

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOÃO MURILO PALONE FAUVEL

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO COMO APOIO À EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA
AGROPECUÁRIA**

**Ilha Solteira
2023**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

JOÃO MURILO PALONE FAUVEL

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO COMO APOIO À EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA
AGROPECUÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Fernando Braz Tangerino Hernandez
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F271e Fauvel, João Murilo Palone.
Evapotranspiração como apoio à eficiência do uso da água na agropecuária
/ João Murilo Palone Fauvel. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
50f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez

Inclui bibliografia

1. Interpolação espacial. 2. Irrigação. 3. Serviço de
apoio ao irrigante.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

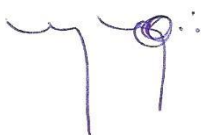
TÍTULO: Evapotranspiração como apoio à eficiência do uso da água na agricultura

ALUNO: **João Murilo Palone Fauvel** RA: **171050223**

ORIENTADOR: Fernando Braz Tangerino Hernandez

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 9,7

Comissão Examinadora:



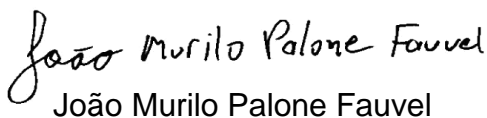
Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez
Presidente (Orientador)



Me. Daniela Araújo de Oliveira



Dr. Alberto Máro Arroyo Avilez



João Murilo Palone Fauvel

Ilha Solteira, 5 de julho de 2023.

Consagro, com amor e gratidão,
à minha família que é minha fonte e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a meus pais, Vivian e Luciano, por tudo que sempre fizeram.

A minha noiva, Constanza, a pessoa à quem dedico a minha vida, pelo imenso apoio, amor e carinho.

Ao Professor Fernando Braz Tangerino Hernandez e a todos os amigos da Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira pelos infinitos conhecimentos e experiências compartilhadas, pelo aporte técnico.

A todos os amigos e irmãos que a faculdade me deixou.

RESUMO

A irrigação é fundamental para o negócio de produzir alimentos, este que precisa suprir uma população crescente de forma sustentável. Os Serviços de Apoio ao Irrigante (SAI) proporcionam dados que favorecem o uso racional e sustentável da água. Este trabalho capturou variáveis agroclimáticas da Costa Leste de Mato Grosso do Sul, também conhecido como Bolsão Sul Mato-grossense ampliado, por meio das estações agrometeorológicas da região, estimando a evapotranspiração de referência (ET_o) e confrontando-a com a estimada pelas estações da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (RANP), com objetivo da ampliação da abrangência deste SAI. Foi desenvolvido uma biblioteca de funções capaz de processar e estimar a ET_o, gerando arquivos tabulares e georreferenciados. Capturaram-se os últimos 23 anos de dados horários, se disponíveis, ou a base de dados completa; e estes dados foram processados agregando em frequência diária, após ajuste de fuso horário. Foi estimada a ET_o, pelo método de Penman-Monteith, e realizaram-se as regressões lineares e a krigagem. Encontrou-se adequada correlação linear entre a ET_o estimada com dados das estações da RANP e da Costa Leste de Mato Grosso do Sul, sugerindo que a RANP possui abrangência para além do Estado de São Paulo, representativa também para parte do Mato Grosso do Sul, que constituem os municípios de Selvíria, Três Lagoas, Paranaíba e Brasilândia, com coeficientes maior ou igual a 0,80 com alguma estação da RANP. Água Clara, Bataguassu, Cassilândia e Ribas do Rio Pardo observaram seus maiores coeficientes de 0,71, 0,68, 0,65, 0,65, respectivamente. As superfícies de ET_o geradas por krigagem mostram zonas homogêneas de ET_o nos meses de déficit hídrico entre as regiões do Noroeste Paulista e da Costa Leste de Mato Grosso do Sul, envolvendo os municípios de Selvíria, Três Lagoas, Paranaíba, Inocência, Aparecida do Taboado e Cassilândia. Esses resultados podem habilitar o manejo da irrigação nestas regiões com base na RANP e contribui com a democratização de acesso a dados agroclimáticos a todos aqueles que fazem seu uso.

Palavras-chave: Interpolação espacial; Serviços de Apoio ao Irrigante; Irrigação.

ABSTRACT

Irrigation is essential to the continually increasing demand in crop and food production, which needs to supply a growing population in a sustainable way. Irrigation Advisory Services (IAS) provide data that enable the rational and sustainable use of water. This work captured agroclimatic variables of the Southeast Coast of the State of Mato Grosso do Sul, also known as Bolsão, through the existing weather stations that have solar radiation sensor, estimating the reference evapotranspiration (ET_o) and comparing it with that estimated by the stations of the Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (RANP), an IAS in the State of São Paulo that has stations that border the Bolsão, expanding the scope of this IAS. A library of functions capable of processing and estimating ET_o was developed, generating tabular and georeferenced files. The last 23 years of hourly data were captured, if available, or the complete database; these were processed, removing or recovering, by interpolation, the hourly gaps, and aggregating in daily frequency, after time zone adjustment. ET_o was estimated by the Penman-Monteith method, and linear regressions and kriging were performed. An adequate linear correlation was found between estimated ET_o with data from the RANP and INMET stations, suggesting that the RANP has coverage beyond the state of São Paulo, being representative for part of Mato Grosso do Sul, which would enable irrigation management in these regions based on the RANP.

Keywords: Spatial interpolation; Irrigation Advisory Services; Irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cobertura de estações agrometeorológicas públicas no Mato Grosso do Sul e porcentagem de dados faltando em 2021.....	16
Figura 2 – Evolução da Área Irrigada no Noroeste Paulista.....	17
Figura 3 – Evolução da Área Irrigada na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.....	17
Figura 4 – Localização geográfica da área em estudo e estações meteorológicas inseridas na região.....	20
Figura 5 – Percentual de lacuna de dados no conjunto de dados.....	26
Figura 6 – Mapas de percentual de dados faltantes para o.....	27
Figura 7 – Análise descritiva das médias anuais de precipitação (A) e médias diárias de ETo (B) na RANP (UNESP) e na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.....	29
Figura 8 – Matriz de R^2 para ETo diária.....	30
Figura 9 – R^2 em função da distância entre os pares de estações da RANP e todas as estações do INMET/CEMTEC no Mato Grosso do Sul.....	32
Figura 10 – R^2 em função da distância entre os pares de estações da RANP e INMET/CEMTEC na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.....	32
Figura 11 – R^2 em função do Δ de altitude* entre os pares de estações da RANP e INMET/CEMTEC no Mato Grosso do Sul.....	35
Figura 12 – Correlação entre média da ETo e altitude.....	35
Figura 13 – Semivariogramas mensais.....	36
Figura 14 – Mapas de distribuição da ETo mensal por krigagem.....	39
Figura 15 – Mapas de distribuição de ETo média para o período completo de dados (A) e nos meses de déficit hídrico (B).....	40
Figura 16 – Zonas de ETo nos meses de déficit hídrico.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações na área de estudo.....	21
Tabela 2 – Matriz de regressões lineares entre estações da UNESP e INMET/CEMTEC com as maiores correlações.....	31
Tabela 3 – ETo mensal por estação.....	33
Tabela 4 – Distância (km) cartesiana entre estações da RANP (UNESP) e INMET/CEMTEC.....	34
Tabela 5 – Parâmetros dos semivariogramas e ajuste do modelo.....	38
Tabela 6 – Validação cruzada da krigagem por LOOCV para todas as estações da RANP e INMET/CEMTEC.....	42

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos do INMET
CEMTEC	Centro de Monitoramento do Tempo e do Clima de Mato Grosso do Sul
CIMIS	California Irrigation Management Information System
csv	Comma-separated values
ET _o	Evapotranspiração de referência
FAO	Food and Agriculture Organization
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GMT	Greenwich Mean Time
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
R ²	Coefficiente de determinação
RANP	Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista
SAFER	Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving
SAI	Serviço de Apoio ao Irrigante
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrica para as Américas
UGRHI	Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1. Histórico e importância da agricultura irrigada.....	11
2.2. Serviços de Apoio ao Irrigante.....	14
2.3. Krigagem como método para estimativa de ETo.....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Coleta e processamento de dados.....	22
3.1.1. Produto para a coleta.....	24
3.2. Krigagem e mapas climáticos.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5. CONCLUSÕES.....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

A irrigação tem seu primórdio no Oriente Médio e acredita-se que ela também era praticada no antigo Egito, se espalhando pela Pérsia, Oriente Médio e Mediterrâneo nos milênios seguintes (SOJKA; BJORNEBERG; ENTRY, 2002), constituindo a base econômica destes povos.

A agropecuária irrigada é um fator essencial para a sustentabilidade da produção de alimentos, pois permite uma produção mais próxima do potencial das culturas e reduz os riscos do déficit hídrico. O Brasil, que possui 7,3 milhões de hectares irrigados (ANA, 2019a) e um potencial de mais de 60 milhões de hectares para essa atividade, enfrenta o desafio de ampliar as oportunidades socioeconômicas com o uso racional dos recursos hídricos (DOURADO NETO, 2017). Outros países, por sua vez, lutam para não perder área irrigada devido a má gestão da água. Isso explica a expansão da irrigação no Brasil (ANA, 2019b) e no Noroeste Paulista (OLIVEIRA; HERNANDEZ, 2022).

Em vista disso, para o correto manejo da irrigação, a fim de garantir o uso racional e sustentável da água, é necessário mensurar a umidade no solo, ou as perdas de água pelas plantas para a atmosfera no processo chamado de evapotranspiração. Realizando medições sequenciais da umidade do solo é possível o manejo da irrigação via solo, e pela estimativa da evapotranspiração, realizada por estações agrometeorológicas, é possível o manejo da irrigação via atmosfera. Medições no solo são pontuais e exigem procedimentos rigorosos no local de inserção do sensor, enquanto o manejo baseado na atmosfera com a estimativa da evapotranspiração pode e deve ser estendido para grandes áreas, limitadas por acidentes geográficos (CARVALHO et al., 2011).

A Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (RANP) foi concebida para coletar sistematicamente as variáveis climáticas com elevada precisão para apoiar o desenvolvimento de pesquisas ligadas à obtenção de coeficientes e indicadores de manejo e desempenho do uso da água pelos sistemas de irrigação, e, simultaneamente, como um Serviço de Apoio ao Irrigante — fato que divulga a cada nova hora a evapotranspiração de referência para toda a região delimitada pelos grandes lagos das Usinas Hidrelétricas de Ilha Solteira, Jupia, Três Irmãos e Água

Vermelha. Financiada pela FAPESP e mantida pela UNESP, disponibiliza seus dados de forma livre e gratuita na sua parte visível que é o Canal CLIMA da UNESP, que em 2019 registrou 537 visualizações de páginas diariamente, vindas de 10.711 usuários que realizaram 131 acessos diários (UNESP, 2019; UNESP, 2020).

Entre as pesquisas de longo alcance e de apoio ao Irrigante na região do Noroeste Paulista, estão os trabalhos de Silva Júnior (2017) e Silva Júnior et al. (2018) que estabelecem regiões homogêneas de evapotranspiração de referência e demonstram a real importância dos sistemas de irrigação para a sustentabilidade da produção de alimentos em função do intenso e prolongado déficit hídrico nesta região de altas taxas de evapotranspiração do Estado de São Paulo.

Imagina-se que ao transpor o rio Paraná, a região da Costa Leste de Mato Grosso do Sul, antes conhecida como Bolsão Sul Mato-grossense, se encontra em situação semelhante de déficit hídrico e potencial para a ampliação da área irrigada (DOURADO NETO, 2017). Hernandez (2020) destaca o clima semelhante e déficit hídrico reconhecido, com presença de solos arenosos e altas taxas de evapotranspiração, e expansão dessa região do Estado de Mato Grosso do Sul em termos de áreas irrigadas, com a produção de grãos, citros, integração lavoura-pecuária e pecuária intensiva.

Diante disso, este trabalho teve por objetivo identificar as estações agrometeorológicas existentes, que possibilitam a estimativa da ETo, e avaliar o raio de influência da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista para além do Estado de São Paulo na Costa Leste de Mato Grosso do Sul, composta por 13 municípios, estimando a evapotranspiração de referência e confrontando-a com as obtidas pelas estações fronteiriças da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Histórico e importância da agricultura irrigada

A irrigação é uma prática milenar que visa fornecer água às plantas em quantidade e qualidade adequadas, especialmente em regiões ou períodos de escassez hídrica. A irrigação tem sido fundamental para o desenvolvimento da

agricultura e da civilização em diversas partes do mundo, desde o Oriente Médio até a Ásia (SOJKA; BJORNEBERG; ENTRY, 2002).

No Brasil, a irrigação iniciou-se no final do século XIX, com a construção de reservatórios para o cultivo de arroz no Rio Grande do Sul. Posteriormente, a irrigação se expandiu para outras regiões e culturas, como o café em São Paulo e as frutas no Nordeste (BRASIL, 2008). A irrigação no Brasil tem contribuído para o aumento da produtividade, da diversificação e da qualidade dos produtos agrícolas, além de gerar emprego e renda no meio rural (SILVA JUNIOR et al., 2018).

No entanto, a irrigação também implica em desafios e responsabilidades, como o uso racional e eficiente da água e da energia, a preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente, a adoção de técnicas adequadas de manejo e planejamento, a integração com outras políticas públicas e a participação dos usuários na gestão dos sistemas de irrigação (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017; FAO, 2016).

A área total equipada para irrigação no mundo foi estimada em 324 milhões de ha em 2015, dos quais 85% estavam localizados em países em desenvolvimento. Isso representa um aumento de cerca de 24% em relação aos 261 milhões de ha em 2000. A área efetivamente irrigada no mundo foi cerca de 264 milhões de ha em 2015, ou cerca de 81% da área equipada para irrigação. Os métodos mais comuns de irrigação são a irrigação por superfície (cerca de 85% da área total irrigada), a irrigação por aspersão (cerca de 10%) e a microaspersão (cerca de 5%). As principais culturas cultivadas sob irrigação são cereais (cerca de 50% da área colhida total irrigada), seguidos por culturas forrageiras (cerca de 15%), oleaginosas (cerca de 10%) e hortaliças (cerca de 10%). O arroz é a cultura irrigada mais importante, representando cerca de 30% da área colhida total irrigada (FAO, 2020). A agricultura irrigada engloba 20,4% do total da área cultivada no mundo e contribui com 40% da produção mundial de alimentos.

A maioria da irrigação mundial está na Ásia, com destaque para a China e a Índia, que juntas somam 41% da área irrigada global, usando principalmente a irrigação por superfície. No Brasil, a área irrigada é a sétima maior do mundo, segundo a FAO (2020), ficando atrás de Tailândia, México, Indonésia, Irã, Paquistão, Estados Unidos, Índia e China.

Segundo o Censo Agropecuário do IBGE (2017), o Brasil possui 6,69 milhões de hectares irrigados, distribuídos em diferentes métodos de irrigação. O método mais utilizado é a irrigação por pivô central que representa 21,2% da área irrigada, seguido pela irrigação por inundação (20,9%), e pela irrigação por aspersão convencional, com 16,1%. O gotejamento ocupa 15,2% da área irrigada, enquanto a microaspersão ocupa 8,3%. Os demais métodos de irrigação têm menor participação na área irrigada nacional: autopropelido/carretel enrolador (11,1%), e outros métodos (7,2%).

