Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

DOI: 10.5380/abclima

COMPARAÇÃO DO SALDO DE RADIAÇÃO MEDIDO E ESTIMADO NUMA ÁREA DE MATA ATLÂNTICA NO LITORAL ALAGOANO DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA

COMPARISON OF THE MEASURED AND ESTIMATED RADIATION BALANCE IN AN ATLANTIC FOREST AREA ON THE ALAGOAS COAST DURING THE RAINY SEASON

COMPARACIÓN DEL BALANCE DE RADIACIÓN MEDIDO Y ESTIMADO EN UN ÁREA DE BOSQUE ATLÁNTICO EN LA COSTA DEL ESTADO DE ALAGOAS DURANTE LA ESTACIÓN DE LLUVIAS

José Marcelo Lopes Júnior
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
josemarcelolopesjunior@hotmail.com

Marcos Antônio Lima Moura
Universidade Federal de Alagoas
malm@ccen.ufal.br

Carlos Alexandre Santos Querino
Universidade Federal do Amazonas
carlosquerino@ufam.edu.br

André Luiz de Carvalho
Universidade Federal de Alagoas
del.andre2@hotmail.com

Nayara Barreto da Costa
Universidade Federal de Alagoas
nayarabarretodacosta@gmail.com

Misael Ferreira dos Santos
Universidade Federal de Alagoas
misael.santos@icat.ufal.br

Resumo: O estudo do saldo de radiação em áreas florestais é essencial, pois torna-se possível demonstrar como a floresta interage com a atmosfera e quais os potenciais impactos devido à substituição da vegetação original, por áreas urbanas, pastos ou áreas cultivadas. O principal objetivo deste trabalho foi comparar o saldo de radiação e suas componentes medidas e estimadas na Mata Atlântica no estado de Alagoas durante a estação chuvosa. As medidas foram realizadas por instrumentos instalados em uma torre micrometeorológica dentro da Mata Atlântica no município de Coruripe, entre 13 de abril e 13 de julho de 2017. A estimativa do saldo de radiação foi realizada através da soma do balanço de radiação de ondas curtas e ondas longas estimados. A comparação dos dados medidos com os calculados foi realizada por meio de regressão linear. A estimativa do saldo de radiação apresentou um erro médio absoluto de 0,30 e a raiz do erro quadrático médio de 3,13. O coeficiente de determinação foi baixo (0,19), em contraste com o índice de concordância de Willmott (0,64) demonstrando que apesar de não haver uma boa correlação entre os dados, ainda existe um nível de concordância razoável entre os mesmos.
Palavras-chave: Radiação solar. Micrometeorologia. Hotspot de biodiversidade.

Abstract: The study of radiation balance in forest areas is essential, because it becomes possible to demonstrate how the forest interacts with the atmosphere and the potential impacts of replacing the original vegetation with urban areas, pastures or cultivated areas. The main aim of this paper was to compare the radiation balance and its measured and estimated components in the Atlantic Forest in the state of Alagoas during the rainy season. The measures were carried out by instruments installed in a micrometeorological tower placed within the Atlantic Forest in the municipality of Coruripe, from April 13 to July 13, 2017. The estimation of the radiation balance was made by summing the estimated shortwave and longwave radiation balance. Comparison of measured and calculated data was performed by linear regression. The radiation balance estimate presented an absolute mean error of 0.30 and the root mean square error of 3.13. The coefficient of determination was low (0.19), in contrast to Willmott's index of agreement (0.64) showing that although there is no good correlation between the data, there is still a reasonable level of agreement between them.
Keywords: Solar Radiation. Micrometeorology. Biodiversity hotspot.

Resumen: El estudio del balance de radiación en zonas forestales es fundamental porque permite demostrar cómo interactúa el bosque con la atmósfera y cuáles son los impactos potenciales debido a la sustitución de la vegetación original, por zonas urbanas, pastos o zonas cultivadas. El objetivo principal de este trabajo fue comparar el balance de radiación y sus componentes medidos y estimados en la Mata Atlántica en el estado de Alagoas durante la época de lluvias. Las mediciones se realizaron con instrumentos instalados en una torre micrometeorológica dentro de la Mata Atlántica en el municipio de Coruripe, entre el 13 de abril y el 13 de julio de 2017. La estimación del balance de radiación se realizó sumando el balance estimado de radiación de onda corta y de onda larga. La comparación de los datos medidos y calculados se realizó mediante regresión lineal. La estimación del balance de radiación presentó un error medio absoluto de 0,30 y un error cuadrático medio de 3,13. El coeficiente de determinación fue bajo (0,19), en contraste con el índice de concordancia de Willmott (0,64), lo que demuestra que, aunque no hay una buena correlación entre los datos, sigue habiendo un nivel razonable de concordancia entre ellos.
Palabras clave: Radiación solar. Micrometeorología. Punto caliente de la biodiversidad.

Submetido em: 09/06/2020
Aceito para publicação em: 04/08/2021
Publicado em: 22/09/2021

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é considerada um dos 25 *hotspots* do mundo devido à sua grande biodiversidade que contém cerca de 5% dos vertebrados e da flora mundial (SANTOS et al., 2020; LOPES JUNIOR et al., 2019). Originalmente a Mata Atlântica possuía uma área de aproximadamente 1,3 milhões de Km^2 dos quais, atualmente, restam apenas 8,5% de área remanescente (SOS MATA ATLÂNTICA, 2020). Toda essa modificação na cobertura natural tem como consequência alteração na transferência de carbono para a atmosfera além de impactar diretamente o microclima devido a modificação no balanço de radiação superficial (LOPES JUNIOR et al., 2019; QUERINO et al., 2017). O balanço ou saldo de radiação (Rn) representa a quantidade de energia disponível na superfície terrestre, ou seja, expressa a soma entre os fluxos radiativos de ondas curtas e longas na superfície (PAVÃO et al., 2016). O Rn é essencial à vida na Terra, pois atua modificando diretamente o tempo e clima na baixa atmosfera (IZIOMON et al., 2000; CUETO et al., 2015). Seu estudo é fundamental para a meteorologia, visto que, é possível determinar o total de energia disponível para processos físicos e biológicos como a evapotranspiração e o aquecimento do ar e do solo. Particularmente, dados de Rn são utilizados em modelos de troca de massa e energia entre o sistema superfície-atmosfera (AYOOLA et al. 2014; IZIOMON et al., 2000).

