

Radiação Solar UV em cidades brasileiras: Uma perspectiva para o tempo ideal de exposição solar saudável

Lilianne de Queiroz Leal

Professora Mestre, CCTA/UFCG, Brasil
lilianne.queiroz@professor.ufcg.edu.br

Solange Maria Leder

Professor Doutora, CT/UFPB, Brasil
solangeleder@yahoo.com.br

RESUMO

A radiação UV, representando menos de 10% da radiação solar total, tem efeitos tanto benéficos quanto prejudiciais na saúde, incluindo a síntese de vitamina D e danos à pele e DNA. Este artigo investiga a relação entre radiação UV e global em cidades brasileiras de baixa e média latitudes e seus efeitos no tempo ideal de exposição solar para síntese de vitamina D. Em João Pessoa/PB (7° S) e Florianópolis/SC (27°S), foi observada uma alta correlação positiva entre radiação global e UV, com maior variabilidade horária em latitudes mais próximas do Equador. O pico de radiação UV ocorreu ao redor do meio-dia solar, com maior intensidade em João Pessoa. O período propício para síntese de vitamina D começou antes das 7h em todas as estações em João Pessoa e às 7h no verão e 9h no inverno em Florianópolis. Apesar da recomendação de evitar exposição entre as 10h e 15h, a presença de radiação UV foi observada antes e depois desse intervalo. O estudo identificou períodos de baixa e alta incidência de UV, destacando a exposição solar para produção de vitamina D e alertando sobre danos à pele em horários diferentes dos recomendados. Essas descobertas contribuem para compreender melhor a exposição à radiação UV e possíveis adaptações em locais com características climáticas similares.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação UV. Exposição solar. Saúde.

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é a principal fonte de energia do nosso planeta. De comprimento de onda curta (entre 100 e 400 nm), a radiação ultravioleta (UV) faz parte do espectro eletromagnético, classificada em três faixas: UVA (315–400 nm), UVB (280–315 nm) e UVC (100–280 nm). A banda UVC e aproximadamente 90% do UVB são absorvidos pela camada de ozônio, precipitação, oxigênio e dióxido de carbono, que estão presentes nas porções superiores da atmosfera (VAN DER LEUN, 2004). No entanto, o UVA compõe o maior espectro que atinge a superfície da Terra, sofrendo interferência mínima de componentes atmosféricos.

Responsável pelas transformações biológicas e fotoquímicas no corpo humano, a radiação UV solar estabelece um papel fundamental para saúde. Efeitos diretos geram consequências na pele (MULLENDERS, 2018) e nos olhos (DEL COURT *et al.*, 2014). A exposição excessiva aos raios UV também implica em danos ao DNA das células da pele, como eritema ou queimaduras solares, e, em casos mais graves, no desenvolvimento de câncer (AUTIER; DORÉ, 2020). Por outro lado, a exposição solar é essencial para produção de vitamina D, de serotonina com a melhoria da saúde mental, a liberação de óxido nítrico reduzindo a pressão arterial, entre outros fatores fotoquímicos associados à regulação do ciclo circadiano (RAZZAQUE, 2018; WACKER; HOLICK, 2013).

A irradiância eritematosa envolve parte da faixa UVA e UVB, sendo o parâmetro para avaliação dos níveis de UV na pele representado pelo Índice Ultravioleta (IUV). O IUV foi estabelecido como padrão internacional pela Organização Mundial da Saúde (OMS) com diretrizes para exposição solar segura, definida como um valor adimensional, integral e positivo que varia de 1 (risco mínimo) a 11+ (risco extremo) (OMS, 2002). Este índice é uma ferramenta simples para auxiliar a população na adoção de medidas seguras em relação à exposição aos raios UV, especificamente para evitar queimaduras solares.

A exposição à radiação UVB (280–315 nm) é a principal fonte para a síntese de vitamina D decorrente da ação espectral ponderada pela resposta da pele humana. O processo para produção da síntese D ocorre quando um fóton de radiação UVB atinge as células da pele e a provitamina D, 7-desidrocolesterol (7-DHC) é convertida em pré-vitamina D, que é isomerizada

por reações térmicas até a formação da vitamina D3. Posteriormente, a D3 é transportada através da corrente sanguínea para o fígado, onde é convertida em 25-hidroxivitamina D (25(OH)D). Nos rins, é regulada a forma ativa da vitamina D, 1,25-dihidroxivitamina D (1,25(OH)2D). A medida padrão do status de vitamina D é a concentração de 25(OH)D no sangue, sem distinção entre D2 obtida por dieta e suplementação, e D3 por exposição solar (MACLAUGHLIN; ANDERSON; HOLICK, 1982).

Essencial para saúde, a vitamina D ou hormônio D desempenha papel fundamental na absorção do cálcio e no fortalecimento dos ossos. O tempo recomendado de exposição ao sol para fins de síntese D depende de vários fatores, incluindo as determinantes atmosféricas, ambientais e parâmetros pessoais. O primeiro fator interfere na intensidade da radiação ultravioleta por meio de variáveis meteorológicas (ozônio, nebulosidade, poluição do ar, aerossol e albedo), localização (latitude) e aspectos sazonais e temporais. Os parâmetros pessoais envolvem características endógenas, como genética (idade, fototipo de pele ou doenças hepáticas, renais, ósseas e autoimunes) e aspectos comportamentais, culturais e de estilo de vida, como porcentagem de pele exposta, frequência de exposição, tipo de vestimenta e uso de fotoproteção (ENGELSEN, 2010; GRANT; BHATTOA; PLUDOWSKI, 2017; HOLICK, 2004). Uma regra geral é a indicação de índices UV (IUV) abaixo 3 como incapazes de alcançar um status adequado de vitamina D (MCKENZIE; LILEY; JOHNSTON, 2009; WEBB; ENGELSEN, 2008).

