

# ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DE ONDA LONGA UTILIZANDO DADOS DE PRESSÃO DE VAPOR

José Rafael Franco – jose\_rafael.franco@hotmail.com

Isabela Alves de Almeida

Marcus Vinícius Contes Calça.

Isaque Miyabara Agostinho

Matheus Rodrigues Raniero.

Daniele Cristina Lopes Mariano.

Valeria Cristina Rodrigues Sarnighausen.

Sergio Augusto Rodrigues.

Alexandre Dal Pai.

Enzo Dal Pai.

Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP de Botucatu, São Paulo – Brasil.

**Resumo.** As radiações solares de ondas longas são complexas na medição devido a conceitos físicos exigentes e custosos equipamentos. Devido das dificuldades de se obter as medidas da radiação de onda longa o objetivo do estudo foi gerar equações de estimativa da onda longa utilizando medidas de pressão de vapor atual. O estudo foi realizado no Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (22°54'S de latitude, 48°27'O de longitude e 786m de altitude). Os dados meteorológicos foram obtidos junto à estação meteorológica do departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP de Botucatu, São Paulo – Brasil. Foram utilizados dados meteorológicos de temperatura, umidade relativa do ar e radiação solar de ondas longas atmosférica e terrestre no período 1 de janeiro de 2015 a 6 de dezembro de 2015, no intervalo de 5 minutos. Os modelos foram processados em escala global (anual) e sazonal. Para a validação dos modelos foram utilizadas medidas de onda longa mensuradas no ano de 2020 utilizando os seguintes indicativos estatísticos: MBE, rMBR, RMSE e rRMSE. O modelo de onda longa terrestre apresentou correlação de  $R^2$  0,69, já os modelos de onda longa atmosférica sazonais apresentaram os seguintes valores: verão  $R^2$  0,81, primavera  $R^2$  0,83, inverno  $R^2$  0,89, outono  $R^2$  0,93, modelo anual  $R^2$  0,95. É viável a estimativa da irradiância de ondas longas atmosféricas com valores de pressão de vapor atual.

**Palavras-chave:** Umidade relativa, Temperatura, Radiação solar.

## 1. INTRODUÇÃO

O Sol é a principal fonte de energia para o planeta Terra. Nesse sentido, o estudo da radiação solar assume relevância em diversos setores da sociedade, como as diversas áreas da engenharia, medicina, meteorologia, agronomia, entre outras. A quantificação da radiação solar desempenha um papel crucial no dimensionamento preciso de construções, lavouras e outros projetos envolvendo o uso de energias renováveis (Allen *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 2017; Rossi *et al.*, 2018). A radiação solar, composta por ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos, pode ser classificada em função do seu comprimento de onda. De modo que, comprimentos menores de ondas, denominados de radiação solar de ondas curtas, tendem a apresentar maior capacidade energética em comparação com os comprimentos de ondas mais longos, conhecidas como as radiações solares de ondas longas (Sentelhas, Nascimento, 2003; Dal Pai, Escobedo, 2015).

A radiação solar de ondas curtas é a radiação solar mais estudada. Nas ondas curtas está a parcela visível da radiação solar, que é aproveitada pelas plantas para a realização da fotossíntese (Reis *et al.*, 2012; Fortana *et al.*, 2012;). Valores de radiação solar de ondas curtas são comumente disponibilizados por agências meteorológicas, como o IPMET ou o INMET (INMET, 2023; IPMET, 2023). Geralmente a radiação solar de ondas curtas é separada em global e refletida. A radiação solar global é a que atinge a superfície do planeta Terra, de modo que, parte dessa radiação solar é refletida devido a interação com os componentes atmosféricos. Já a radiação solar no espectro de ondas curtas que realmente atinge a superfície terrestre, representa o saldo da radiação solar global menos a refletida, o que é chamado de balanço de ondas curtas. Para se estimar esses valores é comum se utilizar a reflexão de uma superfície com grama, que geralmente fica próxima de 0,23 (23%) da quantidade total de radiação solar global que chega a superfície da Terra (Sentelhas, Nascimento, 2003; Aguiar *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2017; Flumignan *et al.*, 2018; Krieger *et al.*, 2020).

A radiação solar de ondas longas é mais complexa. Ondas longas são portadoras de menor capacidade energética, geralmente associadas à radiação solar termal. Sua medida envolve conceitos físicos mais complexos, exigindo instrumentos mais caros para sua obtenção. Isto faz com que valores de ondas longas não sejam tão facilmente

encontrados como valores de radiação solar de ondas curtas. As ondas longas podem ser divididas em atmosféricas, quando partem da atmosfera terrestre aquecida em direção para baixo (solo) e terrestres, quando partem do solo aquecido para a atmosfera terrestre (Vilani *et al.*, 2010; Aguiar *et al.*, 2011; Dal Pai, Escobedo, 2015; Krieger *et al.*, 2020).

