



Comparação de medições meteorológicas obtidas em superfície terrestre e por meio do Google Earth Engine (GEE) em Botucatu, São Paulo, Brasil

Matheus Rodrigues RANIERO¹, Marcus Vinícius Contes CALÇA^{1*}, José Rafael FRANCO¹,
Giovana STUCCHI¹, Ludmila Ribeiro RODER¹, Alexandre DAL PAI¹

¹ Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, Brasil.

*E-mail: marcus.calca@unesp.br

Submetido em 10/07/2023; Aceito em 21/08/2023; Publicado em 15/09/2023.

RESUMO: O objetivo deste estudo foi comparar medidas meteorológicas obtidas a partir de produtos geoespaciais no Google Earth Engine em relação a coletadas por uma estação meteorológica automática na Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP em Botucatu (SP) - Brasil. Foram criados gráficos de dispersão e gerados os indicadores estatísticos MBE, rMBE, RMSE, rRMSE e r a partir das variáveis meteorológicas de temperatura do ar, precipitação, evapotranspiração, velocidade do vento, irradiação solar de onda curta e pressão atmosférica, obtidas em 2018 nas resoluções temporais horária, diária e mensal. A investigação apontou uma forte correlação positiva em grande parte das medições meteorológicas, no entanto, aquelas relacionadas à quantidade de água presente na atmosfera, como precipitação e evapotranspiração, apresentaram uma menor correlação, principalmente na resolução temporal horária. O estudo demonstrou que os produtos geoespaciais foram uma alternativa eficiente para obter medidas meteorológicas para o município de Botucatu (SP) - Brasil, principalmente por terem sido obtidos de forma simplificada a partir da plataforma de computação em nuvem do Google Earth Engine, o que demonstrou ser uma possível alternativa às medições meteorológicas tradicionais, coletadas na superfície terrestre, em áreas onde não se tem recursos tecnológicos necessários para atender essa demanda.

Palavras-chave: medidas meteorológicas; produtos de satélites; dados climáticos geoespaciais.

Comparison of weather measurements obtained on land surface and by Google Earth Engine (GEE) in Botucatu, São Paulo, Brazil

ABSTRACT: The aim of this study was to compare weather data obtained from geospatial products in Google Earth Engine with measurements collected by an automatic weather station at the School of Agricultural Sciences of UNESP in Botucatu (SP) - Brazil. Scatter plots were created and the statistical indicators MBE, rMBE, RMSE, rRMSE and r were generated from data on air temperature, precipitation, evapotranspiration, wind speed, shortwave solar irradiation, and atmospheric pressure, obtained in 2018 at hourly, daily, and monthly temporal resolutions. The investigation pointed to a strong positive correlation in most of the weather data, however, those related to the amount of water present in the atmosphere, such as precipitation and evapotranspiration, showed a lower correlation, mainly in the hourly temporal resolution. The study demonstrated that geospatial products were an efficient alternative to obtain weather data for the city of Botucatu (SP) - Brazil, mainly because they were obtained in a simplified way from the Google Earth Engine cloud computing platform, which demonstrated to be a possible alternative to traditional weather measurements, collected on the earth's surface, in areas where the necessary technological resources are not available to meet this demand.

Keywords: weather measurements; satellite products; geospatial climatic data.

1. INTRODUÇÃO

O estudo sobre as condições atmosféricas e os fenômenos climáticos é essencial para compreender as mudanças nas necessidades de cultivos agrícolas, uma vez que permitem torná-los mais eficientes e produtivos (TORRES et al., 2015). No Brasil, por um longo tempo, a obtenção de informações climáticas era realizada por estações meteorológicas convencionais, tendo sido substituídas, posteriormente, por instrumentos automáticos, que apresentam um alto desempenho, praticidade e confiabilidade no registro de medidas meteorológicas na

superfície terrestre (TORRES et al., 2015). Contudo, seu custo de implantação é elevado, tornando as estações meteorológicas automáticas escassamente distribuídas em países subdesenvolvidos (MENDELSON et al., 2007).

Uma alternativa para a obtenção de informações meteorológicas onde não existem instrumentos locais de coleta de medidas é a utilização de produtos derivados de observações realizadas por satélites em órbita da Terra. Os satélites possuem sensores acoplados que coletam informações em diferentes comprimentos de onda, permitindo medir também valores meteorológicos. No

entanto, essas medições apresentam precisão inferior em relação às realizadas por sensores em superfície terrestre (MENDELSON et al., 2007). Outro entrave é o acesso e o aproveitamento total dos produtos de satélites, que ainda é restrito, devido à limitação de conhecimento técnico e de recursos computacionais para se trabalhar com grandes volumes de dados. Sendo assim, o maior obstáculo é a falta de gerenciamento básico da tecnologia da informação (GORELICK et al., 2017).