Os níveis de radiação UV variam de acordo com a faixa de comprimento de onda e a posição do sol no céu ou ângulo de elevação solar (AES). Este último é formado entre a linha do horizonte e o raio do sol e é definido em função da latitude e declinação solar. Seu ângulo complementar é o ângulo zenital solar - AZS (MADRONICH, 1993). A incidência de UV inicia logo após o nascer do sol, quando baixos ângulos de elevação solar (aproximados de 0°) são predominantes, mesmo com menor intensidade. Com o AES próximo de 90°, os fótons UV percorrem distâncias mais curtas e têm baixa probabilidade de absorção pelo ozônio. À medida que esse ângulo se aproxima do zênite, a proporção de UVB aumenta em relação à banda UV banda larga (UVA+UVB), atingindo sua irradiância máxima ao meio-dia solar (WEBB; ENGELSEN, 2008). McKenzie *et al.* (2009) adotaram AES maior que 20° (zenitais abaixo de 70°) como referência para a incidência de UVB, enquanto Engelsen (2010) assume que a síntese de vitamina D se inicia com menor intensidade para ângulos maiores que 15° e mais evidentes por volta do meio-dia, quando atingem valores superiores a 75°. O modelo de Webb *et al.* (2011) considerou relevante o ângulo de elevação solar acima de 45°.

Embora haja consenso entre os dermatologistas em relação aos riscos dos raios solares, como queimaduras e doenças oculares, a literatura destaca a exposição moderada como suficiente para manter os níveis adequados de vitamina D. Especialistas acreditam que as condições ideais de exposição solar estejam entre 5 e 30 minutos e pelo menos duas vezes na semana (WACKER; HOLICK, 2013). Recomenda-se exposição ao meio-dia (próximo ao horário solar) por ser o período mais favorável para estimular a síntese de vitamina D, sobretudo por apresentar maior incidência de UVB. Por isso, entre 10h e 15h é o horário ideal, sendo aconselhável a exposição inicial de braços, pernas ou costas sem fotoproteção (GRANT; BHATTOA; PLUDOWSKI, 2017; HOLICK, 2004). Diante dos riscos de queimaduras solares, é essencial o equilíbrio entre a vitamina D e a proteção da pele. Produção de vitamina D foi avaliada em função da latitude, estação do ano e tipo de pele, no período da primavera (março)

e do meio-dia solar ($AES = 48^\circ$) para o contexto de Boston ($42,5^\circ N$). Utilizando a ferramenta *FastRT UV*, foi simulado o tempo de exposição suficiente para uma dose padrão de vitamina D – 1000UI/dia ou *Standard Vitamin D Dose* (SDD) para quatro latitudes, sob a incidência de UVB em uma superfície horizontal. Para as baixas latitudes ($11,5^\circ N$) e pele de fototipo I exposta às 9 horas, estimaram que a síntese ocorre após 18 minutos no inverno e 9 minutos no verão. Para peles do tipo IV, o tempo dobra para 35 minutos e 19 minutos nas mesmas estações. Acima de $60^\circ N$, recomenda-se um tempo de exposição mais longo (WEBB; ENGELSEN, 2008).

Mckenzie, Liley e Johnston (2009) avaliaram ângulo zenital solar, Índice Ultravioleta (IUV), Regra das Sombras (*Shadow Rules*) e a razão entre radiação UV ponderada para síntese D e para eritema no contexto de Lauder, Nova Zelândia ($45^\circ S$, $170^\circ L$ e altitude 370m). Avaliou-se o tempo de exposição solar suficiente para atingir a dose diária de vitamina D (1000UI) sem queimaduras solares na pele fototipo II. Observou-se que a variável “percentual de pele exposta” é inversamente proporcional ao tempo necessário para produzir vitamina D. Ao meio-dia solar durante o período de verão ($AZS < 30^\circ$ ou $AES > 60^\circ$), foi necessário apenas 1 minuto e 10 minutos para 100% e 10% do corpo exposto ao sol, respectivamente, enquanto os danos cutâneos se iniciaram somente após 18 minutos. Para outros fototipos (FITZPATRICK, 1988), ocorreu redução de $\pm 0,7$ para o tipo I, o dobro para o tipo IV e de 5 a 10 vezes para os tipos V a VI. O efeito da regra de sombra, que corresponde à relação entre a altura humana e a dimensão de sua sombra no plano horizontal - tangente à AZS – demonstrou que quanto menor o fator sombra, maior o IUV e menor o tempo de sol necessário para sintetizar vitamina D.

Nas últimas décadas, houve um aumento progressivo e uma grande preocupação relacionada à quantidade de radiação UV que atinge a superfície da Terra. Devido aos danos à camada de ozônio da estratosfera, aumenta-se os efeitos nocivos para os seres vivos, uma vez que se trata do único gás capaz de filtrar a radiação ultravioleta na faixa B. Por evitar exposições frequentes, a deficiência de vitamina D tornou-se um problema de saúde pública mundial (HOSSEIN-NEZHAD; HOLICK, 2013). Devido à sua grande extensão territorial entre as latitudes $4^\circ N$ a $34^\circ S$, o Brasil é considerado referência tropical e faz parte desse cenário epidemiológico com altos níveis de deficiência e insuficiência de vitamina D, especialmente nas regiões sul e sudeste (FONTANIVE *et al.*, 2020; PEREIRA-SANTOS *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2012; UNGER *et al.*, 2010).

Para avaliar os impactos na saúde, a Organização Mundial da Saúde recomenda o monitoramento da incidência de UV para orientação por meio de órgãos de saúde pública (OMS, 2002). Iniciativas governamentais e não-governamentais brasileiras têm sido colocadas em ação para aumentar a conscientização da população sobre os comportamentos de fotoproteção (BRASIL, 2013; SCHALKA; STEINER, 2014). No entanto, apesar de sua relevância, o levantamento da radiação UV ainda é pouco frequente na maioria das estações meteorológicas do Brasil, uma vez que a aquisição de instrumentos com alta acurácia são onerosos e requerer manutenção frequente.

Como alternativa para suprir essa escassez, levantamentos nacionais têm relacionado a radiação UV combinada (UVA e UVB) e a radiação de banda larga global (280 a 2800nm), que é uma medida mais facilmente encontrada em estações automáticas. Investigações brasileiras mostraram que a irradiância UV horária constitui 5,2% da irradiância solar global com $R^2 = 0,92\%$ e erros $MBE\% = 3,09\%$ e $RMSE\% = 15,80\%$ para a cidade de Recife/PE (LEAL, 2011; TIBA; LEAL, 2012; TIBA; SILVA LEAL, 2017) Essa estimativa reduziu para 2,8% em Maceió/AL com $R^2=0,99$

