetro de brilho
B_{cn}	brilho em condição de céu com nuvens
b_n	coeficiente das funções esféricas de Bessel
B_{ref}	brilho de referência em condição de céu não encoberto por nuvens
d	medida de distância
d_λ	intervalo de comprimento de onda
E_D	componente difusa de E_G
E_G	irradiância global na superfície
E_λ	irradiância espectral
E_{Mie}	intensidade espalhada por partículas
E_{Ray}	intensidade espalhada por moléculas
E_s	componente direta de E_G

E_0	radiação incidente no topo da atmosfera
g	parâmetro de assimetria
K_{er}	constante equivalente a $40 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$
m	índice de refração complexo
N	densidade de moléculas
η	física; índice de refração
Π	física; número de espalhadores
n	estatística; número de instrumentos
$P(\theta)$	função de fase para ângulos de espalhamento
Q_{abs}	coeficiente de absorção
Q_{esp}	coeficiente de espalhamento
Q_{ext}	coeficiente de extinção
Q_{Ray}	coeficiente de extinção no espalhamento Rayleigh
r	coeficiente de correlação de Pearson
R^2	coeficiente de determinação
s	caminho óptico na atmosfera
S	irradiância biologicamente ativa
S_0	irradiância no topo da atmosfera
S_{er}	espectro de ação do eritema

$T(x)$	transformações matemáticas
x	física; parâmetro de Mie
y	estatística; valor individual
α	grau de polarização
ΔT	intervalo de tempo
f	termo de correção anisotrópica
λ	comprimento de onda
μ_0	cosseno do ASZ
ω	albedo simples
σ	erro padrão
σ_{abs}	seção transversal de absorção
σ_{esp}	seção transversal de espalhamento
σ_{ext}	seção transversal de extinção
σ_{Ray}	seção transversal das moléculas no espalhamento Rayleigh
τ	profundidade óptica total
θ	medida angular
ζ	parâmetro único nas transformações matemáticas

LISTA DE ABREVIATURAS

Amp	amplitude
ANOVA	análise de variância
ASZ	ângulo solar de zênite
CCD	Charged-Couple Device
cen	valor central
Cfa	clima subtropical úmido
CMF	Cloud Modification Factor (fator de modificação das nuvens)
cos	cosseno
csv	valor separado por vírgulas
CTO	coluna total de ozônio
DEP	dose eritematosa padrão
dif	diferença
DOSE	dose eritemal acumulada
DP	desvio padrão
EARS	Eventos de Amplificação da Radiação Solar
GUV	Ground-based Ultraviolet Radiometer
HSI	espaço de cor; H (matiz), S (saturação), I (intensidade)

HSV	espaço de cor; H (matiz), S (saturação), V (valor)
IUV	índice ultravioleta
JPEG	Joint Photographic Experts Group
K_{er}	constante equivalente a $40 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$
KNN	k-Nearest Neighbors (número de vizinhos mais próximos)
LSV	Local Sky Viewer
NPixels	número de pixels brilhantes
PAR	radiação fotossintética ativa
PSP	Precision Special Pyranometer
RGB	espaço de cor; R (vermelho), G (verde), B (azul)
RMSE	Root Mean Square Error
RUV	radiação ultravioleta
SJC	São José dos Campos; $23,20^\circ \text{ S}$, $45,86^\circ \text{ W}$, 621 m
SW	teste de Shapiro-Wilk
UT	tempo universal
UV	ultravioleta
UV ₃₀₅	RUV 305 nm medida com o GUV
UV ₃₁₃	RUV 313 nm medida com o GUV
UV ₃₂₀	RUV 320 nm medida com o GUV

UV ₃₄₀	RUV 340 nm medida com o GUV
UV-A	RUV, 320-400 nm
UV-B	RUV, 280-320 nm
UV-C	RUV, 10-320 nm
UV _{med}	irradiância em condição de céu com nuvens
UV _{sn}	irradiância em condição de céu não encoberto por nuvens
VB	variação do brilho

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Objetivos específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 A RUV solar.....	5
2.2. Interações da RUV na atmosfera	6
2.2.1 A absorção da RUV na atmosfera	6
2.2.2 O espalhamento da RUV na atmosfera.....	8
2.3 Parâmetros geofísicos que alteram a RUV na superfície	15
2.3.1 O ângulo solar de zênite (ASZ)	15
2.3.2 O ozônio	17
2.3.3 A altitude	18
2.3.4 O albedo superficial.....	18
2.3.5 O impacto dos aerossóis	18
2.3.6 O papel das nuvens	19
2.3.7 A taxa de dose eritematosa.....	21
3 EVENTOS DE AMPLIFICAÇÃO UV NA SUPERFÍCIE	25
3.1 O estado da arte dos EARS na região do UV	25
3.2 A identificação do fenômeno de amplificação	29
3.3 A observação das nuvens e o brilho visível durante as amplificações	31
4 MÉTODOS	37
4.1 A área de estudo	37
4.2 O radiômetro multiespectral GUV.....	37
4.3 O imageador LSV	39
4.4 O tratamento inicial dos dados de irradiância.....	41
4.5 A determinação dos EARS	43
4.6 A relação entre a irradiância e o brilho das nuvens durante os EARS	45

4.7 O cálculo da dose diária de RUV	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 A irradiância espectral UV medida em São José dos Campos	53
5.2 O modelo para identificação dos EARS	55
5.3 A caracterização estatística dos EARS	57
5.3.1 O número de eventos e o intervalo de ocorrência	57
5.3.2 A sazonalidade dos EARS	61
5.3.3 A posição das nuvens nos eventos	64
5.4 O estudo da variação do brilho das nuvens nos EARS	71
5.5 A contribuição dos EARS para o índice IUV e PAR	85
6 CONCLUSÕES	93
7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE A – CÓDIGO PYTHON PARA DETERMINAÇÃO DOS EARS ..	117
APÊNDICE B – CÓDIGO SIMPLIFICADO PARA HISTOGRAMAS HSV	129
APÊNDICE C – TRANSFORMAÇÕES MATEMÁTICAS PARA INVESTIGAÇÃO DA VARIAÇÃO DO BRILHO DAS NUVENS DURANTE OS EARS	131
APÊNDICE D – CÓDIGO KNN PARA O BRILHO DE REFERÊNCIA NOS EARS	133

1 INTRODUÇÃO

Dentro do espectro eletromagnético da radiação solar, a radiação ultravioleta (RUV) impulsiona numerosos processos fotoquímicos e fotobiológicos na superfície terrestre (STEPHENS et al., 2015), e mesmo desempenhando importante papel na regulação da fisiologia osteomineral, do sistema imunológico e cardiovascular, tem energia suficiente para produzir uma série de efeitos nocivos ao organismo humano, conforme a intensidade e o tempo de exposição dos indivíduos ao Sol (WHO, 1994; YAMASOE; CORRÊA, 2016; BORNMAN et al., 2019).

A incidência da RUV na superfície terrestre depende, fundamentalmente, do ângulo solar de zênite (ASZ) e de atenuações na atmosfera, particularmente, associadas à absorção pelo ozônio, à dispersão de Rayleigh pelas moléculas do ar, ao espalhamento e absorção por aerossóis¹ e ao espalhamento por nuvens (BAIS et al., 2019; SILVA et al., 2022).

Se por um lado a camada de ozônio é apontada como principal agente absorvedor de RUV na atmosfera, cabe às nuvens o papel de atuar como seu principal modulador atmosférico (LAMY et al., 2018; SILVA et al., 2019; 2022), uma vez que promovem variações de curto período na irradiância² e a efetiva redução da componente direta da radiação quando posicionadas na frente do Sol (LONG et al., 2006; SECKMEYER et al., 2008).

Contudo, ao contrário dos outros constituintes atmosféricos, que apenas atenuam a RUV, as nuvens podem também aumentar a irradiância UV na superfície, em um fenômeno destacado na literatura como efeito lente ou super irradiância (SABBURG; WONG, 2000; PARISI; DOWNS, 2004; CALBÓ et al., 2017; SILVA et al., 2019; ZAMALLOA-JARA et al., 2023).

Historicamente, desde a década de 1960, é sabido que em dias parcialmente nublados, em todos os comprimentos de ondas do espectro solar, a irradiância

¹ Aerossóis atmosféricos designam partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, com dimensão entre 1 nm e 100 µm, tamanho superior ao de moléculas individualizadas (Hinds, 1999).

² A irradiância é definida como o fluxo de radiação que incide sobre um elemento de superfície por unidade de área (Liou, 2002).

na superfície pode exceder o valor esperado em relação àquela que é medida em condições de céu não encoberto por nuvens (BENER, 1964; NORRIS, 1968; NACK; GREEN, 1974). Até então, essas intensificações eram interpretadas como o resultado de reflexões da radiação solar promovidas pelas extremidades das nuvens, fundamentação que hoje se mostra incompleta e pouco específica ao detalhamento de um fenômeno que é muito complexo (JÄRVELÄ et al., 2020).

De fato, os Eventos de Amplificação da Radiação Solar (EARS) podem ocorrer inúmeras vezes ao dia, com diferentes intervalos de duração, atribuídos não somente às bordas das nuvens, mas também ao espalhamento dos fótons por nuvens opticamente finas ou aberturas estreitas entre nuvens adjacentes (YORDANOV et al., 2013; ZHANG et al., 2018; SILVA, 2022). Fisicamente, suas propriedades ópticas podem ser compreendidas a partir da Teoria de Mie para o espalhamento da radiação por partículas de dimensões arbitrárias (YORDANOV et al., 2012; PECENAK et al., 2016), que apresenta, em termos de séries infinitas, uma solução analítica das equações de Maxwell para o espalhamento da radiação eletromagnética por uma esfera dielétrica (VAN DE HULST, 1981; LIOU, 2002).

Nos últimos 30 anos, amplificações na irradiância UV têm sido observadas em diferentes localidades do planeta, principalmente, a partir de medidas de banda larga (MIMS III; FREDERICK, 1994; TIBA; SILVA LEAL, 2017; SILVA et al., 2019). Porém, apesar de expressivos avanços no desenvolvimento de técnicas e ferramentas computacionais para a identificação dos eventos, não há um consenso quanto à sua caracterização formal, sendo formuladas diferentes hipóteses para explicar os mecanismos físicos subjacentes aos EARS (ZHANG et al., 2018; CASTILLEJO-CUBEROS; ESCOBAR, 2020).

Conduzir avaliações de longo prazo da irradiância UV em superfície, juntamente com o estudo dos EARS, representa uma tarefa desafiadora, porém de suma relevância, principalmente, para as populações que residem em áreas de baixas e médias latitudes, uma vez que os eventos podem incrementar a dose UV em curtos intervalos de tempo, potencializando os riscos de uma exposição inadequada à radiação solar (LIU et al., 2017; BAIS et al., 2019).

É preciso destacar que, para além dos impactos na saúde humana, a irradiância adicional resultante dos EARS e o aumento dos poluentes atmosféricos devido às atividades humanas podem interagir de maneira significativa, tendo potencial para afetar os ciclos biogeoquímicos em escala global, não se restringindo apenas a regiões tropicais e subtropicais (SULZBERGER et al., 2019; BAIS et al., 2019).

Nessa perspectiva, Bais et al. (2019) ressaltam que o aumento na concentração de CO₂ na atmosfera pode resultar em menores fluxos de calor latente e em um maior calor sensível para o sistema terrestre, promovendo modificações nas propriedades físicas das nuvens na camada limite em latitudes baixas e médias. Essas mudanças podem influenciar a quantidade de RUV espalhada na superfície e, como resultado, aumentar a frequência dos EARS, tornando-os, possivelmente, mais comuns, mais intensos e com períodos contínuos mais longos.

Dentro do contexto apresentado, surge uma questão fundamental: a interação entre as nuvens e a RUV tem a capacidade de gerar amplificações significativas da irradiância em diferentes comprimentos de onda, resultando em exposições mais intensas à radiação solar durante os EARS em latitudes médias?

Para investigar essa dinâmica, dada a relevância do estudo EARS em regiões tropicais, não apenas para avanços na pesquisa sobre a RUV, mas também para compreender o potencial impacto da radiação amplificada desses eventos na saúde humana e no meio ambiente a longo prazo, o presente trabalho se propõe a avaliar a influência das nuvens no espalhamento da RUV em diferentes comprimentos de onda ao longo de um período de um ano, utilizando medições espectrais e imagens do céu obtidas em superfície.

1.1 Objetivo

Desenvolver um método sistemático para analisar a contribuição das nuvens para os EARS em regiões espectrais do ultravioleta (UV) e da radiação fotossintética ativa (PAR, do inglês *Photosynthetically Active Radiation*), a partir de medidas simultâneas da irradiância espectral obtidas com radiômetros GUV (*Ground-based Ultraviolet Radiometer, Biospherical Instruments Inc.*) e imagens

do céu, captadas com imageador Local Sky Viewer (LSV), na cidade de São José dos Campos.

1.2 Objetivos específicos

1. Elaborar, a partir de um modelo semiempírico, um algoritmo para identificação de EARS em 6 linhas espectrais da RUV e na banda PAR, com base em imagens do céu e medidas de irradiância;
2. Caracterizar estatisticamente as situações em que ocorrem EARS e quantificar a irradiância espectral extra observada na superfície;
3. Avaliar possíveis expressões analíticas que correlacionem a irradiância espectral RUV e PAR com a variação do brilho das nuvens durante os eventos;
4. Estimar doses de radiação recebidas durante os EARS.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos necessários ao estudo da RUV solar na superfície terrestre, abordando suas interações na atmosfera em função de parâmetros geofísicos.

2.1 A RUV solar

A principal fonte de energia do sistema terrestre é a radiação eletromagnética proveniente do Sol, onde a RUV responde por menos de 10% da radiação solar total que incide no topo da atmosfera terrestre e cobre uma pequena parte do espectro eletromagnético solar, contida na região delimitada por comprimentos de onda (λ) entre 10 e 400 nm (PETTY, 2004).

Segundo Petty (2004), para facilitar o estudo das propriedades físicas e os efeitos químicos e biológicos da RUV, a região é particionada em três faixas espectrais: UV-A (320 a 400 nm), UV-B (280 a 320 nm) e UV-C (10 a 280 nm).

Aproximadamente 95% da RUV presente na superfície está contida na região do UV-A, faixa espectral que em excesso e em longo prazo pode danificar a pele, causando seu envelhecimento precoce (KULLAVANIJAYA; LIM, 2005; ERICKSON III et al., 2015; LOPES et al., 2015).

A radiação UV-B é 1000 vezes mais danosa à pele do que a radiação UV-A (KULLAVANIJAYA; LIM, 2005). Contudo, menos de 10% da irradiância UV-B que chega à estratosfera alcança a superfície terrestre, sendo o ozônio estratosférico seu principal agente absorvedor (SILVA et al., 2019; 2022).

A irradiância UV-B na superfície é fortemente influenciada pelo ângulo solar de zênite (ASZ) e constituintes atmosféricos, variando sazonalmente, em latitude, altitude e hora do dia (KULLAVANIJAYA; LIM, 2005; LOPES et al., 2015), fornecendo também energia motriz para todos os processos fotoquímicos que ocorrem na atmosfera, onde seus fótons podem fragmentar moléculas estáveis em frações muito reativas, que dão origem a espécies químicas que não ocorreriam na ausência de luz solar (ERICKSON III et al., 2015; LOPES et al., 2015; BARNES et al., 2019).

Uma das espécies mais ativadas fotoquimicamente pela RUV em uma atmosfera poluída é o dióxido de nitrogênio (NO_2), apontada como uma das principais moléculas precursoras do *smog* fotoquímico (BARNES et al., 2019). Outro exemplo é o radical hidroxila (OH^*), o oxidante mais importante na química da troposfera, fundamental na remoção de poluentes do ar, como os hidrocarbonetos originados nos processos de combustão incompleta (EHHALT et al., 1999; ERICKSON III et al., 2015).

Por fim, tem-se a região do UV-C, dada como a mais energética dentre as três e a mais nociva aos tecidos biológicos (BARNES et al., 2019). Apesar disso, seu papel na patogênese humana é bastante reduzido, uma vez que seus fótons são totalmente absorvidos pelas moléculas de oxigênio e ozônio na estratosfera (LOPES et al., 2015).

2.2. Interações da RUV na atmosfera

A atmosfera terrestre é composta principalmente por nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), que representam cerca de 99%. O gás inerte Argônio (Ar) compõe a maior parte do 1% restante (JACOBSON, 2005), enquanto vapor d'água, gás carbônico, ozônio e outros gases estão presentes em quantidades mínimas em relação à composição majoritária. Além disso, a atmosfera contém aerossóis, partículas de poeira, gotículas de água suspensas no ar e cristais de gelo, responsáveis pela formação das nuvens (ANDREWS, 2010).

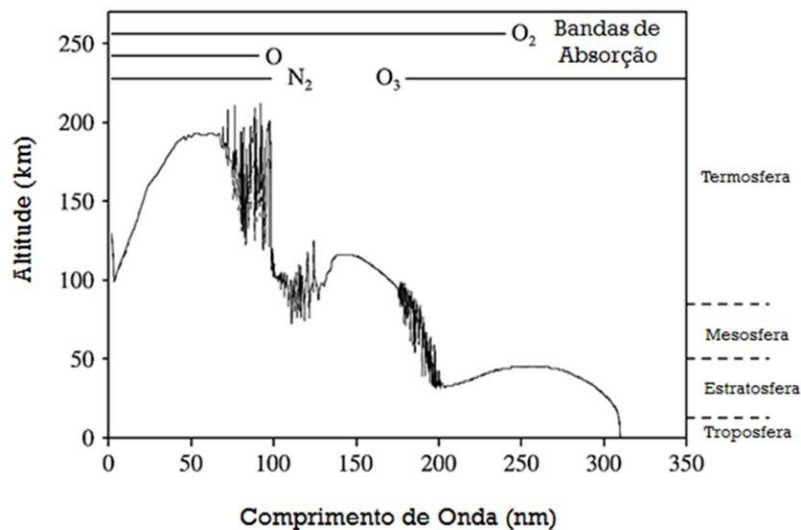
Conforme mencionado na seção 2.1, a RUV sofre uma significativa atenuação ao interagir com essas moléculas e partículas, em um processo conhecido como extinção. Essa redução é quantificada com base no princípio da conservação de energia, que envolve tanto o espalhamento da radiação em todas as direções quanto a absorção de energia por esses elementos (SEINFELD; PANDIS, 2006).

2.2.1 A absorção da RUV na atmosfera

Na Figura 2.1, tem-se a representação do perfil de absorção da RUV na atmosfera, considerando tanto a altitude quanto o comprimento de onda (λ). Conforme ilustrado, o oxigênio molecular e o ozônio emergem como os principais

absorvedores da RUV na atmosfera terrestre livre de poluentes (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Figura 2.1. Principais bandas de absorção da RUV na atmosfera, em relação à altitude e ao comprimento de onda (λ).



Fonte: Adaptado de Andrews (2010).

De acordo com a Figura 2.1, o oxigênio e o nitrogênio absorvem toda radiação UV-C incidente em altitudes maiores que 80 km, impedindo que fótons altamente energéticos cheguem à superfície. Nesta figura, a irregularidade observada na banda espectral de comprimento de onda entre 70 e 100 nm é associada à ionização da alta atmosfera, enquanto a faixa de 100 a 130 nm mostra irregulares de origem desconhecida (ANDREWS, 2010). Observa-se ainda que o O₂ absorve fortemente a RUV na faixa de 100 a 175 nm, denominada *continuum* de Schumann-Runge, e também entre 175 e 200 nm, chamada de banda de Schumann-Runge (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Na faixa entre 200 e 245 nm (*continuum* de Herzberg), os fótons são absorvidos, principalmente, pelo O₂ estratosférico, dando origem à camada de ozônio (JACOBSON, 2005). Neste ciclo, o ozônio absorve fortemente a RUV na faixa de 230 a 300 nm (banda de Hartley) e fracamente na região entre 310 nm e 350 nm (banda de Huggins) (ANDREWS, 2010).

Dentre outros gases absorvedores da RUV na atmosfera, pode-se ainda destacar o dióxido de nitrogênio (NO_2), que absorve a radiação solar em uma larga faixa espectral, de 190 nm a 650 nm, com pico de absorção próximo a 400 nm (SOLOMON et al., 1999; FINLAYSON-PITTS; PITTS JR., 1999; HAWE et al., 2007), e o dióxido de enxofre (SO_2), que apresenta absorção muito fraca na banda de 340 a 390 nm, moderadamente forte entre 260 e 340 nm e muito forte na faixa de 180 a 240 nm (EHHALT et al., 1999; VANDAELE; HERMANS, 2009; DAVIS; MCLAREN, 2020).

Na baixa atmosfera, poluentes como o *black carbon*³, hematita (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3), ao absorver fótons tanto do UV-A quanto do UV-B, são apontados como as principais partículas absorvedoras da RUV (EHHALT et al., 1999; JACOBSON, 2005).

Além destes, compostos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e particulados nitrogenados também são destacados como absorvedores da RUV na troposfera, podendo ser citados como exemplo os picos do nitrato de sódio (297 nm), do íon nitrato (302 nm) e do nitrato de amônio (308 nm) (SOMMER, 1989; EHHALT et al., 1999).

2.2.2 O espalhamento da RUV na atmosfera

O espalhamento da radiação solar por partículas é um dos processos mais importantes na modulação da RUV em superfície (JACOBSON, 2005).

Para Liou (2002), a atenuação da radiação solar ao atravessar uma camada de material opaco é definida em termos da profundidade óptica atmosférica (τ), que é determinada em relação à vertical na

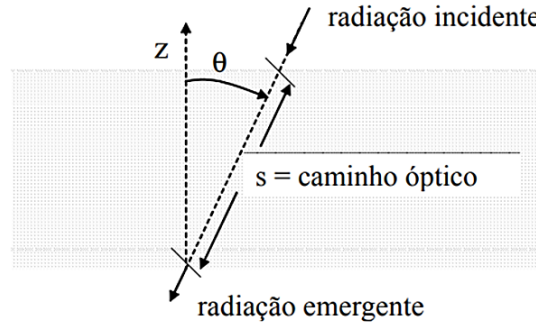
Figura 2.2, onde, para um caminho óptico (s), a componente vertical (z) é dada por $s \cos\theta$, que orienta a propagação da radiação incidente (LIOU, 2002). Dessa forma, a irradiância global na superfície (E_G) pode ser escrita em termos de suas

³ O *black carbon* é um dos principais componentes do material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm . Suas fontes são: a queima de combustíveis fósseis, a queima de combustíveis sólidos para indústrias, queima residencial de madeira e carvão, queima de biomassa a céu aberto (agricultura, floresta e vegetação em geral) e centrais elétricas que utilizam óleo pesado ou carvão como insumos (Bond et al., 2013).

componentes direta (E_S) e difusa (E_D) (Equação 2.1).

$$E_G = E_S \cos \theta + E_D \quad (2.1)$$

Figura 2.2. Caminho óptico (s): a distância efetivamente percorrida por um feixe de radiação ao atravessar um meio opticamente ativo.



Fonte: Yamasoe e Corrêa (2016).

Na Equação (2.1), E_S é definida como a irradiância transmitida na direção do feixe incidente, com formulação matemática descrita pela Lei de Beer para a extinção da radiação solar (Equação 2.2),

$$E_S = S_0 e^{-\tau/\mu_0} \quad (2.2)$$

onde S_0 é a irradiância no topo da atmosfera, μ_0 é o cosseno do ASZ ($\cos\theta$) e τ é a profundidade óptica total da camada atmosférica.

O termo E_D na Equação (2.1) trata da irradiância que atinge a superfície após ter sofrido desvios em sua trajetória, decorrente da interação com moléculas, aerossóis e nuvens (ANDREWS, 2010), sendo associado aos parâmetros profundidade óptica (τ), função de fase para ângulo de dispersão dos raios solares (P) e albedo simples (ω), que fornecem detalhes sobre as propriedades físicas dos constituintes atmosféricos e como promovem a atenuação da radiação incidente no processo de espalhamento (PETTY, 2004).

O termo τ pode ser escrito como a soma integral do coeficiente de extinção (Q_{ext})

ao longo do caminho óptico (s), de acordo com a Equação (2.3).

$$\tau = \int Q_{ext} ds \quad (2.3)$$

Para a RUV, τ representa a soma das atenuações atribuídas à absorção pelo ozônio, espalhamento pelas moléculas do ar, espalhamento e absorção por aerossóis e espalhamento das nuvens (BAIS et al., 2019; SILVA et al., 2022).

Segundo Petty (2004), Q_{ext} é estabelecido em função da seção transversal de extinção da partícula (σ_{ext}), que, por sua vez, depende das seções transversais de espalhamento (σ_{esp}) e de absorção (σ_{abs}), conforme a Equação (2.4). Por consequência, tem-se que Q_{ext} é dado por $Q_{ext} = Q_{esp} + Q_{abs}$ (Equação 2.5), onde Q_{esp} é o coeficiente de espalhamento e Q_{abs} é o coeficiente de absorção.

$$\sigma_{ext} = \sigma_{esp} + \sigma_{abs} \quad (2.4)$$

$$Q_{ext} = Q_{esp} + Q_{abs} \quad (2.5)$$

A proporção de Q_{esp} para Q_{ext} é chamada de albedo simples (ω), determinado como $\omega = Q_{esp}/Q_{ext} = \sigma_{esp}/\sigma_{ext}$, onde partículas não espalhadoras apresentam $\omega = 0$, enquanto partículas que somente a espalham tem $\omega = 1$ (LIOU, 2002).

Embora uma solução simplificada para o espalhamento da radiação por partículas possa ser encontrada por métodos assintóticos (SPOHN, 1997; FRÖLICH et al., 2002; CHEW, 2020), seu formalismo matemático tem sido compreendido a partir da Teoria de Mie, desenvolvida em detalhes por inúmeros autores nos últimos anos (DEIRMENDJIAN, 1969; VAN DE HULST, 1981; BOHREN; HUFFMAN, 1983; HERGERT; WRIEDT, 2012; CHEW, 2020).

A solução apresentada por Mie resolve as equações de Maxwell para o espalhamento da radiação eletromagnética por uma esfera dielétrica em termos

de funções vetoriais esféricas (VAN DE HULST, 1981; LIOU, 2002). Nesta solução, Q_{esp} e Q_{ext} são calculados a partir da integração do vetor de *Poynting*⁴ em relação às variáveis angulares e espaciais, sendo Q_{abs} determinado em termos relativos, como $Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{esp}$ (JACOBSON, 2005).

Conforme a Teoria de Mie, o tamanho de uma partícula espalhadora é parametrizado pela razão entre a circunferência da partícula e o comprimento de onda (λ) da radiação incidente sobre ela, ($x = 2\pi r/\lambda$), razão definida como parâmetro de Mie (SEINFELD; PANDIS, 2006). Segundo esse parâmetro, a componente difusa da radiação solar (E_D) pode ser decomposta em termos de duas contribuições principais: o espalhamento Rayleigh e espalhamento Mie.

O primeiro deles, o espalhamento Rayleigh, é um dos processos mais importantes de espalhamento da RUV por gases na atmosfera, sendo decorrente do redirecionamento da radiação incidente, principalmente, pelas moléculas de nitrogênio e oxigênio, que têm dimensão⁵ muito reduzida em relação aos comprimentos de onda incidentes (JACOBSON, 2005).

Segundo Liou (2002), a função de fase do espalhamento Rayleigh para a radiação solar incidente não polarizada é dada pela Equação (2.6),

$$P(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2\theta) \quad (2.6)$$

e o espalhamento Rayleigh é dado pela Equação (2.7), que mostra que a distribuição angular da intensidade espalhada é diretamente proporcional à função de fase.

⁴ Na Física, o vetor de *Poynting* está relacionado com a propagação da energia das ondas eletromagnéticas, sendo definido como o vetor que indica a direção e a taxa de transferência de energia da onda em um determinado ponto do espaço (Jacobson, 2005). O vetor de *Poynting* é perpendicular ao plano formado pelos campos elétrico e magnético da onda, e sua magnitude representa a densidade de fluxo de energia da onda (Liou, 2002).

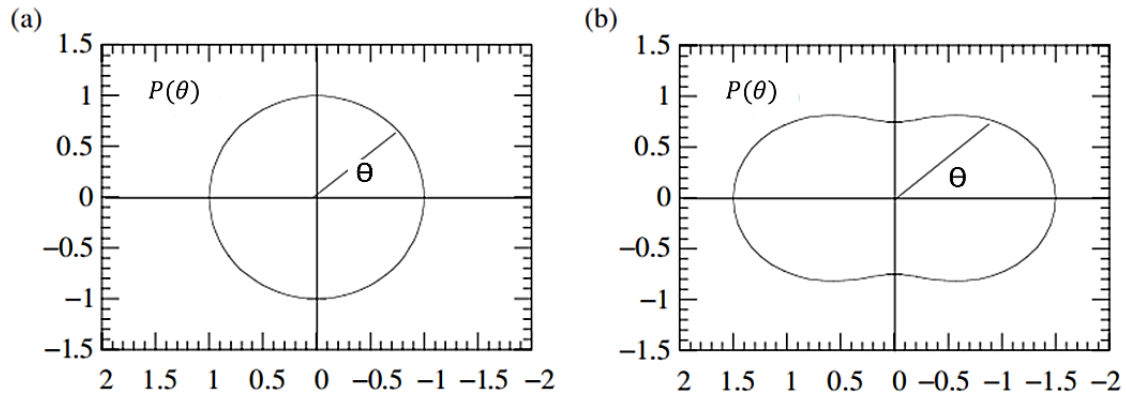
⁵ Os espalhadores da radiação solar na atmosfera variam em tamanho de moléculas de gás ($\sim 10^{-4}$ μm) a aerossóis (~ 1 μm), gotículas de água (~ 10 μm), cristais de gelo (~ 100 μm) e grandes gotas de chuva e partículas de granizo (~ 1 cm) (Andrews, 2010).

$$E_{Ray} = \left(\frac{4E_0}{d^2}\right)\alpha^2 \left(\frac{128\pi^5}{3\lambda^4}\right) \left(\frac{1+\cos^2\theta}{2}\right) \left(\frac{P(\theta)}{4\pi}\right) \quad (2.7)$$

De acordo com a Equação (2.7), a intensidade da radiação solar não polarizada espalhada por uma molécula é proporcional à E_0 (radiação incidente) e inversamente proporcional ao quadrado da distância (d) entre a molécula e o ponto de observação. Além desses dois fatores, a intensidade espalhada também depende do grau de polarização (α) e do comprimento de onda (λ) da radiação incidente, bem como do ângulo de espalhamento (θ).

As Figuras 2.3a e 2.3b mostram, respectivamente, funções de fase para o espalhamento isotrópico ($P(\theta) = 1$) e Rayleigh. Nelas, nota-se que a função de fase para espalhamento isotrópico é distribuída igualmente em todas as direções, enquanto para o espalhamento Rayleigh ela é simétrica, com projeções, principalmente, nas direções para frente e para trás (JACOBSON, 2005).

Figura 2.3. Distribuição da função de fase (P) (normalizada), em coordenadas polares, para o (a) espalhamento isotrópico e (b) espalhamento Rayleigh.



Fonte: Adaptado de Jacobson (2005).

O coeficiente de extinção devido ao espalhamento Rayleigh (Q_{Ray}) é dado por $Q_{Ray} = N\sigma_{Ray}$, sendo proporcional à N (densidade de moléculas) e σ_{Ray} (seção transversal das moléculas). Como N diminui exponencialmente com o aumento da altitude, a extinção da radiação solar devido ao espalhamento Rayleigh

também diminui exponencialmente com o aumento da altitude (ANDREWS, 2010).

O termo σ_{Ray} pode ser estimado a partir da Equação (2.8),

$$\sigma_{Ray} = \frac{8\pi^3(\eta^2-1)^2}{\lambda^4 N^2} f \approx \frac{32\pi^3(\eta-1)^2}{3\lambda^4 N^2} f \quad (2.8)$$

onde η é o índice de refração real do meio, considerando a temperatura de 288 K e pressão de 1 atm, e f é o termo de correção anisotrópica, que é da ordem de 1,05 para espalhamentos isotrópicos perfeitos, calculado em função do comprimento de onda (JACOBSON, 2005). Examinando a Equação (2.8), tem-se que Q_{Ray} varia inversamente com a quarta potência de comprimento de onda (λ), espalhando comprimentos de onda curtos de modo mais eficiente do que comprimentos de onda longos.

Diferente do espalhamento Rayleigh, quando o diâmetro da partícula espalhadora é da ordem do comprimento de onda da radiação incidente a radiação está sob o regime do espalhamento Mie (JACOBSON, 2005).

No espalhamento Mie, a intensidade espalhada por uma partícula em função da direção é dada pela Equação (2.9) (LIOU, 2002),

$$E_{Mie} = \frac{\sigma_{esp}}{d^2} \frac{P(\theta)}{4\pi} E_0 \quad (2.9)$$

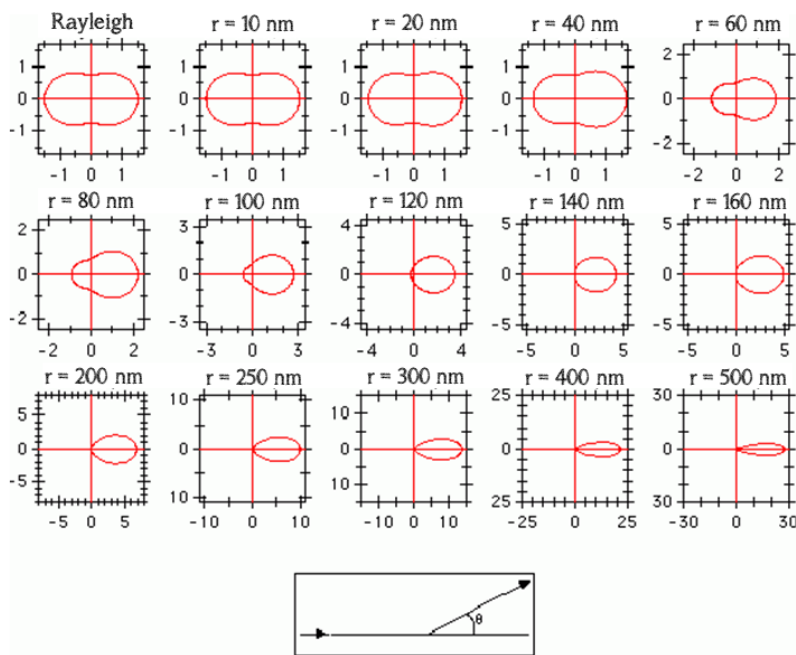
onde θ é o ângulo de espalhamento, d é a distância entre a partícula e o observador, σ_{esp} é a seção transversal de espalhamento, $P(\theta)$ é a função de fase e 4π é o ângulo sólido para todo o espaço esférico. Já a direção da radiação espalhada depende do parâmetro de assimetria (g) (Equação 2.10), um fator que caracteriza a direção preferencial do espalhamento, também compreendido como sendo a média ponderada da intensidade do cosseno do ângulo de espalhamento (JACOBSON, 2005).

$$P(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{(1-g^2)}{(1+g^2-2g \cos\theta)^{3/2}} \quad (2.10)$$

Na Equação (2.10), para $g = 0$, tem-se o espalhamento simétrico da radiação, enquanto na medida em que g se aproxima de 1 a radiação é espalhada, predominantemente, de modo frontal. Valores negativos de g denotam o retroespalhamento (ANDREWS, 2010).

A Figura 2.4 mostra a simulação do padrão angular de espalhamento da radiação incidente ($\lambda = 550 \text{ nm}$) sobre partículas de diferentes diâmetros, todas com índice de refração complexo $m = 1,52 + 0,008i$. Nesta figura, quando a partícula é da ordem de tamanho do comprimento de onda incidente, a distribuição da função de fase ocorre como no espalhamento Rayleigh. À medida que a partícula se torna maior em relação à onda incidente, tem-se o predomínio do espalhamento Mie, onde a radiação espalhada se concentra mais fortemente na direção frontal, exprimindo padrões cada vez mais complexos (LIOU, 2002).

