Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS E CONTRIBUIÇÕES DAS VARIÁVEIS E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Principal components analysis and contributions of variables and weather stations in determining reference evapotranspiration in the Stade of Rio Grande do Sul

Análisis de principales componentes y contribuciones de las variables y estaciones meteorológicas en la determinación de la evapotranspiración de referencia en el Estado de Rio Grande do Sul

Giane Lavarda Melo
Instituto Federal Catarinense – *Campus* Camboriú (IFC-CAM)
giane.melo@ifc.edu.br

Mirta Teresinha Petry
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
mirta.petry@gmail.com

Juliano Dalcin Martins
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
julianodalcinmartins@gmail.com

Bruna de Villa
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
bruna.devilla5000@gmail.com

Resumo: A evapotranspiração de referência (ET_o) é fundamental na hidrologia e meteorologia, sendo amplamente utilizada na previsão de alterações climáticas e no uso da terra. Este estudo utilizou a análise de componentes principais (PCA) para determinar as contribuições das variáveis e estações meteorológicas na estimativa da ET_o, utilizando com dados diários de treze estações meteorológicas no Estado do Rio Grande do Sul de 1990 a 2022, segregados por períodos sazonais. As três primeiras componentes principais explicaram 85,6% da variabilidade total da ET_o na primavera, 87,9% no verão,

81,5% no outono e 80,4% no inverno. T_{max}, RH_{min} e R_s foram as variáveis meteorológicas mais significativas na primavera, verão e outono, enquanto u_2 e R_s se destacaram no inverno. As estações com maiores contribuições foram: Uruguaiana, Bom Jesus, Torres, São Borja e SLG (primavera e verão); Bom Jesus, Encruzilhada - Canguçu, São Borja e SLG (outono); e Camaquã, Passo Fundo, Porto Alegre e Torres (inverno). Esses resultados fornecem informações precisas sobre as variáveis e estações meteorológicas que influenciam a ET_o, evidenciando a variabilidade climática em escalas sazonais e contribuindo para uma representação adequada da demanda hídrica regional.

Palavras-chave: Estatística multivariada. Série climatológica. Variância. Sazonalidade.

Abstract: Reference evapotranspiration (ET_o) is fundamental in hydrology and meteorology, and is widely used in climate change prediction and land use. This study used principal component analysis (PCA) to determine the contributions of meteorological variables and stations in estimating ET_o, employing daily data from thirteen meteorological stations in the State of Rio Grande do Sul from 1990 to 2022, categorized by seasonal periods. The first three principal components explained 85.6% of the total ETo variability in spring, 87.9% in summer, 81.5% in autumn and 80.4% in winter. T_{max}, RH_{min} and R_s were the most significant meteorological variables in spring, summer and autumn, while u_2 and R_s stood out in winter. The stations with the largest contributions were: Uruguaiana, Bom Jesus, Torres, São Borja and SLG in spring and summer; Bom Jesus, Encruzilhada - Canguçu, São Borja and SLG (autumn); and Camaquã, Passo Fundo, Porto Alegre and Torres in winter. These results provide accurate information on the meteorological variables and seasons that influence ET_o, highlighting climate variability on seasonal scales and contributing to an adequate representation of regional water demand.

Keywords: Multivariate statistics. Climatological series. Variance. Seasonality.

Resumen: La evapotranspiración de referencia (ET_o) es fundamental en hidrología y meteorología, y se utiliza en la predicción del cambio climático y el uso del suelo. Este estudio utilozó el análisis de componentes principales (PCA) para determinar las contribuciones de las variables meteorológicas y las estaciones en la estimación de ET_o, empleando datos diarios de trece estaciones meteorológicas del Estado de Rio Grande do Sul entre 1990 y 2022, categorizados por períodos estacionales. Los primeros tres componentes principales explicaron el 85,6% de la variabilidad total de la ET_o en primavera, el 87,9% en verano, el 81,5% en otoño y el 80,4% en invierno. T_{max}, HR_{min} y R_s fueron las variables meteorológicas más significativas en primavera, verano y otoño, mientras que u_2 y R_s destacaron en invierno. Las estaciones con mayores contribuciones fueron: Uruguaiana, Bom Jesus, Torres, São Borja y SLG (primavera y verano); Bom Jesus, Encruzilhada - Canguçu, São Borja y SLG (otoño); y Camaquã, Passo Fundo, Porto Alegre y Torres (invierno). Estos resultados proporcionan información precisa sobre las variables meteorológicas y las estaciones que influyen en la ET_o, destacando la variabilidad climática en escala estacional y contribuyendo a una representación adecuada de la demanda regional de agua.

Palabras clave: Estadística multivariada. Serie climatológica. Diferencia. Estacionalidad.

Submetido em: 08/01/2025
Aceito para publicação em: 27/09/2025
Publicado em: 20/10/2025

1. INTRODUÇÃO

A taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência (grama) é chamada de evapotranspiração de referência e é denotada como ET_o (ALLEN *et al*., 1998). Importante no ciclo hidrológico, a ET_o afeta a disponibilidade de água, particularmente para o planeamento da irrigação agrícola e os balanços hídricos (FENG; VICO; PORPORATO, 2012). A ET_o é um fator fundamental para calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c), portanto sua variação pode afetar a precipitação, bem como os regimes hidrológicos, tendo um impacto direto na produção agrícola, alterando o balanço hídrico agroecológico e por consequência (DOS SANTOS *et al*., 2020; JIN *et al*., 2017; LIU; CHEN; PAN, 2019; VOURTILIS *et al*., 2002), provocando mudanças significativas no clima regional e global. Além disso, de acordo com Silva *et al*. (2018), as mudanças em algumas variáveis meteorológicas no contexto das mudanças climáticas, como temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, impactam diretamente na ET_o.

