

Artigo

Validação da SPEIbase para a Região Sudeste Brasileira

Ruth Venturini Mariani¹ , Gustavo Bastos Lyra², Marcel Carvalho Abreu²,
Janaina Cassiano dos Santos³

¹*Departamento de Agricultura e Ciências Ambientais, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.*

²*Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.*

³*Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, São José dos Campos, SP, Brasil.*

Recebido em: 12 de Dezembro de 2023 - Aceito em: 27 de Março de 2024

Resumo

A seca é um fenômeno natural, que causa impactos severos em diferentes setores da sociedade. Para avaliar a seca, são utilizados índices que permitem comparar eventos em diferentes regiões e escalas temporais. O SPEIbase é uma base de dados em grade que fornece estimativas do SPEI em escala global, com ampla abrangência temporal (1901 a 2022), resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ e segue em processo de atualização. O objetivo deste estudo foi avaliar o SPEIbase v2.9 na representação dos padrões espaço-temporal da seca na Região Sudeste Brasileira. Para isso, foram comparados os valores da SPEIbase via dados de oito estações meteorológicas convencionais (EMC), para o período de 1961 a 2010. A SPEIbase apresentou resultados satisfatórios para a Região Sudeste Brasileira. Os dados em grade apresentaram tendência linear positiva para todas as oito EMC, com correlação forte ($0,70 < r < 0,90$) para mais de 50% das estações. Além disso, a SPEIbase apresentou desempenho satisfatório na identificação da frequência e intensidade das secas. O SPEIbase é um importante produto que pode ser usado para a análise de secas na Região Sudeste Brasileira.

Palavras-chave: clima, secas, dados em grade, métodos estatísticos.

Validation of the SPEIbase for the Southeastern Brazil Region

Abstract

Drought is a natural phenomenon that cause severely impacts on different sectors of society. To assess drought, indices are used that allow comparing events in different regions and time scales. SPEIbase is a gridded database that provides global-scale SPEI estimates with an extensive temporal coverage (1901 to 2022), $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ spatial resolution, and is currently being updated. This study aimed to evaluate SPEIbase v2.9 in representing the spatio-temporal patterns of drought in the Southeastern Brazil Region. For this, SPEIbase values were compared to values calculated from data from eight conventional meteorological stations (CMS), for the period from 1961 to 2010. SPEIbase showed satisfactory results for the Southeastern Brazil Region. The gridded data presented a positive linear trend for all eight CMS in the study, with a strong correlation ($0,70 < r < 0,90$) for more than 50% of the stations. Additionally, SPEIbase performed satisfactorily in identifying the frequency and intensity of droughts. SPEIbase is an important tool for drought analysis in the Southeastern Brazil Region.

Keywords: climate, drought, gridded data, statistical methods.

1. Introdução

A seca é um fenômeno natural que causa impactos negativos progressivos em escala espacial e temporal, e se manifesta de maneira gradual e prolongada, diferenciando-se de outros desastres naturais (Fontão *et al.*, 2022). É um fenômeno climático que está intrinsecamente relacionado à insuficiência ou ausência de precipitação durante um período prolongado, e desencadeia desequilíbrio agrí-

do-se de outros desastres naturais (Fontão *et al.*, 2022). É um fenômeno climático que está intrinsecamente relacionado à insuficiência ou ausência de precipitação durante um período prolongado, e desencadeia desequilíbrio agrí-

cola, hidrológico e socioeconômico (Alito e Kerebih, 2024; Becker e Sparks, 2020). Conforme seus efeitos a seca pode ser classificada em quatro categorias: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (Gonçalves *et al.*, 2021).

A seca meteorológica é um indicador de deficiência na precipitação, enquanto que as secas agrícolas e hidrológicas são causadas, respectivamente, pelo déficit hídrico no solo e deficiência nas vazões (Fontão *et al.*, 2022; Morsy *et al.*, 2022). Já a seca socioeconômica é uma crise que ocorre quando problemas sociais, econômicos e ambientais são decorrentes da falta de recursos hídricos (Fernandes *et al.*, 2021). Fernandes *et al.* (2021) destacam que os impactos dos eventos de seca em diferentes setores estão relacionados a sua duração e o grau de severidade, além da sua frequência de ocorrência. Ou seja, o fenômeno torna-se consequência da associação dos tipos de secas mencionados anteriormente (Gonçalves *et al.*, 2021; Morsy *et al.*, 2022).

Os eventos de seca afetam todos os setores socioeconômicos, com destaque para o setor agrícola, altamente dependente das condições climáticas (Santos *et al.*, 2011; Cunha *et al.*, 2019). A variabilidade e as mudanças climáticas podem incrementar a frequência e intensidade das secas (Lyra *et al.*, 2017; Morsy *et al.*, 2022; Sobral *et al.*, 2019; Raposo *et al.*, 2023). A compreensão dos motivos de ocorrência e impactos provocados por esses eventos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de planejamento, mitigação e adaptação (He *et al.*, 2023), principalmente por parte dos gestores de políticas públicas e privadas, a fim de auxiliar na tomada de decisões (Gonçalves *et al.*, 2021; Arra *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo na frequência, intensidade e duração de eventos extremamente quentes e secos na América do Sul, especialmente na região Sudeste do Brasil. Nobre *et al.* (2016) relataram que o período de 2013 à 2015 é considerado o intervalo de seca mais severa no Sudeste do Brasil desde a década de 1950. O reservatório Cantareira, o qual abastece em torno de 46% da população da região metropolitana de São Paulo, em janeiro de 2015 atingiu um nível de 5% de sua capacidade total de armazenamento, comprometendo o abastecimento de água de cerca de 9 milhões de pessoas (Jesus *et al.*, 2020).

Marengo *et al.* (2018), relatam que seca meteorológica em 2015/16 na Bacia do Rio São Francisco, Sudeste do Brasil, impactou a água disponível para vegetação e afetou a descarga natural que entra no reservatório de Três Marias (Minas Gerais). No período de 2014 à 2015 a região serrana do Rio de Janeiro sofreu com um número sem precedentes de incêndios florestais (Rodrigues *et al.*, 2018), além disso houve um número de fatalidades relacionadas a um severo surto de dengue, associado ao armazenamento de água domiciliar instalados pela população pela escassez hídrica (Brown *et al.*, 2014; BBC, 2015). De

Oliveira Roza *et al.* (2024) encontraram tendências de intensificação da seca principalmente nas regiões mais ao norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil. A escassez de água no Sudeste brasileiro teve impactos significativos na economia, como o setor cafeeiro (Watson, 2014).