(PORFIRIO *et al.*, 2010) e 4,1% em Botucatu/SP com $R^2=0,97$, com erros MBE% = -1,67 e RMSE% = 9,94 (ESCOBEDO *et al.*, 2009). Os estudos internacionais são mais evidentes no Hemisfério Norte, especialmente em latitudes médias e altas (CANADA; PEDROS; BOSCA, 2003; HABTE *et al.*, 2018; MEHNATI *et al.*, 2021; QIN *et al.*, 2020; WRIGHT *et al.*, 2020). Assim, este artigo tem como objetivo investigar a relação entre a radiação solar ultravioleta e a radiação global em cidades brasileiras de baixas e médias latitudes e os impactos no tempo ideal de exposição à síntese de vitamina D.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição dos locais de estudo

Para este estudo, foram escolhidos dois locais representativos no Brasil (Figura 1). João Pessoa/Paraíba (7° S, 34° W, 43m) está situada na região Nordeste. Seus parâmetros meteorológicos atingem temperatura média de 27°C ($\pm 2,5^\circ\text{C}$), umidade relativa do ar de 74% ($\pm 11,6\%$) e radiação global de 1.502,8 KJm⁻², com pico em janeiro (INMET, 2013). Florianópolis/Santa Catarina (27° S, 48°W, 15m) está localizada no litoral da região Sul. A temperatura média é de 21,6°C ($\pm 4,3^\circ\text{C}$), umidade relativa do ar de 78% ($\pm 12,5\%$) e 1.070,7 KJm⁻² de radiação global (INMET, 2020).

Figura 1 – Localização das cidades: (a) João Pessoa/PB e (b) Florianópolis/SC



A Figura 2 ilustra as cartas solares e algumas particularidades dos locais. Embora ambas sejam regiões costeiras, suas características climáticas são distintas. A classificação de Köppen define João Pessoa com clima tropical úmido, tendo período mais chuvoso em junho. Florianópolis se caracteriza pelo clima subtropical úmido, sendo determinado pelas massas de ar tropical e polar, com chuvas abundantes e pico de temperatura no verão, especialmente em janeiro. Invernos frios e verões quentes são características deste local.

Figura 2 - Características das cidades



João Pessoa/PB
Latitude: 7° 6' S; Longitude: 34° 51' W, Alt: 40m
Meio-dia solar no inverno=59°26' e no verão=73°40'
Fotoperíodo no inverno=11:43 e no verão=12h32

Florianópolis/SC
Latitude: 27° 35' S; Longitude: 48° 32' W, Alt: 15m
Meio-dia solar no inverno=38°57' e no verão=85°50'
Fotoperíodo no inverno=10:26 e no verão=1:53

2.2. Medições UV e coleta de dados

Na cidade de João Pessoa/PB, foram medidos dados de índice ultravioleta (IUV – irradiância ponderada espectralmente para ação de eritema) com série temporal horária. A estação foi instalada no Núcleo de Pesquisa e Processamento de Alimentos (NUPPA) sob condução do Laboratório de Conforto (LABCON) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) nos anos de 2012 e 2013. O equipamento utilizado foi a estação meteorológica *Davis Vantage Pro2*. Mesmo o datalogger armazenando registros durante dois anos, foram coletados apenas os dados obtidos no ano de 2013, das 6h às 18h, por apresentar menos erros de medição e ocorrências nulas. Como o monitoramento da irradiância UV (W/m^2) requer utilização de equipamentos com elevado custo de aquisição, os dados de João Pessoa foram estimados a partir da aplicação do modelo estatístico desenvolvido para o contexto da cidade de Recife (latitude 8° 04' 03" Sul; longitude 34° 55' 00" Oeste; Altitude de 4m). Este modelo estima o IUV (adimensional) através de dados de radiação ultravioleta banda larga com faixa espectral de 280 a 450nm – UVA+UVB – em W/m^2 , definido pela Equação 01. O R^2 , erros padrão MBE% e RMSE% foram correspondentes a 0,90, 0,41 e 14,07, respectivamente (TIBA; LEAL, 2012; TIBA; SILVA LEAL, 2017).

Equação 1 – Modelo adimensional para conversão de UV em IUV

$$IUV = 0,2321 * UV - 1,3411$$

onde IUV = Índice Ultravioleta (adimensional), e UV = UVA+UVB (Wm^{-2})

Os dados de radiação ultravioleta da cidade de Florianópolis/SC foram levantados pela estação de monitoramento instalada no Parque Sapiens, cedidos pelo Laboratório Fotovoltaica (FV) da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (MANTELLI; MARTINS; RUTHER, 2020). Os equipamentos registraram medições de irradiância ultravioleta com limite máximo de $400W/m^2 \pm 0,58W/m^2$ e alcance espectral de 280 a 400 nm referente à radiação combinada de UVA e UVB. Para esta investigação, foram adotadas as medições que ocorreram nos anos de 2020.

Para avaliação das irradiâncias globais, foram utilizados os registros horários anuais levantadas em estações automáticas instaladas nas cidades. Assim, foram seguidos os mesmos recortes temporais das medições de radiação ultravioleta. A etapa de tratamento dos dados consistiu na organização e tabulação das séries temporais. O resultado das medições passou por

uma pré-análise, de modo a identificar as ocorrências incoerentes ocasionadas por erros e eliminar os registros nulos. Em seguida, os dados tratados foram tabulados e divididos por variáveis explicativas referente ao mês, dia e hora legal que ocorreu a medição, e por variáveis resposta representadas pelas irradiâncias global e ultravioleta em W/m^2 (INMET, 2013, 2020).

2.3. Análise estatística

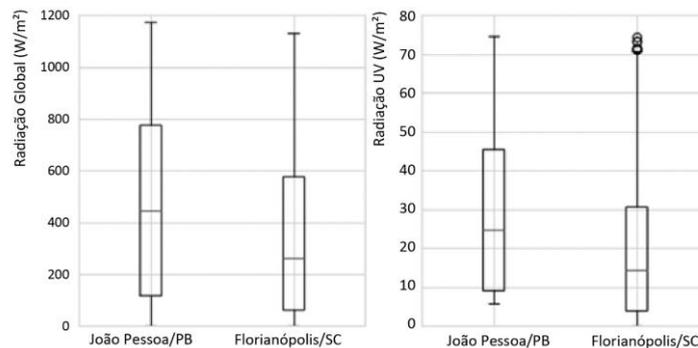
Todas as análises estatísticas foram realizadas no software RStudio v.1.3 (RSTUDIO TEAM, 2022). Para todos os experimentos foram adotados intervalo de confiança de 95% e valor de $p < 0,05$ como estatisticamente significativo. A aplicação do teste estatístico de *Lilliefors* detectou não normalidade na distribuição dos dados (valores de $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$). Assim, o teste não paramétrico de correlação de Spearman foi utilizado para comparar a relação entre a radiação global e ultravioleta. O teste de *Wilcoxon* foi aplicado para verificar a igualdade (hipótese nula) ou diferença (hipótese alternativa) da radiação UV horária e mensal (Wm^{-2}) em João Pessoa e Florianópolis. Além disso, estatísticas descritivas e gráficos boxplots e de linhas foram utilizados para avaliar as distribuições das radiações em função de parâmetros temporais e verificar o padrão horário e sazonal (estações do ano).