Figura 2.4. Simulação do padrão angular de espalhamento da radiação ($\lambda = 550 \text{ nm}$) sobre partículas de diferentes diâmetros ($m = 1,52 + 0,008i$).



Fonte: Adaptado de Schwartz (1996).

Em termos de eficiência do espalhamento, o coeficiente de espalhamento no regime Mie é determinado conforme a Equação (2.11), onde x é o parâmetro de Mie, Π corresponde ao número de espalhadores e a_{Π} e b_{Π} são os coeficientes obtidos das funções esféricas de Bessel (VAN DE HULST, 1981).

$$Q_{esp} = \frac{2}{x^2} \sum_1^{\infty} (2\Pi + 1) (|a_{\Pi}|^2 + |b_{\Pi}|^2) \quad (2.11)$$

O coeficiente de eficiência da extinção (Q_{ext}) de uma única partícula no espalhamento Mie é definido pela Equação (2.12),

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_1^{\infty} (2\Pi + 1) Re(a_{\Pi} + b_{\Pi}) \quad (2.12)$$

onde Re corresponde à parte real dos coeficientes a_n e b_n .

2.3 Parâmetros geofísicos que alteram a RUV na superfície

2.3.1 O ângulo solar de zênite (ASZ)

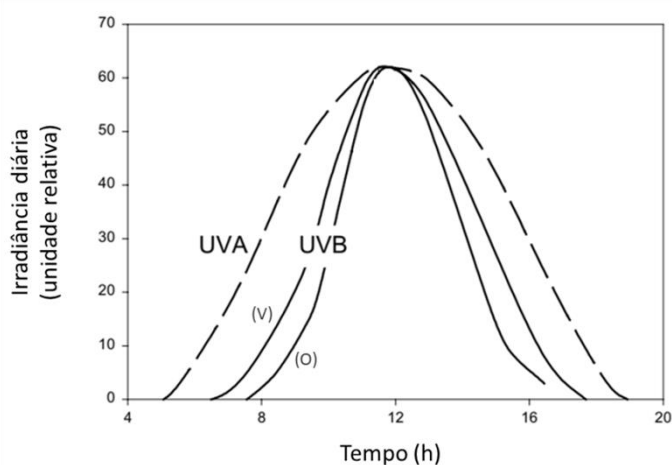
De acordo com a Equação (2.1), a irradiância medida em superfície é dada em função do caminho óptico percorrido pela radiação solar através da atmosfera e da quantidade de atenuadores ao longo desse caminho. Assim, a irradiância em uma superfície horizontal diminui com o aumento do ASZ (variação horária) (KERR; FILETOV, 2008) (Figura 2.5).

Kerr (2005) afirma que, devido à forte absorção de UV-B pelo ozônio, a variação sazonal do UV-B é mais proeminente do que a do UV-A. A irradiância global na superfície depende, explicitamente, da massa de ar atmosférica, isto é, do caminho óptico seguido pela radiação. Contudo, a massa de ar atmosférico para

um dado comprimento de onda depende não apenas do ASZ, mas também dos componentes atmosféricos e de sua distribuição na atmosfera.

Como exemplo, a Figura 2.5 mostra como as irradiâncias UV-A e UV-B variam no decorrer de um dia típico de verão e de outono em determinada localidade na latitude de 50°. Nela, enquanto medidas da radiação UV-B no verão (V) e no outono (O) se mostram diferentes, para a radiação UV-A, as medidas correspondentes a essas estações são praticamente sobrepostas.

Figura 2.5. Variação diurna (relativa) da irradiância global UV-A e UV-B na latitude 50°.



Fonte: Adaptado de Moan (2001).

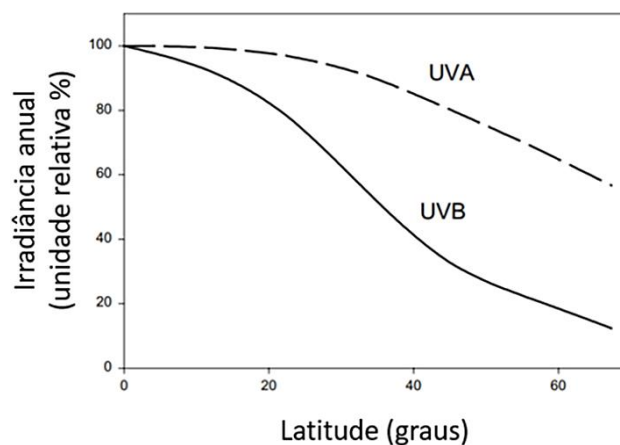
Ainda segundo a Figura 2.5, para a latitude 50°, Moan (2001) afirma que no verão, enquanto a irradiância UV-B é reduzida pela metade cerca de 2,5 horas após o meio-dia local, no UV-A, a metade da intensidade é alcançada somente 4 horas após o meio-dia. No outono, a irradiância UV-B varia mais do que no verão ao longo do dia e é reduzida pela metade cerca de 2 horas após o meio-dia local. Cabe destacar que outras latitudes têm variações diferentes destas apresentadas por Moan (2001).

A distância da Terra ao Sol também afeta a irradiância UV em superfície. O Hemisfério Norte fica 1,7% mais longe do Sol no verão do que o Hemisfério Sul (MOAN, 2001). Essa variação percentual, aliada às condições atmosféricas e à variação do ozônio na porção sul do planeta, faz com que a RUV no sul seja, em

média, de 12% a 15% maior do que a observada no norte em uma mesma estação do ano (MCKENZIE et al., 1996).

Em relação à latitude, a irradiância anual UV-B varia mais do que a irradiância anual UV-A (Figura 2.6). Observa-se na Figura 2.6 que a variação anual relativa da irradiância UV-B para latitudes de 60°, 45° e 30° é de, respectivamente, 80%, 60% e 35%, em relação à radiação incidente no Equador. A variação anual relativa correspondente a essas latitudes para a radiação UV-A é de 40%, 20% e 8%, respectivamente.

Figura 2.6. Variação relativa (%) da irradiância UV-A (360 nm) e UV-B (310 nm) em função da latitude no período de um ano.



Fonte: Adaptado de Moan (2001).

Ressalta-se que como a Terra gira com uma inclinação de aproximadamente 23° em relação ao plano da eclíptica e as latitudes em torno deste ângulo recebem maior quantidade de radiação solar no verão, conseqüentemente, uma maior quantidade de RUV atinge a superfície nessa época do ano.

2.3.2 O ozônio

Devido aos ciclos solares, flutuações na irradiância UV-C na atmosfera superior são da ordem de 10% a 200 nm e entre 6 e 8% a 250 nm (KERR; FILETOV, 2008). Essa oscilação impacta diretamente a quantidade de ozônio formada na

estratosfera, influenciando, conseqüentemente, à fração de UV-B que chega até a superfície terrestre (COLDEWEY-EGBERS et al., 2022).

Análises da coluna total de ozônio (CTO) nas últimas décadas têm demonstrado que quando a atividade solar está no máximo em comparação com o mínimo do ciclo solar há um aumento de 2% a 3% na CTO (GHOSH, 2002). Usualmente, no Hemisfério Sul, a CTO varia de $0,6 \pm 0,5\%$ por década em regiões subtropicais, de $1,0 \pm 0,9\%$ por década nas latitudes médias e de $2,8 \pm 2,6\%$ por década na faixa de latitude entre 60° e 70° S (COLDEWEY-EGBERS et al., 2022).

Alterações no perfil da CTO promovem variações de 5 a 25% na irradiância UV-B em solo (PETKOV et al., 2014; ANTON et al., 2016; BELAN et al., 2020). A intensidade da radiação UV-B pode aumentar em até 40% na superfície quando ocorrem depressões de ozônio estratosférico (GIES et al., 2013; BELAN et al., 2020).

2.3.3 A altitude

Para um ângulo de elevação solar de 20° , a irradiância UV-A aumenta em até 12% a cada 1000 m de incremento na altura. Para o UV-B esse valor é próximo de 20%. Para um ângulo de elevação solar de 60° , a irradiância é aumentada em cerca de 9% a cada 1000 m de incremento na altura para o UV-A e 14% para o UV-B (BLUMTHALER et al., 1997).

2.3.4 O albedo superficial

Em relação às reflexões promovidas pela superfície, areia e asfalto podem refletir de 1 a 5% da intensidade UV-B incidente, espelhos d'água e pastagens entre 2 e 7% e superfícies pintadas de branca até 10% (MOAN, 2001). A reflexão pela neve merece atenção especial, pois, para um ângulo solar de 45° , com um albedo de superfície de 80%, a irradiância UV-B pode ser aumentada por um fator de 4 (KERR; FILETOV, 2008).

2.3.5 O impacto dos aerossóis

A composição e a distribuição dos aerossóis desempenham um papel muito importante na modulação da RUV em superfície, uma vez que afetam a

irradiância UV por espalhamento e absorção, podendo ainda afetar a formação de nuvens (SEINFELD; PANDIS, 2006; KERR; FILETOV, 2008). Nesse sentido, enquanto alguns aerossóis, como a fuligem e os compostos orgânicos, absorvem a RUV e reduzem a intensidade de radiação que chega à superfície, outros, formados por sulfatos e nitratos, são eficientes em dispersar a radiação solar em diferentes direções, aumentando a quantidade de RUV que alcança o solo (ANDREAE; ROSENFELD, 2008).

Embora os mecanismos associados ao efeito radiativo dos aerossóis atmosféricos sejam bem conhecidos, ainda persistem significativas incertezas quanto à sua análise quantitativa, distribuição espacial e temporal, especialmente, em regiões de latitudes médias (DENG et al., 2012; COLDEWEY-EGBERS et al., 2022).

A contribuição dos aerossóis atmosféricos na variação da irradiância UV-B é da ordem de 10% em condições de céu sem nuvens (DE BOCK et al., 2014; FOUNTOULAKIS et al., 2016; 2022). No entanto, essa contribuição pode variar de 4% a 11%, dependendo da quantidade de nuvens no céu (BELAN et al., 2020). Segundo Belan et al. (2020), essa situação altera rapidamente quando a densidade de partículas atmosféricas aumenta, citando, como exemplo, as ricas massas de aerossóis que viajam do Saara à Espanha (ANTON et al., 2012) e a forte poluição de Beijing (AN et al., 2008; DENG et al., 2012), capazes de atenuar mais de 50% da radiação UV-B em superfície.

2.3.6 O papel das nuvens

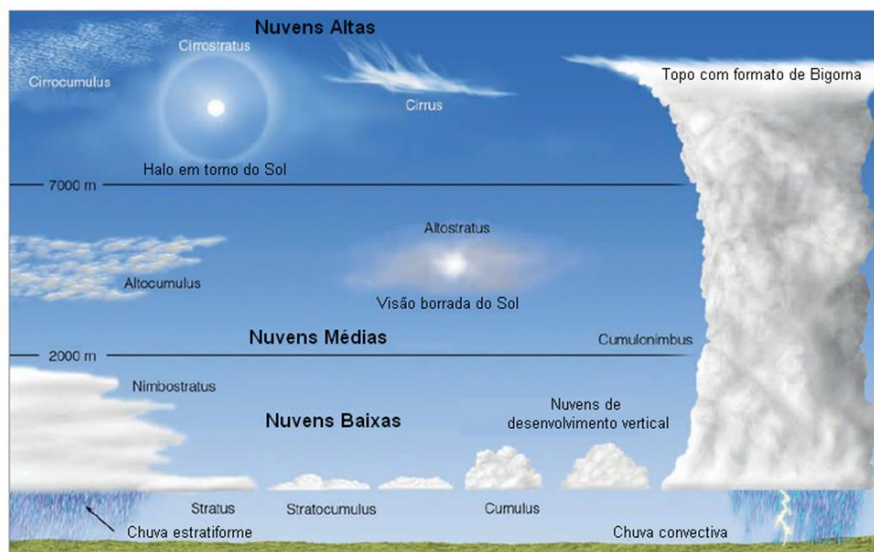
Dentre os agentes moduladores da RUV na superfície terrestre, as nuvens são apontadas com a maior influência sobre a irradiância superficial do que qualquer outro parâmetro atmosférico (STEPHENS et al., 2012; CALBÓ et al., 2017; JÄRVELÄ et al., 2020; SILVA, 2022).

As nuvens podem ser descritas como um aglomerado de gotículas formadas por vapor de água condensado em torno de uma minúscula partícula de aerossol, chamada de núcleo de condensação (WMO, 2017; SILVA, 2022). No entanto, Silva (2022) afirma que não há um consenso amplamente aceito sobre o número

exato de gotículas que resultam em uma nuvem, especialmente porque uma pluma de aerossóis, normalmente, não sendo compostos por gotículas de água, pode se encaixar perfeitamente na descrição de nuvem supracitada.

Convencionalmente, as nuvens são classificadas em termos de sua posição e aparência na atmosfera, de acordo com níveis de altitude que se sobrepõem, conforme a Figura 2.7.

Figura 2.7. Classificação das nuvens segundo altura e aparência na atmosfera.



Fonte: Tunes (2018).

Nuvens com altura de base de pelo menos 6 km são definidas como nuvens altas, comumente chamadas de Cirrus; nuvens médias (altura de base entre 2 km e 8 km) são formadas por Altostratus e Altopumulus; nuvens baixas, com altura de base abaixo de 2 km, recebem o nome de Stratus ou Cumulus (WRIEDT, 2012; WMO, 2017). Há ainda um grupamento que trata das nuvens com desenvolvimento vertical acentuado, muito comum em regiões tropicais, denominadas Cumulonimbus (KERR; FIOLETOV, 2008).

O efeito mais conhecido e mais frequente das nuvens sobre a radiação solar é a atenuação (WRIEDT, 2012, CALBÓ et al., 2017), onde alguns estudos demonstrando que a cobertura de nuvens pode reduzir a RUV de 10% a 38%

(MCKENZIE et al., 1996; LUBIN et al., 1998). Em condições de Cumulonimbus, no entanto, a irradiância UV em superfície pode ser reduzida em mais de 95% (KERR, 2005; KERR; FIOLETOV, 2008).

Apesar disso, contrariando o senso comum, em condições de céu parcialmente nublado, a RUV medida em superfície pode apresentar valores acima dos esperados em relação aos dias de céu não encoberto por nuvens, sendo observado um aumento súbito do fluxo de radiação solar para o solo a partir da radiação espalhada pelas nuvens, o que tem sido descrito como EARS (SCHAFER et al., 1996; PARISI; DOWNS, 2004; YORDANOV et al., 2013; SILVA et al., 2019; SILVA, 2022). Além do interesse científico acerca da análise dos EARS, a radiação extra espalhada pelas nuvens pode ter um impacto significativo sobre a saúde humana e diferentes áreas do conhecimento, tanto científicas quanto tecnológicas (CASTILLEJO-CUBEROS; ESCOBAR, 2020).

2.3.7 A taxa de dose eritematosa

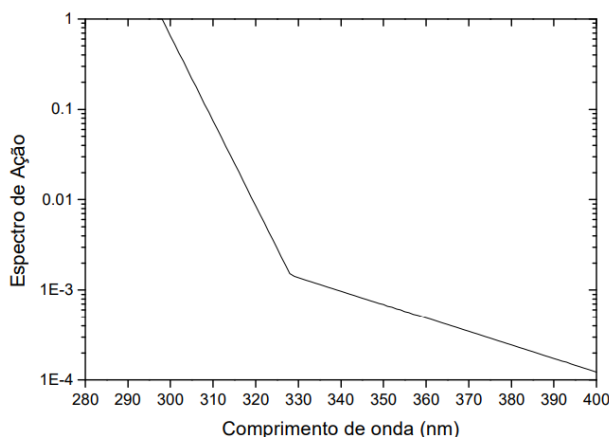
O eritema solar é uma resposta inflamatória aguda à dilatação dos vasos sanguíneos superficiais da derme, caracterizada por vermelhidão, inchaço e dor na pele, causada pela exposição excessiva à RUV (SCHMALWIESER et al., 2002).

A sensibilidade biológica nos diferentes comprimentos de onda da radiação solar é descrita por um espectro de ação, que expressa por meio de uma relação numérica a resposta biológica relativa à exposição a radiações monocromáticas em uma determinada faixa espectral (MADRONICH, 1993 apud KIRCHHOFF et al., 2000). Segundo Kirchhoff et al. (2000), para avaliar o efeito da radiação solar sobre a pele humana utiliza-se o espectro de ação de eritema de McKinlay e Diffey (1987), ilustrado na Figura 2.8, que mostra a eficácia relativa de diferentes comprimentos de onda UV para eritemas, normalizado a 297 nm.

Em termos de escala, a dose acumulada de RUV é representada pela unidade chamada dose eritematosa padrão (DEP), onde cada unidade corresponde a 100 J m^{-2} . De acordo com recomendações internacionais (WHO, 1994; MOEHRLE et al., 2003), estima-se que uma dose diária de 1,08 DEP seja suficiente para atender às necessidades diárias de vitamina D para os seres

humanos. No entanto, é importante ressaltar que a DEP não pode ser definida por um valor único, pois varia de pessoa para pessoa, principalmente com base no tipo de pele (Tabela 2.1).

Figura 2.8. Espectro de ação de eritema de McKinlay e Diffey normalizado a 297 nm.



Fonte: Kirchhoff et al. (2000).

Na quinta coluna da Tabela 2.1 são descritos os valores de DEP necessários para produzir eritema de acordo com o fototipo cutâneo, segundo classificação de Fitzpatrick (1988). Doses variando de 1,5 a 3,0 são suficientes para produzir eritema em indivíduos de pele mais clara, fototipos I e II. Por outro lado, uma dose de 4,5 a 6 DEP pode causar esse mesmo efeito em peles com fototipos III e IV (Tabela 2.1) (FITZPATRICK, 1988).

Tabela 2.1. Classificação de fototipos cutâneos de Fitzpatrick (1988).

Cor da pele	Fototipo	Queimadura	Bronzeamento	DEP
Branca	I	sim	não	2,0-3,0
	II	sim	mínima	2,5-3,5
	III	sim	sim	3,0-5,0
	IV	não ou mínima	sim	4,5-6,0
Parda	V	não	sim	6,0-10,0
Negra	VI	não	sim	10,0-20,0

Fonte: Adaptado de SMP (2017).

Usando a DEP e o espectro de ação é possível calcular a dose eritemal acumulada (DOSE) em um determinado período de tempo, em unidades de energia por área, conforme a Equação (2.13), onde S é a irradiância solar biologicamente ativa em um intervalo de tempo (ΔT) (COARITI, 2017 apud LOPES, 2022).

$$DOSE = S \times \Delta T \quad (2.13)$$

Com o intuito de divulgar a quantidade de RUV ao público, bem como auxiliar na adoção de medidas de proteção à sociedade, em 1992, foi elaborado o Índice Ultravioleta (IUV), uma escala de classificação numérica adimensional relacionada com a RUV biologicamente ativa, que induz a formação de eritema na pele humana, determinada em função das irradiâncias espectrais UV e seus efeitos fotobiológicos sobre a pele humana (MCKINLAY; DIFFEY, 1987; CORRÊA, 2015).

Cada unidade do IUV corresponde a $0,025 \text{ W m}^{-2}$ de irradiância eritematosa, usualmente calculada como a soma ponderada do efeito dos comprimentos de onda entre 280 nm e 400 nm (CORRÊA, 2015), segundo a Equação (2.14), a partir do espectro de ação do eritema (S_{er}), da irradiância espectral solar (E_{λ}) no intervalo de comprimento de onda ($d\lambda$) e de K_{er} , uma constante igual a $40 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$, que converte o IUV em um valor adimensional. conforme escala apresentada na (Figura 2.9) (WHO, 1994).

$$IUV = K_{er} \int_{280 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda \quad (2.14)$$

A Figura 2.10 apresenta o comportamento diário típico da RUV em um cenário de céu não encoberto por nuvens, incluindo também uma distribuição do IUV ao longo do dia.

Figura 2.9. Intervalos do IUV em escala de cores.

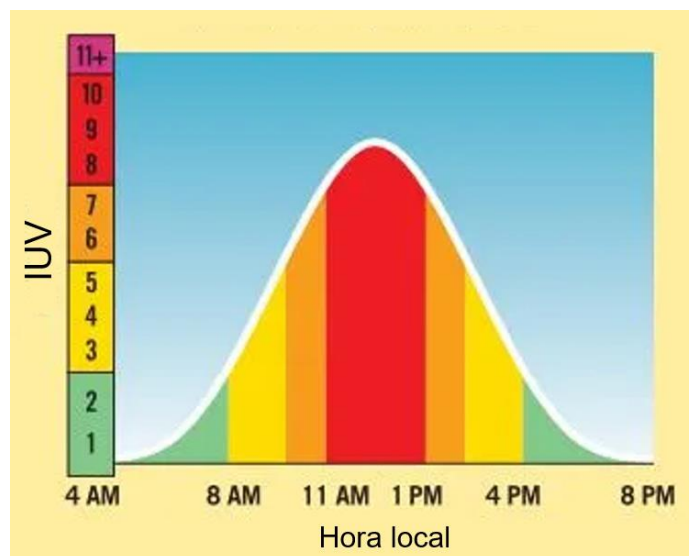


Fonte: Adaptado de Johnson (2023).

De acordo com a Figura 2.10, a intensidade da irradiância UV aumenta durante o dia, com pico por volta do meio-dia local, diminuindo ao longo da tarde. Essa variação ao longo do dia tem implicações importantes para a proteção contra os efeitos nocivos da RUV e, com base nessa variação, a Organização Mundial da Saúde (OMS) e outros órgãos de saúde pública recomendam a adoção de medidas de proteção solar que variam de acordo com a intensidade UV.

Assim, dependendo da hora do dia, há diferentes níveis de IUV e, conforme este valor, diferentes medidas de proteção à radiação solar são necessárias (WHO, 1994).

Figura 2.10. Distribuição do IUV em um dia típico de céu não encoberto por nuvens.



Fonte: Adaptado de Gregory (2020).

3 EVENTOS DE AMPLIFICAÇÃO UV NA SUPERFÍCIE

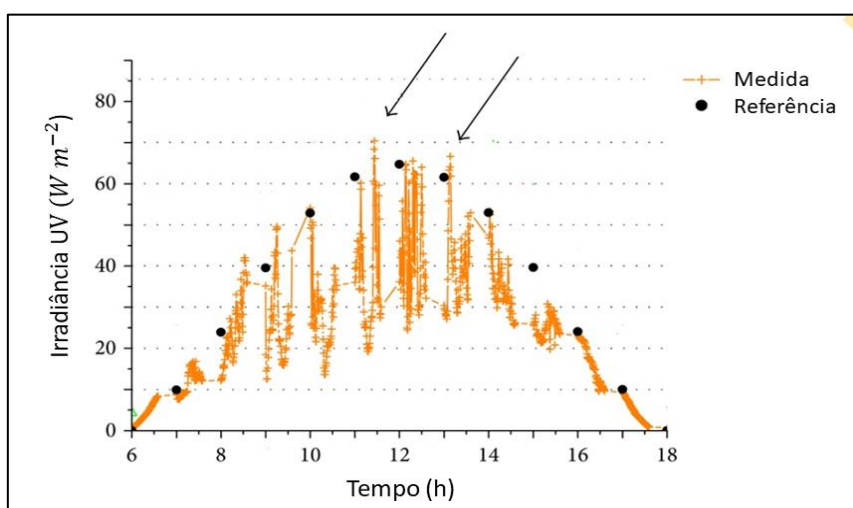
Neste capítulo, apresenta-se o estado da arte das pesquisas em EARS na região do UV e do uso conjunto de imagens na investigação dos eventos.

3.1 O estado da arte dos EARS na região do UV

EARS são fenômenos em que o padrão das nuvens aumenta subitamente a irradiância global em superfície acima dos níveis que seriam esperados em condições de céu não encoberto por nuvens (CASTILLEJO-CUBEROS; ESCOBAR, 2020).

A Figura 3.1 ilustra o comportamento da irradiância UV (UV-A + UV-B) medida em Recife, PE, em 09/10/2011 (TIBA; SILVA LEAL, 2017). Em laranja, são mostrados dados de irradiância obtidos em superfície com piranômetro *Precision Spectral Pyranometer* (PSP) Eppley e, nos pontos pretos, a irradiância de referência do céu não encoberto por nuvens para este dia. Na figura, observa-se alta variação nas medidas de irradiância, com picos e quedas acentuadas, onde, em alguns períodos, a irradiância medida ultrapassa a esperada para o dia sem nuvens aparentes no céu, caracterizando possíveis EARS.

Figura 3.1. Irradiância UV (UV-A + UV-B) medida em Recife, PE, em 09/10/2011. As setas indicam possíveis eventos EARS.



Fonte: Adaptada de Tiba e Silva Leal (2017).

Conforme Järvelä et al. (2020), os EARS são conhecidos desde a década de 1960, de modo que, inicialmente, as intensificações eram interpretadas de forma simples como resultado de reflexões da radiação solar nas extremidades das nuvens.

Embora várias hipóteses sobre as causas dos EARS tenham sido propostas (ZHANG et al., 2018), fisicamente, Silva (2022) aponta três mecanismos capazes de produzi-los na região do UV, destacando:

1. situações em que o disco solar não está obscurecido pelas nuvens: a radiação difusa é aumentada devido ao espalhamento da radiação pelas bordas de nuvens verticalmente desenvolvidas, que acaba por aumentar a irradiância global no solo;
2. circunstâncias onde o disco solar é obscurecido por nuvens finas, bordas ou partes delgadas de nuvens: o feixe de radiação direta é reduzido, mas devido ao espalhamento frontal da radiação (Espalhamento Mie), a componente difusa aumenta, compensando a diminuição da componente direta, incrementando, assim, a radiação global no solo;
3. condições em que há reflexões superficiais: a radiação solar refletida por uma superfície clara para a atmosfera é novamente refletida por nuvens e aerossóis, aumentando a componente descendente da irradiância global (SILVA, 2022).

A Tabela 3.1 mostra algumas das pesquisas desenvolvidas acerca dos EARS, relatando onde foram conduzidas, a instrumentação utilizada e o intervalo de tomada das medidas, a maior amplificação percentual observada em relação a um valor de referência e suas publicações de origem. Segundo os dados, em latitudes médias, as nuvens produzem aumentos de até 40%-45% na irradiância UV medida em superfície (PARISI et al., 2004; SILVA, 2009; 2013).

Tabela 3.1. EARS na região do UV: localização, instrumentação e resolução das medidas, amplificação percentual em relação a um valor de referência e respectivas publicações científicas.

Localidade	Coordenadas Geográficas	Instrumento de medida	Resolução das medidas (min)	Maiores amplificações (%)	Estudo de Referência
EUA	36°N, 79°W, 90 m	Brewer MKIV	60	27	Estupinán et al. (1996)
EUA	36°N, 82°W, 951 m	Brewer MKIV	60	11	Schafer et al. (1996)
Argentina	22°–65° S, 57°–68°W, 14-3459 m	Biômetros UV	15	11	Cede et al. (2002)
Argentina	23°S, 65°W, 3900 m	Piranômetro Kahl UV	90	6	Piacentini et al. (2003)
Polônia	52°N, 21°E, 180 m	Biômetro Solar Light	5	20	Krzyscin et al. (2003)
Austrália	28°S, 152°W, 693 m	Bentham DTM 300	3	40	Parisi et al. (2004)
Chile	40°S, 73°W, 5 m	Biospherical GUV-511	1	6	Lovergreen et al. (2005)
Austrália	28°S, 152°E, 693 m	Biômetro Solar Light	15	7	Sabburg e Calbó (2009)
Espanha	42°N, 3°E, 100 m	Kipp&Zonnen UV-set	1	3	Sabburg e Calbó (2009)
Brasil	20°S, 44°W, 910 m	Biômetro Solar Light	1 - 6	45	Silva (2009, 2013)
Chile	23°S, 68°W, 5100 m	Bentham DMc150F-U	3	11	Cordero et al. (2014)
Brasil	8°S, 34°W, 7 m	Piranômetro PSP	1	9	Tiba e Silva Leal (2017)
Argentina	55°S, 69°W, 15 m	Biospherical GUV-541	1	30	Wolfram et al. (2017)

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019).

Sabburg e Parisi (2006) enfatizam de forma categórica que as amplificações UV ocorrem independentemente do comprimento de onda, tanto no UV-B como no UV-A, podendo ser verificadas situações de aumento da irradiância, de diminuição ou mesmo nenhuma dependência espectral. Contudo, outros pesquisadores concordam que os efeitos de atenuação ou aumento são mais notáveis para maiores comprimentos de onda (MATEOS et al., 2011; PIEDEHIERRRO et al., 2014, MCKENZIE, et al. 2017).

Eckstein et al. (2003 apud SABBURG; LONG, 2004) propõem que a dependência do comprimento de onda nos EARS ocorre principalmente devido à conversão da irradiância direta em irradiância difusa durante o espalhamento da radiação solar. De acordo com esses autores, a radiação direta espalhada na borda de uma nuvem alcança outra nuvem próxima e é espalhada novamente, criando um efeito de tunelamento que aumenta a radiação difusa abaixo delas. Conseqüentemente, em um ponto no solo onde a radiação direta alcança por uma lacuna entre as nuvens, é possível observar uma radiação difusa adicional, que resulta em um maior fluxo actínico.

Sabburg e Long (2004) explicam que esse mecanismo se baseia no fato de que a radiação direta aumenta devido à dependência inversa da quarta potência do espalhamento molecular, enquanto a parte difusa do fluxo actínico diminui à medida que o comprimento de onda aumenta. Como resultado, quando o comprimento de onda é maior, uma proporção relativamente maior de radiação direta é convertida em radiação difusa abaixo das nuvens, o que resulta na dependência do comprimento de onda observada nos EARS.

Silva et al. (2019) afirmam que os EARS estão diretamente relacionados à posição do Sol no céu. Esses efeitos são comumente observados em condições de céus parcialmente nublados, quando as nuvens estão posicionadas em um ASZ de até 70°, sendo mais intensos entre 30° e 60°, dependendo das características das nuvens envolvidas no processo de espalhamento (SABBURG; PARISI, 2006, PIACENTINI et al., 2011; SILVA et al., 2019).

Em relação ao tipo de nuvens que promovem as intensificações dos EARS, as nuvens Cumulus e Stratus, quando posicionadas ao redor do disco solar em ASZ

menores que 30°-35°, tendem a potencializar as ampliações UV para a superfície. Isso se deve à distribuição espacial e à estrutura multicamadas dessas nuvens, que favorecem o mecanismo de aumento (WEIHS et al., 2000; SABBURG; WONG, 2000). No entanto, de acordo com Sabburg e Calbó (2009), os EARS apresentam maior intensidade quando nuvens do tipo Cirrus estão presentes. Isso se deve à notável capacidade dessas nuvens, opticamente finas, de espalhar a RUV em várias direções de modo uniforme, resultando em uma distribuição angular quase isotrópica da radiação difusa. Além disso, outras nuvens também são mencionadas como potenciais espalhadoras da RUV para a superfície, incluindo as nuvens de média altitude, como *Altostratus* e *Altostratus*, e até mesmo as nuvens globulares, como as *Stratocumulus* (SABBURG; WONG, 2000; PIACENTINI et al., 2011; SILVA, 2009; 2013). Essas observações destacam a importância das diferentes nuvens na modificação da radiação solar que alcança a superfície terrestre e seu impacto na exposição humana e no meio ambiente à radiação extra dos EARS.

3.2 A identificação do fenômeno de amplificação

O efeito das nuvens sobre a irradiância tem sido expresso pelo fator de modificação da nuvem (CMF, do inglês *Cloud Modification Factor*), definido como a relação entre o valor medido em diferentes condições de cobertura de nuvens (UV_{med}) e a irradiância avaliada em condições sem nuvens (UV_{sn}), ambas na mesma região de comprimento de onda (STAIGER et al., 2008; FEISTER et al., 2015, MCKENZIE et al., 2017), segundo a Equação (3.1).

$$CMF = \frac{UV_{med}}{UV_{sn}} \quad (3.1)$$

Para Castillejo-Cuberos e Escobar (2020), ainda que valores de CMF determinados de modo subjetivo possam levar a dados suspeitos ou mesmo inválidos, seu uso como limiar na detecção dos EARS tem fornecido resultados muito precisos, sendo utilizado em inúmeros estudos.

Os valores típicos de CMF para o céu nublado variam de 0,3 a 0,8, dependendo do tipo e das características das nuvens (SABBURG; CALBÓ, 2009). López et al. (2009) concluíram que o CMF no UV pode atingir valores mais altos do que na região do visível, apresentando, especificamente, para nuvens do tipo Stratocumulus, valores entre 0,1 e 0,7 no UV e de 0,1 a 0,5 no VIS (LÓPEZ et al., 2009).

Por definição, na observação dos EARS, o CMF é maior do que 1 (SILVA et al., 2019; CASTILLEJO-CUBEROS; ESCOBAR, 2020), mas não há um consenso quanto ao seu valor limite inferior, sendo este um fator crucial para a precisa identificação dos eventos.

Ao estabelecerem relações mais ou menos simples entre os dados experimentais e os parâmetros de entrada, modelos empíricos e semiempíricos vêm sendo comumente utilizados para obtenção da irradiância do céu não encoberto por nuvens (SABBURG; CALBÓ, 2009; FEISTER et al., 2015; SILVA et al., 2019). Todavia, apesar da aparente facilidade de uso, muitos deles requerem dados de entrada por vezes indisponíveis para determinadas localidades e, além disso, o tempo de execução e algumas restrições de uso os tornam ferramentas não apropriadas a certas aplicações (ZHAO et al., 2019).

Dados recuperados dos satélites também são, frequentemente, utilizados na obtenção do parâmetro UV_{sn} (FEISTER et al., 2015). No entanto, a variação da das resoluções espaciais, temporais e radiométricas dos satélites sobre os locais de medida faz com que a construção completa da variação diurna da RUV seja uma atividade desafiadora por meio desse tipo de dado (DEV et al., 2019, JEBAR et al., 2021).

Alguns dos modelos mais amplamente utilizados são fundamentados no algoritmo DISORT (*Discrete Ordinate Radiative Transfer*), desenvolvido por Stamnes et al. (1988), que resolve a equação de transferência radiativa por meio do método das ordenadas discretas. Dentre eles, pode-se mencionar o STAR (*System for a Transfer of Atmospheric Radiation*) (NAKAJIMA; TANAKA, 1986), o TUV (*Tropospheric Ultraviolet and Visible radiative transfer code*) (MADRONICH, 1987), o SBDART (*Santa Barbara Disort Atmospheric Radiative*

Transfer) (RICCHIAZZI et al., 1998) e o LIBRADTRAN (*Library for Radiative Transfer*) (MAYER; KYLLING, 2005). No Brasil, foi desenvolvido o modelo SunCloud-e, que se baseia em parâmetros geográficos simples e no fator de Linke (ANDRADE et al., 2015).

Como alternativa, são destacados os modelos de previsão de irradiância solar baseados em imagens do céu obtidas em solo (SILVA et al., 2019; DEV et al., 2019; ZHAO et al., 2019; ZHEN et al., 2020; SONG et al., 2022), método que tem obtido sucesso a partir do ajuste da irradiância medida em superfície a partir de funções de distribuição gaussiana fundamentadas em imagens do céu não encoberto por nuvens aparentes (MAKNUNAH et al., 2019). Esse tipo de ajuste tem sido empregado não somente para estimar a irradiância do céu não encoberto por nuvens, mas também para calcular a variação diária da RUV em muitas localidades (DIFFEY, 2009; MAKNUNAH et al., 2019; JEBAR et al., 2021). A incerteza desses modelos pode variar dependendo de diversos fatores, como a qualidade e precisão dos instrumentos utilizados nas medições, as condições atmosféricas e a complexidade do próprio modelo. Conforme Marín Fernández (2007), as incertezas são da ordem de 10%, dependendo do modelo específico e das condições sob as quais ele é aplicado.