A irrigação por superfície tem um baixo custo inicial, mas requer uma sistematização do terreno e pode causar perdas de água por percolação. A irrigação subterrânea também tem um baixo custo inicial, mas é sensível ao entupimento dos tubos e pode diminuir a profundidade das raízes. Já a irrigação por aspersão tem um alto custo inicial, principalmente nos sistemas de pivô central e autopropelido, mas permite uma melhor distribuição da água e uma maior eficiência na fertirrigação. Por fim, a irrigação localizada tem um alto custo inicial, devido à abundância de tubulações, mas é a que apresenta a maior eficiência no uso da água, pois aplica a água diretamente na zona radicular das plantas (TESTEZLAF, 2017). A eficiência no uso de água é maior na irrigação localizada do que na aspersão, e maior na aspersão do que na irrigação por superfície.

Nesse contexto, a evapotranspiração de referência (ET_o) é um parâmetro fundamental para o manejo da irrigação, pois representa a demanda atmosférica de água pelas plantas. A ET_o pode ser estimada por diferentes métodos, que dependem da disponibilidade e da qualidade dos dados meteorológicos. A ET_o também varia espacial e temporalmente, conforme as condições climáticas de cada região (ALLEN et al., 1998).

Assim, o conhecimento da ET_o é essencial para o dimensionamento, a operação e a avaliação dos sistemas de irrigação, bem como para o monitoramento das condições hídricas do solo e das plantas. A ET_o também pode ser utilizada para definir zonas homogêneas de manejo da irrigação, que consideram as características climáticas, edáficas e agronômicas de cada área (SILVA JUNIOR, 2017).

No Noroeste Paulista, uma região que se destaca pela produção agrícola irrigada, principalmente de cana-de-açúcar, laranja e café, foi instalada em 2009 a Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, que conta com 12 estações agrometeorológicas distribuídas em diferentes municípios. Essa rede disponibiliza gratuitamente através do Canal CLIMA da UNESP informações sobre as condições climáticas regionais, além de outros serviços que auxiliam no planejamento da irrigação, incluindo a ETo. O Canal CLIMA da UNESP é um sistema de assessoramento ao Irrigante que visa difundir tecnologias e conhecimentos sobre o uso racional da água na agricultura (UNESP, 2023).

O uso racional dos recursos hídricos é crucial para assegurar a segurança alimentar da população e garantir a sustentabilidade do setor agrícola, se tornando imprescindível que sejam implementadas políticas públicas eficazes na gestão da água na agricultura, bem como a conscientização e a educação dos agricultores e da sociedade em geral sobre a importância da preservação dos recursos hídricos.

2.2. Serviços de Apoio ao Irrigante

A agricultura é um setor crucial da economia mundial e um dos maiores consumidores de recursos hídricos. O Brasil, como um dos maiores produtores e exportadores de commodities agrícolas, não é exceção a este fato. A produção de 1 kg de soja ou milho requer, respectivamente, 1800 ou 900 litros de água. Além disso, o Brasil é o quarto país que mais exporta água presente nas commodities agrícolas, o que reflete a importância da gestão responsável e eficiente dos recursos hídricos no setor agrícola. O cenário atual aponta para uma preocupante tendência de escassez hídrica em muitas regiões do mundo, incluindo o Brasil. É fundamental, portanto, que sejam implementadas medidas concretas para preservar e gerenciar de maneira sustentável os recursos hídricos. A otimização dos sistemas de irrigação e o uso eficiente da água, energia e outros recursos são aspectos críticos neste contexto (FAO, 2016; ANA, 2022).

Os Serviços de Apoio ao Irrigante (SAI) tem papel fundamental nesta questão, ao prestar assessoramento técnico e apoio na implementação de práticas eficientes de uso da água na agricultura, fornecendo aos agricultores informações sobre o

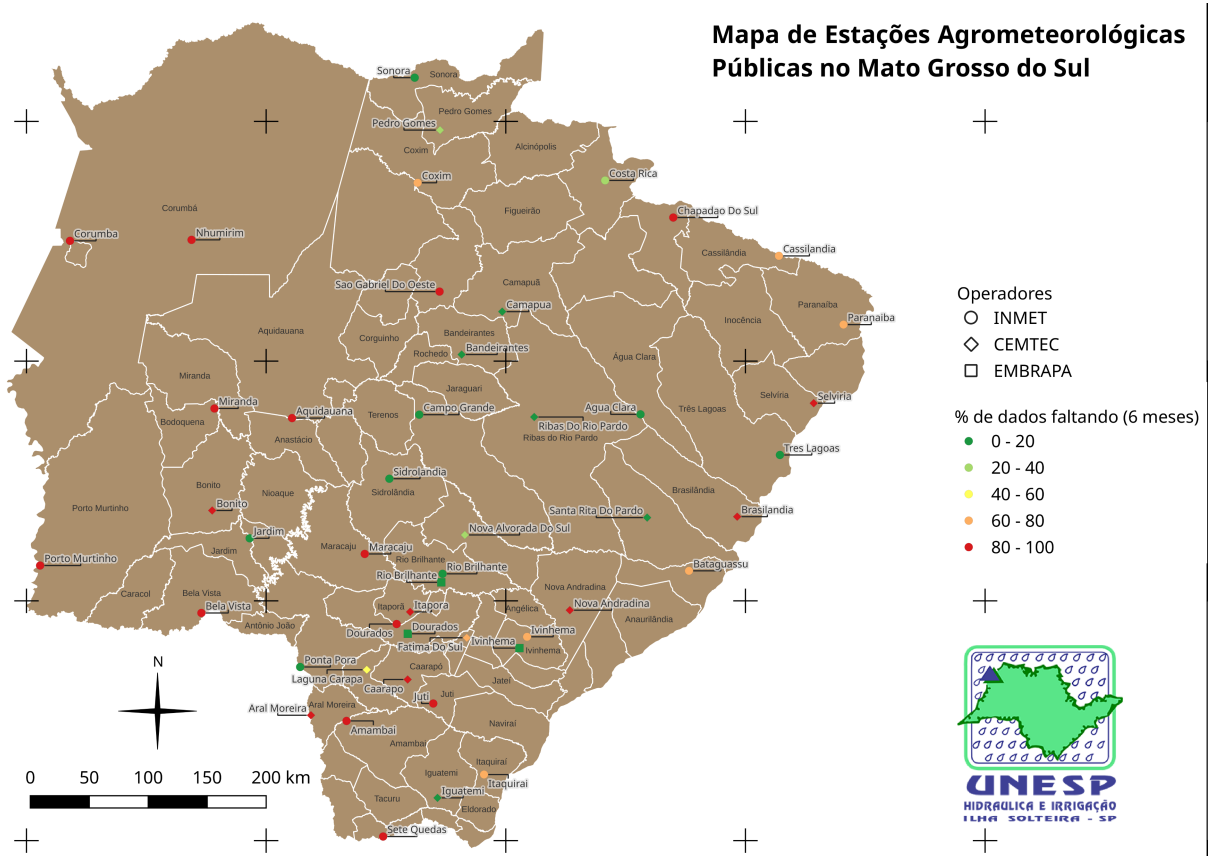
manejo do cultivo, envolvendo os fatores relacionados ao cálculo de necessidades hídricas, elaboração de calendário de irrigação, avaliações dos sistemas de irrigação, contribuindo para o uso eficiente de recursos hídricos, aumentando a eficiência do uso da água, energia e recursos (BAZZA; KAY, 2002; ENGLISH, 2002).

Um dos SAI mais reconhecidos é o CIMIS (California Irrigation Management Information System), que é uma rede integrada de mais de 100 Estações agrometeorológicas espalhadas em diversas áreas, urbanas ou rurais, em toda a Califórnia. O CIMIS fornece informações para melhorar a gestão da água e da energia promovendo práticas de irrigação eficientes.

O progresso da tecnologia agrícola tem conduzido a uma elevação da eficiência na utilização dos recursos disponíveis, com o objetivo de maximizar a produtividade. Atualmente, a atenção das pesquisas agrícolas está concentrada na gestão eficiente da terra e da água, os quais são considerados fatores limitantes no desempenho produtivo (FERERES; SORIANO, 2007).

Conforme a Figura 1, o Estado de Mato Grosso do Sul conta com 47 estações agrometeorológicas públicas, que disponibilizam dados de radiação global, necessário para a estimativa da ETo. Dessas 47, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) opera 28, enquanto 16 são operadas pelo Centro de Monitoramento do Tempo e do Clima de Mato Grosso do Sul (CEMTEC), e 3 pela Embrapa. A maior densidade de cobertura está localizada no sul do Estado, no entanto, no segundo semestre de 2021 haviam várias estações com alta taxa de dados faltando, sendo que a média superava 50%. Além do problema da consistência de dados, há vastas extensões sem cobertura alguma, como o caso do centro leste, centro oeste e noroeste do Estado.

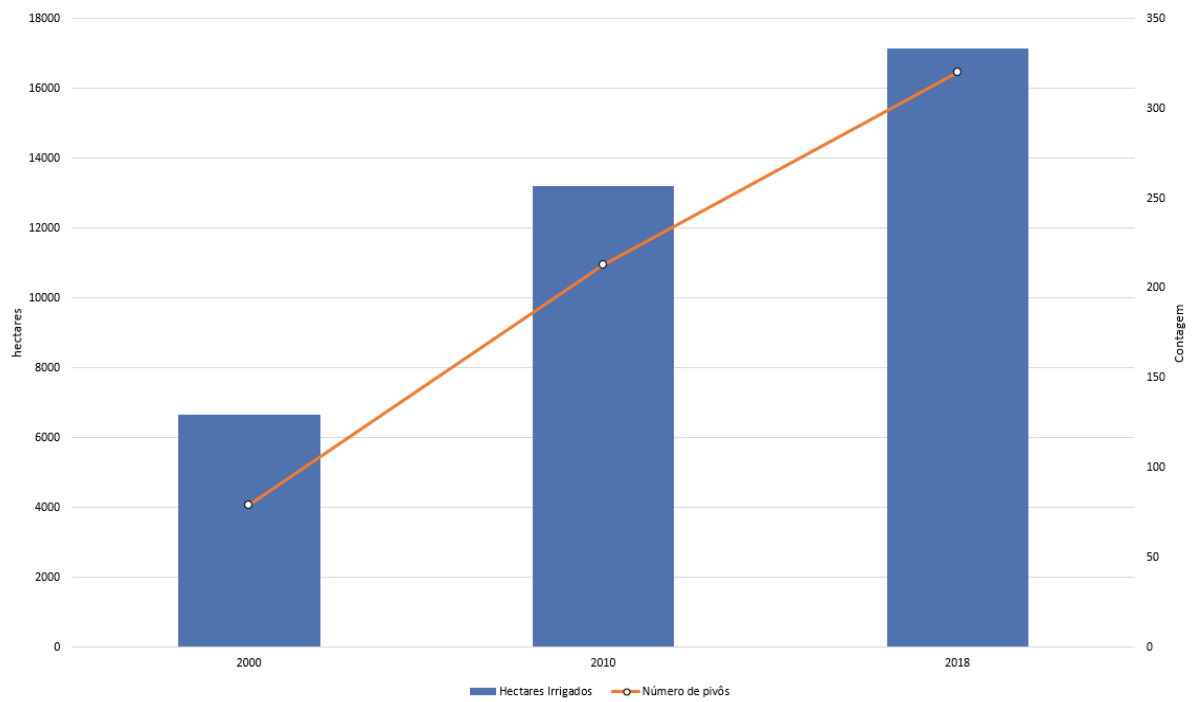
Figura 1 – Cobertura de estações agrometeorológicas públicas no Mato Grosso do Sul e porcentagem de dados faltando em 2021.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

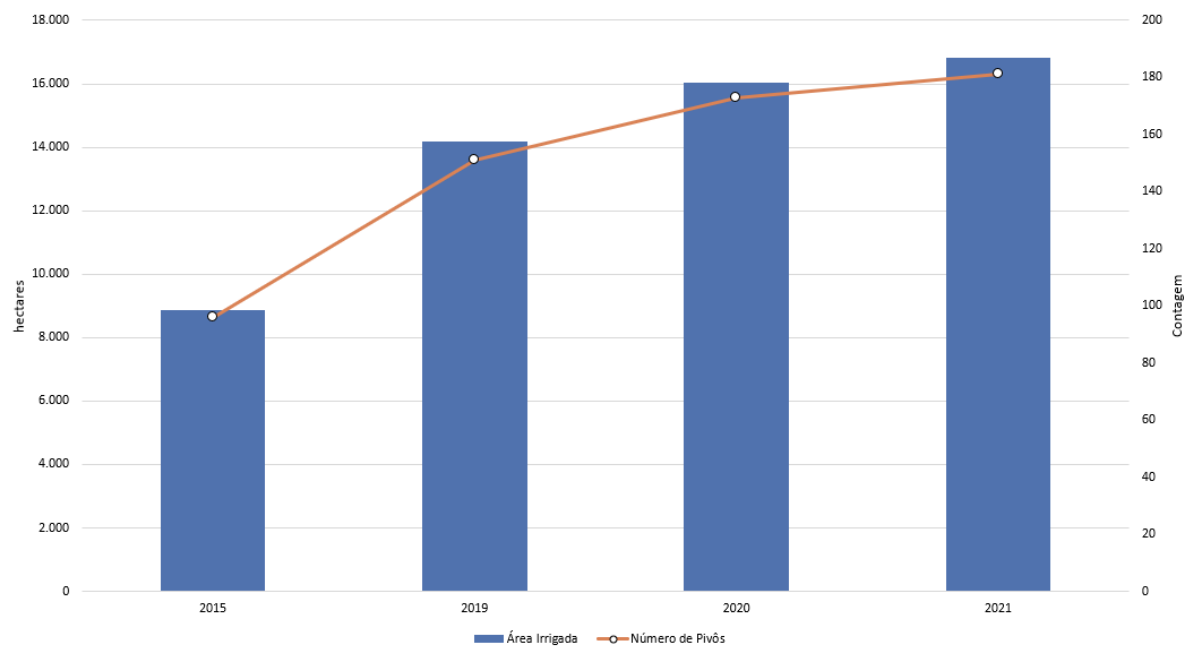
As regiões do Noroeste Paulista e Costa Leste de Mato Grosso do Sul contavam, em 2021, com mais de 16.000 hectares irrigados (PARMEGANI, 2022) e o Noroeste Paulista mais de 17.000 hectares em 2018 (OLIVEIRA; HERNANDEZ, 2022), Figura 2 e 3. Tendo isso em vista e que a cobertura por estações é esparsa e com alta taxa de falhas na Costa Leste de Mato Grosso do Sul, não só o manejo racional da irrigação é dificultado, resultando em desperdício deste recurso indispensável, mas também prejudicando todos aqueles que fazem uso de dados agroclimáticos.

Figura 2 – Evolução da Área Irrigada no Noroeste Paulista.



Fonte: Adaptado de Oliveira e Hernandez (2022).

Figura 3 – Evolução da Área Irrigada na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.



Fonte: Adaptado de Parmegiani (2022).

2.3. Krigagem como método para estimativa de ETo

A medição direta da ETo é difícil em muitas regiões do Brasil e do mundo, tornando importante o uso de métodos alternativos para sua estimativa (SILVA; MEZA; VARAS, 2010). Um desses métodos é a krigagem, uma técnica geoestatística que interpola dados espaciais usando uma média ponderada de observações próximas, baseada em um modelo de correlação espacial. A krigagem permite obter mapas contínuos da ETo a partir de dados pontuais de estações meteorológicas, considerando a variabilidade espacial da variável e minimizando o erro de interpolação (MARKIDIS; KALIVAS; KOLLIAS, 2005).