O padrão mínimo para a síntese sazonal de vitamina D foi avaliado de acordo com o período de início de cada estação do ano, bem como os ângulos de elevação solar (AES). O AES maior que 20° foi adotado como referência temporal (ou ângulo zenital solar abaixo de 70°), sendo este o limite mínimo para o início da incidência de UVB na atmosfera, mesmo em menor intensidade. Para os horários de pico da radiação UVB, considerou-se o ASE entre 70° e 90° ($20^\circ < AZS < 0^\circ$), correspondendo a horas próximas ao meio-dia solar (MCKENZIE; LILEY; JOHNSTON, 2009). Os dados foram coletados de acordo com a hora legal (hora padrão) convertido em hora solar e em AES utilizando o software Tropsolar (CABÚS; RIBEIRO, 2015). Além disso, as distribuições da radiação UV em função do AES foram analisadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No âmbito das estatísticas descritivas, os dados foram divididos em variáveis dependentes a Radiação Global e Radiação UV de ambas as cidades e a faixa temporal (mensais e sazonais) como variáveis independentes. Observou-se pelos boxplots ilustrados na Gráfico 1 que as variáveis apresentaram uma distribuição assimétrica positiva, cuja concentração dos dados está abaixo da média e a curva com maior evidência à direita. Há uma maior frequência de valores baixos em ambas as variáveis, sobretudo para Radiação UV. Os dados para João Pessoa exibiram uma distribuição mais ampla com medianas relativamente altas em comparação à Florianópolis.

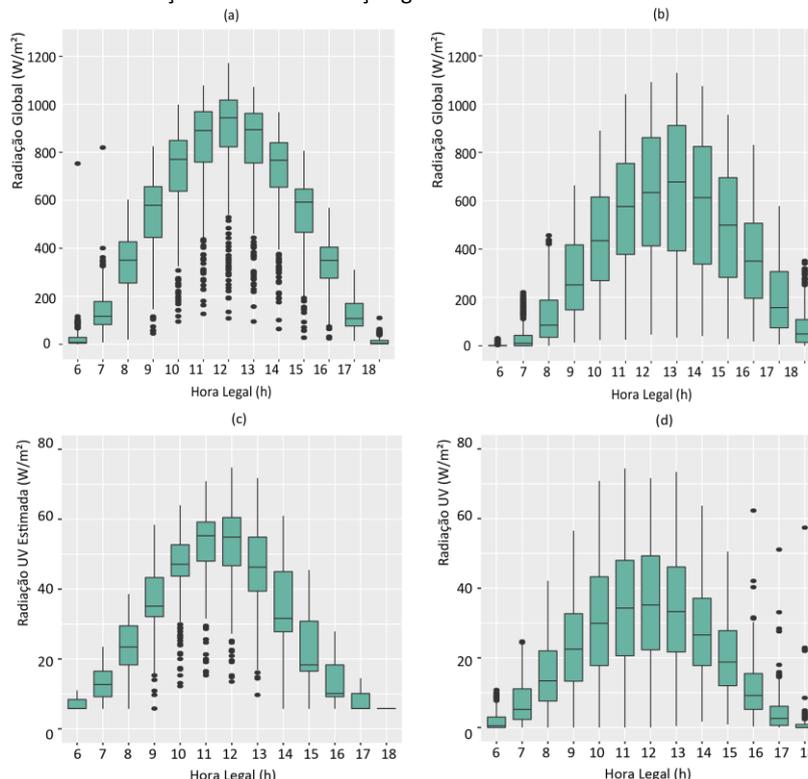
Gráfico 1 – Distribuição dos dados por histograma – João Pessoa e Florianópolis



3.1 Comparando radiação solar global e radiação ultravioleta

Os dados referentes aos registros horários de radiação para as cidades de João Pessoa/PB e Florianópolis/SC apresentaram distribuição não-normal (Gráfico 2). Assim, os dados de mediana foram utilizados como medida de análise. A irradiância global anual em João Pessoa apresentou maiores ocorrências de outliers abaixo do quartil inferior, principalmente entre 9h e 16h e medianas mais altas atingindo valores entre 800 e 1000W/m², mínima de 0 e máxima próxima de 1200W/m² (Gráfico 2a). Em Florianópolis, os dados horários mostraram maior variação nas faixas horárias próximas ao meio-dia (hora legal), com dados discrepantes pouco representativos (Gráfico 2b).

Gráfico 2 – Distribuição horária da radiação global e UV em João Pessoa e em Florianópolis



Os dados de radiação ultravioleta de João Pessoa foram registrados a partir do Índice UV, o valor mínimo calculado foi de 6W/m² quando a UVI era nula, das 6h às 18h – horário legal (Gráfico

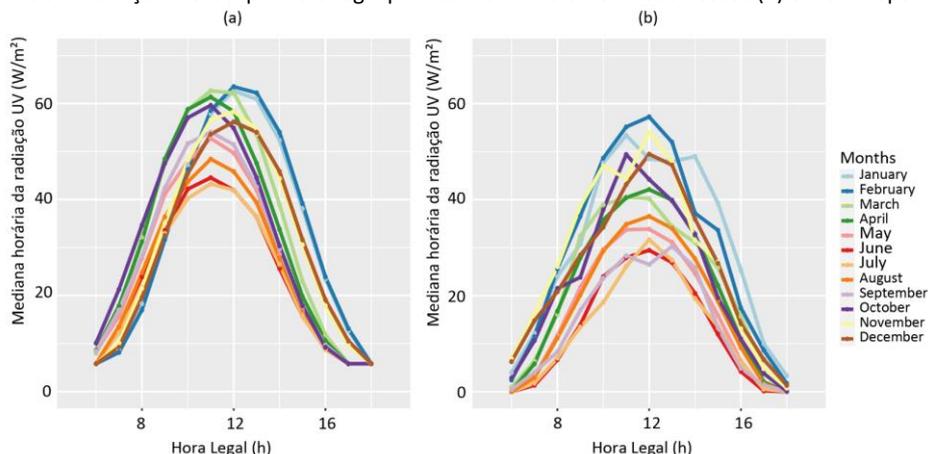
2c). Em Florianópolis, os resultados indicam uma variação horária e a ocorrência de valores tendendo a zero no início e no final do dia (Gráfico 2d). Em João Pessoa, as medianas UV registraram acima de 50 W/m² entre 11h e 13h – horário legal. Ao contrário, Florianópolis/SC atingiu medianas UV mais elevadas próximas a 30 W/m² no mesmo intervalo de tempo. Maior variabilidade dos dados foi observada em latitude média (27°), decrescente a zero e máximas acima de 70 W/m², principalmente das 10h às 13h – horário legal. Em baixas latitudes (7°), maiores e menores ocorrências foram alcançadas acima de 70 W/m² e 20 W/m², respectivamente. Às 6h e 18h, a menor irradiância UV estava acima de 6 W/m² para João Pessoa e próxima de zero para Florianópolis.