Estudos avaliativos de séries de dados meteorológicos são frequentes e geralmente abrangem técnicas de estatísticas descritivas. De acordo com Terra (2021) e Mishra; Singh (2010), análises mais complexas são necessárias para melhor compreensão das condições climáticas em escala local devido, principalmente a heterogeneidade na variabilidade hidrometeorológica. Essas análises são imprescindíveis em locais onde a economia está diretamente relacionada à agricultura.

O Estado do Rio Grande do Sul apresenta importante representação na produção agrícola do Brasil, contribuindo com aproximadamente 12,4% da produção nacional (CONAB, 2024), e sua base agrícola se deve principalmente à sua posição geográfica e condições climáticas, que apresentam grande variação sazonal, característica de climas temperados do tipo subtropical úmido (ALVARES *et al.*, 2013; MARTINS *et al*., 2021; MELO, 2006). Entretanto, embora o Rio Grande do Sul apresente caracterização climática bem definida, eventos de variabilidade climática em escalas sazonais, interanuais e decadais, como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) MATZENAUER; RADIN; MALUF (2018), e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (STRECK *et al*., 2009), são frequentes, além de estar suscetível às mudanças do sistema climático global, de acordo com o 6º Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 2023 (ALLAN *et al*., 2023; IPCC, 2021).

Devido à grande heterogeneidade na variabilidade hidrometeorológica espaço-temporal das variáveis climatológicas, os autores Espinosa, Portela e Rodrigues (2019) e Terra (2021), recomendam o desenvolvimento de técnicas de redução, classificação e filtragem das informações, como por exemplo a análise de componente principal (PCA), a fim de auxiliar a divulgar regularidades de alto nível que permitem a generalização sobre áreas com base em um parâmetro espacial e temporalmente variável. Diversos estudos na área de hidrologia e climatologia (ALMEIDA *et al*., 2024; ANDRADE *et al*., 2003; DE SOUZA TEIXEIRA *et al*., 2023; RAZIEI, 2017; TERRA, 2021), aplicaram a PCA em variáveis meteorológicas, porém há carência de estudos específicos em ET_o.

A PCA permite obter um conjunto de variáveis não correlacionadas, a partir de um conjunto de variáveis correlacionadas (HONGYU, 2018). É um método fatorial que se baseia na redução do número de variáveis a partir de novas variáveis sintéticas obtidas pela combinação linear dos dados originais, porém, essa redução só será possível se estas variáveis forem dependentes e correlacionadas entre si. Já, a importância de um componente principal (PC) é avaliada mediante sua contribuição, ou seja, pela proporção de variância total explicada pelo componente (FERREIRA, 2015), considerando perda mínima de informações dos dados originais (LOPES; DANTAS; FERREIRA, 2019).

Sendo assim, a partir da análise de dados meteorológicos diários, entre os anos 1990 e 2022, nos períodos sazonais do Rio Grande do Sul, definiu-se como objetivo deste trabalho a determinação das contribuições das variáveis e estações meteorológicas na estimativa da ET_o, por meio da utilização de análise de componentes principais (PCA).

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo e detalhamento das estações metodológicas

O trabalho contemplou o estado do Rio Grande do Sul, parte mais meridional do Brasil, entre os paralelos 27°05’ e 33°45’ Sul e as longitudes de 49°43’e 57°39’ Oeste e que ocupa uma área territorial de 284.184km^2, com altitudes entre o nível do mar (Costa Litorânea Oceano Atlântico), e a pouco mais de 1.200 m (Serra do Nordeste). Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Kottek *et al*., 1996), o Rio Grande do Sul pertence à zona

fundamental temperada “C”, do tipo úmido “Cf”, com as variedades subtropicais “Cfa” e temperada “Cfb”, com características de verão ameno, tendo chuvas uniformemente distribuídas, sem estação seca definida e com a temperatura média do mês mais quente superior a 22ºC (ALVARES *et al*., 2013).

As descrições e localizações das estações meteorológicas convencionais e automáticas, são apresentadas na Tabela 1 e Figura 1.

Tabela 1 – Descrição das estações meteorológicas.

Município do RS	Estação meteorológica	Latitude (graus decimais)	Longitude (graus decimais)	Altitude (m)
Bagé	Convencional	-31,3	-54,1	245,6
	Automática	-31,3	-54,0	226,2
Bento Gonçalves	Convencional	-29,2	-51,5	624,1
	Automática	-29,2	-51,5	623,3
Bom Jesus	Convencional	-28,6	-50,4	1047,5
Camaquã	Convencional	-30,8	-51,8	92,3
	Automática	-30,8	-51,8	92,3
Cruz Alta	Convencional	-28,6	-53,6	475,5
	Automática	-28,6	-53,7	426,7
Encruzilha do Sul - Canguçu	Convencional	-30,5	-52,5	427,8
	Automática	-31,4	-52,7	446,8
Passo Fundo	Convencional	-28,2	-52,4	684,0
	Automática	-28,2	-52,4	680,7
Porto Alegre	Convencional	-30,1	-51,2	41,2
	Automática	-30,1	-51,2	41,2
Santa Maria	Convencional	-29,7	-53,7	103,1
	Automática	-29,7	-53,7	103,1
São Borja	Convencional	-28,4	-56,0	99,0
	Automática	-28,6	-56,0	81,1
São Luiz Gonzaga (SLG)	Convencional	-28,4	-54,9	246,0
	Automática	-28,4	-54,9	246,0
Torres	Convencional	-29,4	-49,7	4,6
	Automática	-29,4	-49,7	8,4
Uruguaiana	Convencional	-29,8	-57,1	74,4
	Automática	-29,8	-57,1	74,3

Fonte: Elaborado pelos autores.

