



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE DEVIDO AO EFEITO “CLOUD ENHANCEMENT”

Vitor Marvulle de Almeida

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pelo Professor Dr. Fernando Ramos Martins, pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE DEVIDO AO EFEITO “CLOUD ENHANCEMENT”

Vitor Marvulle de Almeida

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pelo Professor Dr. Fernando Ramos Martins, pela Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP).

RESUMO

Estudos cada vez mais aprofundados sobre a radiação solar incidente na atmosfera promovem o conhecimento necessário para entendermos as causas, os efeitos e as formas em que podemos explorar de maneira sustentável essa fonte de energia renovável. Este projeto de pesquisa tem como objetivo principal realizar um estudo para compreender a ocorrência de eventos extremos de irradiância solar incidente na superfície associados com o espalhamento de radiação solar em bordas de nuvens, causados pelo efeito denominado Cloud Enhancement. Estes fenômenos são observados em decorrência das medições de estações radiométricas espalhadas por todo o globo terrestre e comparados aos diversos modelos de céu claro presente na literatura. Neste estudo, será utilizado como referência o Modelo de céu claro (C) apresentado por Iqbal e os dados das estações radiométricas da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais). Para realização dessa análise, foi utilizada modelagem numérica em linguagem de programação Python, afim de apresentar a ocorrência de tais eventos extremos usando como comparação as medições das estações e os dados calculados. Como resultado não foi possível gerar os gráficos necessários para tal observação, entretanto, o programa é capaz de gerar os dados e armazená-los em DataFrames (tabelas).

Palavras-Chave: Radiação Solar. Cloud Enhancement. Modelo de céu claro. Modelagem numérica.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 01 – DataFrame com os valores da Radiação Direta, Difusa e Global calculadas de hora em hora para a estação de Petrolina/PE, utilizando o Modelo C - Iqbal.	20
Figura 02 – DataFrame com os valores da Radiação Direta, Difusa e Global organizadas de hora em hora e geradas a partir da medição da estação de Petrolina/PE.....	21
Figura 03 – Código para geração dos DataFrames (destaque para input do endereço para qualquer estação).....	22
Figura 04 – Código para geração dos DataFrames (destaque para input das coordenadas geográficas para qualquer estação).....	22

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

NASA	National Aeronautics and Space Administration
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
WRC	World Radiation Center
CNTP	Condições Normais De Temperatura E Pressão
IDE	Integrated Development Environment

LISTA DE SÍMBOLOS

E_0	Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre
Γ	Ângulo diário
dn	Dia numérico do ano
δ	Declinação solar
E_t	Equação do tempo
θ_z	Ângulo zenital
φ	Latitude
ω	Ângulo horário
π	Pi (3,14159...)
TOA	Irradiância no topo da atmosfera
i_{sc}	Constante solar
i_n	Radiação direta normal
i_d	Radiação difusa
i_{dr}	Radiação de banda-larga difusa na superfície devido ao espalhamento Rayleigh
i_{da}	Radiação difusa devido ao espalhamento do aerossol que passa pela primeira camada da atmosfera
i	Radiação global
i_{dm}	Radiação difusa produzida pelas múltiplas interações entre a superfície e a atmosfera
F_c	Razão da energia espalhada na direção a frente pela energia espalhada total
T_r	Transmitância para a radiação direta devido ao espalhamento produzido pelas moléculas de ar (Rayleigh)
T_o	Transmitância para a radiação direta devido a absorção do ozônio

T_g	A transmitância para a radiação direta devido à absorção dos gases misturados
T_w	Transmitância para a radiação direta devido à absorção do vapor d'água
T_a	Transmitância para a radiação direta devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis
T_{aa}	Transmitância da radiação direta devido à absorção do aerossol
T_{as}	Fração da energia incidente transmitida devido ao espalhamento dos aerossóis
m_a	Massa óptica relativa
m_r	Massa óptica relativa não corrigida
ρ_g	Albedo da superfície
ρ'_a	Albedo de céu claro
p	Pressão local em milibars
p_s	Pressão parcial do vapor d'água no ar saturado
w	Água precipitável calculada, em cm
ω_0	Albedo de espalhamento único
ϕ_r	Umidade relativa na superfície, expressa em “%”
T	Temperatura na superfície em graus Kelvin
U_3	Caminho ótico relativo do ozônio
U_1	Pressão corrigida do caminho ótico da água precipitável
l	Espessura da camada vertical de ozônio