A krigagem possui diferentes tipos de modelos, que se adequam a diferentes conjuntos de dados e escalas espaciais. A krigagem ordinária é o tipo mais simples e comum, que assume uma média constante e desconhecida da variável interpolada. A krigagem universal é uma extensão da krigagem ordinária, que incorpora uma tendência espacial conhecida ou estimada da variável, como uma função polinomial das coordenadas. A cokrigagem é uma forma de krigagem multivariada, que utiliza informações de uma ou mais variáveis auxiliares correlacionadas com a variável de interesse, para melhorar a precisão da interpolação. A krigagem indicadora é uma técnica não paramétrica, que transforma os valores da variável em indicadores binários de ocorrência ou não de um determinado limiar, ou classe, e interpola esses indicadores usando krigagem ordinária (CARVALHO; VIEIRA, 2001; STEIN, 1999).

Há algumas vantagens da utilização da krigagem em comparação a outros métodos para estimar ETo, como fórmulas empíricas, sensoriamento remoto ou redes neurais artificiais. A krigagem pode considerar a heterogeneidade espacial e anisotropia de ETo, bem como a não-linearidade e não-estacionariedade da relação entre ETo e variáveis climáticas (GOKMEN; VEKERDY; BATUKLI, 2018). A krigagem também pode incorporar informações auxiliares, como elevação ou tipo de solo, para melhorar a precisão das estimativas de ETo (GARCIA; SHIBUSAWA, 2006).

Mesmo sendo um método útil e robusto para estimativa espacial da ETo, a krigagem também apresenta alguns desafios e limitações. Entre eles, estão: a necessidade de um número mínimo e adequado de estações meteorológicas para garantir a representatividade espacial dos dados; a escolha do tipo e do modelo de

krigagem mais adequado para cada caso; a sensibilidade dos resultados à qualidade dos dados e aos parâmetros do modelo; e a dificuldade de incorporar fatores não estacionários ou anisotrópicos na interpolação (CARVALHO; VIEIRA, 2001).

Silva Junior (2017) utilizou a krigagem ordinária para estimar a ETo e criar mapas de zonas homogêneas de evapotranspiração em parte da região de estudo do presente trabalho, encontrando coeficientes de determinação indicando alta correlação em geral, com exceção dos meses de março e abril.

Em um estudo realizado por Vilanova, Simões e Tranin (2012), que analisou a interpolação geoespacial da evapotranspiração (ETo) no Sul de Minas, foram observados altos índices de correlação ($R^2=0,90$; $R=0,99$) e precisão ($d=0,99$ e $REMQ=0,09$) ao comparar os dados estimados de ETo por meio da técnica de krigagem ordinária com os dados observados em uma estação localizada na área interpolada.

Noushadi e Reza (2005) exploraram o uso de métodos de interpolação geoestatística para estimar a evapotranspiração potencial média mensal e anual em quatro províncias no Irã. Os resultados mostraram que a krigagem foi considerada o melhor método para o mês de abril, enquanto a cokrigagem foi mais eficaz para os meses de junho, junho, novembro e dezembro. Para os demais meses e para a média anual da evapotranspiração, a krigagem residual foi identificada como o método mais adequado. Os autores tentaram reduzir a incerteza da estimativa ao incluir informações de elevação na interpolação. A krigagem foi considerada um bom estimador linear não tendencioso, mas a estacionariedade só pode ser aplicada localmente, limitando sua aplicação em uma região inteira. Além disso, a cobertura esparsa de estações meteorológicas em algumas áreas dificultou a aplicação da krigagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho teve como limite o Noroeste Paulista e o Mato Grosso do Sul (Figura 4), localizada geograficamente entre 17°S a 24°S e 52°O a 58°O, constituindo 36,7 milhões de hectares. A área de interesse foi a Costa Leste de Mato Grosso do Sul, também conhecida como Bolsão Sul Mato-grossense ampliado,

Tabela 1 – Estações na área de estudo.

ID da estação	Cidade	Operador	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Alt. Vento (m)	Fuso Horário*	Início de operação
A756	Água Clara	INMET	-20,444444	-52,875833	323,6	10	GMT	13/08/2010
A750	Amambaí	INMET	-23,002500	-55,329444	433,6	10	GMT	10/06/2008
A719	Aquidauana	INMET	-20,475556	-55,783889	151,4	10	GMT	31/10/2006
A759	Bataguassu	INMET	-21,750000	-52,471389	392,1	10	GMT	20/03/2013
A757	Bela Vista	INMET	-22,101667	-56,540833	206,1	10	GMT	08/08/2011
S705	Brasilândia	CEMTEC	-21,298333	-52,068889	345,0	10	GMT	05/04/2018
A702	Campo Grande	INMET	-20,447195	-54,722615	528,5	10	GMT	09/09/2001
A742	Cassilândia	INMET	-19,122500	-51,720833	494,7	10	GMT	07/03/2008
A730	Chapadão Do Sul	INMET	-18,802222	-52,602500	820,8	10	GMT	19/12/2006
A724	Corumbá	INMET	-18,996667	-57,637500	111,7	10	GMT	25/10/2006
A760	Costa Rica	INMET	-18,492778	-53,171389	727,3	10	GMT	03/12/2012
A720	Coxim	INMET	-18,512222	-54,736111	251,5	10	GMT	05/11/2006
A721	Dourados	INMET	-22,193889	-54,911389	463,3	10	GMT	17/10/2006
A752	Itaquiraí	INMET	-23,449444	-54,181944	337,8	10	GMT	27/05/2008
A709	Ivinhema	INMET	-22,300556	-53,822778	377,4	10	GMT	07/02/2003
A758	Jardim	INMET	-21,478611	-56,137778	252,5	10	GMT	03/08/2011
A749	Juti	INMET	-22,857222	-54,605556	375,2	10	GMT	15/06/2008
A731	Maracaju	INMET	-21,609167	-55,177500	388,9	10	GMT	14/12/2006
A722	Miranda	INMET	-20,395556	-56,431667	132,5	10	GMT	01/11/2006
A717	Nhumirim	INMET	-18,988611	-56,622778	102,3	10	GMT	01/08/2006
S713	Nova Andradina	CEMTEC	-22,078611	-53,465833	372,0	10	GMT	08/04/2018
A710	Paranaíba	INMET	-19,695556	-51,181667	408,1	10	GMT	09/11/2006
A703	Ponta Porã	INMET	-22,552500	-55,716389	668,0	10	GMT	06/09/2001
A723	Porto Murtinho	INMET	-21,705833	-57,886667	78,6	10	GMT	23/10/2006
S715	Ribas Do Rio Pardo	CEMTEC	-20,466694	-53,763028	442,0	10	GMT	17/01/2018
A743	Rio Brillhante	INMET	-21,775000	-54,528056	324,3	10	GMT	25/06/2008
A732	São Gabriel Do Oeste	INMET	-19,420278	-54,553056	646,0	10	GMT	17/12/2006
S717	Selvíria	CEMTEC	-20,351389	-51,430278	374,0	10	GMT	04/04/2018
A751	Sete Quedas	INMET	-23,966944	-55,024167	398,4	10	GMT	02/06/2008
A754	Sidrolândia	INMET	-20,981667	-54,971944	471,4	10	GMT	28/09/2008
A761	Sonora	INMET	-17,635278	-54,760556	495,3	10	GMT	29/11/2012
A704	Três Lagoas	INMET	-20,795000	-51,713333	328,9	10	GMT	02/09/2001
13	Bonança	UNESP	-20,673083	-51,033917	357,0	2	GMT-3	02/09/2011
19	Dracena	UNESP	-21,457833	-51,552250	373,0	2	GMT-3	01/04/2017
1	Ilha Solteira	UNESP	-20,423444	-51,353639	337,0	2	GMT-3	20/08/1991
14	Itapura	UNESP	-20,641139	-51,474972	335,0	2	GMT-3	16/11/2011
2	Marinópolis	UNESP	-20,446528	-50,807250	370,0	2	GMT-3	06/08/1998
4	Paranapuã	UNESP	-20,024639	-50,565889	436,1	2	GMT-3	16/12/2010
10	Populina	UNESP	-19,879556	-50,470361	394,0	2	GMT-3	11/06/2011
12	Santa Adélia	UNESP	-20,528333	-51,249444	426,0	2	GMT-3	14/07/2011
11	Santa Adélia Pioneiros	UNESP	-20,728333	-50,959722	350,0	2	GMT-3	07/07/2011

Fonte: Elaboração do próprio autor.

*Fuso horário referente ao padrão dos dados brutos provenientes do Canal CLIMA e BDMEP.

As estações na Costa Leste de Mato Grosso do Sul não disponibilizam a ETo diretamente, sendo necessário a sua estimativa a partir dos dados horários, pois os dados diários não possuem a radiação global, e, portanto, não é considerado um SAI.

Foram utilizados exclusivamente *softwares* e ferramentas livres de código aberto e gratuitos para a realização deste trabalho.

3.1. Coleta e processamento de dados

Foram identificadas as estações agrometeorológicas do INMET e CEMTEC na região, pois disponibilizam dados de temperatura, umidade relativa, radiação global e velocidade do vento, necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

O INMET disponibiliza seus dados horários, com a radiação global, pelo Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP), onde é possível realizar a requisição de dados históricos em formato csv (*comma separated values* – valores separados por vírgulas) e para uma série de estações simultaneamente (INMET, 2023).

A Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (RANP) disponibiliza seus dados agrometeorológicos diários, incluindo a evapotranspiração de referência, pelo Canal CLIMA da UNESP, gratuitamente (UNESP, 2023).

Foram coletados os dados do INMET através do site BDMEP e os dados do Canal CLIMA por meio de programa de linha de comando desenvolvido pelo autor, nomeado climafeis (<https://github.com/joaofauvel/climafeis>), que faz interface com o banco de dados e exporta dados diários em diversos formatos a critério do usuário. Coletou-se os dados de 2000 (se disponível) até junho de 2023 (ou o último período de coleta da estação), com exceção para as estações do CEMTEC, que parou de disponibilizar seus dados horários pelo BDMEP.

Para o processamento de dados foi utilizado o Python no ambiente interativo Jupyter Lab, com as bibliotecas Pandas 2.0 (THE PANDAS DEVELOPMENT TEAM, 2023) juntamente ao NumPy 1.24 (HARRIS et al., 2020; MCKINNEY, 2010) e SciPy 1.10 (VIRTANEN et al., 2020). Para a confecção dos mapas foi utilizado o programa QGIS 3.16 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2023) e para os gráficos as bibliotecas seaborn 0.12 (WASKOM, 2021) e Matplotlib 3.7 (HUNTER, 2007).

Para os dados da RANP, não foi necessário processamento posterior, pois os dados contêm a ETo e precipitação na frequência diária. Para os dados provenientes do INMET/CEMTEC, foi necessário ajustar o fuso horário para GMT-3, padrão da RANP, converter a velocidade do vento de 10 para 2 metros, necessário para o método de Penman-Monteith de estimação da evapotranspiração de referência; agregar os dados em intervalo diário que foi o intervalo utilizado para a

estimativa de evapotranspiração de referência, e preencher lacunas devido a alta taxa de falhas, principalmente durante a noite, para recuperar parte do conjunto de dados.

Criou-se um banco de dados Pandas similar a Tabela 1 com as informações das 41 estações, incluindo frequência dos dados, altura da medição do vento, operador, latitude e longitude geodésica e projetada, caminho para o arquivo csv com as variáveis climáticas brutas de cada estação. Utilizando o Pandas, importou-se cada arquivo csv com as variáveis climáticas das estações como objetos Pandas e foi adicionado uma nova coluna no banco de dados de estações contendo uma referência a estes objetos. O propósito deste banco de dados com referências foi executar operações em vários conjuntos de dados de diferentes estações ao mesmo tempo, facilitando a criação de tabelas e gráficos deste trabalho pelo Python.

Para obter as coordenadas métricas, as coordenadas geodésicas das estações foram projetadas, com o QGIS, na projeção SIRGAS 2000/Brazil Polyconic (EPSG: 5880), pois a área de estudo abrange múltiplas zonas UTM, impossibilitando o uso da projeção UTM.

Foi criado uma biblioteca de funções que operam em objetos de banco de dados Pandas, e permitem o processamento dos dados. Essas funções incluem a importação, exportação, execução de algoritmos e cálculos estatísticos, preenchimento de lacunas, conversão de fuso, pressão e radiação global, e agregação em frequência diária.

O preenchimento de lacunas nos dados horários (apenas do INMET e CEMTEC) foi realizado para as variáveis da ETo, descritas anteriormente, apenas de noite, após às 19 e antes das 7, que contribuem pouco com a ETo diária, exceto quando houve apenas uma hora consecutiva durante o dia com falha. Para o preenchimento durante a noite foi utilizada a média do dia anterior, e das falhas não consecutivas (apenas uma hora faltando entre duas outras horas com dados) foi realizado a interpolação linear. Dias com falhas horárias que não se encaixaram nestes limites foram retirados. Esta metodologia permitiu recuperar vários dias de dados com erro aproximando a zero.

Para as análises mensais envolvendo a precipitação ou a ETo, devido a lacunas em dias que compõem os meses de várias estações do INMET e CEMTEC,

optou-se por agregar apenas meses com menos de 10% de falhas. Para as análises envolvendo pares de estações, os gráficos de dispersão e matrizes, foi realizado operações a nível do dia, apenas onde ambas as estações possuíam dados em uma mesma data. Particularmente para a análise de altitude das estações e média de ETo, como a maioria das estações está entre 300 a 400 metros, enviesando uma análise por estação, optou-se por subdividir os dados em 5 classes de altitude.

Para o cálculo da ETo, foi utilizado um algoritmo em Python para estimativa diária, a partir dos Guidelines for computing crop water requirements (ALLEN et al., 1998), que opera vetorizadamente no objeto de banco de dados Pandas.

3.1.1. Produto para a coleta

O programa de linha de comando climafeis (<https://github.com/joaofauvel/climafeis>) emula as requisições GET ou POST do protocolo de comunicação HTTP/1.1 nas URLs (localizador uniforme de recursos) do Canal CLIMA da UNESP. Foram identificadas: a URL, o método de solicitação (GET ou POST) e conteúdo da requisição em si, através do monitoramento da rede e implementadas as mesmas requisições por meio da biblioteca Requests 2.26.

Cada requisição responde com uma página HTML (HyperText Markup Language – Linguagem de Marcação de Hipertexto), portanto se faz necessário a utilização da biblioteca BeautifulSoup 4 que possibilita a análise e processamento do código-fonte da página, processando-a e a transformando em csv utilizando a biblioteca Pandas.

3.2. Krigagem e mapas climáticos

Os dados para a krigagem foram exportados do banco de dados de estações através do Pandas e da biblioteca de funções criadas para a execução deste trabalho. Foi exportado um único arquivo csv com todas as estações e coordenadas projetadas. Em seguida foi importado no QGIS, escolhendo as colunas do csv referentes as coordenadas, através do *Data Source Manager*. Para os mapas

mensais, foi utilizado o algoritmo *Split Vector Layer* e divididos os dados importados por mês, criando 12 arquivos *geopackage* (equivalente ao *shapefile*).

A krigagem, os semivariogramas e a validação cruzada foram realizadas através do SAGA GIS 9 (CONRAD et al., 2015). Foram importados os arquivos *geopackage* e executadas as ferramentas *Variogram* e *Ordinary Kriging*, este último com tamanho de pixel de adequado, salvando as saídas dos parâmetros dos semivariogramas, das krigagens e validações cruzadas. Foi escolhida a krigagem ordinária com o modelo gaussiano, seguindo a metodologia de Silva Junior (2017), que encontrou bom ajuste do modelo para ETo na região do Noroeste Paulista e obteve bons resultados utilizando a krigagem ordinária. Os parâmetros dos semivariogramas foram encontrados por otimização de parâmetros, encontrando parâmetros de *lag*, *bins*, *nugget*, *sill* e *range* que resultam no melhor ajuste do modelo (maior coeficiente de determinação).

Foram importadas as tabelas de saída do SAGA GIS utilizando o Pandas para confecção das tabelas de parâmetros, validação e semivariogramas.