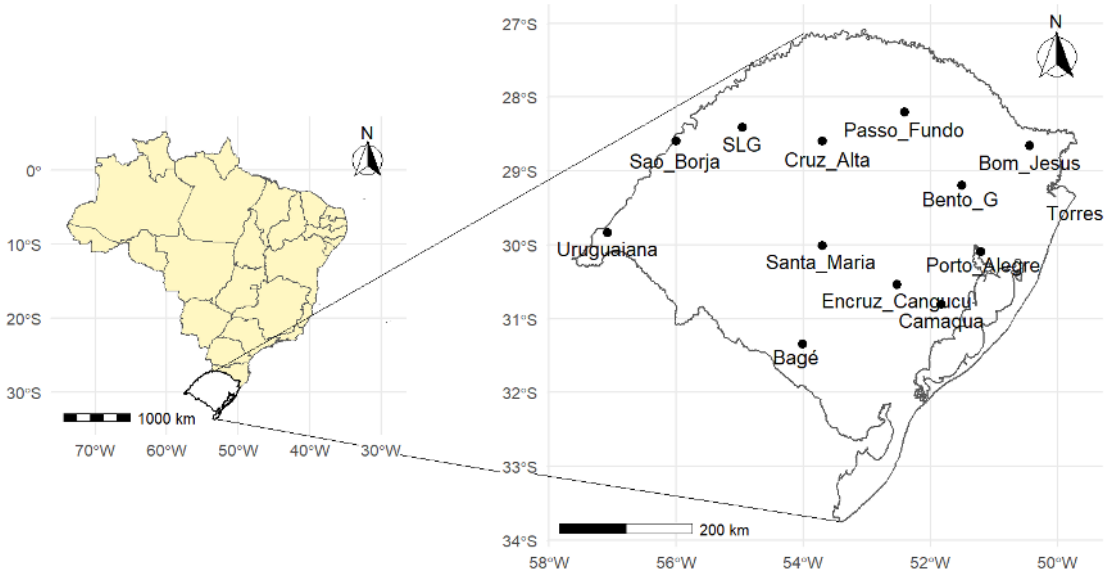
2.2. Dados meteorológicos

Utilizou-se as séries históricas (janeiro de 1990 até dezembro de 2022) de dados

diários das variáveis meteorológicas temperatura máxima do ar, em °C, (T_{max}); temperatura mínima do ar , em °C, (T_{min}); umidade relativa máxima do ar , em %, (RH_{max}); umidade relativa mínima do ar , em %, (RH_{min}); radiação solar global, em MJ m² dia^{-1}, (R_s); e vento à 10 m, em m s^{-1}, convertidos para vento à 2 m (Allen *et al*., 1998), (u_2). A ausência de dados em período curto (um a dois dias), foi preenchida com médias entre os valores de dois dias anteriores e posteriores. Para o preenchimento de falhas com períodos superiores a dois dias, para variável meteorológica R_S, foi utilizada a Equação de Hargreaves-Samani (HS) (HARGREAVES & SAMANI, 1985) recomendada por Allen *et al*. (1998), Paredes e Pereira (2019) e Paredes *et al*. (2020).

Após verificação da completude, presença de erros e consistência dos dados, períodos sazonais foram delimitados, sendo que a primavera representou ao período sazonal de 22/09 até 21/12, o verão representou ao período sazonal de 22/12 até 19/03, o outono representou ao período sazonal de 20/03 até 20/06 e inverno representou ao período sazonal de 21/06 até 21/09.

Figura 1. Localização e descrição das estações meteorológicas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

A ET_o foi estimada usando a Equação de Penman-Monteith, segundo as recomendações da Food and Agriculture Organization (FAO) (ALLEN *et al*., 1998) (Equação 1):

$$ET_o = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34U_2)} \quad (1)$$

onde: ET_o é a evapotranspiração de referência da grama (mm dia $^{-1}$); R_n é a radiação líquida na superfície da cultura (MJ m $^{-2}$ dia $^{-1}$);G é a densidade do fluxo de calor do solo (MJ m $^{-2}$ dia $^{-1}$); T é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura (°C); U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s $^{-1}$); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa); $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor de saturação (kPa), Δ é o declive da curva de pressão de vapor (kPa ° C $^{-1}$) e γ é a constante psicométrica (kPa ° C $^{-1}$).

Os valores médios sazonais (primavera, verão, outono e inverno), de ET_o foram calculados a partir dos valores diários das variáveis meteorológicas, entre o período de janeiro de 1990 até dezembro de 2022, para cada estação meteorológica.

2.4. Estatística descritiva

Inicialmente, a estatística descritiva envolveu a distribuição de frequências, medidas de tendência central, medidas de dispersão e as separatrizes (ou quartis). Os quartis são valores que dividem um conjunto de dados ordenados em partes iguais, como a mediana (duas partes) e os quartis (quatro partes). As medidas de tendência central mostram o valor representativo em torno do qual os dados tendem a agrupar-se, com maior frequência. As medidas de variabilidade ou de dispersão mostram o grau de afastamento dos valores observados em relação àquele valor representativo.

Nesse estudo, a análise descritiva estatística foi realizada paralelamente à estatística multivariada, com o objetivo de caracterizar os dados e identificar possíveis discrepâncias. Calculou-se médias, máximas, mínimas, primeiros quartis (1Q), medianas (2Q), terceiros quartis (3Q) e frequência dos dados, das médias sazonais de cada variável meteorológica determinante da ET_o no RS. De acordo com Brum (2006), a estatística descritiva

auxilia a compreensão da dispersão e a simetria dos dados, sendo particularmente úteis para segmentar o conjunto de valores e analisar proporções específicas.