As ondas curtas têm seu fluxo diurno, enquanto as ondas longas têm seu fluxo durante as 24 horas do dia. Geralmente são as ondas longas que influenciam o clima local no período noturno. Embora o grande aporte de energia no planeta Terra esteja nas ondas curtas, as ondas longas apresentam grande importância. A disponibilidade energética total depende das ondas longas, inclusive a quantidade de água evaporada e evapotranspirada pelas plantas. A equação de Penman-Montheith, chamada de “Equação da FAO” para cálculo de evapotranspiração (e de irrigação agrícola) necessita da medida ou de valores estimados das ondas longas. (Allen *et al.*, 1998; Sentelhas, Gillespie, 2008; Reis *et al.*, 2012; Dal Pai, Escobedo, 2015)

Outra característica das ondas longas é a sua grande reatividade com água. A presença ou ausência de água no ambiente pode alterar drasticamente a irradiância das ondas longas atmosférica e terrestre. A água altera o termo de emissividade da equação de Stefan-Boltzmann. Assim como, nuvens, chuva, umidade relativa alta, alto teor de água no solo e outras formas em que a água pode estar presente no ambiente também alteram os valores da irradiância de ondas longas (Vilani *et al.*, 2010; Aguiar *et al.*, 2011, Reis *et al.*, 2012; Carrilho Sobrinho *et al.*, 2013; Dal Pai, Escobedo, 2015). Neste contexto, o objetivo deste estudo é relacionar valores de irradiância de ondas longas atmosférica e terrestre com valores de pressão de vapor d’água no ar a fim de se obter uma forma de estimativa dessas componentes da radiação solar.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização e clima

O estudo foi realizado no Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (22°54’S de latitude, 48°27’O de longitude e 786m de altitude). Os dados meteorológicos foram obtidos junto à estação meteorológica do departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP de Botucatu, São Paulo - Brasil. Botucatu é um município de aproximadamente 145 mil habitantes em uma área territorial de 1.482,642 km<sup>2</sup>, com bioma Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2023). O município está localizado próximo a duas grandes represas (Barra Bonita e Jurumirim) e está distante aproximadamente 221 km do oceano atlântico (ROSSI *et al.*, 2018). As principais atividades agrícolas da região são as plantações de cana-de-açúcar e eucalipto, assim como atividades industriais e comerciais moderadas (Dal Pai *et al.*, 2016).

Segundo Franco *et al.* (2023) o clima de Botucatu, utilizando o método de Köppen, é classificado como Aw, possuindo estações bem definidas (verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos). O clima da região apresenta temperatura média de 21,34°C, temperatura máxima média de 26,51°C e temperatura mínima média de 17,24°C. A umidade relativa do ar apresenta valor médio de 70% com precipitação acumulada de 1.500mm distribuída em aproximadamente 107 dias chuvosos no ano. O mês mais chuvoso ocorre em janeiro com precipitação média de 315,14 mm e umidade relativa de 75,76%. O mês mais quente ocorre em fevereiro com temperatura média de 23,80°C e temperatura máxima média de 28,12°C. o mês mais frio ocorre em julho com temperatura média de 18,28°C e temperatura mínima média de 14,13°C. O mês mais seco ocorre em agosto com precipitação média de 38,60mm e umidade relativa de 61,95%.

### 2.2 Instrumentos e medidas

Para a obtenção das medidas das componentes da radiação solar global foi utilizado um Saldo Radiômetro modelo CNR1 da marca Kipp & Zonen (Fig. 1).

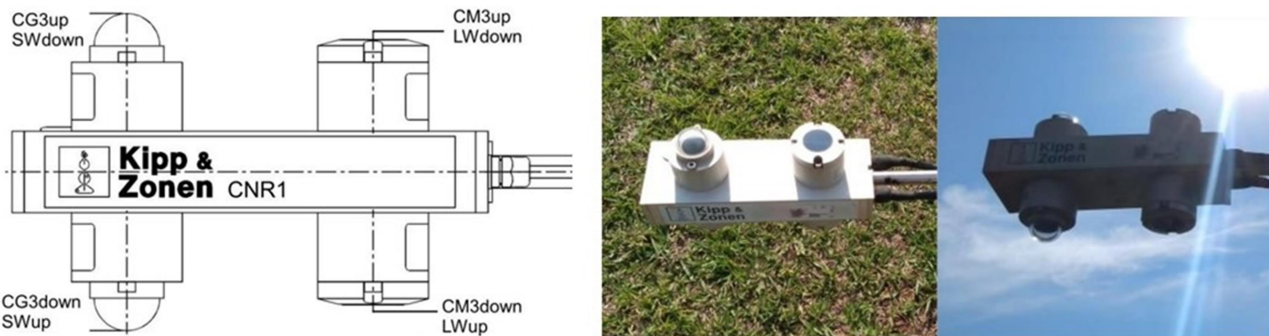


Figura 1 - Radiômetro CNR1 da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu, São Paulo, Brasil. Fonte: Calca (2021).

O CNR1 possui a capacidade de medir as quatro componentes da radiação solar: global, refletida, onda longa atmosférica e onda longa terrestre (Campbell Scientific, 2011). Os valores foram tomados na partição instantânea (medidas de irradiância solar), a cada 5 segundos, e armazenadas a cada 5 minutos (média de 60 valores de 5 em 5 segundos nos 5 minutos). As medidas foram armazenadas com o auxílio de um sistema de aquisição de dados registrador modelo CR3000 da *Campbell Scientific* (Campbell Scientific, 2018).

No processamento dos dados de ondas curtas, os valores noturnos foram retirados com o cálculo do fotoperíodo. Portanto, valores obtidos fora do horário de fotoperíodo não foram considerados na integração numérica das ondas curtas para outras escalas temporais. As ondas longas não cessam seu fluxo durante a noite, portanto, foram consideradas as 24 horas do dia na integração numérica dos valores para as outras escalas temporais.