Uma vez configurada a irradiância do céu não encoberto por nuvens (UV_{sn}), o CFM e a consequente caracterização dos EARS passam a depender, tão somente, da precisão das medidas dos instrumentos.

3.3 A observação das nuvens e o brilho visível durante as amplificações

A observação terrestre de nuvens é uma atividade antiga e continua sendo um método fundamental para coletar dados sobre a cobertura de nuvens em muitos países (SILVA; SOUZA-ECHER, 2016; YANG et al., 2016).

Ao longo do tempo, várias pesquisas têm se dedicado a aprimorar as técnicas observacionais, especialmente usando imagens do céu obtidas automaticamente por câmeras imageadoras em solo (SILVA; SOUZA-ECHER, 2016; HASENBALG et al., 2020; LOGOTHETIS et al., 2022). Esses esforços têm se mostrado especialmente relevantes para pesquisas sobre os EARS (SABBURG; WONG, 2000; SABBURG; LONG, 2004; 2004b; SABBURG;

CALBÓ, 2009; PARISI et al., 2020). Assim, as técnicas de observação do céu têm sido aprimoradas e os estudos sobre os EARS têm se beneficiado significativamente dessas melhorias.

Conforme relatado por Weihs et al. (2000) e Parisi et al. (2004), durante os EARS, nuvens posicionadas em ASZ maiores que 30° mostram grandes porções refletoras visíveis e brilhantes ao observador. Segundo Zelinka et al. (2012), a compreensão desse brilho pode fornecer informações valiosas sobre a dinâmica das nuvens, sobre as retroalimentações climáticas e as interações entre a radiação solar, as nuvens e os aerossóis, contribuindo para o melhoramento de modelos climáticos e à compreensão de como as nuvens influenciam a variabilidade do clima em longo prazo.

Em condições de céus encobertos (não considerando EARS), Sabburg e Wong (2000) afirmam que o nível de radiação UV-B em superfície diminui à medida que o brilho das nuvens é aumentado. A expectativa de uma relação entre o brilho das nuvens e a RUV durante os EARS baseia-se na suposição de que o brilho percebido das nuvens pode estar relacionado à quantidade de luz visível que é espalhada pelas partículas presentes nas nuvens. Uma vez que as nuvens também podem dispersar a RUV, a intensidade do brilho das nuvens pode estar correlacionada com a quantidade de RUV que chega à superfície.

Em pesquisas posteriores, Sabburg e Long (2004) avaliaram novos algoritmos de processamento de imagens para pesquisar os EARS no UV, mas não conseguiram estabelecer uma relação entre a quantidade de nuvens em diferentes ASZ e o brilho visível das nuvens ao redor do sol, sugerindo que a análise precisa da variação do brilho das nuvens requer imagens do céu com maior resolução temporal. A questão sobre a variação do brilho das nuvens durante os EARS ainda não possui uma resposta definitiva, mas a análise do CMF em conjunto com imagens automáticas obtidas em solo pode contribuir para melhorar esse entendimento.

Em princípio, as nuvens espalham a luz visível em função da posição do Sol no céu e de características das próprias nuvens (WAN; DU, 2020). No entanto, além desses fatores, a caracterização do brilho das nuvens por meio de câmeras

depende, fundamentalmente: 1) da quantidade de iluminação na atmosfera, que se baseia tanto no ASZ quanto na visibilidade atmosférica, um parâmetro associado, principalmente, à profundidade óptica; 2) e da instrumentação utilizada nos experimentos (WANG et al., 2014; GALILEISKII et al, 2015).

Sobre o primeiro aspecto, Kerr (2013) afirma que os aerossóis chegam a promover a redução de até 95% da visibilidade atmosférica, mas destaca que ela também é influenciada pela umidade e presença de gases poluentes. Desse modo, para uma abordagem abrangente da visibilidade atmosférica, são necessárias análises para caracterização das partículas presentes na atmosfera, bem como a consideração de outros fatores ambientais.

Sobre o segundo aspecto, existe a compreensão de que, para estudar a variabilidade do brilho em imagens do céu, deve-se obter dados de calibrações fotométricas, particularmente, quando se aplicam métodos de visão computacional baseados em parâmetros físicos dos objetos de estudo (LALONDE et al., 2012; KAWAKAMI et al., 2013). Porém, apesar de ser um elemento fundamental para comparações de cores e parâmetros de iluminação entre diferentes tipos de câmeras, a estimativa da sensibilidade espectral dos instrumentos tem sido negligenciada na literatura de visão computacional (KAWAKAMI et al., 2013; BURGGRAAFF et al., 2019), algo que em um mercado em constante evolução, limita a interoperabilidade entre os dispositivos e reduz a vida útil de muitos projetos (BURGGRAAFF et al., 2019).

De modo geral, análises de imagens do céu têm sido baseadas no espaço de cores vermelho, verde e azul, mais usualmente chamado de RGB (do inglês, *Red, Green and Blue*), sendo o método bidimensional, que analisa o limiar da faixa vermelho-azul, o mais adotado na identificação de nuvens no céu (HEINLE et al., 2010; YANG et al., 2015, 2016; SILVA; SOUZA-ECHER, 2016).

Além do RGB, espaços de cores da família HSI (do inglês, *Hue, Saturation and Intensity*), baseados no sistema Munsell, onde as cores são descritas em termos do matiz, da saturação e da intensidade, também são bastante utilizados para a detecção de nuvens nas imagens (ECHER et al., 2001; SOUZA-ECHER et al., 2006; WEST et al., 2014).

Embora a segmentação das nuvens em ambos os espaços de cores apresente bom desempenho, a detecção precisa do fator de brilho de uma nuvem continua sendo um problema desafiador devido ao forte espalhamento Mie da radiação solar (YANG et al., 2015). Nesse sentido, nos últimos anos, os algoritmos baseados no HSV (onde a intensidade (I) do HSI é chamada de valor, V) têm demonstrado grande eficiência na detecção do brilho das imagens (CHEN et al., 2007; HAMUDA et al., 2016; YU et al., 2021), e devido a estes atributos, vêm sendo amplamente utilizados em diversas aplicações de visão computacional.

Segundo Chaves-González et al. (2010), no modelo HSV, o valor de brilho (B) representa a intensidade da cor, onde um valor mais alto de brilho indica uma cor mais clara e brilhante, enquanto um valor mais baixo indica uma cor mais escura. O matiz (H) define cores específicas, enquanto a saturação (S) determina a pureza ou a intensidade da cor.

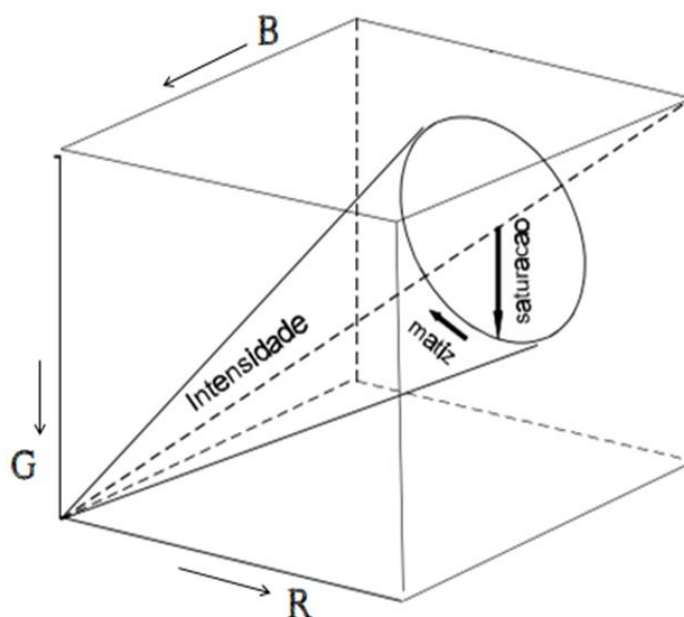
Destaca-se que o espaço HSV está mais alinhado com a percepção humana de cores, revelando-se mais sensível à variação do brilho em comparação com outros modelos de cor. Isso ocorre porque o HSV separa as componentes de iluminação e cor nas imagens, favorecendo o reconhecimento de pixels brilhantes sem afetar seu matiz ou saturação (SOBOTTKA; PITAS, 1996; BURGER; BURGE, 2009; CHAVES-GONZÁLEZ et al., 2010). Essa característica torna o modelo HSV uma escolha eficiente e valiosa para diversas aplicações de processamento de imagens e visão computacional.

Conforme Gonzalez e Woods (2009), para converter um valor RGB para HSV deve-se encontrar o valor máximo (V) e o valor mínimo (mín) entre R, G e B, e calcular a diferença entre eles ($dif = V - mín$). A partir daí:

1. a componente *Value* (V), é simplesmente o valor de V.
2. para obter a componente *Hue* (H): se V é igual a R, então $H = (G - B) / dif$; se V é igual a G, então $H = 2 + (B - R) / dif$; se V é igual a B, então $H = 4 + (R - G) / dif$.
3. para obter a componente *Saturation* (S): se V é igual a 0, $S = 0$; se V é diferente de 0, $S = dif / V$.

A Figura 3.2 mostra uma representação geométrica do gradiente de cores nos espaços RGB (cubo) e HSV (cone). Enquanto no espaço RGB, as cores são representadas em um cubo onde cada vértice representa uma cor pura, e as cores intermediárias são obtidas pela combinação das três componentes, vermelho (R), verde (G) e azul (B), no espaço HSV, as cores são representadas em um cone tridimensional, onde o eixo vertical (eixo do cone) representa o Matiz, que é a cor pura em graus, variando de 0 a 360 graus. A saturação (S) é a distância radial a partir do eixo do Matiz e representa a pureza da cor. Quanto mais próximo do centro do cone ($S = 0$), mais próxima a cor é do cinza (menos intensa). A luminância ou valor (V) é a altura ao longo do eixo do cone e representa o brilho da cor.

Figura 3.2. Representação do Gradiente de Cores no RGB (Cubo) e no HSV (Cone).



Fonte: Adaptada de Crosta (1999).

Gonzalez (2010) adverte que, dependendo das convenções específicas de programação ou bibliotecas utilizadas na conversão RGB-HSV, podem existir

pequenas variações nas implementações práticas da conversão, que devem ser observadas e avaliadas pontualmente.

É importante observar que o uso do modelo de cor HSV na avaliação do brilho das nuvens e a eficácia das técnicas de segmentação de pixels brilhantes nas pesquisas sobre os EARS não são sistematicamente descritos na literatura. No entanto, uma análise detalhada das imagens sugere a possibilidade de uma relação entre a irradiância UV e o brilho aparente das nuvens durante esses eventos (SABBURG; LONG, 2004). Deve-se ressaltar que essa relação pode não ser de natureza direta e linear, e vários fatores, como a composição das nuvens, a quantidade de partículas que as compõem e a posição do Sol no céu, podem influenciá-la. Portanto, a investigação dessa relação a partir do parâmetro de brilho do HSV e a compreensão de seus detalhes são aspectos significativos a serem explorados nesta pesquisa.

4 MÉTODOS

Para caracterizar a contribuição das nuvens para eventos de amplificação UV em uma cidade de latitude tropical foi realizada uma pesquisa de caráter exploratório e analítico, a partir de medidas de irradiância UV e PAR em superfície, obtidas por meio de radiômetros multiespectrais, e imagens digitais. Neste capítulo são apresentados os métodos empregados para obter tal caracterização.

4.1 A área de estudo

A aquisição dos dados foi conduzida nas instalações do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos (SJC, 23,20° S, 45,86° W, 621 m), de setembro de 2019 a agosto de 2020. Os equipamentos foram instalados no terraço do Laboratório Associado de Sensores e Materiais, a 10 m de altura, para evitar a interferência de outras construções ou sombras de árvores sobre as medidas de irradiância. O sistema de aquisição de dados foi montado na sala de Tecnologia da Informação, localizada logo abaixo do topo do prédio, onde o experimento foi instalado.

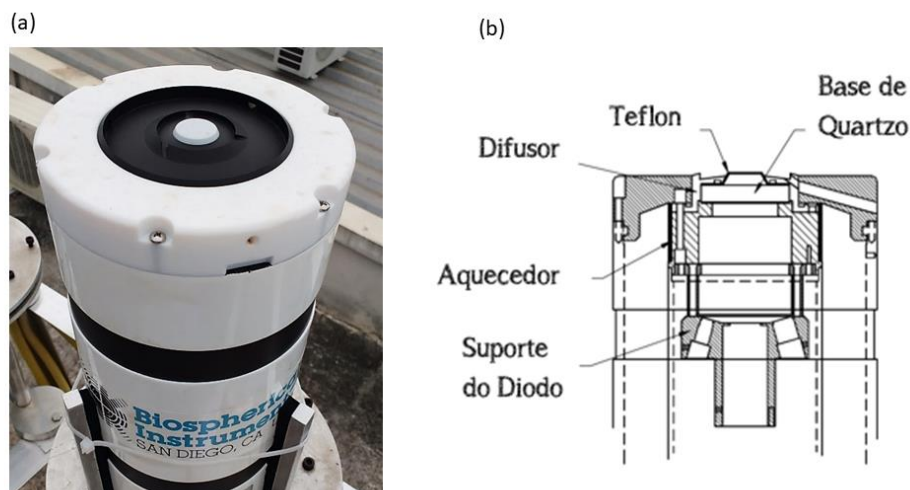
SJC é uma cidade de médio porte, localizada na porção leste do Estado de São Paulo, posicionada entre duas grandes metrópoles do Brasil (São Paulo e Rio de Janeiro), e é a maior cidade da região do Vale do Paraíba, com 737.310 habitantes residentes na região (IBGE, 2022). De acordo com a classificação Koeppen, seu clima é subtropical úmido (Cfa), com períodos de forte chuva nos verões e de seca nos invernos, com uma temperatura média anual do ar de 20,9°C (FERREIRA et al., 2020).

4.2 O radiômetro multiespectral GUV

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram instalados dois radiômetros multiespectrais, modelo GUV-2511 (Biospherical Instruments Inc.), com números de série #156 e #158, que medem a irradiância UV em superfície com comprimentos de onda de 305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm e 395 nm, com largura de banda à meia altura de 10 nm, e a PAR (400nm-700nm)

(BIOSPHERICAL, 1998; WERNER et al., 2017). A Figura 4.1 mostra um dos equipamentos GUV-2511 utilizados no experimento e seu diagrama interno.

Figura 4.1. O radiômetro multiespectral GUV-2511 (a) e seu diagrama interno (b).



Fonte: a) Do autor; b) Biospherical (1998).

Conforme mostrado na Figura 4.1b, a radiação solar é medida pelo instrumento através de um difusor de teflon posicionado sobre uma base de quartzo na parte superior do equipamento (PIEDEHIERRO et al., 2016). Cada sensor espectral possui seu próprio fotodiodo com amplificador, que converte a radiação em um sinal elétrico interpretado como pulso pelo radiômetro. O instrumento é operado por um módulo controlador, e a transferência de dados é realizada por meio de uma interface RS232 (WERNER et al., 2017).

Enquanto a RUV é medida como irradiância espectral ($\mu W cm^{-2} nm^{-1}$), a banda PAR⁶ é medida como fluxo de fótons⁷ ($\mu E s^{-1} cm^{-2}$) (BIOSPHERICAL, 1998).

⁶ A PAR não é medida rotineiramente nas estações radiométricas. Contudo, suas medidas são requeridas para a estimativa da radiação interceptada por comunidades de plantas, com diversos propósitos, dentre os quais, a modelagem da fotossíntese e do desenvolvimento de ecossistemas (Hatfield; Carlson, 1978).

⁷ O fluxo de fótons da banda PAR é dado como ($\mu E s^{-1} cm^{-2}$), onde μE significa microEinstein (1 Einstein = 1 mol de fótons) (De Assis; Mendes, 1989). A relação entre de fluxo de fótons e irradiância não é obtida de modo direto, sendo determinada por métodos empíricos, a partir dos dados coletados para cada localidade, ou em termos de uma fonte conhecida de radiação artificial (Thimijan; Heins, 1983).

Para minimizar o efeito das mudanças da temperatura sobre as medidas, o GUV-2511 possui aquecimento interno controlado por um sistema que mantém a temperatura de operação ($50,0 \pm 0,5$ °C) a partir da temperatura ambiente, garantindo a estabilidade e a precisão das medidas (BIOSPHERICAL, 1998).

O fator de resposta direcional do instrumento é certificado pela fábrica, determinado por meio de testes direcionais com dispositivos calibradores em bancada e, segundo o fabricante, as incertezas em relação à resposta angular dos radiômetros são menores do que 5% para medidas efetuadas em ASZ de 0° a 70° e $\pm 10\%$ para medidas efetuadas em ASZ compreendidos entre 71° e 85° (BIOSPHERICAL, 1998). A incerteza característica das medidas de irradiância espectral do GUV-2511 é estimada em 7,8% (PIEDEHIERRO et al., 2016).

Os equipamentos estavam em seu primeiro ano de uso, com certificado de calibração óptica dos radiômetros emitido pelo fabricante, válido por 01 (um) ano, sendo os dados da calibração dos instrumentos requeridos para a operação e funcionamento do software utilizado pelo sistema.

Conforme destacado na seção 4.1, o experimento foi realizado no período de setembro de 2019 a agosto de 2020. A coleta de dados ao longo de um ano foi cuidadosamente planejada para assegurar que as medições permanecessem dentro dos padrões de precisão estabelecidos pelo fabricante e pela calibração dos instrumentos ao longo de toda a duração do experimento. Essa abordagem garantiu a confiabilidade e consistência dos dados coletados ao longo do estudo. Além do mencionado acima, o imageador LSV foi disponibilizado ao experimento somente para uso no período de um ano.

Em relação à resolução temporal dos dados de irradiância, o software fornecido pelo fabricante gravou, diretamente em um computador, a média de 20 segundos de medidas de cada um dos seis comprimentos de onda UV e da PAR, totalizando, para cada um desses canais, três medidas por minuto.

4.3O imageador LSV

Para avaliar a contribuição das nuvens, foi instalado um imageador LSV (do inglês *Local Sky Viewer*), desenvolvido pelo Dr. Abel A. Silva, que possui uma

abertura angular de 100° (50° em torno do zênite solar), que produz imagens do céu local logo acima dele. Tal abertura elimina a distorção da imagem pela curvatura e a falsa impressão de incremento da cobertura de nuvens devido ao efeito de visão em perspectiva das regiões da abóbada celeste com ASZ maiores (SILVA, 2010).

A Figura 4.2a mostra, em primeiro plano, o imageador LSV, com os radiômetros ao fundo. Um panorama geral da área experimental, com instrumentos, é apresentado na Figura 4.2b

Figura 4.2. a) Em primeiro plano, o imageador LSV; b) visão da área experimental com os instrumentos instalados, também em primeiro plano, no cavalete.



Diferente de outros imageadores, o LSV toma imagens do céu sem obstruir o sol e, como observa tanto o céu quanto o sol diretamente, as nuvens que bloqueiam o disco solar podem ser identificadas com mais precisão.

O LSV utilizado é formado por uma câmera digital *charged-couple device* (CCD) de 1/4 de polegada, da marca Greatek (modelo SEGC-M141G), com um filtro de densidade óptica de 7-8 acoplado a uma lente de 2,5 mm. Em geral, câmeras CCD são conhecidas por sua alta eficiência quântica (TAKEUCHI et al., 1999), o que significa que conseguem transformar, de modo eficiente, a luz incidente em elétrons, tornando-as adequadas para aplicações de captura de imagens de

alta qualidade em diferentes faixas do espectro eletromagnético, incluindo o UV. A eficiência quântica de uma câmera varia com a sensibilidade espectral do sensor e o processo de conversão de fótons em elétrons, tornando-se um critério fundamental ao selecionar câmeras para aplicações específicas, como a conduzida nesta pesquisa. No entanto, é importante observar que informações detalhadas sobre a eficiência quântica da câmera modelo SEGC-M141G não foram encontradas nas especificações técnicas do equipamento, nem obtidas em comunicação direta com o fabricante do produto.

O dispositivo foi posicionado de frente para o céu e capturava imagens coloridas de 24bits, em *Joint Photographic Experts Group* (JPEG), com 720 x 576 pixels (415 Kpixels) de resolução, a cada 20 segundos. Ao longo do experimento, considerando o intervalo das 11h às 19h (UT), foram registradas 1440 imagens ao dia. A rotina de operação da câmera foi fornecida pelo fabricante, sendo as imagens gravadas diretamente em um computador.

Por meio da análise combinada de medições espectrais e imagens do céu obtidas em solo, esta abordagem de estudo da radiação solar difusa proporciona a oportunidade de examinar não somente os EARS, mas também a relação entre o brilho percebido das nuvens e a irradiância UV durante os eventos. Essa análise promove uma compreensão mais aprofundada dos fatores que podem influenciar essa relação, englobando aspectos como a composição das nuvens, a quantidade de partículas que as compõem e a posição do Sol no céu.

4.4 O tratamento inicial dos dados de irradiância

Devido à grande quantidade de dados, as medidas obtidas com os radiômetros, disponibilizadas pelo software dos radiômetros em arquivos de valores separados por vírgulas (.csv), foram compiladas em uma única planilha, por meio de um algoritmo estruturado em Python, uma linguagem de programação interpretada e orientada a objetos, que suporta e oferece interface para multiplataformas (SEBESTA, 2003). A rotina foi desenvolvida no Colab (*Google Colaboratory*), um projeto de pesquisa destinado a gerar modelos de aprendizado de máquina, que fornece ambientes de *notebook* sem servidor para desenvolvimento interativo na *web* (BISONG, 2019).

Seguindo um padrão da maioria das linguagens orientadas a objeto, o código Python foi organizado a partir do conceito *SOLID*⁸, que fornece diretrizes de como organizar as funções e estruturas de dados em objetos, abstratos e instanciáveis⁹, e como estes devem ser interconectados (CHEBANYUK; MARKO, 2016; MARTIN, 2019).

Em um primeiro momento, a estrutura do algoritmo foi composta por três pilares:

1. identificação das variáveis, de forma a compor o banco de dados, de irradiância espectral e imagens;
2. segmentação dos dados por estação do ano, data, hora e ASZ, tornando menos dificultosas as interações de processamento, transformações e armazenamento do algoritmo em si;
3. criação de uma classe gestora, que operacionalizou a identificação dos EARS.

Em termos práticos, como resultados dos passos descritos acima, a partir dos dados de irradiância dos dois radiômetros, foi realizada a sincronização de horário dos arquivos originais de toda a campanha, seguida da concatenação deles, agora em um único arquivo.

Para analisar as diferenças estatísticas nas medidas espectrais dos dois radiômetros em dias de céu sem nuvens aparentes, foram calculados os coeficientes de determinação (R^2) e os erros médios quadráticos (RMSE, do inglês *Root Mean Squared Error*). Os resultados revelaram três grupos distintos: 1) o grupo UV-B (305 nm, 313 nm e 320 nm) alcançou o mais alto nível de ajuste dos dados, com uma média de R^2 em torno de 0,9996 e um RMSE médio de cerca de 0,369, indicando ajustes altamente precisos; 2) embora o grupo UV-A (340 nm, 380 nm e 395 nm) tenha exibido um R^2 ligeiramente menor, demonstrou um ajuste sólido aos dados, com um R^2 médio de 0,9993 e um RMSE médio de

⁸SOLID é um acrônimo que representa cinco princípios-chave de design: princípio de responsabilidade única, princípio aberto-fechado, princípio de substituição de Liskov, princípio de segregação de interface e princípio de inversão de dependência (Martin, 2019). O uso desses princípios de design torna o *software* mais adaptável, eficaz e ágil (idem).

⁹ A instanciação é um processo por meio do qual se realiza a cópia de um objeto (classe) existente em um script. Uma classe, que tem a função de determinar um tipo de dado, deve ser instanciada para que se possa utilizá-la (Martin, 2019). Uma classe abstrata é um tipo de classe especial que não pode ser instanciada, apenas herdada (idem).

1,837; 3) por fim, o grupo PAR, apesar de ter o menor RMSE (0,005), apresentou um R^2 médio ligeiramente inferior, aproximadamente 0,999, também resultando em medidas altamente precisas, mas com um ajuste um pouco menos robusto entre os dois radiômetros.

Calculou-se, então, a média de uma mesma medida horária dos dois instrumentos, definindo o erro padrão (σ) associado a cada medida amostral, avaliado como $\sigma = DP/\sqrt{n}$, onde DP é a incerteza do instrumento (7,8%) e n é o número de medidores. Sendo assim, quando ambos os radiômetros mediram a irradiância, $\sigma = 5,5\%$. Quando por qualquer eventual problema, um único radiômetro registrou medidas, assumiu-se $\sigma = 7,8\%$. Esses resultados são utilizados para a determinação dos EARS neste trabalho.

A partir dessa nova planilha, com a média temporal de cada medida de irradiância, agora separada por data e hora, foi desenvolvido o modelo que apontasse os EARS.

4.5 A determinação dos EARS

A irradiância de referência em condições de céu encoberto foi obtida a partir das imagens do LSV, parametrizadas a partir de funções de distribuição gaussiana (DIFFEY, 2009; MAKNUNAH et al., 2019). Os cálculos espectrais do CMF foram baseados inteiramente em dados experimentais.

Inicialmente, cada imagem foi visualizada para que fossem identificados e listados momentos em que o disco solar não estava obstruído por nuvens. Os períodos em que o sol estava brilhando, ainda que imediatamente antes ou após a obstrução por uma nuvem, foram usados como medidas de referência. Segundo Feister et al. (2015), nestas condições observa-se que, apesar da presença das nuvens, quando o sol não está obstruído, a radiação retorna imediatamente ao nível do sol não obstruído. As diferenças que poderiam introduzir radiação extra proveniente da base das nuvens em relação ao céu de referência foram minimizadas selecionando as imagens com o menor número de nuvens possível.

Em geral, para a irradiância de referência foram selecionadas de 6 a 10 imagens por dia, sempre com o menor número de nuvens visíveis possível. A data e a hora dessas imagens foram anotadas e, com base nelas, foram separadas as respectivas medidas de irradiância dos sete sensores registrados com os radiômetros. A partir dessas medidas, por meio do pacote *Lmfit*, biblioteca para minimização de mínimos quadrados e ajuste de dados em Python (NEWVILLE et al., 2014), foi ajustada uma curva de referência para cada sensor e cada dia. O modelo utilizado teve como parâmetros de entrada: a amplitude (*Amp*), o valor central (*cen*) e o desvio padrão (*DP*), de acordo com a Equação (4.1) (NEWVILLE et al., 2014).

$$f(y; Amp, cen, DP) = \frac{Amp}{DP\sqrt{2\pi}} e^{[-(y-cen)^2/2DP^2]} \quad (4.1)$$

A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio da regressão linear entre a irradiância medida e a de referência, sendo observados o R^2 e o RMSE, critério mais importante no ajuste de uma curva quando o principal objetivo reside no uso do modelo para fins de previsão, considerando que quanto menor o valor do RMSE mais ajustado é o modelo (VIRTANEN et al., 2020).

Como avaliação adicional, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk (SW), que avalia a aderência dos resíduos à uma distribuição Normal em amostras com tamanho reduzido, de 3 a 50 observações (WILKS, 2011). O p-valor do teste se refere à hipótese de que os resíduos seguem de fato uma distribuição Normal, sendo rejeitada, de modo geral, quando p-valor é menor que 0,05. Assim, quando p-valor foi maior do que 0,05, com 95% de confiança, as curvas ajustadas eram similares a uma distribuição normal segundo o teste SW (MURPHY; KATZ, 2019).

Todo o processamento estatístico foi desenvolvido a partir de uma sub-rotina com *Scipy*, ferramenta *Open Source* em linguagem Python, desenvolvida para cálculos estatísticos e matemática aplicada (VIRTANEN et al., 2020).

Realizou-se a quantificação diária da discrepância entre a irradiância medida efetivamente por cada sensor e a medida de referência. Essa abordagem permitiu abordar o parâmetro CMF (Equação 3.1, Seção 3.2) não apenas como uma relação simples entre a irradiância com e sem nuvens, mas como a razão entre a irradiância medida e a irradiância sem obstrução solar, mantendo constantes todas as outras condições atmosféricas.

Conforme sugerido por Parisi e Dows (2004) e Silva et al. (2019), os EARS foram detectados quando o CMF apresentou diferenças maiores que 2σ entre a irradiância medida em condições de céus com nuvens (UV_{med}) e a irradiância de referência (UV_{sn}). Sendo assim, valores de $CMF > 1,156$, para medidas efetuadas com um único instrumento, e valores de $CFM > 1,11$, quando os dois radiômetros registraram medidas, foram considerados EARS.

Uma vez que na observação dos EARS, por definição, o CMF é maior do que 1 (SILVA et al., 2019; CASTILLEJO-CUBEROS; ESCOBAR, 2020), neste trabalho, o CMF é abordado e utilizado em termos percentuais (CMF%). Dessa forma, $CMF > 1,156$ referem-se a ampliações maiores do que 15,6% ($1,156 - 1 = 0,156$). Igualmente, $CFM > 1,11$, reportam condições em que os aumentos foram maiores do que 11% ($1,11 - 1 = 0,11$).

A irradiância espectral aumentada pelas nuvens, assim como a caracterização estatística dos eventos, foi analisada considerando o número de ocorrências e a radiação extra. Para esse propósito, fez-se uso de histogramas que representam a distribuição de frequência horária, sazonal e de ASZ. Além disso, as imagens do céu durante os EARS foram incorporadas nessa análise para fornecer informações adicionais.

O código implementado até esse desenvolvimento é mostrado no Apêndice A.

4.6 A relação entre a irradiância e o brilho das nuvens durante os EARS

A segmentação dos pixels brilhantes das imagens foi processada por meio de um algoritmo estruturado em *Computer Vision Library* (OpenCV), ferramenta de visão computacional multiplataforma desenvolvida para Python, que dispõe da função específica (`cv2.calcHist`) para calcular a proporção de RGB nas imagens

em termos dos pixels brilhantes de cada cor RGB nelas (BRADSKI; KAEHLER, 2008). Usualmente, o eixo das abscissas (pixels de brilho) é um número digital que varia de 0 a 255.

Para obter a distribuição de brilho, foi realizada a conversão das imagens de RGB para o espaço de cores HSV. Em seguida, calculou-se o histograma de brilho de cada imagem, fornecendo informações sobre a quantidade de pixels com determinada intensidade. Durante esse processo, é importante considerar a diferença significativa entre os diâmetros das moléculas atmosféricas e das partículas de nuvens, que resultam, respectivamente, nos fenômenos de espalhamento Rayleigh e Mie da luz solar visível. Essas características espectrais distintas influenciam os histogramas de brilho das imagens do céu, tornando-os diferentes quando há ou não nuvens aparentes (WAN; DU, 2020).

Como a intensidade de brilho do disco solar nas imagens é detectada na porção direita do histograma, quantificou-se os pixels com intensidade de brilho dos histogramas, segundo técnica de limiarização descrita por Gonzalez (2010), que separa as regiões de interesse a partir de diferentes valores utilizados como classificadores de uma característica particular das imagens. Neste procedimento foi utilizado o método do limiar fixo (LI et al., 2019), obtido com base na análise estatística das imagens, uma vez que os pixels mais brilhantes apresentam valores próximos a 250 nos histogramas. Após análises iniciais, obteve-se, para cada imagem, o número de pixels com intensidade de brilho maior que 180, 200, 230 e 245, categorizando, assim, neste estudo, o brilho das nuvens em quatro canais.

É importante ressaltar que os canais de processamento de dados do OpenCV não são otimizados para radiometria quantitativa e que a calibração de câmeras comerciais é mais complexa em comparação com as câmeras científicas (BURGGRAAFF et al., 2019). No entanto, de acordo com Bradski e Kaehler (2008), mesmo com essas considerações, a incerteza numérica associada ao brilho processado pelo OpenCV é menor que 1%.

Todas as 457.920 imagens foram segmentadas, sendo os dados colocados em uma nova planilha, com os canais de brilho ordenados por data e hora, tal como

foi feito para o banco de irradiância espectral. Uma sub-rotina simplificada para esse desenvolvimento é apresentada no Apêndice B.

As duas planilhas, de irradiância média calculada e canais de brilho das imagens, foram agrupadas automaticamente pelo algoritmo Python, sendo realizada a sincronização de horário entre elas.

Para analisar a relação entre a irradiância medida e o brilho das nuvens ao longo dos EARS foi necessário obter a variação do brilho nas imagens (VB), a partir da Equação (4.2),

$$VB = \frac{B_{cn}}{B_{ref}} \quad (4.2)$$

que apresenta a relação entre o brilho calculado em condições de céu com cobertura de nuvens (B_{cn}) e o brilho de referência (B_{ref}), avaliado em condições em que o Sol não estava obstruído, segundo método híbrido adaptado a partir de Sabburg e Wong (2000) e Yang et al. (2016). Neste trabalho, tal como para o CMF, a VB é abordada e utilizada em termos percentuais, como VB%.

O ponto crítico da Equação (4.2) é a obtenção do brilho de referência (B_{ref}), pois, diferente da irradiância de referência, calculada a partir de imagens, não havia instrumentação específica para medir, efetivamente, o brilho das imagens durante o experimento. Além disso, para a devida correspondência da VB com os dados de irradiância, é preciso considerar a variação do dia solar, que faz com que a posição do sol nas imagens seja alterada em $0,9856^\circ$ ao dia (BOCZKO, 1984), não permitindo a sincronização direta de B_{ref} na planilha de dados.

Para resolver o problema mencionado, assumiu-se que em uma imagem sem nuvens aparentes, haveria uma posição correspondente ou muito próxima na imagem que contém nuvens (YANG et al., 2016). De acordo com Yang et al. (2015), essas duas imagens devem apresentar não apenas distribuições de

brilho muito semelhantes, mas também outras características que garantam sua correspondência.

A partir desta condição, diferentes métodos podem ser utilizados para determinar B_{ref} em imagens contendo nuvens, podendo ser citadas: 1) Regressão Linear (SEBER; LEE, 2012); 2) Regressão de Árvore(s) de Decisão (BREIMAN et al., 2017); 3) Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) (ABE, 2005) e 4) Redes Neurais Artificiais (GOODFELLOW et al., 2016), cada uma com suas vantagens e desafios computacionais.

Além destas alternativas, diferentes autores destacam o uso de algoritmos de regressão do tipo k-Nearest Neighbors (KNN¹⁰) como mecanismo que apresenta vantagens em relação aos métodos sugeridos anteriormente, uma vez que é relativamente simples de entender e implementar, o que o torna uma escolha atraente para problemas de regressão quando a estrutura dos dados não é facilmente modelada por métodos paramétricos (YAO; RUZZO, 2006; HYYPPÄ et al., 2012; TAUNK et al., 2019; BALAZS et al., 2022).

Acerca dessas vantagens, Hyyppä et al. (2012) pontuam que o KNN:

- a) é um algoritmo não paramétrico, característica que permite que ele seja mais flexível e capaz de lidar com diferentes tipos de relações não lineares;
- b) é um método baseado em instâncias, o que significa que ele não gera um modelo explícito durante a fase de treinamento, mas armazena esses dados e usa-os diretamente durante a fase de previsão, tornando-o capaz de se adaptar rapidamente a novos dados, incorporando automaticamente as mudanças na distribuição dos dados de treinamento;
- c) não requer um processo de treinamento complexo ou computacionalmente caro;

¹⁰A regressão KNN é um algoritmo de aprendizagem de máquina supervisionado não paramétrico que é usado para classificação e regressão. O KNN aproxima a associação entre as características de entrada e a variável de resposta usando similaridade de características (Yao; Ruzzo, 2006). Basicamente, o KNN se baseia na ideia de que objetos semelhantes tendem a estar próximos uns dos outros (Hyyppä et al., 2012).

- d) permite a escolha da métrica de distância adequada para calcular a proximidade entre as amostras, possibilitando a adaptação do algoritmo às características específicas do problema em questão.