O estudo do saldo de radiação em áreas florestadas é de fundamental importância, pois é possível demonstrar como a floresta interage com a atmosfera e sobre os possíveis impactos devido à substituição da vegetação original por áreas urbanas, pastos, áreas cultivadas, entre outros (MARQUES et al., 2017; MOURA et al., 2019). Assim, a caracterização e o conhecimento das diferenças no saldo de radiação em diferentes tipos de superfície são importantes aos modelos regionais e de circulação geral da atmosfera que requerem parametrizações mais próximas do real de muitos processos atmosféricos e de superfície (GALVÃO; FISCH, 2000). Além disso, são responsáveis por influenciar na fotossíntese, no aquecimento superficial e nos campos de temperatura, vento, umidade e precipitação (BIUDES et al., 2015).

Atualmente não existem medidas regulares do saldo de radiação na Mata Atlântica, uma vez que tais medidas dependem do desenvolvimento de pesquisas experimentais que envolvem a compra, montagem e manutenção de instrumentos de alto custo, tornando este processo de medição superficial muitas vezes inviável. Neste aspecto, a utilização de

equações empíricas, ou seja, modelos para estimativa de radiação de onda longa atmosférica tornou-se um modo alternativo amplamente utilizado (AGUIAR et al., 2011; QUERINO et al., 2020). Os modelos para estimativa de ondas longas consideram a emissividade e a temperatura de um corpo e alguns levam em consideração a pressão de vapor. No entanto, devido ao padrão dinâmico da temperatura e da pressão de vapor na atmosfera faz-se necessária a parametrização desses modelos para regiões especificas (QUERINO et al., 2020).

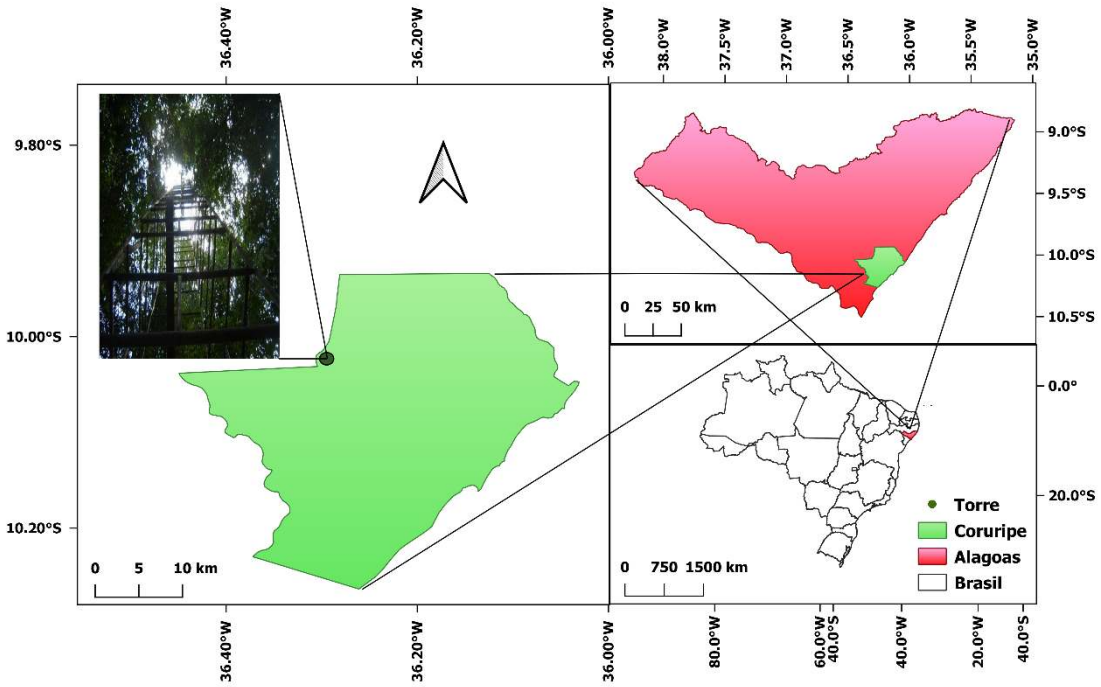
Assim, devido à ausência de estudos a despeito do tema na região de Mata Atlântica o objetivo deste trabalho foi analisar a variação diária do saldo de radiação e de suas componentes e realizar uma comparação entre seus valores medidos e estimados num fragmento de Mata Atlântica no estado de Alagoas durante a estação chuvosa.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada num fragmento de Mata Atlântica da Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) na fazenda Lula Lobo (10°4’12” S e 36°17’31” W), com uma área de 68,6 ha pertencente à usina Coruripe Açúcar e Álcool S/A, no município de Coruripe, Alagoas (Figura 1). O estado de Alagoas está localizado ao leste da região Nordeste do Brasil, e possui limites com os estados de Pernambuco (ao norte), Bahia e Sergipe (ao sul) e com o oceano Atlântico (ao Leste). Possui uma área de 27.933 km^2 e encontra-se subdividido em três mesorregiões geográficas são elas: Litoral (ou Zona da Mata), Agreste e Sertão que possuem diferentes tipos de clima.

Figura 1 - Localização da torre micrometeorológica instalada no município de Coruripe, Alagoas, Brasil. Fonte: Autoria própria.



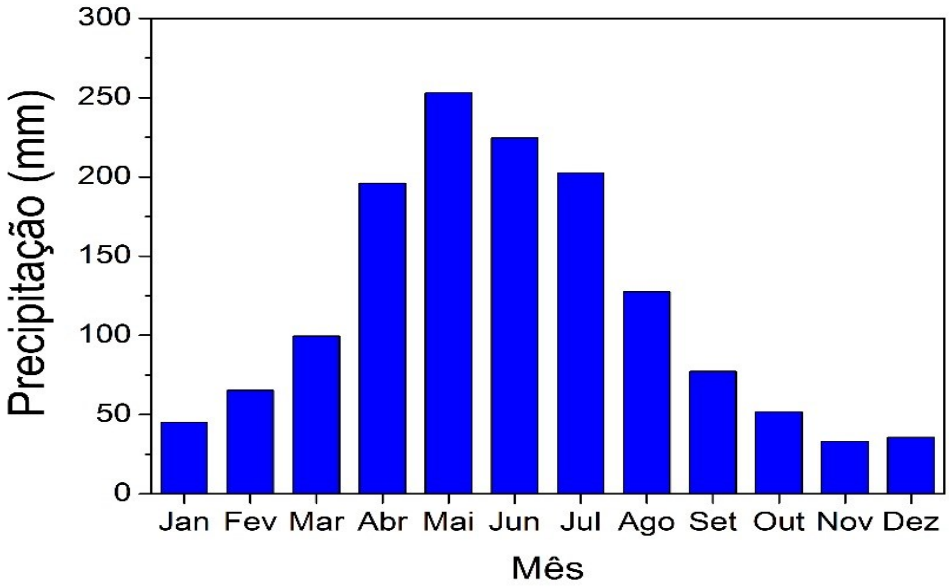
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Climatologia da precipitação

O município de Coruripe possui um clima tropical chuvoso com verão seco de acordo com a classificação de Köppen (SEMARH, 2014). Coruripe tem um total pluviométrico médio anual de 1410,62 mm, com período seco compreendido entre Outubro e Janeiro equivalendo a aproximadamente 11,71% do total pluviométrico anual e período chuvoso entre Abril – Julho com 62,08% do total pluviométrico anual (Figura 2) (ANA, 2016).