A avaliação do fenômeno da seca requer o uso de índices, o que torna essencial a análise de desempenho para a identificação e utilização do que melhor reflete as condições e características da região de estudo, além disso pode-se também adotar uma análise multi-índice (Pelinson, 2023). Dentre os índices destacam-se o Índice de Precipitação Padronizada - SPI (*Standardized Precipitation Index*), Índice de Severidade de Seca de Palmer - PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) e Índice de Precipitação-Evapotranspiração Padronizado - SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*). Desenvolvido por McKee *et al.* (1993), o SPI permite a comparação entre regiões de diferentes climas, devido à associação da precipitação e escalas temporais (Fernandes *et al.*, 2021). O PDSI é obtido pela equação desenvolvida por Palmer em 1965 (Fernandes *et al.*, 2010) e reflete o desvio das condições de umidade do solo (Santos, 2011). O SPEI utiliza dados de chuva mensal (P) e temperatura do ar para estimar a evapotranspiração potencial (ETP). Foi proposto por Vicente-Serrano *et al.* (2010a) e consiste em um índice baseado no cálculo do SPI, no entanto combina P e ETP . Os autores utilizaram a metodologia do balanço hídrico climático simples, baseado na diferença entre P e ETP (Thorntwaite, 1948), calculado em diferentes escalas de tempo para obter o SPEI.

A escolha dos índices de seca depende da quantidade e qualidade dos dados climáticos disponíveis, objetivos do estudo, simplicidade de cálculo e, a capacidade do índice de detectar a distribuição espaço-temporal e variações na frequência e intensidade dos eventos de seca (Morsy *et al.*, 2022; Nouri, 2023). Os índices SPI e SPEI são os mais utilizados para caracterizar a seca meteorológica, contudo o SPI utiliza apenas dados de precipitação, enquanto o SPEI considera além da precipitação, a ETP , o que o torna mais sensível a variações e tendências de longo-tempo (> 30 anos) relacionadas à variabilidade e às mudanças climáticas (Morsy *et al.*, 2022; Bergueria *et al.*, 2010) ou em condições de climas subúmidos seco, semiáridos e áridos, onde as diferenças entre P e ETP são mais sensíveis (Nouri, 2023).

Aliada à sensibilidade dos índices a variações e tendências de longo-tempo, a escassez de dados de EMC pode restringir a avaliação de fenômenos climáticos, incluindo a seca, principalmente quando utilizados índices que necessitam de séries de precipitação e temperatura do ar (de Oliveira Roza *et al.*, 2024; Morsy *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2022; Tostes *et al.*, 2017). Para suprir séries climáticas de qualidade, contínuas e homogêneas no espaço e tempo, pode-se utilizar bases de dados em grade obtidas por interpolação espacial de séries climáticas de estações

meteorológicas de superfície, simulados por modelos numéricos da atmosfera, obtidos por sensores remotos orbitais ou produtos híbridos, que consideram mais de uma destas abordagens (Santos *et al.*, 2018; Nouri, 2023). O SPEIbase é uma base de dados em grade que fornece estimativas da SPEI em escala global e de longo prazo, que pode auxiliar na obtenção de informações climáticas e de índices de seca. Contudo, esses produtos devem ser avaliados quanto a sua capacidade de representar o fenômeno em escala regional e no tempo (Tostes *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018), uma vez que a resolução espacial e temporal desses produtos em grade, influenciam na precisão e acurácia da base de dados (Santos *et al.*, 2016).

O objetivo deste estudo é avaliar a precisão e acurácia da SPEIbase para a Região Sudeste Brasileira. Para isso, serão utilizados dados de EMC, os quais serão selecionados e submetidos à análise de qualidade, preenchimentos de falhas e análise de homogeneidade. Por fim, os valores de SPEIbase foram comparados com os valores calculados a partir dos dados de EMC.

2. Materiais e Métodos

2.1. Séries climáticas observadas

As séries observadas de precipitação e temperatura do ar foram obtidas no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), mantido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o período de janeiro de 1961 a dezembro de 2010. A seleção das estações meteorológicas utilizadas, baseou-se no trabalho de Santos (2022), em que a autora selecionou estações meteorológicas que atenderam aos seguintes critérios: i) estar dentro do raio de 100 km do limite geopolítico do Estado do Rio de Janeiro; ii) não apresentar porcentagem de falhas superior a 1/3 dos dados; iii) apresentar r^2 da regressão linear entre a série avaliada e a série de referência igual ou superior a 0,50 (na etapa inicial); iv) coeficiente angular da regressão (β_1) entre 0,7 e 1,3; e v) não ultrapassar sete anos de ausência de dados consecutivos. Com base nesses critérios, foram selecionadas oito estações meteorológicas localizadas nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, conforme mapa de localização da Fig. 1 e relação das estações na Tabela 1.

As séries de precipitação e temperatura do ar foram submetidas a análise de qualidade, preenchimento de falhas e análise de homogeneidade dos dados. Para a análise de qualidade, Santos (2022) avaliou três métodos: análise supervisionada, análise não-supervisionada e pacote do ambiente R Climatol (Guijarro, 2018). Após as análises de resultados, a abordagem indicada pela autora como de melhor desempenho foi a análise supervisionada, sendo essa considerada no presente estudo.

A análise de qualidade dos dados foi baseada em três passos: i) limites físicos; ii) limites climáticos e iii) con-

sistência espaço-temporal. No preenchimento de falhas, Santos (2022) utilizou o método da regressão linear descrita por Oliveira-Júnior *et al.* (2012) e, para a análise de homogeneidade foi utilizado método do resíduo acumulado (Allen *et al.*, 1998; Guimarães *et al.*, 2012; Kite, 1988). As etapas envolvidas em cada método são descritas com detalhes por Santos (2022).

2.2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

Para o cálculo do SPEI, utilizou-se a diferença mensal (ou semanal) entre P e ETP (Vicente-Serrano *et al.*, 2010a), sendo ETP calculada pelo método de Thornthwaite (1948).

Com um valor para a ETP , a diferença entre a P e a ETP para o mês i é calculada por meio da Eq. (1):

$$D_i = P_i - ETP_i, \quad (1)$$

em que P (mm) é a precipitação mensal; ETP (mm) é a evapotranspiração potencial.