Neste contexto, o Google Earth Engine é uma plataforma de computação em nuvem que facilita o acesso a recursos computacionais de alto desempenho para a obtenção, processamento e análise de grandes volumes de informações geoespaciais (GORELICK et al., 2017; XIA; GUO; CHEN, 2020). Portanto, o objetivo deste estudo foi comparar medidas geoespaciais de temperatura do ar, precipitação pluvial, evapotranspiração, velocidade do vento, irradiância solar de onda curta e pressão atmosférica na superfície terrestre, obtidas a partir de quatro produtos de satélites, em relação a medições de referência, coletadas na superfície terrestre por uma estação meteorológica automática, a fim de verificar a sua exatidão.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de Estudo

O estudo foi realizado pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (AGROMET) da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP de Botucatu (SP), Brasil. O município de Botucatu está inserido em uma região de fortes atividades agrícolas, tal que apresenta características de clima temperado, com um período de inverno seco, que ocorre de junho a agosto, e de verão quente e úmido, que ocorre de dezembro a fevereiro (DAL PAI et al., 2016).

2.2. Estação Meteorológica Automática

As medidas meteorológicas obtidas na superfície terrestre durante o período de 2018, para comparação com as informações geoespaciais, foram cedidas pela Estação Meteorológica Lageado (EML) da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP de Botucatu (SP) - Brasil, localizada nas coordenadas geográficas: Latitude 22° 50' 48,14" S (-22,846694°), Longitude 48° 25' 53,52" O (-48,431528°) e Altitude de 786 metros acima do mar.

As temperaturas mínimas, médias e máximas do ar foram medidas por um termohigrômetro da Campbell Scientific - HC2S3. A precipitação foi medida por um pluviômetro da Campbell Scientific - TB4 Rain Gage. As velocidades do vento, a 2 e 10 metros, foram medidas por um anemômetro da Campbell Scientific - Met One 034B Windset. A irradiância solar de onda curta foi medida por um piranômetro da Kipp & Zonen - CMP3. As pressões atmosféricas, na superfície terrestre e no nível do mar, foram medidas por um barômetro da Vaisala - CS106. A evapotranspiração foi estimada a partir do modelo de Penman-Monteith, usando as medições obtidas na Estação Meteorológica Lageado (EML, 2020).

2.3. Google Earth Engine

O Google Earth Engine é uma plataforma baseada em computação em nuvem que disponibiliza gratuitamente um

catálogo com diversos petabytes de informações geoespaciais na internet, contendo um grande repositório com observações de uma variedade de sistemas de imagens aéreas e de satélites, em comprimentos de ondas do visível ao não visível, variáveis ambientais, previsões meteorológicas e climáticas, cobertura de solo, topografia e informações econômicas (GORELICK et al., 2017). De modo que, o usuário pode acessar essas informações utilizando códigos nas linguagens de programação JavaScript ou Python.

Neste sentido, para realizar a comparação das medições captadas em superfície terrestre, através de sensores automáticos de referência no ano de 2018, foi realizado o descarregamento de informações geoespaciais (Tabela 1) a partir do editor de códigos do Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>), uma interface gráfica intuitiva e que possibilita que o usuário possa ter acesso a informações geoespaciais de forma simplificada. Portanto, foram descarregados dados meteorológicos obtidos pelos produtos do Famine Early Warning Systems Network - Land Data Assimilation System (FLDAS), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA-5), Climate Forecast System - Versão 2 (CFSV-2) e Global Land Data Assimilation System - Versão 2.1 (GLDAS-2.1).

2.4. Indicativos Estatísticos

As medidas meteorológicas obtidas pela Estação Meteorológica Lageado e por meio do Google Earth Engine foram comparadas a partir de gráficos de dispersão e indicativos estatísticos. Os indicativos estatísticos utilizados foram: Mean Bias Error (MBE), Relative Mean Bias Error (rMBE), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Root Mean Square Error (rRMSE) e Coeficiente de Correlação (r). O MBE (Equação 1) quantifica se a diferença entre pares de dados comparados possui tendência significativa em superestimar ou subestimar. O RMSE (Equação 3) estima o erro quadrático obtido pelas diferenças entre pares de dados comparados, dando maior peso para grandes erros. Os valores relativos rMBE e rRMSE (Equações 2 e 4) fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média da observação. Já o r (Equação 5) fornece o grau de correlação entre os pares de dados comparados (RINCÓN et al., 2018). Para os indicativos estatísticos MBE, rMBE, RMSE e rRMSE, valores próximos a zero são desejáveis, porém para o r deve ser próximo a 1.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (01)$$

$$rMBE (\%) = \frac{MBE}{\underline{Y}} \times 100 \quad (02)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (03)$$

$$rRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\underline{Y}} \times 100 \quad (04)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \underline{Y})(Y_i - \underline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \underline{Y})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \underline{Y})^2}} \quad (05)$$

Nas Equações 1, 2, 3, 4 e 5 o Y' representa os valores das medidas meteorológicas geoespaciais disponibilizadas pelo

Google Earth Engine, enquanto o \underline{Y} faz referência as medições realizadas em superfície terrestre (referência) pela Estação Meteorológica Lageado. Portanto, o \underline{Y}' simboliza a

média dos valores disponibilizados pelos produtos geoespaciais e o \underline{Y} retrata a média dos valores medidos na superfície terrestre, pelos sensores automáticos de referência.