2.5. Análise de componentes principais (PCA) e contribuições

A estatística multivariada de análise de componentes principais (Principal Components Analysis – PCA), baseia-se na transformação de um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão, os componentes principais (PCs), que são combinações lineares das variáveis originais e que são capazes de identificar quais variáveis e estações meteorológicas melhor explicam a diferença entre os períodos sazonais do estudo. A normalização dos dados (média igual a zero e desvio padrão igual a um) foi realizada para evitar erros das escalas e unidades das variáveis e estações meteorológicas determinantes da ET_o. A redução do número de variáveis em componentes principais (PC), maximizam o poder explicativo do conjunto de todas as variáveis (WILKS, 2006; TERRA, 2021) e, considera a variação total presente no conjunto das variáveis iniciais, sendo que o primeiro componente principal (PC1) explica o máximo possível da variância dos dados iniciais, enquanto o segundo componente principal (PC2) explica o máximo possível da variância ainda não explicada e assim sucessivamente, até o último componente principal (PC*m*) que contribui com a menor parcela de explicação da variância total dos dados iniciais (IKUDAYISI; ADEYEMO, 2016).

A partir do cosseno ao quadrado (*cos*²), determinou-se a contribuição da variável e estação meteorológica, em porcentagem (%) em cada PC, (Equação 2). O *cos*² do ângulo formado entre a origem, a variável e a sua projeção no PC, de acordo com Abdi; Willians (2010), mostra o quão (em proporção) uma determinada variável é explicada pelo PC.

$$contrib_{\ PC} = \frac{cos^2_{var\ PC}}{\sum_{vars} cos^2_{PC}} * 100 \qquad (2)$$

Onde: $contrib_{\ PC}$ é a contribuição da variável meteorológica e/ou estação meteorológica na PC; $cos^2_{var\ PC}$ é a determinação do cos^2 do ângulo formado entre a origem, a variável e a sua projeção na PC; e $\sum_{vars} cos^2_{PC}$ é o somatório dos cos^2 de todas as variáveis na PC.

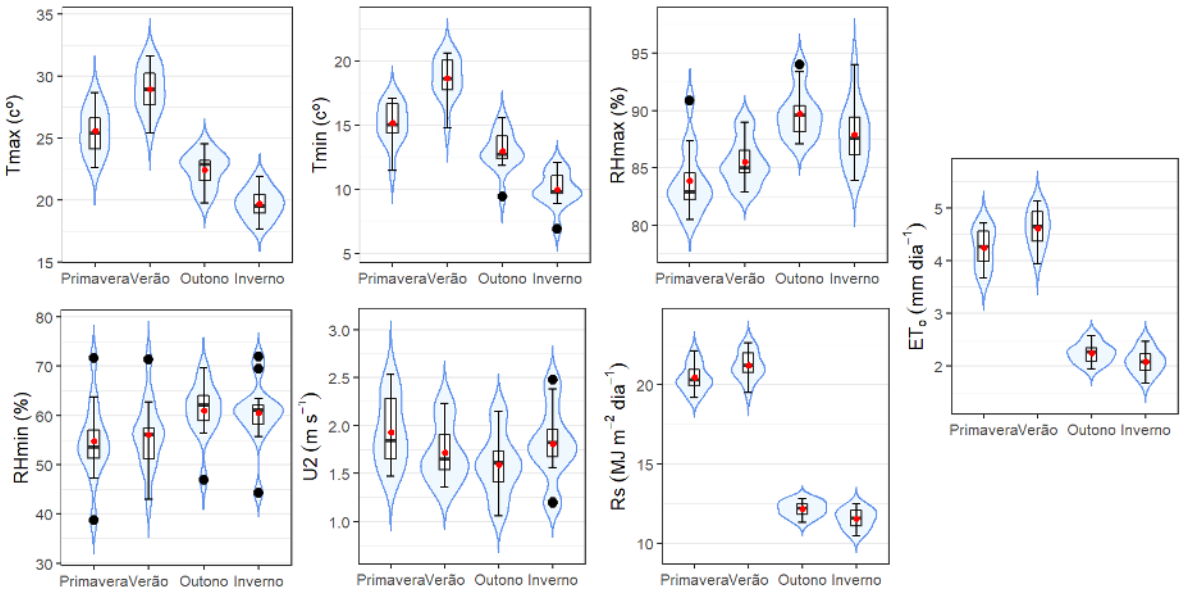
A tabulação dos dados foi realizada por meio do Microsoft® Excel® 2019 e todos os procedimentos descritos foram processados no software RStudio versão 4.0.5 (R CORE TEAM, 2019), com uso dos pacotes factoextra, FactoMiner, geobr, gstat, metR, psych, raster, sf, SumarizedExperiment e tidyverse.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Estatística descritiva

Uma vez que não sofre influência de outliers, uma estatística descritiva mais robusta para avaliar a variabilidade intersazonal é apresentada pelas caixas interquartílicas dos gráficos boxplots (Figura 2). No RS, durante 1990 a 2022, verificaram-se distintas segregações entre os períodos sazonais quentes e frios, nas variáveis ET_o, T_{max} e R_s, indicando menor variabilidade (menor amplitude entre o terceiro (3Q) e primeiro quartil (1Q)), nos períodos mais frios, ou seja, as medições dessas variáveis mantiveram-se com pouca divergência no outono e no inverno.

Figura 2 – Boxplots dos quartis (Q1, Q2 e Q3) da ET_o e variáveis meteorológicas determinantes nos períodos sazonais primavera, verão, outono e inverno, entre os anos 1990 e 2022 no RS.



Notas: Pontos pretos representam outliers, pontos vermelhos representam a média e violinos azuis representam a frequência dos dados.

Fonte: Elaborado pelos autores.