Como dados não apresentam normalidade nas distribuições, a associação das variáveis foi medida por meio do teste de correlação não-paramétrica de Spearman, "ρ" (/rho), que determina o grau de dependência, resultando em alta correlação positiva (ρ > +0,80) entre radiação global e UV, +0,89 para João Pessoa e +0,80 para Florianópolis. Isto pode indicar que os efeitos da radiação UV podem estar associados à radiação global.

3.2. Radiação ultravioleta: variação mensal e sazonal

As mudanças diárias das medianas horárias de UV para as duas cidades são mostradas na Gráfico 3. Os resultados demonstraram que a maior radiação UV ocorreu ao meio-dia (hora legal). No entanto, as medianas UV diminuíram especialmente nos meses de inverno (junho/julho). Para esta estação, normalmente os efeitos atenuantes da radiação UV são causados pelo aumento das chuvas e nebulosidade em João Pessoa/PB e pelo baixo AES, céu com predominância nublado e menor fotoperíodo (duração do dia) em Florianópolis/SC. A radiação UV atingiu valores acima de 60 W/m² em um intervalo de 10 h e 13 h de janeiro a abril (verão e outono) em João Pessoa e obteve medianas máximas acima de 50 W/m², não superior a 60 W/m², em janeiro, fevereiro e novembro em Florianópolis. No início e no final do dia (6h e 18h), as medianas variaram de 0 a 10 W/m².

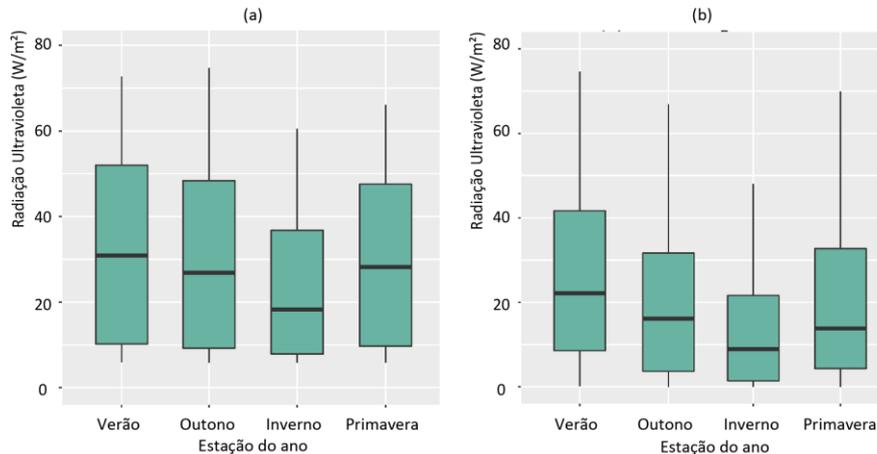
Gráfico 3 – Variação mensal por hora legal para as medianas UV em João Pessoa (a) e Florianópolis (b)



A distribuição sazonal do UV é bastante semelhante ao comportamento horário mediano com níveis mais elevados de radiação UV em João Pessoa (Gráfico 4a). Os valores também foram ligeiramente superiores aos do verão, com 50% dos dados entre 10 W/m² e 50

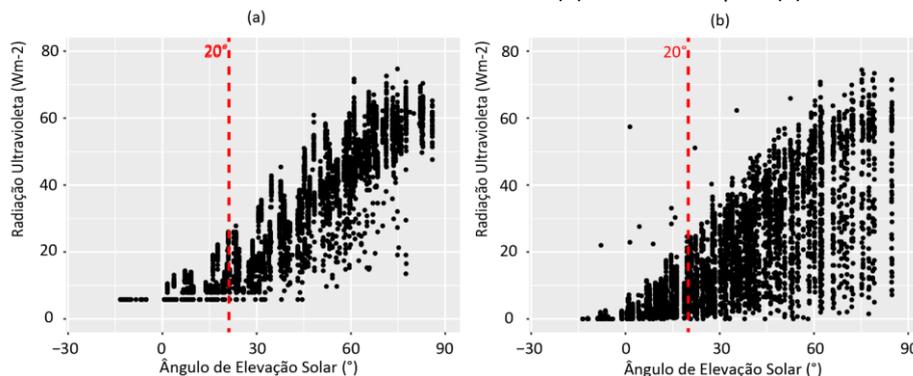
W/m² e mediana próxima a 30 W/m². Os resultados sugerem desempenho semelhante no outono e na primavera. Em Florianópolis, houve maior variabilidade entre o terceiro quartil e o valor máximo. Já a menor ocorreu no inverno com mediana próxima a 10 W/m² e variação entre 5 e 20 W/m² na faixa interquartil (Gráfico 4b).

Gráfico 4 – Variações sazonais de radiação UV em João Pessoa 9 (a) e em Florianópolis (b)



Para avaliar os padrões de síntese de vitamina D, adotou-se um AES superior a 20°. Há uma maior intensidade diária de radiação UVB próximo ao zênite (90°), devido à redução das massas de ar relativas. O comportamento anual da irradiação UV em função do AES para as cidades é mostrado na Gráfico 5. Os valores máximos de UV foram alcançados quando o sol atingiu posições mais altas no céu, mais precisamente ao meio-dia solar (AES~90°). Em ângulos acima de 20°, João Pessoa (Gráfico 5a) obteve radiação UV maior que Florianópolis (Gráfico 5b). Um aumento na dispersão da irradiância foi observado na latitude média, mesmo em ângulos mais próximos do pico, devido à possível variação das condições atmosféricas e ao aumento de nuvens. Para esta latitude, uma interferência do efeito sazonal também é evidente.