Cabe considerar que o KNN apresenta desafios específicos que podem afetar seu desempenho e precisão. Alguns desses desafios incluem: determinar o valor adequado de "k" (número de vizinhos próximos); lidar com a sensibilidade a *outliers*; e trabalhar com conjuntos de dados desbalanceados (BALAZS et al., 2022).

Diante das aparentes vantagens, neste estudo, o B_{ref} foi obtido a partir de um algoritmo de regressão KNN, segundo modelo adaptado a partir de Taunk et al. (2019), por meio da variação da trajetória do disco solar no decorrer do experimento (data e hora), do ASZ e do número de pixels brilhantes das imagens.

A partir das irradiâncias de referência (UV_{sn}), foram identificados no banco de dados os dias ensolarados ou predominantemente ensolarados durante o período de experimento. Esses dias foram selecionados mês a mês para o treinamento do algoritmo e, em seguida, B_{ref} foi previsto usando a técnica de interpolação local dos brilhos associados aos vizinhos mais próximos no conjunto de treinamento, com base na distância euclidiana (LIBERTI et al., 2014), considerando a data e o ASZ. O treinamento foi realizado de forma mensal para evitar enviesamentos nos dados de brilho e reduzir a alta variabilidade no processo de regressão. A qualidade da regressão foi avaliada utilizando as métricas R^2 e RMSE.

Vale ressaltar que VB não foi observado como uma simples relação entre o brilho da imagem com e sem nuvens, mas, sim, como a razão entre o número de pixels brilhantes calculado para uma imagem contendo sol e nuvens e o número de pixels brilhantes da imagem onde somente o disco solar estava aparente, de modo a identificar a contribuição efetiva dos pixels de brilho das nuvens nos EARS. Assim, conforme a Equação (4.2), determinou-se VB para cada EARS.

Por meio de análises de regressão linear e matriz de correlação, procurou-se avaliar possíveis expressões analíticas que correlacionem a irradiância espectral RUV e PAR com a variação do brilho das nuvens durante os eventos.

Considerando que a escala original das medidas de irradiância espectral e brilho poderia obscurecer características importantes no conjunto de dados, inicialmente, fez-se a análise de dispersão dos dados, sendo os dados submetidos, em seguida, a transformações matemáticas, de modo a buscar o melhor ajuste a uma expressão matemática.

Desse modo, foram testadas as relações listadas nas Equações (4.3), cada uma definindo uma família de transformações indexadas pelo parâmetro único zeta (ζ) (MURPHY; KATZ, 2019). As variáveis transformadas foram segmentadas por estação do ano e avaliadas junto aos CMF por matriz de correlação (r de Pearson) (WILKS, 2011; MURPHY; KATZ, 2019).

$$T(x) = \begin{cases} x^\zeta, & \zeta > 0 & (a) \\ \ln(x), & \zeta = 0 & (b) \\ \frac{x^\zeta - 1}{\zeta}, & \zeta \neq 0 & (c) \end{cases} \quad (4.3)$$

As transformações matemáticas avaliadas nesta etapa são apresentadas no Apêndice C. A sub-rotina para o mecanismo de KNN é apresentada no Apêndice D.

4.70 cálculo da dose diária de RUV

Para quantificar a irradiância espectral amplificada na superfície, aqui chamada de radiação extra, selecionou-se no banco de dados de irradiância e eventos, as variáveis de tempo (data e hora), os sensores medidores da irradiância espectral e seus respectivos CMF. Para cada sensor, a radiação extra foi calculada como o produto de cada medida do sensor de irradiância pelo CMF. O resultado foi armazenado como uma nova variável (“rad_extra”).

As medidas dos sensores foram agrupadas por data e, na sequência, somadas durante o intervalo das medidas, das 11h às 19h (UT), definindo-se, assim, o total da irradiância espectral recebida em superfície por dia (dose diária de radiação). A partir da seleção somente dos EARS (para cada sensor), a radiação extra foi também agrupada e totalizada por data, estabelecendo a dose de radiação diária extra. A diferença entre elas resultou na irradiância característica do dia, sem a radiação extra dos EARS.

A contribuição percentual da radiação extra na dose diária de radiação foi obtida por meio da razão entre a radiação diária extra e a dose diária da irradiância característica.

Para medidas com os radiômetros GUV-2511, o IUV é calculado a partir da combinação linear de medidas de quatro sensores (Equação 4.4),

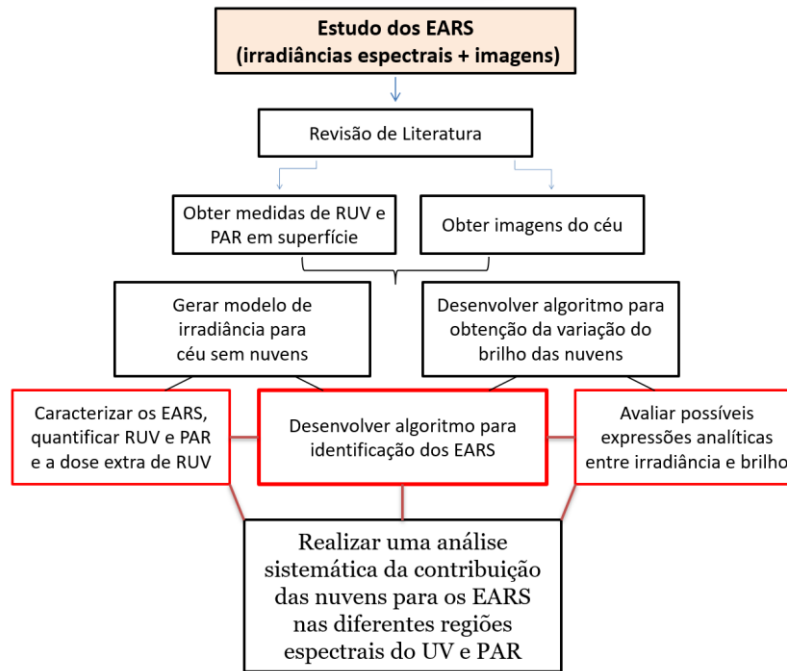
$$IUV = a_1 UV_{305} + a_2 UV_{313} + a_3 UV_{320} + a_4 UV_{340} \quad (4.4)$$

onde, $a_1 = 0,8058$, $a_2 = 0,0887$, $a_3 = 0,0324$ e $a_4 = 0,0131$ (BIOSPHERICAL, 2013).

De acordo com a Equação (4.4), eritemas causados pela radiação solar são induzidos, basicamente, pela radiação UV-B, especialmente, pelo UV-B (305 nm), com peso de 80% na formação do índice. As doses individualizadas dos eventos foram calculadas como a soma direta da radiação solar no intervalo de duração de cada EARS.

Para proporcionar uma visualização mais clara das etapas envolvidas na pesquisa, a Figura 4.3 apresenta o fluxograma das atividades realizadas neste estudo de EARS.

Figura 4.3. Fluxograma das atividades executadas neste estudo de EARS.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa destinada a compreender qual a contribuição das nuvens para EARS na RUV e PAR, a partir de medidas de irradiância espectral e imagens do céu obtidas na cidade de São José dos Campos, SP, no período de setembro de 2019 a agosto de 2020.

Cada medida de irradiância (RUV e PAR) foi associada a uma imagem registrada do céu. Considerando o intervalo das 11h às 19h (UT), o grupo amostral analisado neste trabalho de investigação dos EARS no UV, para 318 dias de medidas, foi composto, potencialmente, por 457.920 linhas de dados de irradiância espectral e esse mesmo montante de imagens digitais.

5.1 A irradiância espectral UV medida em São José dos Campos

Como exemplo dos perfis obtidos com o GUV, as Figuras 5.1a e 5.1b ilustram um perfil diário da irradiância espectral (RUV e PAR) medida em superfície em dia típico de céu não encoberto por nuvens, na cidade de São José dos Campos (SJC) (23,20° S, 45,86° W, 621 m). Estas Figuras mostram a média das medidas espectrais obtidas com os dois radiômetros GUV-2511, sendo três comprimentos de onda obtidos na região do UV-B (305 nm, 313 nm e 320 nm), três na região do UV-A (340 nm, 380 nm e 395 nm) e na PAR (400 nm-700nm). Os dados são referentes ao dia 01/06/2020. As Figuras 5.1c e 5.1d ilustram perfis médios sazonais da irradiância em c) 305 nm e d) PAR em dias típicos de céu não encoberto por nuvens.

Embora as medidas de irradiância tenham sido obtidas para todos os seis comprimentos de onda e banda PAR, de modo a dinamizar a apresentação dos resultados deste trabalho, em sua maioria, as discussões acerca dos EARS serão conduzidas em termos dos comprimentos de onda 305 nm (UV-B) e 380 nm (UV-A), importantes para entender os efeitos biológicos do UV-B e UV-A, seus impactos ambientais, e para desenvolver medidas de monitoramento e proteção à radiação solar, e PAR.

A Figura 5.2 mostra a variação mensal da irradiância espectral (305 nm, 380 nm e PAR) medida em SJC, média e desvio padrão, ao longo do período de

experimento (2019-2020). A variação mensal da irradiância para os demais comprimentos de onda segue os perfis apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.1. Perfis da irradiância espectral em um dia típico de céu não encoberto por nuvens: a) RUV e b) PAR, em SJC, em 01/06/2020; e perfis médios sazonais da irradiância em c) 305 nm e d) PAR.

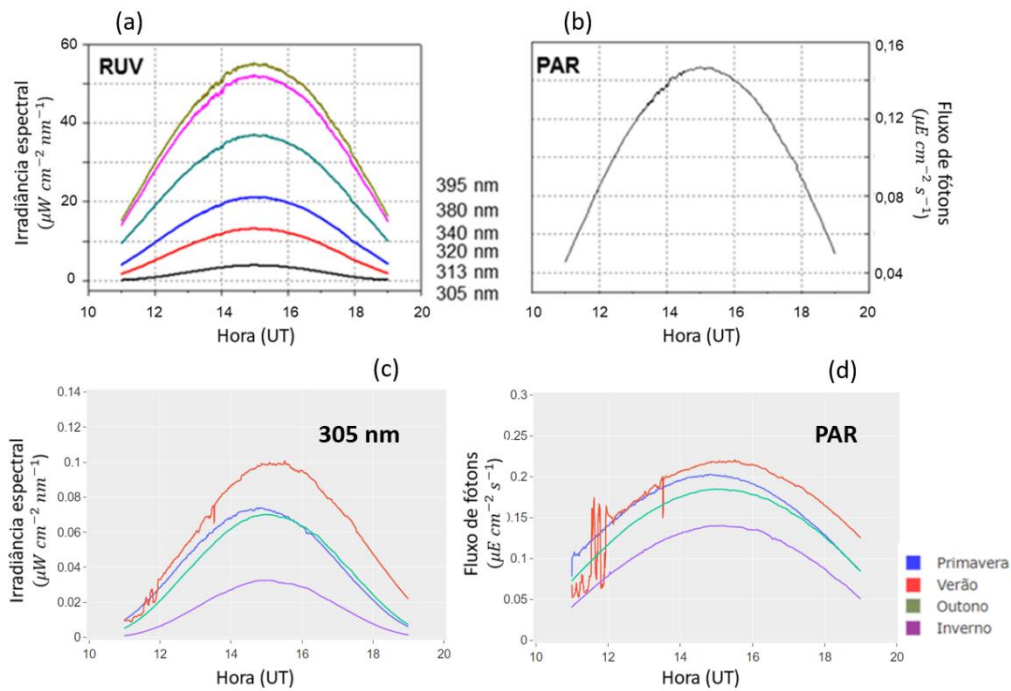
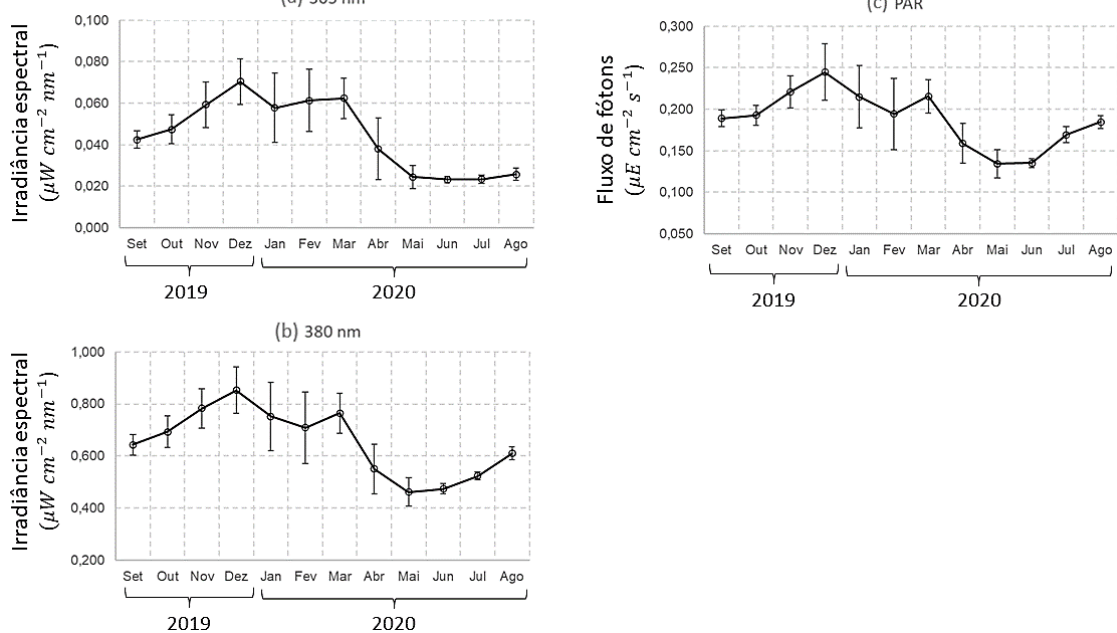


Figura 5.2. Variação mensal da irradiância espectral (RUV e PAR) medida em SJC, entre 2019 e 2020. (a) 305 nm, (b) 380 nm e (c) PAR.



De acordo com a Figura 5.2, as médias mensais das irradiâncias diárias apresentam tendência de crescimento na primavera, atingindo o ápice no mês de dezembro. A partir daí, as irradiâncias foram sendo reduzidas, gradualmente, após o pico do verão, apresentando valores mínimos próximo do inverno.

A variabilidade anual da irradiância medida entre 2019 e 2020 foi de 66,9% para o UV-B (305 nm), 45,9% no UV-A (380 nm) e de 45,0% na PAR. Atribui-se a variabilidade mensal, expressa por meio das barras de erro nos gráficos da Figura 5.2, à variação da inclinação solar nas estações, às intercorrências mensais na camada de ozônio e às diferentes condições de transparência atmosférica no período de monitoramento, associadas aos aerossóis e ao tipo e cobertura de nuvens em SJC.

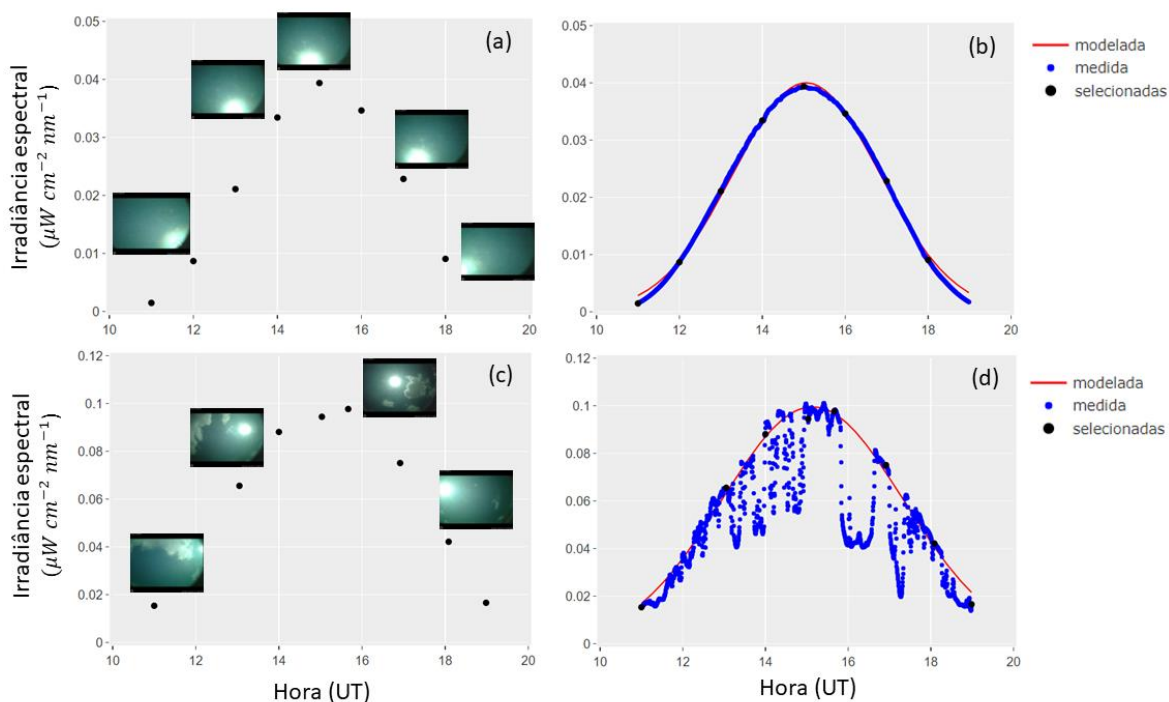
5.2O modelo para identificação dos EARS

Conforme o procedimento descrito na seção 4.3, a partir de imagens onde o disco solar não estava ocluído por nuvens, foram selecionadas as irradiâncias de cada sensor para parametrização das curvas de referências (UV_{sn}).

Exemplos desse procedimento em 305 nm são apresentados nas Figuras 5.3a e 5.3b (para o céu não encoberto por nuvens) e Figuras 5.3c e 5.3 d (para o céu com nuvens), onde são mostradas as imagens do céu ao lado de suas respectivas medidas de irradiância.

As Figuras 5.3a e 5.3b mostram, respectivamente, a seleção da irradiância para a curva de referência ajustada para um dia de céu não encoberto por nuvens, 01/06/2020 ($R^2 = 0,993$, $RMSE = 0,0008$, estatística de SW = 0,939, p-valor = 0,597). As Figuras 5.3c e 5.3d exibem o mesmo procedimento quando realizado para um dia com cobertura de nuvens, 27/12/2019 ($R^2 = 0,990$, $RMSE = 0,0016$, estatística de SW = 0,908, p-valor = 0,344). Ambos os exemplos de modelamento são para 305 nm, sendo as demais curvas obtidas da mesma forma para todos os sensores.

Figura 5.3. Obtenção da irradiância de referência a partir de imagens do LSV e medidas do GUV em 305 nm: (a) 01/06/2020; b) 27/12/2019.

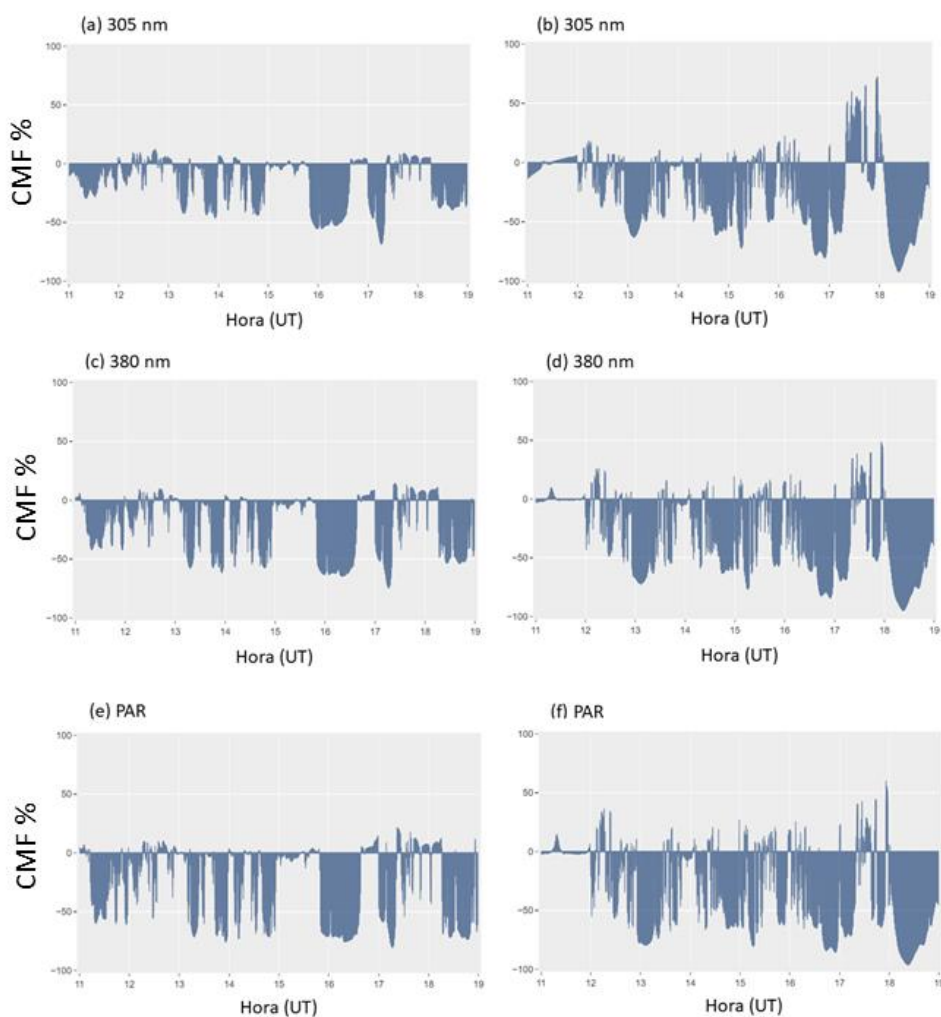


Com base nas curvas de referências (UV_{sn}), determinou-se o CMF% em cada momento das medidas e, como exemplo, o efeito das nuvens sobre a irradiância RUV e PAR observado nos dias 27/12/2019 e 09/02/2020 é apresentado nas Figuras 5.4 (a, b, c, d, e, f).

Em todas as Figuras 5.4, percentuais negativos são relacionados com a atenuação da RUV e PAR pelas nuvens, enquanto os valores positivos são devidos as ampliações da irradiância espectral. Para os dois dias, o papel das nuvens como agente atenuador da irradiância espectral foi pronunciado, por vezes obstruindo quase 100% da radiação incidente.

Nota-se, no entanto, que em diversos momentos de ambos os dias a irradiância espectral foi aumentada. Para o dia 09/02/2020, por exemplo, no decorrer de alguns minutos (entre 17h e 18h), as ampliações alcançaram 50% ou mais da irradiância de referência, tanto no UV-B quanto no UV-A e PAR (Figura 5.3b, 5.3d e 5.3f).

Figura 5.4. Variação diária percentual do fator de modificação da nuvem (CMF%) sobre a RUV e PAR: (a, c, e) 27/12/2019; (b, d, f) 09/02/2020.



O procedimento comparativo foi realizado para todos os dados de irradiância obtidos no trabalho e, ao final desta etapa, partiu-se para a identificação dos eventos de amplificação da irradiância UV e PAR, seguindo o critério $CMF > 2\sigma$, como apresentado na Seção 4.5.

5.3A caracterização estatística dos EARS

5.3.1 O número de eventos e o intervalo de ocorrência

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros estatísticos que descrevem as ocorrências dos EARS durante o período de experimento em SJC (setembro de 2019 a agosto de 2020). Para cada sensor, a Tabela apresenta: a ocorrência em número

de dias e o número de eventos identificados, o intervalo médio de duração dos eventos e o maior intervalo de tempo de uma medida contínua.

De acordo com a Tabela 5.1, observa-se um aumento do número de eventos com o aumento do comprimento de onda, onde, dos 1.735 EARS observados, a radiação UV-B (305nm) representa 6,0% do total, enquanto a UV-A (380 nm) e PAR representam 17,5% e 30,5%, respectivamente.

Tabela 5.1. Estatística descritiva dos EARS em SJC.

λ (nm)	Dias de ocorrência (n)	Eventos (n)	Intervalo ¹ (min)	Maior intervalo contínuo (min)
305	62	104	1 a 5 (73%)	25
313	82	132	1 a 5 (79%)	25
320	81	138	1 a 5 (77%)	27
340	103	191	1 a 5 (73%)	27
380	142	303	1 a 5 (72%)	29
395	148	338	1 a 5 (71%)	37
PAR	188	529	1 a 5 (68%)	39

¹O número entre parênteses se refere ao percentual de eventos no intervalo referido.

Diferentes estudos relatam essa relação espectral entre o número de eventos, demonstrando que as intensificações são mais frequentes para a radiação solar medida em bandas largas e comprimentos de onda mais longos, em comparação com a radiação mais curta (SECKMEYER et al., 1996; KYLLING et al., 1997; MATEO et al., 2011). Segundo Sabburg e Long (2004), à medida que o comprimento de onda da radiação solar aumenta, mais irradiância direta é convertida em irradiância difusa abaixo das nuvens.

De maneira semelhante, o intervalo contínuo de duração dos EARS aumenta com o comprimento de onda, devido à interação entre a radiação solar e as gotículas e cristais das nuvens.

Segundo Seckmeyer et al. (1996), comprimentos de onda mais curtos da radiação solar atravessam a nuvem com mais eficiência do que comprimentos de onda mais longos, porque os fótons espalhados pela primeira vez para cima no topo da nuvem podem ser espalhados novamente para baixo, tentando, assim, atravessar a nuvem mais de uma vez. Como resultado, tanto o número de ocorrências quanto o intervalo contínuo de duração dos EARS são aumentados devido às reflexões da própria nuvem, sendo essas intensificações dependentes do comprimento de onda, conforme destacado por Kylling et al. (1997 apud LINDFORS; AROLA, 2008).

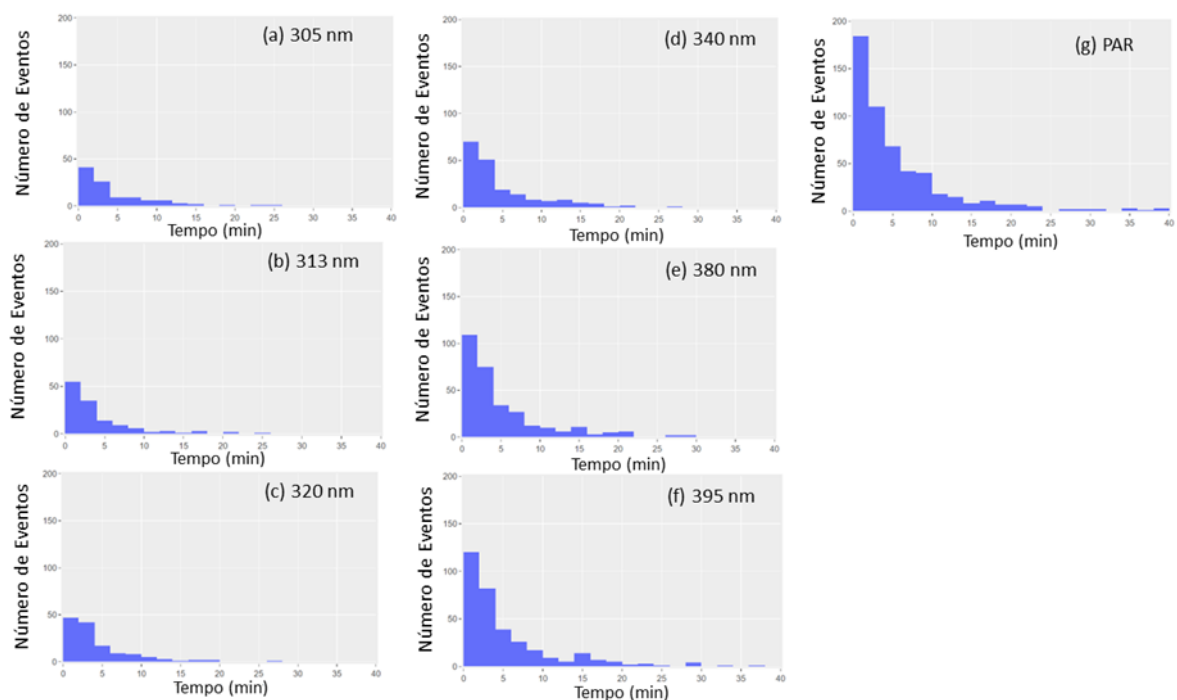
Para todos os sensores, 37% ($\pm 3\%$) dos EARS tiveram duração de até 1 minuto, dos quais, de acordo com a distribuição de Poisson, que expressa a probabilidade das amplificações ocorrerem em determinado intervalo de tempo se estas ocorrerem independentemente de quando ocorreu o último evento (WILKS, 2011), existe 99,6% de chances dos fenômenos serem avaliados com duração de até 5 minutos contínuos (p -valor $> 0,05$). Para o UV-B (305 nm, 313, nm e 320 nm), em média, 76% dos EARS tiveram esta duração. Esse percentual para a radiação UV-A (340 nm, 380 nm e 395 nm) e PAR foi, respectivamente, de 72% e 68%. De modo individual, esse percentual é apresentado entre parênteses, para cada comprimento de onda (λ), na coluna "Intervalo" da Tabela 5.1.

As Figuras 5.5 mostram a distribuição do intervalo contínuo de ocorrências dos eventos de amplificação em SJC. Por meio delas, tem-se que a ocorrência e o intervalo contínuo de duração dos EARS aumentam na medida em que λ é aumentado. Essa tendência pode ser explicada pela evolução temporal da formação das nuvens e suas características intrínsecas. À medida que λ aumenta, a interação entre as partículas atmosféricas e a radiação solar se torna mais complexa, devido à maior capacidade de espalhamento da luz em

comprimentos de onda maiores, resultando em uma maior difusão da radiação nas nuvens.

O espalhamento mais amplo pode afetar o processo de formação e dissipação das nuvens, levando a uma maior ocorrência e a um intervalo de duração mais longo dos EARS. Portanto, os dados observacionais fornecem insights valiosos sobre como as características espectrais das nuvens impactam o comportamento dos EARS ao longo do tempo.

Figura 5.5. Distribuição do intervalo contínuo de ocorrências dos EARS em SJC: UV-B (a, b, c); UV-A (d, e, f); PAR (g).



Como exemplo dos longos intervalos de duração contínua de alguns EARS, em fevereiro de 2020, observou-se que uma única amplificação da irradiância UV-B (305 nm) perdurou por 25 minutos, entre 17h e 18h (UT). Em outubro e dezembro de 2019, pelo menos dois aumentos no UV-A (380 nm e 395 nm) e na PAR ocorreram em intervalo igual ou superior a 29 minutos, tanto na parte da manhã (entre 11h e 12h, UT) quanto à tarde, entre 17h e 18h (UT). No entanto, pode-se destacar que esses longos intervalos contínuos não prevalecem na distribuição

de frequência do fenômeno, sendo suas ocorrências episódicas, com a maioria dos eventos compreendidos em intervalos de tempo, em geral, menores do que 5 minutos.

5.3.2 A sazonalidade dos EARS

O comportamento sazonal dos EARS é mostrado nas Figuras 5.6 (a, b, c) para o UV-B (305 nm), Figuras 5.6 (d, e, f) para o UV-A (380 nm) e Figuras 5.6 (g, h, i) para a banda PAR. As Figuras 5.6a, 5.6d e 5.6g ilustram como os eventos se distribuíram ao longo do experimento, mês a mês. Nas Figuras 5.6, os gráficos *boxplot* mostram o número de eventos e radiação extra por estação do ano, em 305 nm (b, c), 380 nm (e, f) e PAR (h, i), criados a partir da frequência do número de eventos e radiação extra, que agrupados em classes, mostram como os eventos se distribuem em cada estação do ano.

De acordo com as Figuras 5.6 (c, f, i), devido à influência do ASZ e dos constituintes da atmosfera sobre a variação sazonal da irradiância UV, a dispersão da radiação extra é maior na primavera e no verão do que no outono e no inverno. Assim, enquanto para o UV-A (380 nm) e PAR a dispersão da radiação extra é menos pronunciada entre as estações (Figuras 5.6f, 5.6i), em 305 nm, essa caracterização se mostra mais acentuada (Figura 5.6c).

Nas latitudes tropicais, especialmente na primavera e verão, é observada maior irradiância UV-B atingindo a superfície da Terra. Essa radiação adicional pode interagir com as nuvens, contribuindo para a possível radiação extra dos EARS nestes comprimentos de ondas durante essas estações do ano (Figura 5.6c).

No entanto, é importante ressaltar que a intensificação da radiação UV-B pelas nuvens em latitudes tropicais pode ser influenciada por diversos fatores atmosféricos, sendo necessária a realização de análises detalhadas para compreender adequadamente a variação da radiação UV-B nessas regiões.

Para Zamalloa-Jara et al. (2023), é importante lembrar que as características de sazonalidade dos EARS podem variar dependendo de fatores regionais (como latitude, continentalidade e altitude) e características locais específicas. Além disso, a presença de partículas atmosféricas, como poeira, poluentes e

aerossóis naturais, pode ser mais significativa durante certas estações do ano, podendo atuar como núcleos de condensação para a formação de gotículas de nuvens, aumentando a eficiência do espalhamento da radiação (ALVIM et al., 2017).

No outono e no inverno, por exemplo, as condições atmosféricas em SJC são mais estáveis e menos propensas a eventos de formação intensa de nuvens e, por consequência, com menos umidade e menor frequência de sistemas meteorológicos, verifica-se uma menor dispersão da radiação extra dos EARS durante essas estações (Figura 5.6c).

Outro importante aspecto em relação à dispersão sazonal dos EARS no UV-B está na altura da cobertura de nuvens, pois intensificações da radiação UV-B também podem ser relacionadas à distância entre as nuvens e a superfície da Terra, que faz com que a radiação extra UV-B espalhada pelas nuvens percorra uma distância menor antes de alcançar a superfície.

Para avaliar se o número de eventos e as irradiâncias extras dos EARS eram estatisticamente diferentes em termos sazonais, os dados foram submetidos ao teste estatístico ANOVA (Análise de Variância) (WILKS, 2011). Nesta técnica, segundo Wilks (2011), quando p-valor é menor do que 0,05 existe diferença significativa entre os tratamentos.

De acordo com a ANOVA, ao nível de significância de 95%, não se observou diferenças significativas entre as estações do ano para nenhum dos sensores, nem para as ocorrências, tampouco para a radiação extra dos EARS. Os p-valores para o número de eventos e radiação extra são dispostos entre parênteses, respectivamente, para cada sensor ilustrado nas Figuras 5.6: 305 nm (0,69; 0,13), 380 nm (0,78; 0,10) e PAR (0,89; 0,27)

Figura 5.6. O gráfico de barras ilustra a distribuição mensal dos EARS: (a) UV-B (305 nm), (d) UV-A (380 nm) e (g) PAR. Os gráficos *boxplot* mostram o número de eventos e radiação extra por estação do ano: 305 nm (b, c), 380 nm (e, f) e PAR (h, i).



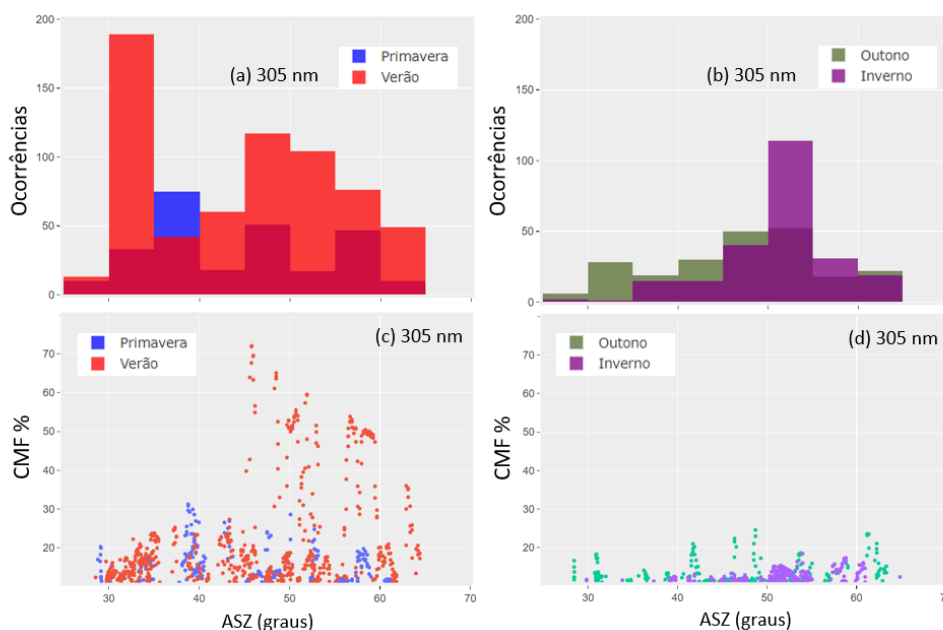
5.3.3 A posição das nuvens nos eventos

Para investigar a relação entre a posição das nuvens e os EARS, cada amplificação foi observada individualmente em relação ao ASZ, discretizadas como eventos singulares de vinte segundos.