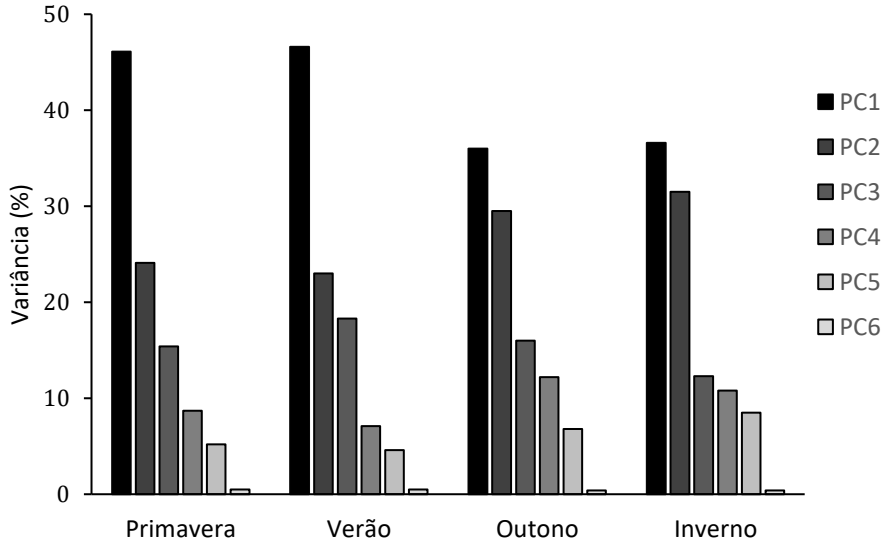
Verificou-se aumento na T_{min} e T_{max} na primavera, verão e inverno, e redução no outono, além de redução no u_2 e umidade relativa média, para todos os períodos sazonais quando comparando com Reisser Junior (2012), mesmo esse utilizando metodologias diferenciadas, com menos estações meteorológicas e anos analisados.

Nesse estudo, a presença de eventos climáticos de ordem anual e decadal, como El Niño (El Niño Oscilação Sul - ENOS fase quente), La Niña (El Niño Oscilação Sul - ENOS fase fria) e ODP (Oscilação Decadal do Pacífico), foram responsáveis pela apresentação dos outliers, considerando maior periodicidade de La Niña e ODP fase fria (NOAA, 2023).

3.2. Variabilidade dos componentes principais

A estratificação das variáveis meteorológicas por período sazonal foi necessária para analisar a relação com a ET_o, na série histórica 1990 a 2022. Dessa forma, na Figura 3 é apresentada a variância explicada dos componentes principais (PC), referente as variáveis meteorológicas determinantes da ET_o, nos diferentes períodos sazonais do Rio Grande do Sul, onde verifica-se que os três primeiros PCs de cada período sazonal representam as maiores variabilidades, com valores de 46,1%, 46,6%, 36% e 36,6%, para a primavera, verão, outono e inverno, respectivamente.

Figura 3 - Variância dos componentes principais (PC), referente as variáveis meteorológicas determinantes da ET_o, nos diferentes períodos sazonais do RS.



Fonte: Elaborado pelos autores.

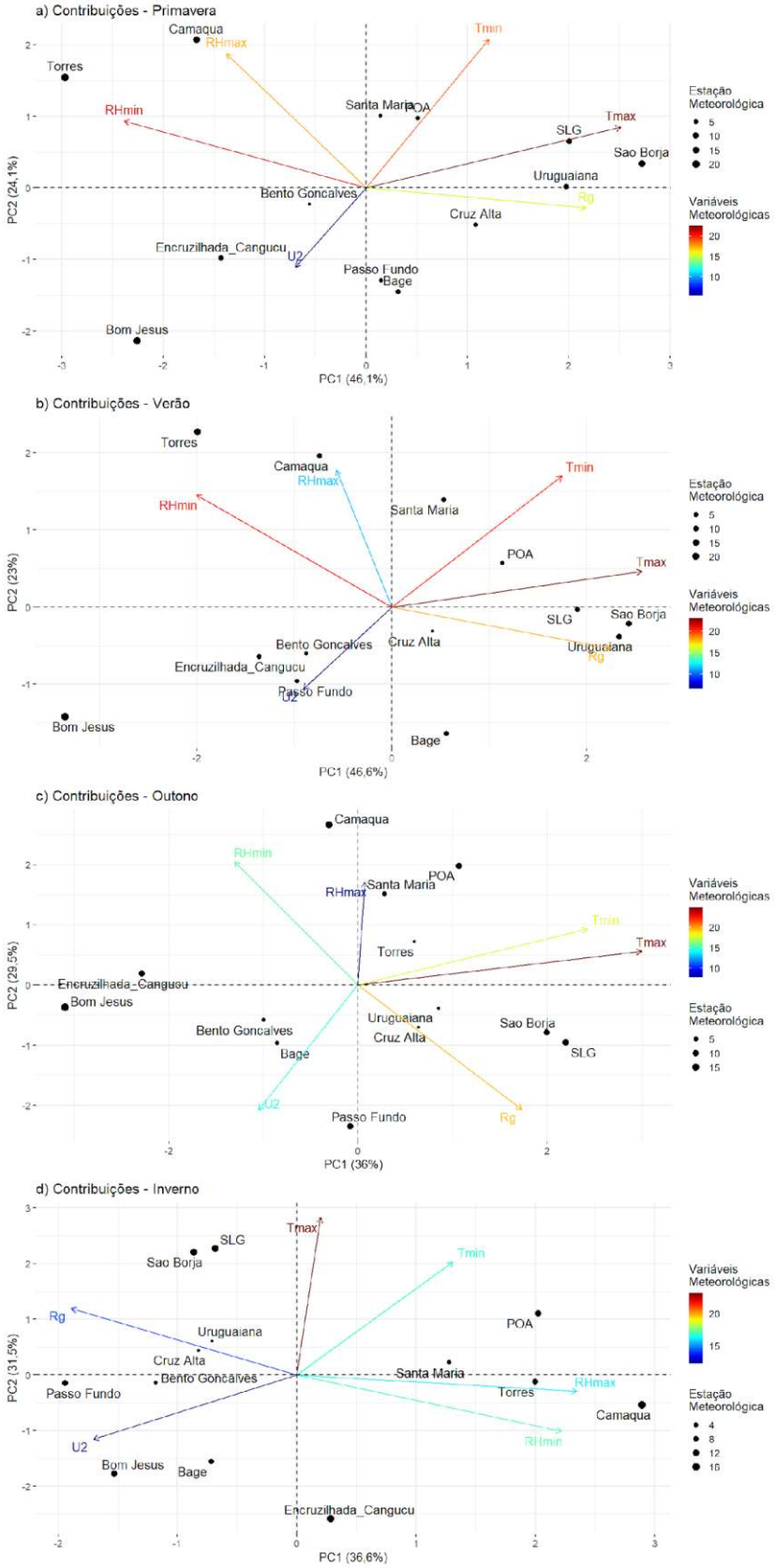
As variâncias acumuladas de PC1, PC2 e PC3, corresponderam a 85,6% da representatividade da variabilidade total da primavera, 87,9% do verão, 81,5% do outono e 80,4% do inverno. A porcentagem da variância acumulada é um critério empírico indicado por vários autores (ANDRADES *et al*., 2003; 2008; HONGYU *et al*., 2016; IKUDAYISI; ADEYEMO, 2016), na qual, considera-se mantidos os componentes que resultam em um significado, quando esses explicam a variabilidade total, em pelo menos 70% da porcentagem da variância acumulada. Em uma análise mensal dos elementos atmosféricos: temperatura, umidade relativa do ar, amplitude térmica e precipitação, no período compreendido entre os anos de 2008 e 2012, para Uberlândia, Minas Gerais, Prado *et al*. (2016), verificaram que apenas um PC conseguiu explicar 70,59% da variação total e se caracterizou por representar meses úmidos, chuvosos e com pouca variação de temperatura.