O CNR1 utiliza dois piranômetros modelo CM3 para medir as ondas curtas – na Fig. 2 representando o lado esquerdo do instrumento. Para medir as ondas longas o CNR1 possui dois pirgeômetros modelo CG3 – representados do lado direito do instrumento. Medidas de ondas longas utilizam, além do elemento sensível, uma correção de temperatura, realizada com auxílio de uma ligação do tipo PT-100. Pelo fato de as ondas longas possuírem natureza termal esta correção da emissividade do instrumento deve ser realizada, oferecendo maior confiabilidade em seus valores (Campbell Scientific, 2011; Dal Pai, Escobedo, 2015).

Para acompanhamento da pressão de vapor foi utilizado dados de temperatura e umidade relativa do ar medidos por um termohigrometro modelo HC2S3 da *Campbell Scientific*. Este instrumento foi acoplado ao mesmo registrador de medidas (CR3000 - *Campbell Scientific*) com mesmo tempo de aquisição de dados (intervalos de 5 minutos). Este instrumento fornece a medida de temperatura do ar, em graus celsius (°C), e da umidade relativa do ar, em porcentagem (%). A pressão de vapor (Kpa) foi calculada com base no manual de evapotranspiração da FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) como apresentam as Eq. (1) e Eq. (2).

$$es = 0.6108 \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \quad (1)$$

$$ea = es \left(\frac{UR}{100}\right) \quad (2)$$

Onde:

$es$  = Pressão de saturação de vapor (KPa);

$ea$  = Pressão atual de vapor (KPa);

$T$  = Temperatura do ar (°C);

$UR$  = Umidade relativa do ar (%).

Os dados foram todos processados na partição de 5 minutos, tanto para as irradiâncias solares quanto para a temperatura e umidade relativa do ar. No processamento das pressões de vapor, utilizou-se a média da temperatura de 5 minutos e a média da umidade relativa de 5 minutos. Os dados foram medidos de 01/01/2015 até 06/12/2015. Devido a instabilidades no CNR1 os dados de dezembro não apresentarem homoscedasticidade com o restante dos dados e foram descartados para este estudo. Todos os sensores foram calibrados e comparados com sensores de referência no início do experimento em questão.

### 2.3 Indicativos estatísticos

Para os indicativos estatísticos MBE (Eq. 3) e RMSE (Eq. 5) valores próximos de zero são desejáveis. Os valores relativos de rMBE (Eq. 4) e rRMSE (Eq. 6) fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média da observação, ou seja, consegue explicar a variabilidade da variável de resposta.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (3)$$

$$rMBE (\%) = \frac{MBE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$rRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (6)$$

Foram comparados dados estimados pelos modelos produzidos com dados mensurados pelos sensores na superfície terrestre, onde  $Y$  são as medidas de referência realizadas pelo CNR1, tal que  $Y'$  representa os dados estimados pelos modelos,  $n$  o número de observações,  $\bar{Y}$  a média das medidas de referência e  $\bar{Y}'$  é a média dos dados da estimados (Raniero *et al.*, 2020; Rincón *et al.*, 2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 2 são apresentados os valores medidos pelo CNR1 de irradiância solar das quatro componentes, global, refletida, atmosférica e terrestre, no ano de 2015.

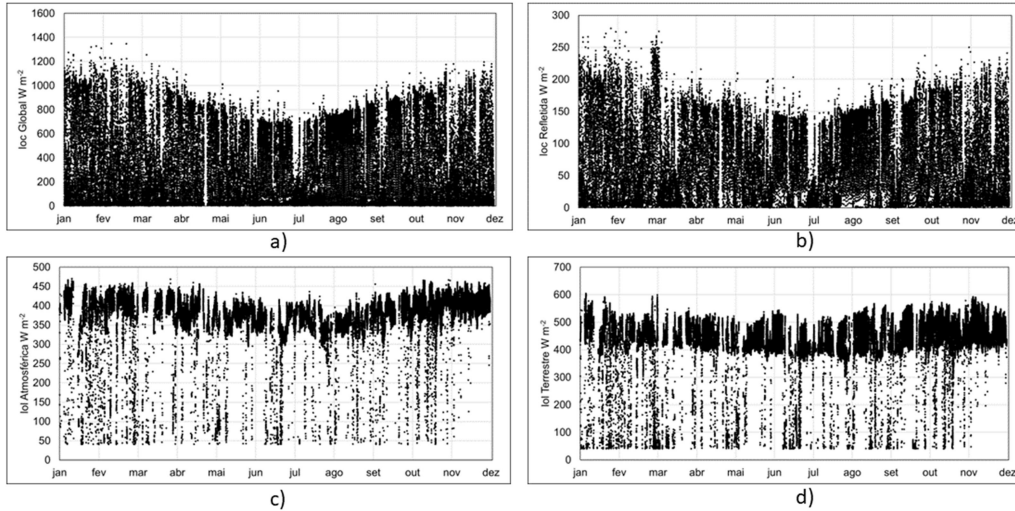


Figura 2 - Componentes da radiação solar medidos entre 01/01/2015 a 06/12/2015.