Os valores de D_i calculados são agregados em diferentes escalas de tempo, por meio da Eq. (2):

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1} - ETP_{n-1}), \quad n \geq k, \quad (2)$$

em que k (meses) é a escala de tempo de agregação e n é o número de cálculo.

Posteriormente, as séries do SPEI foram empregadas para identificar atributos relacionados à seca, tais como sua duração, intensidade e severidade. A classificação do SPEI é feita de acordo com a categorização do SPI desenvolvida por McKee *et al.* (1993), cujos limites estão indicados na Tabela 2.

2.3. SPEIbase - séries em grade

Vicente-Serrano *et al.* (2010b) elaboraram o banco de dados global robusto e de longo prazo sobre as condições de seca à escala global, representado pelo SPEI, denominado SPEIbase, com resolução espacial de 0,5 grau e uma resolução temporal mensal. Possui caráter multi-escala, fornecendo escalas temporais do SPEI entre 1 e 48 meses. Atualmente, SPEIbase encontra-se na versão v2.9 e abrange o período de janeiro de 1901 a dezembro de 2022.

O banco de dados global multiescalar proposto por Vicente-Serrano *et al.* (2010b), permite realizar a obtenção dos dados por meio de arquivo no formato netCDF ou arquivo de texto (formato csv), sendo que neste último o usuário seleciona a localização para a qual deseja obter o SPEI. Além disso, também é facultado ao usuário a escolha da escala temporal, ou seja, pode-se obter o SPEI na escala mensal, trimestral ou anual, por exemplo. Ao selecionar escala desejada e ponto de interesse, o usuário também pode visualizar o gráfico do SPEI para a localização.

É importante ressaltar que, apesar dos dados possuírem abrangência para o período de janeiro de 1901 a dezembro de 2022, não necessariamente todas as localiza-

ções e escalas temporais possuirão dados para 100% do período. A SPEIbase é baseada em dados de precipitação mensal e evapotranspiração potencial do *Climatic*

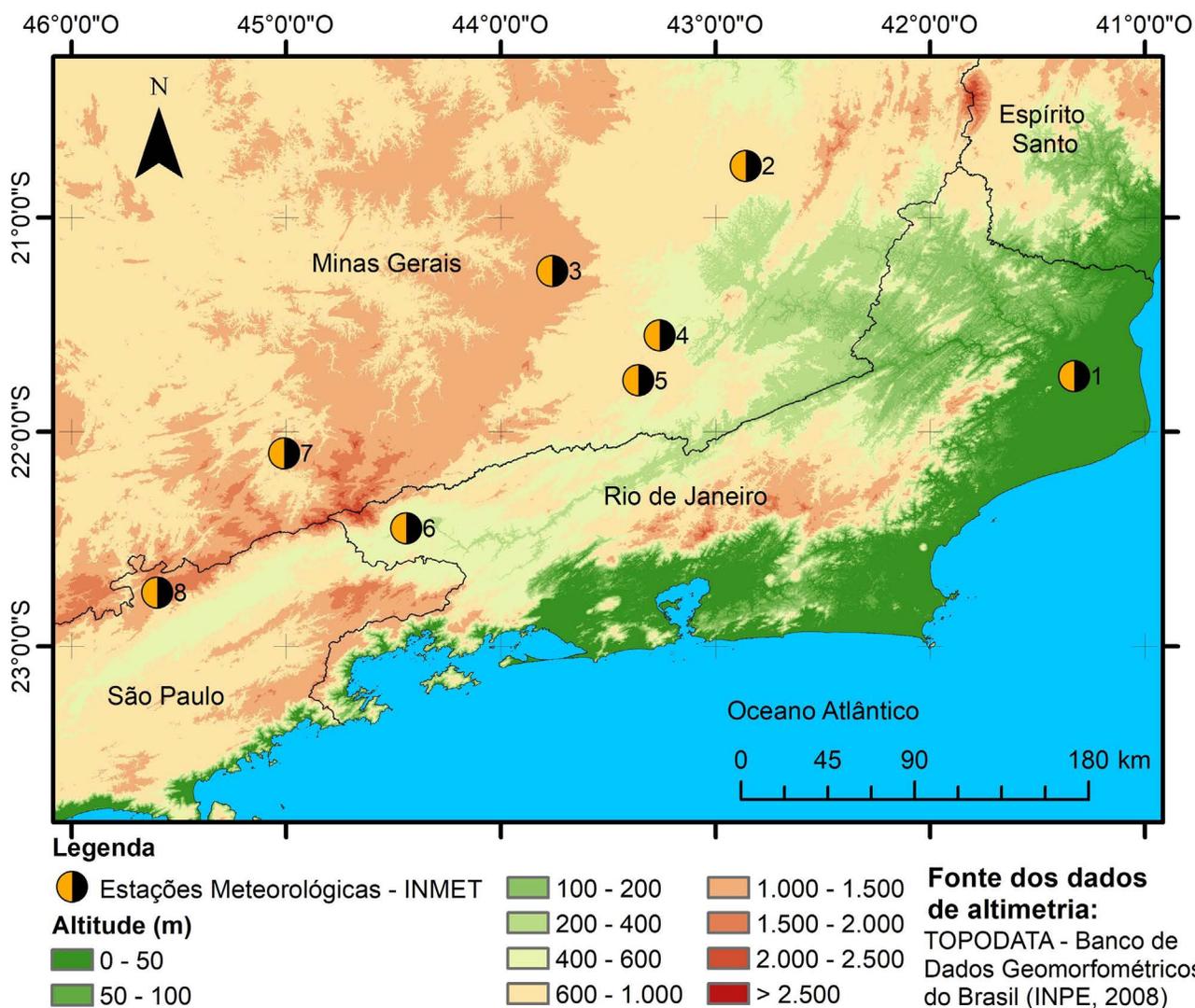


Figura 1 - Mapa de localização e altimetria das estações meteorológicas.

Tabela 1 - Relação das estações meteorológicas utilizadas, identificador (ID)⁺, município, unidade federativa, falhas (%) nas séries de precipitação e temperatura do ar.

ID	Município	Unidade Federativa (UF)	Falhas precipitação	Falhas temperatura
1	Campos dos Goytacazes	RJ	18,17%	4,3%
2	Viçosa	MG	18,67%	20,0%
3	Barbacena	MG	9,83%	12,0%
4	Coronel Pacheco	MG	21,67%	23,2%
5	Juiz de Fora	MG	9,33%	15,2%
6	Resende	RJ	18,67%	6,5%
7	São Lourenço	MG	7,33%	17,0%
8	Campos do Jordão	SP	6,33%	32,7%

+ Identificador em acordo com o mapa da Fig. 1.