Tabela 1. Dados meteorológicos geoespaciais usados no estudo.
Table 1. Weather geospatial data used in the study.

Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System (FLDAS)			
Resolução Temporal: Mensal			
Variável Meteorológica	Indexação	Unidade de Medida	
Temperatura média do ar	TAMED	K	
Precipitação média	PM	kg/m ² /s	
Evapotranspiração média	EM	kg/m ² /s	
Velocidade do vento a 2 metros	VV2	m/s	
Irradiância solar de onda curta	IOC	W/m ²	
Pressão atmosférica na superfície terrestre	PAS	Pa	
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA-5)			
Resolução Temporal: Diária			
Temperatura média do ar	TAMED	K	
Temperatura máxima do ar	TAMAX	K	
Temperatura mínima do ar	TAMIN	K	
Precipitação acumulada	PA	mm	
Velocidade do vento a 10 metros	VV10	m/s	
Pressão atmosférica na sup. terrestre	PAS	Pa	
Pressão atmosférica ao nível do mar	PAM	Pa	
Climate Forecast System Versão 2 (CFSV-2)			
Resolução Temporal: Horária (6 horas)			
Temperatura média do ar	TAMED	K	
Temperatura máxima do ar	TAMAX	K	
Temperatura mínima do ar	TAMIN	K	
Precipitação média	PM	kg/m ² /s	
Velocidade do vento a 10 metros	VV10	m/s	
Irradiância solar de onda curta	IOC	W/m ²	
Pressão atmosférica na superfície terrestre	PAS	Pa	
Global Land Data Assimilation System Versão 2.1 (GLDAS-2.1)			
Resolução Temporal: Horária (3 horas)			
Temperatura média do ar	TAMED	K	
Precipitação média	PM	kg/m ² /s	
Evapotranspiração média	EM	kg/m ² /s	
Velocidade do vento a 2 metros	VV2	m/s	
Irradiância solar de onda curta	IOC	W/m ²	
Pressão atmosférica na superfície terrestre	PAS	Pa	

3. RESULTADOS

3.1. Produtos Geoespaciais Horários do GLDAS-2.1

A temperatura média do ar, evapotranspiração média, velocidade do vento a 2 metros, irradiância solar de onda curta e pressão atmosférica na superfície terrestre, fornecidas pelo Global Land Data Assimilation System - Versão 2.1 em comparação com as medidas obtidas pela Estação Meteorológica Lageado, em resolução temporal horária, apresentaram uma correlação positiva significativa (Figura 1), exceto pela precipitação média, que no caso dos produtos geoespaciais é afetada pelas limitações dos sensores remotos em relação à resolução temporal e espacial, interferência atmosférica, influência da vegetação e ainda sofre com as limitações dos modelos hidrológicos utilizados (LI et al., 2017; BHATTARAI; WAGLE, 2021; GOORDARZI et al., 2022). Apesar da correlação positiva, a irradiância solar de onda curta e a evapotranspiração média indicaram uma grande variabilidade nos valores medidos em relação aos obtidos por meio de sensoriamento remoto, uma vez que a nuvem de dispersão dos pontos se mostrou maior, em relação as demais.

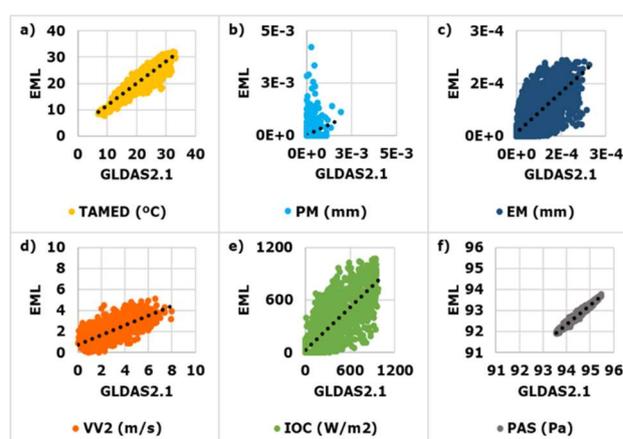


Figura 1. Dispersão da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo GLDAS-2.1.

Figure 1. Scatter of the comparison between data obtained by the EML and by the GLDAS-2.1.

