



Espacialização por meio de malha de dados de precipitação e evapotranspiração em sub-bacia do rio Pirapó utilizando sensoriamento remoto

Lucas Vinicius Dias

Mestre, UEM, Brasil.
vinicioslukas_dias@hotmail.com

Lais Ferrer Amorim de Oliveira

Pesquisadora Doutora, USP, Brasil.
laisamorim@alumni.usp.br

Paulo Fernando Soares

Professor Doutor, UEM, Brasil.
pfsoares@uem.br

Cláudia Telles Benatti

Professora Doutora, UEM, Brasil.
ctbenatti@uem.br

Recebido: 22 de outubro de 2024

Aceito: 5 de novembro de 2024

Publicado online: 14 de dezembro de 2024

DOI: 10.17271/1980082720420245195

<https://doi.org/10.17271/1980082720420245195>

Licença

Copyright (c) 2024 Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista



Este trabalho está licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution 4.0 International License

Espacialização por meio de malha de dados de precipitação e evapotranspiração em sub-bacia do rio Pirapó utilizando sensoriamento remotos

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo utilizar dados de sensoriamento remoto dos produtos IMERG e GLDAS a partir de um grid de precipitação e evapotranspiração mensal médio para gerar uma análise espacializada das variáveis de precipitação e evapotranspiração na sub-bacia do Rio Pirapó, com exultório na estação de captação de água de Maringá, Paraná, visando a melhoria no monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Foi aplicada uma abordagem quantitativa com o uso de uma malha de 07x09 células (100 km² por célula) para mapear as variáveis ambientais de 2000 a 2020. A precipitação foi analisada utilizando polígonos de Thiessen com dados de cinco estações pluviométricas e a evapotranspiração foi obtida por meio de balanço de energia e dados de temperatura de uma estação climatológica. Métodos estatísticos de acurácia e similaridade foram usados para validar os resultados. O estudo apresenta uma importante aplicação de sensoriamento remoto para monitorar variáveis hidrometeorológicas em escala espacial na bacia do Rio Pirapó, oferecendo uma alternativa a dados pontuais obtidos por estações terrestres. A malha gerada apresentou ótima correlação, boa similaridade entre os dados de precipitação e evapotranspiração, com baixos erros e incertezas, comprovando a acurácia dos dados espacializados. A malha ajustada pode ser utilizada para a correlação com outros parâmetros hidrometeorológicos, bem como análise espacial das variáveis envolvidas no gerenciamento dos recursos hídricos e no ciclo hidrológico. A metodologia proposta pode aprimorar a gestão dos recursos hídricos, fornecendo dados mais detalhados para previsões de impacto ambiental e gestão sustentável dos meios naturais e antrópicos.

PALAVRAS-CHAVE: Variáveis hidrometeorológicas. Produtos IMERG. Produtos GLDAS.

Spatialization through a rainfall and evapotranspiration data mesh in the Pirapó River sub-basin using remote sensing

ABSTRACT

This work aims to use remote sensing data from the IMERG and GLDAS products based on an average monthly grid of precipitation and evapotranspiration to generate a spatial analysis of the precipitation and evapotranspiration variables in the Pirapó River sub-basin, focusing on the water intake station in Maringá, Paraná, aiming to improve the monitoring and management of water resources. A quantitative approach was applied using a 07x09 cell mesh (100 km² per cell) to map environmental variables from 2000 to 2020. Precipitation was analyzed using Thiessen polygons with data from five rain gauge stations, and evapotranspiration was obtained through energy balance and temperature data from a climatological station. Statistical methods of accuracy and similarity were used to validate the results. The study presents an important application of remote sensing to monitor hydrometeorological variables at a spatial scale in the Pirapó River basin, offering an alternative to point data obtained from ground stations. The generated mesh showed great correlation and good similarity between the precipitation and evapotranspiration data, with low errors and uncertainties, confirming the accuracy of the spatialized data. The adjusted mesh can be used for correlation with other hydrometeorological parameters, as well as for spatial analysis of the variables involved in the management of water resources and the hydrological cycle. The proposed methodology can enhance water resource management by providing more detailed data for environmental impact predictions and sustainable management of natural and anthropogenic environments.

PALAVRAS-CHAVE: Hydrometeorological variables. IMERG products. GLDAS products.

Espacialización mediante una malla de datos de precipitación y evapotranspiración en la subcuenca del río Pirapó utilizando sensores remotos

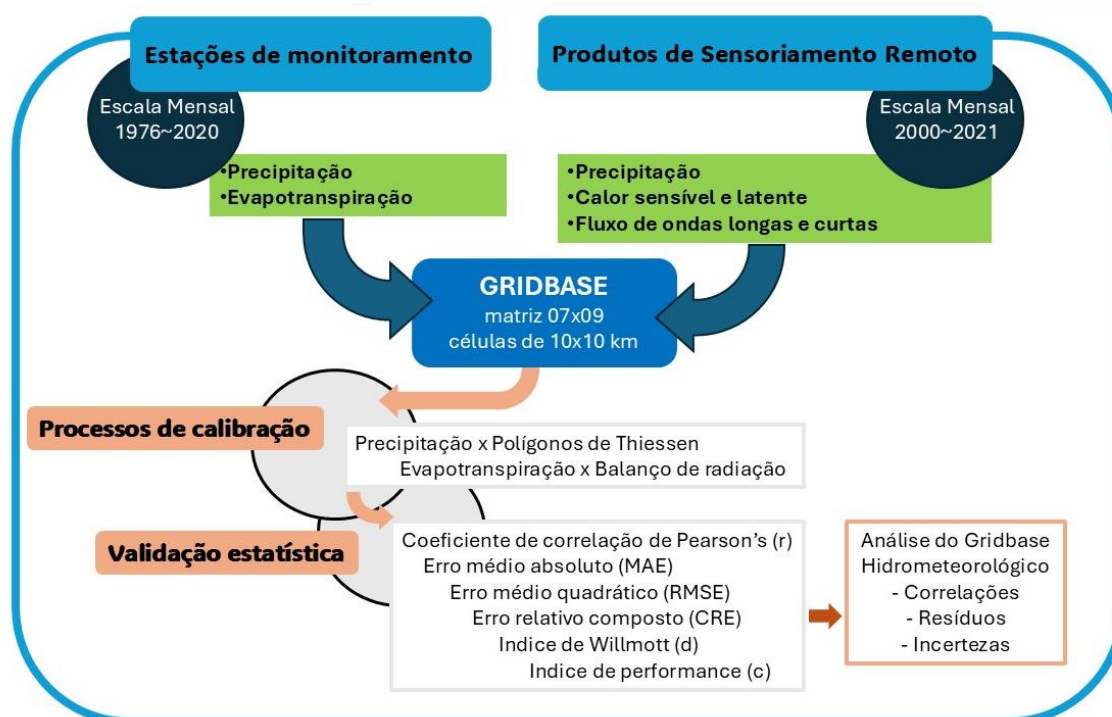
RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo utilizar datos de sensores remotos de los productos IMERG y GLDAS a partir de una malla de precipitación y evapotranspiración mensual promedio para generar un análisis espacializado de las variables de precipitación y evapotranspiración en la subcuenca del río Pirapó, con exutorio en la estación de captación de agua de Maringá, Paraná, buscando la mejora en el monitoreo y la gestión de los recursos hídricos. Se aplicó un enfoque cuantitativo utilizando una malla de 07x09 celdas (100 km² por celda) para mapear las variables ambientales

de 2000 a 2020. La precipitación se analizó mediante polígonos de Thiessen con datos de cinco estaciones pluviométricas, y la evapotranspiración se obtuvo mediante balance energético y datos de temperatura de una estación climatológica. Se emplearon métodos estadísticos de precisión y similitud para validar los resultados. El estudio presenta una importante aplicación de sensores remotos para monitorear variables hidrometeorológicas a escala espacial en la cuenca del río Pirapó, ofreciendo una alternativa a los datos puntuales obtenidos por estaciones terrestres. La malla generada presentó una excelente correlación, buena similitud entre los datos de precipitación y evapotranspiración, con bajos errores e incertidumbres, comprobando la precisión de los datos espacializados. La malla ajustada puede ser utilizada para la correlación con otros parámetros hidrometeorológicos, así como para el análisis espacial de las variables involucradas en la gestión de los recursos hídricos y en el ciclo hidrológico. La metodología propuesta puede mejorar la gestión de los recursos hídricos, proporcionando datos más detallados para predicciones de impacto ambiental y la gestión sostenible de los medios naturales y antrópicos.