3.3. Contribuições das variáveis e estações meteorológicas

As variáveis e as estações meteorológicas contribuem distintamente para a determinação da ET_o em cada período sazonal. Quanto mais afastadas estão do centro do biplot, maiores são as contribuições das variáveis meteorológicas e/ou estações meteorológicas. Para cada período sazonal, o PC1 está representado pelo eixo das abscissas e o PC2 pelo eixo das ordenadas. Logo, as estações meteorológicas que estão no primeiro e quarto quadrantes são mais associadas ao PC1, ou seja, que apresentam coordenada positiva em relação ao eixo das abscissas, enquanto as estações meteorológicas localizadas no segundo e terceiro quadrantes são menos associadas ao PC1. Quanto mais próximas as estações meteorológicas estão dos vetores representando as variáveis meteorológicas, maior é a associação dessa variável com a estação meteorológica. Assim, as contribuições entre as variáveis meteorológicas e as estações meteorológicas, nos diferentes períodos sazonais do ano, por meio de análises biplot, são apresentadas na Figura 4.

A Tabela 2 explicita os valores de contribuição, apresentados na Figura 4. No período sazonal da primavera (Figura 4a), as variáveis meteorológicas que mais contribuíram para o PC1 foram a T_{max}, com dados provenientes das estações meteorológicas de São Borja e SLG; a RH_{min}, com dados provenientes da estação meteorológica de Torres; e a R_s com dados provenientes da estação meteorológica de Uruguaiana. No período sazonal do verão

Figura 4 - Contribuições entre variáveis meteorológicas determinantes da ET_o e as estações meteorológicas para os períodos sazonais do Rio Grande do Sul.



Fonte: Elaborado pelos autores.

(Figura 4b), as contribuições das variáveis meteorológicas e estação meteorológicas, seguiram o mesmo padrão do período sazonal da primavera, com apenas pequenas discrepâncias.

No período sazonal do outono (Figura 4c), as variáveis meteorológicas que mais contribuíram para o PC1 foram a T_{max}, T_{min} e R_s, com os dados provenientes das estações meteorológicas de São Borja e SLG, porém de forma não tão expressiva quanto nos períodos sazonais mais quentes. Verificou-se alta contribuição da estação meteorológica de Encruzilhada - Canguçu nesse período sazonal, porém com nenhuma variável meteorológica associada. Na Figura 4d, referente ao período sazonal do inverno, as variáveis meteorológicas que mais contribuíram para o PC1 foram RHmax, com dados provenientes das estações de Porto Alegre e Torres; RHmin com dados provenientes das estações de Camaquã e Torres; e u_2 e Rs com dados provenientes de Passo Fundo.

A partir desses resultados, verificou-se que nos períodos sazonais mais quentes, dentre as variáveis meteorológicas, a T_{max} e R_s estão mais correlacionadas com a ET_o, sendo essas, portanto, as mais responsivas e mais influentes em todo o território do RS, indicando que as maiores influências na ET_o são principalmente o resultado da entrada de energia e dos processos de aquecimento da superfície ao longo do tempo. A importância dos R_s na ET_o já foi relatada em diferentes condições climáticas ao redor do mundo (ANTONOPOULOS; ANTONOPOULOS, 2017; NOIA JÚNIOR *et al*., 2019; VALIPOUR *et al*., 2017), e no Brasil (JERSZURKI; SOUZA; SILVA, 2019; MONTEIRO *et al*., 2021). Também nos períodos sazonais mais quentes, a RH_{max} e RH_{min} apresentaram forte influência na ET_o, indicando que a quantidade de vapor d'água atua como moderador no processo ET_o, da mesma forma que Noia Júnior *et al*. (2019) e Monteiro *et al*. (2021), encontraram em seus estudos. Ruhoff *et al*. (2009) estudaram a ET_o por meio de análises multivariadas no Estado de São Paulo e concluíram que o processo é comandado principalmente por três componentes, que explicaram mais de 70% da variância dos dados: o PC1 é a radiação representada pela irradiância solar global incidente (R_s) juntamente com o saldo de radiação (R_n), que explicaram mais de 40% da variância do processo; o PC2 é processo de circulação atmosférica local, representado pelas variáveis de velocidade do vento e pressão atmosférica, que regulam o sistema de precipitação e as condições de umidade do ar e do solo, que explicaram mais de 22% da variância do processo; e o PC3 foram as condições da vegetação, que apresentam

modificações significativas com a alternância de estações secas e úmidas, explicando mais de 10% da variância do processo.