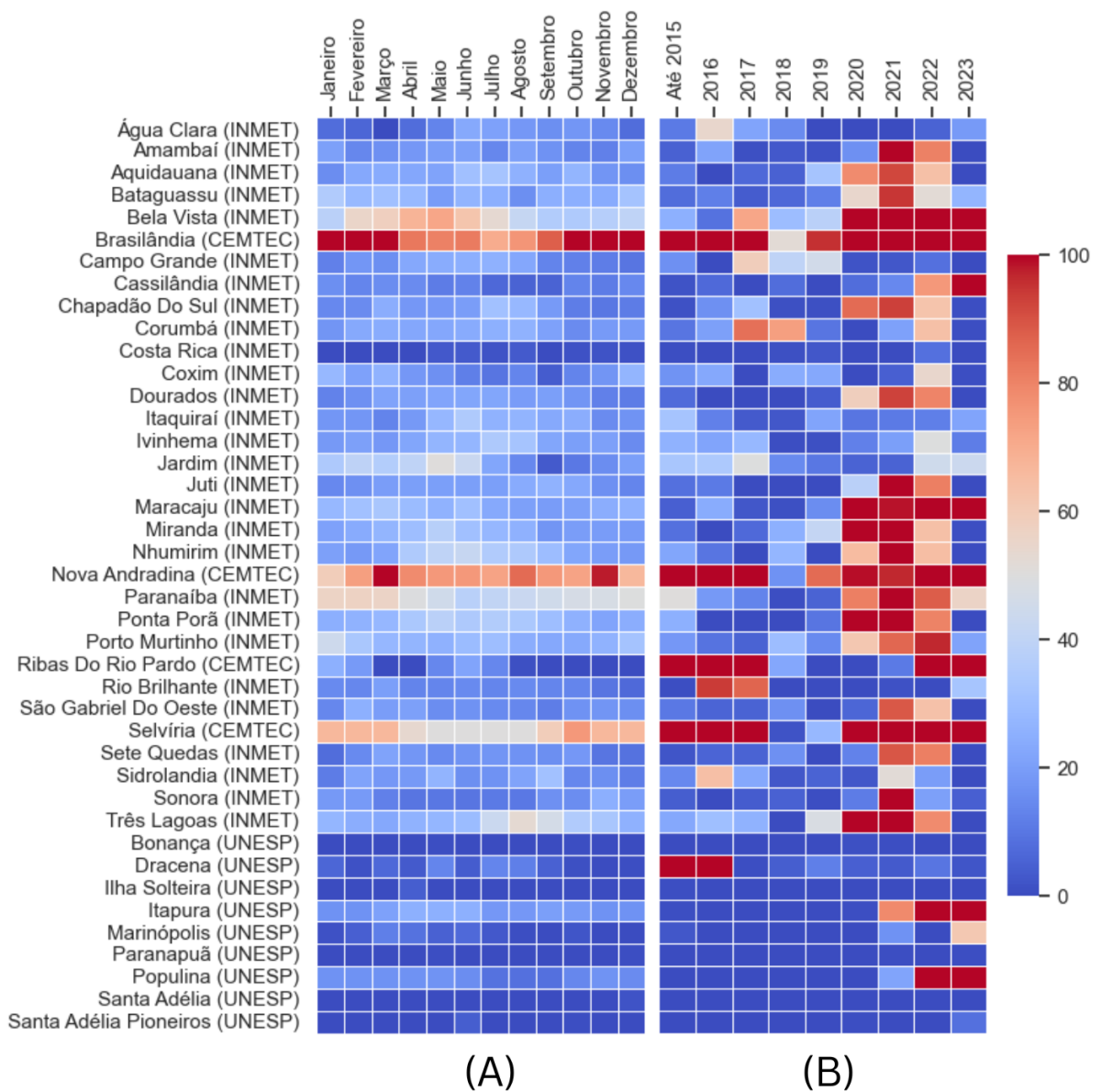
Os mapas climáticos foram criados no QGIS, onde importou-se os *rasters* de saída do SAGA GIS e executou o algoritmo *Contour Polygons* com intervalo de 0,5 ou 0,1 ou 0,2, dependendo do mapa, nos *rasters* de cada mês, obtendo polígonos para o intervalo especificado de evapotranspiração. Em seguida aplicou-se paleta de cores aos polígonos e executou o algoritmo *Clip* para cortar os polígonos na área de estudo.

Foram obtidos mapas vetoriais dos Estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo e sua respectiva malha de municípios disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística no endereço: <https://downloads.ibge.gov.br>. Por padrão, esses mapas possuem as coordenadas geográficas referenciadas de acordo com o Sistema de Referência Geocêntrica para as Américas (SIRGAS 2000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

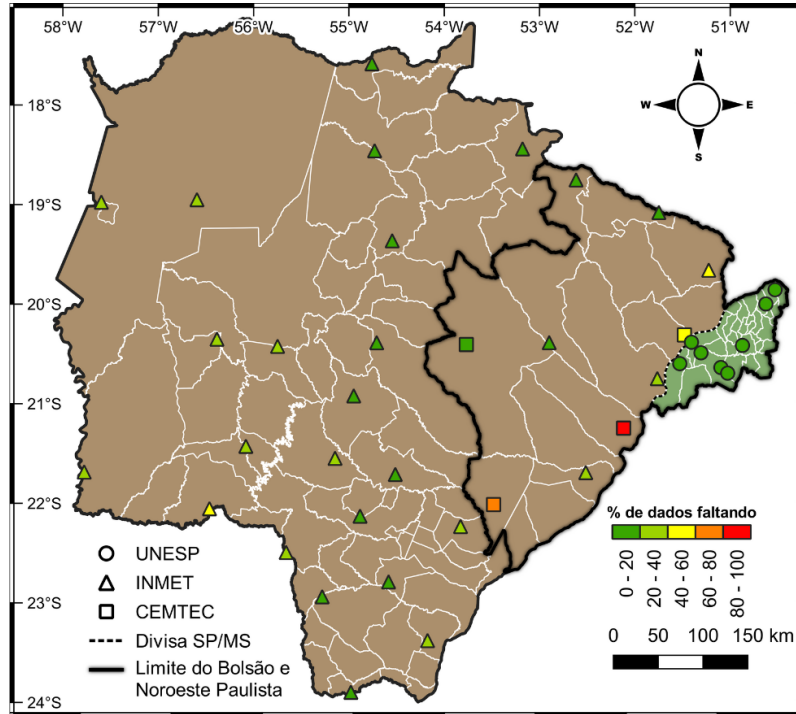
No geral, as estações da Costa Leste de Mato Grosso do Sul, tanto do INMET quanto do CEMTEC, sofrem com altos percentuais de lacunas, sendo que em 2023 metade das estações instaladas não funcionam mais ou possuem alta taxa de falhas (Figuras 5 e 6).

Figura 5 – Percentual de lacuna de dados no conjunto de dados.

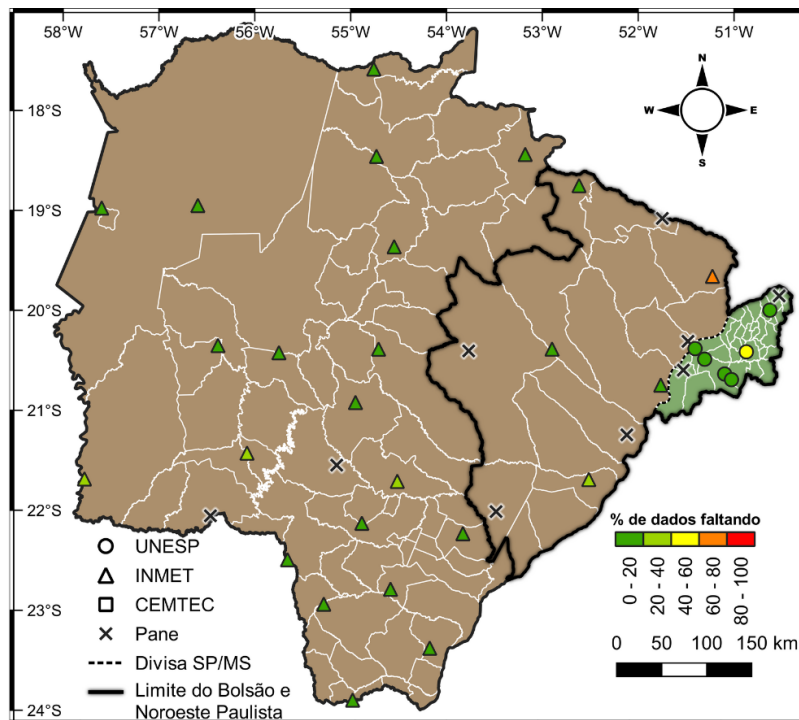


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 6 – Mapas de percentual de dados faltantes para o conjunto total de dados (A) e para 2023 (B).



(A)



(B)

Fonte: Elaboração pelo próprio autor.

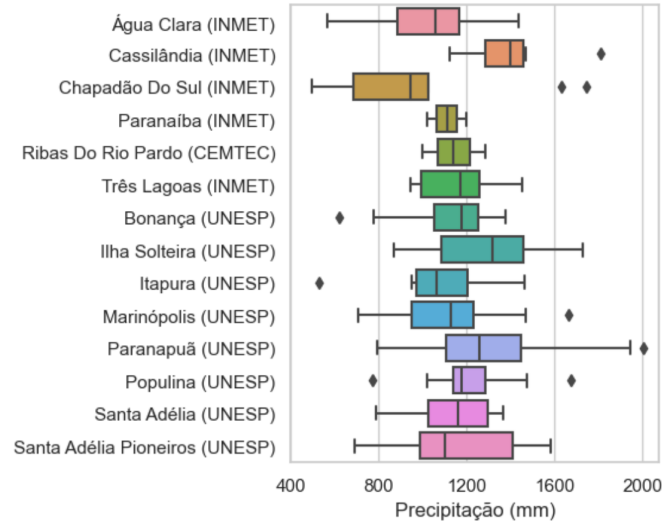
Na RANP, Itapura foi desativada em outubro de 2020, devido a incêndio que inutilizou sensores na estação, já Populina e Marinópolis estão temporariamente fora do ar, o que contribuiu para maiores percentuais mensais, no entanto, previamente a 2021, todas as estações apresentaram percentuais próximo a zero. Dracena, por sua vez, só começou a operar em 2017.

Foi constatado alto percentual de lacunas nos dados diários das estações do INMET e CEMTEC, quando comparadas com as da RANP. As estações do CEMTEC foram as que observaram o maior volume de dados faltando (instalação foi realizada em 2018), indicando possivelmente manutenção mais precária nestas estações. A estação de Brasilândia (CEMTEC), por exemplo, foi instalada em abril de 2018 e funcionou por apenas 6 meses e com alto volume faltando. Nova Andradina (CEMTEC) e Selvíria (CEMTEC) também observaram percentual alto de lacunas.

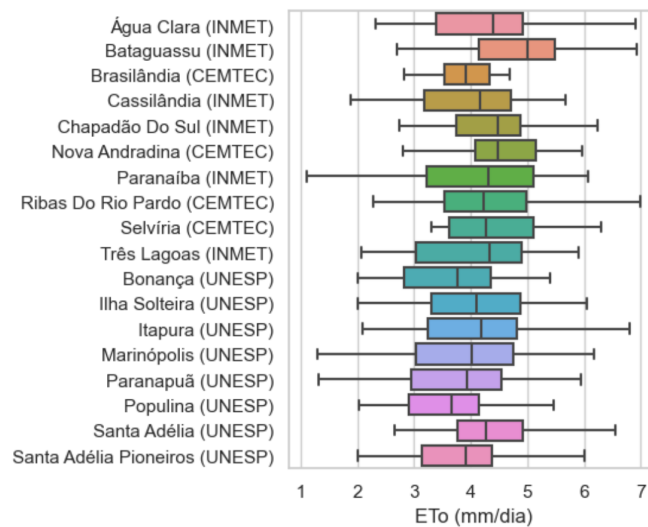
As lacunas nos dados, principalmente quando ocorrem em meses de déficit hídrico, dificultam o manejo de irrigação por atmosfera, uma vez que não se sabe a quantidade de água que evapotranspirou e, portanto, a água disponível no solo (COELHO FILHO et al., 2011). A democratização do acesso à dados agroclimáticos é importante à todos aqueles que fazem seu uso, sejam produtores, pesquisadores e o desenvolvimento de pesquisa, órgãos públicos, ou a população em geral. A chuva constitui na mais importante fonte de água natural e o principal meio pelo qual o reservatório de água no solo é reabastecido, portanto a ETo e a precipitação são imprescindíveis para o planejamento e manejo sustentável da irrigação (OLIVEIRA; KUHN; SILVA, 2006).

Na Figura 7 observa-se que o comportamento da precipitação apresenta uma variação maior entre estações do que a ETo. É possível que a chuva esteja sendo afetada pela frequência cada vez maior de chuvas convectivas — caracterizadas por serem localizadas, espacialmente irregulares, moderadas a fortes, de curta a média duração e mais comuns no final da tarde ou começo da noite (SILVA JUNIOR, 2017). A ETo depende das condições gerais do clima (UNESP, 2016; GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Figura 7 – Análise descritiva das médias anuais de precipitação (A) e médias diárias de ETo (B) na RANP (UNESP) e na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.



(A)



(B)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A caixa representa os quartis (do percentil 25 a 75, sendo a linha a mediana), as linhas o restante da distribuição, e os pontos os *outliers*.

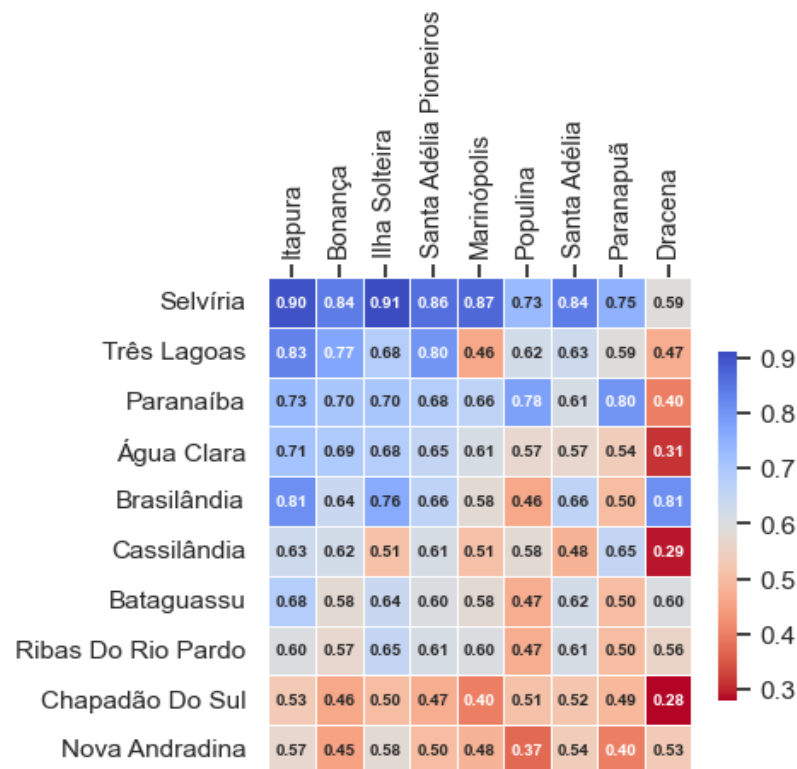
Precipitação anual apenas para estações com pelo menos um ano completo de dados sem lacunas.