PALABRAS CLAVE: Variables hidrometeorológicas. Productos IMERG. Productos GLDAS.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

Estudos sobre mudanças climáticas e eventos hidroclimáticos extremos têm sido foco nas últimas décadas, devido à sua magnitude e frequência (BHUNYA *et al.*, 2020). Nesta perspectiva, dados como precipitação, temperatura e evapotranspiração são essenciais para analisar os padrões hidroclimáticos de uma área ou bacia hidrográfica (GOMES *et al.*, 2022). Contudo, o monitoramento terrestre de variáveis hidroclimáticas em áreas menores, como uma área de drenagem dentro de uma bacia Ottocodificada de nível 3 ou superior (Sistema Otto Pfafstetter de Codificação), é geralmente falho e descontínuo. Grandes áreas são representadas por um único ponto de monitoramento, seja por uma estação climatológica ou pluviométrica, ou por pesquisas realizadas na região.

O intuito do monitoramento hidrometeorológico é criar uma base de dados hidrométricos de uma bacia hidrográfica para o monitoramento de parâmetros relacionados a quantidade e qualidade da água em diferentes subsistemas do ciclo hidrológico (SREPARVATHY; SRINIVAS, 2020). Possibilita informações relacionadas aos recursos hídricos e variáveis hidrológicas, que podem servir de indicativos para a análise de mudanças climáticas e eventos extremos na bacia. Esta abordagem possibilita tomadas de decisões mais assertivas para gestão e projetos territoriais e de recursos hídricos (POZZONI; SALVETTI; CANNATA, 2020).

As medições por estações (pluviométricas, fluviométricas e climatológicas) fazem parte do sistema mais clássico de uma rede de coleta e monitoramento, realizando medições periódicas de dados para previsões meteorológicas, hidrológicas ou para alguma finalidade específica (NJUE, 2019). As estações citadas podem ser convencionais, com equipamentos instalados em local apropriado e leitura manual por pessoal qualificado que anota e armazena os dados na estação. Podem ser automáticas com a utilização de sensores programados para coletar os dados, com tempo de resposta mais rápido, e transferência diretamente para a estação. Podem ser ainda telemétricas, que partem do mesmo princípio das automáticas, mas além de utilizarem sensores para a coleta de dados, as mesmas armazenam e disponibilizam as informações na rede em tempo real (OŚRÓDKA; OTOP; SZTURC, 2022; WMO, 2023).

Entretanto, estes monitoramentos acabam por gerar dados pontuais, no local fixo da estação que não necessariamente representa na íntegra a intensidade dos parâmetros hidrometeorológicos em todo o entorno da estação. Desta forma, se faz necessário a espacialização dos dados monitorados, por meio de metodologias de interpolação, de forma a obter dados contínuos na superfície geográfica analisada (FRANCO; UDA, 2015; WANG *et al.*, 2024).

O geoprocessamento e sistemas de informações geográficas (SIG) podem ser utilizados para a obtenção de dados de monitoramento hidrometeorológicos com uma maior espacialização em determinada área (BRUBACHER *et al.*, 2020). Com a utilização de sensores imageadores (imagens de satélites) é possível a coleta de dados de uma determinada área e período, conforme resolução espacial e temporal do sensor, que a bordo do satélite monitora amplas regiões e diversas variáveis (relevo, declividade, evapotranspiração, vegetação etc.), disponibilizando assim dados espacializados de um parâmetro analisado (RADOČAJ *et al.*, 2020).

Ainda, um cuidado deve ser tomado quanto a resolução espacial destas imagens, uma vez que quanto maior o valor de resolução, menor o nível de detalhamento observado. Desta

forma, quanto maior o valor espacial do monitoramento, as imagens passarão a apresentar o dado predominante em seus pixels e suprimir certos detalhes que não são passíveis de serem observados nesta resolução (CARMO; AZEVEDO; MATIAS, 2023; SILVA et. al., 2024).

Os produtos obtidos pelo algoritmo IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*) são resultados das estimativas do sensor do satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*) que coleta dados de precipitação de todo o globo terrestre desde o início de sua operação em 2014 até a atualidade. Os produtos IMERG mais recentes realizam uma fusão com os dados monitorados anteriormente pelo sensor TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), lançado em 1997 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em conjunto com a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão, e com operação de 2000 a 2015, apresentando como produto, imagens da análise do monitoramento e previsão de precipitação em zonas tropicais e subtropicais, levando em consideração as interações do clima e precipitação com as massas de ar e terra, além das extensas áreas marítimas e suas influências (BLUMENFELD, 2020; JUNQUEIRA et al., 2022).

Outro produto que pode ser utilizado para análise de parâmetros hidrometeorológicos por sensoriamento remoto, é o GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*), desenvolvido pela NASA em conjunto com o NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). GLDAS utiliza uma nova geração de sistemas de observação baseados em dados terrestres e espaciais para integrar seu modelo de superfície terrestre em conjunto com dados meteorológicos e atmosférico, de forma a obter dados globais em alta qualidade e que representem a superfície da Terra, bem como suas trocas de calor, e fluxos de ondas de radiação (RODELL et al., 2004). Por meio destas variáveis, é possível obter dados de temperatura, umidade do ar, evapotranspiração, e outros parâmetros relacionados ao ciclo hidrológico em determinada área, com uma periodicidade mensal, diária, ou a cada 3 horas.

O monitoramento adequado de parâmetros hidrometeorológicos com a maior capacidade de detalhamento é imprescindível para a gestão dos recursos hídricos de certa região. A análise de sub-bacias de contribuição no uso da água deve ser realizada de forma contínua, a fim de entender as possíveis alterações que o meio natural e antrópico ocasionam no ciclo hidrológico e nos recursos hídricos presentes na sub-bacia.

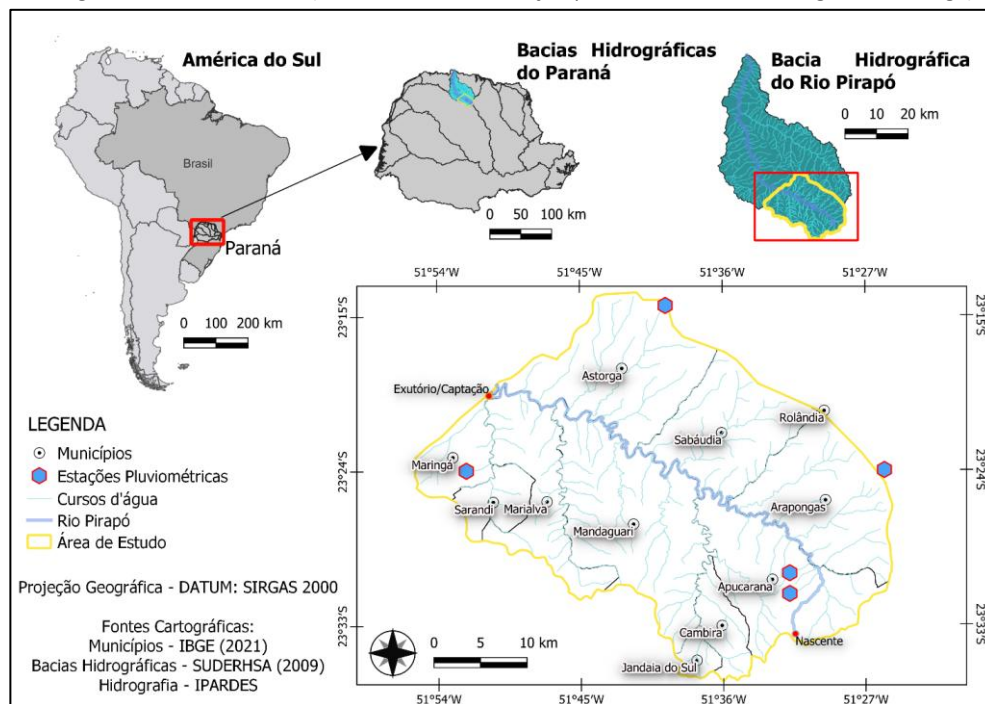
O município de Maringá, localizado no norte central do Estado do Paraná, utiliza pelo menos 85% de águas superficiais do Rio Pirapó para seu abastecimento urbano (CÂMARA MUNICIPAL DE MARINGÁ, 2018), com uma sub-bacia com área de 1232,40 km² de contribuição, que contempla onze municípios do Estado. Destes somente quatro municípios apresentam estações pluviométricas para monitoramento das chuvas, e somente uma estação climatológica em toda a região.

Desta forma, a realização de estudos hidrometeorológicos mais especializados de forma a contemplar a melhor distribuição das variáveis do ciclo hidrológico na sub-bacia é vital para viabilizar uma gestão sustentável dos recursos hídricos. Assim, o presente trabalho teve como objetivo utilizar os produtos IMERG e GLDAS a partir de um grid de precipitação e evapotranspiração mensal médio de 2000 a 2020 para a área da sub-bacia do Rio Pirapó com exultório na estação de captação de água do município de Maringá, Paraná, como uma metodologia para obter dados espacializados das variáveis em questão.

2 METODOLOGIA

A área de estudo deste trabalho é a sub-bacia do rio Pirapó, com sua nascente na região de Apucarana, nas coordenadas geográficas 23°33'33"S; 51°31'27"O, e um exutório nas coordenadas 23°19'33"S; 51°50'42"O, estação de captação de água superficiais para abastecimento urbano do município de Maringá, como pode ser observado na Figura 1 (ANA, 2022).