Sendo assim, com relação ao Global Land Data Assimilation - Versão 2.1, o indicativo estatístico MBE demonstrou que nenhum dado meteorológico fornecido por meio de sensoriamento remoto subestimou as medidas

realizadas em superfície terrestre (Tabela 2). Para o rMBE, a precipitação média e a temperatura média do ar apresentaram o maior e o menor valor, respectivamente. Do mesmo modo que, para o rRMSE, o maior e o menor valor são apresentados pela pressão média e pela precipitação atmosférica na superfície terrestre, respectivamente. Para o indicativo estatístico r, a precipitação atmosférica na superfície terrestre e a precipitação média apresentam o maior (0,99) e o menor valor (0,27), respectivamente.

Tabela 2. Indicativos estatísticos da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo GLDAS-2.1.
Table 2. Statistical indicators of the comparison between data obtained by the EML and by the GLDAS-2.1.

Variável Meteorológica	MBE (rMBE)	RMSE (rRMSE)	r
TAMED (°C)	0,16 (0,78)	1,77 (8,44)	0,92
PM (mm)	1e-5 (44,15)	2e-4 (583,10)	0,27
EM (mm)	6e-7 (1,34)	3e-5 (96,43)	0,73
VV2 (m/s)	0,63 (31,66)	1,10 (55,15)	0,75
IOC (W/m ²)	10,72 (5,20)	172,44 (83,62)	0,81
PAS (Pa)	1,70 (1,83)	1,70 (1,83)	0,99

3.2. Produtos Geoespaciais Horários do CSFV-2

A temperatura máxima, média e mínima do ar, velocidade do vento a 10 metros, irradiância solar de onda curta e pressão atmosférica na superfície terrestre, fornecidas pelo Climate Forecast System - Versão 2, em comparação com as obtidas pela Estação Meteorológica Lageado, em resolução temporal horária, apresentaram forte correlação positiva, com exceção da precipitação média, assim como foi visto anteriormente (Figura 2). Neste caso, a velocidade do vento a 10 metros e a irradiância solar de onda curta, apesar de terem demonstrado ter uma correlação positiva significativa, indicaram uma variabilidade maior entre as medições obtidas em superfície terrestre e as fornecidas por meio de sensoriamento remoto, em relação as demais.

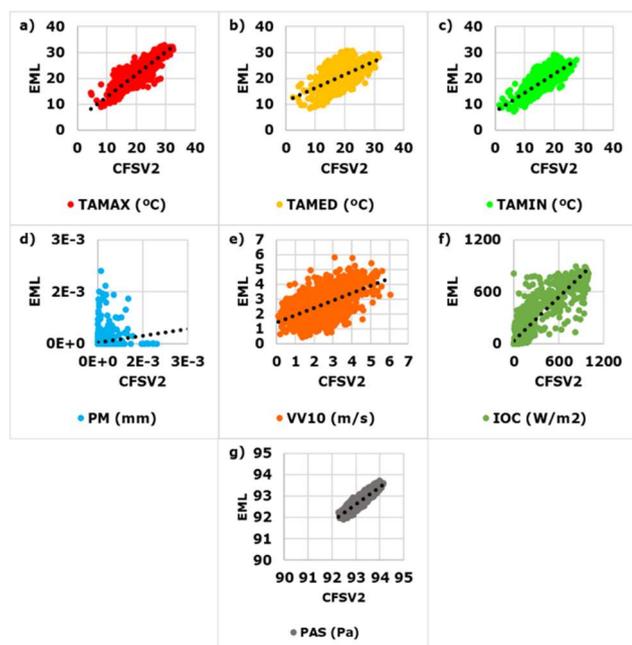


Figura 2. Dispersão da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo CFSV-2.
Figure 2. Scatter of the comparison between the data obtained by the EML and by the CFSV-2.

Portanto, com relação ao Climate Forecast System - Versão 2, o indicativo estatístico MBE mostra que a temperatura máxima, média e mínima do ar, velocidade do vento a 10 metros e a irradiância solar de onda curta fornecidas por meio de sensoriamento remoto subestimaram as medidas realizadas em superfície terrestre (Tabela 3). Para o rMBE, a precipitação média e a temperatura mínima do ar apresentaram o maior e o menor valor, respectivamente. Assim como, para o rRMSE, o maior e menor valor são apresentados pela precipitação média e pressão atmosférica na superfície terrestre, respectivamente. Já para o indicativo estatístico r, a irradiância solar de onda curta e a precipitação média obtiveram o maior (0,91) e o menor valor (0,18), respectivamente.

Tabela 3. Indicativos estatísticos da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo CFSV-2.
Table 3. Statistical indicators of the comparison between the data obtained by the EML and by the CFSV-2.