Zhang et al. (2013) encontraram uma relação complexa entre a precipitação e a ETo na China que pode estar relacionada ao El Niño, à interseção ar-mar e à atividade solar, corroborado por Vourlitis et al. (2015), que, em uma floresta tropical sazonalmente seca no Nordeste do Brasil, demonstra que a evapotranspiração é fortemente controlada pela precipitação sazonal e pela disponibilidade de água no solo, e que há uma forte correlação entre a evapotranspiração e o índice

multivariado do El Niño-Oscilação Sul. Tito et al. (2020) contradiz essas observações, não encontrando a mesma relação entre o El Niño e a evapotranspiração no Rio de Janeiro.

Na Figura 8 e Tabela 2 constata-se alta correlação linear entre evapotranspiração de referência estimada a partir das estações meteorológicas da RANP e INMET para várias estações. Selvíria, Três Lagoas, Paranaíba, Água Clara e Brasilândia apresentaram coeficientes altos com alguma estação da RANP, já Cassilândia, Bataguassu e Ribas do Rio Pardo apresentaram coeficientes moderados. Itapura, Bonança, Ilha Solteira e Marinópolis foram as estações com as maiores correlações com as estações da Costa Leste de Mato Grosso do Sul. Em decorrência da alta correlação encontrada para algumas estações, conclui-se que é possível utilizar a ETo estimada pela RANP para regiões da Costa Leste de Mato Grosso do Sul, que constituem os municípios de de Selvíria, Três Lagoas, Paranaíba e Brasilândia, com coeficientes maior ou igual a 0,80 com alguma estação da RANP; desde que sejam realizadas as correções lineares. Água Clara, Bataguassu, Cassilândia e Ribas do Rio Pardo observaram seus maiores coeficientes de 0,71, 0,68, 0,65, 0,65, respectivamente.

Figura 8 – Matriz de R^2 para ETo diária.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 2 – Matriz de regressões lineares entre estações da UNESP e INMET/CEMTEC com as maiores correlações.

Operador		UNESP								
INMET/CEMTEC		Bonança	Dracena	Ilha Solteira	Itapura	Marinópolis	Paranapuã	Populina	Sta Adélia	Sta Adélia Pioneiros
Água Clara	Eq	0,94x + 0,71	0,52x + 2,08	0,86x + 0,8	0,85x + 0,74	0,85x + 0,83	0,79x + 1,09	0,95x + 0,79	0,78x + 0,79	0,87x + 0,8
	R ²	69,09	31,47	68,07	70,53	60,86	53,57	56,76	57,38	65,34
	Erro	0,0101	0,0172	0,0092	0,0099	0,0108	0,0117	0,0144	0,0107	0,0102
Bataguassu	Eq	1,02x + 1,3	0,87x + 1,64	1,03x + 1,06	0,99x + 1,03	0,97x + 1,2	0,91x + 1,49	1,01x + 1,44	0,97x + 0,86	0,98x + 1,29
	R ²	58,1	60,06	64,03	68,29	58,01	50,12	46,72	61,55	59,67
	Erro	0,0165	0,0195	0,0147	0,0137	0,0159	0,0173	0,0216	0,0145	0,0154
Cassilândia	Eq	0,81x + 1,09	0,46x + 2,36	0,67x + 1,31	0,75x + 1,11	0,67x + 1,34	0,84x + 0,78	0,88x + 0,9	0,65x + 1,25	0,79x + 1,08
	R ²	61,68	28,57	51,25	62,89	50,55	65,35	58,23	47,92	61,17
	Erro	0,0105	0,0181	0,0093	0,01	0,0096	0,0097	0,0123	0,011	0,0102
Paranaíba	Eq	0,92x + 1,01	0,6x + 1,94	0,84x + 1,04	0,83x + 1,11	0,81x + 1,18	0,97x + 0,64	1,06x + 0,65	0,78x + 1,01	0,87x + 1,14
	R ²	70,5	40,33	70,3	73,1	65,62	80,28	77,88	61,25	67,62
	Erro	0,0116	0,0221	0,0097	0,0099	0,0105	0,0091	0,0111	0,0121	0,0116
Três Lagoas	Eq	0,99x + 0,43	0,71x + 1,41	0,8x + 0,8	0,94x + 0,28	0,64x + 1,61	0,84x + 0,88	0,95x + 0,61	0,82x + 0,57	0,98x + 0,42
	R ²	77,32	47,12	67,6	82,85	45,66	59,15	62,06	62,7	79,59
	Erro	0,01	0,0246	0,0075	0,0084	0,0097	0,0128	0,0143	0,0118	0,0092
Brasilândia	Eq	1,19x + 0,47	0,87x + 0,86	1,03x + 0,64	1,02x + 0,58	0,88x + 0,99	1,01x + 0,68	1,22x + 0,69	0,82x + 0,88	1,03x + 0,42
	R ²	64,3	80,84	75,59	80,64	57,84	49,53	45,85	66,38	66,48
	Erro	0,0737	0,0382	0,0487	0,0417	0,0626	0,0852	0,1109	0,0485	0,061
Ribas Do Rio Pardo	Eq	0,84x + 1,26	0,72x + 1,5	0,92x + 0,93	0,75x + 1,29	0,83x + 1,05	0,71x + 1,48	0,93x + 1,19	0,72x + 1,1	0,81x + 0,96
	R ²	57,23	56,44	65,34	60,49	59,79	50,17	46,9	61,04	61,38
	Erro	0,0204	0,0185	0,0188	0,0184	0,0197	0,0198	0,028	0,0163	0,0183
Selvíria	Eq	1,22x + 0,44	0,92x + 1,25	1,24x + 0,24	1,07x + 0,58	1,11x + 0,43	0,98x + 0,84	1,29x + 0,56	0,95x + 0,63	1,14x + 0,21
	R ²	83,84	58,76	91,36	90,48	86,76	75,18	72,52	84,31	85,95
	Erro	0,0233	0,0352	0,0166	0,0151	0,0189	0,0246	0,0345	0,0179	0,0201

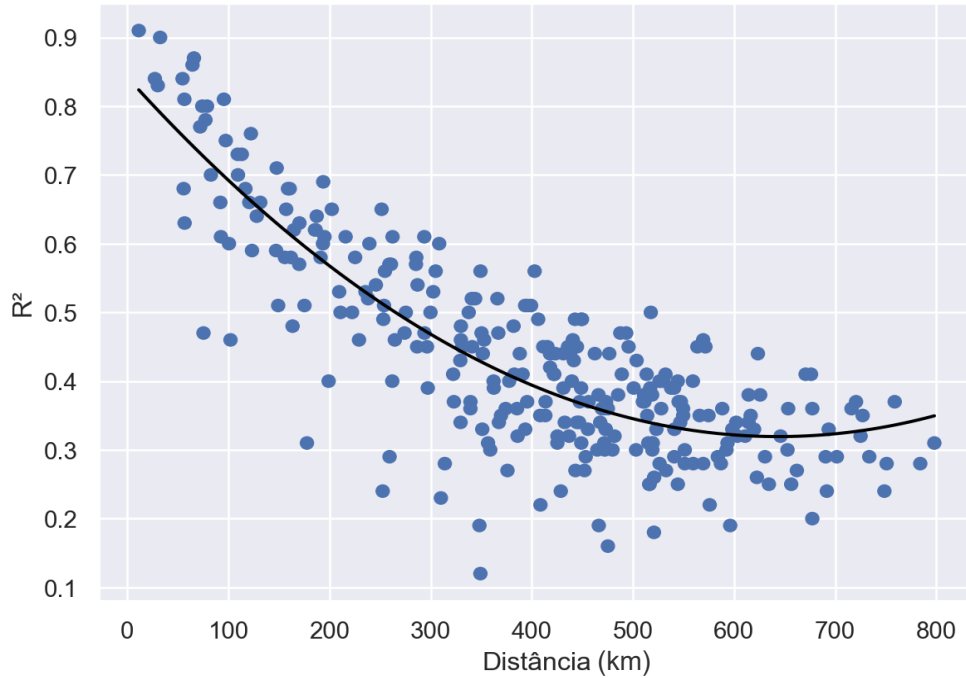
Fonte: Elaboração pelo próprio autor.

Equações tem como variável independente (x) estações da UNESP e dependente (y) as da Costa Leste de Mato Grosso do Sul. Exemplo: $S = 1,24 \times ISA + 0,24$; onde S é a ETo diária da estação de Selvíria e ISA a ETo diária da estação de Ilha Solteira.

Em alguns casos, apesar de distâncias geográficas pequenas, apresentadas nas Figuras 9 e 10, observou-se baixos coeficientes de determinação, o que pode ser explicado devido às condições microclimáticas do local onde a estação foi instalada — afetando condições de temperatura, frequência de precipitação, fluxos de energia no solo. A evapotranspiração de referência é afetada fortemente por fatores ambientais e climáticos (DOLMAN; DE JEU, 2010).

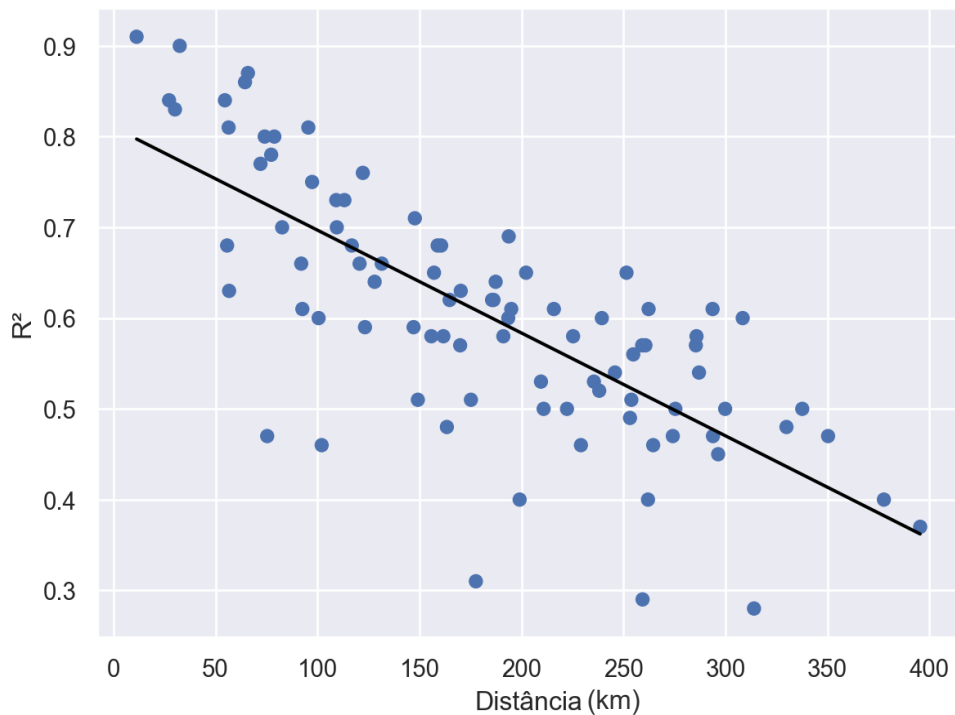
Tanaka et al. (2008), em trabalho de revisão da estimativa de evapotranspiração de florestas tropicais e regiões adjacentes na Tailândia, observa diferenças significativas na evapotranspiração estimada entre regiões relativamente próximas umas das outras em decorrência da demanda evaporativa atmosférica. O trabalho também observa que variações de precipitação impactam significativamente no balanço e troca energética, que afeta a evapotranspiração.

Figura 9 – R^2 em função da distância entre os pares de estações da RANP e todas as estações do INMET/CEMTEC no Mato Grosso do Sul.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 10 – R^2 em função da distância entre os pares de estações da RANP e INMET/CEMTEC na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A precipitação é um componente da ETo, no entanto, a região da Costa Leste de Mato Grosso do Sul possui média anual histórica de precipitação de 1.435 mm anuais, segundo Flumignan, Fietz e Comunello (2015), em comparação o Noroeste Paulista possui média anual histórica de 1270 a 1320 mm, segundo Nunes et al., (2019), corroborado por Nery et al. (2004). Este trabalho encontrou médias diferentes para a Costa Leste de Mato Grosso do Sul, com média anual de 1140 mm, aumentando para 1230 mm para além da Costa Leste, e 1180 mm para as estações da RANP, podendo concluir que a Costa Leste e o Noroeste Paulista possuem médias anuais históricas similares.

Apesar dessa similaridade encontrada, a diferença do regime de chuvas entre alguns pares de estação pode ser um dos fatores que explica a variância maior da ETo em alguns casos — quando estações estão próximas geograficamente entre si e possuem baixa correlação de ETo. O regime de chuvas também pode ser um dos fatores que influencia na correlação espacial.

Tabela 3 – ETo mensal por estação.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Água Clara	4,97	4,86	4,42	3,70	2,88	2,57	2,86	3,78	4,38	4,74	5,17	5,17
Bataguassu	5,75	5,41	5,06	4,59	3,64	3,41	4,04	5,02	5,61	5,67	5,80	5,81
Brasilândia	-	-	-	4,59	3,57	2,82	3,79	3,91	-	-	-	-
Cassilândia	4,73	4,71	4,32	3,64	2,92	2,58	2,79	3,55	4,33	4,70	4,80	4,87
Chapadão Do Sul	4,62	4,51	4,29	3,93	3,36	3,18	3,67	4,79	5,25	4,96	4,75	4,85
Nova Andradina	5,64	4,86	-	4,49	3,69	2,80	4,15	3,66	4,07	4,47	-	5,97
Paranaíba	5,08	4,96	4,35	3,86	3,16	2,85	3,20	4,05	5,12	5,45	5,14	5,26
Ribas Do Rio Pardo	4,83	4,71	4,54	3,86	3,12	3,12	3,48	4,14	4,95	5,45	4,95	5,10
Selvíria	5,97	5,20	4,82	4,10	3,46	3,33	3,60	4,25	5,54	5,21	4,86	5,94
Três Lagoas	4,81	4,83	4,41	3,64	2,81	2,53	2,73	3,59	4,19	4,75	5,07	5,09
Bonança	4,19	4,10	3,83	3,23	2,59	2,25	2,59	3,31	4,17	4,39	4,57	4,37
Ilha Solteira	4,51	4,49	4,12	3,74	2,93	2,71	3,19	4,10	4,74	4,83	4,94	4,75
Itapura	4,75	4,55	4,17	3,48	2,72	2,52	2,89	3,83	4,62	4,70	5,03	4,92
Marinópolis	4,42	4,29	4,21	3,71	2,86	2,51	2,92	3,58	4,46	4,64	4,59	4,50
Paranapuã	4,17	4,27	3,88	3,39	2,69	2,47	2,93	3,71	4,50	4,74	4,70	4,40
Populina	4,07	4,17	3,81	3,21	2,54	2,38	2,70	3,47	4,14	4,46	4,24	3,93
Santa Adélia	4,50	4,42	4,23	3,80	3,17	3,04	3,76	4,65	5,28	5,08	4,92	4,89
Santa Adélia Pioneiros	4,40	4,28	3,85	3,31	2,69	2,46	2,88	3,54	4,27	4,56	4,79	4,64

Fonte: Elaboração pelo próprio autor.

Tabela 4 – Distância (km) cartesiana entre estações da RANP (UNESP) e INMET/CEMTEC.