Figura 1 - Área de estudo (sub-bacia de contribuição para abastecimento de água de Maringá)



O clima característico predominante da região é o subtropical úmido segundo classificação de Köppen (1978), do tipo Cfa. As características destes climas são as de verões mais quente e chuvosos, invernos sem a frequência de geadas e sem apresentar uma estação de seca definida. Apresenta uma temperatura mínima anual na faixa de 15 a 17 °C, temperatura máxima anual de 25 a 29 °C e temperatura média anual de 20 a 23 °C. A média anual de precipitação está na faixa de 1400 a 1800 mm na região, com umidade relativa do ar de 70 a 75%, e evapotranspiração potencial (ETP) de 900,1 a 1100 mm (IAPAR, 2019).

Para esta análise foram consideradas as cinco estações pluviométricas constantes na área da bacia, nas quais foram obtidos dados de precipitação mensal e anual, e a estação climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET), no município de Maringá, na qual foram obtidos os dados de temperatura máxima e mínima, evapotranspiração real e potencial em escala mensal. Os dados de todas as estações podem ser observados na



Tabela 1.

Tabela 1 - Estações de monitoramento na área de interesse

Estação	Código da Estação	Nome	Tipo	Escala Temporal	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
P1	2351008	Apucarana (Fazenda Ubatuba)	Pluviométrica ^a	jan/1976-set/1999	Apucarana	-23,500	-51,533	746
P2	2351080	PCH Apucarantina Montante 2	Pluviométrica ^a	out/199-dez/2020	Apucarana	-23,518	-51,530	792
P3	2351048	Arapongas	Pluviométrica ^a	jan/1976-dez/2019	Arapongas	-23,400	-51,433	793
P4	2351051	Astorga	Pluviométrica ^a	jan/1976-dez/2019	Astorga	-23,237	-51,661	572
P5	2351045	Guaiapó	Pluviométrica ^a	jan/1976-dez/2019	Maringá	-23,400	-51,874	584
C1	83767	Maringá	Climatológica ^b	jan/1990-dez/2021	Maringá	-23,400	-51,917	542

Nota: Dados trabalhados a partir de: a - HidroWeb, ANA (2022) e b – INMET (2022)

2.1 Sensoriamento remoto e geoprocessamento de dados

Para uma espacialização das características hidrometeorológicas da sub-bacia foram utilizados produtos de sensoriamento remoto (apresentados Tabela 2), para que, quando validados com os dados das estações na área de estudo, pudessem apresentar uma caracterização das variáveis analisadas, como observado nas pesquisas de Xavier, King e Scanlon (2015) e Xavier *et al.* (2021). Os produtos de sensoriamento remoto foram obtidos via GES Disc NASA (2022), provedor para downloads da plataforma *EarthData* da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (*National Aeronautics and Space Administration – NASA*).

Tabela 2 - Produtos de sensoriamento remoto em escala mensal obtidos pela GES DISC NASA

Produto	Satélite/Sensor	Resolução espacial	Parâmetro	Histórico de dados	Amostras	Falhas
IMERG	GPM/TRMM	10 km	Precipitação (mm h ⁻¹)	out/2000-set/2021	252	0
GLDAS	NASA	25 km	Calor latente e sensível (W m ⁻²) Rede de fluxo de ondas curtas e longas (W m ⁻²)	jan/2000-nov/2021	263	0

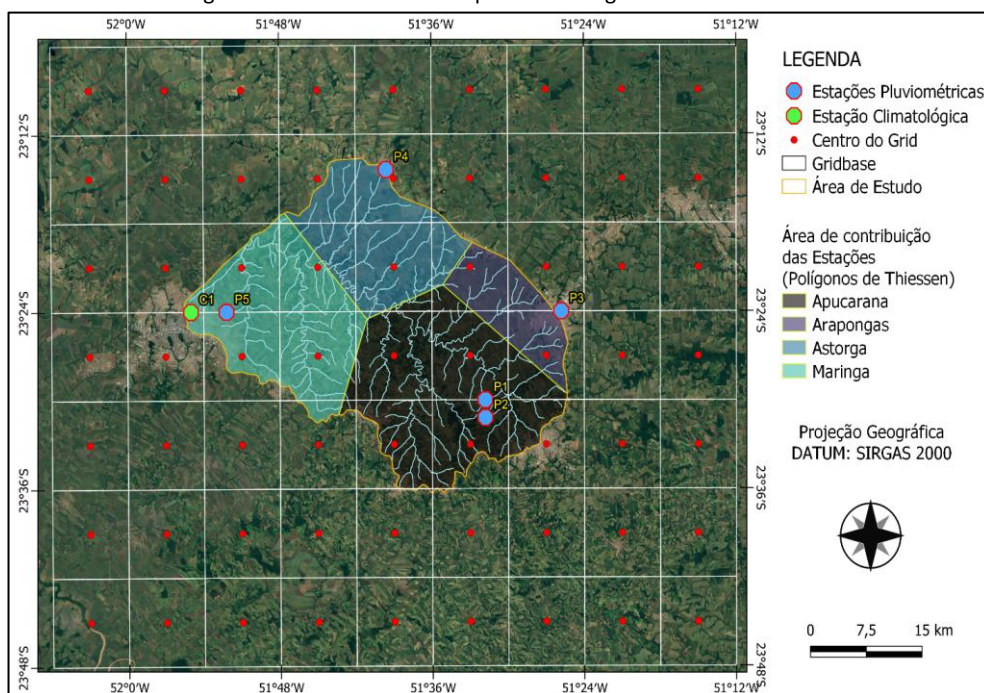
Os produtos IMERG foram utilizados para a obtenção de dados de precipitação da área de estudo. Já os produtos GLDAS foram utilizados para a obtenção da evapotranspiração real, utilizando dos fluxos de calor presentes na sub-bacia em conjunto com o saldo de radiação global (ondas longas e curtas).

Como as resoluções espaciais dos produtos de sensoriamento remoto obtidas apresentavam valores de até 25 km, foi utilizado o software Quantum Gis (Qgis 3.16.16) para delimitar um retângulo com geometria limite de 70 km na vertical e 90 km na horizontal (coordenadas: -52,099; -23,799; -51,199; -23,099), para ser utilizado dentro das plataformas

Earthdata Search e *GES Disc*, da NASA, para obtenção dos produtos determinados para análise. Dentro deste limite foi realizada uma malha (*gridbase*) em uma matriz de 07x09 células de 10x10 km (totalizando os 70x90 km) de forma que compreendesse a menor faixa de resolução espacial dos sensores utilizados (10 km), com pontos centrais que possibilitassem a amostragem de dados das imagens raster (

Figura 2).

Figura 2 - Gradeamento base para amostragem de valores raster



Como só há a presença de 1 estação climatológica, os parâmetros obtidos pela mesma foram considerados como a média da bacia com área de 1232,40 km². Já para as estações pluviométricas em atividade, foi utilizado o diagrama de Voronoi (AURENHAMMER, 1991), por meio da função *v.voronoi* no software Qgis, que gera polígonos de Thiessen a partir dos centroides das estações, para delimitar a área de influência de cada estação (FORTUNE, 1987).

2.2 Procedimentos de calibração hidrometeorológicos

Dentro da malha, cada polígono foi designado com valores de um a quatro para estabelecer os limites de influência de cada estação, sendo: 1 relativo à estação de Apucarana, 2 a estação de Arapongas, 3 a estação de Astorga e 4 a estação de Maringá. Com maior influência nas áreas dos polígonos de Apucarana (1) e Maringá (4), com respectivamente 472,51 e 351,79 km²; seguidas de Astorga (3) e Arapongas (2), com respectivamente 272,25 e 135,86 km².

Para a seleção da metodologia de calibração tomou-se como base os trabalhos realizados por Xavier, King e Scanlon (2015) e Xavier *et al.* (2021), em que o método da média aritmética foi o método mais acurado, com maior percentual de valores corretos, levando em

consideração a sazonalidade de períodos chuvosos e secos, uma vez que, outros métodos utilizados ao espacializar a chuva acabam por suavizar a precipitação, subestimando os dados em períodos de chuvosos, e superestimando os dados em períodos sem chuva (0 mm dia^{-1}). Assim, para a calibração dos dados foi utilizada a metodologia de interpolação, da média aritmética, relacionada aos polígonos de Thiessen para a precipitação, de forma a proporcionar um valor para a área do polígono sobreposta a malha (que pode compreender mais de um polígono simultaneamente pela resolução espacial de 10 km).