Tabela 2 - Classificação do SPEI.

Valores de SPEI	Classificação
$\geq 2,0$	Extremamente úmido
1,50 a 1,99	Muito úmido
1,00 a 1,49	Moderadamente úmido
0,99 a -0,99	Próximo ao normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Muito seco
$\leq -2,00$	Extremamente seco

Fonte: McKEE et al. (1993), 1995.

Research Unit da University of East Anglia, e utiliza para as séries de evapotranspiração, a evapotranspiração estimada pelo método Penman-Monteith parametrizado no boletim de Irrigação e Drenagem No 56 da FAO (Allen et al., 1998), portanto é recomendada para a maioria dos usos, incluindo análises climatológicas de longo prazo.

O conjunto de dados pode ser acessado por meio do endereço eletrônico da [Global SPEI database](#). Desde a versão 2.0, para gerar a SPEIbase foi utilizado um código R, que está acessível no [GitHub](#).

2.4. Análise estatística

A validação da SPEIbase para a região de estudo foi realizada utilizando como referência os valores de SPEI obtidos com as séries observadas nas oito EMC selecionadas. A escala temporal considerada foi de 12 meses para o período de dezembro de 1961 até dezembro de 2010 (50 anos) (Santos, 2022). O SPEI determinado com os dados observados em superfície utilizou a *P* e *ETP*, sendo a *ETP* estimada pelo método de Thornthwaite (1948), em função da temperatura do ar. Os dados de precipitação e temperatura do ar foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk, homogeneidade e tendência, todos no *software* R. Para o primeiro teste foi utilizado o pacote nortest versão 1.0-4 (Gross e Ligges, 2015) e para os demais, utilizou-se o pacote trend, versão 1.1.4 (Pohlert, 2020).

Os valores da SPEIbase para validação, na mesma escala temporal e período, foram obtidos para os pontos de grade mais próximos da localização das EMC selecionadas. De posse dos valores de SPEI com as séries observadas e dos correspondentes da SPEIbase, os mesmos foram comparados.

A primeira etapa da validação consistiu na análise de regressão linear simples entre os valores de SPEI observado (*X*) e os valores obtidos na SPEIbase (*Y*) e dos gráficos de dispersão, de forma a identificar tendência e, inferir sobre a precisão (coeficiente de correlação de Pearson - *r*) - Eq. (3) e exatidão (coeficiente de concordância de Willmott - *d_w*) - Eq. (4). Para a interpretação do coeficiente de correlação obtido foi considerada a interpretação apresentada na Tabela 3, propostos por Mukaka (2012).

Tabela 3 - Interpretação do coeficiente de correlação.

Intervalo	Interpretação
0,90 a 1,00 (-0,90 a -1,00)	Correlação muito forte
0,70 a 0,90 (-0,70 a -0,90)	Correlação forte
0,50 a 0,70 (-0,50 a -0,70)	Correlação moderada
0,30 a 0,50 (-0,30 a -0,50)	Correlação fraca
0 a 0,30 (0 a -0,30)	Correlação desprezível

Fonte: Mukaka, (2012).

$$r = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(Y)}} \quad (3)$$

em que *x* e *y* são, respectivamente, os valores de SPEI obtido com os dados observados e o SPEIbase e \bar{x} e \bar{y} são as médias aritméticas das séries.

$$d_w = 1 - \left[\frac{\sum (y_i - x_i)^2}{\sum (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \right] \quad (4)$$

em que *y_i* representa os valores de SPEIbase; *x_i* os valores do SPEI obtido com dados observados; \bar{x} à média dos valores de observados.

Outras técnicas realizadas para validação dos dados em grade SPEI, foram a análise de frequência e intensidade do índice. Para análise da frequência, foram identificados o número de vezes em que o SPEI apresenta mesmo sinal (+ ou -) para as duas bases de dados. É importante ressaltar que a análise foi realizada para os 589 meses da série temporal de dezembro de 1961 a dezembro de 2010.

Para análise da intensidade, foi realizada a classificação do SPEI seguindo a Tabela 2, para as duas bases de dados e posteriormente comparadas essas classificações entre si, para determinar quantas vezes foram identificadas a mesma classificação do SPEI para as estações (análise 1). Além disso, foi considerado também acerto os casos em que a classificação do SPEIbase não coincidiu, mas ficou em uma classe acima ou abaixo da referência (dados observados), denominada análise 2.

3. Resultados e Discussão

Os diagramas de dispersão, a curva de regressão e a linha 1 para 1 dos dados em grade e observados são apresentados na Fig. 2. A comparação dos dados em grade com os de EMC mostrou linearidade, com distribuição dos dados concentrada em torno da linha de tendência, indicando menor dispersão e distribuição simétrica para todas as estações.

A estação de Coronel Pacheco foi a que apresentou menor dispersão dos pontos ao redor da linha de tendência, ou seja, maior precisão. Esse fato se deve a essa estação apresentar maior coeficiente de correlação (*r* = 0,80) (Tabela 4). As estações Campo do Jordão e Campos dos