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivo	9
2 METODOLOGIA.....	10
2.1 Modelo C - Iqbal.....	10
2.1.1 Parâmetros astronômicos.....	11
2.2 Radiação Direta	14
2.3 Radiação Difusa	17
2.4 Radiação Global.....	19
2.5 Código em Python.....	19
3 RESULTADOS OBTIDOS	20
4 CONCLUSÃO.....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1 INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar que incide na superfície é de suma importância para entendermos o funcionamento da vida na Terra, desde a sua influência em processos micro meteorológicos, relacionado aos fluxos turbulentos atmosféricos, aos processos em grande escala, que promovem o aquecimento e circulação geral da atmosfera. No atual contexto de desenvolvimento sustentável, a humanidade busca fontes alternativas de energia, sendo a energia solar uma destas fontes (BELÚCIO et al., 2014).

Segundo Yamasoe (2016), as nuvens, assim como as características físicas da superfície sobre a qual a radiação solar incide, também desempenham um papel importante no balanço de radiação do sistema na Terra. Dessa forma, alterações na composição química, na concentração, na quantidade e em outras propriedades de gases, os aerossóis e nuvens que interagem com a radiação eletromagnética podem afetar o perfil de temperatura e, por conseguinte, o perfil de pressão da atmosfera. Thomas e Stamnes (1999) complementam, indicando que caso esta esteja suficientemente úmida e na presença de núcleos de condensação, as nuvens podem alterar a distribuição de radiação solar incidente emitindo e/ou absorvendo radiação infravermelha na superfície.

A energia emitida pelo Sol, em forma de radiação eletromagnética, é medida em Joules, do qual, o fluxo em função do tempo é medido em Watts (J/s). Quando esse fluxo atravessa uma determinada área, é chamado de irradiância. Ou seja, a irradiância em um determinado ponto de uma superfície é definido como sendo a razão entre o fluxo de radiação e a área do elemento de superfície, cuja unidade é W/m^2 . (GÓMEZ et al., 2018)

Pesquisas e estudos científicos realizados em diversos centros de análise de dados meteorológicos, mostram picos de radiação solar a cima dos valores da curva modelo que representa a condição de céu limpo. Esse efeito, conhecido como Cloud Enhancement, pode durar por vários minutos em locais com condições de ventos adequadas (velocidades relativamente baixas) (YORDANOV et al., 2013).

Pode-se dizer que, este fenômeno, é um efeito contra intuitivo por se tratar de um evento climático em que a incidência de radiação solar na superfície é maior quando se tem nuvens (parcialmente nublado) do que o esperado em condições de ausência de nuvens.

1.1 Objetivo

Este projeto de pesquisa, por sua vez, tem como objetivo caracterizar esses eventos extremos, através da comparação e análises estatísticas entre os valores de radiação global observados nas estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), em suas diversas localidades a qual estão instaladas pelo território brasileiro, com modelos empíricos que estimam uma condição de céu claro para aquela condição e região, tornando possível, assim, a visualização de valores que extrapolam a curva modelo, ocasionados pelo efeito Cloud Enhancement.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo C - Iqbal

Dentro os mais diversos modelos de irradiância de céu claro disponíveis na literatura, Iqbal (1983) nos apresenta três modelos, denominados A, B e C, sendo o último o mais acurado e com resultados mais promissores. Este, por sua vez, é baseado em dois estudos desenvolvidos por Bird e Hulstron (1980, 1981). Onde, no primeiro estudo, fora realizada uma comparação detalhada entre diversos modelos de incidência de radiação direta. Eles compararam cada elemento individualmente utilizando um rigoroso modelo, denominado SOLTRAN, construído a partir do modelo LOWTRAN desenvolvido por Selby e McClatchey (1975) e Selby et al (1978).

Com base nestas análises e comparações, foram desenvolvidas equações parametrizadas para a transmitância de cada constituinte atmosférico, sendo esses, o espalhamento pelas moléculas de ar (espalhamento Rayleigh), transmitância devido a absorção da camada de ozônio, transmitância devido à absorção dos gases uniformemente misturados, transmitância devido a absorção pelo vapor d'água, e o espalhamento e absorção pelos aerossóis.