Para a obtenção e posterior interpolação da evapotranspiração real, primeiramente foi analisado o saldo de radiação na área de estudo, utilizando a Equação 1 do Balanço de Energia FAO 56: Crop ET de Allen *et al.* (1998).

$$R_n - G - LE - H = 0 \quad \text{Equação 1}$$

Em que, G é o fluxo de calor do solo (W m^{-2}), H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}), LE é o fluxo de calor latente (W m^{-2}) e R_n é o saldo de radiação (W m^{-2}), dado pela diferença do saldo de radiação de ondas curtas (W m^{-2}) e o saldo de radiação de ondas longas (W m^{-2}).

Pelo rearranjo da equação foi encontrado o fluxo de calor do solo na área de estudo. Sendo o fluxo de calor latente uma forma de expressar a evapotranspiração em termos de energia, foi possível, utilizando da Equação 2, obter a evapotranspiração na área.

$$ET = \frac{LE}{L \cdot \rho} = \frac{LE}{(2501 - 2,37Ts) \cdot \rho} \quad \text{Equação 2}$$

Em que, L é o calor latente de vaporização em kJ Kg^{-1} , Ts é a temperatura do ar junto a superfície da água em $^{\circ}\text{C}$ e ρ é a massa específica da água em Kg m^{-3} . Os dados trabalhados se apresentavam em escala mensal, sendo a evapotranspiração real (ET) reportada em mm mês^{-1} .

2.3 Validação estatística dos dados

Uma vez que foram necessárias interpolações e calibrações para a obtenção das séries históricas obtidas pelos sensores remotos, foram utilizadas as análises estatísticas apresentadas na pesquisa de aspecto similar de Xavier, King e Scalon (2015), e demonstradas por Naghettini e Pinto (2007), para avaliar a acurácia dos dados adquiridos. Para tanto foram utilizados: o coeficiente de correlação de Pearson (r), o erro médio absoluto (*Mean Absolute Error – MAE*), o erro médio quadrático (*Root Mean Square Error – RMSE*) e o erro relativo composto (*Compound Relative Error – CRE*).

Além disso, foram utilizados o índice de Willmott (d) para analisar a exatidão dos dados obtidos em relação aos dados observados (WILLMOTT *et al.*, 1985), e o índice de desempenho (c) apresentado por Camargo e Sentelhas (1997), que remete à confiabilidade dos dados adquiridos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando do IMERG foi possível espacializar os dados de forma que não se concentrassem em um ponto pluviométrico, uma vez que em eventos extremos, os valores de pico são atribuídos ao ponto em que a estação se encontra, e não necessariamente em toda a

sua área de polígono. Desta forma, utilizando 20 anos de dados coletados mensalmente pelos satélites/sensores GPM e TRMM, e utilizando os valores médios encontrados dentro dos polígonos de Thiessen delimitados, foram obtidos os gráficos das Figuras 3 e 4, em que foram eliminados todos os meses que apresentavam falhas nas estações pluviométricas observadas, e desta forma, examinados 190 dados de precipitação. Além disso, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão apresentados o resultado da análise estatística realizada para a validação da aproximação dos dados adquiridos por satélite e os observados por sensoriamento remoto.

Figura 3 - Comparação de dados de precipitação adquiridos (IMERG) e observados (Estação) - (a) Polígono da estação de Apucarana (Ap) e (b) Polígono da estação de Araçongas (Ar)

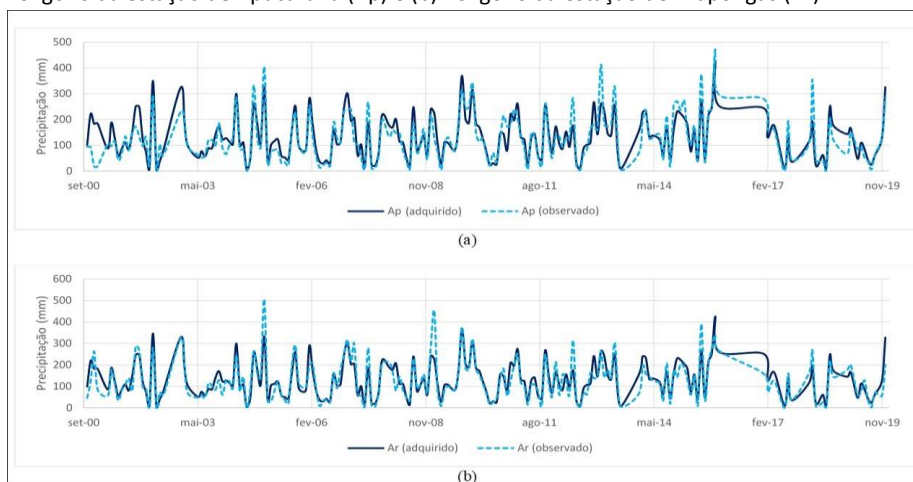


Figura 4 - Comparação de dados de precipitação adquiridos (IMERG) e observados (Estação) - (a) Polígono da estação de Astorga (As) e (b) Polígono da estação de Maringá (Mg)

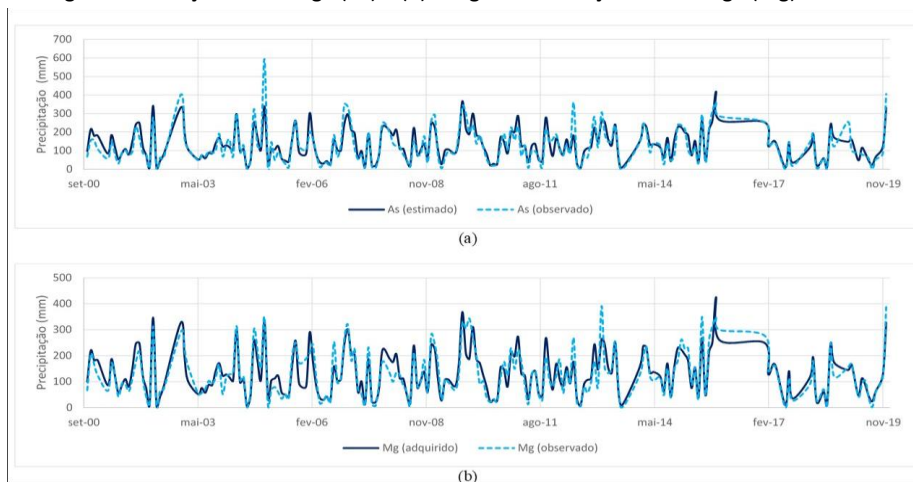


Tabela 3 - Medidas para validação das médias dos polígonos de precipitação obtidos

Validação	MAE	RMSE	r (Pearson)	CRE	d (Willmott)	c
Apucarana	33,43	46,34	0,87	0,30	0,93	0,81
Araçongas	31,37	46,06	0,88	0,29	0,93	0,81
Astorga	28,73	42,36	0,90	0,25	0,94	0,86
Maringá	28,00	38,62	0,91	0,21	0,95	0,87

Nos gráficos das Figuras 3 e 4, é possível observar a proximidade com os dados adquiridos e observados, com momentos em que a aproximação é subestimada e em outros superestimada, ocasionado pela sazonalidade, pela posição dos pontos de monitoramento e pela suavização da precipitação (com a interpolação ocasionada pela sua espacialização) no polígono.

Geralmente, nos picos de momentos extremos de máxima precipitação observados, os valores são subestimados, uma vez que na estação aqueles valores são concentrados, e pelo sensoriamento remoto existe uma média de toda a área de influência, o que justifica essa subestimação, uma vez que em uma célula de 10x10 km o detalhamento local e sua variabilidade dentro da célula acaba perdida. Já em períodos de seca pontuais na estação, ocorre a situação inversa, em que o valor da célula é superestimado pelo arraste da média pelos valores de precipitação dentro da área de 100 km² (1 célula).

Os valores apresentados na Tabela 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** revelam uma forte correlação entre os dados, conforme pode-se observar pelo coeficiente de Pearson, além de boa similaridade, conforme CRE. As medidas de acurácia também se apresentam satisfatórias levando em consideração a amplitude dos valores observados. Além disso, são apresentados valores ótimos de exatidão dos dados pelo índice de Willmott, e pelo índice de confiança/desempenho (c).

Diferentemente da pesquisa realizada por Xavier, King e Scalon (2015) tanto a acurácia quanto à similaridade dos valores por sensoriamento e observada nas estações, apresentam um bom desempenho, uma vez que, com uma escala temporal maior (mensal nesta pesquisa, e diária na pesquisa dos autores) acarretam uma diminuição dos possíveis erros e incertezas dos dados obtidos.