A Fig. 2a apresenta os valores instantâneos de irradiância solar global – onda curta. Na Fig. 2a é possível observar a variação sazonal de seus valores. As irradiâncias solares globais são maiores no período de verão e menores no período de inverno. Nos meses de janeiro, fevereiro e março a irradiância solar global atinge os valores máximos, próximos a 1300 Watts por metro quadrado; no inverno os valores máximos ficam próximos a 700-800 Watts por metro quadrado. Na Fig. 2b são apresentados os valores de irradiância solar global e no albedo da grama: 0,23 ou 23% de poder de reflexão. As medições da refletida foram obtidos sobre vasta área gramada e seus valores apresentam média de 20,33% da global.

Medidas das ondas longas (Fig. 2c e Fig. 2d) são mais complexas de se interpretar. Seus valores são contínuos, não cessando no período noturno, e sua variação no ano são menos explícitas. Outros elementos de clima interferem nas ondas longas: água na atmosfera, presença de nuvens, orvalho, cerração, turbidez atmosférica, teor de água no solo, entre outros. Outro ponto interessante é a magnitude dos valores, a irradiância solar de ondas longas terrestre tem maiores valores quando comparados à irradiância solar de ondas longas atmosférica. A terrestre corresponde à fração de energia devolvida ao espaço, representando uma perda de energia no ambiente. Por ser sempre maior, o saldo de radiação de ondas longas sempre é negativo – significando uma perda de energia. Nos modelos teóricos de mudanças climáticas é este valor negativo de perda que está tendendo a ficar menor com o aumento da concentração de gases do efeito estufa, aumentando a energia presente na atmosfera, causando um aquecimento acima do normal.

Na Fig. 3 são apresentados os valores medidos pelo HC2S3 de temperatura e umidade relativa do ar durante ano de 2015.

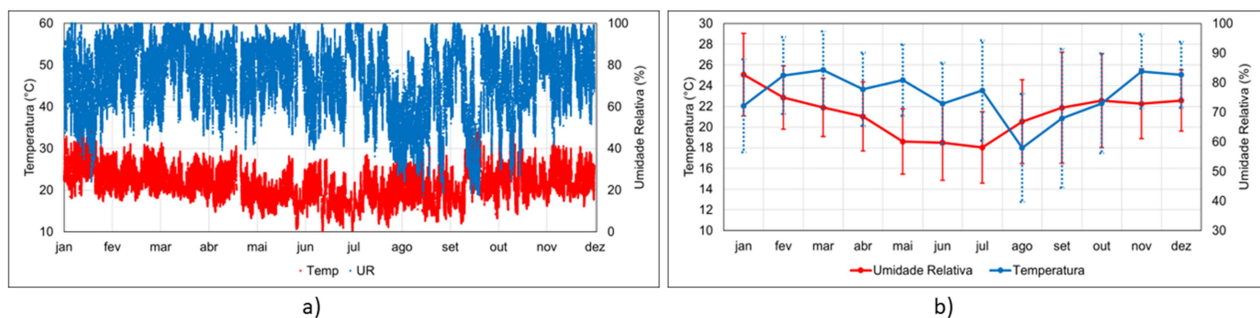


Figura 3 - Temperatura e umidade relativa do ar medidas entre 01/01/2015 a 06/12/2015.

A Fig. 3a apresenta todos os valores, na escala de 5 em 5 minutos. A Fig. 3b apresenta os valores médios mensais. Todos os valores medidos entre 01/01/2015 a 06/12/2015. Observa-se a variação sazonal do clima local: em Botucatu as chuvas são predominantes no verão e o período de seca corresponde ao inverno. Maiores temperaturas e umidades relativas são encontradas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Na época de inverno o volume de chuvas é pequeno, diminuindo a umidade relativa do período. Da temperatura e umidade relativa foram calculados os valores da pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ) e da pressão atual de vapor ( $e_a$ ) no período. Vale lembrar que a pressão atual de vapor corresponde ao montante de vapor presente no ar, sem a dependência da temperatura, como é o valor de umidade relativa. Os valores de  $e_a$ , em KPa estão apresentados na Fig. 4.

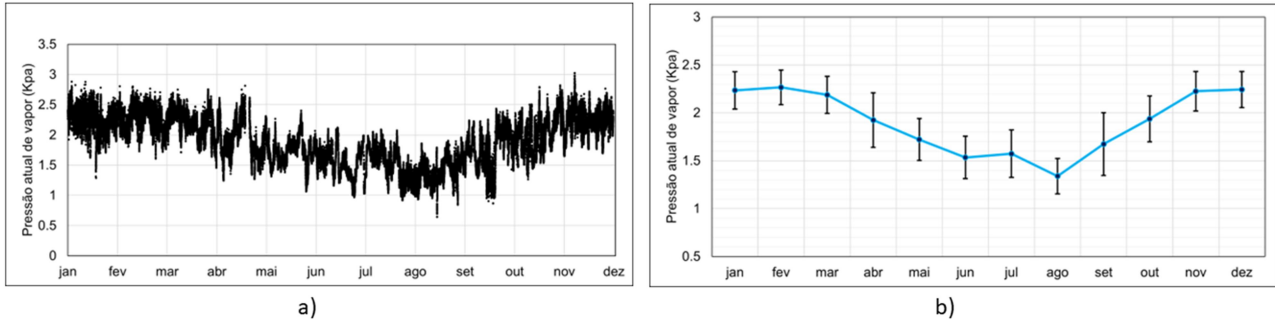


Figura 4 - Pressão atual de vapor ( $e_a$ ) em KPa medidos entre 01/01/2015 a 06/12/2015.