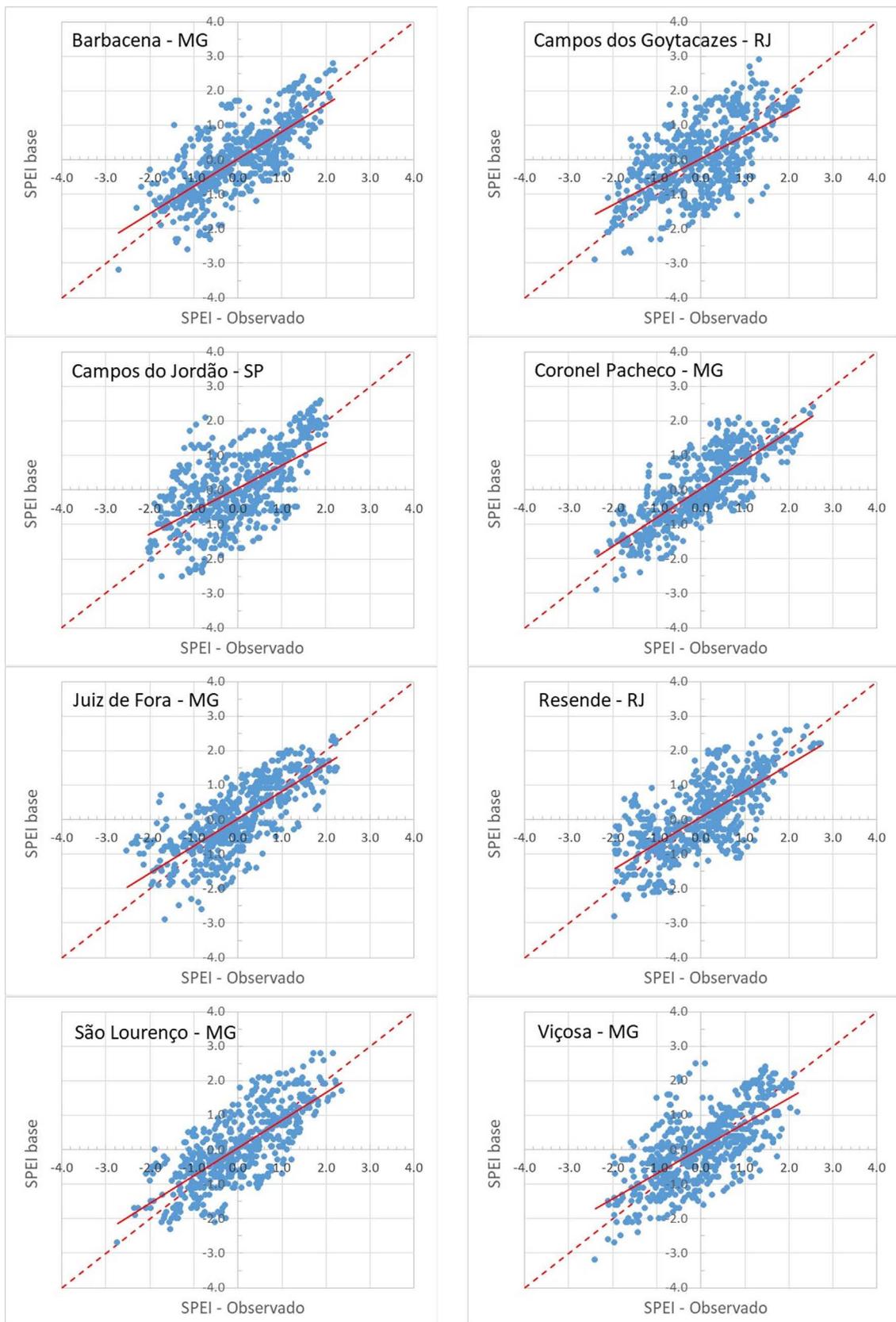


Figura 2 - Diagramas de dispersão entre o SPEI observado (eixo-x) e o SPEIbase (eixo-y).

Tabela 4 - Equação da reta e correlação.

Localização	Equação da reta	Coefficiente de correlação	Correlação
Barbacena - MG	$y = 0,7881x + 0,0208$	0,76	Forte
Campos dos Goytacazes - RJ	$y = 0,6668x + 0,0397$	0,62	Moderada
Campos do Jordão - SP	$y = 0,6603x + 0,0455$	0,62	Moderada
Coronel Pacheco - MG	$y = 0,8327x + 0,033$	0,80	Forte
Juiz de Fora - MG	$y = 0,7865x + 0,0304$	0,76	Forte
Resende - RJ	$y = 0,7628x + 0,0717$	0,72	Forte
São Lourenço - MG	$y = 0,803x + 0,0576$	0,76	Forte
Viçosa - MG	$y = 0,7282x + 0,0298$	0,69	Moderada

Goytacazes foram as que apresentaram maior dispersão ($r = 0,62$). Observou-se tendência geral de superestimativa (subestimativa) dos valores do SPEIbase para o SPEI negativo (positivo).

Para todas as estações avaliadas a exatidão, indicada pelo índice de concordância de Willmott (d_w) foi maior que a precisão. De qualquer forma, similar a precisão, a estação de Coronel Pacheco apresentou o maior d_w (0,89), enquanto os menores valores foram observados nas estações de Campos dos Goytacazes e Campos do Jordão, ambas com $d_w = 0,79$. Destaca-se que a maioria das estações (cinco) teve $r > 0,70$ e $d_w > 0,85$, o que indicou que o SPEIbase representou satisfatoriamente a variabilidade dos dados e a intensidade do SPEI.

Em Campos do Jordão, a maior dispersão pode estar relacionada à altitude da cidade (aprox. 1.628 m), logo, do ponto de localização da EMC (Santos *et al.*, 2022). Campos dos Goytacazes por ser uma região caracterizada de clima subúmido seco (Santos *et al.*, 2018) tem variações maiores de temperatura do ar na escala diária que as demais estações, além da proximidade com o ambiente costeiro. Santos *et al.* (2022) observaram discrepâncias entre índices de aridez estimados com as séries de chuva e temperatura do ar obtidos em EMC em relação a dados em grade do GHCN/GPCC e os Universidade de Delaware.

Destacam-se as estações Barbacena, Coronel Pacheco, Juiz de Fora, Resende e São Lourenço, que apresentaram correlação forte. No entanto, as demais estações também apresentaram correlação significativa estatisticamente ($p < 0,05$). Observou-se que mais de 50% das estações apresentaram correlação forte, enquanto as demais apresentaram correlação moderada.

Por meio da análise da Fig. 3, foram identificados intervalos na série temporal em que os valores de SPEI apresentaram diferentes tendências para cada uma das fontes dos dados. Ou seja, houve divergência no sentido (+/-) dos dados, enquanto SPEIbase apresenta valores positivos, SPEI calculado apresenta valores negativos, e vice-versa.

Três períodos merecem destaque: 1968 a 1972 (Campos dos Goytacazes e Campos do Jordão); 1979 a 1982 (Barbacena, Resende e Viçosa) e 1993 a 1996 (Cam-

pos dos Goytacazes, Campos do Jordão e Coronel Pacheco). Cada um deles apresentou pelo menos duas estações com divergência no sinal do SPEI. Destaca-se também o período do final da década de 1990 (Campos do Jordão) e o início dos anos 2000 (Resende), em que ambos apresentaram uma estação com diferentes tendências entre as fontes. É importante destacar as estações de Juiz de Fora e São Lourenço, uma vez que ambas não apresentaram concentração temporal de divergência de sinal.