Tabela 2 – Contribuições em porcentagem (%) das variáveis e estações meteorológicas na determinação da ET_o, nos diferentes períodos sazonais do RS.

	Primavera			Verão			Outono			Inverno		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Variância explicada	46,1	24,1	15,4	46,6	23,0	18,3	36,0	29,5	16,0	36,6	31,5	12,3
						Variáveis meteorológicas						
T_{max}	30,7	6,7	0,1	33,2	2,2	0,2	43,5	1,8	1,1	0,2	50,1	0,1
T_{min}	7,1	40,2	10,6	15,4	29,5	0,2	28,5	5,2	11,7	9,2	25,7	29,0
RH_{max}	9,2	32,8	3,5	1,6	32,2	34,7	0,0	17,3	64,2	29,5	0,5	2,2
RH_{min}	27,7	8,1	0,0	20,3	21,6	1,7	8,2	24,8	21,8	26,3	6,4	0,1
u_2	2,4	11,4	82,3	4,2	11,6	56,5	5,3	25,6	1,0	15,6	8,4	64,8
R_s	22,9	0,7	3,5	25,3	2,9	6,8	14,5	25,3	0,1	19,2	8,9	3,8
						Estações meteorológicas						
Bagé	0,3	11,2	6,5	0,9	15,0	9,8	2,6	4,1	3,4	1,8	9,9	1,6
Bento Goncalves	0,9	0,3	7,5	2,1	2,0	7,3	3,5	1,5	10,3	4,9	0,1	4,1
Bom Jesus	14,2	24,3	27,3	30,9	11,2	21,6	34,1	0,6	2,5	8,2	12,9	34,1
Camaquã	7,8	22,8	6,5	1,5	21,4	0,1	0,3	31,0	5,2	29,2	1,2	12,7
Cruz Alta	3,2	1,4	0,1	0,5	0,5	0,0	1,4	2,1	2,8	2,4	0,8	1,1
Encruzilhada-Canguçu	5,7	5,1	3,8	5,1	2,3	14,0	18,5	0,2	0,1	0,3	27,3	16,2
Passo Fundo	0,1	8,9	14,5	2,6	5,2	14,6	0,0	24,0	4,2	13,2	0,1	10,1
Porto Alegre	0,7	5,0	7,4	3,5	1,8	17,3	4,1	17,0	1,8	14,3	5,0	1,5
Santa Maria	0,1	5,4	0,0	0,8	10,8	3,9	0,3	10,1	14,4	5,7	0,2	0,4
São Borja	20,6	0,6	2,5	16,3	0,2	8,3	14,1	2,7	6,9	2,6	19,9	2,0
SLG	11,2	2,3	0,0	10,0	0,0	0,1	17,1	4,0	0,2	1,7	21,1	5,3
Torres	24,5	12,7	22,0	10,9	28,7	1,7	1,3	2,3	40,4	13,9	0,1	10,7
Uruguaiana	10,9	0,0	1,9	14,9	0,8	1,3	2,6	0,6	7,9	1,8	1,5	0,2

Fonte: Elaborado pelos autores.

Verificou-se uma forte influência dos fatores climáticos altitude e maritimidade/continentalidade, na contribuição das estações meteorológicas durante os períodos sazonais mais quentes (Figura 4 e Tabela 2). Considerando a redução das taxas de ET_o, as regiões de maior altitude (Bom Jesus) e a região litorânea (Torres) do RS apresentaram as maiores contribuições, enquanto as maiores contribuições, considerando o aumento das taxas de ET_o, foram registradas nas áreas mais a oeste do Estado (Uruguaiana, São Borja e SLG). No período sazonal do verão, constatou-se uma ampliação da área com as maiores taxas

de ET_o em comparação ao período da primavera, o que se deve, principalmente, às temperaturas do ar mais elevadas nas regiões oeste e noroeste. A região de Bagé, conforme relatado por Cordeiro; Alves e Da Rocha (2020), é caracterizada pelos altos índices pluviométricos durante o período sazonal da primavera, o que justifica a observação de menores taxas de ET_o nesse período.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, a análise de componentes principais (PCA) e contribuições das variáveis e estações meteorológicas, nos diferentes períodos sazonais, foram suficientes para analisar a variabilidade da ET_o no Rio Grande do Sul. De acordo com a PCA, verificou-se que os três primeiros componentes principais, referente às variáveis meteorológicas, foram capazes de explicar 85,6% da representatividade da variabilidade total da primavera, 87,9% do verão, 81,5% do outono e 80,4% do inverno.

As variáveis meteorológicas T_{max}, RH_{min} e R_s apresentaram maiores contribuições para a determinação da ET_o nos períodos sazonais da primavera, verão e outono e o u_2 e R_s no inverno. As estações meteorológicas com maiores contribuições foram: Uruguaiana, Bom Jesus, Torres, São Borja e SLG (primavera e verão); Bom Jesus, Encruzilhada - Canguçu, São Borja e SLG (outono) e, Camaquã, Passo Fundo, Porto Alegre e Torres (inverno).