Para uma análise visual de sua correlação, foram plotados os diagramas de dispersão entre os dados de precipitação adquiridos a partir dos produtos de sensoriamento remoto e observados (estações pluviométricas), e das incertezas geradas entre os mesmos, como pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Dispersão entre os dados de precipitação (em mm) adquiridos e observados para os polígonos: (a) de Apucarana, (b) de Arapongas, (c) de Astorga e (d) de Maringá

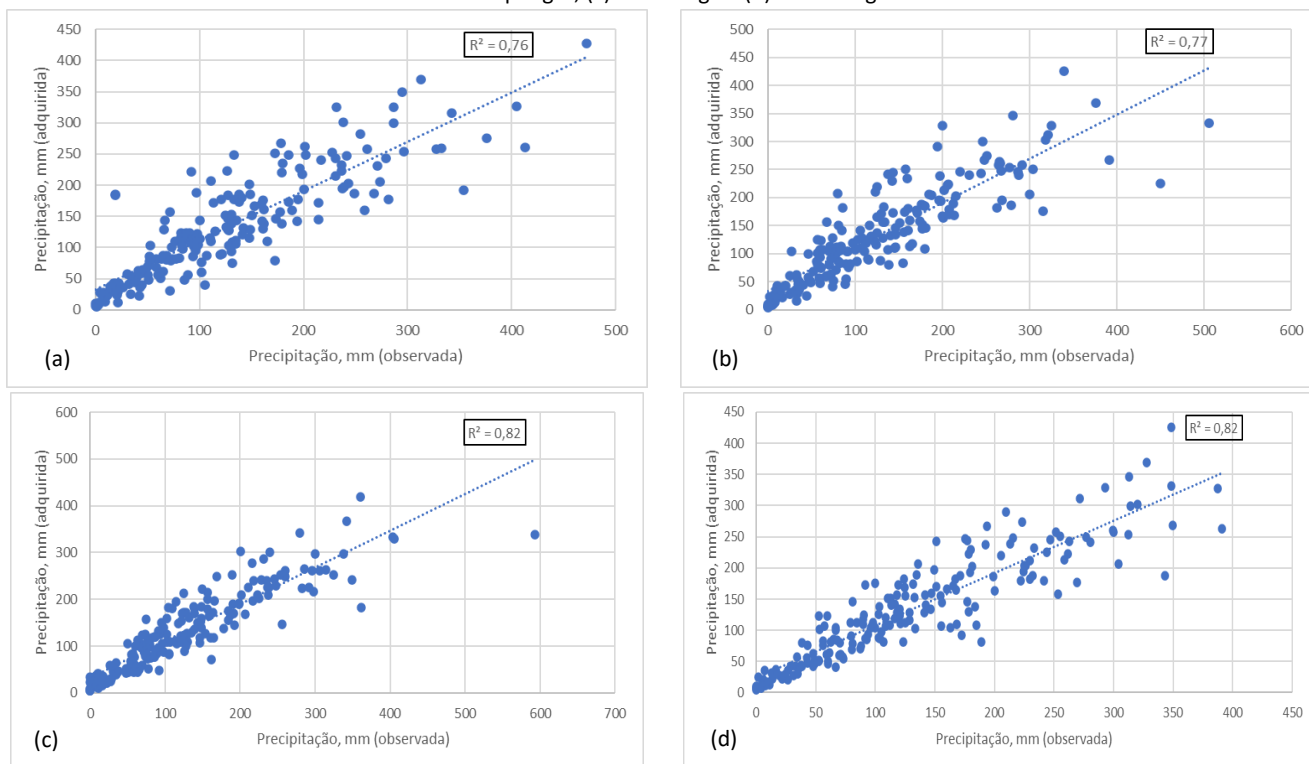
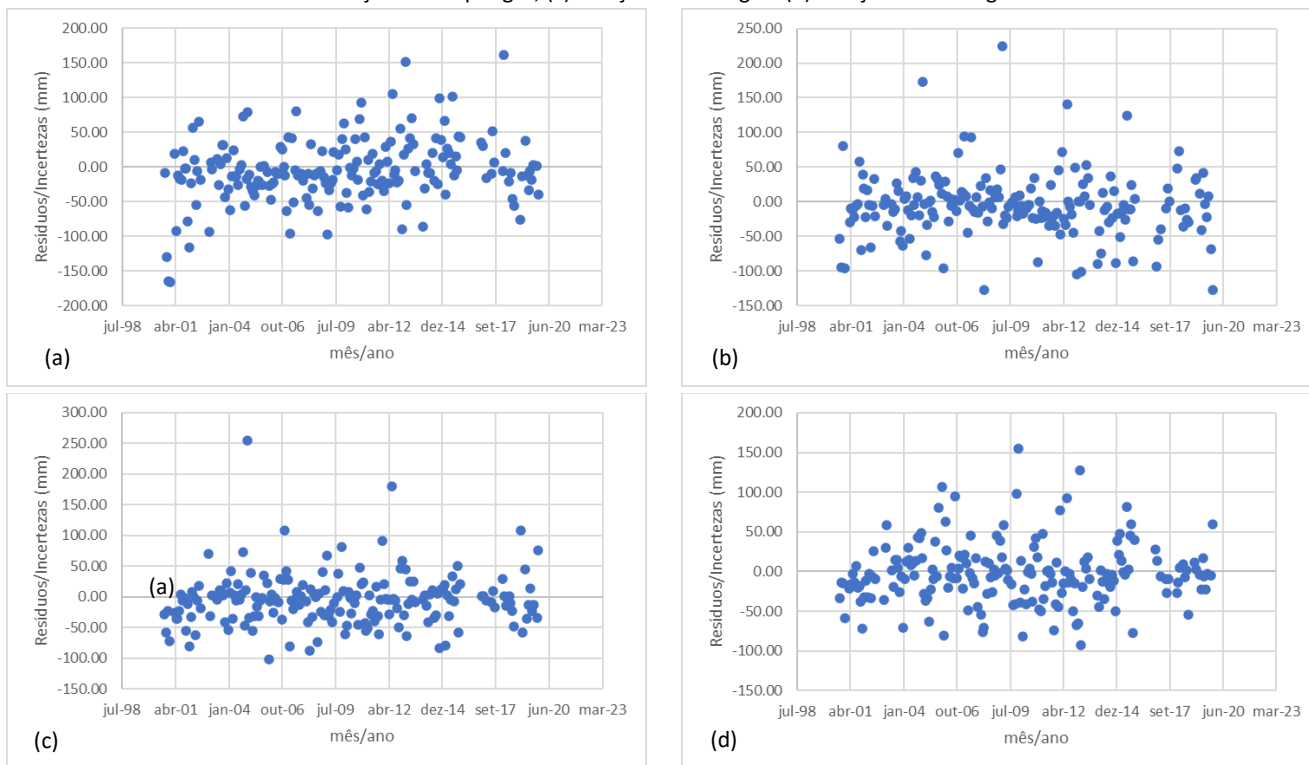


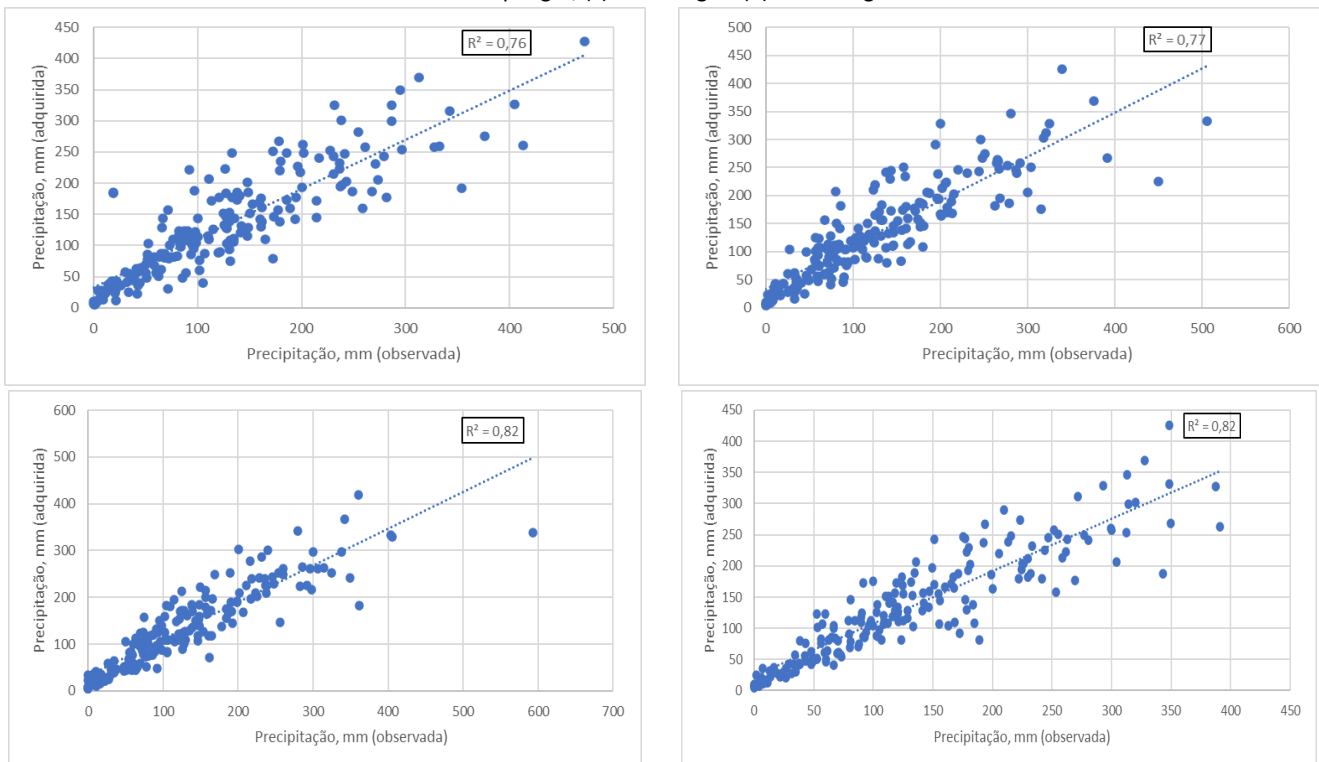
Figura 6 - Dispersão dos resíduos/incertezas entre os dados, no tempo: (a) Estação de Apucarana, (b) Estação de Arapongas, (c) Estação de Astorga e (d) Estação de Maringá