A estação chuvosa de Coruripe está relacionada com a máxima convergência dos ventos alísios de sudeste com a brisa terrestre, que é mais influente durante as estações de outono e inverno quando a diferença de temperatura entre a terra e o oceano é maior (KOUSKY, 1980). Também devido a diversos outros sistemas meteorológicos comuns em boa parte do nordeste brasileiro, como é o caso das linhas de instabilidade costeira, variação sazonal dos ventos causada pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), posição e intensidade da Zona de Convergência Intertropical, Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, Ondas de Leste, entre outros (SOUZA et al., 2003).

Figura 2 - Precipitação média mensal do município de Coruripe-AL durante 66 anos entre 1937-2013. Dados provenientes de registros da Agencia Nacional de Águas (ANA).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Obtenção dos dados

Os instrumentos foram posicionados no topo da torre micrometeorológica com 24m de altura, logo acima do dossel das árvores. Os dados foram coletados a cada 20 segundos e as médias foram armazenadas a cada 10 minutos em um datalogger CR10X (*Campbell Scientific Inc.)* no período de 13 de abril a 13 de julho de 2017. Na torre foram realizadas medições da Radiação solar global (R_G); Radiação de ondas curtas refletida (R_R); Radiação de onda longa atmosférica (R_A); Radiação Terrestre (R_S); Precipitação (P), Temperatura (T) e Umidade do Ar (UR).

A precipitação foi medida por um pluviômetro *TR-525M da Texas Electronics, Inc*. as medições da temperatura e umidade foram realizadas através de um Termohigrômetro *HMP 45C* da *Campbell Scientific, Inc*. As medições das variáveis radiativas foram realizadas através de um saldo radiômetro CNR1 da *Kipp & Zonen*. Os saldos de radiação de ondas curtas (BOC) e longas (BOL), Albedo (Al) e Saldo de Radiação (Rn) medidos pelo sensor, foram obtidos através das Equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente:

$$BOC = R_G - R_R \quad (1)$$

$$BOL = R_A - R_S \quad (2)$$

$$Al = \frac{OC\uparrow}{R_G} \quad (3)$$

$$Rn = BOC - BOL \quad (4)$$

Estimativa do saldo de radiação

As equações do saldo de radiação, BOC (Equação 5) e BOL (Equação 6), têm como base a equação de transferência radiativa com a inclusão dos efeitos de espalhamento atmosférico. A equação do BOC é uma equação física derivada diretamente do processo de transferência radiativa baseando-se nos processos de transferência radiativos de emissão, transmissão e reflexão (espalhamento), pois se tratam de fluxos radiativos emitidos pelo Sol, transmitidos e espalhados pela atmosfera e refletidos pela superfície. A equação do BOL é empírica e envolve mais processos de transferência radiativa, como é o caso da absorção atmosférica devido aos gases do efeito estufa, materiais particulados e aerossóis (PETTY, 2006). Quanto ao método de abordagem essas equações podem ser classificadas como modelos Big-Leaf, uma vez que o dossel da floresta é tratado como um sistema simples de apenas uma camada, ou seja, as propriedades físicas do dossel são consideradas homogeneamente como apenas uma folha (CERENZIA, 2011).

A componente de ondas curtas do saldo de radiação (BOC_{cal}) foi estimada por meio da diferença entre o total de R_G que atinge a superfície e o albedo desta superfície (Al) (Equação 5) (QUERINO et al., 2017).

$$BOC_{cal} = R_G * (1\text{-}Al) \qquad (5)$$

A estimativa do BOL_{cal} foi realizada através da equação empírica desenvolvida por Penman (1948) e adaptada por Doorenbos e Pruitt (1977) (Equação 6) baseado no modelo de Brunt (1932).

$$BOL_{cal} = -[4{,}903 \text{ X } 10^{-9} * T^4 \left(0{,}56\text{-}0{,}25 * \sqrt{e_a}\right)(0{,}1+0{,}9 * \frac{n}{N})] \qquad (6)$$

onde (e_a) é a pressão de vapor na atmosfera (Equação 7) foi calculada a partir da Umidade Relativado Ar (UR) e da pressão de saturação de vapor de água atmosférico (es) (Equação 8), T é a temperatura do ar em K, n é a insolação, N o fotoperíodo (Equação 9).

$$e_a = \frac{UR * es}{100} \qquad (7)$$

$$es = 0{,}61078^{\left[\frac{17{,}269*T}{(237{,}3+T)}\right]} \qquad (8)$$

$$N = \frac{2*h}{15} \qquad (9)$$

onde o (N) foi calculado através do ângulo horário do sol (h) (Equação 10) que por sua vez, considera a latitude local (ϕ) e declinação solar (σ) (Equação 11).

$$h = \cos^{-1}\left(-tg(\phi)*tg(\sigma)\right) \quad (10)$$

$$\sigma = 23{,}45* \sin\left[\frac{360}{365}(dn+284)\right] \quad (11)$$

onde dn é o dia de acordo com o calendário Juliano.

A irradiância solar no topo da atmosfera (R_O) foi calculada conforme Iqbal (1983) (Equação 12) no qual considera em seu cálculo a constante solar (S_o= 1367 Wm^{-2}), a correção da excentricidade do raio vetor da órbita terrestre (E_o) (Equação 13) e o cosseno do ângulo zenital (Equação 14).

$$R_o = S_o * E_o * \cos\theta_Z \quad (12)$$

$$E_o = 1+0{,}033* \cos\left(\frac{2\pi*dn}{365}\right) \quad (13)$$

$$\cos\theta_z = sen\phi * sen\,\delta + \cos\phi * \cos\delta * \cosh \quad (14)$$

O Rn_{cal} foi estimado através da soma das variáveis BOC_{cal} e BOL_{cal}.

Métodos e análise realizada

Inicialmente os dados foram trabalhados com o software Microsoft Office Excel 2007, onde foram realizadas correções pontuais dos valores instantâneos e das médias diárias para todas as variáveis. É importante destacar que as análises das irradiâncias (R_G e R_O) foram feitas entre o intervalo de 06:00h as 17:00h, compreendendo praticamente todo o período diurno.