No UV-B (305 nm) foram quantificadas, individualmente, 1373 amplificações. A distribuição angular dos EARS nesta região espectral pode ser vista nas Figuras 5.7, que as apresenta em termos da ocorrência de eventos (5.7a e 5.7b) e do CMF% (5.7c e 5.7d), por estação do ano. Foram observados eventos ocorrendo entre os ASZ de 25° e 65° durante todo o período analisado.

Ao longo do verão, foram observados dois picos em relação ao número de ocorrências (Figura 5.7a): o primeiro deles para ângulos de 30° a 35°, com 189 amplificações (13,8% do total); o segundo, em torno de 50°, com 117 ocorrências de aumentos (8,5% do total). No inverno, as amplificações se concentraram em ângulos solares de 50° a 55° (Figura 5.7b), sendo contabilizadas observações em números semelhantes aos do verão para a mesma faixa angular, com 114 ocorrências (8,5% do total).

Figura 5.7. Número de EARS e CMF% em relação ao ASZ no UV-B (305 nm): (a) e (c): primavera e verão; (b) e (d) outono e inverno.



Em relação ao primeiro pico, ao analisar as imagens, identificou-se que os EARS no UV-B (305 nm) em ângulos de 30° a 35° estavam associados a nuvens fragmentadas provenientes de Cumulus ou Stratus, resultado que corrobora os estudos de Lovengreen et al. (2005) e Sabburg e Parisi (2006), onde essas nuvens são apontadas como as principais responsáveis por EARS na primavera e no verão, uma vez que são mais propensas a favorecer os processos convectivos que poderiam explicar o maior espalhamento de ondas mais curtas nestas estações do ano e ângulos solares.

Além de Cumulus e Stratus, a análise visual das fotos mostrou também uma grande quantidade de nuvens Altocumulus e Altostratus posicionadas em ASZ entre 30° e 35° durante os EARS. Para todas elas, nessa faixa angular, as intensificações não ultrapassaram 25% da irradiância de referência do dia.

A Figura 5.8 ilustra a imagem de nuvens do tipo Altocumulus e Altostratus observadas em ASZ de 34°, às 13h42 (UT), durante a ocorrência de EARS no UV-B (305 nm), em 01/12/2019. Percebe-se que as nuvens não ocluíam o disco solar nas imagens, mas as formações mais próximas da circunferência solar podem ter dado origem aos eventos identificados nesse horário.

Figura 5.8. Nuvens Altocumulus e Altostratus observadas em ASZ de 34° durante EARS no UV-B (305 nm), em 01/12/2019.



Segundo a análise dos dados, nuvens posicionadas em ASZ de 30° a 35° na primavera-verão intensificaram o UV-B (305 nm) em 14,1% ($\pm 2,3\%$) (Figura 5.7c). No outono e inverno, nesta mesma faixa de ASZ, não se observou o aumento do número de eventos (Figura 5.7b), possivelmente, devido ao processo inibitório de formação das nuvens Cumulus e Stratus nesta estação, por sua vez associado ao aumento na concentração de aerossóis atmosféricos, em um processo discutido detalhadamente por diversos autores (ANDREAE et al., 2004; ANDREAE; ROSENFELD, 2008; PINHEIRO; COSTA, 2013; JIANG et al., 2018).

Por meio das imagens, para todas as estações do ano, pode-se observar que, em ASZ de 45° a 55° (Figuras 5.7a e 5.7b), o segundo pico de EARS no UV-B (305 nm) estava associado à uma composição mais diversificada da cobertura de nuvens, com predominância de nuvens de média e de alta altitude, tais como Altostratus e Cirrus, muito características da região de SJG ao longo de todo o ano (FERREIRA et al., 2020). Excluindo-se o verão (que será analisado individualmente abaixo), para a primavera, outono e inverno, considerando-se ASZ > 35°, a contribuição dos EARS no UV-B (305 nm) foi de 13,8% ($\pm 2,4\%$) (Figura 5.7c e 5.7d).

A Figura 5.9 mostra nuvens Altostratus captadas em ASZ de 54°, às 17h14 (UT), durante EARS em 23/06/2019.

Figura 5.9. Nuvens do tipo Altostratus captadas em ASZ de 54°, durante EARS no UV-B (305 nm), em 23/06/2019.



Examinando-se a Figura 5.9, verifica-se que uma camada de nuvens acinzentada, como um véu ou lençol fibroso de grande dimensão, cobre toda a imagem, de modo que o disco solar é visto como através de um vidro fosco. Tais características fizeram com que os EARS fossem produzidos a partir de espalhamentos múltiplos da RUV por esse tipo de cobertura de nuvens.

As maiores contribuições individuais para os EARS no UV-B (305 nm), no entanto, ocorreram para ASZ entre 45° e 60° (Figura 5.7c), relacionadas ao espalhamento do UV-B (305 nm) pelas bordas de nuvens Cumulus e Stratocumulus, no verão (aumentos de $34,5\% \pm 14,1\%$ em 247 eventos).

A Figura 5.10 mostra nuvens Cumulus e Stratocumulus captadas em ASZ de 46°, às 17h56 (UT), durante EARS no UV-B (305 nm), em 09/02/2020, que promoveram aumentos de 30 a 72% na irradiância UV-B (305 nm) em superfície.

Figura 5.10. Nuvens Cumulus e Stratocumulus captadas em ângulo solar de 46°, durante EARS no UV-B (305 nm), em 09/02/2020.



A partir desses dados, identificou-se que no verão, apesar do grande número de eventos atribuído às nuvens Altocumulus e Altostratus posicionadas em ASZ entre 30° e 35°, o espalhamento pelas bordas de Cumulus e Stratocumulus em ASZ de 45° a 60° gera intensificações mais expressivas no UV-B (305 nm).

Em oposição às sugestões de Sabburg e Calbó (2009) e Sabburg e Wong (2000), que afirmam que as maiores amplificações da RUV ocorrem na presença de nuvens Cirrus, capazes de produzir espalhamentos múltiplos, Yordanov et al. (2015) e Mol et al. (2023) apontam as nuvens Cumulus e Stratocumulus como os principais fatores responsáveis pela sua intensificação na superfície, tanto em relação ao número de eventos quanto ao tempo de duração.

Yordanov et al. (2015) relatam que devido à sua ampla cobertura espacial e à presença de pequenas lacunas, nuvens Cumulus e Stratocumulus são responsáveis por aumentar as intensificações em mais de 30% durante o verão, conforme mostrado na Figura 5.7c. Essas nuvens promovem EARS curtos, porém mais intensos. Por outro lado, de acordo com Mol et al. (2023), no verão, as nuvens Stratocumulus possuem um potencial tão significativo quanto as Cumulus em termos de quantidade absoluta e intensidade de EARS. Segundo esses autores, juntas, essas duas nuvens representam mais de 70% de todos os eventos, tal como observado neste estudo.

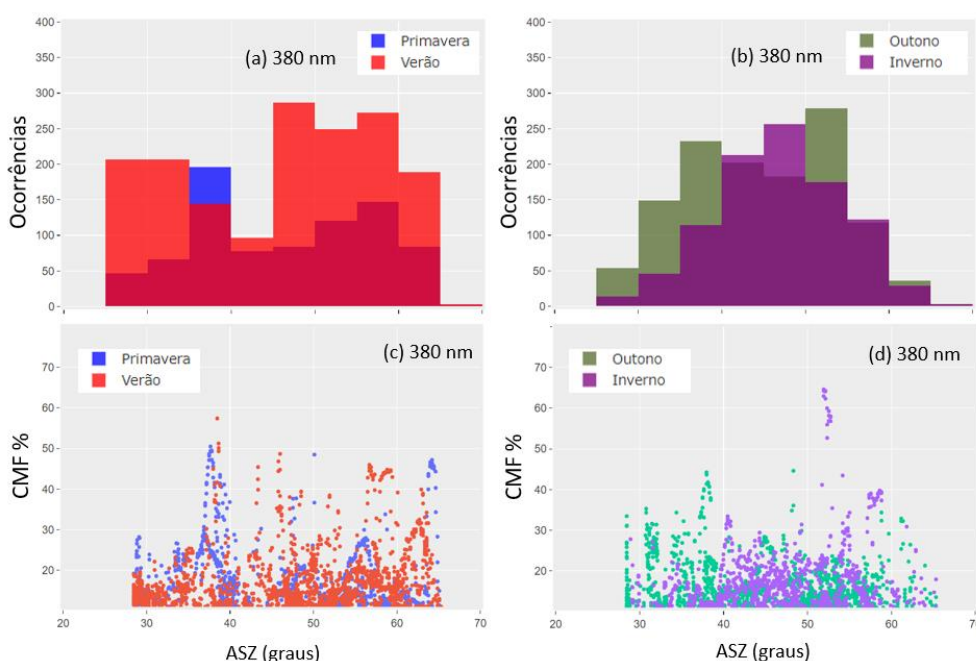
Na região do UV-A (380 nm) foram quantificadas individualmente 4705 amplificações. Na PAR, esse número foi de 9109. Por estação do ano, a distribuição angular dos EARS no UV-A (380 nm) é mostrada em relação às ocorrências nas Figuras 5.11 (a e b) e ao CMF% (c e d). Para EARS na PAR, essas relações são apresentadas nas Figuras 5.12 (a e b) e 5.12 (c e d). Destaca-se que, para melhor visualização, as escalas de ocorrências nas figuras são diferentes para cada comprimento de onda.

Para o UV-A (380 nm) e PAR, as distribuições angulares (Figura 5.11b e 5.12b) não se concentraram em picos tão bem definidos como no UV-B (305 nm). Aliás, diferentemente do UV-B (305 nm), que apresentou um grande número de eventos entre 30° e 35° no verão, nesta mesma faixa angular, EARS no UV-A (380 nm) mostraram um pico bem definido de eventos na primavera, entre 35° e 40° (Figura 5.11a), notando-se ainda que, no verão, as ocorrências no UV-A (380 nm), entre 25° e 35°, se distribuíam de maneira mais homogênea do que para o UV-B (305 nm), com imagens associadas, principalmente, a nuvens Altocumulus

e Altostratus, mas também entre 45° e 60° (Figura 5.11a), devido às nuvens Cumulus e Stratocumulus.

O pico das ocorrências de EARS na PAR na primavera sofreu um deslocamento em relação ao UV-B (305 nm), concentrando as intensificações em ASZ de 35° a 45° (Figura 5.12a), decorrente da interação entre a PAR e gotículas de água das nuvens Altostratus e Altostratus, relativamente pequenas em comparação com as gotículas encontradas em nuvens Cumulus (WRIEDT, 2012). Esse pico foi observado no outono, onde para ASZ entre 35° e 40° foram anotados 506 eventos (5,6% do total) (Figura 5.11b). No inverno, tal como para o UV-B (305 nm), houve um agrupamento do número de eventos no UV-A (380 nm) e PAR em ângulos de 30° a 60°, como se a frequência dos EARS pudesse ser descrita por uma distribuição Normal durante esse período do ano (Figura 5.11b).

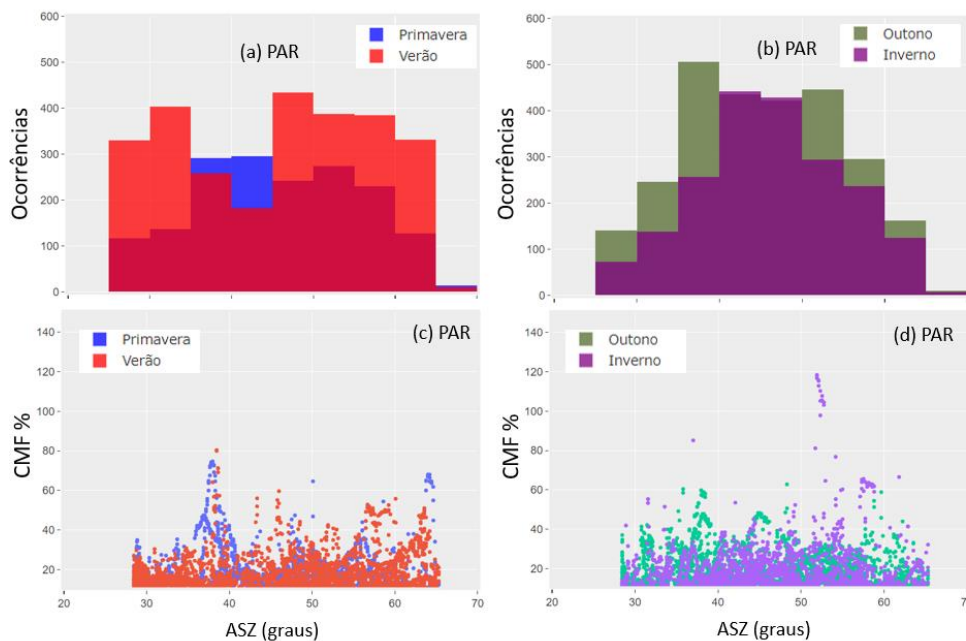
Figura 5.11. Número de EARS e CMF% em relação ao ASZ no UV-A (380 nm): (a) e (c): primavera e verão; (b) e (d) outono e inverno.



Comparando as Figuras 5.11a e 5.11b, e as Figuras 5.12a e 5.12b, verifica-se que o agrupamento do número de EARS em torno de ângulos entre 30° e 60° é da mesma ordem para todo o ano, com diferenças significativas sendo observada somente para o período da primavera (ANOVA, p-valor < 0,05). Tal

como para o UV-B (305 nm), a análise das imagens mostrou que um mesmo grupo de nuvens, Altocumulus e Altostratus, foi responsável por intensificações no UV-A (380 nm) e PAR em ASZ de 30° a 60° e, considerando os CMF% apresentados nas Figuras 5.11c e 5.11d (para o UV-A) e Figuras 5.12c e 5.12d (para a PAR), observa-se que ao longo do ano, em 90% dos casos, a irradiância foi aumentada em 16,1% ($\pm 4,5\%$) para o UV-A (380 nm) e 16,8% ($\pm 4,8\%$) para a PAR.

Figura 5.12. Número de EARS e CMF% em relação ao ASZ na PAR: (a) e (c): primavera e verão; (b) e (d) outono e inverno.



Como exemplo de influências das nuvens, a Figura 5.13 ilustra nuvens do tipo Cumulus e Stratocumulus que produziram os maiores CMF% no UV-A (380 nm) e PAR, respectivamente, 64% e 118%. Elas foram observadas em ASZ de 51°, às 17h26 (UT), durante EARS ocorridos em 15/06/2020.

Ressalta-se que, embora não se tenha observado uma relação direta entre o CMF% e a posição das nuvens durante os EARS, a análise visual das imagens evidenciou o papel significativo das nuvens Cumulus e Stratocumulus nas intensificações, principalmente durante a ocorrência do fenômeno no UV-B. É importante observar, no entanto, que as nuvens Altostratus e Cirrus mostraram-

se relevantes nas ampliações de todos os outros comprimentos de onda investigados

Figura 5.13. Nuvens Cumulus e Stratocumulus em ASZ de 51° durante EARS no UV-A (380 nm) e PAR, em 09/02/2020.



5.4O estudo da variação do brilho das nuvens nos EARS

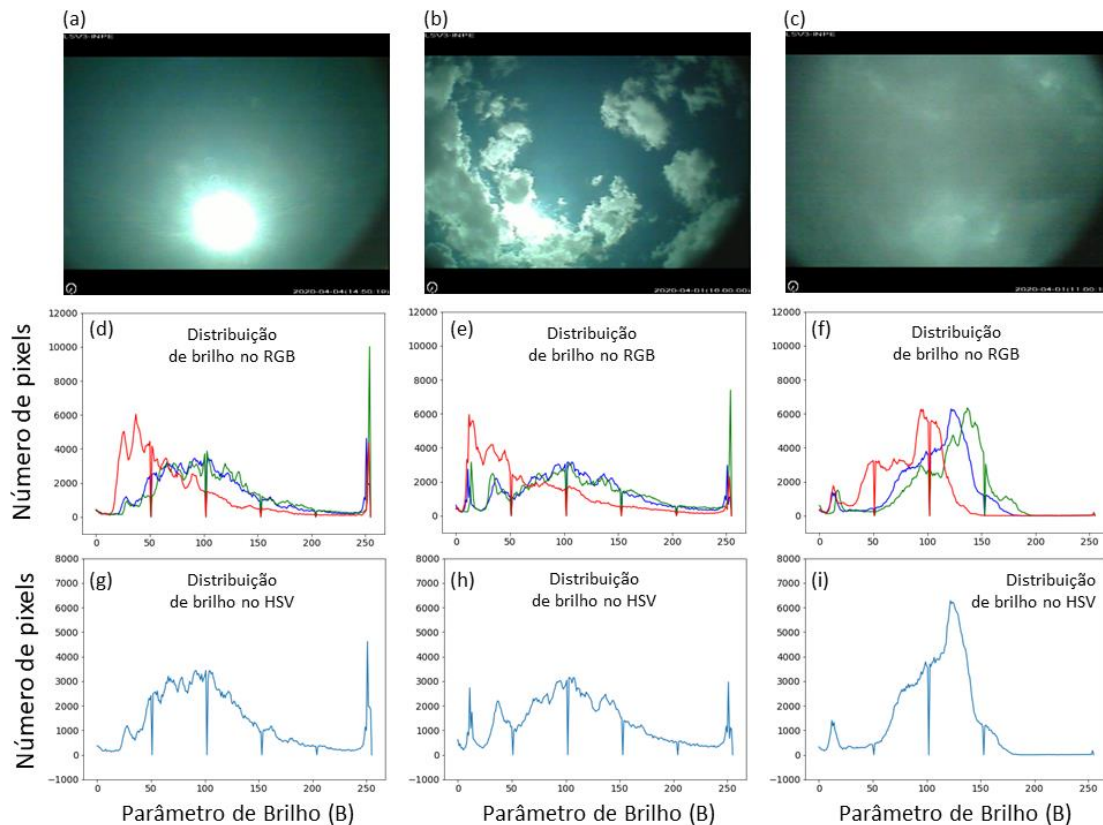
Para examinar a sensibilidade do algoritmo às mudanças de nebulosidade, inicialmente, comparou-se um grupo aleatório de 30 imagens por meio de histogramas de brilho do HSV. A partir de diferentes dias, foram selecionadas 10 imagens com Sol e céu sem nuvens aparentes, 10 imagens contendo Sol e nuvens aparentes e 10 imagens de céu encoberto, todas capturadas no mesmo local, com os mesmos parâmetros da câmera, onde um exemplo de imagem de cada conjunto é mostrado na parte superior da Figura 5.14 (a, b e c).

Na Figura 5.14, as imagens e dados apresentados na coluna mais à esquerda são referentes à 04ABR2020, às 14h50 (UT); na coluna do meio, à 01ABR2020, às 16h50 (UT); e a terceira coluna, à 01ABR2020, às 11h00 (UT). A distribuição da intensidade de cores dos canais RGB é apresentada na linha do meio da Figura (5.14d, 5.14e e 5.14f), sendo o histograma de brilho (B) do HSV exibido em sua linha inferior (Figura 5.14g, Figura 5.14h e Figura 5.14i).

Segundo Yang et al. (2016), se as condições de iluminação atmosférica de cada imagem não são as mesmas, estas imagens têm distribuições de brilho

marcadamente diferentes. Dessa forma, examinando-se as Figuras 5.14d e 5.14g, nota-se que a intensidade de brilho do disco solar pode ser detectada na parte inferior direita dos histogramas, com valores próximos a 250, uma vez que os pixels do Sol são mais brilhantes do que seu entorno. Nas Figuras 5.14e e 5.14h, o aumento da nebulosidade na imagem faz com que ocorra a redução do número de pixels mais brilhantes nesta mesma região dos histogramas, algo ainda mais evidente nas Figuras 5.14f e 5.14i, que ilustram os histogramas da imagem do céu encoberto.

Figura 5.14. Imagens originais mostradas na linha superior, a distribuição da intensidade RGB na linha do meio e de brilho no HSV na linha inferior, para o céu sem nuvens aparentes (a, d, g); parcialmente nublado (b, e, h); encoberto (c, f, i).

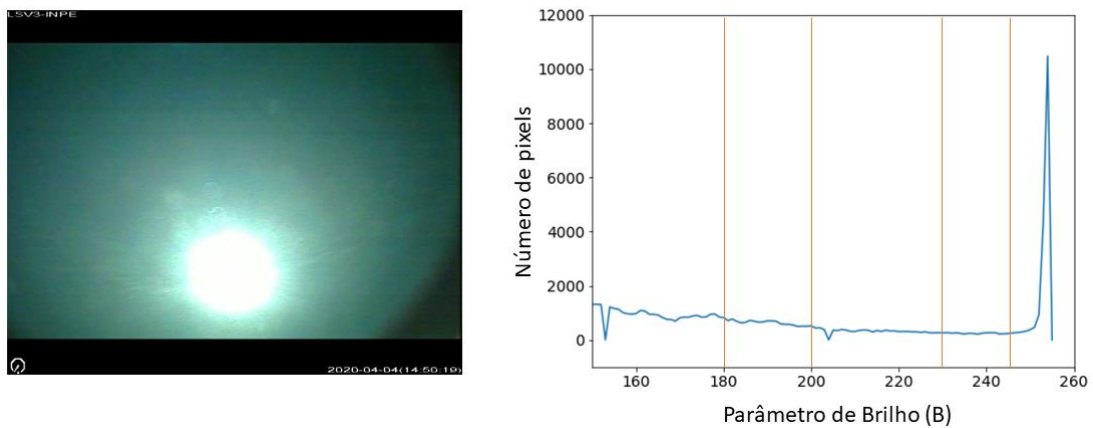


Não há um valor pré-determinado na literatura que estabeleça o limiar de integração dos pixels brilhantes do Sol (ou do Sol e das nuvens) nos histogramas. Logo, a partir de análises visuais e teste empíricos, conforme o método proposto na seção 4.6, valores de brilho (B) maiores que 180, 200, 230

e 245 foram considerados como critérios de limiarização na integração dos pixels.

A Figura 5.15 ilustra uma imagem do céu sem nuvens aparentes (a) e seu histograma de brilho HSV (b), onde nas linhas vermelhas são marcados os limiares testados na segmentação dos pixels. De acordo com a Figura, quanto menor o valor limite de integração, maior o número de pixels residuais carregados na contagem de pixels brilhantes das imagens.

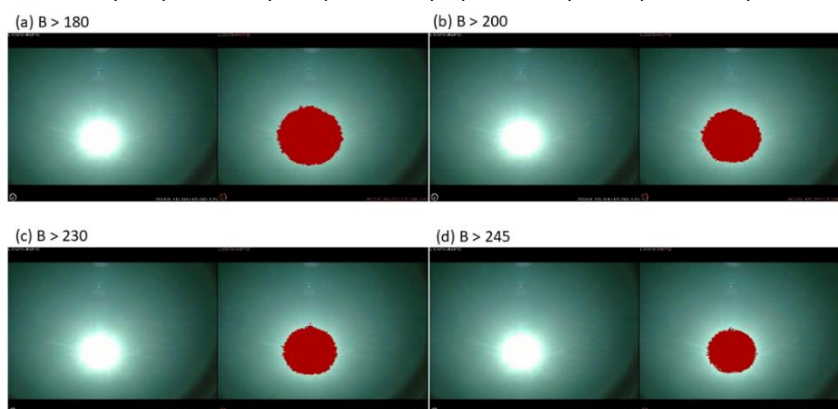
Figura 5.15. Imagem do céu sem nuvens aparentes (a) e seu histograma de brilho HSV (b). As linhas vermelhas mostram os limiares testados na segmentação.



Para avaliar a sensibilidade do algoritmo na contagem dos pixels brilhantes, imagens originais do céu sem nuvens aparentes foram duplicadas e todos os pixels que estavam dentro do intervalo limítrofe de brilho (B) foram coloridos em vermelho. Os resultados são vistos nas Figuras 5.16a ($B > 180$), 5.16b ($B > 200$), 5.16c ($B > 230$) e 5.16d ($B > 245$).

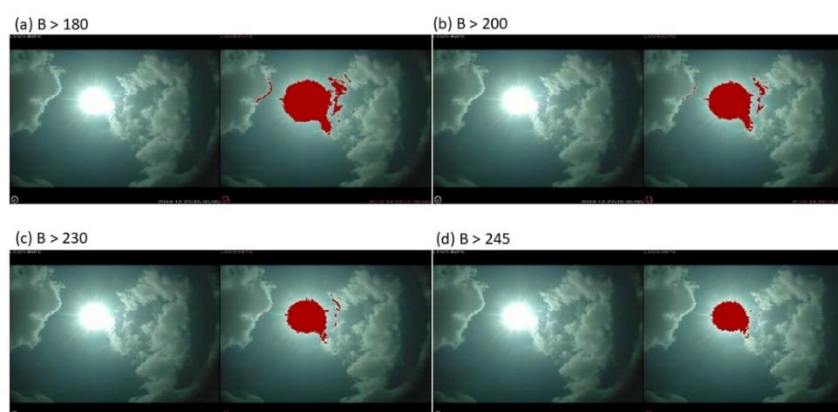
De acordo com as Figuras 5.16, na medida em que a curva do histograma a ser integrada se torna mais estreita, ocorre a redução da área vermelha na Figura (Figuras 5.16c e 5.16d).

Figura 5.16. Imagem do céu sem nuvens aparentes e a mesma imagem onde os pixels com os diferentes limites de integração foram tingidos de vermelho (à direita): a ($B > 180$), b ($B > 200$), ($B > 230$) e d ($B > 245$).



Uma vez evidenciada a capacidade do algoritmo em distinguir e quantificar o número de pixels em imagens sem nuvens, o mesmo procedimento foi realizado utilizando um conjunto de imagens de céu parcialmente nublado. Os resultados são vistos nas Figuras 5.17a ($B > 180$), 5.17b ($B > 200$), 5.17c ($B > 230$) e 5.17d ($B > 245$).

Figura 5.17. Imagem do céu com nuvens e a mesma imagem onde os pixels com os diferentes níveis de integração foram tingidos de vermelho (à direita): a ($B > 180$), b ($B > 200$), ($B > 230$) e d ($B > 245$).



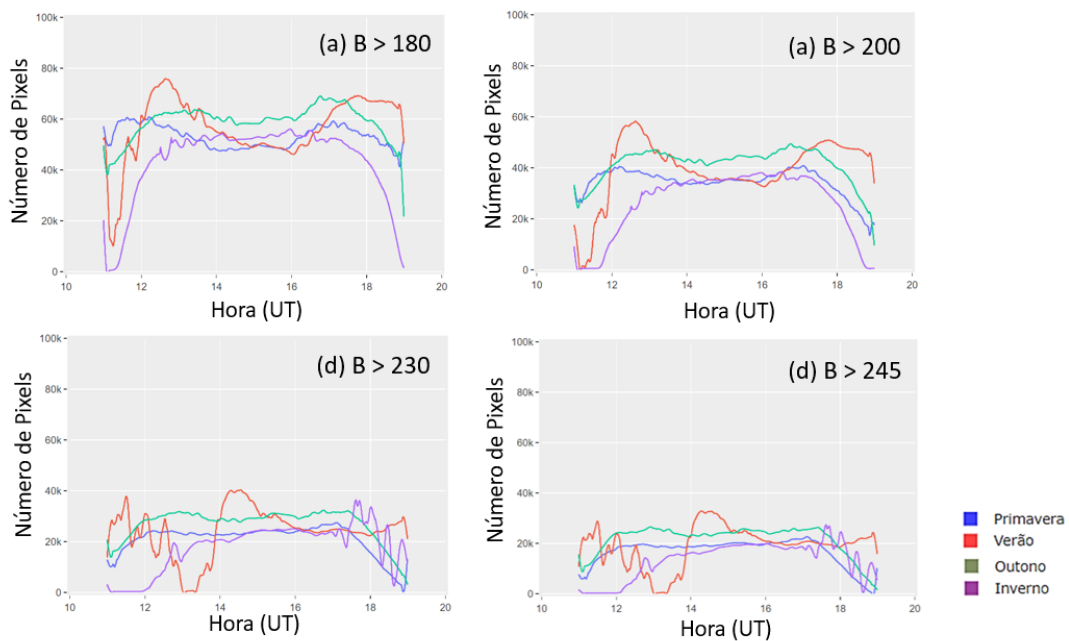
Tal como verificado para imagens sem nuvens aparentes (Figuras 5.16), observou-se a variação do número de pixels coloridos em vermelho nas Figuras 5.17, agora apresentando também alguns pixels das nuvens espalhando o brilho na mesma intensidade dos pixels do disco circunsolar. Tal como para as Figuras

5.16c e 5.16d, na medida em que a curva a ser integrada se tornou mais estreita, houve a redução da área vermelha (Figuras 5.17c e 5.17d).

Para analisar como os limites de integração poderiam influenciar a variação do brilho do céu sem nuvens aparentes ao longo do ano foram contados os pixels de brilho de 1440 imagens de dias sem nuvens, compreendendo quatro dias inteiros (detalhamento na seção 4.3), um para cada estação do ano.

Diferentemente dos perfis sazonais da irradiância ilustrados nas Figuras 5.1c e 5.1d, a variação sazonal do brilho em imagens captadas em condições de céu sem nuvens aparentes não pode ser parametrizada como uma curva de distribuição normal. Como exemplo disto, foram selecionadas as imagens dos dias 01/10/2019 (primavera), 26/12/2019 (verão), 04/04/2020 (outono) e 22/06/2020 (inverno). As Figuras 5.18 ilustram a variação do brilho nestes dias em termos dos parâmetros: a) $B > 180$; b) $B > 200$; c) $B > 230$; e d) $B > 245$. Na Figura 5.18, o tempo (UT) é exibido no eixo x e o número de pixels brilhantes no eixo y, de acordo com o critério de limiarização apontado.

Figura 5.18. Variação sazonal do brilho em imagens captadas em condições de céu sem nuvens aparentes, segundo parâmetros: a) $B > 180$; b) $B > 200$; c) $B > 230$; d) $B > 245$.



Segundo Sakerin et al. (2005), o aumento da espessura óptica dos aerossóis resulta em um maior número de partículas espalhadoras, que, por sua vez, contribuem para o aumento do brilho nas imagens. Porém, o aumento da espessura óptica dos aerossóis também resulta em uma maior extinção da radiação que chega a uma partícula ou volume de espalhamento elementar, favorecendo a redução do brilho. Para os autores, a interação desses dois fatores pode ser a causa da variação do brilho do céu observado nas imagens.

Nas Figuras 5.18, segundo Galileiskii et al. (2015), a variação do brilho do céu não encoberto por nuvens no inverno difere da do verão porque em muitas regiões, por uma combinação de fatores, a atmosfera tende a ser mais estável no inverno, acumulando poluentes e partículas em suspensão, que acabam por favorecer a extinção do brilho das imagens, mantendo-o, de certa forma, constante no meio do dia em todas as estações do ano. Como estações intermediárias, primavera e outono mantêm perfil similar de variação diária do brilho, independentemente do parâmetro de brilho (B) considerado na limiarização dos histogramas.

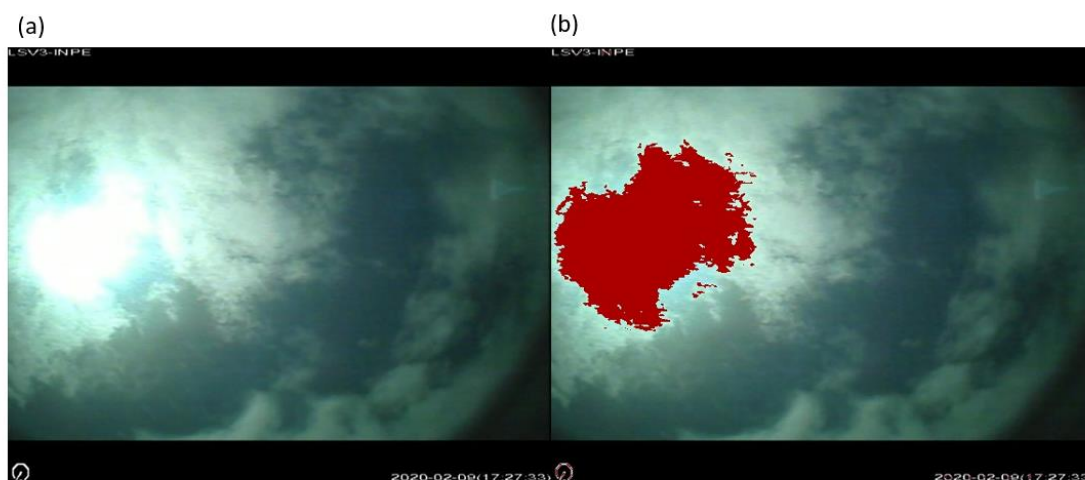
Mesmo podendo ter havido algum efeito adicional na variação do brilho devido às nuvens não detectadas visualmente nos dias selecionados, ao se comparar as Figuras 5.18 (a e b) e 5.18 (c e d), percebe-se, principalmente, em relação aos maiores ASZ, que os parâmetros $B > 230$ e $B > 245$ são mais sensíveis às variações de brilho do que $B > 180$ e $B > 200$.

Assim, após avaliar como os pixels residuais nos histogramas poderiam influenciar o estudo do brilho nos EARS, foi realizada uma análise estatística que comparou os diferentes valores utilizados no processo de limiarização dos pixels brilhantes e, com base nesta avaliação, decidiu-se por prosseguir a investigação da variação do brilho nas imagens (VB) e sua relação com as irradiâncias espectrais medidas nos EARS segundo parâmetro de brilho fundamentado no valor limiar $B > 245$, região com menor quantidade de pixels brilhantes residuais, que integra a totalidade do número de pixels localizados próximos à centralidade dos pixels com maior intensidade de brilho nos histogramas ($B = 250$).

A variação do brilho das nuvens durante os EARS foi avaliada mês a mês, sendo obtidos, com o algoritmo KNN, valores de R^2 superiores a 0,87 e RMSE menores do que 0,11% para as regressões lineares avaliadas como referência.

Em média, a VB% ao longo dos eventos foi de 60,5% ($\pm 11,9\%$) no UV-B (305 nm), 49,7% ($\pm 16,3\%$) no UV-A e 51,1% ($\pm 16,0$) para a PAR. Embora a diferença entre essas médias não tenha se mostrado significativa ao nível de 95% de confiança (ANOVA, p-valor > 0,05), o brilho das nuvens se mostrou bastante variável durante os EARS, apresentando aumentos de até 191%, como no caso do EARS observado em 09/02/2020, às 17h27 (UT), ilustrado na Figura 5.19a e 5.19b, que mostra as imagens lado a lado no momento das intensificações, sendo coloridos de vermelho, na Figura 5.19b, os pixels espalhados com a mesma intensidade de brilho do disco solar.

Figura 5.19. EARS com maior variabilidade de brilho das nuvens no experimento (191%, em 09/02/2020, às 17h27 UT). A Figura mostra o céu com nuvens (a) e a mesma, onde os pixels brilhantes de mesma intensidade do disco solar ($B > 245$) foram tingidos de vermelho (b).