Como apresentado na

Figura 5 - Dispersão entre os dados de precipitação (em mm) adquiridos e observados para os polígonos: (a) de Apucarana, (b) de Arapongas, (c) de Astorga e (d) de Maringá



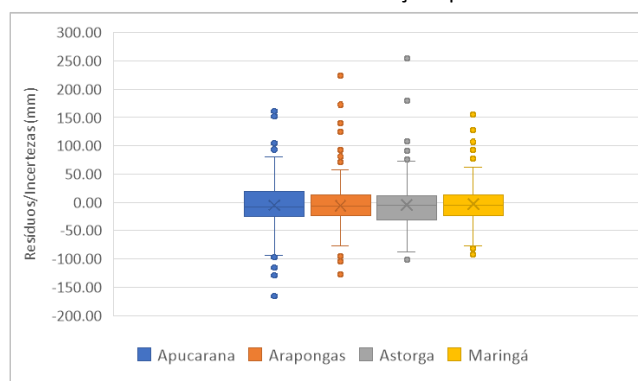
, os dados observados para todas as estações apresentam uma relação linear com os dados adquiridos, porém sem uma variância constante, uma vez que os valores vão se distanciando ao passo que os valores de precipitação aumentam. Isso pode ser atribuído ao fato de que os valores extremos de máxima precipitação ocorrem pontualmente nas estações, que segundo Barni *et al.* (2020) pode ocorrer por variações naturais das probabilidades das precipitações, ou até mesmo devido à aleatoriedade dos eventos de chuva. Como estes não são necessariamente espaçados, como pelo sensoriamento, que ao levar em consideração a média do polígono de Thiessen que representa a estação, acaba por apresentar uma maior dispersão.

Com relação às incertezas apresentadas na

Figura 6, é possível observar uma maior frequência de valores negativos o que indica uma superestimação de valores, contudo no passo de tempo, as incertezas flutuaram em torno de zero sem apresentam uma tendência de aumento ou decaimento, além de uma variância aproximadamente constante. No polígono de Astorga essa frequência é mais acentuada, enquanto no de Maringá e Apucarana é mais discreta. Apresentando as frequências na forma de um diagrama *box-plot* (Figura 7), é possível observar tanto a predominância da superestimação dos valores, quanto da flutuação da frequência em torno de zero. Além disso, fica em evidência os outliers das estações, representando os valores de extrema precipitação, tanto para mínima quanto para máxima, que, ao se especializar, desvia dos valores pontuais creditados nas estações. Situação semelhante foi apresentada por Barni *et al.* (2020), em que os valores obtidos pelo satélite TRMM apresentavam uma atenuação de precipitações em relação as estações, ocorridas por conta de reajustes do satélite e dos produtos distribuídos, com erros

reduzidos e valores mais próximos das médias da estação, possibilitando a flutuação em torno de zero.

Figura 7 - Diagrama *box-plot* dos resíduos gerados entre os dados adquiridos por sensoriamento remoto e os observados nas estações pluviométrica



Já com a média dos 22 anos de fluxo de calor na sub-bacia, foi possível por meio do balanço de energia obter o saldo de radiação na área, bem como os fluxos de calor que compõem o balanço, como pode ser observado nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Saldo de radiação global em 22 anos na sub-bacia de interesse

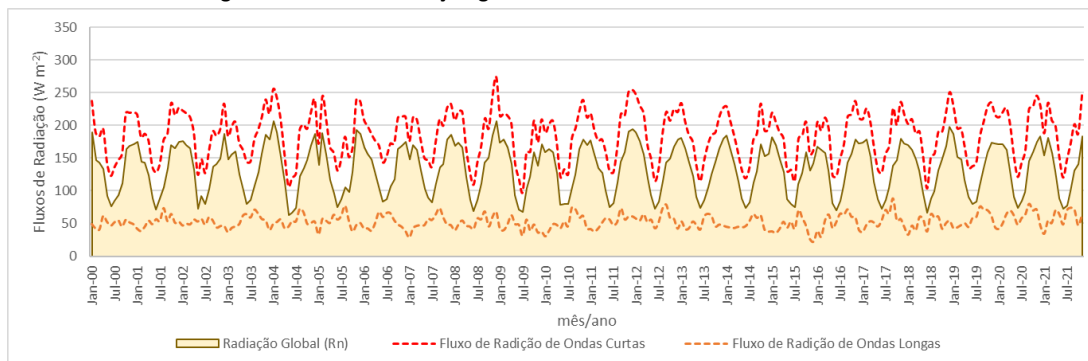
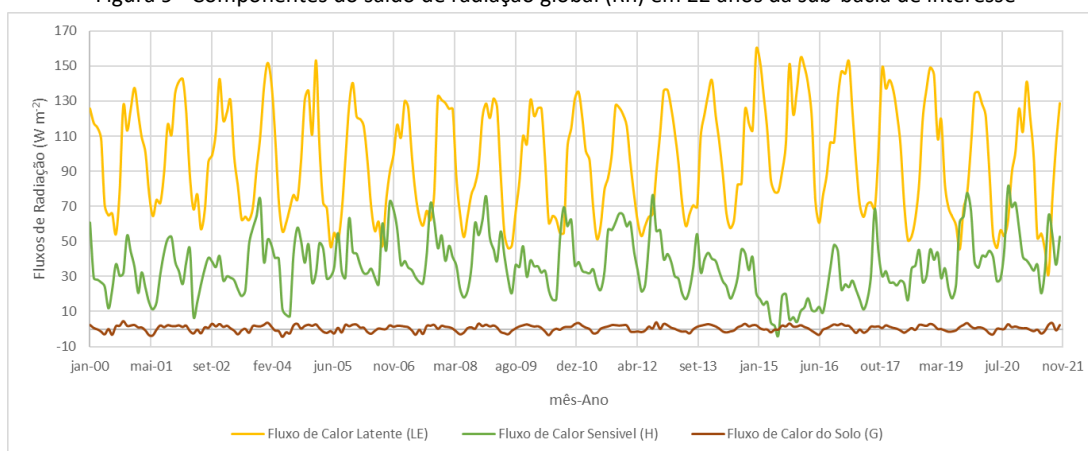


Figura 9 - Componentes do saldo de radiação global (Rn) em 22 anos da sub-bacia de interesse



É possível perceber na

Figura 9 que a maior parte do saldo de radiação da área provém do fluxo de calor latente (*LE*) que atua de forma ascendente, sendo um conversor da energia global em evapotranspiração partindo do solo para a atmosfera, assim como apresentado no trabalho de Gauque-Mellado *et al.* (2022).

O fluxo de calor do solo atua de forma descendente adentrando o solo, representando uma pequena parcela do saldo de radiações totais em comparação aos outros fluxos de calor que ocorrem de forma simultânea. Este apresenta um padrão com menores amplitudes/variações com extremos mínimos chegando a valores negativos, indicando uma alteração no fluxo de descendente para ascendente. Neste sentido, com baixo calor sensível e alta evapotranspiração, o solo passa também a irradiar calor nestes eventos.

Em períodos de estresse hídrico, o fluxo de calor sensível tende a ser inversamente proporcional ao latente, como mostrado por Vourlitis *et al.* (2008), Biudes *et al.* (2015) e Marques *et al.* (2020). Nesses momentos, a evapotranspiração aumenta devido à maior liberação de calor latente, levando a vegetação a reduzir a perda de água. Quando a umidade do solo e da vegetação está ideal, os fluxos de calor sensível e latente são proporcionais, com picos e vales que demonstram a perda e recuperação da água para a atmosfera. Essas variações são semelhantes às observadas por Rocha *et al.* (2004), apesar das diferenças nas escalas temporais analisadas.