Na Fig. 4a são apresentados os valores instantâneos (5 em 5 minutos) e na Fig. 4b são apresentados os valores médios mensais. Ao se analisar a pressão de vapor atual durante o ano observa-se uma leve tendência de os valores serem maiores nos meses de janeiro e fevereiro. Em dezembro estes valores também são elevados, porém o mês de dezembro está incompleto para esta análise. Os valores da pressão atual de vapor tendem a serem maiores nos períodos de maior temperatura. O valor da pressão atual de vapor nunca pode ser maior que o valor de saturação. O valor da pressão de saturação de vapor depende da temperatura do ar, que tende a ser maior durante o período do verão.

O período da seca também é interessante. No inverno as temperaturas são menores e os valores de  $e_s$  também serão menores. Porém no fim da época seca há o mês de agosto: neste mês a temperatura já é elevada, fornecendo maiores valores de  $e_s$ ; porém agosto é o mês mais seco no local: em agosto chove em média apenas 38,60 mm em Botucatu, fornecendo pequenos valores de  $e_a$ . Agosto é o mês com menores valores de umidade relativa no local.

Na Fig. 5 são apresentados os valores de irradiância solar de ondas longas atmosféricas e terrestres associados aos valores da pressão atual de vapor  $e_a$ . Os dados foram agrupados em 100 intervalos de  $e_a$ , indo de 0,7KPa até 3 KPa, de 0,02 em 0,02 KPa. Cada ponto na figura representa a média de um destes 100 intervalos, com seu respectivo desvio padrão. Já a Fig. 5a apresenta a irradiância solar de ondas longas atmosférica e a Fig.5b a irradiância solar de ondas longas terrestres. A linha vermelha representa o ajuste linear.

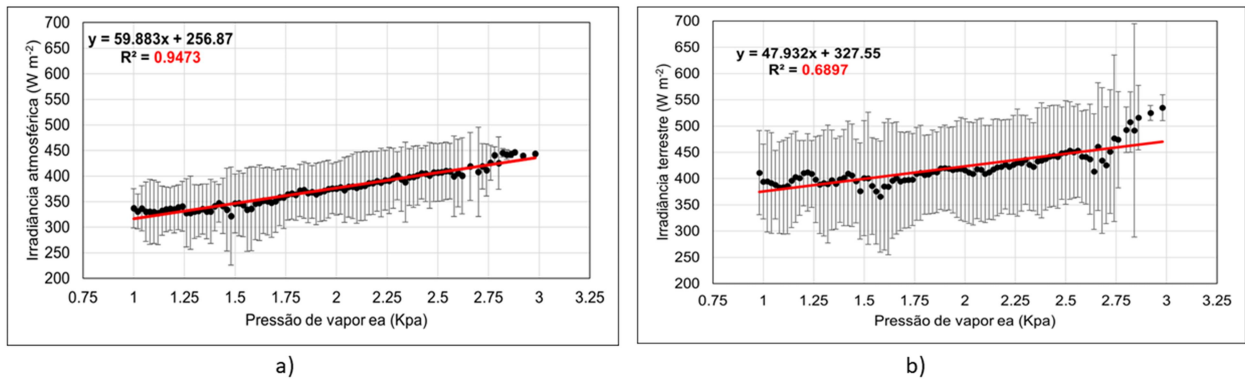


Figura 5 – Relação entre valores de  $e_a$  com valores de irradiância solar de ondas longas.

A correlação entre os valores da pressão atual de vapor ( $e_a$ ) com valores de ondas longas representa o melhor ajuste linear (linha vermelha na Fig. 5). Observa-se que para as ondas longas atmosféricas a inclinação da reta foi maior em comparação com a inclinação da reta das irradiâncias de ondas longas terrestres. De fato, a água tem grande capacidade de alterar o regime irradiativo dos corpos, inclusive da atmosfera. No ajuste da irradiância atmosférica os parâmetros obtidos foram de 53,96 para o termo angular e 269,83 para o termo linear, com  $r$  de 0,9038. Para o ajuste da irradiância terrestre os parâmetros obtidos foram de 48,15 no angular e 330,03 para o linear, com  $r$  de 0,5554. Para as ondas longas terrestres talvez o acompanhamento do teor de água no solo seja mais representativo que a pressão de vapor atual da atmosfera. Pelo melhor ajuste das ondas longas atmosféricas, na Fig. 6 são apresentadas as mesmas correlações, separadas por estação do ano. Devido a diferenças no teor de água na atmosfera em diferentes épocas do ano, a emissividade das ondas longas atmosféricas também apresentou diferenças sazonais.