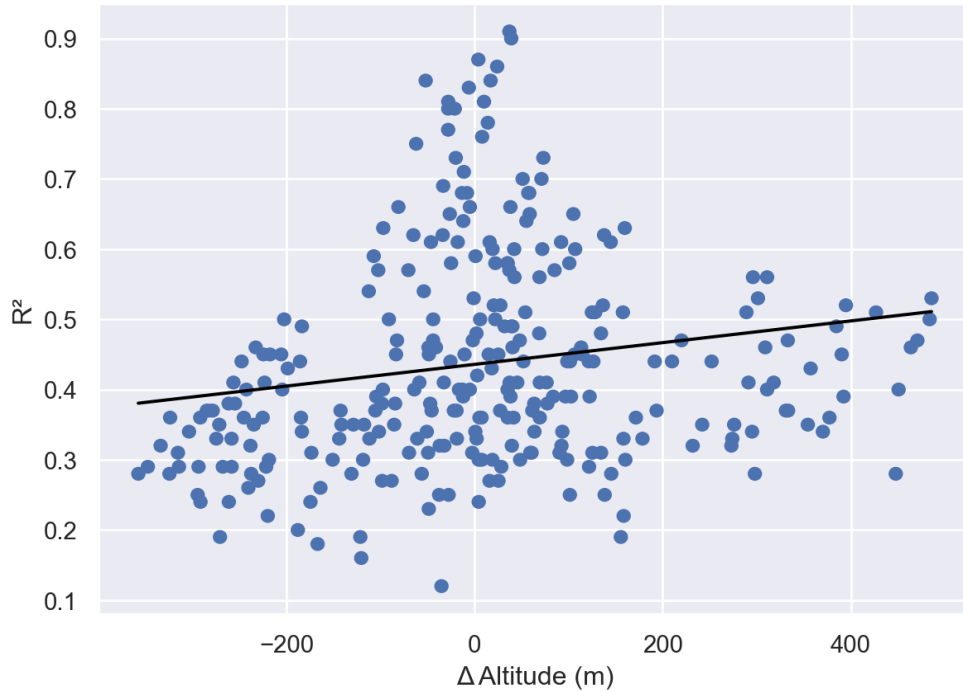
Operador INMET/CEMTEC	UNESP								
	Itapura	Bonança	Ilha Solteira	Sta Adélia Pioneiros	Marinópolis	Populina	Santa Adélia	Paranapuã	Dracena
Selvíria	32	55	11	64	66	113	27	97	123
Três Lagoas	30	72	56	79	102	165	57	147	75
Paranaíba	109	109	83	117	92	77	93	74	199
Água Clara	148	194	159	202	216	259	170	246	178
Brasilândia	95	128	122	131	162	229	121	211	56
Cassilândia	170	186	149	195	175	156	163	157	259
Bataguassu	161	191	187	193	225	294	186	275	101
Ribas Do Rio Pardo	239	285	251	294	308	350	262	338	255
Ivinhema	305	341	330	344	374	440	331	422	253
São Gabriel Do Oeste	349	393	353	403	408	431	367	423	386
Maracaju	399	443	419	449	472	526	425	511	376
Chapadão Do Sul	235	265	222	274	262	254	238	253	314
Nova Andradina	261	296	286	300	330	395	287	378	210
Dourados	396	436	418	441	468	528	422	511	357
Sidrolândia	366	411	382	418	438	485	391	472	359
Aquidauana	450	496	462	504	519	559	473	547	453
Miranda	518	564	530	572	587	626	541	614	521
Juti	406	442	431	445	475	541	433	523	351
Amambaí	477	514	501	517	547	611	503	594	425
Rio Brilhante	341	383	362	388	414	472	367	456	310
Ponta Porã	488	528	510	532	560	620	514	603	447
Jardim	493	538	511	544	566	616	519	602	475
Nhumirim	569	614	575	624	631	654	588	646	596
Porto Murtinho	676	721	694	727	749	798	702	784	657
Coxim	415	456	413	466	465	473	429	469	466
Itaquiraí	418	447	445	449	482	551	443	533	349
Sete Quedas	519	550	545	551	584	653	544	634	452
Corumbá	671	716	677	725	734	759	691	751	692
Campo Grande	339	385	352	394	409	449	362	437	348
Costa Rica	297	330	287	339	329	323	303	322	370
Bela Vista	550	593	569	598	623	677	576	662	521
Sonora	480	517	473	526	520	516	489	515	541

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme a Figura 11, não foi observado uma correlação entre o R^2 e o delta de altitude entre as estações da RANP com as do Mato Grosso do Sul, com concentração ao redor de 0, cerca de 375m, que é a altitude média das estações da RANP. No entanto, foi observado uma forte correlação de 0,84 entre a ETo média e a altitude, apresentado na Figura 12. Sabe-se que a altitude tem papel na ETo, uma vez que a pressão atmosférica, que é um componente importante da ETo, depende da mesma (ZHANG; WANG, 2021; DOLMAN; DE JEU, 2010).

Wassolowski (2020), em trabalho estudando a evapotranspiração no Estado de Mato Grosso do Sul por sensoriamento remoto, também observou alta correlação entre evapotranspiração média entre 2002 e 2019 e altitude, atingindo um R^2 de 0,86, similar ao observado pelo presente trabalho.

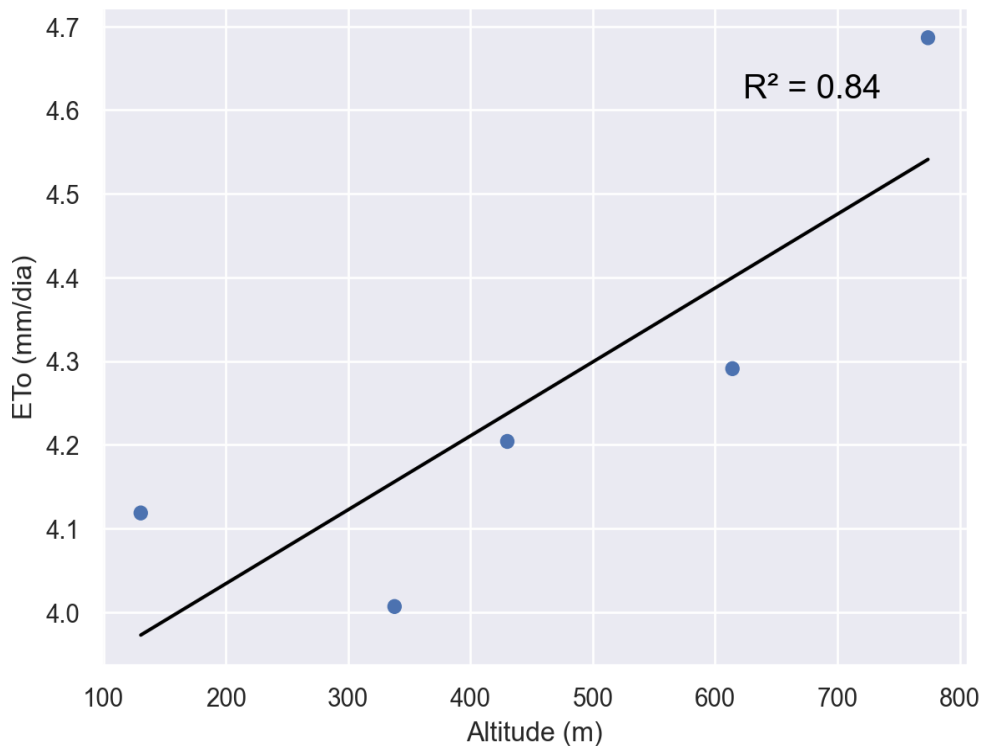
Figura 11 – R^2 em função do Δ de altitude* entre os pares de estações da RANP e INMET/CEMTEC no Mato Grosso do Sul.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

*Números negativos indicam que a a estação do INMET ou CEMTEC está abaixo de estação da RANP.

Figura 12 – Correlação entre média da ETo e altitude.

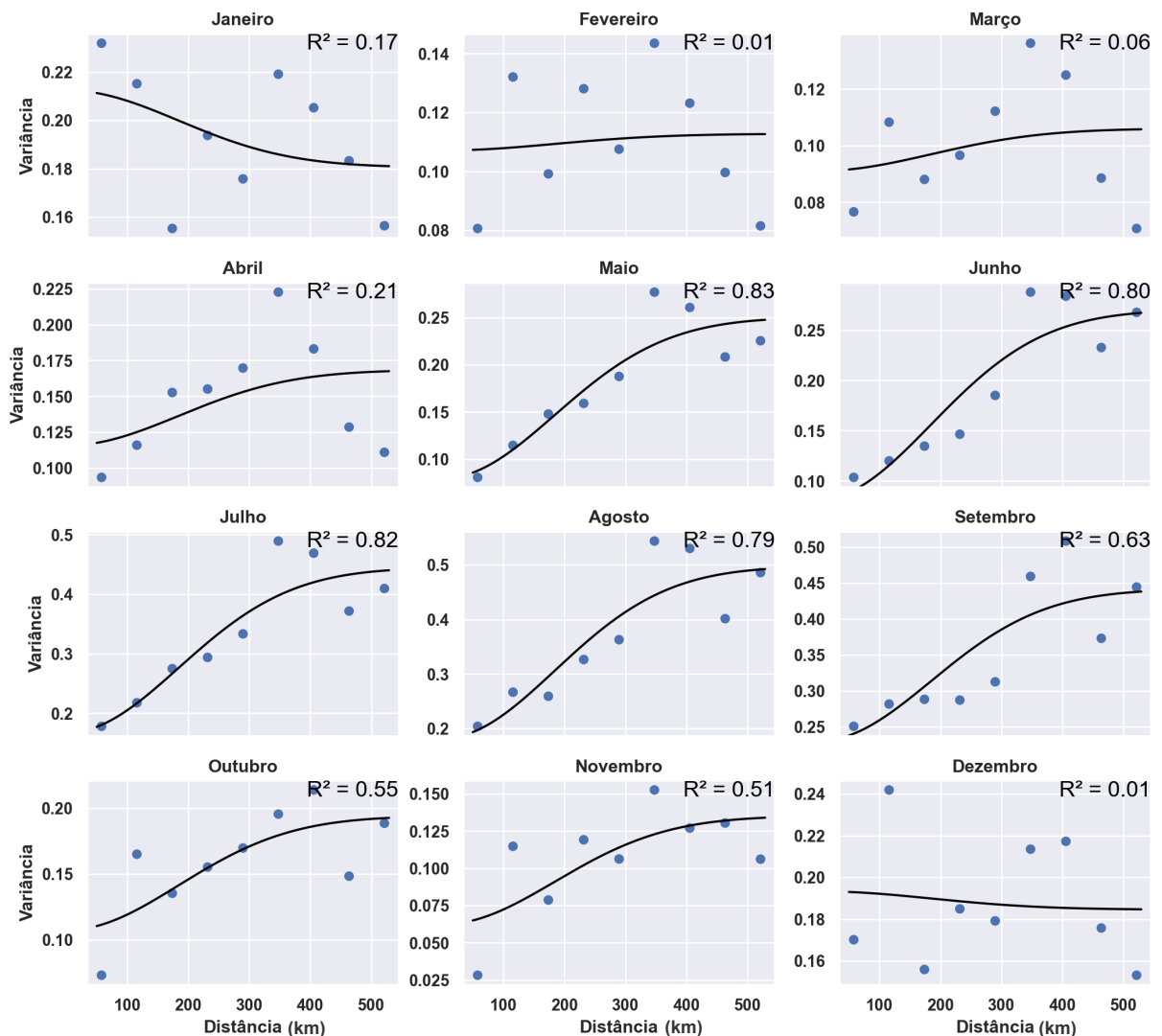


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os semivariogramas apresentados na Figura 13 observaram altas autocorrelações espaciais e adequação do modelo gaussiano de maio à novembro, que são os meses com maior déficit hídrico. A variância espacial (patamar subtraído ao efeito pepita) aproximou a 0,30 de variância ou 0,55 mm/dia de ETo de desvio padrão.

Tanaka et al. (2008) relatam que a precipitação impacta na evapotranspiração, podendo ser uma possível explicação para a dependência espacial menor nos meses com excedente hídrico. Zhang & Wang (2021) encontraram correlações estatisticamente significativas entre precipitação e evapotranspiração, e a identificaram como um dos principais componentes que afetam a evapotranspiração.

Figura 13 – Semivariogramas mensais.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O regime de chuvas e balanço hídrico também são fatores que podem influenciar nas correlações espaciais. Borges et al. (2021), observou déficit hídrico de abril à outubro, sendo os meses de agosto e setembro com as maiores deficiências, no município de Cassilândia em Mato Grosso do Sul, fato que é corroborado por D'Angiolella et al. (2007) e Aparecido et al. (2020), porém observando variações regionais quando se sai da Costa Leste de Mato Grosso do Sul. No Noroeste Paulista, a distribuição de chuva se concentra de novembro a fevereiro e com déficit hídrico de abril a outubro (OLIVEIRA et al., 2021; OLIVEIRA; HERNANDEZ; BISPO, 2020). Conclui-se que a sazonalidade das chuvas é similar no Noroeste Paulista e no Costa Leste de Mato Grosso do Sul.

Tito et al. (2020), corroborado por Wassolowski (2020), em trabalho analisando a estimativa de evapotranspiração na superfície a partir de imagens de satélite no Rio de Janeiro, também encontrou maiores resíduos da estimativa, quando comparadas com o método de Penman Monteith, nos meses de excedente hídrico, apontando que as chuvas, muito provavelmente as conectivas, que são localizadas, tem um efeito na estimativa e interpolação espacial da evapotranspiração.

Silva Junior (2017), em trabalho abrangendo o Noroeste Paulista, observou parâmetros diferentes dos obtidos pelo presente trabalho. Enquanto que neste trabalho o modelo gaussiano foi bem adequado nos meses de déficit hídrico (Tabela 5), no trabalho mencionado não foi encontrado a mesma relação, sendo os maiores coeficientes concentrados de janeiro a maio. Os alcances (r) distintos entre os meses, no trabalho de Silva Junior (2017), dificultam a comparação, uma vez que indicam que a quantidade de pares de estações em cada *bin* (grupo de pares) foi distinto para cada mês, podendo ter efeitos dramáticos nas variâncias.

No mesmo trabalho, no entanto, as variâncias no efeito pepita (n) foram baixas, assim como no presente trabalho, indicando que estações próximas entre si possuem baixa variância e provavelmente maior correlação, quando comparadas ao patamar (s) que sempre foi maior. Comparativamente com o presente trabalho, no geral, houve maior variação no efeito pepita e patamar, e a diferença entre os dois foi maior — indicando que a variância espacial no presente trabalho foi menor,

contribuindo menos para explicar a variância e, portanto, podendo ser um fator que contribui com maior erro da interpolação deste estudo.

A menor variação e diferença entre os parâmetros s (patamar) e n (efeito pepita) podem ser explicados pelo conjunto de dados maior que pode ter resultado na convergência da distribuição da ETo (Teorema do Limite Central), diminuindo os efeitos de *outliers*, e também pela utilização do mesmo agrupamento com mesmo *lag* (distância entre *bins*) para todos os meses realizados pelo presente trabalho.

Tabela 5 – Parâmetros dos semivariogramas e ajuste do modelo.