Com uma temperatura média do ar de 23,37°C foram adotados os valores de literatura de Potter, Wiggert e Ramadan (2016) de massa específica da água de 997 kg m⁻³ a uma temperatura de 25°C. Desta forma, pôde-se obter, partindo da Equação 2, a evapotranspiração real na sub-bacia, como pode ser observado na

Figura 10. Utilizando do parâmetro de temperatura média da área de estudo e densidade da água para a validação dos dados, foram calculados o erro médio absoluto (MAE), o erro médio quadrático (RMSE), o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o Erro Relativo composto (CRE) (Tabela 4). Foram ainda gerados os diagramas de dispersão entre dados e os resíduos gerados no tempo (

Figura 11).

Figura 10 - Comparação dos valores de evapotranspiração obtidos e calculado partindo do Fluxo de calor latente

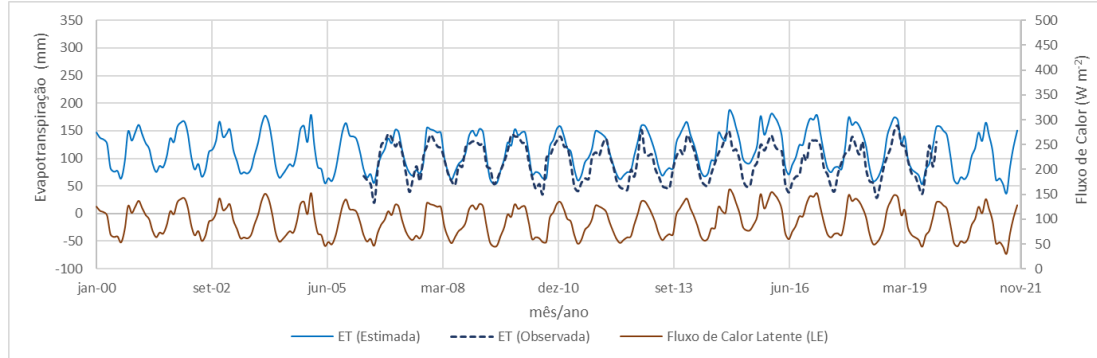
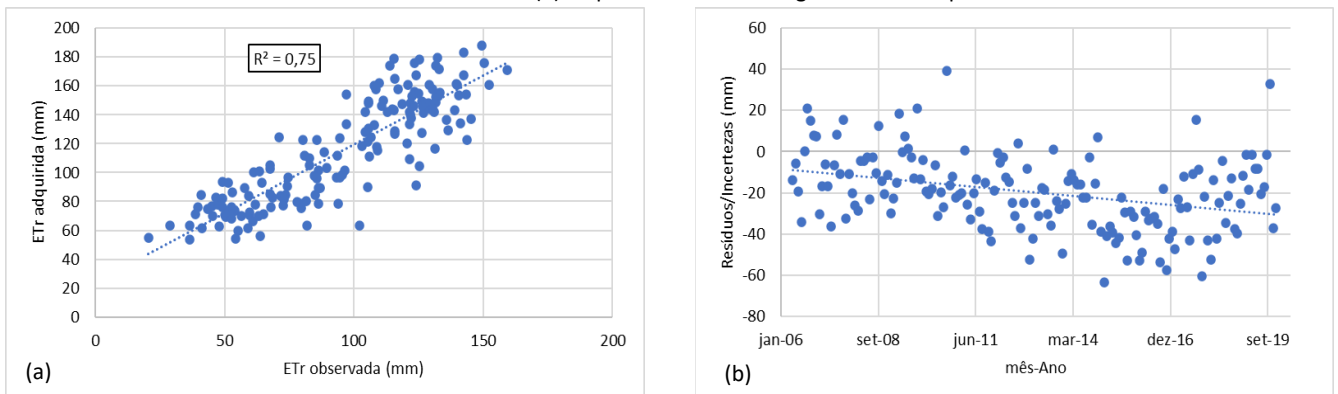


Tabela 4 - Medidas para validação da Evapotranspiração obtida

Validação	MAE	RMSE	r (Pearson)	CRE	D (Willmott)	c
ETr	15,58	19,33	0,87	0,35	0,9994	0,87

Figura 11 - (a) Diagrama de dispersão entre os valores observados na estação climatológica com os adquiridos por sensoriamento remoto e (b) Dispersão dos resíduos gerados no tempo



A Figura 10 mostra que, entre 2005 e 2010, os valores estimados por sensoriamento remoto, ajustados com a temperatura média da sub-bacia, apresentam um comportamento mais simétrico com os valores observados. Porém, de 2011 a 2018, os valores obtidos por

sensoriamento remoto se apresentam subestimados em relação aos reais, mesmo calibrados, sugerindo um aumento na evapotranspiração real na área de estudo.

Considerando a área total de 1232,40 km², o uso e ocupação da terra influencia diretamente os valores de evapotranspiração. Em áreas agrícolas, a evapotranspiração cai em períodos sem cobertura vegetal, enquanto em áreas florestadas, os fluxos são mais constantes ao decorrer do ano. Contudo, uma célula de 100 km² no sensoriamento remoto não permite esse detalhamento, levando a um arraste desta média em relação aos valores pontuais da estação.

Além disso, analisando os resultados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada**. Tabela 4 pode-se concluir que os dados apresentam forte correlação e certa similaridade, uma vez que o CRE não apresenta uma distância tão longe de zero. Já as medidas de acurácia, levando em consideração uma amplitude de mais de 100 mm tanto para os valores adquiridos quanto para os observados, tanto o MAE quanto o RMSE apresentaram valores baixos, o que representa uma boa acurácia entre os dados. Os valores para o índice de exatidão e confiança, se demonstraram ótimos estatisticamente.

No diagrama de dispersão apresentado na

Figura 11(a) é possível observar que os valores apresentam uma relação linear, com coeficiente de determinação satisfatório ($R^2 > 0,7$), contudo, a variância entre os dados não se apresenta constante. Ainda referente às incertezas envolvidas, é possível perceber a partir dos dados apresentados na

Figura 11(b) que estas apresentam uma tendência negativa, em vez de uma flutuação em torno de zero, indicando um maior desvio nos valores de evapotranspiração, com superestimação dos dados, reflexo do parâmetro de uso e ocupação da terra e o tamanho das células do grid analisados. Além disso, vale destacar que os dados observados na estação climatológica apresentam uma série com alto grau de falhas e falta de sequência, o que pode prejudicar a análise e comparação dos dados.

Com os produtos devidamente analisados e validados estatisticamente, a espacialização dos dados no *gridbase* da área de estudo pode ser observada nos exemplos apresentados nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 - Exemplo de dados obtidos e trabalhados a partir do produto IMERG para precipitações mensais de 2000 a 2021 na área estudada

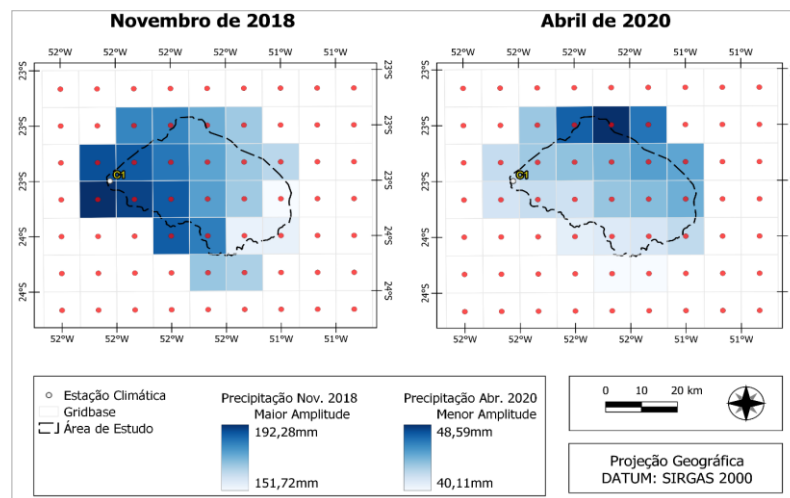
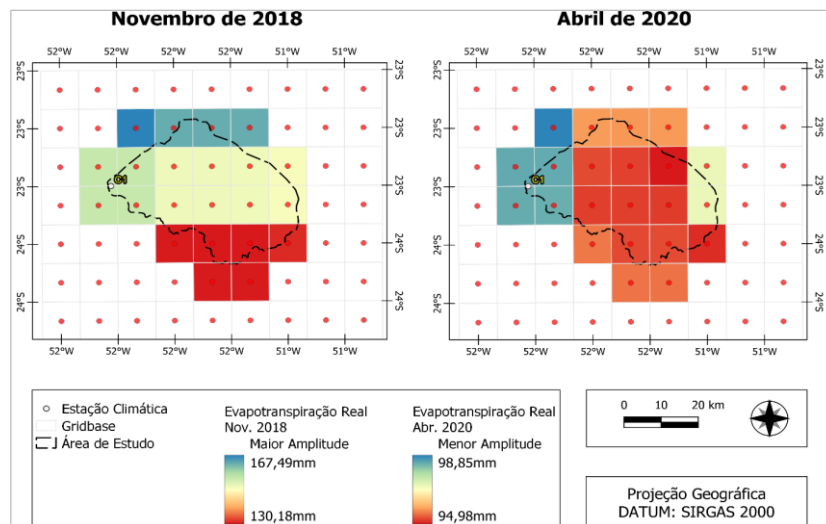