Dessa forma, informações acuradas das principais variáveis e estações meteorológicas na determinação da ET_o foram traçadas, indicando particularidades regionais, mostrando variabilidade climática em escalas sazonais, para fins de adequada representação da demanda hídrica regional.

REFERÊNCIAS

ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. Wiley Interdisciplinary **Reviews: Computational Statistics,** v.2, n. 4, p. 433–459, 2010.

ALLAN, R. P. *et al*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press, p. 3-32, 2023.

ALLEN, R. G. *et al*. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALMEIDA, T. A. B. *et al*. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: Impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 53, p. 101784, 2024.

ALVARES, C. A. *et al*. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, E. D.; SILVEIRA, S. S.; AZEVEDO, B. D. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 8(1), 39-44, 2003.

ANDRADE, E. M. *et al*. Land use effects in groundwater composition of an alluvial aquifer (Trussu River, Brazil) by multivariate techniques. **Environmental research**, v. 106, n. 2, p. 170-177, 2008.

ANTONOPOULOS, V. Z.; ANTONOPOULOS, A. V. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 132, p. 86-96, 2017.

BRUM, A. L. **Análise de complexidade computacional de problemas de estatitística descritiva com entradas intervalares**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim safras e grãos 2024. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos. Acesso em: 15 out. 2024.

CORDEIRO, A. P. A.; ALVES, R. de C. M.; DA ROCHA, M. B. Caracterização agroclimática de Bagé, RS. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, 2020.

DE SOUSA TEIXEIRA, D. B. *et al*. Assessment, regionalization, and modeling rainfall erosivity over Brazil: Findings from a large national database. **Science of The Total Environment**, v. 891, p. 164557, 2023.

DOS SANTOS, C. A. C. *et al*. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, p. 101982, 2020.

ESPINOSA, L. A.; PORTELA, M. M.; RODRIGUES, R. Spatio-temporal variability of droughts over past 80 years in Madeira Island. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 25, p. 100623, 2019.

FENG, X.; VICO, G.; PORPORATO, A. On the effects of seasonality on soil water balance and plant growth. **Water resources research**, v. 48, n. 5, 2012.

FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria: conceitos, métodos e aplicações**. Editora da UNICAMP, 2015.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied engineering in agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HONGYU, K; SANDANIELO, V.; DE OLIVEIRA JUNIOR, G. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and science**, v. 5, n. 1, p. 83-90, 2016.

HONGYU, K. Análise Fatorial Exploratória: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S Engineering and Science**, v. 7, n. 4, p. 88-103, 2018.

IKUDAYISI, A.; ADEYEMO, J. Effects of different meteorological variables on reference evapotranspiration modeling: application of principal component analysis. **World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 632-636, 2016.

IPCC**.** Climate Change 2021: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [S.l.]: IPCC, 2021. Disponível em https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/. Acesso em: 10 jul 2022

JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. de C. R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate dynamics**, v. 53, p. 943-956, 2019.

JIN, Z. *et al*. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 8191, 2017.

LIU, Y. J.; CHEN, J.; PAN, T. Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998–2005. **Earth and Space Science**, v. 6, n. 8, p. 1366-1377, 2019.

LOPES, J. R. F.; DANTAS, M. P.; FERREIRA, F. E. P. Variabilidade da precipitação pluvial e produtividade do milho no semiárido brasileiro através da análise multivariada. **Nativa**, v. 7, n. 1, p. 77-83, 2019.

MARTINS, J. D. *et al*. Mapeamento da área irrigada por pivô central em nível de bacia hidrográfica no extremo sul do Brasil. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 281-296, 2021.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, 2018.

MELO, G. L. **Caracterização de sistemas de cultivo em áreas irrigadas por aspersão no Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado, p. 1-114, 2006

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of hydrology**, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, 2010.

MONTEIRO, A. F. M. *et al*. Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 146, n. 1, p. 583-597, 2021.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Climate Data Online** Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php: Acesso em: 30 mar. 2023.

NOIA JUNIOR, R. de S. *et al*. Evaluation of the Hargreaves-Samani method for estimating reference evapotranspiration with ground and gridded weather data sources. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 35, n. 5, p. 823-835, 2019.

PAREDES, P.; PEREIRA, L. S. Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ETo from temperature with focus on solar radiation. **Agricultural water management**, 215, 86-102, 2019.

PAREDES, P. *et al*. Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves-Samani equation using local climatic variables. **Agricultural Water Management**, 240, 106210. 2020

PRADO, B. Q. D. M *et al*. Avaliação de variáveis climatológicas da cidade de Uberlândia (MG) por meio da análise de componentes principais. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** v. 21, n. 2, p. 407-413, 2016

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing.Vienna, AustriaR Foundation for Statistical Computing, 2019. Disponível em: https://www.r-project.org/

RAZIEI, T. An outlook on the Iranian Köppen-Geiger climate zones in the 21st century. **Iranian Journal of Geophysics**, v. 11, n. 1, p. 84-100, 2017.

REISSER JUNIOR, C. **Atlas climático da Região Sul do Brasil**: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. 2012.

RUHOFF, A. L. *et al*. Análise multivariada do processo de evapotranspiração em áreas de cerrado e cana-de-açúcar. **Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos.** Porto Alegre, RS. Vol. 14, n. 4, p. 137-146, 2009.

SILVA, F. D. S. *et al*. Tendências observadas da evaporação potencial no estado do Alagoas (1961 – 2016). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n.1, p. 28-43, 2018.

STRECK, N. A. *et al*. Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1553-1561, 2009.

TERRA, L. G. **Tendências, agrupamentos e índices padronizado e de anomalia: uma análise da precipitação pluviométrica no Rio Grande do Sul**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

VALIPOUR, M. *et al*. Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 50-60, 2017.

VOURLITIS, G.L. *et al*. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. Water Resources Research, v. 38, n. 6, p. 1-11, 2002

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.