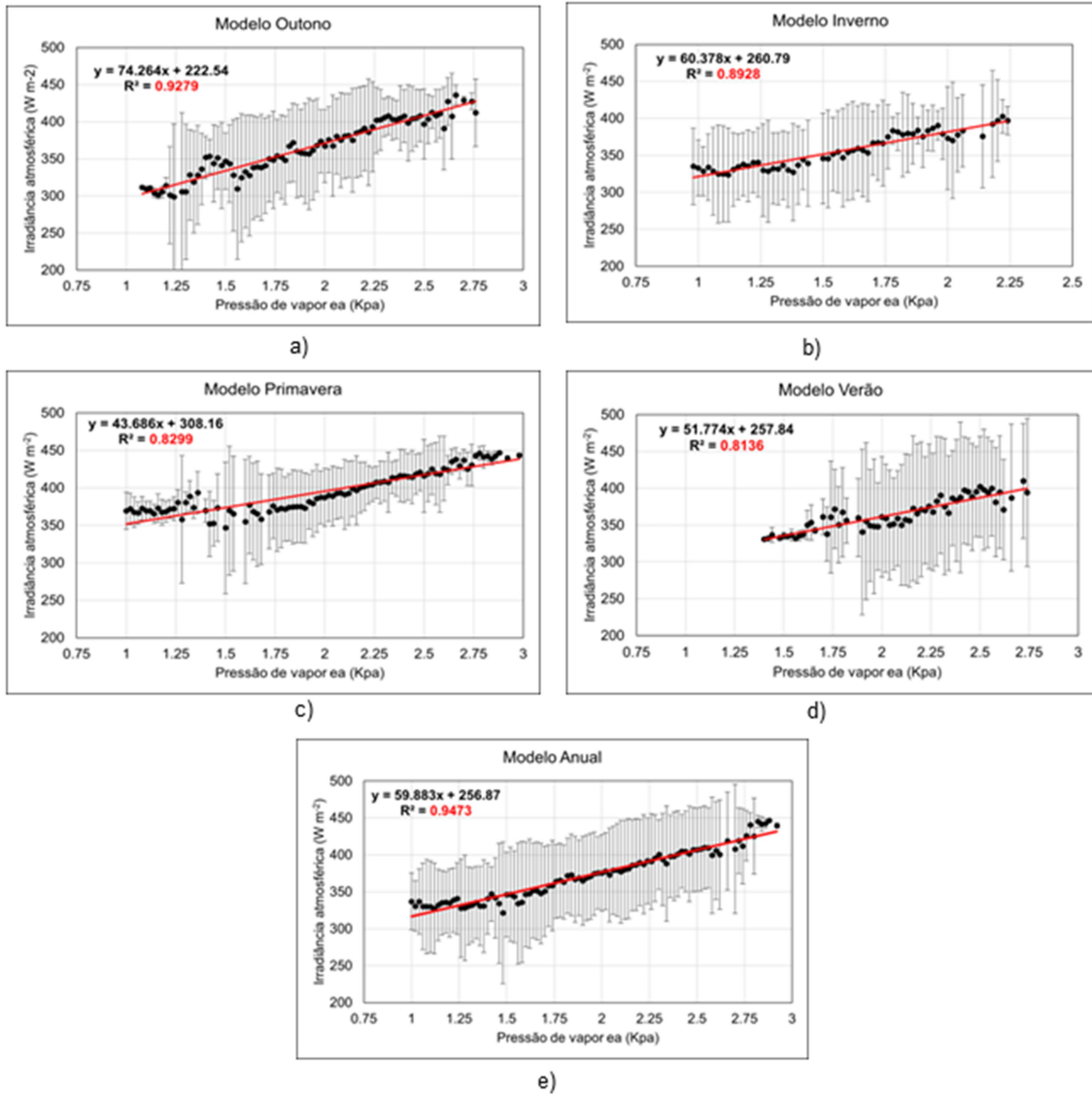


Figura 6 – Comportamento sazonal das irradiâncias de onda longa atmosféricas, e suas respectivas equações de ajuste.

Nota-se na Fig. 6 o comportamento distinto em cada época do ano. Há uma clara tendência dos valores de ea serem maiores no verão (Fig. 6d) e menores na primavera (Fig. 6c) e inverno (Fig. 6b). Os valores mínimos no inverno foram de 1 KPa enquanto os valores mínimos no verão foram de 1,3 KPa. O melhor ajuste foi no outono (Fig. a), com  $R^2$  de 0,93. O pior desempenho do modelo foi no verão (Fig. 6d), com  $r^2$  de 0,8136. No verão há uma lacuna vazia de informações, correspondente ao mês de dezembro, que não foi medido integralmente.

Os menores valores do inverno (Fig. 6b) podem ser explicados pelas menores temperaturas e menores valores de pressão atual de vapor na atmosfera. A primavera (Fig. 6c) obteve comportamento similar: o fim do inverno já se comunica com o início da primavera, épocas com condições climáticas bastante semelhantes. A Fig. 6e apresenta o modelo anual, sendo a junção dos outros 4 modelos.

O relacionamento da irradiância solar atmosférica com os valores de ea podem ser usados como modelo de estimativa da irradiância solar atmosférica. O CNR1, assim como outros sensores de medição de ondas longas apresentam grandes dificuldades operacionais: são sensores que necessitam de uma estação meteorológica em operação constante, o que torna a medida extremamente onerosa do ponto de vista financeiro. A medida da temperatura e umidade relativa é uma medida muito mais comum, fácil e barata de se fazer, assim como dados de temperatura e umidade relativa do ar, que são disponibilizados para todo o território nacional no website do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Na Fig. 7 pode-se observar a diferença entre os modelos anual e sazonais.