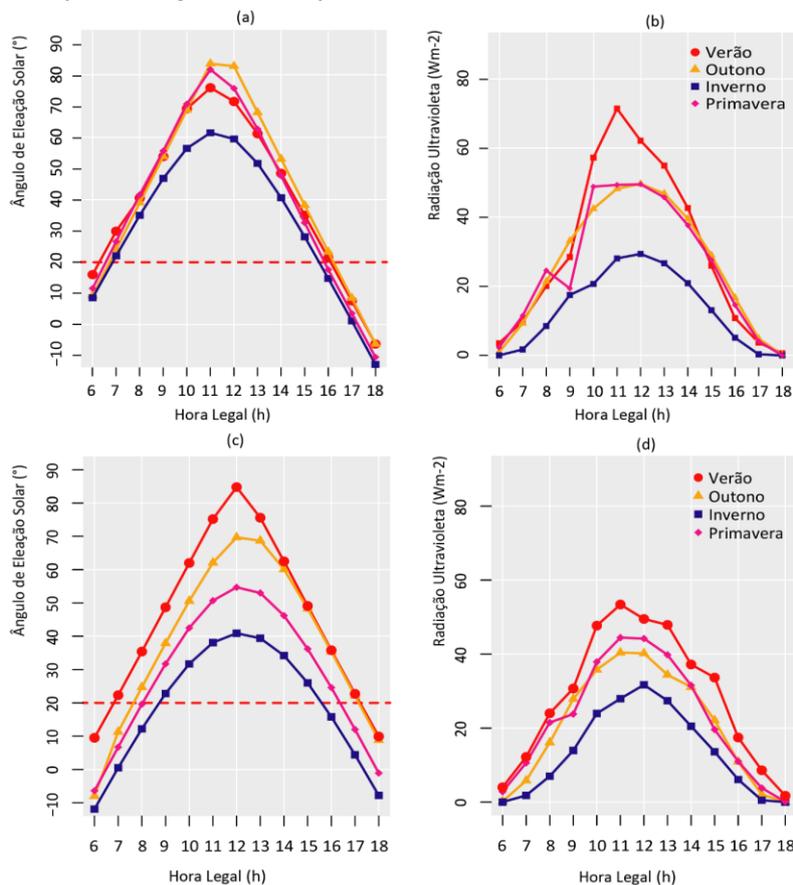
Gráfico 5 – UV e AES anuais em João Pessoa (a) e em Florianópolis (b)



Usando como referência o dia que inicia cada estação, a hora legal e a hora solar foram relacionadas com a irradiação UV nas cidades (Gráfico 6). Para João Pessoa, o outono e a primavera apresentam maior AES próximo ao meio-dia solar (hora local = 11h30), atingindo aproximadamente 80°. Considerando o AES acima de 20° para referência de síntese de vitamina

D, a margem diária de radiação UVB na cidade de baixa latitude é das 7h às 15h30 para o inverno com um pico de AES de 60° às 11h (hora legal). Os valores máximos de radiação UV foram 63Wm-2, 60 W/m², 57 W/m² e 45 W/m² no verão, outono, primavera e inverno, respectivamente.

Gráfico 6 – Radiação UV e ângulos de elevação solar (AES) em João Pessoa (a, b) e em Florianópolis (c, d)



Para a latitude média em Florianópolis, o menor AES (de -10° a 40°) é atingido no inverno e, conseqüentemente, a menor radiação ultravioleta. No verão, o AES atinge 10° e ultrapassa 80°. As irradiações solares do meio-dia registraram 30 W/m² no inverno até 55 W/m² no verão. No outono e na primavera, o UV atingiu valores próximos a 40 W/m². Quanto à possibilidade de síntese de vitamina D, o intervalo diário para Florianópolis é das 8h30 às 15h no inverno e das 7h às 17h no verão, com pico próximo ao meio-dia.

3.3. Diferença estatística entre as cidades

Aplicando o teste não-paramétrico Wilcoxon Rank, as irradiações UV em João Pessoa apresentaram maiores ocorrências quando comparada a Florianópolis com diferença estatisticamente significante ($V= 9501899$, $p < 0,001$). A diferença nos valores estimados tende a ser de 7,54 W/m² com intervalo de confiança de 95% variando entre 7,18 e 7,91. O Gráfico 7 e a Tabela 1 mostram a distribuição da radiação UV nas cidades por faixas de tempo (com ênfase nas medianas) e o resultado do teste de hipóteses com as diferenças estimadas em cinco horários específicos (das 8h às 16h), respectivamente.

Gráfico 7 – Distribuição da radiação ultravioleta por faixas temporais em João Pessoa (a) e Florianópolis (b)

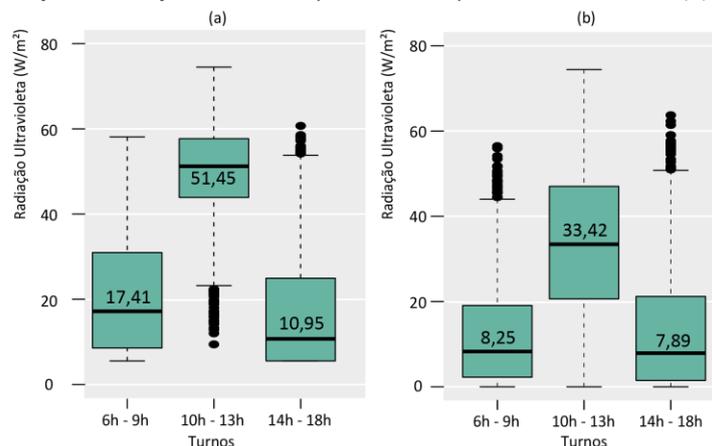


Tabela 1 – Teste de Wilcoxon – Diferenças de radiação UV nas cidades

Hora Legal	Intervalo de Confiança	Diferença estimada (W/m²)
Manhã – 8h	7,85 – 10,42	9,14
Manhã – 10h	15,21 – 19,13	17,19
Meio-dia – 12h	14,69 – 19,47	17,07
Tarde – 2h	5,67 – 9,47	7,48
Tarde – 4h	1,90 – 3,57	2,75