Mês	SQres	R ²	Modelo	n	s	r (m)
Janeiro	0,0050	0,17	Gaussiano	0,2125	0,1805	260.686
Fevereiro	0,0040	0,01	Gaussiano	0,1071	0,1128	260.687
Março	0,0036	0,06	Gaussiano	0,0910	0,1060	260.687
Abril	0,0104	0,21	Gaussiano	0,1156	0,1684	260.687
Maio	0,0059	0,83	Gaussiano	0,0795	0,2505	260.686
Junho	0,0070	0,80	Gaussiano	0,0818	0,2703	260.689
Julho	0,0170	0,82	Gaussiano	0,1670	0,4446	260.686
Agosto	0,0252	0,79	Gaussiano	0,1822	0,4973	260.686
Setembro	0,0224	0,63	Gaussiano	0,2301	0,4416	260.691
Outubro	0,0061	0,55	Gaussiano	0,1073	0,1940	260.687
Novembro	0,0051	0,51	Gaussiano	0,0623	0,1352	260.687
Dezembro	0,0071	0,01	Gaussiano	0,1933	0,1846	260.686

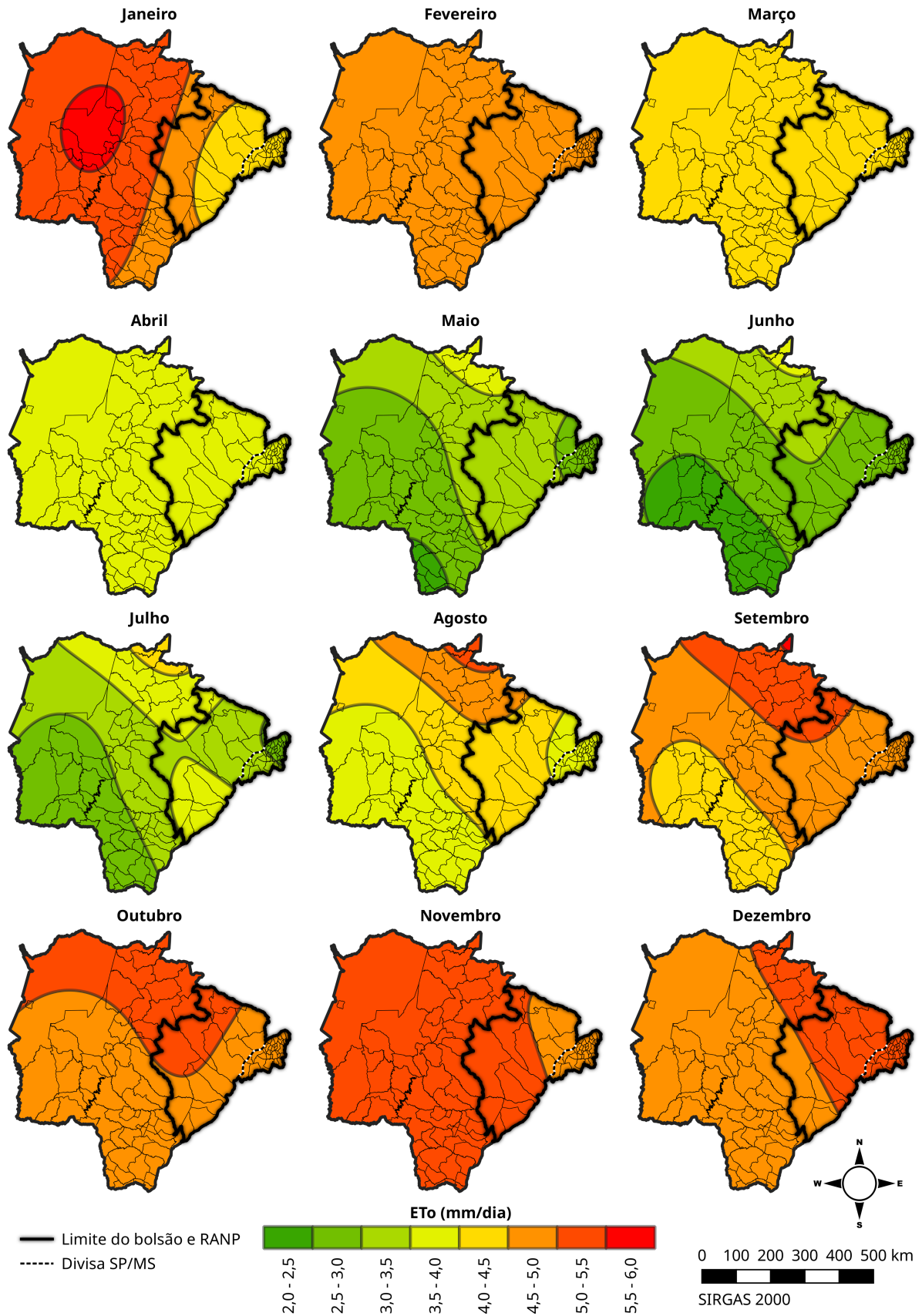
Fonte: Elaboração do próprio autor.

SQres - soma de quadrados do resíduo; R² - coeficiente de determinação; n (nugget) - efeito pepita; s (sill) - distância entre o efeito pepita e o patamar; r (range) – alcance.

A distribuição mensal e da ETo no Noroeste Paulista e no Mato Grosso do Sul na Figura 14 concordou em grande parte com as distribuições encontradas por Silva Júnior (2017) e Wassolowski (2020). As variações podem ser explicadas pelo maior conjunto de dados e o *lag*, que no presente trabalho foi de 66km, escolhido por otimização dos parâmetros ao modelo gaussiano e limitado pela densidade de estações na Costa Leste de Mato Grosso do Sul, sendo ideal manter a quantidade de pares por *bin* similar, o que resultou em maior homogeneidade na região de relativa menor área do Noroeste Paulista, em comparação com a Costa Leste de Mato Grosso do Sul e o Estado de Mato Grosso do Sul.

Os mesmos autores também encontraram alta sazonalidade da evapotranspiração durante o ano. No Noroeste Paulista, nos meses de agosto a fevereiro observou-se evapotranspiração acima de 4,5 mm/dia. Wassolowski (2020) também observou que a evapotranspiração média no estado é mais alta no verão, e diminui à medida que o período se aproxima de julho, começo do inverno, quando a radiação solar, a temperatura e a umidade são menores.

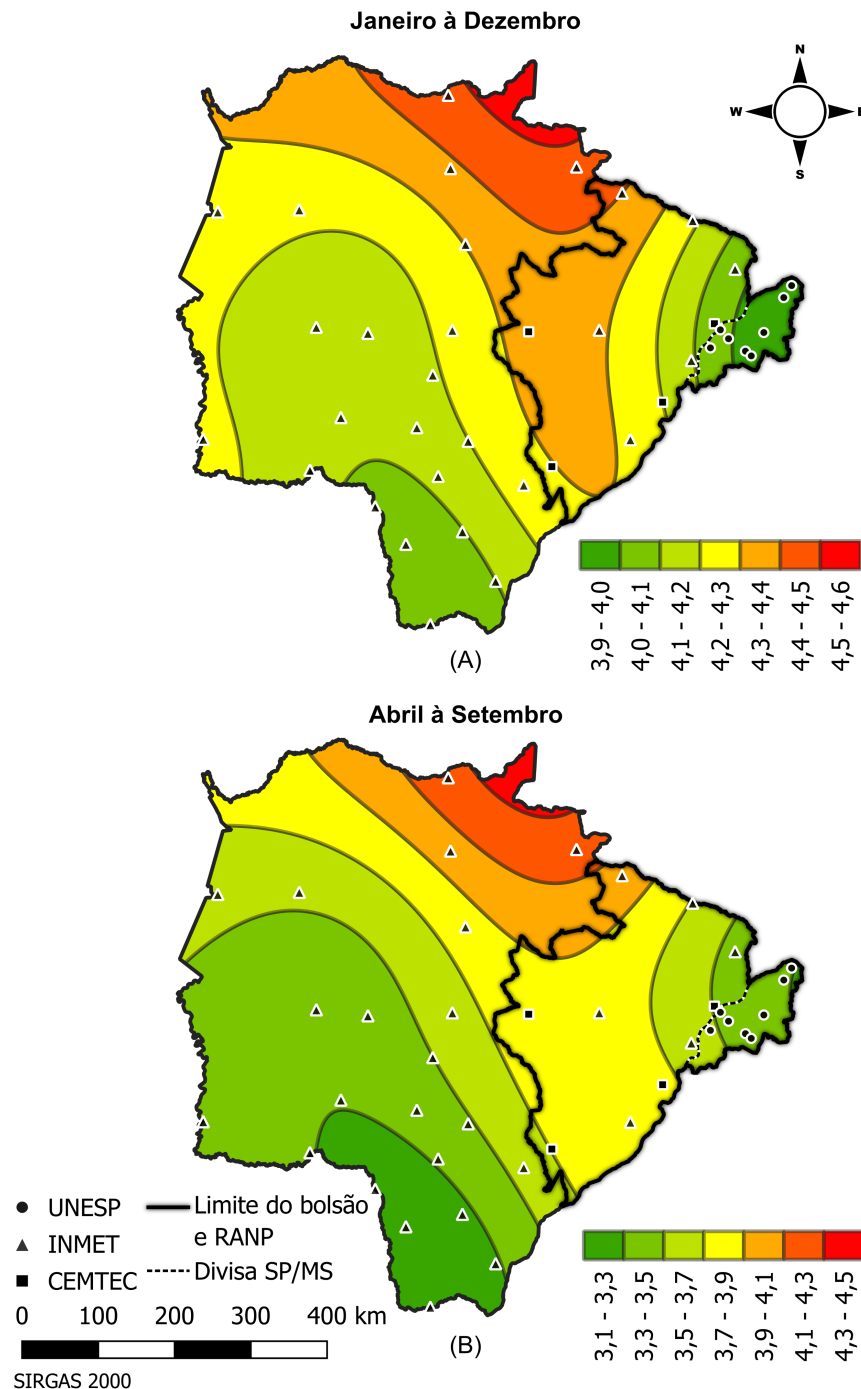
Figura 14 – Mapas de distribuição da ETo mensal por krigagem.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

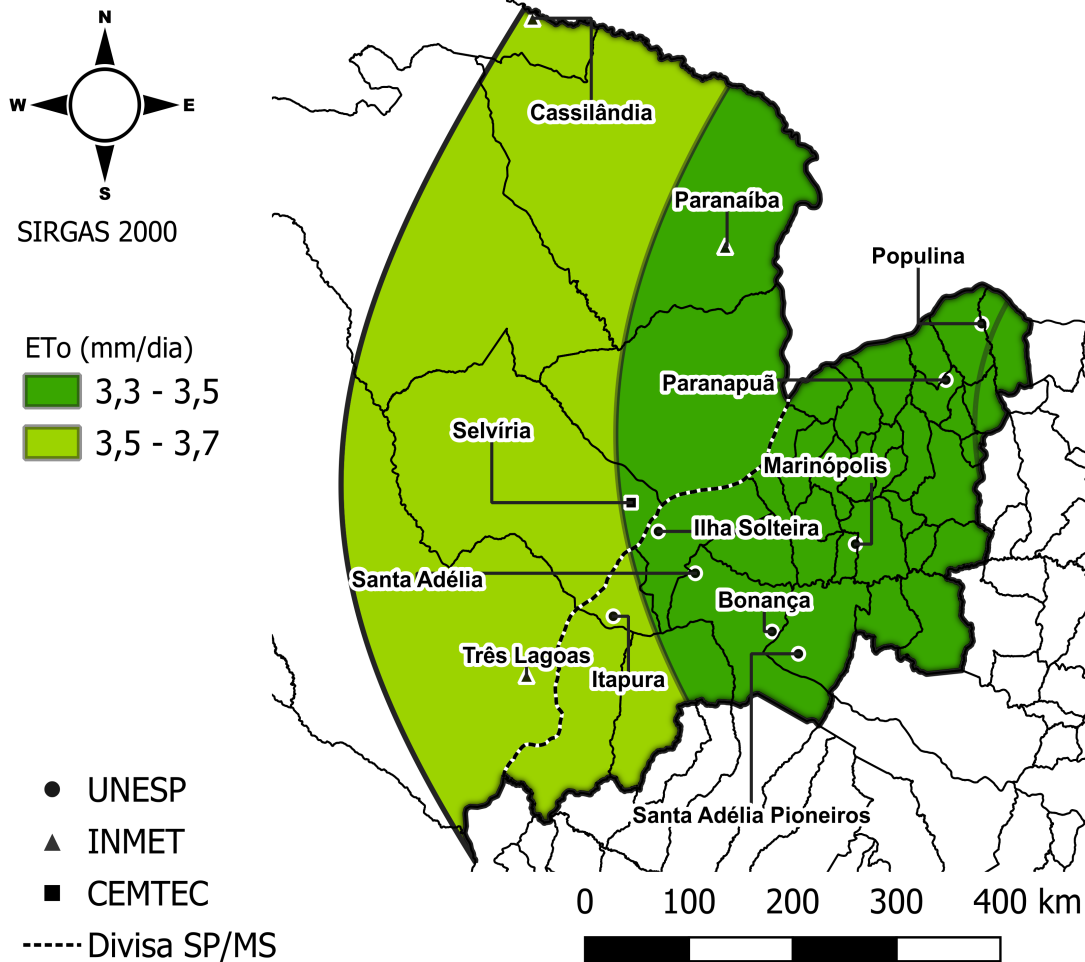
No geral, a distribuição mensal e geral da ETo (Figuras 14, 15 e 16) mostrou zonas de evapotranspiração homogêneas entre o Noroeste Paulista e Costa Leste de Mato Grosso do Sul, inclusive nos meses com maiores taxas de ETo e déficit hídrico, corroborando a hipótese de que as estações da RANP têm abrangência para além do Estado na Costa Leste de Mato Grosso do Sul.

Figura 15 – Mapas de distribuição de ETo média para o período completo de dados (A) e nos meses de déficit hídrico (B).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 16 – Zonas de ETo nos meses de déficit hídrico.



Fonte: Elaboração pelo próprio autor.

Apesar do bom ajuste do modelo gaussiano em alguns meses, não foram encontrados altos, ou mesmo moderados R^2 na validação cruzada de omissão da krigagem (LOOCV – *Leave One Out Cross-Validation*), apresentados na Tabela 6. Nos meses de déficit hídrico o REMQ chegou a 0,64 e R^2 menor que 0,20, porém atingindo 0,35 em maio. Estes resultados, apesar de mostrarem que a krigagem ordinária não foi um método de interpolação espacial de ETo de alta concordância para toda a região do Noroeste Paulista e Mato Grosso do Sul, não descartam a possibilidade de utilizar dados da RANP para além do Estado de São Paulo, considerando a dependência espacial encontrada e as altas correlações entre as estações da RANP e do INMET.

Vilanova, Simões e Trannin (2012), realizando um estudo sobre a espacialização da ETo na região Sul-Mineira, utilizaram a krigagem ordinária e

encontraram alta concordância ($R^2=0,90$ e $REM\text{Q}=0,09$) entre os valores da ETo obtidos por krigagem e os medidos em uma estação dentro da área interpolada. Este trabalho, no entanto, validou a krigagem, que foi realizada com 4 estações, com apenas uma outra estação próxima.

Hodam, Sarkar e Marak (2017), analisando a interpolação espacial da ETo na Índia, utilizando a krigagem ordinária e universal e inverso do quadrado da distância (IQD), encontraram que a krigagem indireta, realizando a interpolação das variáveis para realizar o cálculo da ETo, foi marginalmente melhor que a krigagem direta da ETo, ao mesmo tempo que requer drasticamente menos poder computacional ou tempo para realizar a interpolação. Os mesmos autores também observaram que a interpolação pela krigagem ordinária e universal, em comparação ao IQD, resultou em superfícies de evapotranspiração mensais mais ajustadas, no entanto, o IQD, desde que se identifique os melhores pesos, resultou em menor REMQ quando realizada a validação cruzada por estação, podendo ser um método de interpolação espacial da ETo a se estudar para futuros trabalhos na região da Costa Leste de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso do Sul.

Tabela 6 – Validação cruzada da krigagem por LOOCV para todas as estações da RANP e INMET/CEMTEC.

Mês	Estações	R^2	EQM	REM\text{Q}
Janeiro	40	0,41	0,34	0,58
Fevereiro	40	0,11	0,11	0,33
Março	39	0,15	0,09	0,31
Abril	41	0,15	0,12	0,35
Maio	41	0,35	0,14	0,38
Junho	41	0,32	0,17	0,42
Julho	41	0,24	0,31	0,56
Agosto	41	0,19	0,41	0,64
Setembro	40	0,16	0,38	0,61
Outubro	40	0,15	0,19	0,44
Novembro	39	0,26	0,12	0,34
Dezembro	40	0,11	0,25	0,5

Fonte: Elaboração do próprio autor.