Para o modelo C descrito em Iqbal (1983), serão utilizados como dados de entrada:

- Latitude;
- Longitude;
- Dia do ano;
- Horário (com precisão de minutos);
- Pressão atmosférica (para o cálculo da massa óptica de ar e comprimento óptico relativo ao ozônio);

- Temperatura do ar (para o cálculo de pressão parcial do vapor d'água);
- Umidade relativa do ar (para o cálculo de água precipitável);
- Visibilidade horizontal (para o cálculo de transmitância do aerossol);
- Albedo de superfície e de dispersão simples;
- Fração de dispersão direta para dispersão total.

2.1.1 Parâmetros astronômicos

Para implementação do modelo, primeiro, é necessário calcular alguns parâmetros básicos que serão utilizados nas equações posteriores para obtenção dos valores referentes aos modelos de Radiação Direta, Difusa e Global, sendo esses, a distância Terra-Sol, declinação solar, equação do tempo, fator de correção da excentricidade terrestre, ângulo zenital e incidência de radiação no topo da atmosfera.

Tem-se que a distância Terra-Sol, em seu equinócio, corresponde a 1 AU (aprox. 1.496×10^8 km). Sabemos que esse valor altera ao longo do ano devido à órbita elíptica que a Terra realiza em torno do Sol. Com isso, Spencer (1971), desenvolveu uma fórmula capaz de calcular um fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, expresso por E_0 :

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma. \quad (2.1.1.1)$$

onde, Γ , em radianos, é denominado o ângulo diário e é expresso por:

$$\Gamma = 2\pi(dn-1) / 365 \quad (2.1.1.2)$$

e a variável dn, representa o dia numérico do ano, sendo 1 o dia 1º de Janeiro e 365, dia 31 de Dezembro. Para anos bissexto, o código implementado adiciona +1 após o dia 59 (28 de fevereiro).

Para o cálculo da declinação solar, em radianos, representada por δ , Spencer (1971) apresenta a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma \\ & - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma \\ & - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \quad (2.1.1.3)$$

A hora solar é baseada na rotação da Terra em torno de seu próprio eixo polar e de sua translação envolta do Sol. Um dia solar é o intervalo de tempo necessário para que o Sol complete um ciclo sobre um observador estacionário na Terra e não necessariamente tem 24 horas, pois pode variar devido pequenas discrepâncias durante o processo de rotação no plano elíptico Terra-Sol. Spencer (1971) apresentou essas discrepâncias através da equação do tempo (E_t), em minutos:

$$\begin{aligned} E_t = & (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma \\ & - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) (229.18). \end{aligned} \quad (2.1.1.4)$$

Nessa equação, o primeiro termo em parênteses representa o valor da E_t em radianos, o multiplicador (229.18) é adicionado à equação para a conversão em minutos.

Para calcularmos o tempo aparente de acordo com a localidade, adota-se a longitude padrão de -45° , por estarmos a Oeste do Meridiano de Greenwich em 45° . Assim, temos a seguinte expressão, em minutos:

$$\text{Tempo aparente} = \text{minuto local} - 4 (\text{longitude padrão} - \text{longitude local}) + E_t \quad (2.1.1.5)$$

sendo o minuto local e a longitude local dados de entrada para o código implementado.

No que se refere a cálculos de radiação solar que incidem em superfícies horizontais, é necessária a utilização de algumas relações trigonométricas entre a posição do Sol no céu e as coordenadas geográficas.

Para obtermos o valor do ângulo zenital (θ_z), temos que:

$$\cos \theta_z = \sin \delta [\sin \varphi (\pi/180)] + \cos \delta [\cos \varphi (\pi/180)] \cos \omega \quad (2.1.1.6)$$

onde, φ representa a latitude, em graus, e ω o ângulo horário, em radianos. Para obtermos o valor do ângulo horário, utiliza-se da seguinte expressão:

$$\omega = \{15 [12 - (\text{Tempo aparente}/60)]\} \pi/180 \quad (2.1.1.7)$$

Em posse desse valor, podemos aplicar as devidas relações trigonométricas para obter o seguinte resultado, em graus:

$$\theta_z = \arccos (\cos \theta_z) (180/\pi) \quad (2.1.1.8)$$

Para cálculo da irradiância no topo da atmosfera (TOA), será empregada a seguinte expressão:

$$\text{TOA} = I_{sc} E_0 \cos \theta_z \quad (2.1.1.9)$$

Sendo 1367 W/m^2 para a constante solar (\dot{I}_{sc}), o valor adotado pelo Centro de Radiação Mundial (WRC).