Variável Meteorológica	MBE (rMBE)	RMSE (rRMSE)	r
TAMAX (°C)	-1,45 (-6,38)	2,60 (11,47)	0,88
TAMED (°C)	-2,06 (-9,79)	4,42 (21,08)	0,58
TAMIN (°C)	-2,52 (-13,09)	3,59 (18,62)	0,75
PM (mm)	5e-5 (145,24)	2e-4 (682,69)	0,18
VV10 (m/s)	-0,27 (-10,81)	0,9 (37,17)	0,59
IOC (W/m ²)	-2,84 (-1,38)	115,49 (56,00)	0,91
PAS (Pa)	0,43 (0,46)	0,46 (0,50)	0,88

3.3. Produtos Geoespaciais Diários do ERA-5

Com exceção da precipitação acumulada, que é um elemento relacionado a quantidade de água presente na atmosfera e que apresentou uma alta variabilidade e espalhamento entre os pontos de medidas, assim como visto em ambas as comparações dos produtos geoespaciais anteriores, os demais dados meteorológicos fornecidos pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts em comparação com as medidas obtidas pela Estação Meteorológica Lageado, em resolução temporal diária, demonstraram ter uma forte correlação positiva (Figura 3).

O indicativo estatístico MBE mostra que a precipitação acumulada, velocidade do vento a 10 metros e pressão atmosférica no nível do mar, obtidas a partir do sensoriamento remoto, subestimaram as medidas realizadas em superfície terrestre (Tabela 4). Para o rMBE, a temperatura máxima do ar e a precipitação acumulada apresentaram o maior e o menor valor, respectivamente. Do mesmo modo que, para o rRMSE, o maior e o menor valor são apresentados pela precipitação acumulada e pela pressão atmosférica ao nível do mar, respectivamente. Para o indicativo estatístico r, a pressão atmosférica na superfície terrestre e a pressão atmosférica ao nível do mar, apresentaram os maiores valores (ambos de 0,99), o que indica que há a possibilidade de criar modelos lineares para ajustar os valores obtidos pelo European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, em relação as medidas de referência, coletadas na superfície terrestre. Em contrapartida, a precipitação acumulada, apresentou a menor correlação (r de 0,62) entre todos as medidas meteorológicas investigadas.

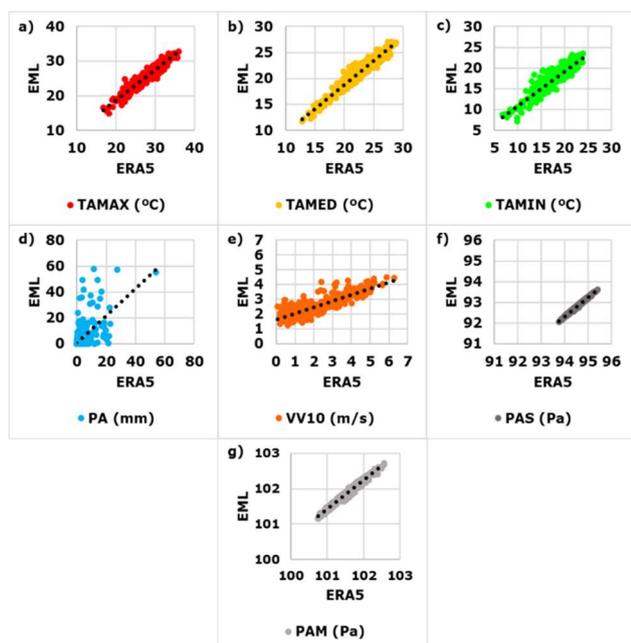


Figura 3. Dispersão da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo ERA-5.

Figure 3. Scatter of the comparison between the data obtained by the EML and by the ERA-5.

Tabela 4. Indicativos estatísticos da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo ERA-5.

Table 4. Statistical indicators of the comparison between the data obtained by the EML and by the ERA-5.

Variável Meteorológica	MBE (rMBE)	RMSE (rRMSE)	r
TAMAX (°C)	2,32 (8,96)	2,54 (9,78)	0,96
TAMED (°C)	1,39 (6,63)	1,61 (7,66)	0,97
TAMIN (°C)	0,44 (2,51)	1,35 (7,78)	0,92
PA (mm)	-0,79 (-23,94)	7,11 (216,59)	0,62
VV10 (m/s)	-0,41 (-15,96)	0,94 (36,93)	0,84
PAS (Pa)	1,72 (1,85)	1,72 (1,86)	0,99
PAM (Pa)	-0,33 (-0,32)	0,34 (0,33)	0,99

3.4. Produtos Geoespaciais Mensais do FLDAS

Em um contexto geral, as medições meteorológicas obtidas pela Estação Meteorológica Lageado e fornecidas pelo conjunto de dados geoespaciais do Famine Early Warning Systems Network - Land Data Assimilation System, em resolução temporal mensal, demonstraram bons resultados, com exceção da precipitação média e da evapotranspiração média, que são elementos relacionados a quantidade de água presente na atmosfera, onde um maior espalhamento é evidenciado (Figura 4).