Diante disso, foram realizadas ainda análises de frequência e intensidade. Para a análise de frequência são apresentados os resultados na Tabela 5. Observou-se que nenhuma das estações apresentou menos de 66% de acertos do sinal do SPEI para a análise de frequência, ou seja, a divergência de classificação e sinal foi menor que 33,4% (Campos dos Goytacazes). Para as estações de Minas Gerais o SPEIbase mostrou maior porcentagem de acertos do sinal (> 75%). É importante destacar que metade das estações apresentou valores de SPEI com mesmo sinal em 80% ou mais da série temporal analisada.

Os resultados da análise de intensidade são apresentados por meio da Tabela 6. Para a análise 1 (mesma classificação do SPEI das duas bases), o SPEIbase representou melhor a intensidade da seca para as estações de Minas Gerais, com acertos em relação ao SPEI observado superiores a 40%, com exceção de Viçosa. No Rio de Janeiro, apenas Resende teve resultado similar. Para a análise da intensidade, vale destacar que 75% das estações, apresentaram divergência total igual ou inferior a 20% e as demais não ultrapassaram os 27%. Ou seja, as estações apresentam classificação de SPEI coincidentes ou uma classe acima/abaixo, para as duas fontes de dados, em pelos menos 73% da série avaliada, chegando até 86%.

Arra *et al.* (2023) avaliaram o SPEIbase em diferentes escalas de tempo (3, 6 e 12 meses) em relação ao SPEI obtido para estações meteorológicas no Paquistão e, observaram que a classificação dos eventos secos/úmidos baseados no SPEIbase coincidiu com o SPEI observado entorno de 61 % das ocasiões. Os autores observaram também que a classificação da seca com o SPEIbase, normalmente é mais severa em todas as escalas de tempo avaliadas.

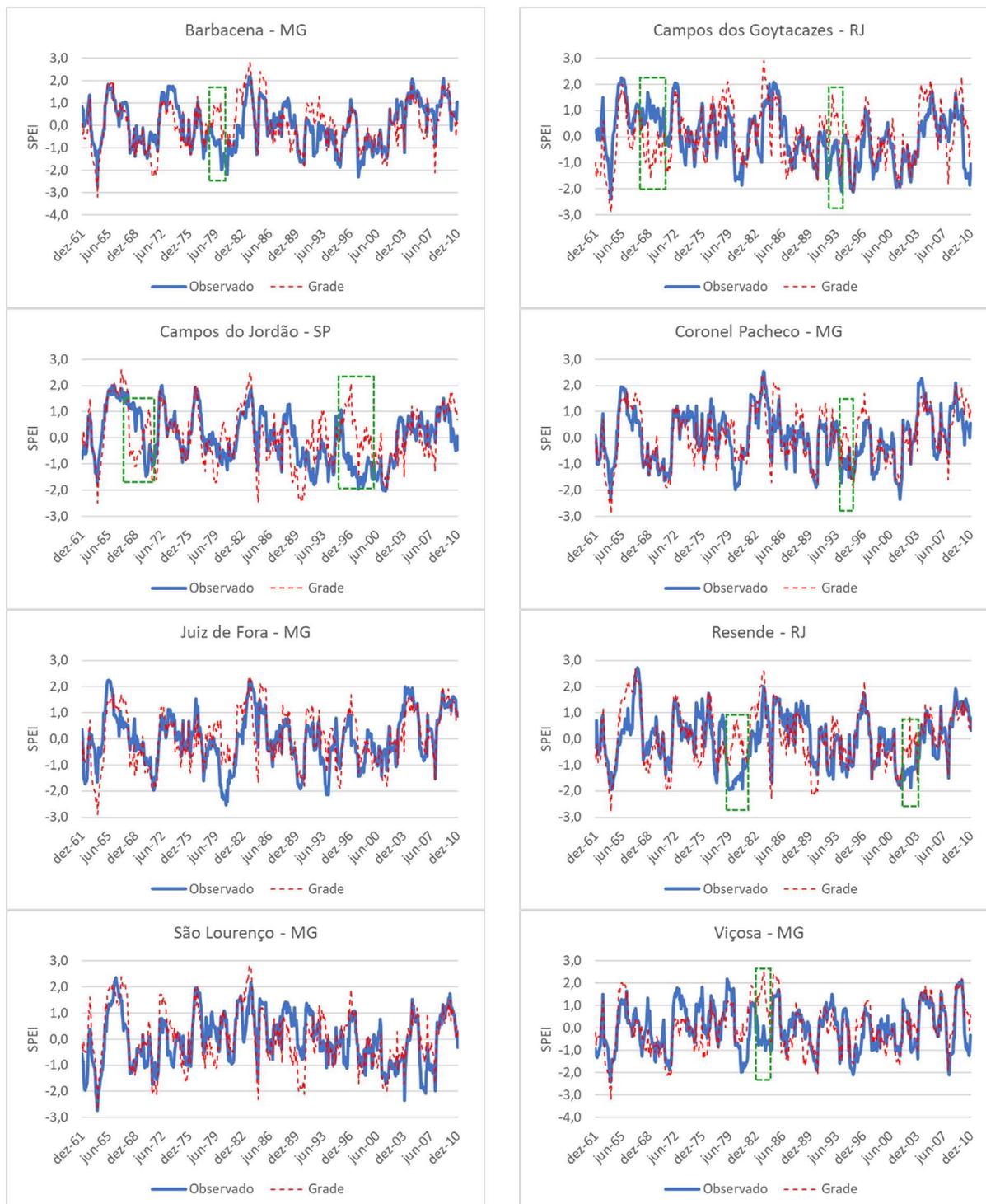


Figura 3 - Séries temporais do SPEI12 com dados observados e SPEIbase.

Desde 2016, o *Joint Research Center* (JRC) afirma nos relatórios técnicos que a seca meteorológica, provavelmente terá efeitos mais severos no futuro (Dukat *et al.*, 2022), devido às alterações climáticas e pressão antrópica sobre os recursos hídricos, conseqüentemente é exigido um aprimoramento no monitoramento, avaliação e enten-

dimento de possibilidades de adaptação para as regiões afetadas (Spinoni *et al.*, 2016). Devido a esse fato, a determinação de bases validadas e de uso público apresentam relevância nos estudos recentes (Spinoni *et al.*, 2018). Assim, espera-se um maior número de ocorrências de secas intensas, concomitante a uma maior frequência de pe-

Tabela 5 - Análise de frequência.