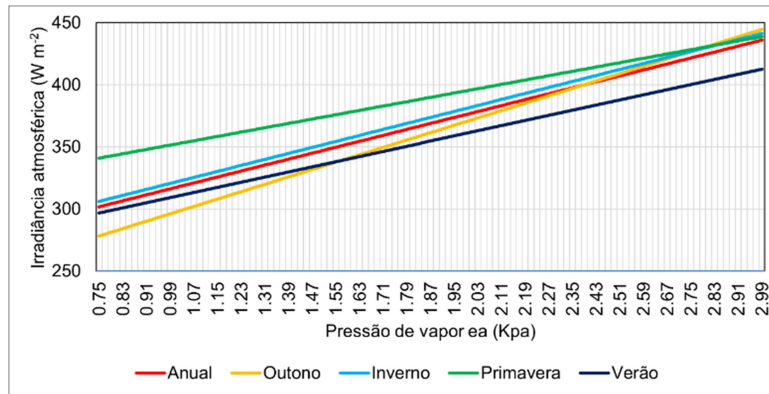


Figura 7 – Modelos de Irradiância atmosférica com base em valores de pressão atual de vapor ea, modelo anual e modelos sazonais.

Nota-se na Fig. 7 o comportamento dos modelos. O modelo anual segue entre os outros modelos. No modelo de primavera a tendência é a irradiância atmosférica ser superestimada em condições de menores valores de ea. No modelo de outono a tendência é a irradiância ser subestimada em situações com baixos valores de ea. O modelo de inverno é o que mais se assemelha ao modelo anual. O modelo de verão tende a subestimar a irradiância atmosférica em condições de altos valores de ea.

No inverno a presença de nuvens é menor no local do experimento, o que pode explicar o melhor ajuste do modelo de inverno: nuvens constituem uma grande fonte de erros e imprecisões na interpretação das ondas longas. Vários modelos de estimativa de ondas longas utilizam apenas dias de céu completamente limpo para execução do modelo.

Para averiguação do modelo, o ano de 2020 foi utilizado. Em 2020 a irradiância solar atmosférica foi medida, assim como a temperatura e umidade relativa do ar. Portanto, a partir das medidas meteorológicas gerou-se os valores de pressão atual de vapor (ea) para 2020 e com estes valores foram estimados os valores de irradiância solar atmosférica, também, para 2020. Os valores estimados e os valores medidos foram comparados. O resultado desta validação está presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Indicativos estáticos e validação dos modelos anual e sazonais de estimativa de irradiância atmosférica com base em valores de pressão de vapor atual.

Modelo	MBE	rMBE(%)	RMSE	rRMSE(%)
Verão	-21.29	-5.24	31.40	7.73
Outono	-18.91	-5.33	31.72	8.93
Anual	-18.24	-4.86	34.71	9.24
Primavera	-5.74	-1.48	33.67	8.65
Inverno	-12.86	-3.63	33.21	9.37

Os valores da validação demonstram um bom ajuste e viabilidade do modelo. Observando-se os valores de MBE o modelo que obteve o pior resultado foi o do verão, com um erro de subestimativa de -21,29 Watts por metro quadrado, 5,24% da média: esta magnitude de erro é pequena considerando que valores mínimos de irradiância solar atmosférica estão por volta dos 300-350 watts por metro quadrado. No modelo de primavera o erro foi de 1,48%, assemelhando-se ao próprio erro do instrumento. Os valores de RMSE também foram bons: valores do espalhamento dos pontos em torno do modelo abaixo dos 10% em medidas instantâneas podem ser considerados baixos, principalmente pelo grande volume de pontos, onde em um ano são aproximadamente 96000 linhas, estas com baixa dispersão em torno do modelo.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir deste estudo pode-se obter as seguintes conclusões.

- É viável a estimativa da irradiância solar de ondas longas atmosféricas com os valores de pressão de vapor atual, calculado a partir de medidas meteorológicas mais fáceis de serem obtidas.
- O modelo de estimativa não demonstrou a mesma viabilidade na irradiância solar terrestre, a qual sugere-se mais estudos com os valores de água presentes no solo.
- A estimativa da irradiância solar de onda longa atmosférica com o uso da pressão de vapor é uma alternativa viável na ausência de onerosos sensores de medição de ondas longas, como o CNR1.
- Na modelagem anual e sazonal, o modelo sazonal de melhor desempenho foi o modelo da primavera, seguido pelo modelo do inverno. Outras estações assemelham-se ao desempenho do modelo anual.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Faculdade de Ciências Agrárias (UNESP) de Botucatu (São Paulo) - Brasil pelo apoio financeiro concedido através das bolsas de estudos (Mestrado e Doutorado).

## REFERÊNCIAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 29 nov. 2022.
- Aguiar, L. J. G.; Costa, J. M. N.; Fischer, G. R.; Aguiar, R. G.; Costa, A. C. L.; Ferreira, W. P. M. 2011. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. Revista Brasileira de Meteorologia, vol. 26, n. 2, pp. 215-224.
- Calça, M. V. C.; Sbardella, M.; Franco, J. R., Raniero, M. R., Dal Pai, A., Dal Pai, E. 2020. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de Radiação diário para o município de Botucatu – São Paulo – Brasil. Revista Brasileira de Climatologia. Vol. 29. pp. 547-570.
- Campbell Scientific, 2011. CNR1 NET RADIOMETER. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cnr1.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2023.
- Campbell Scientific, 2018. CR1000 Datalogger. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000.pdf>. Acesso Em: 29 nov. 2023.
- Carrilho Sobrinho, F. J. *et al.*, 2013. Modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no cerrado Mato-Grossense. Vol. 12. n. 12.
- Dal Pai, E; Escobedo, J. F., 2015. Estimativa Da Radiação Atmosférica Em Função Dos Índices Radiométricos Kt E Kd Para Botucatu-Sp. Energia Na Agricultura, vol. 30, n. 2.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F.; Dal Pai, E., Oliveira, A. P.; Soares, J. R.; Codato, G. 2016. Meo Shadowring Method For Measuring Diffuse Solar Irradiance: Corrections Based On Sky Cover. Renewable Energy, vol. 99, pp. 754-763.
- Franco, J. R.; Dal Pai, E. Calça, M. V. C., Raniero, M. R., Dal Pai, A. Sarnighausen, V. C. R.; Sánchez-Román, R. M. 2023. Atualização Da Normal Climatológica E Classificação Climática De Köppen Para O Município De Botucatu-Sp. Irriga, Vol. 28, N. 1.
- Flumignan, d. L.; Rezende, M. K. A.; Comunello, E.; Fietz, C. R. 2018. Empirical methods for estimating reference surface net radiation from solar radiation. Engenharia agrícola, Vol. 38, n. 1, pp. 32-37.
- Fontana, D. C.; Alves, G. M.; Roberti, D.; Moraes, O. L. L.; Gerhardt, A. 2012. Estimativa Da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida Pela Cultura Da Soja Através De Dados Do Sensor Modis. Bragantia, Vol. 71, pp. 563-571.
- IBGE. 2023. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística, 2023. Disponível Em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/botucatu.html>. Acesso Em: 12 nov. 2023.
- INMET, 2023. Dados históricos anuais. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 29 de nov. de 2023.
- IPMET, 2023. Estação Meteorológica. Disponível em: <https://www.ipmetradar.com.br/2estacao.php>. Acesso em: 29 de novembro de 2023.
- Pereira, E. B. Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. 2017. Atlas Brasileiro De Energia Solar. 2 Ed., São José Dos Campos: Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais.
- RANIERO, M. R.; Calça, M. V. C., Fernando, D. M. Z.; Almeida, O. C. P.; Dal Pai, A. 2020. Software for automated reading of sunshine duration by Digital Image Processing. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, Vol. 18, n. 9.
- REIS, L. S.; Souza, J. L.; Azevedo, C. A. V.; Lyra, G. B.; Ferreira Junior, R. A.; Lima, V. L. A. 2012. Componentes Da Radiação Solar Em Cultivo De Tomate Sob Condições De Ambiente Protegido. Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental Vol. 16, n. 7, pp. 739-744.
- RINCÓN. A.; Jorba, O.; Frutos, M.; Alvarez, L; Barrios, F. P.; Gonzáles, J. A. 2018. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. Solar Energy, Vol. 170, pp. 201-211.
- ROSSI, T. J.; Escobedo, J. F.; Santos, C. M.; Rossi, L. R.; Silva, M. B. P.; Dal Pai, E. 2018. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu/SP/Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Belfast, Vol. 82, pp. 448-459.
- Sentelhas, P. C.; Gillespie, T. J. 2008. Estimating hourly net radiation for leaf wetness duration using the penman-monteith equation. Theoretical and applied climatology, Vol. 91, n. 1, pp. 205-215
- Sentelhas, P. C.; Nascimento, A. L. C. 2003. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. Revista brasileira de meteorologia, v.18, n. 1, p. 71-77.



- Vilani, M. T.; Sanches, L.; Pinheiro, M. R.; Pinto Junior, O. B. 2010. Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica. *Ciência e Natura*. Vol. 32. n. 1. pp. 65-81.
- Krieger, J. M. Vieira, I. S.; Silva, W. O. A.; Souza, J. L.; Lyra, G. B.; Lyra, G. B 2020. Balanço de radiação utilizando métodos de estimativa da radiação solar em cultivo de cana-de-açúcar. *Agrometeoros*, Vol. 27, n.1, pp. 123-133.

### ESTIMATING LONG-WAVE SOLAR RADIATION USING VAPOR PRESSURE DATA

**Abstract.** Long-wave solar radiation is complex to measure due to demanding physical concepts and expensive equipment. Due to the difficulties in obtaining longwave radiation measurements, the objective of the study was to generate longwave estimation equations using current vapor pressure measurements. The study was carried out at the Agrometeorology and Solar Radiometry Laboratory (22°54'S latitude, 48°27'O longitude and 786m altitude). Meteorological data was obtained from the meteorological station of the Rural Engineering and Socioeconomics department of the School of Agronomic Sciences at the Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP in Botucatu, São Paulo - Brazil. Meteorological data on temperature, relative humidity and atmospheric and terrestrial long-wave solar radiation were used from January 1, 2015 to December 6, 2015, at 5-minute intervals. The models were processed on a global (annual) and seasonal scale. Long-wave measurements taken in 2020 were used to validate the models using the following statistical indicators: MBE, rMBR, RMSE and rRMSE. The terrestrial longwave model showed a correlation of  $R^2$  0.69, while the seasonal atmospheric longwave models showed the following values: summer  $R^2$  0.81, spring  $R^2$  0.83, winter  $R^2$  0.89, fall  $R^2$  0.93, annual model  $R^2$  0.95. It is feasible to estimate atmospheric longwave irradiance with current vapor pressure values.

**Keywords:** Relative humidity, Temperature, Solar radiation.