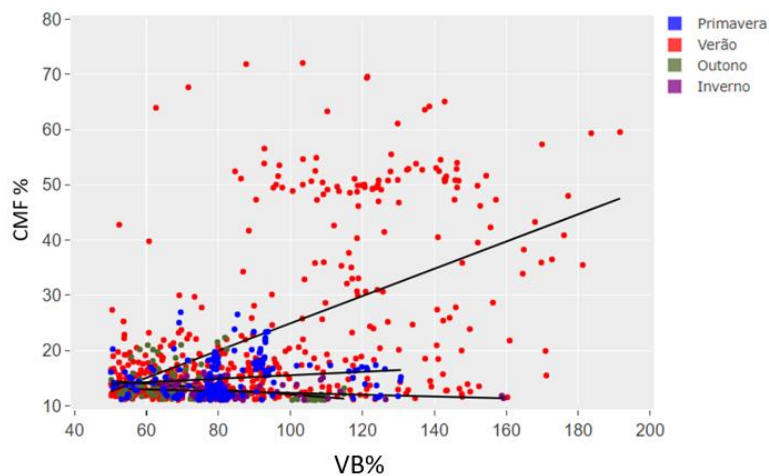
Seguindo o procedimento apresentado na Seção 4.6, procurou-se examinar, por meio de matriz de correlação de Pearson, para cada estação do ano, no momento dos EARS, a relação entre as irradiâncias espectrais, o CMF, a VB, o número de pixels brilhantes das nuvens (“NPixels”) e as transformações matemáticas aplicadas sobre VB e NPixels, apresentadas no Apêndice C.

Em princípio, não foi possível identificar qualquer relação direta entre o CMF ou NPixels e a VB das nuvens em EARS no UV-B (305 nm). A correlação mais forte foi observada para o CMF no verão (r de Pearson = 0,539), podendo-se também destacar a correlação negativa entre essas variáveis no outono (r de Pearson = -0,427). A correlação entre as demais variáveis se mostrou menor do que CMF e VB, sendo que durante eventos em 305 nm, dentro das estações, não se observou diferença estatística significativa entre a irradiância medida, o CMF e as variáveis de brilho (VB, NPixels e suas transformações matemáticas) segundo teste t pareado, a 95% de confiança (p -valor = 0,000), tampouco sendo observadas diferenças estatísticas entre as estações do ano (Teste de Tukey, 95% de confiança).

A partir da análise de correlação de Pearson, identificou-se que o CMF apresenta correlação positiva com VB durante o verão e negativa nas demais estações, indicando uma possível relação linear entre as variáveis durante o ano. No entanto, ao testar a hipótese de linearidade, CMF versus VB, obteve-se R^2 de 0,29 para o verão e de 0,03 para as demais estações do ano, fazendo com que a hipótese inicial fosse rejeitada.

A Figura 5.20 mostra a primeira tentativa de correlação linear entre CMF e VB durante EARS no UV-B (305 nm) ao longo do ano. As retas indicam o ajuste linear aplicada à cada estação.

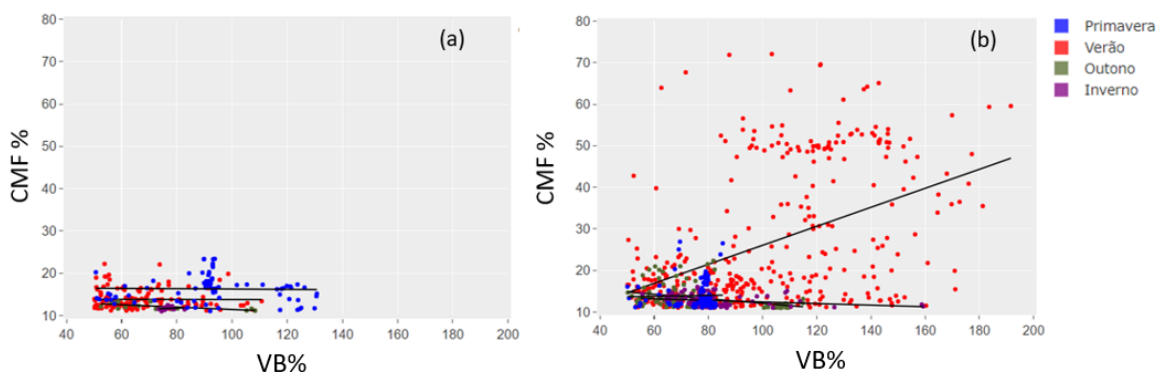
Figura 5.20. Correlação linear entre CMF% e VB% em EARS no UV-B (305 nm) ao longo do ano. As retas indicam o ajuste linear aplicada à cada estação do ano.



De acordo com a Figura 5.20, ao longo de todo o ano, mas, principalmente, no verão, observou-se uma ampla dispersão de VB durante grande parte dos EARS em 305 nm, o que dificultou a obtenção de coeficientes (de correlação e de determinação) mais fortes entre as variáveis CMF e VB durante os eventos.

Ao segmentar essa análise em ASZ, foi observado que a morfologia das nuvens baixas e de média altitude, predominantes em intensificações no UV-B (305 nm) em ASZ < 40° (Figura 5.20a), promove grande variação do brilho para uma mesma faixa de amplificação (CMF < 20%) ao longo de todo o ano (Figura 5.21a). Por outro lado, a Figura 5.21b, que mostra o resultado para EARS em ASZ > 40°, reforça a hipótese de possível linearidade entre as variáveis CMF e VB durante o fenômeno. Porém, tal como à avaliação anterior, a correlação entre CMF e VB apresenta valores inexpressivos de R², mesmo quando investigada no contexto da posição angular das nuvens.

Figura 5.21. Correlação entre CMF% e VB% ao longo das estações do ano em EARS em 305 nm: a) em ASZ < 40°; b) ASZ > 40° (b).



Ainda assim, a partir da Figura 5.21b, é possível inferir a variação média da irradiância espectral em 305 nm por unidade de brilho durante os EARS, o que é uma informação muito relevante para estimar a irradiância espectral em superfície através de imagens. Durante o verão, o CMF causado pelas bordas de Cumulus e Stratocumulus posicionadas em ASZ > 40° intensifica os EARS no

UV-B (305 nm), resultando em um aumento linear da VB. No entanto, nas demais estações, o brilho captado pela câmera diminui.

Segundo Sabburg e Wong (2000), a variação do brilho das nuvens ocorre por consequência da diferença entre os processos de espalhamento nelas: Mie para a luz visível e Rayleigh para a radiação UV-B (SABBURG; WONG, 2000). Embora não tenham abordado diretamente a mudança no perfil da variação do brilho em sua pesquisa, Pfister et al. (2003) apontam que uma possível explicação para esse efeito estaria relacionada à presença de nuvens opticamente finas durante os EARS, capazes de produzir espalhamentos múltiplos da radiação solar.

Sobre esse mecanismo, Sabburg e Long (2004) afirmam que o espalhamento Rayleigh é mais dominante em nuvens compostas por partículas muito pequenas, enquanto Mie é mais proeminente em nuvens formadas por grandes partículas, com maiores gotas de água ou cristais de gelo. Para esses autores, as intensificações na irradiância ocorrem, possivelmente, devido a uma combinação da refração e espalhamento do UV-B quando o disco solar é obscurecido por nuvens opticamente finas, mas ainda visíveis. Nesse processo, a refração da componente direta em nuvens mais finas, seguida do subsequente espalhamento dessa fração refratada pelas bordas de nuvens de baixa e média altitude, podem ser responsáveis, tanto pelo aumento da RUV em superfície quanto pela variação do brilho percebido das nuvens durante EARS em maiores ASZ.

É importante destacar que o brilho captado pelas câmeras segue um processo análogo à absorção de radiação solar pela natureza, onde a taxa de redução da radiação com a espessura do meio material é proporcional à intensidade da radiação incidente (JACOBSON, 2005). Assim, a variabilidade espacial e temporal das nuvens não é o único fator afetando a variabilidade do brilho (VB). Nesse processo, as moléculas e partículas também desempenham um papel crucial, tanto na absorção quanto no espalhamento da luz visível. Os aerossóis atmosféricos, naturais e antropogênicos, têm complexas propriedades ópticas que interferem significativamente na captação do brilho pelos imageadores,

resultando em grande inconstância na VB e altas incertezas nos modelos preditores.

Tal como observado para o UV-B (305 nm), a correlação entre CMF e VB em 380 nm resultou valores positivos para o r de Pearson durante a primavera-verão e negativos no outono-inverno. Porém, em todas as estações do ano, a correlação entre CMF e VB foi diminuída em relação aos eventos em 305 nm, sendo a maior correlação de Pearson observada na primavera (r de Pearson = 0,269). Da mesma maneira, a correlação de Pearson entre o CMF e VB durante intensificações da PAR apresentaram as menores associações entre as três medidas de irradiância, resultado correlações da mesma ordem do UV-A (380 nm) somente no inverno (r de Pearson = -0,224). Tanto no UV-A (380 nm) como na PAR, não se observou diferença estatística significativa entre a irradiância, o CMF e as variáveis de brilho (VB, NPixels e suas transformações matemáticas), segundo teste t pareado, a 95% de confiança (p -valor = 0,000), nem verificadas diferenças estatísticas entre as estações do ano (Teste de Tukey, 95% de confiança).

Inicialmente, esperava-se que, por apresentar maiores quantidades individuais de EARS dentre as medidas espectrais, UV-A (380 nm) e PAR proporcionariam menor dispersão ou mesmo correlações de Pearson mais notáveis com a variação do brilho das nuvens. Ao contrário, uma vez que o coeficiente de extinção e a distribuição espectral das partículas na interface entre a câmera e as nuvens afeta mais o UV-A e PAR do que o UV-B, a variação dos parâmetros atmosféricos e fatores ambientais durante o experimento deve ter exercido uma grande influência na oscilação do brilho observada neste estudo, embora não haja elementos para confirmar isso. A flutuação desses parâmetros aumenta ainda mais a incerteza na modelagem da radiação solar durante os EARS nessas faixas do espectro solar.

Em uma segunda tentativa de avaliar possíveis expressões analíticas que correlacionem a irradiância espectral RUV e PAR com a variação do brilho das nuvens durante os EARS, observou-se cada evento contínuo isoladamente, buscando, dessa vez, relacionar a irradiância medida em superfície diretamente

com a VB nos eventos. Embora não conclusivo, para os três sensores avaliados (305 nm, 380 nm e PAR), foram observadas tendências ascendentes e descendentes para esta relação. No entanto, para o 305 nm, em apenas 11,9% dos casos, o R^2 foi superior a 0,80. Em 380 nm e na PAR, esse percentual foi menor, respectivamente, de 6,9% e 8,9%, fazendo com que essa nova hipótese de linearidade entre as variáveis também fosse rejeitada.

Uma importante questão a ser abordada nesta discussão são as possíveis limitações do mecanismo detector da variação do brilho das imagens desenvolvido neste trabalho.

Em relação à detecção dos EARS, Sabburg e Long (2004) afirmam que o aumento súbito da RUV pode ser observado como uma combinação do aumento real proporcionado pelas nuvens mais os problemas de medição, que podem aumentar a frequência e a magnitude dos casos reais de intensificação. Apesar de tratar da identificação dos EARS, essa afirmação não deve ser descartada na análise da variabilidade do brilho nas imagens.

Na maioria dos casos, os algoritmos de processamento de imagens têm sido desenvolvidos e testados para estimar a cobertura de nuvens, muitos deles, como apresentado na seção 3.3, baseados na limiarização da proporção de intensidades de azul e vermelho em imagens RGB, pelo fato de que as nuvens espalham essas cores de forma semelhante, aparecendo esbranquiçadas ou cinzas nas imagens (KAZANTZIDIS et al., 2012). Heinle et al. (2010), ao substituir a proporção de intensidade pela diferença de intensidade entre o azul e o vermelho, mostraram que, apesar de pequenos erros que ainda persistiam na estimativa da cobertura total de nuvens, o limiar da diferença supera os métodos baseados na razão.

Argumentando que os pixels das nuvens são caracterizados por uma alta refletância, Martins et al. (2003) e Souza-Echer et al. (2006) (apud KAZANTZIDIS et al., 2012) propuseram um método para a estimativa da cobertura de nuvens baseado na transformação da imagem de RGB para HSI. Entretanto, concluíram que os pixels sem nuvens exibem uma saturação de cores muito alta e são predominantemente azuis durante o dia, com matizes que variam do verde ao

vermelho, dificultando o processo de limiarização. Assim, independentemente do processamento de imagens RGB ou HSI, para todos os modelos supracitados, a determinação de valores de limiarização depende da câmera e do perfil óptico da atmosfera, uma vez que menos aerossóis resultam em uma maior intensidade de azul.

A extração de informações das nuvens por meio da segmentação dos pixels em imagens HSV é um método comumente empregado no processamento de imagens meteorológicas (ROSER; MOOSMANN, 2008; LU et al., 2014) e, partindo das premissas de que não há detalhamento de sua utilização na análise dos pixels brilhantes das nuvens na literatura, sobretudo no estudo dos EARS, e que esta variação compõe parte dos objetivos deste estudo, decidiu-se avaliar o parâmetro brilho a partir desta técnica, que identifica os pixels mais brilhantes do restante da imagem, permitindo a obtenção de máscaras e mapas de pixels capazes de representar, exclusivamente, os pixels das nuvens, possibilitando análises estatísticas deste parâmetro nos eventos.

A segmentação dos pixels brilhantes contempla a identificação e separação de regiões emitindo brilho de mesma intensidade dos pixels do disco solar, e nisso pode ter surgido um primeiro complicador: a determinação do valor limite no processo de limiarização.

Na busca por características informativas do brilho das nuvens, neste trabalho, após avaliações prévias, o número de pixels brilhantes foi segmentado segundo quatro valores limítrofes do parâmetro de brilho em histogramas HSV. Cada valor foi avaliado de modo único e individual, não sendo observada a saturação do brilho nas imagens em nenhum histograma. Porém, Long et al. (2006) afirmam que o uso de um valor limite único no processo de limiarização de imagens pode acarretar problemas na identificação de pixels na região circunsolar, especialmente, em condições de céu com nuvens e alta concentração de aerossóis. Diante dos resultados obtidos, a grande oscilação do brilho observada por ter sido decorrente dessa questão, devendo-se analisar, minuciosamente, outros valores limiares nos histogramas e investigar parâmetros de cor e

iluminância de outros espaços de cor em conjunto com o HSV, obtendo novos recursos para modelar e avaliar a variação do brilho das nuvens nos EARS.

Em um segundo momento, é preciso considerar que o processo de segmentação em si envolve a identificação dos pixels brilhantes do Sol e sua retirada do restante da cena, contabilizando somente os pixels das nuvens. O procedimento de criar máscaras ou métodos para remover os pixels brilhantes do disco solar em imagens HSV é uma tarefa bastante desafiadora, uma vez que a variação da intensidade do brilho solar dificulta o estabelecimento de um limiar fixo para segmentar os pixels brilhantes, exigindo ajustes e adaptações para diferentes imagens.

Além desses pontos, a determinação de um valor de referência para o brilho em um dia nublado talvez desponte como o maior complicador no cálculo da VB, pois a presença de nuvens dificulta a obtenção de uma medida precisa do brilho de referência nas imagens.

Existem modelos físicos e algoritmos que podem fornecer uma estimativa do brilho esperado em condições de céu encoberto. Uma possível alternativa, quando disponível, é a análise de dados históricos, que possibilita a obtenção de médias ou faixa de valores de referência para o brilho em condições de céu nublado. Destaca-se, portanto, que a precisão da VB nessas condições pode ser mais desafiadora em comparação com dias ensolarados, onde o brilho das nuvens é mais facilmente medido nas imagens.

Neste trabalho, seguindo Yang et al. (2015; 2016), os valores de referência para o brilho em um dia nublado foram obtidos a partir de comparações relativas, realizadas por meio do algoritmo KNN. Segundo Yang et al. (2016), diferentes técnicas permitem o alinhamento das imagens com base em pontos de referência ou características comuns, a partir de pontos-chave em ambas as imagens, como bordas ou características distintivas. Com base nessa correspondência, é possível determinar a posição do Sol na imagem com nuvens, considerando a posição do Sol na imagem sem nuvens. No entanto, é importante notar que a comparação relativa entre as imagens pode ser dificultada devido a fatores como perspectiva, mudanças na iluminação e

movimento das nuvens. Diante da grande variabilidade do brilho das nuvens obtida neste trabalho, deve-se realçar a importância desses fatores, avaliando e implementando correções mais apropriadas no algoritmo, de modo a obter resultados mais precisos da posição correspondente do Sol em imagens com nuvens.

Em termos gerais, a alta variabilidade do brilho das nuvens nos EARS, associados às condições atmosféricas, ao método e algoritmos empregados, ou a combinação de ambos, impediu qualquer ponderação ou determinação de expressões analíticas envolvendo CMF e VB ao longo do ano, visto que foram obtidos valores não significativos na correlação entre elas para as diferentes medidas de irradiância, tanto do coeficiente de Pearson como de R^2 . Porém, ainda que os resultados não tenham revelado significância estatística para as relações investigadas, o estudo do brilho das nuvens apresentado neste trabalho contribui com dados e técnicas de processamento de imagens, até então, não detalhados em outras avaliações para latitudes médias, considerando as diferentes linhas e banda espectral avaliadas, desenvolvimentos que se tornam relevantes na condução de futuros trabalhos envolvendo RUV, PAR e banda visível nessas localidades.

5.5 A contribuição dos EARS para o índice IUV e PAR

Após apresentar e discutir diferentes aspectos associados aos EARS na região do ultravioleta (UV) e PAR, em SJC, procura-se determinar, para cada sensor, a contribuição da irradiância espectral extra em superfície decorrente dos EARS.

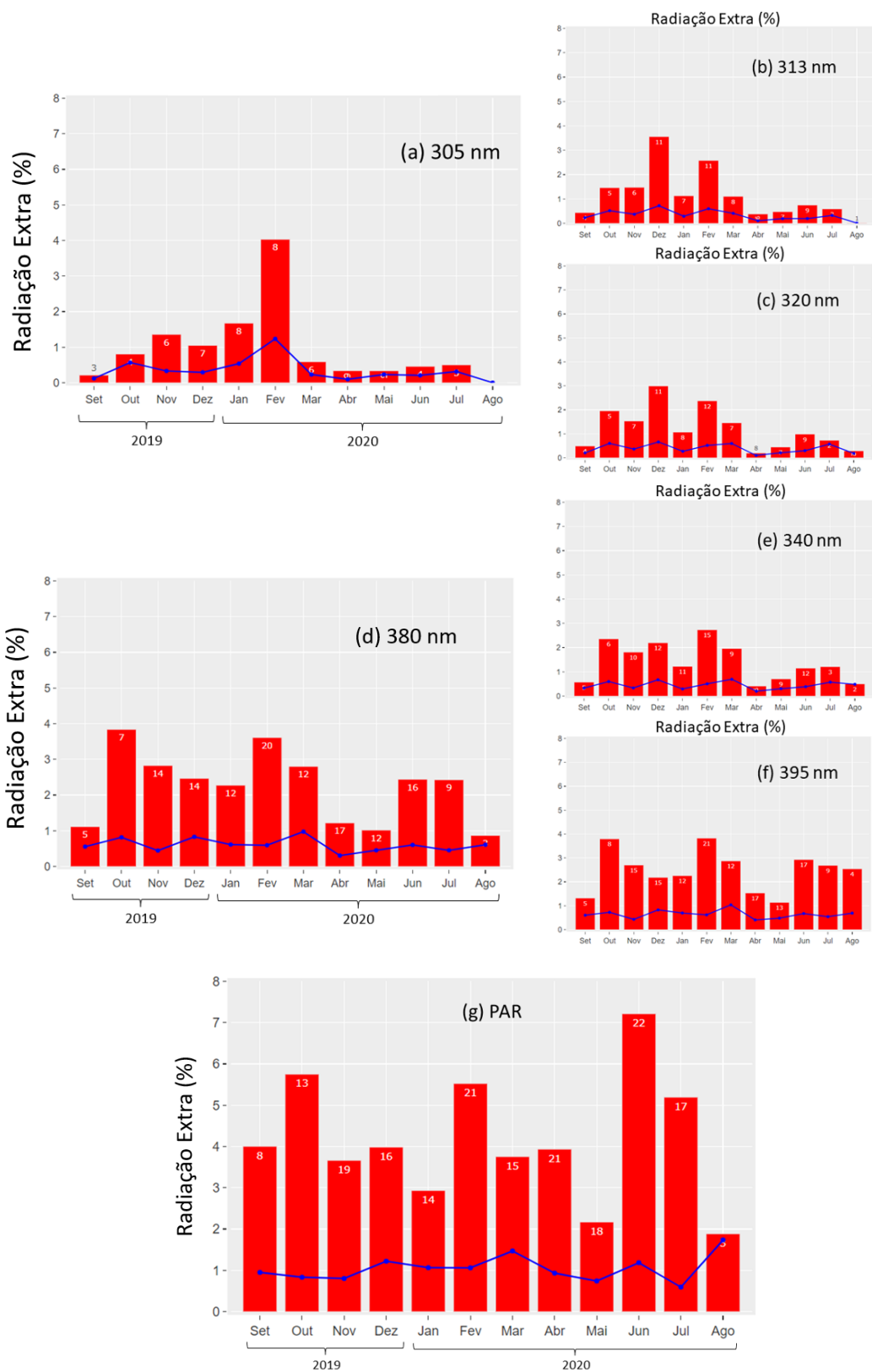
As Figuras 5.22 caracterizam a contribuição percentual da irradiância extra em superfície, para cada sensor, em termos de médias mensais. As Figuras 5.22 (a, b e c) são referentes às intensificações no UV-B (305 nm, 313 nm e 320 nm), as Figuras 5.22 (d, e e f) exibem os resultados para o UV-A (380 nm, 340 nm e 395 nm) e a Figura 5.30g trata da PAR. Nelas, a linha azul indica a média mensal da contribuição, obtidas a partir da dose diária de radiação medida em superfície, e as barras em vermelho mostram o maior valor observado no mês. Os números nas barras indicam o número de EARS dentro do mês.

Diferentes autores relatam que os EARS são maiores para a radiação solar medida em maiores comprimentos de onda do que para a radiação mais curta, ponderada por comprimento de ondas, afirmando que os aumentos são maiores para a PAR, seguidas do UV-A e depois pelo UV-B (MATEO et al., 2011; PIEDEHIERRO et al., 2014; MCKENZIE et al., 2017).

O aumento médio promovido na PAR foi de 1,04% ($\pm 0,32\%$) ao mês, com a maior contribuição em relação à dose média mensal da irradiância medida em junho (7,20%), decorrente de 22 eventos. Na sequência, outubro (13 eventos) e fevereiro (21 eventos) apresentaram as maiores contribuições, ambas entre 5% e 6%. Para o UV-A (380 nm), a contribuição percentual média mensal foi de 0,60% ($\pm 0,18\%$), com maior radiação extra em outubro (3,81%, 7 eventos) e fevereiro (3,63%, 20 eventos), enquanto para o UV-B (305 nm) foi de 0,34% ($\pm 0,32\%$), com maior aumento captado no verão, em fevereiro (4,0 %, 8 eventos). Para todos os sensores (Figuras 5.22), a diferença entre as médias mensais não foi significativa ao nível de 95% de confiança (ANOVA, p-valor > 0,05).

Apesar da contribuição dos eventos parecer pequena em termos mensais, deve-se observar que: 1) as nuvens modulam a irradiância UV em superfície em curto período; 2) grande parte das amplificações ocorrem em intervalos contínuos de até 5 minutos. Logo, ao longo do mês, a radiação extra pode até ser diluída, mas a exposição contínua (e descuidada) à RUV, certamente, pode potencializar malefícios a partir da energia extra decorrente dos EARS.

Figura 5.22. Radiação espectral extra (%) dos EARS em superfície. Valores máximos apresentados nas barras e médios representados nas linhas. Os números nas barras indicam os eventos dentro do mês.



Como exemplo, na Tabela 5.2, que complementa a Tabela 5.1 (Seção 5.3), pode-se observar a radiação extra durante os maiores intervalos contínuos de EARS. Nela, os dados são apresentados em relação aos sensores de medidas espectrais (λ , nm), data e intervalo contínuo das medidas (t, minutos), à soma da irradiância espectral medida ao longo do dia (“Irrad”), entre 11h e 19h (UT), à radiação diária extra proveniente dos EARS (“Extra”) e ao aporte extra, calculado somente para os maiores intervalos de ocorrência contínua dos EARS no referido dia.

Tabela 5.2. Radiação extra em superfície obtida para os maiores intervalos contínuos de EARS durante o experimento em SJC.

λ (nm)	Data	t (min)	Irrad ¹ (dia)	Extra ¹ (dia)	Diferença Irrad Extra ¹ (dia)	Extra no intervalo ¹ t(min)	Aporte Extra (%)	Aporte no intervalo (%)
305	09FEV20	25	8,2	2,7	5,5	1,8	49%	32%
313	29OUT19	25	195,2	19,0	176,2	6,9	11%	4%
320	29OUT19	27	311,6	12,1	299,5	39,3	4%	13%
340	29OUT19	27	548,7	22,5	526,1	76,5	4%	15%
380	29OUT19	29	732,2	157,0	575,3	31,3	27%	5%
395	13DEZ19	37	771,6	164,6	607,0	31,2	27%	5%
PAR	13DEZ19	39	208,3	40,8	167,6	8,5	24%	5%

¹PAR em fluxo de fótons ($\mu E s^{-1} cm^{-2}$) e RUV como irradiância espectral ($\mu W cm^{-2} nm^{-1}$).

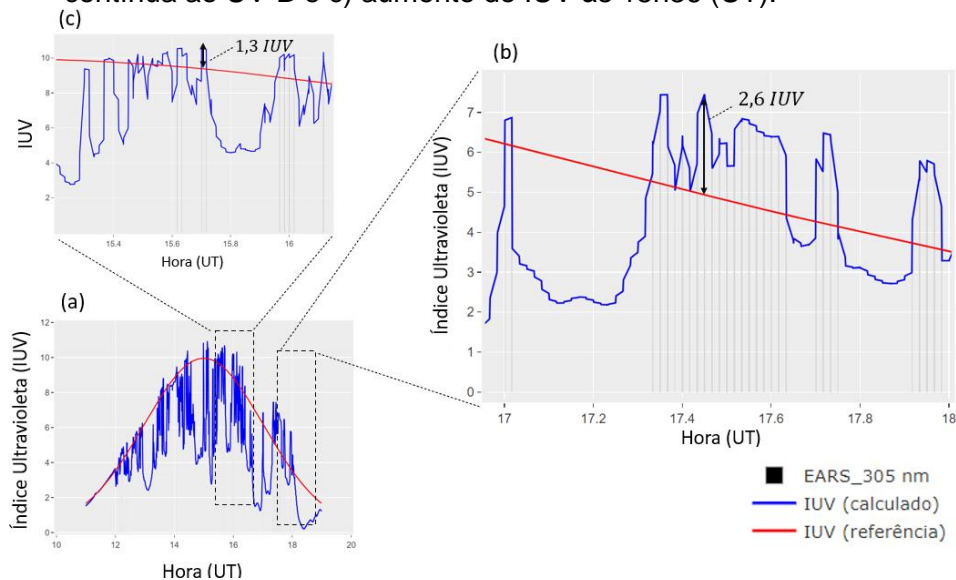
Ao examinar a Tabela 5.2, nota-se que a radiação extra em longos eventos é da ordem de 5%. Porém, conforme discutido na Seção 5.3.1, EARS com longa duração são episódicos, mas, ainda assim, a intensificação da irradiância UV-B em superfície devido à contribuição das nuvens pode incrementar fortemente a dose eritematosa.

Como exemplo, em 09/02/2020, identifica-se que a radiação extra UV-B (305 nm) em superfície, ao longo dos 25 minutos de eventos, incrementou a dose

diária em 32% naquele dia, concentrando, praticamente, 67% da dose diária extra de UV-B (305 nm) neste único evento. Neste dia, a radiação extra no intervalo (coluna “Extra no intervalo”, Tabela 5.2) foi de $1,8 \mu W cm^{-2} nm^{-1}$. Realizada a devida conversão de unidades, obtém-se que a radiação extra foi de $0,018 W m^{-2} nm^{-1}$. Ao se considerar o valor unitário do IUV ($1U = 0,025 W m^{-2}$), somente a contribuição desse EARS no UV-B (305 nm) já seria suficiente para aumentar o índice em quase uma unidade. Porém, o que se nota é que EARS com esta proporção podem promover mudanças do IUV mais pronunciadas do que apenas uma única unidade.

As Figuras 5.23 detalham a variação do IUV no dia 09/02/2020: a variação do IUV ao longo do dia é apresentada na Figura 5.23a; a variação do IUV durante a intensificação contínua de 25 minutos do UV-B (305 nm), que ocorreu entre 17h20 e 17h45 (UT), é apresentada na Figura 5.23b. A Figura 5.23c mostra uma intensificação mais curta, observada próximo do meio-dia local, às 15h36 (UT).

Figura 5.23. Variação do IUV em 09/02/2020 (a): em azul, o IUV calculado, em vermelho, IUV de referência; b) variação durante o período mais longo de exposição contínua ao UV-B e c) aumento do IUV às 15h36 (UT).



Ao longo dos 25 minutos de intensificação do UV-B (305 nm) em 09/02/2020, o IUV foi alterado em até 2,6 unidades (Figura 5.23b), passando de moderado a alto em poucos instantes, um resultado que se revela ainda mais preocupante

considerando que a ocorrência desse evento foi às 17h20 (UT), ou seja, 14h20 no horário local. Potencialmente, percebe-se que EARS próximos do pico de radiação solar, em torno do meio-dia local, ainda que por intervalos bastante reduzidos, podem modificar o IUV para condições mais críticas em um curto espaço de tempo (Figura 5.23c), aumentando os riscos e efeitos negativos associados à exposição excessiva e descuidada à RUV, principalmente, na primavera e no verão.

Essa informação mostra-se ainda mais relevante ao se constatar que, no Brasil, somente em 2021, foram relatados cerca de 170 mil casos de câncer de pele (INCA, 2021), atribuídos, principalmente, às atividades ao ar livre, seja por trabalho ou lazer. Verifica-se que, virtualmente, os EARS podem agravar essa situação, especialmente na região Centro-Sul do país, onde doses máximas diárias de irradiância eritematosa são registradas durante o verão (CORRÊA, 2015).

Evidentemente, como afirmado na Seção 2.3.7, a resposta eritematógena da pele não depende apenas da intensidade da radiação solar, mas do fototipo dos indivíduos, do tempo de exposição ao ar livre, do uso de protetores solares e de roupas com proteção UV. Sendo assim, a população deve ser informada de que nuvens próximas ao Sol podem intensificar significativamente o IUV em curtos intervalos de tempo e a máxima proteção UV deve ser mantida durante todo o ano em latitudes médias, mesmo em condições de céu encoberto.

Nesse cenário, a compreensão dos mecanismos e efeitos dos EARS mostra-se instigante, evidenciando a importância do estudo das intensificações RUV e PAR em regiões tropicais, uma vez que a ocorrência de eventos mais intensos e de longa duração pode impactar o meio ambiente e agravar os dados de saúde nessas localidades.

Notadamente, avaliações de longo prazo da irradiância UV em superfície, assim como o estudo dos EARS, despontam como uma tarefa difícil, porque a RUV está sujeita a variações climáticas e sazonais, demandando um monitoramento sensível e contínuo que pode ser dispendioso em termos de recursos financeiros e humanos. No presente trabalho, as medidas foram limitadas a um ano de

medidas, o que impossibilitou a avaliação interanual dos comprimentos de onda UV e banda PAR. A manutenção de instrumentos de medição ao longo de anos, com calibração precisa e coleta de dados de alta qualidade, bem como o armazenamento e gerenciamento adequado desses dados, representam desafios adicionais. Adaptações à evolução da tecnologia e a garantia de dados confiáveis são obstáculos que devem ser superados para realizar avaliações de longo prazo e estudos da RUV e dos EARS de maneira eficaz e precisa.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a contribuição das nuvens para EARS em uma região de latitude tropical, com base em medidas de irradiância espectral em seis comprimentos de onda UV e banda PAR obtidas em superfície e imagens do céu, na cidade de São José dos Campos, SP, no período de setembro de 2019 a agosto de 2020.

Considerando o grande número de dados de radiação e imagens a serem tratados neste trabalho, foram desenvolvidas rotinas em linguagem Python, que agilizaram o processo de síntese espectral e tratamento das imagens.

A partir dos dados de irradiância obtidos com dois radiômetros GUV, foi determinado o fator de modificação das nuvens sobre a irradiância espectral (CMF), sendo os EARS detectados quando o CMF apresentou diferenças maiores que dois erros padrão entre a irradiância medida em condições de céus com nuvens e a irradiância de referência. A avaliação da ocorrência dos EARS nos seis comprimentos de RUV (305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm e 395 nm) e PAR evidenciou o aumento do número de eventos com o aumento do comprimento de onda, onde, dos 1.735 EARS observados, eventos no UV-B (305nm) representam 6,0% do total, enquanto no UV-A (380 nm) e banda PAR, representam 17,5% e 30,5%, respectivamente.

A distribuição sazonal dos EARS revelou grande dispersão tanto no número de ocorrências como na radiação extra, se mostrando mais acentuada na primavera e no verão do que no outono e no inverno, e mais proeminente na região do UV-A e PAR do que no UV-B. Corroborando outras pesquisas, observou-se que há 99,6% de chances do fenômeno ser observado com duração de até 5 minutos contínuos, sendo que em média 72% dos eventos ocorreram com esta duração.

Os EARS foram detectados em condição de céu parcialmente nublado, em ASZ de até 70°. Embora a composição da cobertura de nuvens durante o experimento tenha se mostrado bastante diversificada, identificou-se que intensificações em ASZ de 30° a 35° na região de SJC estão relacionados, principalmente, a nuvens Cumulus e Stratocumulus, mas também com nuvens médias, do tipo Altocumulus e Altostratus, todas capazes de gerar intensificações de até 20%

em relação às esperadas para o dia. Para ASZ de 45° a 55°, em sua maioria, os EARS são associados a Altostratus e Cirrus, nuvens opticamente finas, muito características da região do experimento durante todo o ano. Essas nuvens também promovem intensificações até 20% em relação as irradiâncias de referência ao longo de todo o ano. Entretanto, no verão, para ASZ de 45° a 55°, ao produzir espalhamentos múltiplos da radiação solar, Altostratus e Cirrus, quando associadas a Cumulus e Stratocumulus, são capazes de gerar aumentos de curta duração, porém mais intensos, podendo chegar a 70% no caso do UV-B (305 nm).

Para investigar a variação do brilho visível das nuvens durante os eventos foram utilizadas imagens obtidas de um imageador LSV. A partir dessas imagens quantificou-se, de forma inédita, por meio de histograma do canal de brilho do espaço de cores HSV, o número de pixels brilhantes das nuvens.

Embora não se tenha identificado correlação estatística entre a irradiância espectral medida em superfície e a variação do brilho das nuvens durante os EARS em nenhum dos comprimentos de onda avaliado, considerou-se que o monitoramento das condições atmosféricas é de extrema importância no estudo do brilho das intensificações da RUV e PAR. Além disso, o melhoramento de algoritmos preditores da irradiância espectral e do brilho de referência em condições de céu com nuvens é de suma importância para os estudos dos eventos, uma vez que esses algoritmos têm como objetivo estimar com precisão a radiação extra que atinge a superfície em diferentes momentos do dia, fornecendo informações valiosas para uma variedade de aplicações.

Para cada sensor, determinou-se a irradiância espectral extra em superfície decorrente dos eventos, observando-se que a contribuição percentual média mensal foi de 1,04% ($\pm 0,32\%$) para a PAR, 0,60% ($\pm 0,18\%$) para o UV-A (380 nm) e 0,34% ($\pm 0,32\%$) no UV-B (305 nm). Mesmo que a contribuição mensal dos eventos pareça reduzida, deve-se considerar que o papel modulador das nuvens sobre a irradiância em superfície é de curto período, e que, apesar de grande parte dos EARS durarem até 5 minutos, a variação súbita do IUV,

seguramente, pode potencializar os efeitos da radiação solar na pele humana e ecossistemas ao longo do tempo.