Localização	Frequência absoluta	Frequência relativa
Barbacena - MG	462	78,4%
Campos dos Goytacazes - RJ	392	66,6%
Campos do Jordão - SP	419	71,1%
Coronel Pacheco - MG	484	82,2%
Juiz de Fora - MG	471	80,0%
Resende - RJ	471	80,0%
São Lourenço - MG	484	82,2%
Viçosa - MG	451	76,6%

Tabela 6 - Análise de intensidade.

Localização	Análise 1	Análise 2	Divergência total
Barbacena - MG	270 (45,8%)	235 (39,9%)	84 (14,3%)
Campos dos Goytacazes - RJ	207 (35,1%)	226 (38,4%)	156 (26,5%)
Campos do Jordão - SP	217 (36,8%)	218 (37,0%)	154 (26,1%)
Coronel Pacheco - MG	265 (45,0%)	257 (43,6%)	67 (11,4%)
Juiz de Fora - MG	252 (42,8%)	249 (42,3%)	88 (14,9%)
Resende - RJ	241 (40,9%)	238 (40,4%)	110 (18,7%)
São Lourenço - MG	245 (41,6%)	240 (40,7%)	104 (17,7%)
Viçosa - MG	215 (36,5%)	256 (43,5%)	118 (20,0%)

ríodos muito secos e muito úmidos, ocasionando mais eventos extremos (Dukat *et al.*, 2022).

A vantagem do SPEI sobre outros índices, é que além de ser um índice multiescalar, que pode caracterizar os quatro tipos de seca (SPEI-1 seca meteorológica, SPEI 3-6 seca agrícola, SPEI-12 seca hidrológica e SPEI-24 seca socioeconômica), o mesmo pode ser comparável a outros índices como o PDSI, SWSI e MAI (Wang *et al.*, 2020). A desvantagem apresentada pelo dado em grade mensal está relacionada a não identificação de seca repentina com a duração inferior a um mês (Wang *et al.*, 2020). Portando restringe alguns tipos de estudos mais rigorosos e grandes escalas ($\leq 0,5^\circ$) necessitando de *dowscaling* e novas avaliações.

É evidente quando se trata desse fenômeno, que a seca é um importante fator na gestão sustentável dos recursos hídricos em diferentes regiões do mundo e para avaliar essas condições em diversas escalas, o SPEI grade oferece uma vantagem significativa e, assim permite uma análise detalhada das mudanças e condições de seca ao longo do tempo em toda esfera. Jones e Thornton (2003) aplicaram o SPEI na escala global, seus resultados indi-

caram uma variabilidade significativa nas condições de seca, o que enfatiza a necessidade de abordagens que não considerem apenas a precipitação, mas também a evapotranspiração. Ou seja, a capacidade do índice em integrar a evapotranspiração oferece uma perspectiva mais completa das condições hídricas da região, sendo uma contribuição valiosa para a gestão dos recursos naturais.

4. Conclusões

A SPEIbase consegue representar com precisão e exatidão entre moderada e forte a variabilidade espaço-temporal do SPEI para as condições fisiográficas (clima, relevo, continentalidade/maritimidade e outros) do Sudeste do Brasil. A SPEIbase classifica corretamente os eventos de seca/úmidos na maioria dos casos, contudo, em alguns anos ele superestima a intensidade dos eventos secos (úmidos).

A SPEIbase pode ser usada para estudar a frequência e intensidade de eventos secos/úmidos na escala mensal no Sudeste do Brasil.

Agradecimentos

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- ALITO, K.T.; KEREBIH, M.S. Spatio-temporal assessment of agricultural drought using remote sensing and ground-based data indices in the Northern Ethiopian Highland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 52, 101700, 2024. doi
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. *Boletim Técnico*. Rome, FAO, 300 p., 1998.
- ARRA, A.A.; AKCA, S.; KESKIN, M.Z.; ŞIŞMAN, E. Exploring the difference between Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) from in-situ meteorological stations and SPEIbase. In: **7th Intercontinental Geoinformation Days**, Peshawar v. 7, p. 67-70, 2023.
- BBC. Brasil enfrenta aumento no número de casos de dengue. *BBC News*, 05 mai. 2015. Disponível em www.bbc.com/news/world-latin-america-32589268, acesso em 10 fev. 2024.
- BECKER, S.; SPARCKS, P. "It never rains in California": Constructions of drought as a natural and social phenomenon. *Weather and Climate Extremes*, v. 29, 100257, 2020. doi
- BROWN, L.; MEDLOCK, J.; MURRAY, V. Impact of drought on vector-borne diseases - How does one manage the risk? *Public Health*, v. 128, n. 1, p. 29-37, 2014. doi
- CUNHA, A.P.M.A.; ZERI, M.; LEAL, K.D.; COSTA, L.; CUARTAS, L.A.; *et al.* Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, v. 10, 642, 2019. doi