O indicativo estatístico MBE mostra que apenas a temperatura média do ar e a evapotranspiração média fornecidas por meio de sensoriamento remoto subestimaram as mensurações realizadas em superfície terrestre. Para o rMBE, a velocidade do vento a 2 metros e a pressão atmosférica na superfície terrestre apresentaram o maior e o menor valor, respectivamente (Tabela 5). Do mesmo modo que, para o rRMSE, o maior e o menor valor são apresentados pela velocidade do vento a 2 metros e pela pressão atmosférica na superfície terrestre, respectivamente. Embora a velocidade do vento a 2 metros tenha apresentado os maiores valores de rMBE e rRMSE, sua alta correlação (r de 0,98) possibilita a criação de modelos lineares para ajuste

dos valores obtidos por meio do Famine Early Warning Systems Network - Land Data Assimilation System. Para o indicativo estatístico r, as variáveis de pressão atmosférica na superfície terrestre e evapotranspiração média apresentaram o maior e o menor valor, respectivamente.

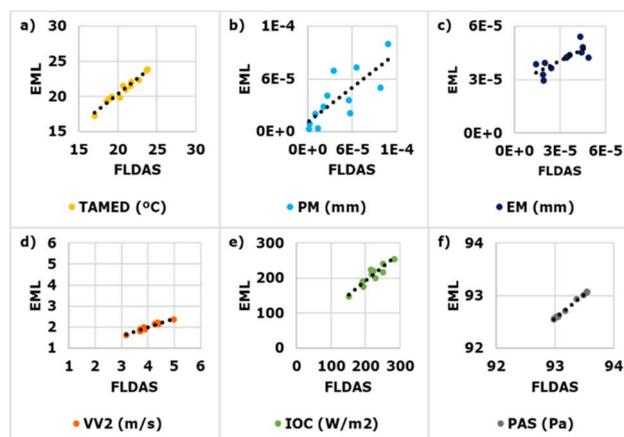


Figura 4. Dispersão da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo FLDAS.

Figure 4. Scatter of the comparison between the data obtained by the EML and by the FLDAS.

Tabela 5. Indicativos estatísticos da comparação entre os dados obtidos pela EML e pelo FLDAS.

Table 5. Statistical indicators of the comparison between the data obtained by the EML and by the FLDAS.

Variável Meteorológica	MBE (rMBE)	RMSE (rRMSE)	r
TAMED (°C)	-0,25 (-1,19)	0,50 (2,40)	0,98
PM (mm)	3e-6 (8,78)	2e-5 (57,75)	0,78
EM (mm)	-1e-5 (-23,11)	1e-5 (29,92)	0,77
VV2 (m/s)	2,02 (100,72)	2,04 (101,57)	0,98
IOC (W/m²)	11,60 (5,62)	16,92 (8,20)	0,93
PAS (Pa)	0,45 (0,49)	0,45 (0,49)	0,99

4. DISCUSSÃO

Em relação aos produtos horários do Global Land Data Assimilation System - Versão 2.1 (Seção 3.1), notou-se uma concordância significativa na temperatura média do ar, evapotranspiração média, velocidade do vento a 2 metros, irradiação solar de onda curta e pressão atmosférica na superfície terrestre. Porém, a precipitação média exibiu uma menor exatidão, possivelmente devido às limitações do sensoriamento remoto, conforme citado anteriormente. As variações significativas da irradiação solar de onda curta e da evapotranspiração média podem ser atribuídas as flutuações climáticas locais dessas variáveis meteorológicas. Neste caso, os produtos geoespaciais não subestimaram as medições, conforme evidenciado pelo MBE. A precipitação média e a temperatura média do ar apresentaram os maiores desvios absolutos (rMBE), enquanto a precipitação atmosférica na superfície terrestre e a precipitação média exibiram o maior e o menor coeficiente de correlação (r), respectivamente.

No caso dos produtos horários do Climate Forecast System - Versão 2, houve uma forte correlação positiva para a maioria das variáveis meteorológicas, exceto a precipitação média, que demonstrou ter um desafio em relação à concordância com as medições terrestres. As variações na velocidade do vento a 10 metros e na irradiação solar de onda curta podem ser atribuídas a fatores sazonais e regionais

do local de obtenção das medições. As métricas estatísticas demonstraram que, neste caso, os produtos geoespaciais subestimam a maioria das variáveis meteorológicas, conforme indicado pelo MBE. A temperatura mínima do ar registrou o menor rMBE, enquanto a pressão atmosférica na superfície terrestre e a precipitação média apresentaram o menor e o maior desvio relativo (rRMSE), respectivamente. O coeficiente de correlação (r) destacou a concordância significativa para a irradiância solar de onda curta e a precipitação média, apesar das variações que foram observadas.