R^2 - coeficiente de determinação; EQM - Erro Quadrático Médio; REMQ - Raiz do Erro Médio Quadrático.

5. CONCLUSÕES

A cobertura de estações agrometeorológicas públicas, consideradas SAI, é esparsa e com alta taxa de falhas devido à falta de manutenção na Costa Leste de Mato Grosso do Sul (bolsão), afetando os Irrigantes que dependem destes serviços e o manejo sustentável da irrigação.

A RANP apresentou altas correlações lineares, juntamente com adequada dependência espacial, com as estações da Costa Leste de Mato Grosso do Sul (bolsão) e, portanto, pode ser possível o manejo da irrigação em parte desta região com base na RANP nos municípios de Selvíria, Três Lagoas, Paranaíba e Brasilândia, com coeficientes maior ou igual a 0,80 com alguma estação da RANP. Água Clara, Bataguassu, Cassilândia e Ribas do Rio Pardo observaram seus maiores coeficientes de 0,71, 0,68, 0,65, 0,65, respectivamente. Foi constatado correlação espacial da ETo e a precipitação e a altitude também se mostraram altamente correlacionadas com a ETo, corroborando a correlação encontrada entre os dados das estações, tendo em vista que a Costa Leste de Mato Grosso do Sul (bolsão) e o Noroeste Paulista tem, em grande parte, regimes de chuva e altitude similares e não há acidentes geográficos entre as regiões. As superfícies de ETo geradas por krigagem mostram duas zonas homogêneas de ETo nos meses de déficit hídrico entre a região da Costa Leste de Mato Grosso do Sul (bolsão) e o Noroeste Paulista, envolvendo parte ou por completo os municípios de Selvíria, Três Lagoas, Paranaíba, Inocência, Aparecida do Taboado e Cassilândia.

A krigagem ordinária não se mostrou adequada para a interpolação espacial da ETo em estações sem dados para toda a região de estudo, observando coeficientes de determinação de moderado a baixo e REMQ de cerca de 0,50, sendo necessário mais estudos para entender os fatores afetando esse baixo desempenho e verificação de outros métodos de interpolação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, p.297, 1998.

ANA – Agência Nacional de Águas (Brasil). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019**: Informe anual. Brasília, 2019a, 100p. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_anual_2019-versao_web-0212-1.pdf. Acesso em: 24 maio 2020.

ANA – Agência Nacional De Águas. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil** / Agência Nacional de Águas, Embrapa Milho e Sorgo. 2 ed. Brasília: ANA, 2019b. 47 p.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 10 jul. 2023.

APARECIDO, L. E. D. O.; MORAES, J. R. D. S. C. D.; MENESES, K. C. D.; TORSONI, G. B.; COSTA, C. T. S. Caracterização Hídrica Espacial e Sazonal de Mato Grosso do Sul com Dados em Grid. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 147–156, mar. 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862020000100147&tlng=pt. Acesso em: 17 jun. 2023.

BAZZA, M.; KAY, M. **Irrigation Advisory Services**. Tunisia: FAO, 2002

BORGES, L. de C; HERNANDEZ, F. B. T.; FAUVEL, J. M. P. BALANÇO HÍDRICO COMO FERRAMENTA PARA O PLANEJAMENTO DA IRRIGAÇÃO EM CASSILÂNDIA - MS. INOVAGRI International Meeting. 2021. *In*: Inovagri International Meeting, 7., 2021, Fortaleza. **Anais eletrônicos..** Fortaleza: INOVAGRI, 2019. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/inovagri_2021_borges_b_hidrico_cassilandia.pdf. Acesso em: 24 maio 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **A irrigação no Brasil: Situações e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008. 132 p.

CARVALHO, J. R. P. de; VIEIRA, S. R. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas - uma proposta**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 21 p.

CARVALHO, L. G. D.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UMA ABORDAGEM ATUAL DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, 6 jul. 2011. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/12760>. Acesso em: 18 jun. 2023.

COELHO FILHO, M. A.; BASSOI, L. H.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. de C. **Relação solo-planta-atmosfera**. In: SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. cap. 1, p. 27-90.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, v. 8, n. 7, p. 1991–2007, 7 jul. 2015. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/8/1991/2015/>. Acesso em: 19 jun. 2023.

D'ANGIOLELLA, G. L. B.; VASCONCELLOS, V. L. D.; RODRIGUEZ, F. A. BALANÇO HÍDRICO CLIMÁTICO DO MATO GROSSO E MATO GROSSO DO SUL. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. 2007. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15., 2007, Aracaju. **Anais..** Aracaju: CBA, 2007.

DOLMAN, A. J.; DE JEU, R. A. M. Evaporation in focus. **Nature Geosci**, Reino Unido, v. 3, p. 296-297, 2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo849>. Acesso em: 12 jan. 2022.

DOURADO NETO, D. **Análise territorial para o desenvolvimento da irrigação no Brasil**. Campinas: FIIB, 2017. Disponível em: <https://irrigacao.blogspot.com/2019/08/mais-opportunidades-com-um-novo-semester.html>. Acesso: 24 maio 2020.

ENGLISH, M. Irrigation advisory services for optimum use of limited water. In: **18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)**. FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 2002.

FAO. **AQUASTAT**. Rome: FAO, 2020.

FAO. **Climate change, agriculture and food security**. Rome: FAO, 2016. 173 p.

FARINASSI, L. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; AMENDOLA, E. C. PERDA E CORREÇÃO DE DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA. INOVAGRI International Meeting. 2017. In: Inovagri International Meeting, 4., 2017, Fortaleza. **Anais eletrônicos..** Fortaleza: INOVAGRI, 2017. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/perda_e_correcao.pdf. Acesso em: 24 maio 2021.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. déficit irrigation for reducing agricultural water use. Special issue on “Integrated approaches to sustain and improve plant production under drought stress”. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 58, p. 147-159, 2007.

FLUMIGNAN, D. L.; FIETZ, C. R.; COMUNELLO, E. **O Clima na Região do Bolsão de Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 46 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1007480/o-clima-na-regiao-do-bolsao-de-mato-grosso-do-sul>. Acesso em: 4 jan. 2022.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher, 1988.

GARCIA, R. D.; SHIBUSAWA, H. Using Maximum Likelihood Estimation to Estimate Kriging Model Parameters. **Journal of Geography**, v. 115, n. 2, p. 87-95, 2006.

GOKMEN, M.; VEKERDY, Z.; BATUKLI, H. Evapotranspiration estimation using remote sensing and kriging techniques: A case study in the Konya Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 817-828, 2018.

GOKMEN, M.; VEKERDY, Z.; LUBCZYNSKI, M. W.; TIMMERMANS, J.; BATELAAN, O.; VERHOEF, W. Assessing groundwater storage changes using remote sensing-based evapotranspiration and precipitation at a large semiarid basin scale. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 6, p. 1733–1753, 2013.

HARRIS, C. R. et al. Array Programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 17 set. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2>. Acesso em: 19 jun. 2023.

HERNANDEZ, F. B. T. **No Pod Irrigar a importância da agricultura irrigada e a segurança hídrica proporcionada pelos sistemas de irrigação**. Ilha Solteira, Blog da Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP. Disponível em: <https://irrigacao.blogspot.com/2020/02/no-pod-irrigar-importancia-da.html>. Acesso em 24 maio 2020.

HODAM, S.; SARKAR, S.; MARAK, A. G. R.; BANDYOPADHYAY, A.; BHADRA, A. Spatial Interpolation of Reference Evapotranspiration in India: Comparison of IDW and Kriging Methods. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 98, n. 4, p. 511–524, dez. 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40030-017-0241-z>. Acesso em: 17 jun. 2023.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4160265/>. Acesso em: 19 jun. 2023.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos**. [S.l.]. INMET, 2023. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 19 jun. 2023.

KEBAILI BARGAOUI, Z.; CHEBBI, A. Comparison of Two Kriging Interpolation Methods Applied to Spatiotemporal Rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 365, n. 1–2, p. 56–73, fev. 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169408005726>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MARDIKIS, M. G.; KALIVAS, D. P.; KOLLIAS, V. J. Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration—An Application in Greece. **Water Resources Management**, v. 19, n. 3, p. 251–278, jun. 2005. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11269-005-3179-2>. Acesso em: 19 jun. 2023.

MCKINNEY, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. Em: 2010, Austin, Texas. [..]. Austin, Texas: 2010. p. 56–61.

NERY, J. T., SILVA, E. S., CARFAN, A. C. **Distribuição da Precipitação Pluvial no Estado de São Paulo**. Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica. 2004. In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 6., 2004, Aracaju. **Anais eletrônicos...** Aracaju: Editora da UFS, 2004. Disponível em: <https://www.ourinhos.unesp.br/Home/Pesquisa/GruposdeEstudo/Clima/Simposios/084.pdf>. Acesso em: 22 jan 2022.

NOUSHADI, M. R.; REZA, S. A. **APPLICATION OF GEOSTATISTICS FOR POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION**. 2005.

NUNES, M. F.; HERNANDEZ; F. B. T.; OLIVEIRA, D. A. de; BISPO, R. de C.; ARAÚJO, V. R. ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NO ANO DE 2018 NO NOROESTE PAULISTA. INOVAGRI International Meeting. 2019. In: Inovagri International Meeting, 5., 2019, Fortaleza. **Anais eletrônicos..** Fortaleza: INOVAGRI, 2019. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/fiorentino_precipitacao_completo.pdf. Acesso em: 24 maio 2021.

OLIVEIRA, A. S. de; KUHN, D.; SILVA. G. P. **A irrigação e a relação solo-planta-atmosfera**. LK editora, 2006, 88p.

OLIVEIRA, D. A. de .; HERNANDEZ, F. B. T. .; BISPO, R. de C.; TEIXEIRA, A. H. de C. DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA. **IRRIGA**, v. 26, n. 3, p. 584–604, 2021. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4453>. Acesso em: 17 jun. 2023.

OLIVEIRA, D. A. de; HERNANDEZ, F. B. T. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL NO NOROESTE PAULISTA. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 44, p. 122–139, 2022.

OLIVEIRA, D. A. de; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. de C.; **BALANÇO HÍDRICO COMO FERRAMENTA PARA O PLANEJAMENTO DA IRRIGAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA**. INOVAGRI International Meeting. 2020. *In*: Inovagri International Meeting, 6., 2020, Fortaleza. **Anais eletrônicos..** Fortaleza: INOVAGRI, 2020. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/tc1290103.pdf>. Acesso em: 24 maio 2021.

PARMEGIANI, A. L. V. **IDENTIFICAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS ÁREAS IRRIGADAS POR PIVÔ CENTRAL NO BOLSÃO SUL-MATO-GROSSENSE EXPANDIDO E SEU IMPACTO SOCIOECONÔMICO**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2022.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [s.l.] QGIS Association, 2023.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017. 327 p.

SAEED SHAH, S. M.; EL-MORSHEDY, M.; MANSOOR, W. Spatial-Temporal Interpolation of Reference Evapotranspiration for Pakistan. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2022, p. 1–18, 28 abr. 2022. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2022/5488725/>. Acesso em: 17 jun. 2023.

SILVA JUNIOR, J. F. **Evapotranspiração de Referência como Base para o Manejo Sustentável da Irrigação no Noroeste Paulista**. 2017. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2017.

SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F.; REIS, L. S.; TEIXEIRA, A. H. de C. **STABLISHMENT OF CRITICAL MONTHS TO IRRIGATED AGRICULTURE FROM A WATER BALANCE STUDY**. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 12, n. 2, p. 122-131, 2018. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/657>. Acesso em: 1 set. 2021.

SILVA, D.; MEZA, F. J.; VARAS, E. Estimating Reference Evapotranspiration (ET_o) Using Numerical Weather Forecast Data in Central Chile. **Journal of Hydrology**, v. 382, n. 1–4, p. 64–71, mar. 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409007963>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L.; ENTRY, J. A. Irrigation: An historical perspective. *In*: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. Nova York: Marcel Dekker, 2002. p.745-749.

STEIN, M. L. **Interpolation of Spatial Data**. New York, NY: Springer New York, 1999. 249 p.

TANAKA, N.; KUME, T.; YOSHIFUJI, N.; TANAKA, K.; TAKIZAWA, H.; SHIRAKI, K.; TANTASIRIN, C.; TANGTHAM, N.; SUZUKI, M. A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Holanda, v. 5, n. 148, p. 807-819, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192308000361>. Acesso em: 13 jan. 2022.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. 32 p.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas, SP: Unicamp/FEAGRI, 2017. 215 p.

THE PANDAS DEVELOPMENT TEAM. **pandas-dev/pandas: Pandas 2.0.2**. Zenodo, 28 maio 2023. Disponível em: <https://zenodo.org/record/7979740>. Acesso em: 19 jun. 2023.

TITO, T. M.; DELGADO, R. C.; DE CARVALHO, D. C.; TEODORO, P. E.; ALMEIDA, C. T. de; SILVA JUNIOR, C. A. de; SANTOS, E. B. dos; SILVA JÚNIOR, L. A. S. da Assessment of Evapotranspiration Estimates Based on Surface and Satellite Data and Its Relationship with El Niño–Southern Oscillation in the Rio de Janeiro State. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 7, p. 449, jul. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10661-020-08421-z>. Acesso em: 18 jun. 2023.

UNESP. **Canal CLIMA**. Ilha Solteira. UNESP, 2023. Disponível em: <https://clima.feis.unesp.br>. Acesso em: 19 jun. 2023.

UNESP. **Estatística de acesso ao Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira**. In: Canal CLIMA. 2019. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/estatistica.php>. Acesso em: 24 maio 2021.

UNESP. **FAQS – Perguntas ou Dúvidas mais Frequentes**. In: Canal CLIMA. 2020. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/faqs.php>. Acesso em: 24 maio 2021.

UNESP. **Levantamento Pluviométrico na região noroeste paulista é irregular**. Ilha Solteira, 2016b. Disponível em: http://www.agr.feis.unesp.br/jornal_dia_a_dia_29_marco_2016.php. Acesso em: 20 de jun. de 2016.

VILANOVA, M. R. N.; SIMOES, S. J. C.; TRANNIN, I. C. D. B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais, Brasil. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 2, p. 179–194, 31 ago. 2012. Disponível em: http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/763/pdf_679. Acesso em: 17 jun. 2023.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.10.1: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2 mar. 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41592-019-0686-2>. Acesso em: 19 jun. 2023.

VOURLITIS, G. L.; SOUZA NOGUEIRA, J. de; ALMEIDA LOBO, F. de; PINTO, O. B. Variations in Evapotranspiration and Climate for an Amazonian Semi-Deciduous Forest over Seasonal, Annual, and El Niño Cycles. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 2, p. 217–230, fev. 2015. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00484-014-0837-1>. Acesso em: 18 jun. 2023.

WASKOM, M. seaborn: statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 60, p. 3021, 6 abr. 2021. Disponível em: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.03021>. Acesso em: 19 jun. 2023.

WASSOLOWSKI, C. R. **EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL POR SENSORIAMENTO REMOTO**. 2020. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, 2020.

ZHANG, H.; WANG, L. Analysis of the Variation in Potential Evapotranspiration and Surface Wet Conditions in the Hancang River Basin, China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 8607, 21 abr. 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88162-2>. Acesso em: 17 jun. 2023.

ZHANG, J.; DING, Z.; YUAN, W.; ZUO, Q. Research on the Relationship between Rainfall and Reference Crop Evapotranspiration with Multi-Time Scales. **Paddy and Water Environment**, v. 11, n. 1–4, p. 473–482, jan. 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10333-012-0338-y>. Acesso em: 18 jun. 2023.