- de OLIVEIRA ROZA, M.P.; CECÍLIO, R.A.; ZANETTI, S.S.; ABREU, M.C.; LYRA, G.B.; *et al.* Natural disasters related to rainfall trends in Espírito Santo, southeastern Brazil. **Theor Appl Climatol.**, v. 155, p. 1451-1466, 2024. doi
- DUKAT, P.; BEDNORZ, E.; ZIEMBLIŃSKA, K.; URBANIAK, M. Trends in drought occurrence and severity at mid-latitude European stations (1951-2015) estimated using standardized precipitation (SPI) and precipitation and evapotranspiration (SPEI) indices. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 134, 20, 2022. doi
- FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.L.F.; AMORIM, A.O. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 8, p. 771-779, 2010. doi
- FERNANDES, V.R.; CUNHA, A.P.M.A.; PINEDA, L.A.C.; LEAL, K.R.D.; COSTA, L.C.O.; *et al.* Secas e os impactos na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 561-584, 2021. doi
- FONTÃO, P.A.B.; MOLINA, J.V.; SALGADO, P.P. Avaliação dos riscos de secas na região metropolitana de São Paulo. **RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 55, p. 3-24, 2022. doi
- GONÇALVES, S.T.N.; VASCONCELOS JUNIOR, F.C.; SAKAMOTO, M.S.; SILVEIRA, C.S.; MARTINS, E.S.P.R. Índices e metodologias de monitoramento de secas: Uma revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3 (Suplemento), p. 495-511, 2021. doi
- GROSS, J.; LIGGES, U. **Package 'Nortest': Tests for Normality**. 2015. Disponível em <https://cran.r-project.org/web/packages/nortest/nortest.pdf>, acesso em 19 fev. 2024.
- GUIJARRO, J.A. **Homogenization of Climate Series with Climatol**, 2018. Disponível em https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12185/2/homog_climatol-en.pdf, acesso em 19 fev. 2024.
- GUIMARÃES, V.S.; LOPES, W.T.A.; FREITAS, M.A.S.; NÓBREGA, M.T.; MENDONÇA, L.S.T.; *et al.* **Orientações para Consistência de Dados Pluviométricos**. 2012. Disponível em <https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaConsistenciaDadosPluviometri-cos-VersaoJul12.pdf>, acesso em 5 nov. 2023.
- HE, Q.; WANG, M.; LIU, K.; LI, B.; JIANG, Z. Spatiotemporal analysis of meteorological drought across China based on the high-spatial-resolution multiscale SPI generated by machine learning. **Weather and Climate Extremes**, v. 40, 100567, 2023. doi
- JESUS, E.T.; AMORIM, J.S.; JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M.R.; MELLO, C.R. Meteorological and hydrological drought from 1987 to 2017 in Doce River Basin, Southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, e29, 2020. doi
- JONES, P.G.; THORNTON, P.K. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. **Global Environmental Change**, v. 13, n. 1, p. 51-59, 2003. doi
- KITE, G.W. **Frequency and Risk Analyses in Hydrology**, 4ª ed. Colorado, Water Resources Publication, 257 p, 1988.
- LYRA, G.B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; GOIS, G.; CUNHA-ZERI, G.; ZERI, M. Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 129, p. 157-171, 2017. doi
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALA, R.C.; CUNHA, A.P.; BRITO, S.; *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 1973-1985, 2018. doi
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **8th Conference on Applied Climatology**, Anaheim, Proceedings, Department of Atmospheric Science Colorado State University, p. 179-183, 1993.
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. Drought Monitoring with Multiple Time Scales. In: **9th Conference on Applied Climatology**, Dallas, Proceedings, American Meteorological Society. p. 233-236, 1995.
- MORSY, M.; MOURSY, F.L.; SAYAD, T.; SHABAN, S. Climatological study of SPEI drought index using observed and CRU gridded dataset over Ethiopia. **Pure and Applied Geophysics**, v. 179, n. 8, p. 3055-3073, 2022. doi
- MUKAKA, M.M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, L.A.; ALVES, L.M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016. doi
- NOURI, M. Drought assessment using gridded data sources in data-poor areas with different aridity conditions. **Water Resources Management**, v. 37, p. 4327-4343, 2023. doi
- OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; LYRA, G.B.; GOIS, G.; BRITO, T.T.; MOURA, N.S.H. Análise de homogeneidade de séries pluviométricas para determinação do índice de seca IPP no Estado de Alagoas. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 101-112, 2012. doi
- PELINSON, D. **Diagnóstico da Seca 2019/2020 no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 112 p., 2023.
- POHLERT, T. **Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection**. Disponível em <https://cran.r-project.org/package=trend>, acesso em 9 mar. 2022.
- RAPOSO, V.M.B.; COSTA, V.A.F.; RODRIGUES, A.F. A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. **Science of The Total Environment**, v. 898, 165550, 2023. doi
- RODRIGUES, J.A.; LIBONATI, R.; PERES, L.F.; SETZER, A. Mapeamento de áreas queimadas em unidades de conservação da região serrana do Rio de Janeiro utilizando o satélite Landsat-8 durante a seca de 2014. **Anuário Do Instituto De Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 1, p. 318-327, 2018. doi
- SANTOS, A.P.; RODRIGUES, D.D.; SANTOS, N.T.; GRIPP JUNIOR, J. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 4, p. 630-650, 2016. doi

- SANTOS, J.C. **Séries Temporais dos Índices de Seca de Palmer (PDSI), Padronizado de Precipitação (SPI) e de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) para Caracterização da Seca na Região Sudeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 142 p., 2022.
- SANTOS, J.C.; LYRA, G.B.; ABREU, M.C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; BOHN, L.; *et al.* Aridity indices to assess desertification susceptibility: a methodological approach using gridded climate data and cartographic modeling. **Natural Hazards**, v. 111, p. 2531-2558, 2022. doi
- SANTOS, J.C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; ZERI, M.; SANTOS, E.O.; LYRA, G.B. Susceptibilidade climática a desertificação no Estado do Rio de Janeiro baseada em dados em grade. **XX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2018.
- SANTOS, R.S.; COSTA, L.C.; SEDIYAMA, G.C.; LEAL, B.G.; DE OLIVEIRA, R.A.; *et al.* Avaliação da relação seca/produzitividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 313-321, 2011. doi
- SOBRAL, B.S.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; DE GOIS, G.; PEREIRA-JÚNIOR, E.R.; DE BODAS TERASSI, P.M.; *et al.* Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. **Atmospheric Research**, v. 220, p. 141-154, 2019. doi
- SPINONI, J.; NAUMANN, G.; BARBOSA, P.; VOGT, J. Meteorological droughts in Europe - Events and impacts, past trends and future projections. **Publications Office of the European Union**, Luxembourg, EUR 27748 EN, 2016. doi
- SPINONI, J.; VOGT, J.; NAUMANN, G.; BARBOSA, P.; DOSIO, A. Will drought events become more frequent and severe in Europe? **International Journal Of Climatology**, v. 38, p. 1718-1736, 2018. doi
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948. doi
- TOSTES, J.O.; LYRA, G.B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; FRAN-CELINO, M.R. Assessment of gridded precipitation and air temperature products for the state of Acre, southwestern Amazonia, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, 153, 2017. doi
- VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010a. doi
- VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I.; ANGULO, M.; EL KENAWY, A. A New global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscale drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, n. 4, p. 1033-1043, 2010b. doi
- WANG, Q.; ZENG, J.; QI, J.; ZHANG, X.; ZENG, Y.; *et al.* A multi-scale daily SPEI dataset for drought monitoring at observation 2 stations over the mainland China from 1961 to 2018. **Earth System Science Data**, p. 1-33, 2020. doi
- WATSON, K. Drought hits Brazil's coffee industry. **BBC News**, 30 mai 2014. Disponível em <https://www.bbc.com/news/business-27623535>, acesso em 19 fev. 2024.

Internet Resources

GitHub, <https://github.com/sbegueria/SPEIbase>.
Global SPEI database, <https://spei.csic.es/database.html>.



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.