Considera-se que a obtenção de medidas de alta precisão e de longo prazo é fundamental para realizar estudos sobre o fluxo extra de RUV e PAR devido aos EARS, bem como refinar os modelos de irradiância espectral, caracterizando a variabilidade temporal e espacial da radiação solar em superfície. A manutenção dessas medidas assegura dados confiáveis sobre como a radiação solar se distribui na superfície e contribui para uma melhor compreensão dos eventos de intensificação e de seus impactos na biosfera.

7 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

- i. A intercalibração dos radiômetros GUV-2511. Uma vez que os instrumentos estavam em seu primeiro uso, com certificado de calibração óptica dos radiômetros emitido pelo fabricante válido por 01 (um) ano, deve-se realizar a calibração comparativa das medidas junto a um outro radiômetro. Tal calibração é realizada a partir de medidas simultâneas, em escala de horas a dias, sob condições meteorológicas favoráveis.
- ii. A expansão do período de observações. A continuidade das medidas de irradiância espectral possibilitará avaliações interanuais dos comprimentos de onda UV e banda PAR.
- iii. O desenvolvimento de classificadores de imagens a partir de redes neurais convolucionais daria maior celeridade e dinamismo ao processamento e análise de imagens digitais nos estudos da RUV em superfície.
- iv. Estudos envolvendo a obtenção de parâmetros atmosféricos em conjunto com dados de EARS para uma melhor compreensão dos mecanismos de sua geração e propagação até a superfície.
- v. Melhoramentos do sistema de captação e segmentação de imagens do céu. Assim como o refinamento de técnicas computacionais, a utilização de câmeras com maior resolução e poder de ajuste de brilho poderá contribuir positivamente para melhorias da definição dos pixels brilhantes nas imagens. Da mesma forma que a otimização dos mecanismos de segmentação de imagens do céu permitirá melhorias na identificação e análise de diferentes tipos e cobertura de nuvens, formações atmosféricas e outros padrões meteorológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, S. **Support vector machines for pattern classification**. London: Springer, 2005. v. 2. 358p.
- ALVIM, D. S.; PENDHARKAR, J.; CAPISTRANO, V. B.; FRASSONI, A.; ENORÉ, D. P.; DE MENEZES NETO, O. L.; FIGUEROA, S. N. Aerosol distribution over Brazil with ECHAM-HAM and CAM5-MAM3 simulations and its comparison with ground-based and satellite data. **Atmospheric Pollution Research**, v. 8, n. 4, p. 718-728, 2017.
- AN, J. L.; WANG, Y. S.; LI, X.; SUN, Y.; SHEN, S. H. Relationship between surface UV radiation and air pollution in Beijing. **Environmental Science**, v. 29, n. 4, p. 1054–1058, 2008.
- ANDRADE, R. C.; TIBA, C.; DA SILVA, T. C. Suncloud-e: software para a localização do efeito lente produzido por nuvens na irradiação solar global. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, n. 2, p. 95-101, 2015.
- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D. J. E. S. R. Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. the nature and sources of cloud-active aerosols. **Earth-Science Reviews**, v. 89, n. 1/2, p. 13-41, 2008.
- ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon. **Science**, v. 303, p. 1337-1342, 2004.
- ANDREWS, D. G. **An introduction to atmospheric physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 249p.
- ANTON, M.; CAZORIA, A.; MATEOS, D.; COSTA, M. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. Sensitivity of UV erythemal radiation to total ozone changes under different sky conditions: results for Granada, Spain. **Photochemistry and Photobiology**, v. 92, n. 1, p. 215–219, 2016.
- ANTON, M.; SORRIBAS, M.; BENNOUNA, Y.; VILAPLANA, J. M.; CACHORRO, V. E.; GROBNER, J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. Efeitos de um evento extremo de poeira do deserto na irradiância ultravioleta espectral em El Arenosillo (Espanha). **Journal of Geophysical Research D**, p. 117-125, 2012.
- BAIS, A. F.; BERNHARD, G.; MCKENZIE, R. L.; AUCAMP, P. J.; YOUNG, P. J.; ILYAS, M.; DEUSHI, M. Ozone–climate interactions and effects on solar ultraviolet radiation. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 18, p. 602-640, 2019.

BAIS, A. F.; LUCAS, R. M.; BORNMAN, J. F.; WILLIAMSON, C. E.; SULZBERGER, B.; AUSTIN, A. T. AUCAMP, P. J. Environmental effects of ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2017. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 17, n. 2, p. 127-179, 2018.

BALAZS, A.; LISKI, E.; TUOMINEN, S.; KANGAS, A. Comparison of neural networks and k-Nearest Neighbors methods in forest stand variable estimation using airborne laser data. **ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 4, p. 100012, 2022.

BARNES, P. W.; WILLIAMSON, C. E.; LUCAS, R. M.; ROBINSON, S. A.; MADRONICH, S.; PAUL, N. D.; ANDRADY, A. L. Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. **Nature Sustainability**, v. 2, p. 569-579, 2019.

BELAN, B. D.; IVLEV, G. A.; SKLYADNEVA, T. K. The relationship between ultraviolet radiation and meteorological factors and atmospheric turbidity: Part I. role of total ozone content, clouds, and aerosol optical depth. **Atmospheric and Oceanic Optics**, v. 33, n. 6, p. 638-644, 2020.

BENER, P. **Investigation on the influence of clouds on the ultraviolet sky radiation**. [S.l.]: APPS, 1964.

BIOSPHERICAL. **GUV “Diffey Dose” calculations: application note**. California: Biospherical Instruments, 2013.

BIOSPHERICAL. **GUV data processing and quality control procedures, C. version 13: manual**. California: Biospherical Instruments, 1998. 66p.

BISONG, E. **Building machine learning and deep learning models on google cloud platform: a comprehensive guide for beginners**. EUA: Apress, 2019. 709p.

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

BOCZKO, R. **Conceitos de astronomia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. 429p.

BOHREN, C. F. E.; HUFFMAN, D. R. **Absorption and scattering of light by small particles**. EUA: Wiley, 1983. 504p.

BOND, T.C.; DOHERTY, S.J.; FAHEY, D.W.; FORSTER, P.M.; BERNTSEN, T.; DEANGELO, B.J.; FLANNER, M.G.; GHAN, S.; KÄRCHER, B.; KOCH, D.; KINNE, S.; KONDO, Y.; QUINN, P.K.; SAROFIM, M.C.; SCHULTZ, M.G.; SCHULZ, M.; VENKATARAMAN, C.; ZHANG, H.; ZHANG, S.; BELLOUIN, N.;

GUTTIKUNDA, S. K.; HOPKE, P.K.; JACOBSON, M.Z.; KAISER, J.W.; KLIMONT, Z.; LOHMANN, U.; SCHWARZ, J.P.; SHINDELL, D.; STORELVMO, T.; WARREN, S.G.; ZENDER, C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 11, p. 5380-5552, 2013.

BORNMAN, J. F.; BARNES, P. W.; ROBSON, T. M.; ROBINSON, S. A.; JANSEN, M. A.; BALLARE, C. L.; FLINT, S. D. Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 18, n. 3, p. 681-716, 2019.

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library**. EUA: O'Reilly Media, 2008. 573p.

BREIMAN, L. **Classification and regression trees**. USA: CRC Press, 2017. 358p.

BURGER, W.; BURGE, M.J. Color images. In: _____ (Ed.). **Principles of digital image processing: undergraduate topics in computer science**. Reino Unido: Springer, 2009.

BURGGRAAFF, O.; SCHMIDT, N.; ZAMORANO, J.; PAULY, K.; PASCUAL, S.; TAPIA, C.; SNIK, F. Standardized spectral and radiometric calibration of consumer cameras. **Optics Express**, v. 27, n. 14, p. 19075-19101, 2019.

CALBÓ, J.; GONZÁLEZ, J. A.; BADOSA, J.; MCKENZIE, R.; LILEY, B. How large and how long are UV and total radiation enhancements? In: AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, 2017. **Proceedings...** 2017. p. 1-5.

CASTILLEJO-CUBEROS, A.; ESCOBAR, R. Detection and characterization of cloud enhancement events for solar irradiance using a model-independent, statistically-driven approach. **Solar Energy**, v. 209, p. 547-567, 2020.

CEDE, A.; BLUMTHALER, M.; LUCCINI, E.; PIACENTINI, R. D.; NUÑEZ, L. Effects of clouds on erythemal and total irradiance as derived from data of the Argentine Network. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 24, p. 76-81, 2002.

CHAVES-GONZÁLEZ, J. M.; VEGA-RODRÍGUEZ, M. A.; GÓMEZ-PULIDO, J. A.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. Detecting skin in face recognition systems: a colour spaces study. **Digital Signal Processing**, v. 20, n. 3, p. 806-823, 2010.

CHEBANYUK, E.; MARKOV, K. An approach to class diagrams verification according to SOLID design principles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODEL-DRIVEN ENGINEERING AND SOFTWARE DEVELOPMENT (MODELSWARD), 4., 2016. **Proceedings...** 2016. p. 435-441.

CHEN, W.; SHI, Y. Q.; XUAN, G. Identifying computer graphics using HSV color model and statistical moments of characteristic functions. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA AND EXPO, 2007. **Proceedings...** 2007. p. 1123-1126.

CHEW, W. C. Lectures on electromagnetic field theory. In: _____ (Ed.). **ECE 604 lecture notes: electromagnetic field theory**. USA: Purdue University Press, 2020. 591p.

COARITI, J. R. **Características da radiação ultravioleta solar e seus efeitos na saúde humana nas cidades de La Paz–Bolívia e Natal–Brasil**. 2017. 110p. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas.

COLDEWEY-EGBERS, M.; LOYOLA, D. G.; LEROT, C.; VAN ROOZENDAEL M. Global, regional and seasonal analysis of total ozone trends derived from the 1995–2020 by GTO-ECV climate data record. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 22, n. 10, p. 6861-6878, 2022.

CORDERO, R. R.; SECKMEYER, G.; DAMIANI, A.; RIECHELMANN, S.; RAYAS, J.; LABBE, F.; LAROZE, D. The world's highest levels of surface UV. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 13, n. 1, p. 70-81, 2014.

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

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Unicamp, 1999. 189p.

DAVIS, Z. Y.; MCLAREN, R. Recommendations for spectral fitting of SO₂ from miniature multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) measurements. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 13, n. 7, p. 3993-4008, 2020.

DE ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. G. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, n. 7, p.797-800, 1989.

DE BOCK, V. H.; DE BACKER, R.; VAN MALDEREN, A.; MANGOLD A.; DELCLO, O., Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 22, p. 12251–12270, 2014.

DEIRMENDJIAN, D. **Electromagnetic scattering on spherical polydispersions**. EUA: Elsevier, 1969. 318p.

DENG, X.; ZHOU, X.; TIE, X.; WU, D.; LI, F.; TAN, H.; DENG, T. Attenuation of ultraviolet radiation reaching the surface due to atmospheric aerosols in Guangzhou. **Chinese Science Bulletin**, v. 57, n. 21, p. 2759-2766, 2012.

DEV, S.; SAVOY, F. M.; LEE, Y. H.; WINKLER, S. Estimating solar irradiance using sky imagers. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 12, n. 10, p. 5417-5429, 2019.

DIFFEY, B. A simple technique for estimating daily ambient erythemal ultraviolet from the ultraviolet index. **Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine**, v. 25, p. 227-229, 2009.

DIFFEY, B. Sources and measurement of ultraviolet radiation. **Methods**, v. 28, n. 1, p. 4-13, 2002.

ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J. The beer's law applied to the earth's atmosphere. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p. 276-283, 2001.

ECKSTEIN, E.; PERNER, D.; BRÜHL, C.; TRAUTMANN, T. A new actinic flux 4p-spectroradiometer: instrument design and application to clear sky and broken cloud conditions. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 3, n. 6, p. 1965-1979, 2003.

EHHALT, D.; ZELLNER, R.; GEORGII, H. W.; WARNECK, P.; ZELLNER, R.; MENTEL, T. F.; SAUSEN, R. **Global aspects of atmospheric chemistry**. Reino Unido: Springer, 1999. 339p.

ERICKSON III, D. J.; SULZBERGER, B.; ZEPP, R. G.; AUSTIN, A. T. Effects of stratospheric ozone depletion, solar UV radiation, and climate change on biogeochemical cycling: interactions and feedbacks. **Photochemical Photobiological Sciences**, v. 14, n. 1, p. 127-148, 2015.

ESTUPINAN, J. G.; RAMAN, S.; CRESCENTI, G. H.; STREICHER, J. J.; BARNARD, W. F. Effects of clouds and haze on UV-B radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 16-807, 1996.

FEISTER, U.; CABROL, N.; HÄDER, D. UV irradiance enhancements by scattering of solar radiation from clouds. **Atmosphere**, v. 6, n. 8, p. 1211-1228, 2015.

FERREIRA, F. L.; PEREIRA, E. B. AND LABAKI, L. C. Land surface temperature associated factors in urban areas: local climate zones and spectral characteristics. **Ambiente e Construção**, v. 21, p. 237-26, 2020.

FINLAYSON-PITTS, B. J.; PITTS JUNIOR, J. N. **Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications**. Reino Unido: Elsevier, 1999. 969p.

FITZPATRICK, T. B. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. **Archives of Dermatology**, v.124, n. 6, p. 869-871, 1988.

FOUNTOULAKIS, A. F.; BAIS, K.; FRAGKOS, C.; MELETI, K.; TOURPALI, M.; ZEMPILA, M. Short- and long-term variability of spectral solar UV irradiance at Thessaloniki, Greece: effects of changes in aerosols, total ozone and clouds," **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 4, p. 2493–2505, 2016.

FOUNTOULAKIS, I.; PAPACHRISTOPOULOU, K.; PROESTAKIS, E.; AMIRIDIS, V.; KONTOES, C.; KAZADZIS, S. Effect of aerosol vertical distribution on the modeling of solar radiation. **Remote Sensing**, v. 14, n. 5, p. 1143-1148, 2022.

FRÖLICH, J.; GRIESEMER, M.; SCHLEIN, B. Asymptotic completeness for Rayleigh scattering. **Annales Henri Poincaré**, v. 3, n. 1, p. 107-170, 2002.

GALILEISKII, V. P.; ELIZAROV, A. I.; KOKAREV, D. V.; MOROZOV, A. M. The formation of the sky brightness with horizon position of the sun. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ATMOSPHERIC AND OCEAN OPTICS: ATMOSPHERIC PHYSICS, 21., 2015. **Proceedings...** 2015. p. 96803L.

GHOSH, S. N. Effects of solar UV, EUV and X-ray radiation on the upper atmosphere. In: _____. **The neutral upper atmosphere**. Reino Unido: Springer, 2002. p. 61-82.

GIES, P.; KLEKOCIUK, A.; TULLY, M.; HENDERSON, S.; JAVORNICZKY, J.; KING, K.; LEMUS-DESCHAMPS, L.; MAKIN, J. Low ozone over Australia in August 2011 and its impact on solar ultraviolet radiation levels. **Photochemical and Photobiological**, v. 89, n. 4, p. 984–994, 2013.

GONZALEZ, R. **Digital image processing using MATLAB**. India: McGraw Hill, 2010. 624p.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Processamento digital de imagens**. 3.ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2009. 612p.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**. USA: MIT Press, 2016. 800p.

GREGORY, C. **UV Index defined: what it means and how it's measured: weather glossary**. 2020. Disponível em:

<https://www.rochesterfirst.com/weather/weather-glossary/uv-index-defined-what-it-means-and-how-its-measured/>. Acesso em: maio 2023.

HAMUDA, E.; MC GINLEY, B.; GLAVIN, M.; JONES, E. Automatic crop detection under field conditions using the HSV colour space and morphological operations. **Computers & Electronics in Agriculture**, v. 133, p. 97-107, 2016.

HASENBALG, M.; KUHN, P.; WILBERT, S.; NOURI, B. KAZANTZIDIS, A. Benchmarking of six cloud segmentation algorithms for ground-based all-sky imagers, **Solar Energy**, v. 201, p. 596-614, 2020.

HATFIELD, J. L.; CARLSON, R. E. Photosynthetically active radiation, CO₂ uptake, and stomatal diffusive resistance profiles within soybean canopies. **Agronomy Journal**, v. 70, n. 4, p. 592-596, 1978.

HAWE, E.; FITZPATRICK, C.; CHAMBERS, P.; LEWIS, E. An investigation into the use of an integrating sphere as a gas absorption cell. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 9, n. 6, S12, 2007.

HEINLE, A.; MACKE, A.; SRIVASTAV, A. Automatic cloud classification of whole sky images. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 3, p. 557–567, 2010.

HERGERT, W.; WRIEDT, T. **The Mie theory: basics and applications**. Reino Unido: Springer, 2012. 259p.

HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles**. EUA: John Wiley & Sons, 1999. 504p.

HYYPPÄ, J.; YU, X.; HYYPPÄ, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; VAAJA, M.; KOSKINEN, J.; ALHO, P. Advances in forest inventory using airborne laser scanning. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1190-1207, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE cidades**. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 nov. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER (INCA). **Estatística**. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/tipos-de-cancer/cancer-de-pele-nao-melanoma>. Acesso em: 22 nov. 2022.

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling**. Reino Unido: Cambridge University Press, 2005. 829p.

JÄRVELÄ, M.; LAPPALAINEN, K.; VALKEALAHTI, S. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. **Solar Energy**, v. 196, p. 137-145, 2020.

JEBAR, M. A.; DOWNS, N. J.; PARISI, A. V.; TURNER, J. Evaluation of the long-term cumulative UV-A facial exposure of queensland school teachers derived for an extended period from the omi satellite irradiance. **Photochemistry and Photobiology**, v. 97, n. 1, p. 192-197, 2021.

JIANG, J. H.; SU, H.; HUANG, L.; WANG, Y.; MASSIE, S.; ZHAO, B.; WANG, Z. Contrasting effects on deep convective clouds by different types of aerosols. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 3874, 2018.

JOHNSON. SC JOHNSON PROFESSIONAL. **O que é o índice UV?**

Disponível em: <https://www.scjp.com/pt-pt/o-que-e-o-indice-uv>. Acesso em: maio 2023.

KAWAKAMI, R.; ZHAO, H.; TAN, R. T.; IKEUCHI, K. Camera spectral sensitivity and white balance estimation from sky images. **International Journal of Computer Vision**, v. 105, 187-204, 2013.

KAZANTZIDIS, A.; TZOUMANIKAS, P.; BAIS, A. F., FOTOPOULOS, S.; ECONOMOU, G. Cloud detection and classification with the use of whole-sky ground-based images. **Atmospheric Research**, v. 113, p. 80-88, 2012.

KERR, A. S. **Espalhamento de luz na atmosfera**. São Paulo: USP, 2013. Notas de aula. Curso de Física da Poluição do Ar (FAP346).

KERR, J. B. Understanding the factors that affect surface ultraviolet radiation. **Optical Engineering**, v. 44, n. 4, p. 041002, 2005.

KERR, J. B.; FIOLETOV, V. E. Surface ultraviolet radiation. **Atmosphere-Ocean**, v. 46, n. 1, p. 159-184, 2008.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E.; LEME, N. P.; SILVA, A. A. A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, p. 63-74, 2000.

KRZYŚCIN, J. W.; JAROSŁAWSKI, J.; SOBOLEWSKI, P. S. Effects of clouds on the surface erythematous UV-B irradiance at northern midlatitudes: estimation from the observations taken at Belsk, Poland (1999–2001). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 4, p. 457-467, 2003.

KULLAVANIJAYA, P.; LIM, H. W. Photoprotection. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 52, n. 6, p. 937-958, 2005.

KYLLING, A.; ALBOLD, A.; SECKMEYER, G. Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range: physical interpretation. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 4, p. 397-400, 1997.

LALONDE, J. F.; EFROS, A. A.; NARASIMHAN, S. G. Estimating the natural illumination conditions from a single outdoor image. **International Journal of Computer Vision**, v. 98, 123-145, 2012.

LAMY, K.; PORTAFAIX, T.; BROGNIEZ, C.; GODIN-BEEKMANN, S.; BENCHERIF, H.; MOREL, B.; LONG, C. N. Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 1, p. 227-246, 2018.

LI, X.; LU, Z.; ZHOU, Q.; XU, Z. A cloud detection algorithm with reduction of sunlight interference in ground-based sky images. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 1-19, 2019.

LI, Z.; KIM, M. A.; KIM, E.; JUNG, Y. C.; KIM, J. J.; SHIN, H. S. Dynamic visualization of ultraviolet dose on skin with sunscreen applied using minimum erythema dose. **Skin Research and Technology**, v. 28, n. 4, p. 614-622, 2022.

LIBERTI, L.; LAVOR, C.; MACULAN, N.; MUCHERINO, A. Euclidean distance geometry and applications. **SIAM Review**, v. 56, n. 1, p. 3-69, 2014.

LINDFORS, A.; AROLA, A. On the wavelength-dependent attenuation of UV radiation by clouds. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 5, L05806, 2008.

LIU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. EUA: Academic Press, 2002. 1053p.

LIU, H.; HU, B.; ZHANG, L.; ZHAO, X. J.; SHANG, K. Z.; WANG, Y. S.; WANG, J. Ultraviolet radiation over China: spatial distribution and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1371-1383, 2017.

LOGOTHETIS, S. A.; SALAMALIKIS, V.; WILBERT, S.; REMUND, J.; ZARZALEJO, L. F.; XIE, Y.; KAZANTZIDIS, A. Benchmarking of solar irradiance nowcast performance derived from all-sky imagers, **Renewable Energy**, v. 199, p. 246-261, 2022.

LONG, C. N.; ACKERMAN, T. P.; GAUSTAD, K. L.; COLE, J. N. S. Estimation of fractional sky cover from broadband shortwave radiometer measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D11, p. 1-11, 2006.

LOPES, B. C. **Análise da radiação UV-B durante os eventos de influência do buraco de ozônio antártico na região sul do Brasil**. 2022. 81p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

LOPES, F. M.; CRUZ, R. D. O.; BATISTA, K. A. Radiação ultravioleta e ativos utilizados nas formulações de protetores solares. **Ensaio e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 16, n. 4, p. 183-199, 2015.

LÓPEZ, M. L.; PALANCAR, G. G.; TOSELLI, B. M. Effect of different types of clouds on surface UV-B and total solar irradiance at southern mid-latitudes: CMF determinations at Córdoba, Argentina. **Atmospheric Environment**, v. 43,

n. 19, p. 3130-3136, 2009.

LOVENGREEN, C.; FUENZALIDA, H. A.; VIDELA, L. On the spectral dependency of UV radiation enhancements due to clouds in Valdivia, Chile (39.8 S). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, D14, 2005.

LU, C.; LIN, D.; JIA, J.; TANG, C. K. Two-class weather classification. In: CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2014. **Proceedings...** IEEE, 2014. p. 3718-3725.

LUBIN, D.; JENSEN, E. H.; GIES, H. P. Global surface ultraviolet radiation climatology from TOMS and ERBE data. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 26061–26091, 1998.

MADRONICH, S. Photodissociation in the atmosphere. Part 1. Actinic flux and the effect of ground reflections and clouds. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p. 9740-9752, 1987.

MADRONICH, S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere. In: _____. **Environmental effects of UV (ultraviolet) radiation**. Boca Raton: Lewis, 1993. p. 17-69.

MAKNUNAH, J.; ABADI, I.; ABDURRAHMAN, I.; IMRON, C. Estimation of solar radiation per month on horizontal surface using adaptive neuro-fuzzy inference system (case study in Surabaya). In: AIP CONFERENCE, 2019. **Proceedings...** 2019. p. 030018.

MARÍN FERNÁNDEZ, M. J. **Estudio de la irradiancia solar ultravioleta B y eritemática en la Comunidad Valenciana**. 2007. 183p. Tese (Doutorado em Física da Terra e Termodinâmica) - Universitat de València, Valencia, 2007.

MARTIN, R. C. **Arquitetura limpa: o guia do artesanato para estrutura e design de software**. Brasil: Alta Books, 2019. 432p.

MARTINS, F. R.; SOUZA, M. P.; PEREIRA, E. B. Comparative study of satellite and ground techniques for cloud cover determination. **Advances in Space Research**, v. 32, n. 11, p. 2275-2280, 2003.

MATEOS, D.; DI SARRA, A.; MELONI, D.; DI BIAGIO, C.; SFERLAZZO, D. M. Experimental determination of cloud influence on the spectral UV irradiance and implications for biological effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 13, p. 1739-1746, 2011.

MAYER, B.; KYLLING A. Technical note: the libRadtran software package for radiative transfer calculations- description and examples of use. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 5, p. 1855-1877, 2005.

MCKENZIE, R.; BODEKER, G.; KEEP, D.; KOTKAMP, M.; EVANS, J. UV radiation in New Zealand: North-to-South differences between two sites, and relationship to other latitudes. **Weather Climate**, v. 16, p. 17–26, 1996.

MCKENZIE, R.; LILEY, B.; KOTKAMP, M.; DISTERHOFT, P. Peak UV: spectral contributions from cloud enhancements. In: AIP CONFERENCE, 2017. **Proceedings...** 2017. p. 110008.

MCKINLAY, A. F.; DIFFEY, B. L. A reference action spectrum for ultra-violet induced erythema in human skin. In: PASSCHIER, W. F.; BOSNJAKOVIC, B. F. M. (Ed.). **Human exposure to ultraviolet radiation: risks and regulations**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 83–87.

MIMS III, F. M.; FREDERICK, J. E. Cumulus clouds and UV-B. **Nature**, v. 371, n. 6495, p. 291, 1994.

MOAN, J. Visible light and UV radiation. In: RADIATION AT HOME, OUTDOORS AND IN THE WORKPLACE, 2001. **Proceedings...** 2001. p. 69-85.

MOEHRLE, M.; DENNENMOSER, B.; GARBE, C. Continuous long-term monitoring of UV radiation in professional mountain guides reveals extremely high exposure. **International Journal of Cancer**, v. 103, n. 6, p. 775-778, 2003.

MOL, W. B.; VAN STRATUM, B. J.; KNAP, W. H.; VAN HEERWAARDEN, C. C. Reconciling observations of solar irradiance variability with cloud size distributions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 128, n. 5, e2022JD037894, 2023.

MURPHY, A.; KATZ, R. W. **Probability, statistics, and decision making in the atmospheric sciences**. EUA: CRC Press, 2019. 545p.

NACK, M. L.; GREEN, A. E. S. Influence of clouds, haze, and smog on the middle ultraviolet reaching the ground. **Applied Optics**, v. 13, n. 10, p. 2405-2415, 1974.

NAKAJIMA, T.; TANAKA, M. Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 35, p. 13-21, 1986.

NEVVILLE, M.; STENSITZKI, T.; ALLEN, D. B.; INGARGIOLA, A. **LMFIT: Non-linear least-square minimization and curve-fitting for python**. 2014. Disponível em: [10.5281/zenodo.11813](https://zenodo.org/record/11813). Acesso em: jan. 2023.

NORRIS, D. J. Correlation of solar radiation with clouds. **Solar Energy**, v. 12, n. 1, p. 107-112, 1968.

PARISI, A. V.; DOWNS, N. Variation of the enhanced biologically damaging solar UV due to clouds. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2004, v. 3, p. 643–647.

PARISI, A. V.; IGOE, D. P.; AMAR, A.; DOWNS, N. J. Solar blue light radiation enhancement during mid to low solar elevation periods under cloud affected skies. **Sensors**, v. 20, n. 15, e4105, 2020.

PARISI, A. V.; SABBURG, J.; KIMLIN, M. G. UV Enhancement by cloud: scattered and Filtered Solar UV Measurements. **Advances in Global Change Research**, v. 17, n. 204 p. 109-129, 2004.

PECENAK, Z. K.; MEJIA, F. A.; KURTZ, B.; EVAN, A.; KLEISSL, J. Simulating irradiance enhancement dependence on cloud optical depth and solar zenith angle. **Solar Energy**, v. 136, p. 675-681, 2016.

PETKOV, B.; VITALE, V.; TOMASI, C.; MAZZOLO, M.; LANCONELLI, C.; LUPI, A.; Busetto, M. Variations in total ozone column and biologically effective solar UV exposure doses in Bologna, Italy during the period 2005–2010. **Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 1, p. 31–39, 2014.

PETTY, G.W. **A first course in atmospheric radiation**. EUA: Sundog Publishing Madion, 2004. 454p.

PFISTER, G.; MCKENZIE, R. L.; LILEY, J. B.; THOMAS, A.; FORGAN, B. W.; LONG, C. N. Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 42, n. 10, p. 1421-1434, 2003.

PIACENTINI, R. D.; CEDE, A.; BARCENA, H. Extreme solar total and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high-altitude desert plateau Puna of Atacama (Argentina). **Journal of Atmospheric Solar Terrestrial Physics**, v. 65, p. 725-731, 2003.

PIACENTINI, R. D.; SALUM, G. M.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 409-412, 2011.

PIEDEHIERRO, A. A.; ANTÓN, M.; CAZORLA, A.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.; OLMO, F. J. Evaluation of enhancement events of total solar irradiance during cloudy conditions at Granada (Southeastern Spain). **Atmospheric Research**, v. 135, p. 1-7, 2014.

PIEDEHIERRO, A. A.; CANCELLO, M. L.; SERRANO, A.; ANTÓN, M.; VILAPLANA, J. M. Global irradiance calibration of multfilter UV radiometers. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 1, p. 427-438, 2016.

PINHEIRO, A. D. S.; COSTA, A. A. Sensitivity of cloud ensembles to variations in microphysical parameters: part II-influence of droplet concentration. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 25-33, 2013.

PRIYATIKANTO, R.; MAYANGSARI, L.; PRIHANDOKO, R. A.; ADMIRANTO, A. G. Classification of continuous sky brightness data using random forest. **Advances in Astronomy**, p.1-11, 2020.

RICCHIAZZI, P.; S. YANG; C. G. 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.

ROSER, M.; MOOSMANN, F. Classification of weather situations on single color images. In: INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, 2008. **Proceedings...** IEEE, 2008. p. 798-803.

SABBURG, J. M.; PARISI, A. V. Spectral dependency of cloud enhanced UV irradiance. **Atmospheric Research**, v. 81, n. 3, p. 206-214, 2006.

SABBURG, J., LONG, C. N. Improved ground based sky camera for studies of enhanced spectral UV irradiance. In: GEOPHYSICAL RESEARCH, 2004. **Abstracts...** 2004b.

SABBURG, J.; CALBÓ, J. Five years of cloud enhanced surface UV radiation measurements at two sites (in the Northern and Southern Hemispheres). **Atmospheric Research**, v. 93, n. 4, p. 902-912, 2009.

SABBURG, J.; LONG, C. N. Improved sky imaging for studies of enhanced UV irradiance. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 4, n. 11/12, p. 2543-2552, 2004.

SABBURG, J.; WONG, J. The effect of clouds on enhancing UV-B irradiance at the earth's surface: a one year study. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 20, p. 3337-3340, 2000.

SAKERIN, S. M.; ZHURALEVA, T. B.; NASRTDINOV, I. M. **Regularities of angular distribution of near-horizon sky brightness in the cloudless atmosphere**. 2005. Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc786069/>. Acesso em: dez. 2022.

SCHAFER, J. S.; SAXENA, V. K.; WENNY, B. N.; BARNARD, W.; LUISI, J. J. Observed influence of clouds on ultraviolet B radiation. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 19, p. 2625-2628, 1996.

SCHMALWIESER, A.W.; WALLISCH, S.; DIFFEY, B. A library of action spectra for erythema and pigmentation. **Photochemistry and Photobiological Science**, v. 11, p. 251-268, 2002.

SCHWARTZ, S. E. The Whitehouse effect--shortwave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: an overview. **Journal of Aerosol Science**, v. 27, p. 359-382, 1996.

SEBER, G. A.; LEE, A. J. **Linear regression analysis**. USA: John Wiley & Sons, 2012. 592p.

SEBESTA, R. W. **Conceitos de linguagens de programação**. [S.l.]: Editora Porto Alegre, 2003. 758p.

SECKMEYER, G.; ERB, R.; ALBOLD, A. Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 20, p. 2753-2755, 1996.

SECKMEYER, G.; PISSULLA, D.; GLANDORF, M.; HENRIQUES, D.; JOHNSEN, B.; WEBB, A.; LENOBLE, J. Variability of UV irradiance in Europe. **Photochemistry and Photobiology**, v. 84, n. 1, p. 172-179, 2008.

SEINFELD, J.; PANDIS, S. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. EUA: John Wiley & Sons, 2006. 1248p.

SILVA, A. A. Clouds affecting total ozone column measurements. **Pure and Applied Geophysics**, v. 179, n. 2, p. 833-844, 2022.

SILVA, A. A. Daily distribution- of UV-Index in Belo Horizonte (Brazil) and the shadow rule. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 3, p. 313-322, 2009.

SILVA, A. A. Erythemal dose rate under noon overcastskies. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 12, n. 5, p. 777-786, 2013.

SILVA, A. A. Taxa de dose eritematosa sob céu encoberto por alto-estrato: estudo de caso. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, p. 349-355, 2010.

SILVA, A. A.; FERREIRA, W. J.; ALVALÁ, P. C. Ground-based and Satellite Measurements of Solar Spectral Irradiances at 305 nm and 380 nm at a Tropical Site. **Photochemistry and Photobiology**, v. 98, p. 1245-1251, 2022.

SILVA, A. A.; SOUZA ECHER, M. P. Ground based observations of clouds through both an automatic imager and human observation. **Meteorological Applications**, v. 23, n. 1, p. 150-157, 2016.

SILVA, A. A.; YAMAMOTO, A. L.; CORRÊA, M. P. Daily maximum erythemal dose rates in the tropics. **Photochemistry and Photobiology**, v. 95, n. 3, p. 886-894, 2019.

SOCIEDADE MINEIRA DE PEDIATRIA (SMP). **Proteção solar na infância**. Disponível em: <http://blog.smp.org.br/protacao-solar-na-infancia/>. Acesso em: maio 2023.

SOBOTTKA, K.; PITAS, I. Face localization and facial feature extraction based on shape and color information. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 3., 1996. **Proceedings...** IEEE, 1996. p. 483-486.

SOLOMON, S.; PORTMANN, R. W.; SANDERS, R. W.; DANIEL, J. S.; MADSEN, W.; BARTRAM, B.; DUTTON, E. G. On the role of nitrogen dioxide in the absorption of solar radiation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D10, p. 12047-12058, 1999.

SOMMER, L. **Analytical absorption spectrophotometry in the visible and ultraviolet**. Holanda: Elsevier, 1989. 310p.

SONG, S.; YANG, Z.; GOH, H.; HUANG, Q.; LI, G. A novel sky image-based solar irradiance nowcasting model with convolutional block attention mechanism. **Energy Reports**, v. 8, p. 125-132, 2022.

SOUZA ECHER, M. P.; PEREIRA, E. B.; BINS, L. S.; ANDRADE, M. A. R. A simple method for the assessment of the cloud cover state in high-latitude regions by a ground-based digital camera. **JAOTech**, v. 23, n. 3, p. 437-447, 2006.

SPOHN, H. Asymptotic completeness for Rayleigh scattering. **Journal of Mathematical Physics**, v. 38, n. 5, p. 2281-2296, 1997.

STAIGER, H.; DEN OUTER, P.; BAIS, A.; FEISTER, U.; JOHNSEN, B.; VUILLEUMIER, L. Hourly resolved cloud modification factors in the ultraviolet. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 2493–2508, 2008.

STAMNES, K.; TSAY, S.C. ; WISCOMBE, W.; JAYAWEERA, K. Numerically stable algorithm for discrete ordinate method radiative transfer in multiple scattering emitting layered media. **Applied Optics**, v. 27, p. 2502-2509, 1988.