Para avaliar o desempenho das estimativas foi realizada uma análise estatística, onde foram utilizados os indicadores estatísticos MAE (Erro Médio Absoluto) (Equação 15), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (Equação 16), coeficiente de determinação (R^2) (Equação 17) e índice de concordância d de Willmott (Equação 18) (WILLMOTT; WICKS, 1980; WILLMOTT, 1981).

$$MAE = \sum_i^n \frac{|Y_i - X_i|}{n} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_i^n \frac{(Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$R^2 = \left(\frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \right)^2 \quad (17)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_i^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_i^n (|X_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \quad (18)$$

em que, X_i são os valores medidos, Y_i são os valores estimados, n o número total de observações, ou seja, o número de dados da amostra e a barra acima da variável corresponde ao valor médio da variável.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variáveis meteorológicas medidas

A temperatura do ar tem variação decrescente ao longo do período, como se pode observar através da sua linha de tendência na Figura 3a. A temperatura média do final do período é quase 5°C menor que a do início da estação quando ainda era outono na região. Essa diminuição ocorreu devido à chegada do inverno, em que, o disco solar situa-se mais ao norte da linha do equador. A temperatura média diária para o período foi de 25,19 °C, ficando acima da normal climatológica 61-90 do INMET que foi 24,70°C para o mesmo período (INMET, 2019). A menor temperatura foi registrada no dia Juliano 189 (08 de julho) (22,05 °C) e a maior no dia 91 (01 de abril) (28,49 °C).

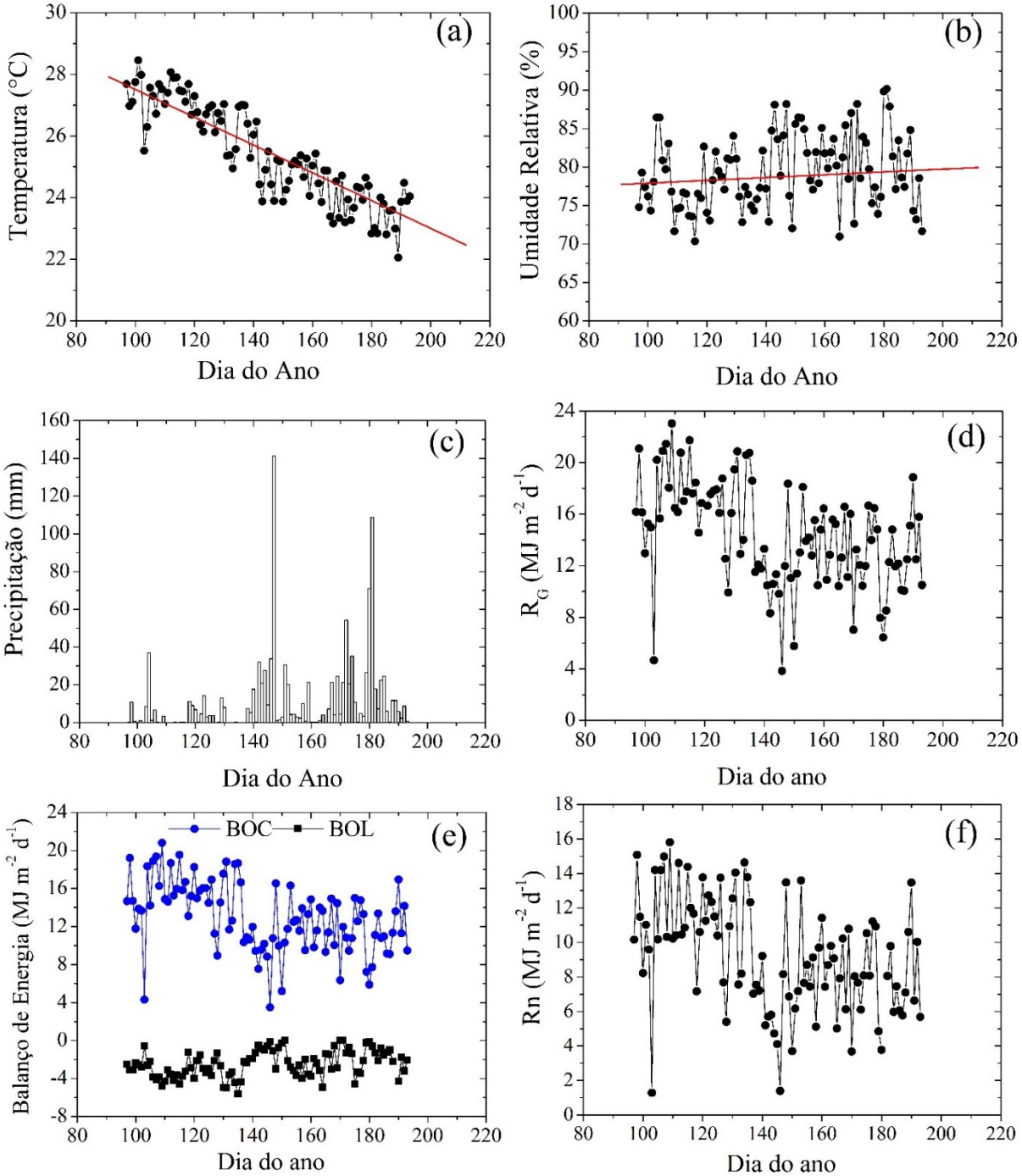
A umidade relativa do ar seguiu padrão inverso ao da temperatura, aumentando com o passar dos dias, uma vez que está adentrando no período chuvoso (Figura 3b). A umidade relativa média foi de 78,84%, sendo menor que o a média da normal climatológica 61-90 para o período (85,1%) (INMET, 2019). A umidade relativa mínima foi registrada no dia 197 (16 de julho) (63,79%), possivelmente ligado com a entrada de alguma massa de ar seco no local, pois também houve falta de chuva no dia em questão. O valor máximo foi 90,15% e ocorreu no dia 181 (30 de junho). Neste dia também ocorreu bastante precipitação (108,7 mm) (Figura 3c). Entretanto, o dia que ocorreu mais chuva foi o 147 (27 de maio) que atingiu 141,1 mm. Nessa estação o total de chuva contabilizado foi 1242,1 mm, quase o dobro do total da normal climatológica 61-90 (665,7 mm). Esse total de precipitação ocorrida no local

possivelmente está relacionado com o escoamento dos alísios próximo ao litoral do nordeste brasileiro (NEB) influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) junto com a existência de cavados próximos a costa, direcionando umidade a região do litoral alagoano (CPTEC, 2019; SOUZA et al., 2003).