A avaliação dos produtos diários do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts também evidenciou uma forte correlação positiva para a maioria das variáveis, exceto para a precipitação acumulada, que apresentou uma alta variabilidade. Essa variabilidade condiz com as observações anteriores, influenciada, provavelmente, por interferências meteorológicas e fenômenos climáticos locais complexos de serem representados pela modelagem geoespacial em questão. As métricas estatísticas revelaram, neste caso, que os produtos geoespaciais subestimaram uma parte das variáveis meteorológicas, sendo a precipitação acumulada a mais afetada, conforme indicado por MBE e rMBE. O coeficiente de correlação (r) se demonstrou elevado para a pressão atmosférica, sugerindo a viabilidade de se criar modelos para ajustar os produtos geoespaciais às medições terrestres.

Por fim, ao explorar os produtos mensais do Famine Early Warning Systems Network - Land Data Assimilation System, observou-se boas concordâncias, exceto para a precipitação média e evapotranspiração média, que apresentaram maior variabilidade. Essa variabilidade pode ser atribuída à complexidade da medição, assim como para os exemplos anteriores. As métricas estatísticas indicaram desvios negativos nas variáveis de temperatura média do ar e evapotranspiração média em relação às medições terrestres, enquanto a velocidade do vento a 2 metros e a pressão atmosférica na superfície terrestre exibiram o maior e o menor desvio, respectivamente. A alta correlação na temperatura média do ar e na pressão atmosférica na superfície terrestre sugerem sua maior confiabilidade para uso em estudos futuros.

É imperativo ressaltar que, até o momento, não existe material na literatura técnica ou científica que tenha abordado de forma metodológica semelhante a comparação de medições meteorológicas derivadas de sensoriamento remoto com aquelas obtidas no local, considerando todas as variáveis meteorológicas e os satélites englobados neste estudo. Contudo, é possível constatar a existência de várias pesquisas científicas conduzidas no Brasil que usam produtos derivados de satélites, que também apresentam bons resultados, como uma alternativa para a obtenção de medidas meteorológicas em escalas temporais distintas.

Neste sentido, o satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), evidenciou sua alta qualidade como uma opção para estimar a precipitação pluviométrica (PESSI et al., 2019; PEREIRA et al., 2023). Os satélites Meteosat Second Generation (MSG) e Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) também se mostraram fontes promissoras para a obtenção de estimativas da radiação solar na superfície terrestre (PORFIRIO; CEBALLOS, 2014; THOMAS et al., 2016). De modo que, o LANDSAT mostrou-se eficaz na estimativa da evapotranspiração (BEZERRA et al., 2008; RIBEIRO et al.,

2008), e o AQUA/MODIS se mostrou uma opção viável para a estimativa da temperatura do ar (ATAÍDE et al., 2009; CAMPAROTTO et al., 2023).

5. CONCLUSÕES

Esta investigação avaliou a exatidão das medidas meteorológicas adquiridas por meio de produtos geoespaciais, contrastando-as com as obtidas na superfície terrestre a partir de uma estação meteorológica automática em Botucatu (SP) - Brasil. As análises estatísticas revelaram que a temperatura do ar, pressão atmosférica, irradiância solar de onda curta e velocidade do vento exibiram um grau satisfatório de concordância (exatidão) com as medidas de referência. Em contrapartida, a precipitação e a evapotranspiração apresentaram resultados menos favoráveis, devido, principalmente, às atuais limitações na modelagem hidrológica dos produtos geoespaciais avaliados no estudo.

Em um contexto geral, os produtos dos satélites FLDAS e ERA 5 demonstraram um melhor desempenho para a maioria das variáveis meteorológicas averiguadas, exceto aquelas relacionadas à quantidade de água na atmosfera. Contudo, os resultados menos satisfatórios foram observados pelos produtos dos satélites CFSV 2 e GLDAS 2.1. Além disso, constatou-se que as medidas meteorológicas em resoluções temporais mensal e diária apresentaram uma exatidão superior quando comparadas às horárias. Nesse contexto, sugere-se a continuidade deste estudo, ampliando o escopo, no sentido de incluir um conjunto de variáveis meteorológicas com um histórico mais longo de medições.

6. REFERÊNCIAS

- ATAÍDE, K. R. P.; LEDO, I. M. D.; OLIVEIRA, M. G. R.; BEZERRA, W. A. Avaliação da estimativa da temperatura de superfície obtida pelo sensor MODIS para o Estado de Goiás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV, **Anais...** Natal, 2009. 3495-3502. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2009/03.02.18.19?mirror=dpi.inpe.br/banon/2003/12.10.19.30.54&metadatarepository=dpi.inpe.br/sbsr@80/2009/03.02.18.19.38>
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da Evapotranspiração Real Diária Utilizando-se Imagens Digitais TM-LANDSAT 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000300005>.
- BHATTARAI, N.; WAGLE, P. Recent Advances in Remote Sensing of Evapotranspiration. **Remote Sensing**, v. 13, e4260, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13214260>.
- CAMPAROTTO, L. D.; BLAIN, G. C.; GIAROLLA, A.; ADAMI, M.; CAMARGO, M. B. P. Validação de Dados Termopluviométricos Obtidos via Sensoriamento Remoto para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 665-671, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600013>.
- DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J.F.; DAL PAI, E.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. R.; CODATO, G. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, v.