Tabela 2 – Teste de Wilcoxon – Diferenças mensais entre cidades

Estação – mês	Intervalo de Confiança	Diferença estimada (W/m²)
Verão – janeiro	1,55 – 3,72	2,57
Outono – março	8,08 – 11,06	9,50
Inverno – agosto	6,97 – 8,97	7,96
Primavera – novembro	2,31 – 5,24	3,72

Pela manhã, a diferença estimada de radiação UV entre as cidades é de 9,14 W/m² às 8h e vai até 17,19 W/m² às 10h, e esta constante vai até o meio-dia (17,07 W/m²). A redução gradativa foi alcançada no período da tarde com 2,75 W/m² às 16 horas. De acordo com as medianas mensais, as estimativas de irradiância UV nos meses mais representativos de cada estação do ano foram comparadas e apresentadas na Tabela 2. Os maiores efeitos das diferenças são no outono (março) com 9,50 W/m² e no inverno (agosto) com 7,96 W/m². Em contraste, janeiro (verão) e novembro (primavera) reduziram para 2,57 W/m² e 3,72 W/m², respectivamente.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a relação entre irradiância global e ultravioleta em cidades brasileiras de baixa e média latitude (7°S e 27°S). Os valores anuais de radiação UV em uma série temporal foram coletados em estações instaladas nas cidades de João Pessoa/PB (INMET, 2013) e Florianópolis/SC (INMET, 2020). As radiações horárias apresentaram maiores variações quando comparadas às sazonais. A cidade de latitude média apresentou maior variabilidade dos dados horários com tendência mínima a zero. Além disso, foi observada uma forte relação entre radiação UV e global, com tendência positiva ($p \geq 0,80$). Os valores de pico foram observados

em horários próximos ao meio-dia legal, devido à redução das massas de ar e às condições de céu claro, sendo próximo às 11h em João Pessoa e entre 12h e 13h em Florianópolis.

Outro fator potencial que justifica a alta irradiância UV é o ângulo de elevação solar, que é maior ao meio-dia. O AES é referência por ser o período em que se inicia a incidência de UVB na atmosfera com possibilidade de síntese de vitamina D. Acredita-se que o tempo máximo de UVB seja responsável por queimaduras solares e câncer de pele, por isso é igualmente importante determinar esses períodos em cada cidade. Em João Pessoa, o AES $>20^\circ$ é atingido antes das 7h, com diferenças mínimas entre as estações. Já em Florianópolis, o sol atinge sua altura mínima às 7h no verão e às 9h no inverno. Considerando o tempo ideal para síntese D (MCKENZIE; LILEY; JOHNSTON, 2009), a produção de vitamina D em ambas as cidades inicia antes do critério baseado em estudos de Holick (2004). O conhecimento do tempo de exposição solar saudável pode ser altamente eficaz na prevenção da deficiência de vitamina D e evitar as consequências nocivas do excesso de radiação solar.

Estar geograficamente localizado muito próximo à linha do Equador é a causa de altos níveis de radiação (global e UV) praticamente durante todo o ano no Estado da Paraíba, particularmente na capital João Pessoa. Assim, esta cidade apresentou a maior diferença estimada ao meio-dia legal (17,09 W/m²) e a menor às 16 horas (2,54 W/m²) em relação a Florianópolis. Além da latitude, estar a 45m acima do nível do mar pode ter interferido nessas diferenças, bem como causado mudanças na intensidade da radiação. O verão atingiu alta incidência de radiação ultravioleta por ser um período com baixa frequência de nebulosidade para as cidades. No entanto, o outono apresentou a maior diferença UV estimada, com 9,50 W/m² em João Pessoa. Apesar da menor concentração de ozônio durante o inverno e da ocorrência de chuvas, há aumento da nebulosidade e umidade relativa, que são causas da atenuação da radiação UV, atingindo diferenças de 7,96 W/m².

As irradiâncias UV próximas ao meio-dia solar podem representar um risco considerável para a saúde, mesmo que sejam suficientes para garantir a síntese de vitamina D. Assim, é essencial verificar o horário mínimo e o intervalo de tempo em que os raios UV atingem a atmosfera. Esse tipo de estudo esclarece e traz orientações sobre períodos de baixa e alta intensidade radiativa, considerando as diferentes faixas de ultravioleta A e B, além de implicações como danos cutâneos e estimulação da vitamina D. Ainda assim, contribui para um melhor entendimento da incidência da irradiância ultravioleta em locais com latitudes e características climáticas semelhantes.

REFERÊNCIAS

AUTIER, P.; DORÉ, J. F. Ultraviolet radiation and cutaneous melanoma: A historical perspective. *Melanoma Research*, v. 30, n. 2, p. 113–125, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/cmr.0000000000000609>. Acesso em: junho de 2023.

BRASIL Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 5734/2013**, de 6 de junho de 2013. Autoriza a Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz) a disponibilizar medicamentos, mediante ressarcimento, e dá outras providências. Brasília: Câmara dos Deputados, 2013. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=580055>. Acesso em: junho de 2023.

CABÚS, R.; RIBEIRO, P. V. S. **Simulação em Conforto Ambiental: Aprendendo a Utilizar o TropSolar 5**. Maceió, AL: Instituto Lumeeiro, 2015. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/grupopesquisa/grilu/bib/AprendendoaUtilizaroTropSolar5.pdf>. Acesso em: junho de 2023.

CANADA, J.; PEDROS, G.; BOSCA, J. V. Relationships between UV (0.290 - 0.385 μ m) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy*, v. 28, n. 3, p. 199–217, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00111-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00111-1). Acesso em: junho de 2023.

DELCOURT, C. *et al.* Lifetime exposure to ambient ultraviolet radiation and the risk for cataract extraction and age-related macular degeneration: The alienor study. **Investigative Ophthalmology and Visual Science**, v. 55, n. 11, p. 7619–7627, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1167/iov.14-14471>. Acesso em: junho de 2023.

ENGELSEN, O. The relationship between ultraviolet radiation exposure and vitamin D status. **Nutrients**, v. 2, n. 5, p. 482–95, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nu2050482>. Acesso em: junho de 2023.

ESCOBEDO, J. F. *et al.* Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 3, p. 299–309, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013>. Acesso em: junho de 2023.

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, 1 jun. 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/archderm.124.6.869>. Acesso em: junho de 2023.

FONTANIVE, T. O. *et al.* Seasonal variation of vitamin D among healthy adult men in a subtropical region. **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 66, n. 10, p. 1431–1436, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9282.66.10.1431>. Acesso em: junho de 2023.