A radiação solar global (R_G) seguiu o padrão sazonal, isto é, diminuiu no decorrer dos dias (Figura 3d) pelo fato do Sol está se deslocando para seu ponto máximo ao norte. Com isso, a R_G apresentou uma média diária aproximada de 14,34 ± 4,02 MJ m^{-2} d^{-1} com mínimo de 3,85 MJ m^{-2} d^{-1} no dia 149 (26 de maio) e máximo de 23,03 MJ m^{-2} d^{-1} no dia 109 (19 de abril). As médias mensais foram 17,30 MJ m^{-2} d^{-1} (abril), 13,94 MJ m^{-2} d^{-1} (maio), 13,01 MJ m^{-2} d^{-1} (junho) e 13,06 MJ m^{-2} d^{-1} (julho). Porfírio et al. (2012) realizou um estudo de caracterização da R_G e radiação solar ultravioleta para a cidade de Maceió e encontraram, em sua maioria, médias diárias da R_G variando entre 20 e 10 MJ m^{-2} durante o período chuvoso, além de existir uma grande semelhança nos gráficos da R_G em relação a sua diminuição com o passar dos dias.

O balanço de radiação de ondas curtas (BOC) na Figura 3e seguiu o padrão da curva da R_G, o que era de se esperar, visto que o albedo, que é a segunda componente determinante do BOC, não sofreu variação considerável ao longo dos dias, com média de 0,10 (valores não inclusos no trabalho). A média do BOC foi de 12,99 ± 3,64 MJ m^{-2} d^{-1}. Seu máximo de 20,81 MJ m^{-2} d^{-1} e mínimo de 3,49 MJ m^{-2} d^{-1} coincidentes com os mesmos dias de R_G. No caso do balanço de radiação de ondas longas (BOL) (Figura 3e), ao contrário do BOC, teve tendência de aumento durante este período devido ao decréscimo da R_G e aumento da nebulosidade. A média do BOL ficou em -2,50 ± 1,35MJ m^{-2} d^{-1} com máximo de -0,14 MJ m^{-2} d^{-1} no dia 146 (26 de maio) e um mínimo de -5,65MJ m^{-2} d^{-1} no dia 135 (15 de maio). Enquanto o BOL aumentou o Rn diminuiu, devido a diminuição do BOC com a queda da radiação solar incidente, uma vez que a R_G é a principal componente do balanço de ondas curtas se levado em consideração a quantidade energética. A média diária do Rn foi 9,19 ± 3,25MJ m^{-2} d^{-1}, o máximo 15,80 MJ m^{-2} d^{-1} e o mínimo 1,28MJ m^{-2} d^{-1} (Figura 3f).

Figura 3 - Variação média diária da temperatura do ar (a), umidade relativa do ar (b), total diário de precipitação (c), radiação solar global (R_G) (d), balanço de radiação (BOC e BOL) (e) e saldo de radiação (Rn) (f) durante a estação chuvosa(abril/2017 a julho/2017). Obs.: Dia do ano representa o dia sequencial do ano ou dia Juliano (1 a 366), onde 80 representa o dia 21 de março num ano não bissexto.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Variáveis meteorológicas calculadas: médias mensais

Observa-se na Tabela 1 que a R_G calculada através da equação de Angstrom-Prescott teve uma média sazonal de 14,46 MJ m^{-2} d^{-1} com a máxima em Abril (18,41MJ m^{-2} d^{-1}). A R_O teve uma média de 31,07 MJ m^{-2} d^{-1} no período. Yaniktepe e Genc (2015) avaliaram diversos modelos para a estimativa da R_G derivados de parametrizações do modelo de Angstrom-Prescott em Osmaniye na Turquia e observaram médias mensais variando entre 0,98 e 9,20 MJ m^{-2} com MAPE de 8,98 MJ m^{-2} e RMSE de apenas 0,43 MJ m^{-2}, demonstrando que a equação utilizada quando parametrizada respondeu bem as medições e seus valores foram próximos aos deste trabalho, ao considerar a diferença latitudinal. Conceição e Mandelli (2006) em seu estudo também utilizaram a equação de Angstrom-Prescott para a estimativa da R_G em Bento Gonçalves – RS e encontraram níveis de R_G medidos e estimados menores que os encontrados aqui para o mesmo período com médias de 10,57 MJ m^{-2} e 11,77 MJ m^{-2} para os dados medidos e estimados, respectivamente.

O BOC teve configuração aproximada à R_G com máximo em abril e mínimo em julho. Da mesma forma o Rn, uma vez que estas variáveis têm como principal componente a R_G. A R_G seguiu o padrão dos valores da insolação, que teve uma média de 2,19 h em julho. Comparando com os valores medidos, as médias estimadas para cada mês são aproximadas, excluindo apenas o mês de julho que não teve uma quantidade representativa de dados, podendo ser uma das causas do índice muito baixo de insolação. O BOL, por sua vez, teve configuração oposta a R_G, em virtude desta componente não ser dependente apenas das condições de nebulosidade, mas, também, de outros fatores como, por exemplo, o poder de emissividade da superfície que contribui diretamente com a radiação terrestre (R_S) e a quantidade de vapor de água na atmosfera e outros constituintes atmosféricos como o dióxido de carbono, ozônio, metano, óxido nitroso e alguns clorofluorcarbonetos (CFCs), que contribuem para a variação da radiação de onda longa atmosférica (R_A) (LIOU, 2002; PASHIARDIS; KALOGIROU; PELENGARIS, 2017). Ana et al. (2012) em seu estudo, realizaram medições e estimativas do Rn instantâneo e diário para uma ilha localizada no estado do Tocantins-Brasil através da utilização de um algoritmo de cálculo do Rn via imagens de satélite e obtiveram médias diárias de 138,6 W m^{-2} (ou 11,97 MJ m^{-2}) e 139,5 W m^{-2} (ou 12,05 MJ m^{-2}) para os dados medidos e estimados respectivamente, num dia ao final da

estação chuvosa da região, semelhante a média diária mensal do mês de entrada da estação chuvosa de Coruripe (abril).

A insolação teve máxima em abril e mínima em julho. A presença de mais nuvens durante o período pode ser a causa da queda da insolação, já que a mesma é inversa à nebulosidade. A média do período foi de 4,57h. O fotoperíodo teve uma média de 11,54h para toda a estação. O índice de transmitância atmosférica global (Kt) corroborou com os valores da insolação e, por consequência, da R_G, uma vez que segundo Angstrom (1924) e Prescott (1940) existe uma estreita relação entre todas essas componentes. Por fim, a pressão de vapor na atmosfera (e_a), essencial ao cálculo do BOL, teve uma média sazonal de 2,54 kPa e um máximo em abril concordando com os valores do BOL, pois quanto maior for a e_a maior será a R_A e mais negativo o BOL.