Em posse desses resultados, podemos agora calcular os modelos referentes às radiações direta, difusa e global.

2.2 Radiação Direta

A radiação direta normal instantânea é calculada pela expressão:

$$\dot{I}_n = 0.9751 \dot{I}_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (2.1.1.10)$$

O valor de 0.9751 se dá devido ao intervalo espectral considerado pelo SOLTRAN ser da ordem de $0.3\text{-}3.0 \mu\text{m}$, onde, em sua publicação original (BIRD; HULSTROM, 1980) atribuem a esse fator de multiplicação o valor de 0.9662, que representa uma constante solar na ordem de 1307 W/m^2 . Entretanto, o autor do modelo implementado neste trabalho, (IQBAL, 1983), realizou essa alteração conforme a constante solar (\dot{I}_{sc}) de 1367 W/m^2 , que representa um acréscimo de 2%.

A transmitância para a radiação direta devido ao espalhamento produzido pelas moléculas de ar (Rayleigh) é representada por τ_r ; τ_o é a transmitância para a radiação direta devido a absorção do ozônio; τ_g é a transmitância para a radiação direta devido à absorção dos gases misturados; τ_w é a transmitância para a radiação direta devido à absorção do vapor d' água e τ_a é a transmitância para a radiação direta devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis.

A transmitância devida ao espalhamento Rayleigh é obtida através da seguinte expressão:

$$\tau_r = \exp [-0.0903 m_a^{0.84} (1.0 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (2.1.1.11)$$

onde, m_a está representando a massa óptica relativa, nas condições locais, e é calculada por:

$$m_a = m_r (p / 1013.25) \quad (2.1.1.12)$$

Sendo p a pressão local em milibars e m_r a massa ótica relativa não corrigida. Esta, por sua vez, é calculada pela expressão elaborada por Kasten, (1965) usando o perfil de densidade do ar do Modelo Atmosférico ARDC de 1959, e o índice de refração no comprimento de onda de $0.7\mu\text{m}$, sendo assim:

$$m_r = [\cos \theta z + 0.15 (93.885 - \theta z)^{-1.253}]^{-1} \quad (2.1.1.13)$$

A transmitância devido à absorção do ozônio é obtida pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \tau_o = 1 - [0.1611 U_3 (1.0 + 139.48 U_3)^{-0.3035} \\ - 0.002715 U_3 (1.0 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2)^{-1}] \end{aligned} \quad (2.1.1.14)$$

onde, U_3 é o caminho ótico relativo do ozônio, calculado por:

$$U_3 = l m_r \quad (2.1.1.15)$$

e l é a espessura da camada vertical de ozônio, medida em centímetros, às condições normais de temperatura e pressão (CNTP), onde, a média global obtida segundo A. Newman (2020) do Observatório de Ozônio da NASA, é por volta de 300 Dobson Units, ou, 0.3 centímetros.

A transmitância devido à absorção dos gases uniformemente misturados é obtida através da seguinte equação:

$$\tau_g = \exp (-0.0127 m_a^{0.26}) \quad (2.1.1.16)$$

A transmitância devido à absorção do vapor d'água é parametrizada por:

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 [(1.0 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1]^{-1} \quad (2.1.1.17)$$

onde, U_1 é a pressão corrigida do caminho ótico da água precipitável, conforme Iqba1 (1983):

$$U_1 = w m_r \quad (2.1.1.18)$$

sendo w , a água precipitável calculada, obtida em centímetros, pela fórmula empírica elaborada por Leckner (1978), expressa a seguir:

$$w = 0.493 \phi_r ps / T \quad (2.1.1.19)$$

onde, a umidade relativa na superfície, expressa em “%” é ϕ_r , T é a temperatura na superfície em graus Kelvin, e ps é a pressão parcial do vapor d'água no ar saturado, obtida pela seguinte equação semi-empírica, apresentada por Iqbal, (1983):

$$ps = \exp (26.23 - 5416/T) \quad (2.1.1.20)$$

Para a transmitância da radiação direta devido ao espalhamento e absorção dos aerossóis, será empregada a seguinte expressão:

$$\tau_a = [0.97 - 1.265(\text{Vis})^{-0.66}] m_a^{0.9}, \quad 5 < \text{Vis} < 180 \text{ km} \quad (2.1.1.21)$$

Onde, para a visibilidade horizontal (Vis), será atribuído o valor de 15 km.

2.3 Radiação Difusa

Para a radiação difusa, utiliza-se da seguinte expressão:

$$I_d = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (2.1.1.22)$$

Sendo, a radiação de banda-larga difusa na superfície devido ao espalhamento Rayleigh (I_{dr}), obtido por:

$$I_{dr} = 0.79 I_{sc} \cos \theta_z T_o T_g T_w T_{aa} 0.5 (1 - \tau_r) / (1 - m_a + m_a^{1.02}) \quad (2.1.1.23)$$

onde, τ_{aa} , representa a transmitância da radiação direta devido à absorção do aerossol e é resultado da expressão:

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_o) (1 - m_a + m_a^{1.06}) (1 - \tau_a) \quad (2.1.1.24)$$

onde, para a variável ω_0 , que representa o albedo de espalhamento único, (BIRD; HULSTROM, 1980) recomendam atribuir um valor de 0.9, caso não haja um valor mais acurado disponível na medição.

A radiação difusa devido ao espalhamento do aerossol que passa pela primeira camada da atmosfera (\dot{I}_{da}), é dada por:

$$\dot{I}_{da} = 0.79 \dot{I}_{sc} \cos\theta_z T_o T_g T_w T_{aa} F_c (1 - T_{as}) / (1 - m_a + m_a^{1.02}) \quad (2.1.1.25)$$

onde, a fração da energia incidente transmitida devido ao espalhamento dos aerossóis (T_{as}), é obtida por:

$$T_{as} = T_a / T_{aa} \quad (2.1.1.26)$$

Para este modelo, recomenda-se o uso do valor constante de 0.84 para F_c (razão da energia espalhada na direção a frente pela energia espalhada total).

Para a última variável da equação (22), que representa a radiação difusa produzida pelas múltiplas interações entre a superfície e a atmosfera (\dot{I}_{dm}), utiliza-se da seguinte expressão:

$$\dot{I}_{dm} = (\dot{I}_n \cos\theta_z + \dot{I}_{dr} + \dot{I}_{da}) \rho_g \rho'a / (1 - \rho_g \rho'a) \quad (2.1.1.27)$$

onde, para a variável ρ_g , que representa o albedo da superfície, será empregado o valor fixo de 0.16 para todas as estações, ou seja, 16% de toda a radiação é espalhada de volta para a atmosfera pela superfície. Para a variável $\rho'a$, que representa o albedo de céu claro, utiliza-se da seguinte expressão:

$$\rho'a = 0.0685 + (1 - F_c) (I - T_{as}) \quad (2.1.1.28)$$

2.4 Radiação Global

Com todos os dados anteriores já calculados, pode-se agora, partir para a radiação global, que é obtida através da seguinte expressão:

$$I = I_n \cos\theta_z + I_d \quad (2.1.1.29)$$

A radiação global (I) será a irradiância empregada no modelo de céu claro a fim de comparar com o valor real obtido nas medições das estações, podendo, assim, visualizar através de gráficos a presença ou não de efeitos de irradiância extrema causados por “Cloud Enhancement”.

2.5 Código em Python

Por se tratar de um grande volume de dados a serem analisados, foi necessário o uso de ferramentas que permitem esse estudo de forma mais rápida e aprofundada. Para isso, utilizou-se da programação em Python, que permite criar grandes bancos de dados em forma de tabelas/matrizes (Dataframes), além de inúmeras bibliotecas extremamente funcionais para a execução de tarefas específicas, tais como, Pandas, NumPy, Matplotlib, entre outras.