- 99, p. 754-763, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.026>.
- ESTAÇÃO METEOROLÓGICA LAGEADO. **Sobre a Estação Meteorológica**. Disponível em: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>. Acesso em: 06 nov. 2020.
- GOOGLE EARTH ENGINE. **Platform - Google Earth Engine**. Disponível em: <https://earthengine.google.com/platform>. Acesso em: 04 nov. 2020.
- GOODARZI, M. R.; POOLADI, R.; NIAZKAR, M. Evaluation of Satellite-Based and Reanalysis Precipitation Datasets with Gauge-Observed Data over Haraz-Gharehsoo Basin, Iran. **Sustainability**, v. 14, p. 13051, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142013051>.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- HUNTINGTON, J. L.; HEGEWISCH, K. C.; DAUDERT, B.; MORTON, C. G.; ABATZOGLOU, J. T.; MCEVOY, D. J.; ERICKSON, T. Climate Engine: cloud computing and visualization of climate and remote sensing data for advanced natural resource monitoring and process understanding. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 11, p. 2397-2410, 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>.
- IBGE. Panorama do município de Botucatu - SP. **Cidades: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**: Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 16 out. 2019.
- KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1509, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>.
- LI, Y.; LIANG, K.; LIU, C.; LIU, W.; Bai, P. Evaluation of different evapotranspiration products in the middle Yellow River Basin, China. **Hidrology Research**, v. 48, p. 498-513, 2017. <https://doi.org/10.3390/w10121884>.
- MENDELSON, R.; KURUKULASURIYA, P.; BASIST, A.; KOGAN, F.; WILLIAMS, C. Climate analysis with satellite versus weather station data. **Climatic Change**, v. 81, n. 1, p. 71-83, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9139-x>.
- PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, 2023. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p139-148>
- PESSI, D. D.; SANTOS, C. S. A.; NONATO, J. J.; DOURADO, L. G. A.; SILVA, O. P.; BASSINI, R. T.; JOSÉ, J. V. Validação das Estimativas de Precipitação do Satélite TRMM no Estado de Mato Grosso. Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 79-88, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.19084/RCA18217>.
- PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. Validação da Estimativa de Irradiação Solar Direta Normal por Satélite. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, V, Recife, Brasil, 2014. **Anais...** Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2211>.
- RIBEIRO, H. J.; OLIVEIRA, W. N.; SIQUEIRA, R. V.; OLIVEIRA, A. W. N.; OLIVEIRA, V. T. **Estimativa da Evapotranspiração Diária para Diferentes Usos do Solo Utilizando imagens do Satélite LANDSAT 5**. In: 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Mato Grosso do Sul, Brasil, p.513-522, 2018. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p73.pdf>.
- RINCÓN, A.; JORBA, O.; FRUTOS, M.; ALVAREZ, L.; BARRIOS, F. P.; GONZÁLEZ, J. A. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, v. 170, p. 201-211, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.061>.
- THOMAS, C.; WEY, E.; BLANC, P.; WALD, L. Validation of Three Satellite-Derived Databases of Surface Solar Radiation Using Measurements Performed at 42 Stations in Brazil. **Advances in Science & Research**, v. 13, n. 81-86, 2016. <https://doi.org/10.5194/asr-13-81-2016>.
- TORRES, J. D.; MONTEIRO, I. O.; SANTOS, J. R.; ORTIZ, M. S. Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 2015.
- XIA, Z.; GUO, X.; CHEN, R. Automatic extraction of aquaculture ponds base on Google Earth Engine. **Ocean & Coastal Management**, v. 198, p. 105348, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105348>.

Agradecimentos: 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).

Contribuição dos autores: M. R. R. e J. R. F. - Conceituação, Metodologia, Investigação ou Coleta de Dados, Análise Estatística e Redação (Esboço Original). M. V. C. C. - Metodologia, Investigação ou Coleta de Dados, Validação, Redação (Revisão e Edição). G. S. e L. R. R. - Metodologia, Redação (Esboço Original) e Redação (Revisão e Edição). A. D. P. - Investigação ou Coleta de Dados e Administração ou Supervisão.

Financiamento: Bolsas de Mestrado e Doutorado fornecidas pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq).

Revisão por comitê institucional: Não se aplica.

Comitê de Ética: Não se aplica.

Disponibilização de dados: Os algoritmos, scripts e dados produzidos por este estudo podem ser solicitados ao autor correspondente ou ao primeiro autor, através dos e-mails: marcus.calca@unesp.br e matheus.raniero@unesp.br.

Conflito de Interesse: Os autores declaram que não existem conflitos de interesse com outros pesquisadores ou instituições.