Tabela 1 - Médias diárias mensais das variáveis estimadas, incluindo a radiação solar global (MJ m^{-2} d^{-1}), radiação solar no topo da atmosfera (MJ m^{-2} d^{-1}), saldo de radiação (MJ m^{-2} d^{-1}), balanço de radiação de ondas curtas (MJ m^{-2} d^{-1}), balanço de radiação de ondas longas (MJ m^{-2} d^{-1}), insolação (h), fotoperíodo (h), índice de transmitância atmosférica global e pressão de vapor na atmosfera (kPa), respectivamente, da esquerda à direita.

Mês	R_G	R_O	BOC	BOL	Rn	n	N	Kt	e_a
Abril	18,41	34,26	16,01	-3,59	12,41	7,11	11,75	0,51	2,79
Maio	14,15	31,20	12,31	-2,53	9,78	4,24	11,54	0,44	2,61
Junho	13,79	29,35	12,00	-2,71	8,48	4,76	11,43	0,44	2,46
Julho	11,48	29,49	9,98	-1,70	6,76	2,19	11,44	0,44	2,29
Média	14,46	31,07	12,57	-2,63	9,36	4,57	11,54	0,46	2,54

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Estimativa do saldo de radiação (Rn) diário

A relação linear entre o BOC medido e estimado (Figura 4a) retornou baixos erros estatísticos e um bom índice de concordância de Willmott, porém com baixo coeficiente de determinação (Tabela 2). Apesar da pouca correlação, ou seja, os valores estimados não explicarem muito bem os medidos, eles ainda apresentaram uma boa concordância entre si, indicando necessariamente que o BOC medido segue em boa parte dos casos o padrão do estimado e vice-versa. Esse fato pode ser observado através da Figura 5a, onde é possível destacar o comportamento aproximado do padrão de tendência das curvas do BOC medido e calculado tanto em curtos períodos (declives nos dias 100 a 110 e 135 a 155 e aclives nos dias 110 a 120, 130 a 140 e de 155 a 180) como ao decorrer de toda a série de dados. É

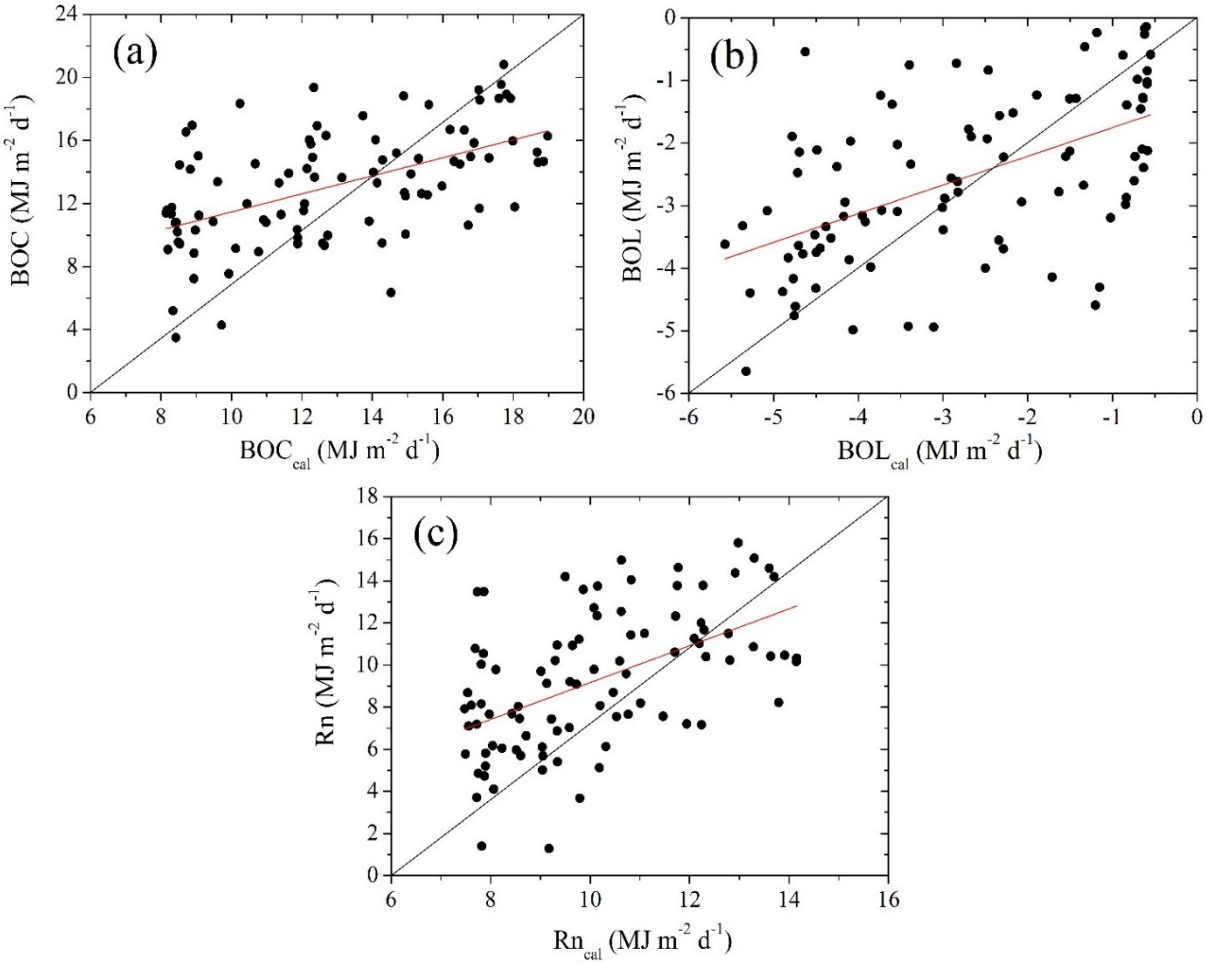
importante destacar que estes períodos com maior aproximação das curvas medidas e calculadas, foram períodos em que ocorreu menor precipitação e, por consequência, menores níveis de nebulosidade, o que contribui para uma melhor estimativa dos valores incidentes de radiação. Os coeficientes linear e angular da equação foram 5,75 e 0,57, respectivamente.

A estimativa do BOL teve praticamente os mesmos resultados do BOC, somente os erros estatísticos foram menores (Tabela 2), principalmente o RMSE que teve uma queda de mais de 50% se comparado com os erros do BOC. Isso indica que a estimativa do BOL pela equação de Penman-Brunt retornou melhores resultados que a estimativa do BOC, que é mais simples. Isso pode ser explicado pelo fato do período de estudo possuir maiores variações nos índices de nebulosidade, o que dificulta a estimativa do BOC com a R_G estimada, uma vez que suas equações não possuem nenhuma correção quanto a essa variação. É possível observar na Figura 5b que as estimativas seguem os principais padrões do BOL medido, resultado de erros estatísticos baixos e de um índice de concordância elevado. Vale salientar que o BOL não é tão afetado pela nebulosidade, pois seu padrão segue a variabilidade de diversos outros fatores, como é o caso da emissividade de superfície e da presença de gases do efeito estufa e de material particulado na atmosfera (LIOU, 2002). Os coeficientes linear e angular encontrados foram -1,21 e 0,46, respectivamente.