Assim, todos os cálculos e as devidas relações matemáticas, foram realizadas em linguagem Python (versão 3.7.6) utilizando como ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) o software Spyder (versão 4.0) indicado para programação científica e Data Science. Uma das principais vantagens de se trabalhar com essa linguagem é a sua sintaxe de forma simples, além de sua ampla aplicabilidade e fácil compreensão, quando comparada a outros tipos de linguagens.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Devido as dificuldades encontradas durante o processo de realização do projeto científico, o desenvolvimento em relação ao código de programação que seria responsável pela análise estatística e produção dos gráficos de modelo de céu claro e dos modelos extraídos das medições da rede SONDA, não obteve êxito. Sendo possível, somente, a produção dos DataFrames (tabelas) com os dados gerados empiricamente a partir dos cálculos e o com os dados das medições reais das estações. Como dispostos a seguir.

Figura 01 – DataFrame com os valores da Radiação Direta, Difusa e Global calculadas de hora em hora para a estação de Petrolina/PE, utilizando o Modelo C - Iqbal.

DATA	Rad. Direta	Rad. Difusa	Rad. Global
2019-02-01 05:00:00	nan	nan	nan
2019-02-01 06:00:00	31.3068	20.7803	23.1191
2019-02-01 07:00:00	339.945	108.642	216.63
2019-02-01 08:00:00	502.463	143.709	416.117
2019-02-01 09:00:00	587.955	162.59	593.478
2019-02-01 10:00:00	635.457	173.81	730.983
2019-02-01 11:00:00	659.38	179.693	815.452
2019-02-01 12:00:00	666.596	181.508	840.784
2019-02-01 13:00:00	658.333	179.381	804.557
2019-02-01 14:00:00	630.793	172.597	707.959
2019-02-01 15:00:00	577.548	160.203	560.518
2019-02-01 16:00:00	479.432	138.767	375.36
2019-02-01 17:00:00	286.51	96.555	172.018
2019-02-01 18:00:00	0.682645	4.00984	4.02249
2019-02-01 19:00:00	nan	nan	nan

Fonte: o Autor (2020)

Figura 02 – DataFrame com os valores da Radiação Direta, Difusa e Global organizadas de hora em hora e geradas a partir da medição da estação de Petrolina/PE.

DATA	Rad. Global	Rad. Direta	Rad. Difusa
2019-02-01 05:00:00	-85.125	0	-129.525
2019-02-01 06:00:00	-84.881	0	-126.059
2019-02-01 07:00:00	-84.927	0	-125.52
2019-02-01 08:00:00	187.138	0	177.002
2019-02-01 09:00:00	4099.29	3566.69	3898.17
2019-02-01 10:00:00	9901.1	810.522	10336.1
2019-02-01 11:00:00	20450.3	5358.97	17384.8
2019-02-01 12:00:00	43710.6	26212	21830.4
2019-02-01 13:00:00	53830.4	37351.6	18074.7
2019-02-01 14:00:00	59719.7	39482.7	19445.1
2019-02-01 15:00:00	62024.8	51346.8	10426.2
2019-02-01 16:00:00	56103	52586	7073.5
2019-02-01 17:00:00	46697.5	45173.8	10560.7
2019-02-01 18:00:00	30506.9	32005.2	11653.6
2019-02-01 19:00:00	16791.9	41288.8	4982.58

Fonte: o Autor (2020)

O código permite calcular para qualquer base de dados da rede SONDA, necessitando apenas da alteração no “input” do endereço do arquivo correspondente à base de dados e das coordenadas geográficas da respectiva estação que será analisada. Conforme mostram as figuras 03 e 04, a seguir.