STEPHENS, G. L.; LI, J.; WILD, M.; CLAYSON, C. A.; LOEB, N., KATO, S.; STACKHOUSE JUNIOR, P. W. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 10, p. 691-696, 2012.

STEPHENS; G. L.; O'BRIEN; D. WEBSTER; P.; J.; PILEWSKI; P.; KATO; S.; LI; J. L. The Albedo of Earth. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 1, p. 141-163, 2015.

SULZBERGER, B.; AUSTIN, A. T.; CORY, R. M.; ZEPP, R. G.; PAUL, N. D. Solar UV radiation in a changing world: roles of cryosphere–land–water–atmosphere interfaces in global biogeochemical cycles. **Photochemical & Photobiological Sciences**, n. 18, p. 747-774, 2019.

TAUNK, K.; VERMA, S.; SWETAPADMA, A. A brief review of nearest neighbor algorithm for learning and classification. In: INTERNATIONAL CONFERENCE

ON INTELLIGENT COMPUTING AND CONTROL SYSTEMS (ICCS), 2019. **Proceedings...** 2019. p. 1255-1260.

TAKEUCHI, S.; KIM, J., YAMAMOTO, Y.; HOGUE, H. H. Development of a high-quantum-efficiency single-photon counting system. **Applied Physics Letters**, v. 74, n. 8, p. 1063-1065, 1999.

THIMIJJAN, R. W.; HEINS, R. D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. **HortScience**, v. 18, n. 6, p. 818-822, 1983.

TIBA, C.; SILVA LEAL, S. D. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, e 8107435, 2017.

VAN DE HULST, H. C. **Light scattering by small particles**. EUA: Courier Corporation, 1981. 470p.

VANDAELE, A. C.; HERMANS, C. Fourier transform measurements of SO₂ absorption cross sections: II.: temperature dependence in the 29 000–44 000 cm⁻¹ (227–345 nm) region. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 110, n. 18, p. 2115-2126, 2009.

VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; HABERLAND, M.; REDDY, T.; COURNAPEAU, D.; VAN MULBREGT, P. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261-272, 2020.

WAN, X.; DU, J. Cloud classification for ground-based sky image using random forest. In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 43, B3, p.835-842, 2020.

WANG, J.; LIU, X.; YANG, X.; LEI, M.; RUAN, S.; NIE, K.; LIU, J. Development and evaluation of a new digital photography visiometer system for automated visibility observation. **Atmospheric Environment**, v. 87, p. 19-25, 2014.

WEIHS, P.; WEBB, A. R.; HUTCHINSON, S. J.; MIDDLETON, G. W. Measurements of the diffuse UV sky radiance during broken cloud conditions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D4, p. 4937-4944, 2000.

WERNER, R.; PETKOV, B.; VALEV, D.; ATANASSOV, A.; GUINEVA, V.; KIRILLOV, A. Ozone determination by GUV 2511 ultraviolet irradiation measurements at stara zagora. **Sun and Geosphere**, v. 12, n. 2, p. 133-138, 2017.

WEST, S. R.; ROWE, D.; SAYEEF, S.; BERRY, A. Short-term irradiance forecasting using sky cams: motivation and development. **Solar Energy**, n. 110, p. 188–207, 2014.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. EUA: Academic Press, 2011. 661p.

WOLFRAM, E. A.; ORTE, F.; SALVADOR, J.; QUIROGA, J.; D'ELIA, R.; ANTÓN, M.; QUEL, E. Study of UV cloud modification factors in Southern Patagonia. In: AIP CONFERENCE, 2017. **Proceedings...** 2017. p. 110012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Ultraviolet radiation: environmental health criteria**. 1994. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39901/9241571608-eng.pdf?sequence=1>. Acesso em: abr. 2023.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Manual on the observation of clouds and other meteors**. 2017. Disponível em: <https://cloudatlas.wmo.int/en/clouds-definitions.html>. Acesso em: nov. 2022.

WRIEDT, T. Mie theory: a review. **Optical Sciences**, v. 169, p. 53-71, 2012.

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

YANG, J.; MIN, Q.; LU, W.; MA, Y.; YAO, W.; LU, T.; DU, J.; LIU, G. A total sky cloud detection method using real clear sky background, **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 9, p. 587–597, 2016.

YANG, J.; MIN, Q.; LU, W.; YAO, W.; MA, Y.; DU, J.; LU, T.; LIU, G. An automated cloud detection method based on the green channel of total-sky visible images, **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, p. 4671–4679, 2015.

YAO, Z.; RUZZO, W. L. A regression-based K nearest neighbor algorithm for gene function prediction from heterogeneous data. **BMC Bioinformatics**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2006.

YORDANOV, G. H.; SAETRE, T. O.; MIDTGÅRD, O. M. Extreme overirradiance events in Norway: 1.6 suns measured close to 60 N. **Solar Energy**, v. 115, p. 68-73, 2015.

YORDANOV, G. H.; SAETRE, T. O.; MIDTGÅRD, O. M. 100-millisecond resolution for accurate overirradiance measurements. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 4, p. 1354-1360, 2013.

YU, W.; YOU, H.; LV, P.; HU, Y.; HAN, B.: A moving ship detection and tracking method based on optical remote sensing images from the geostationary satellite. **Sensors**, v. 21, n. 22, p. 7547, 2021.

ZAMALLOA-JARA, M. A.; SEVILLANO-BENDEZÚ, M. Á.; ULBRICH, C.; NOFUENTES, G.; GRIESELER, R.; TÖFFLINGER, J. A. Overirradiance conditions and their impact on the spectral distribution at low-and mid-latitude sites. **Solar Energy**, v. 259, p. 99-106, 2013.

ZELINKA, M. D.; KLEIN, S. A.; HARTMANN, D. L. Computing and partitioning cloud feedbacks using cloud property histograms. Part II: attribution to changes in cloud amount, altitude, and optical depth. **Journal of Climate**, v. 25, n. 11, p. 3736-3754, 2012.

ZHANG, J.; WATANABE, K.; YOSHINO, J.; KOBAYASHI, T.; HISHIKAWA, Y.; DOI, T. Physical process and statistical properties of solar irradiance enhancement observed under clouds. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 57, n. 8S3, 08RG11, 2018.

ZHAO, X.; WEI, H.; WANG, H.; ZHU, T.; ZHANG, K. 3D-CNN-based feature extraction of ground-based cloud images for direct normal irradiance prediction. **Solar Energy**, v. 181, p. 510-518, 2019.

ZHEN, Z.; LIU, J.; ZHANG, Z.; WANG, F.; CHAI, H.; YU, Y.; LIN, Y. Deep learning based surface irradiance mapping model for solar PV power forecasting using sky image. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 56, n. 4, p. 3385-3396, 2020.

APÊNDICE A – CÓDIGO PYTHON PARA DETERMINAÇÃO DOS EARS

```
!pip install Imfit
import pandas as pd
import zipfile
import gdown
import os

parent_dir = '/content'
directory = 'guv'

# Path
path = os.path.join(parent_dir, directory)

if not(os.path.isdir(path)):
    mode = 0x666
    os.mkdir(path, mode)

file_name = #inserir endereço do arquivo zip
output = os.path.join(path, file_name)

if not(os.path.isfile(output)):
    url = #inserir endereço do Drive Google Colab
    gdown.download(url, output=output, quiet=False)

zip_ref = zipfile.ZipFile(output, 'r')
zip_ref.extractall(path)
zip_ref.close()

folder_dados = #inserir nome da pasta
guv_156 = 'GUV_156'
guv_158 = 'GUV_158'

complete_path_156 = os.path.join(path, folder_dados, guv_156)
complete_path_158 = os.path.join(path, folder_dados, guv_158)

dict_mes = {'JAN': 1, 'FEV': 2, 'MAR': 3, 'ABR': 4, 'MAI': 5, 'JUN': 6, 'JUL': 7,
            'AGO': 8, 'SET': 9, 'OUT': 10, 'NOV': 11, 'DEZ': 12}

if os.path.isdir(complete_path_156):
    list_dir = os.listdir(complete_path_156)

    df_156 = {}

    for mes_ano in list_dir:
        mes = dict_mes[mes_ano.split('_')[0]]
        ano = int(mes_ano.split('_')[1])
```

```

# verifica se dicionário já tem elemento
if ano not in df_156:
    df_156[ano] = {}

if mes not in df_156[ano]:
    df_156[ano][mes] = {}

path156 = os.path.join(complete_path_156, mes_ano)
files156 = [f for f in os.listdir(path156) if (os.path.isfile(os.path.join(path156,
f)) and (f.endswith('.csv')) )]
dia_156 = [int(dia.split('_')[2]) for dia in files156]

i = 0
n = len(dia_156)
for j in dia_156:
    df_156[ano][mes][j] = pd.read_csv( os.path.join(path156,
files156[j]),encoding="ISO-8859-1", sep=',', skiprows=8, header=None,
names=['date_time',
'Ed0Gnd_156','Ed0305_156','Ed0313_156','Ed0320_156','Ed0340_156','Ed038
0_156','Ed0395_156','Ed0PAR_156','Ed0Temp','Ed0Vin','exc']).iloc[:,9]
    i = i + 1

if os.path.isdir(complete_path_158):
    list_dir = os.listdir(complete_path_158)

    df_158 = {}

    for mes_ano in list_dir:
        mes = dict_mes[mes_ano.split('_')[0]]
        ano = int(mes_ano.split('_')[1])

        if not((ano == 2019) and (mes == 9)): # assim que arrumar o arquivo 9
        remover esta linha e realinhar o código logo abaixo
            if not((ano == 2020) and (mes == 8)): # assim que arrumar o arquivo 9
            remover esta linha e realinhar o código logo abaixo

                # verifica se dicionário já tem elemento
                if ano not in df_158:
                    df_158[ano] = {}

                if mes not in df_158[ano]:
                    df_158[ano][mes] = {}

                path158 = os.path.join(complete_path_158, mes_ano)
                files158 = [f for f in os.listdir(path158) if
(os.path.isfile(os.path.join(path158, f)) and (f.endswith('.csv')) )]
                dia_158 = [int(dia.split('_')[2]) for dia in files158]

```

```

i = 0
n = len(dia_158)
for j in dia_158:
    df_158[ano][mes][j] = pd.read_csv( os.path.join(path158,
files158[i]),encoding="ISO-8859-1", sep=',', skiprows=8, header=None,
names=['date_time',
'Ed0Gnd_158','Ed0305_158','Ed0313_158','Ed0320_158','Ed0340_158','Ed038
0_158','Ed0395_158','Ed0PAR_158','Ed0Temp','Ed0Vin','exc', 'exc1', 'exc2',
'exc3', 'exc4']).iloc[:,9]
    i = i + 1
for ano in list(df_156.keys()):
    for mes in list(df_156[ano].keys()):
        lista_dias = list(df_156[ano][mes].keys())
        for dia in lista_dias:
            df_156[ano][mes][dia].date_time =
pd.to_datetime(df_156[ano][mes][dia].date_time, format= "%d/%m/%Y
%H:%M:%S")

for ano_158 in list(df_158.keys()):
    for mes_158 in list(df_158[ano_158].keys()):
        lista_dias = list(df_158[ano_158][mes_158].keys())
        for dia_158 in lista_dias:
            df_158[ano_158][mes_158][dia_158].date_time =
pd.to_datetime(df_158[ano_158][mes_158][dia_158].date_time, format=
"%m/%d/%Y %l:%M:%S %p")
for ano in list(df_156.keys()):
    for mes in list(df_156[ano].keys()):
        lista_dias = list(df_156[ano][mes].keys())
        for dia in lista_dias:
            df_156[ano][mes][dia]['hour'] = df_156[ano][mes][dia].date_time.dt.hour
            df_156[ano][mes][dia]['minute'] =
df_156[ano][mes][dia].date_time.dt.minute
            df_156[ano][mes][dia]['second'] =
df_156[ano][mes][dia].date_time.dt.second / 10
            df_156[ano][mes][dia]['date'] = df_156[ano][mes][dia].date_time.dt.date
            df_156[ano][mes][dia]['second'] =
df_156[ano][mes][dia]['second'].astype('int8')

            df_156[ano][mes][dia]['hora_dec'] = (df_156[ano][mes][dia]['hour'] +
df_156[ano][mes][dia]['minute']/60 + df_156[ano][mes][dia]['second']/3600)

for ano in list(df_156.keys()):
    for mes in list(df_158[ano].keys()):
        lista_dias = list(df_158[ano][mes].keys())
        for dia in lista_dias:
            df_158[ano][mes][dia]['hour'] = df_158[ano][mes][dia].date_time.dt.hour
            df_158[ano][mes][dia]['minute'] =
df_158[ano][mes][dia].date_time.dt.minute

```

```

df_158[ano][mes][dia]['second'] =
df_158[ano][mes][dia].date_time.dt.second / 10
df_158[ano][mes][dia]['date'] = df_158[ano][mes][dia].date_time.dt.date
df_158[ano][mes][dia]['second'] =
df_158[ano][mes][dia]['second'].astype('int8')

```

```

df_158[ano][mes][dia]['hora_dec'] = (df_158[ano][mes][dia]['hour'] +
df_158[ano][mes][dia]['minute']/60 + df_158[ano][mes][dia]['second']/3600)

```

```

hora_inicial = 11
hora_final = 19

```

```

query_str = 'hour >= {} & hour < {}'.format(hora_inicial, hora_final)

```

```

df_156_filtro_hora = {}

```

```

for ano in list(df_156.keys()):
    df_156_filtro_hora[ano] = {}
    for mes in list(df_156[ano].keys()):
        lista_dias = list(df_156[ano][mes].keys())
        df_156_filtro_hora[ano][mes] = {}
        for dia in lista_dias:
            df_156_filtro_hora[ano][mes][dia] =
df_156[ano][mes][dia].query(query_str)

```

```

df_158_filtro_hora = {}

```

```

for ano in list(df_158.keys()):
    df_158_filtro_hora[ano] = {}
    for mes in list(df_158[ano].keys()):
        lista_dias = []
        lista_dias = list(df_158[ano][mes].keys())
        df_158_filtro_hora[ano][mes] = {}
        for dia in lista_dias:
            df_158_filtro_hora[ano][mes][dia] =
df_158[ano][mes][dia].query(query_str)

```

```

df_teste1 = df_158_filtro_hora[2019][12][25].groupby(by=[ 'date', 'hour', 'minute',
'second']).sum()
df_teste2 = df_156_filtro_hora[2019][12][25].groupby(by=[ 'date', 'hour', 'minute',
'second']).sum()
df_merge_teste = pd.merge( df_teste2, df_teste1, how='inner', left_index=True,
right_index=True )
df_merge = {}

```

```

for ano in list(df_156.keys()):

```



```

df_merge[ano] = {}
set_mes_156 = set(df_156_filtro_hora[ano].keys())
set_mes_158 = set(df_158_filtro_hora[ano].keys())
meses_ambos = set_mes_156.union(set_mes_158)

for mes in meses_ambos:
    if mes in set_mes_156:
        set_156 = set( list(df_156_filtro_hora[ano][mes].keys()) )
    else:
        set_156 = set()

    if mes in set_mes_158:
        set_158 = set( list(df_158_filtro_hora[ano][mes].keys()) )
    else:
        set_158 = set()

    dias_ambos = set_156.union(set_158)
    df_merge[ano][mes] = {}

    for dia in dias_ambos:
        if ((dia in set_156) and (dia in set_158)):
            # se existe em ambos, faz um merge
            df_156_temp = df_156_filtro_hora[ano][mes][dia].groupby(by=[ 'date',
'hour', 'minute', 'second']).sum()
            df_158_temp = df_158_filtro_hora[ano][mes][dia].groupby(by=[ 'date',
'hour', 'minute', 'second']).sum()
            if ((df_156_temp.shape[0] > 0) and (df_158_temp.shape[0] > 0) ):
                df_merge[ano][mes][dia] = pd.merge( df_156_temp, df_158_temp,
how='inner', left_index=True, right_index=True )
            elif (df_156_temp.shape[0] > 0) :
                df_merge[ano][mes][dia] = df_156_temp
                df_158_filtro_hora[ano][mes].pop(dia)
            elif (df_158_temp.shape[0] > 0):
                df_merge[ano][mes][dia] = df_158_temp
                df_156_filtro_hora[ano][mes].pop(dia)
            elif (dia in set_156):
                df_156_temp = df_156_filtro_hora[ano][mes][dia].groupby(by=[ 'date',
'hour', 'minute', 'second']).sum()
                df_merge[ano][mes][dia] = df_156_temp
            elif (dia in set_158):
                df_158_temp = df_158_filtro_hora[ano][mes][dia].groupby(by=[ 'date',
'hour', 'minute', 'second']).sum()
                df_merge[ano][mes][dia] = df_158_temp

df_media = {}

for ano in list(df_156.keys()):
    df_media[ano] = {}

```

```

set_mes_156 = set(df_156_filtro_hora[ano].keys())
set_mes_158 = set(df_158_filtro_hora[ano].keys())
meses_ambos = set_mes_156.union(set_mes_158)

print('ano: ', ano )
for mes in meses_ambos:
    print('---- mes: ', mes)
    if mes in set_mes_156:
        set_156 = set( list(df_156_filtro_hora[ano][mes].keys()) )
    else:
        set_156 = set()

    if mes in set_mes_158:
        set_158 = set( list(df_158_filtro_hora[ano][mes].keys()) )
    else:
        set_158 = set()

    dias_ambos = set_156.union(set_158)
    df_media[ano][mes] = {}

    for dia in dias_ambos:
        try :
            if ((dia in set_156) and (dia in set_158)):
                print('----- dia: ', dia, ' (MEDIA)')
                # se existe em ambos, faz um merge
                df_media[ano][mes][dia] = pd.DataFrame(
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0305']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0305_156','Ed0305_158']].mean( axis='columns'
                    )/100
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0313']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0313_156','Ed0313_158']].mean( axis='columns'
                    )/100
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0320']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0320_156','Ed0320_158']].mean( axis='columns'
                    )/100
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0340']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0340_156','Ed0340_158']].mean( axis='columns'
                    )/100
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0380']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0380_156','Ed0380_158']].mean( axis='columns'
                    )/100
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0395']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0395_156','Ed0395_158']].mean( axis='columns'
                    )/100
                    df_media[ano][mes][dia]['Ed0PAR']
                    df_merge[ano][mes][dia][['Ed0PAR_156','Ed0PAR_158']].mean( axis='columns' )
                    df_media[ano][mes][dia]['hora_dec']
                    df_merge[ano][mes][dia]['hora_dec_y']

```

```

df_media[ano][mes][dia]['threshold'] = 0.11

elif (dia in set_156):
    print('----- dia: ', dia, ' (156)')
    df_media[ano][mes][dia] = pd.DataFrame()
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0305'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0305_156']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0313'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0313_156']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0320'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0320_156']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0340'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0340_156']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0380'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0380_156']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0395'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0395_156']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0PAR'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0PAR_156']
    df_media[ano][mes][dia]['hora_dec'] =
df_merge[ano][mes][dia]['hora_dec']
    df_media[ano][mes][dia]['threshold'] = 0.156

elif (dia in set_158):
    print('----- dia: ', dia, ' (158)')
    df_media[ano][mes][dia] = pd.DataFrame()
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0305'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0305_158']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0313'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0313_158']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0320'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0320_158']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0340'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0340_158']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0380'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0380_158']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0395'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0395_158']/100
    df_media[ano][mes][dia]['Ed0PAR'] =
df_merge[ano][mes][dia]['Ed0PAR_158']
    df_media[ano][mes][dia]['hora_dec'] =
df_merge[ano][mes][dia]['hora_dec']
    df_media[ano][mes][dia]['threshold'] = 0.156

except :
    print('----- dia: ', dia, ' (ND)')
# exportar o arquivo como .csv ou .xls para fit gaussiano no Lmfit.

```

```

!pip install lmfit
import numpy as np
import lmfit
from lmfit.models import GaussianModel

df = #inserir endereço do arquivo .csv ou .xls
df['data'] = pd.to_datetime(df['data'], format='%Y-%m-%d')
df['ano'] = df['data'].dt.strftime('%Y').astype(int)
df['mes'] = df['data'].dt.strftime('%m').astype(int)
df['dia'] = df['data'].dt.strftime('%d').astype(int)

df_temp_resumo = df.reset_index()

df_all = {}
anos = list(df_temp_resumo['ano'].unique())
for ano in anos:
    df_all[ano] = {}
    meses = list(df_temp_resumo.query(f'ano == {ano}')['mes'].unique())
    for mes in meses:
        df_all[ano][mes] = {}
        dias = list(df_temp_resumo.query(f'ano == {ano} & mes ==
{mes}')['dia'].unique())
        for dia in dias:
            df_all[ano][mes][dia] = pd.DataFrame()
            df_all[ano][mes][dia] = df.query(f'ano == {ano} & mes == {mes} & dia ==
{dia} & hora_dec <= 19.0003' )

df_gaussiana = {}
anos = list(df_all.keys())
for ano in anos:
    df_gaussiana[ano] = {}
    meses = list(df_all[ano].keys())
    for mes in meses:
        df_gaussiana[ano][mes] = {}
        dias = list(df_all[ano][mes].keys())
        for dia in dias:
            if df_all[ano][mes][dia].shape[0] > 0 :
                modelo = ['CFM0305', 'CFM0313', 'CFM0320', 'CFM0340', 'CFM0380',
'CFM0395', 'CFM0PAR']

s = []
sf = []
x = np.array(df_train[ano][mes][dia].hora_dec.values)
if ( len(x) < 4):
    print(ano, mes, dia, sensor, ' Amostras insuficientes n=: ', len(x))
else:
    for sensor in modelo:

```

```

y = np.array(df_train[ano][mes][dia][sensor].values)

df_gaussiana[ano][mes][dia] = {}
df_gaussiana[ano][mes][dia]['dados_z'] = pd.DataFrame(
columns=['hora_dec'])
df_gaussiana[ano][mes][dia]['parametros'] =
pd.DataFrame(data=[0,0,0],index=['amplitude', 'center', 'sigma'], columns=['moc']
) #(index=['amplitude', 'center', 'sigma'])

# Parâmetros do Fit obtido

mod = lmfit.models.GaussianModel()
pars = mod.make_params(c=y.mean(), center=x.mean(),
sigma=x.std(), amplitude=x.std()*y.ptp())
out = mod.fit(y, pars, x=x, nan_policy='propagate') # a curva azul
sai daqui!

a = out.best_values['amplitude']
mu = out.best_values['center']
sigma = out.best_values['sigma']

s.append( pd.Series(data=[a, mu, sigma], index=['amplitude',
'center', 'sigma'], name=sensor))

# Ajusta o fit aos dados medidos
model = GaussianModel()
parameters = model.make_params( amplitude=a, center=mu,
sigma=sigma )

h = np.array(df_all[ano][mes][dia]['hora_dec'].values)
modelo_z = model.fit(df_all[ano][mes][dia][sensor], parameters,
x=h)

z_data = modelo_z.best_fit
sf.append( pd.Series(data=z_data, name=sensor) )

df_sf = pd.concat(sf , axis=1)
df_gaussiana[ano][mes][dia]['dados_z'] =
pd.concat([df_all[ano][mes][dia].reset_index()['hora_dec'], df_sf ] , axis=1)
df_gaussiana[ano][mes][dia]['parametros'] = pd.concat(s , axis=1)

from scipy.optimize import curve_fit
def func(x, a, b):
return a *x + b
popt, pcov = curve_fit(func, x, y)
from sklearn.metrics import mean_squared_error
rms = mean_squared_error(valores_modelados, valores_x, squared=False)

```

```

rms

CFM      =      (df_gaussiana[ano][mes][dia]['dados_z'][      sensor
]/df_all[ano][mes][dia][canal].reset_index(drop=True))

ev = CMF > df_all[ano][mes][dia].reset_index(drop=True).threshold
print ("nº de eventos: " , ev.sum(), "; " , "nº de eventos %: " ,
100*(ev.sum()/ev.shape[0]))

## Identificação dos EARS - original

treshold_saldo = 1000 ## filtro outliers

df_resumo = {}

anos = list(df_all.keys())
for ano in anos:
    df_resumo[ano] = {}
    meses = list(df_all[ano].keys())
    for mes in meses:
        df_resumo[ano][mes] = {}
        dias = list(df_all[ano][mes].keys())
        for dia in dias:
            if df_all[ano][mes][dia].shape[0] > 0 :
                colunas = [('CFM0305','Ed0305'), ('CFM0313', 'Ed0313'), ('CFM0320',
'Ed0320'),
                ('CFM0340', 'Ed0340'), ('CFM0380','Ed0380'), ('CFM0395',
'Ed0395'),
                ('CFM0PAR', 'Ed0PAR')]

                s = []
                x = np.array(df_train[ano][mes][dia].hora_dec.values)
                if ( len(x) < 5):
                    print(ano, mes, dia, sensor, ' Amostras insuficientes n=: ', len(x))
                else:
                    for sensor in colunas:

                        df_resumo[ano][mes][dia]
pd.DataFrame(data=[0,0,0],index=['n_eventos_%','n_eventos',      'saldo'],
columns=['moc'] )

                        resultado_dif
(df_all[ano][mes][dia][sensor[1]].reset_index(drop=True)/df_gaussiana[ano][mes
][dia]['dados_z'][ sensor[0] ]) - 1
                        resultado_bool      =      resultado_dif      >
df_all[ano][mes][dia].reset_index(drop=True).threshold
                        v_thres      =
df_all[ano][mes][dia].reset_index(drop=True).threshold[0]

```

```

        texto_coluna = f"{sensor[0]}_dif"
        df_all[ano][mes][dia][texto_coluna] = [ valor if valor >= v_thres
else 0 for valor in resultado_dif.values ]

        n_ev_p = resultado_bool.sum()/len(resultado_bool)
        n_ev = resultado_bool.sum()
        saldo = df_all[ano][mes][dia][texto_coluna]*df_all[ano][mes][dia][
sensor[1] ]
        saldo_esc = saldo.sum()

        #if saldo > treshold_saldo:
            #n_ev_p = 0
            #n_ev = 0
            #saldo = 0

        s.append(pd.Series(data=[n_ev,    100*n_ev_p,    saldo_esc],
index=['n_eventos','n_eventos_%','saldo'], name=texto_coluna))

        df_resumo[ano][mes][dia] = pd.concat(s , axis=1)

#exportar df_resumo[ano][mes][dia] em .csv ou .xls

```


APÊNDICE B – CÓDIGO SIMPLIFICADO PARA HISTOGRAMAS HSV

```
from __future__ import division
import csv
import os
from csv import writer
import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Parâmetros Iniciais -----
# Limite de pixels claros
LIGHT_PIXELS_THRESH = #colocar o limite a ser integrado

# Diretório de armazenamento de imagens.
storagePath = '/gdrive/MyDrive/ch3_2019-10-04-14-50-01-0175.jpg'
storagePath = os.path.splitext(storagePath)[0]
# -----

with open(storagePath+'Output.csv', 'a+', newline='') as fd:
    writer = csv.writer(fd)
    writer.writerow(['Arquivo', 'Qtd Pixels Claros', 'Total Pixels', 'Percentual',]) #
    CSV Header
    # Cria lista do diretório
    imgsList = os.listdir(storagePath)
    for imgName in imgsList:
        if imgName[-11:] == '_Result.jpg' or imgName[-4:] != '.jpg':
            continue
        imgFullPath = storagePath+imgName
        # Abre Imagem RGB
        img = cv2.imread(imgFullPath, 1)
        imgH = img.shape[0]
        imgW = img.shape[1]
        totalPixels = imgH * imgW
        # Clona a imagem antes da manipulação
        imgOrig = img = cv2.resize(img,(imgW, imgH), interpolation =
cv2.INTER_LINEAR)

        # Processamento da Imagem
        img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2HSV)
        for l in range(imgH): # Conta pixels acima de determinado limite e os faz
vermelhos
            for c in range(imgW):
                HSVPixel = img[l][c]
                h, s, v = HSVPixel[0], HSVPixel[1], HSVPixel[2]
                if v >= LIGHT_PIXELS_THRESH:
                    img[l][c] = (0, 255, 170) # Vermelho escuro
                    lighterPixelsCount += 1
```

```
writer.writerow([imgName, str(lighterPixelsCount), str(totalPixels),  
str(lighterPixelsCount/totalPixels),])
```

```
img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_HSV2BGR)  
# concatena imagem com separador  
imgResult = np.concatenate((imgOrig, img), axis=1)  
imgResultFullPath = imgFullPath[:-4]+'_Result.jpg'  
cv2.imwrite(imgResultFullPath, imgResult)
```

APÊNDICE C – TRANSFORMAÇÕES MATEMÁTICAS PARA INVESTIGAÇÃO DA VARIAÇÃO DO BRILHO DAS NUVENS DURANTE OS EARS

Variável	Nome Atribuído	Estrutura	Zeta (ζ).
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels_root</i>	$[NPixels] ^ (\text{zeta})$	0,5
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels_natlog</i>	$\text{Ln } [NPixels]$	0
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels</i>	$[NPixels]$	1
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels_sqre</i>	$[NPixels] ^ (\text{zeta})$	2
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels_cox1</i>	$[([NPixels] ^ (\text{zeta}) - 1] / (\text{zeta})$	1
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels_cox2</i>	$[([NPixels] ^ (\text{zeta}) - 1] / (\text{zeta})$	2
Número de Pixels brilhantes	<i>NPixels_cox3</i>	$[([NPixels] ^ (\text{zeta}) - 1] / (\text{zeta})$	3
Variação do Brilho	<i>VB_root</i>	$[VB] ^ (\text{zeta})$	0,5
Variação do Brilho	<i>VB_natlog</i>	$\text{Ln } [VB]$	0
Variação do Brilho	<i>VB</i>	$[VB]$	1
Variação do Brilho	<i>VB_sqre</i>	$[VB] ^ (\text{zeta})$	2
Variação do Brilho	<i>VB_cox1</i>	$[([VB] ^ (\text{zeta}) - 1] / (\text{zeta})$	1
Variação do Brilho	<i>VB_cox2</i>	$[([VB] ^ (\text{zeta}) - 1] / (\text{zeta})$	2
Variação do Brilho	<i>VB_cox3</i>	$[([VB] ^ (\text{zeta}) - 1] / (\text{zeta})$	3

APÊNDICE D – CÓDIGO KNN PARA O BRILHO DE REFERÊNCIA NOS EARS

```
%pip install pingouin
import pandas as pd
import numpy as np
import plotly.express as px
import plotly.graph_objects as go

from sklearn import neighbors
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from math import sqrt
import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn.metrics import confusion_matrix, accuracy_score
from sklearn.metrics import classification_report
from sklearn.model_selection import cross_val_score
from sklearn.linear_model import LogisticRegression

all = pd.read_csv ('inserir endereço do arquivo')
complete = all.filter(items=colunasSel)

train = complete.query('condicao == "Ensolarado" & mes == 1 & L_200 > 13705
& L_245 < 60762')
season_dict = {"Spring": 1,
               "Summer": 2,
               "Fall": 3,
               "Winter": 4}
train['season'] = train['season'].apply(lambda x: season_dict[x])
X = train.drop(['data', 'season', 'condicao', 'hora_dec', 'CFM0305_dif',
               'CFM0380_dif', 'CFM0PAR_dif', 'Ed0305', 'Ed0380', 'Ed0PAR', 'L_180', 'L_200',
               'L_230', 'L_240', 'L_245'], axis=1)
y = train['L_200']

from sklearn.model_selection import train_test_split
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.10,
random_state=0)

from sklearn.preprocessing import StandardScaler

sc = StandardScaler()
X_train = sc.fit_transform(X_train)
X_test = sc.transform(X_test)

from sklearn import neighbors
from sklearn.metrics import mean_squared_error
```

```

from math import sqrt
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline

rmse_val = [] # armazena os valores rmse para diferentes k
for K in range(10):
    K = K+1
    model = neighbors.KNeighborsRegressor(n_neighbors = K)

    model.fit(X_train, y_train) # fit the model
    pred=model.predict(X_test) # predições na equipe de prova
    error = sqrt(mean_squared_error(y_test,pred)) #calculate rmse
    rmse_val.append(error) #store rmse values
    print('Valor de RMSE para k= ', K , 'es:', error)

from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn import metrics

KNN_reg = KNeighborsRegressor(n_neighbors=8)
regressor = KNN_reg.fit(X_train, y_train)
y_pred_knn = regressor.predict(X_test)
from sklearn.metrics import mean_squared_error, r2_score
from sklearn import metrics
print ("Mean Absolute Error:" , metrics.mean_absolute_error(y_test,
y_pred_knn))
print ("Mean Squared Error:" , metrics.mean_squared_error(y_test,
y_pred_knn))
print ("Root Mean Squared Error:" , np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test,
y_pred_knn)))
print('Coefficient of determination: %.2f%' r2_score(y_test, y_pred_knn))

df_objetivo = complete.query('CFM0305_dif > 0')
list = [2]
df_objetivo = df_objetivo[df_objetivo['mes'].isin(list)]

X_objetivo = df_objetivo.drop(['data', 'season', 'nseason', 'condicao', 'hora_dec',
'CFM0305_dif', 'CFM0380_dif', 'CFM0PAR_dif', 'Ed0305', 'Ed0380', 'Ed0PAR',
'L_180', 'L_200', 'L_230', 'L_240', 'L_245'], axis=1)
y_predict = regressor.predict(X_objetivo)
df_objetivo['y_predict'] = y_predict

#o brilho durante os EARS
df_objetivo['VB'] = df_objetivo['L_245']/df_objetivo['y_predict']

df_objetivo['VB'] = 100 * df_objetivo['VB']

canal = 'CFM0305_dif'
sensor = 'Ed0305'

```

```

df_objetivo[canal] = 100 * df_objetivo[canal]

df_VB = df_objetivo[['season', 'data', 'dia', 'mes', 'hora_dec', 'SZA', sensor ,
canal , 'L_200', 'L_245','VB']]
VB = df_VB.query('CFM0305_dif > 0')
VB['season']= VB['season'].replace(["Spring"],"Primavera")
VB['season']= VB['season'].replace(["Summer"],"Verão")
VB['season']= VB['season'].replace(["Fall"],"Outono")
VB['season']= VB['season'].replace(["Winter"],"Inverno")

VB2 = VB.query(#caso queira colocar algum limite)

VB2['NPixels'] = VB2['L_245']*VB2['VB']/100 # número de pixel somente das
nuvens no momento dos EARS

VB2['Irrad_Extra'] = VB2[canal] * VB2[sensor] # radiação extra devido aos
EARS

# Válido para NPixels

VB2['NPixels_root'] = VB2['NPixels'] ** (0.5)
VB2['NPixels_natlog'] = np.log(VB2['NPixels'])
VB2['NPixels_sqre'] = VB2['NPixels'] ** (2)

VB2['NPixels_cox1'] = (VB2['NPixels'] - 1)
VB2['NPixels_cox2'] = ((VB2['NPixels'] ** (2) - 1)/2)
VB2['NPixels_cox3'] = ((VB2['NPixels'] ** (3) - 1))/3

# #Válido para VB

VB2['VB_root'] = VB2['VB'] ** (0.5)
VB2['VB_natlog'] = np.log(VB2['VB'])
VB2['VB_sqre'] = VB2['VB'] ** (2)

VB2['VB_cox1'] = (VB2['VB'] - 1)
VB2['VB_cox2'] = ((VB2['VB'] ** (2) - 1)/2)
VB2['VB_cox3'] = ((VB2['VB'] ** (3) - 1))/3

df = VB2

x1 = df['VB']
y1 = df['CMF']

fig = px.scatter(x=x1, y=y1, color=df['season'], color_discrete_sequence=[ "red",
"blue", "purple", "darkolivegreen"],

```

```
        trendline="ols", trendline_color_override="black", log_x=False,
log_y=False,
        labels={
            'x': "VB %",
            'y': "CMF %"
        })
results = px.get_trendline_results(fig)
print(results)

print(results.px_fit_results.iloc[2].summary())
```