A estimativa do Rn (Figura 2c), realizada pela soma entre o BOC_{cal} e o BOL_{cal}, teve erros estatísticos baixos, menores até que os do BOC_{cal}, porém, tanto o coeficiente de determinação quanto o índice de concordância foram menores (Tabela 2). Os coeficientes da equação da reta foram 0,41 e 0,87. O nível de correlação entre o Rn medido e estimado foi baixo. Contudo, apesar de não haver uma boa correlação entre os dados, é importante ressaltar que existe 64% de concordância entre os mesmos, além de que seus erros apresentam valores baixos indicando que é possível, até certo ponto, estimar os dados de Rn pelas equações propostas, como pode ser observado nas curvas diárias do Rn medido e calculado presentes na Figura 5c. Através desse gráfico nota-se que em alguns períodos da estação (dias 105 a 130 e dias 155 a 178) o Rn calculado é bem próximo do Rn medido e, em seu gráfico, é possível perceber a semelhança da tendência com o BOC, uma vez que o BOC é mais energético e, portanto, mais representativo dentro do Rn.

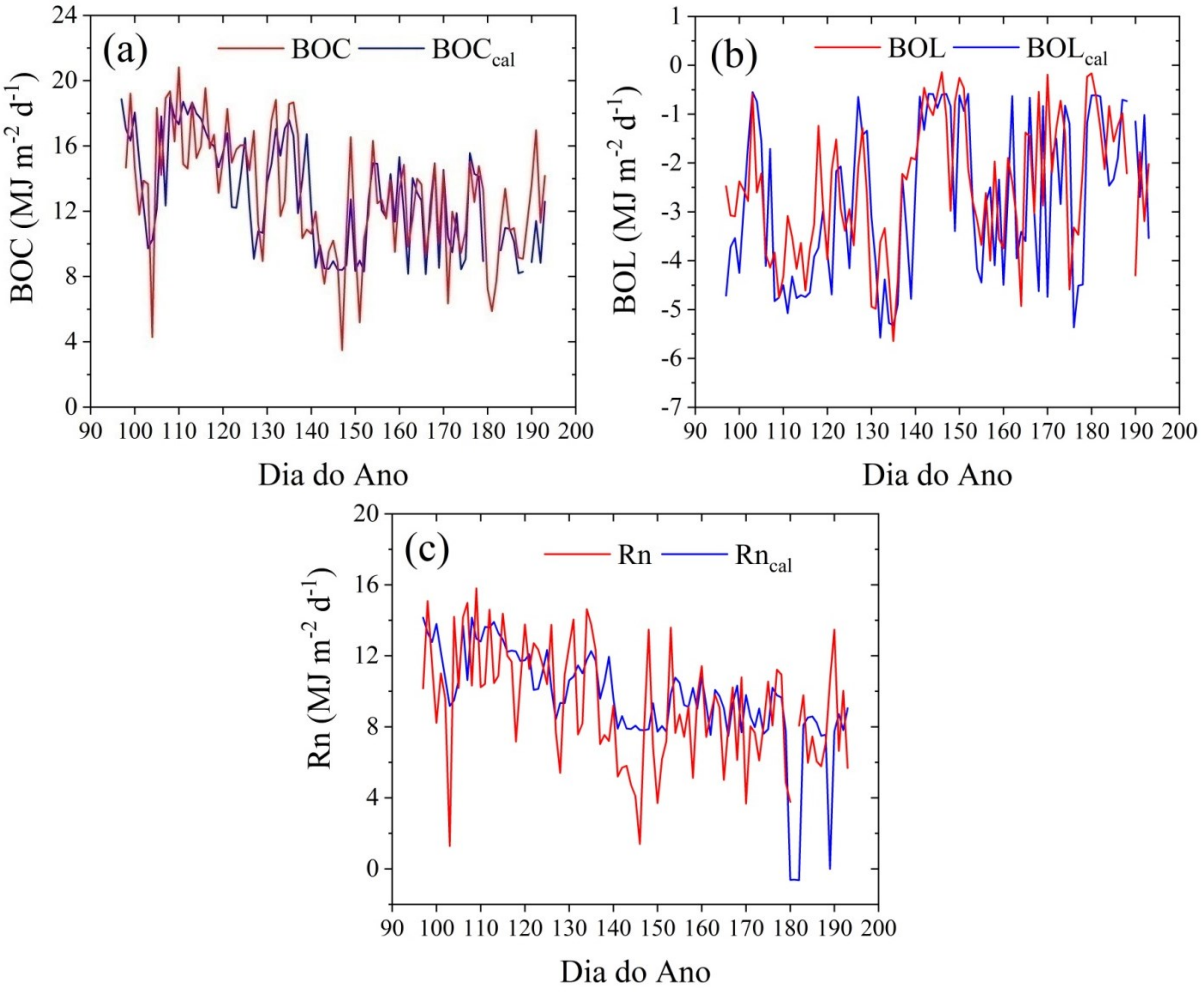
É necessário salientar que as medições realizadas em estações de superfície ao redor do mundo ainda são insuficientes para caracterizar o Rn ao longo da superfície terrestre, devido à grande heterogeneidade superficial e atmosférica, havendo muitas regiões sem dados disponíveis. Uma das causas deste problema é a dificuldade de instalação de tais estações que são compostas de instrumentos de alto custo, além de requererem manutenção periódica dos mesmos (CUETO et al., 2015). Assim, destaca-se a importância dessas estimativas para a caracterização dos fluxos de radiação superficiais e atmosféricos, uma vez que para suprir a falta de informações para o fechamento do Rn, se faz necessário o desenvolvimento de métodos de obtenção, sejam eles físicos ou estatísticos (RAHMAN; ZHANG, 2019).

Figura 4 - Relação linear entre o balanço de radiação de ondas curtas calculado (BOC_{cal}) e medido (BOC) (a) balanço de radiação de ondas longas calculado (BOL_{cal}) e medido (BOL) (b) e saldo de radiação calculado (Rn_{cal}) e medido (Rn) para o período de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Figura 5 - Variação diária do balanço de radiação de ondas curtas medido (BOC) e calculado (BOC_{cal}) (a), balanço de radiação de ondas longas medido (BOL) e calculado (BOL_{cal}) (b) e saldo de radiação medido (Rn) e calculado (Rn_{cal}) (c) para o período de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Tabela 2 - Variáveis estimadas e seus correspondentes avaliadores de desempenho: Erro médio absoluto (MAE), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), coeficiente de determinação (R^2) e índice de concordância de Willmott (d).