Figura 03 – Código para geração dos DataFrames (destaque para input do endereço para qualquer estação)

```

85     astronomico[linha,:] = cos_toa(day, time, minute, local_lat, local_lon)
86     linha = linha +1
87
88
89     # criando o Df com dados astronomicos
90     df_toa=pd.DataFrame(data=astronomico, columns=['DIA','HORA','MINUTO', 'TOA', 'EXCENTRICIDADE', 'COSZ', 'Z'])
91     df_toa['DATA'] = pd.to_datetime(df_toa['DIA']-1, origin='2019', unit='d') + pd.to_timedelta(df_toa['MINUTO'], unit='
92     df_toa.set_index('DATA', inplace=True)
93
94
95     #criando Df com os dados SONDA
96     cabecalho = ['TO', 'ANO', 'DIA', 'MIN', 'Rad. Global', 'Rad. Direta', 'Rad. Difusa', 'Onda Longa', 'PAR', 'LUX', 'Temp. s
97     df_dadossonda = pd.read_csv("C:/Users/Vitor/Desktop/dados_SONDA/PTR1902ED/PTR1902ED.csv" sep = ";", header=None, names
98     df_dadossonda['DATA'] = pd.to_datetime(df_dadossonda['DIA']-1, origin='2019', unit='d') + pd.to_timedelta(df_dadossc
99     # df_dadossonda.set_index('DATA', inplace=True)
100    df_dadossonda.fillna(0, inplace=True)
101
102    #calculando a soma/média de 1h em 1h (radiométricos/meteorológicos)
103    df_dados = df_dadossonda.resample('H').agg({'Rad. Global': np.sum, 'Rad. Direta':np.sum, 'Rad. Difusa':np.sum, 'Temp. su
104
105
106    #limitando o range de seleção do .loc no Df "df_toa"
107    start = dt.datetime.strptime('2019-01-31 23:00:00', '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
108    end = dt.datetime.strptime('2019-03-01 00:00:00', '%Y-%m-%d %H:%M:%S')
109
110    #parâmetros já obtidos que serão utilizados:
111    cos_z = df_toa.loc[(df_toa.index > start) & (df_toa.index < end), 'COSZ']
112    p = df_dados.loc[:, 'Pressão']

```

Fonte: o Autor (2020)

Figura 04 – Código para geração dos DataFrames (destaque para input das coordenadas geográficas para qualquer estação)

```

7
8     ano = 2020
9     horas_dia = list(range(0, 24))
0     minute = 0
1     local_lat = -9
2     local_lon = -40
3     lon_padrao = -45
4
5     if (ano%4==0):
6         final_day = 366
7     else:
8         final_day = 365
9
10    num_linhas = final_day*len(horas_dia)
11    astronomico=np.zeros((num_linhas,7), dtype=float)
12
13    linha = 0
14    for day in range (1,final_day+1):

```

Fonte: o Autor (2020)

4 CONCLUSÃO

Embora não tenha alcançado um resultado satisfatório no que diz respeito a análise dos dados e produção dos gráficos para a observação do efeito “Cloud Enhancement”, o estudo realizado permitiu criar um programa em linguagem Python capaz de ler o banco de dados de uma estação e relacioná-lo com as variáveis empregadas para o cálculo do Modelo de Céu Claro (C), gerando assim, os cálculos necessários para tal análise e o armazenamento dos resultados em DataFrames.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. NEWMAN, P. **NASA Ozone Watch: Latest status of ozone**, 2020. Disponível em: <<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html>>. Acesso em: 1 jun. 2020.

BELÚCIO, L. P. et al. **Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP)**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. 4, p. 494–504, dez. 2014.

BIRD, R.; HULSTROM, R. **Direct insolation models**. Trans. ASME J. Sol. Energy Eng. 1980.

BIRD, R.; HULSTROM, R. **A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces**. p. 46, 1981.

GÓMEZ, J. M. R. et al. **A irradiância solar: conceitos básicos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, n. 3, 2018.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Toronto; New York: Academic Press, 1983.

KASTEN, F. **A new table and approximation formula for the relative optical air mass**. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, v. 14, n. 2, p. 206–223, 1 set. 1965.

LECKNER, B. **The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model**. Solar Energy, v. 20, n. 2, p. 143–150, 1978.

SELBY, J. E.; MCCLATCHEY, R. A. **Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 Microns: Computer Code LOWTRAN 3**: Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1975. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA017734>>. Acesso em: 1 jun. 2020.

YAMASOE, M.; DE PAULA CORREA, M. **Processos radiativos na atmosfera FUNDAMENTOS**. 2016.

YORDANOV, G. H. et al. **Overirradiance (Cloud Enhancement) Events at High Latitudes**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 3, n. 1, p. 271–277, jan. 2013.