Figura 13 - Exemplo de dados obtidos e trabalhados a partir do produto GLDAS para evapotranspiração real mensal de 2000 a 2021 na área estudada



Em ambas as figuras (12 e 13) foram analisadas as amplitudes de dados obtidos na área de estudo conforme célula do *gridbase*, selecionando os meses com menor (novembro de 2018) e maior amplitude (abril de 2020) para a variável evapotranspiração que apresentava uma maior resolução espacial e baixas variações nas células de 10km (ocasionadas pela calibração com a temperatura local). Levando em consideração a quantidade de pontos terrestres de monitoramento, a espacialização se apresentou efetiva, possibilitando uma análise gradual das variáveis de estudadas e uma maior quantidade de dados passíveis de serem utilizados para o gerenciamento dos recursos hídricos da região.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desta forma, este estudo conclui que levando em consideração a necessidade de variáveis hidrometeorológicas espacializados, ao se utilizar dados de sensoriamento remoto, foi

possível ajustar uma malha de parâmetros hidrometeorológicos na área estudada de forma eficaz e que possibilitasse um maior detalhamento e análise dos dados da sub-bacia.

Esta condição possibilita posterior expansão para outras áreas e em conjunto com uma gama maior de dados observados em estações, melhor a acurácia dos dados. Além disso, a correlação de dados com variáveis do ciclo hidrológico obtidas em menores resoluções espaciais provenientes de outros produtos de sensoriamento remoto, possibilitaria refinar os dados já adquiridos e garantir um maior gradiente de variação e detalhamento de áreas de estudo, principalmente sub-bacias já delimitadas.

Para um teste mais significativo, uma opção seria realizar o monitoramento in loco de determinadas variáveis do ciclo hidrológico e que seriam fundamentais para a obtenção determinados componentes da bacia, bem como os sistemas de recursos hídricos da área, que seriam utilizados para calibração de produtos de sensoriamento remoto.

O entendimento das incertezas dentro dos processos hidrometeorológicos, bem como seu levantamento no gerenciamento de recursos hídricos e imprescindível para gerar produtos e modelos de meio ambiente que representem o mais similar possível os fenômenos ambientais, e forneçam dados admissíveis de análise e previsão de fatores que podem impactar os meios naturais e antrópicos.

5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G., *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. 2022. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

AURENHAMMER, F. *Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure*. **ACM Computing Surveys**, v. 23, n. 3, p. 345-405, 1991.

BARNI, P. E. *et al.* Precipitação no extremo norte da Amazônia: distribuição espacial no estado de Roraima, Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 439-456, 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-52769>.

BHUNYA, P. K. *et al.* A Review of Case Studies on Climate Change Impact on Hydrologic Cycle: An Indian Perspective. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology**, v. 7, n. 5, p. 249-266, September-October-2020. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET207548>.

BIUDES, M. S. *et al.* Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112-124, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.008>.

BLUMENFELD, J. **From TRMM to GPM: The Evolution of NASA Precipitation Data** | Earthdata, 2020. Disponível em: <<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/articles/trmm-to-gpm>>. Acesso em: 28 abr. 2023.

BRUBACHER, J.P.; OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A. Preenchimento de Falhas e Espacialização de Dados Pluviométricos: Desafios e Perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 615-629, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354006>.

CÂMARA MUNICIPAL DE MARINGÁ. **Sala de Imprensa - Hiroshi Fukumoto. Guardiã da nascente do Rio Pirapó foi homenageado com Brasão do Município**. Assessoria de Imprensa. 2018. Disponível em: <<https://www.cmm.pr.gov.br/?inc=noticia&id=3493>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARMO, B. A.; AZEVEDO, T.; MATIAS, L. F. As imagens de sensoriamento remoto no planejamento urbano de cidades pequenas: a necessidade da adoção de imagens aéreas. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2023, Florianópolis – SC. *Anais [...]*. Florianópolis – SC.: SBSR, v. 20, 2023.

FORTUNE. S. J. A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams. **Algorithmica** 2. p. 153-174, 1987.

<https://doi.org/10.1007/BF01840357>.

FRANCO, A. C. L.; UDA, P. K. Comparação de métodos de espacialização da precipitação na bacia do alto rio Negro, Santa Catarina. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2015, João Pessoa-PB. *Anais [...]*. João Pessoa-PB: INPE, 2015. p. 3052-3058.

GOMES, D. J. C., *et al.* Estimativa de precipitação dos dados CHIRPS e GPCC em anos de extremos climáticos, Bacia Hidrográfica do rio Guamá-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.15, n. 03, p. 1583-1598, 2022.

GUAUQUE-MELLADO, D. *et al.* Evapotranspiration under Drought Conditions: The Case Study of a Seasonally Dry Atlantic Forest. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 871, 1 jun. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13060871>.

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná (2019) Atlas climáticos do Paraná. Disponível em:

<<https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>>. Acesso em 16 jun. 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia (2022) Gráficos. Disponível em:

<<https://portal.inmet.gov.br/servicos/bdmep-dados-hist%C3%B3ricos>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

JUNQUEIRA, R. *et al.* Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 115, April 2022, 103773.

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103773>.

KÖPPEN. W. Climatologia. México: Fundo de Cultura Econômica, 1978.

MARQUES, T. V. *et al.* Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, 107957, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>.

NAGHETTINI. M.; PINTO. E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NJUE, N. *et al.* Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. **Science of The Total Environment**, v. 693, 133531, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337>.

OŚRÓDKA; K.; OTOPI, I.; SZTURC, J. Automatic quality control of telemetric rain gauge data providing quantitative quality information (RainGaugeQC), **Atmos. Meas. Tech.**, 15, p. 5581-5597. 2022. <https://doi.org/10.5194/amt-15-5581-2022>.

POTTER. M.C. WIGGERT. D.C., RAMADAN, B. **Mecânica dos Fluidos**, 4. ed. São Paulo: Cengage Learning. 2016.

POZZONI, M., SALVETTI, A., CANNATA, M. Retrospective and prospective of hydro-met monitoring system in the Canton Ticino, Switzerland. *Hydrological Sciences Journal*, 67(16), p. 2386-2400, 2020.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1760280>.

RADOČAJ, D. *et al.* Global Open Data Remote Sensing Satellite Missions for Land Monitoring and Conservation: A Review. *Land*, 9, 402, 2020. <https://doi.org/10.3390/land9110402>.

ROCHA, H. R. *et al.* Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 22-32, 2004.

RODELL, M. *et al.* The Global Land Data Assimilation System. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 3, p. 381-394, 2004. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.

SILVA, A. L. P. *et al.* O uso do sensoriamento remoto na biodiversidade e conservação. **Peer Review**, v. 6, n. 7, 2024. Disponível em: <<http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2235>>. Acesso em: 29 de maio de 2024.

SREEPARVATHY, V., SRINIVAS, V.V. A fuzzy entropy approach for design of hydrometric monitoring networks. **Journal of Hydrology**, v. 586, 124797, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124797>.

VOURLITIS, G. L. *et al.* Energy balance and canopy conductance of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. **Water Resources Research**, v. 44, n. 3, mar. 2008. <https://doi.org/10.1029/2006WR005526>.

WANG, Y.; LIU, X.; LIU, R.; ZHANG, Z. Research Progress on Spatiotemporal Interpolation Methods for Meteorological Elements. **Water**, v., 16, n. 6, 818, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16060818>.

WILLMOTT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation of model performance. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8998-9005, 1985.

WMO - World Meteorological Organization. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. WMO-No. 8. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.

XAVIER, A. C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020). **International Journal of Climatology**, n. May, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2015. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.

6 DECLARAÇÕES

6.1 Contribuição de cada autor

Lucas Vinicius Dias: Concepção e Design do Estudo, Curadoria de Dados, Análise Formal, Aquisição de Financiamento, Investigação, Metodologia, Redação - Rascunho Inicial.

Lais Ferrer Amorim de Oliveira: Concepção e Design do Estudo, Metodologia, Redação - Revisão Crítica, Supervisão.

Paulo Fernando Soares: Concepção e Design do Estudo, Metodologia, Redação - Revisão Crítica, Supervisão.

Cláudia Telles Benatti: Concepção e Design do Estudo, Metodologia, Redação - Revisão Crítica, Revisão e Edição Final, Supervisão.

6.2 Declaração de conflitos de interesse

Nós, Lucas Vinicius Dias, Lais Ferrer Amorim de Oliveira, Paulo Fernando Soares e Cláudia Telles Benatti, declaramos que o manuscrito intitulado "Espacialização por meio de malha de dados de precipitação e evapotranspiração em sub-bacia do rio Pirapó utilizando sensoriamento remotos":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.