Variável	MAE	RMSE	R^2	d
BOC	0,49	3,29	0,28	0,73
BOL	0,44	1,50	0,28	0,73
Rn	0,30	3,13	0,19	0,64

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

CONCLUSÃO

As equações de estimativa do balanço de radiação de ondas curtas e longas analisadas retornaram boas estimativas, pois tanto os erros estatísticos quanto o índice de concordância de Willmott revelaram uma boa concordância dos dados calculados com os

medidos sendo possível essa observação também através da comparação das curvas diárias das componentes. E, além disso, deve-se levar em consideração a complexidade e o conjunto de fatores superficiais e atmosféricos envolvidos no processo de determinação do saldo de radiação, os quais dificultam o desenvolvimento de modelos empíricos que retratem fielmente a realidade. É o que se observa em alguns estudos como o de Pashiardis, Kalogirou e Pelengaris (2017) e Iziomon, Mayer e Matzarakis (2000) que demonstram a influência da nebulosidade na estimativa do saldo de radiação, e a importância de se considerar a temperatura e umidade no processo de estimativa dos fluxos do saldo de radiação em superfície.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior – CAPES e a Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Hidroweb**. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf. Acesso em: 23 ago. 2016.

AGUIAR, L. J. G. et al. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 215-224, 2011.

ANA, C. V. L. et al. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.10, p.1107–1114, 2012.

ANGSTRON, A. Solar and Terrestrial radiation. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society,** Malden, v. 50, p. 121 – 126, 1924.

AYOOLA, M.A. et al. Measurements of net all-wave radiation at a tropical location, Ile-Ife, Nigeria. **Atmósfera**, Mexico City, v. 27, n.3, p. 305 - 315, 2014.

BIUDES, M. S. et al. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.I.], v.202, p.112–124, 2015.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **Quarterly Journal Resource Meteorological Society,** Malden, v. 58, p. 389-418, 1932.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. Boletim Técnico. Disponível em: http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt. Acesso em: 21 de Mai. 2019.

CERENZIA, I. **Ecophysiological processes in a Big-Leaf model**. Turim: Universidade de Turim, 2011.

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MANDELLI, F. **Estimativa diária da radiação solar incidente com base no número de horas de brilho solar para a região de Bento Gonçalves, RS.** 21. ed. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/541820/1/bop012.pdf. Acesso em: 14 de mar. 2019.

CUETO, R.G. et al. Parameterization of net radiation in an arid city of northwestern Mexico. **Atmósfera**, Mexico City, v. 28, n.2, p. 71-82, 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage**, Roma, v. 24, 179 p., 1977.

GALVÃO, J.A.C.; FISCH, G. Balanço de energia em área de floresta e de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia,** São José dos Campos, v. 15, n.2, p. 25-37, 2000.

INMET. **Gráficos Climatológicos.** Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos. Acesso em: 08 de Jan. 2019.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** 1.ed. New York: Academic Press, 1983.

IZIOMON, M.G.; MAYER, H.; MATZARAKIS, A. Empirical models for estimating net radiative flux: a case study for three mid-latitude sites with orographic variability. **Astrophysics and Space Science**, [S.I.], v. 273, n. 1-4, p. 313-330, 2000.

KOUSKY, V. E. Diurnal raifall variation on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 108, n. 4, p. 488-498, 1980.

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

LOPES JÚNIOR, J.M. et al. Estimativa do balanço de radiação de ondas longas durante a estação chuvosa em área de Mata Atlântica no estado de Alagoas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.I.], v.10, n.2, p.155-168, 2019.

MARQUES, H. O. et al. Estimated net radiation in an Amazon–Cerrado transition forest by Landsat 5 TM. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 11, n.4, 11 p., 2017.

MOURA, A.R.M. et al. Impact of a dam construction on the surface biophysical parameters in Amazonia. **Remote Sensing Applications: Society and Environment,** [S.I.], v.15, 8 p. 2019.

PASHIARDIS, S; KALOGIROU, S.A; PELENGARIS, A. Characteristics of longwave radiation through the statistical analysis of downward and upward longwave radiation and inter-comparison of two sites in Cyprus. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, [S.I.], v. 164, p. 60-80, 2017.

PAVÃO, V.M. et al. Variação espacial e temporal do saldo de radiação superficial em uma área do sul do Amazonas, Brasil. **Ra'e Ga**, Curitiba, v. 37, p.333 – 352, 2016.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the royal society A**, London, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PETTY, G. W. **A First Course in Atmospheric Radiation**. 2. ed. Madison: Sundog Publishing, 2006.

PORFÍRIO, A. C. S. et al. An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió - Northeastern Brazil. **Energy,** [S.I.], v. 44, n. 1. p. 584-592, 2012.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia,** London, v. 64, p. 114-118, 1940.

QUERINO, C. A. S. et al. Balanço de ondas curtas sobre floresta sazonalmente alagável do Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v.20, p. 252-266, 2017.

QUERINO, C.A.S. et al. Modelling parametrization to estimate atmospheric long wave radiation in the Northern Mato Grosso, Brazil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.42, n.105, 8 p. 2020.

RAHMAN, M. M.; ZHANG, W. Review on estimation methods of the Earth's surface energy balance components from ground and satellite measurements. **Journal of Earth System Science**, Bangalore, v. 128, n. 84 2019.

SANTOS, M. F. et al. Variabilidade estacional do balanço de ondas longas em um ecossistema de mata atlântica no estado de Alagoas-Brasil. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v.21, n.75, p. 201-213, 2020.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH) **Município de Coruripe**, 2014. Disponível em: www.semarh.al.gov.br/tempo-e-clima/boletins-e-analises-tecnicas/balanco-hidrico/2014/junho/litoral/CORURIPE.pd. Acesso em: 27 abr. 2018.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica.** São Paulo: relatório técnico, 2020. Disponível em: http://mapas.sosma.org.br/site_media/download/2020_Atlas_Mata_Atlantica_2018-2019_relatorio_tecnico_final.pdf. Acesso em: 19 de Mai. 2021.

SOUZA, J. L. et al. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período 1972 - 2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** Santa Maria, v. 11, n. 2, p.131-141, 2003.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, London, v. 2, n.2, p. 184 - 194, 1981.

WILLMOTT, C.J.; WICKS, D.E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, London, v. 1, n.1, p. 59-73, 1980.

YANIKTEPE, B.; GENC, Y. A. Establishing new model for predicting the global solar radiation on horizontal surface. **Hydrogen energy**, [S.I.], v. 40, p. 15278-15283, 2015.