GRANT, W. B.; BHATTOA, H. P.; PLUDOWSKI, P. Determinants of Vitamin D Deficiency From Sun Exposure: A Global Perspective. In: **Vitamin D: Fourth Edition**. Elsevier Inc., 2017. v. 2, p. 79–90. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809963-6.00061-4>. Acesso em: junho de 2023.

HABTE, A. *et al.* Estimating Ultraviolet Radiation from Total Radiation. Solar Power International. **Anais...Anaheim, CA**: set. 2018. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72429.pdf>. Acesso em: junho de 2023.

HOLICK, M. F. Sunlight and vitamin D for bone health and prevention of autoimmune diseases, cancers, and cardiovascular disease. **The American journal of clinical nutrition**, v. 80, n. 6, p. 1678–1688, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.6.1678s>. Acesso em: junho de 2023.

HOSSEIN-NEZHAD, A.; HOLICK, M. F. Vitamin D for health: A global perspective. **Mayo Clinic Proceedings**. **Anais...Elsevier Ltd**, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016%2Fj.mayocp.2013.05.011>. Acesso em: junho de 2023.

INMET. **Banco de dados meteorológico para ensino e pesquisa-João Pessoa/PB**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: junho de 2023.

INMET. **Banco de dados meteorológico para pesquisa-Florianópolis/SC**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: junho de 2023.

LEAL, S. **Medição, análise e mapeamento da radiação solar UV no Estado de Pernambuco**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9314>. Acesso em: junho de 2023.

MACLAUGHLIN, J. A.; ANDERSON, R. R.; HOLICK, M. F. Spectral Character of Sunlight Modulates Photosynthesis is of previtamin D3 and Its Photoisomers in Human Skin. **Science**, v. 216, n. 4549, p. 1001–1003, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.6281884>. Acesso em: junho de 2023.

MADRONICH, S. The Atmosphere and UV-B Radiation at Ground Level. In: **Environmental UV photobiology**. Boston, MA: Springer, p. 1–39, 1993. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2406-3_1. Acesso em: junho de 2023.

MANTELLI, S. L. N.; MARTINS, G. L.; RUTHER, R. Uncertainty analysis of solar monitoring station: A case study. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019. **Anais... International Solar Energy Society**, 2020. Disponível em: <https://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0208-MantelliNeto.pdf>. Acesso em: junho de 2023.

MCKENZIE, R.; LILEY, B.; JOHNSTON, P. Balancing risks and benefits of UV radiation Atmospheric Research Exposure time for light skin (minutes). **Water & Atmosphere**, v. 17, n. 1, p. 24–25, 2009. Disponível em: <https://niwa.co.nz/sites/default/files/import/attachments/risks.pdf>. Acesso em: junho de 2023.

MEHNATI, P. *et al.* Assessment of solar ultraviolet radiation in Tabriz city, Iran. **International Journal of Radiation Research**, v. 19, n. 2, p. 437–441, 2021. Disponível em: <https://ijrr.com/article-1-3673-en.pdf>. Acesso em: junho de 2023.

MULLENDERS, L. H. F. Solar UV damage to cellular DNA: From mechanisms to biological effects. **Photochemical and Photobiological Sciences**. Royal Society of Chemistry, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c8pp00182k>. Acesso em: junho de 2023.

PEREIRA-SANTOS, M. *et al.* Vitamin D deficiency and associated factors among pregnant women of a sunny city in Northeast of Brazil. **Clinical Nutrition ESPEN**, v. 23, p. 240–244, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2017.09.007>. Acesso em: junho de 2023.

QIN, W. *et al.* A novel efficient broadband model to derive daily surface solar Ultraviolet radiation (0.280-0.400 μm). **Science of the Total Environment**, v. 735, p. 139513, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139513>. Acesso em: junho de 2023.

RAZZAQUE, M. S. Sunlight exposure: Do health benefits outweigh harm? **Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2016.09.004>. Acesso em: junho de 2023.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, Boston, 2022. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso em: 28 jun. 2022. Disponível em: Acesso em: junho de 2023.

SANTOS, B. R. *et al.* Vitamin D deficiency in girls from South Brazil: a cross-sectional study on prevalence and association with vitamin D receptor gene variants. **BMC Pediatrics**, v. 12, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1471-2431-12-62>. Acesso em: junho de 2023.

SCHALKA, S.; STEINER, D. **Consenso brasileiro de fotoproteção—Fotoproteção no Brasil: Recomendações da Sociedade Brasileira de Dermatologia**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: www.sbd.org.br. Acesso em: junho de 2023.

TIBA, C.; LEAL, S. Modelagem do IUV a partir da irradiação UV (A+B) em Recife (PE). **Revista Brasileira de Energia Solar Ano**, v. 3, n. 1, p. 8–14, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.59627/rbens.2012v3i1.72>. Acesso em: junho de 2023.

TIBA, C.; SILVA LEAL, S. DA. Enhancement of UV radiation by cloud effect in NE of Brazil. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/8107435>. Acesso em: junho de 2023.

UNGER, M. D. *et al.* Vitamin D status in a sunny country: Where has the sun gone? **Clinical Nutrition**, v. 29, n. 6, p. 784–788, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2010.06.009>. Acesso em: junho de 2023.

VAN DER LEUN, J. C. The ozone layer. **Photodermatology, photoimmunology & photomedicine**, v. 20, p. 159–162, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.2004.00091.x>. Acesso em: junho de 2023.

WACKER, M.; HOLICK, M. F. Sunlight and Vitamin D: A global perspective for health. **Dermato-Endocrinology**, v. 5, n. 1, p. 51-108, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4161/derm.24494>. Acesso em: junho de 2023.

WEBB, A. R.; ENGELSEN, O. Ultraviolet Exposure Scenarios: Risks of Erythema from Recommendations on Cutaneous Vitamin D Synthesis. Em: REICHRATH, J. (Ed.). **Sunlight, Vitamin D and Skin Cancer**. New York: Springer, v. 624p. 72–85, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-0-387-77574-6_6. Acesso em: junho de 2023.

WHO. **Global solar UV index: A practical guide**. World Health Organization, 2002. Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42459/9241590076.pdf?sequence=1>. Acesso em: junho de 2023.

WRIGHT, C. Y. *et al.* A Comparison of Solar Ultraviolet Radiation Exposure in Urban Canyons in Venice, Italy and Johannesburg, South Africa. **Photochemistry and Photobiology**, v. 96, n. 5, p. 1148–1153, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/php.13291>. Acesso em: junho de 2023.