

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em
Ciências Ambientais

SUELLEM DE SOUSA PEREIRA

**Análise dos índices padronizados de precipitação (SPI) e vazão (SSI) na
Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba – SP**

Sorocaba

2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



unesp
Sorocaba

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em
Ciências Ambientais

SUELLEM DE SOUSA PEREIRA

**Análise dos índices padronizados de precipitação (SPI) e vazão (SSI) na Bacia
Hidrográfica do Rio Sorocaba – SP**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Mestra em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Enrique Gamero Guandique

Sorocaba

2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências ambientais



unesp
Sorocaba

P436a	Pereira, Suellem de Sousa Análise dos índices padronizados de precipitação (SPI) e vazão (SSI) na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba – SP / Suellem de Sousa Pereira. -- Sorocaba, 2026 115 p. : tabs., mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Manuel Enrique Gamero Guandique 1. Chuvas. 2. Regiões áridas. 3. Monitoramento Ambiental. I. Título.
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise dos índices padronizados de precipitação (SPI) e vazão (SSI) na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba – SP

AUTORA: SUELLEM DE SOUSA PEREIRA

ORIENTADOR: MANUEL ENRIQUE GAMERO GUANDIQUE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MANUEL ENRIQUE GAMERO GUANDIQUE (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Prof. Dr. LEANDRO CARDOSO DE MORAIS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Prof. Dr. SERGIO NASCIMENTO DUARTE (Participação Virtual)
Biossistemas / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ) - Universidade de São Paulo (USP)

Sorocaba, 03 de março de 2026.

Dedico esse trabalho a minha filha que tantas vezes
abdicou de minha companhia para que eu
pudesse realizar esse sonho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pelo dom da vida, por me conceder saúde, força e estar sempre ao meu lado ao longo dessa jornada iluminando meus caminhos não deixando que eu desistisse diante das dificuldades.

À minha filha, meu maior motivo e minha maior inspiração. Mesmo diante da minha ausência em tantos momentos sempre demonstrou compreensão, carinho e amor tornando tudo mais leve e significativo.

Aos meus pais, por todo amor, incentivo e apoio incondicional fundamentais para que eu nunca desistisse mesmo diante dos desafios.

Ao meu companheiro, pelo amor, paciência, apoio constante e por caminhar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus irmãos, pelo apoio e incentivo que foram essenciais durante essa trajetória.

Ao meu orientador, pela dedicação, paciência, ensinamentos e por toda a ajuda necessária ao longo do desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma fundamental para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus colegas do mestrado, pela convivência, troca de conhecimentos, apoio mútuo e companheirismo ao longo dessa caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – nº do processo: 131712/2024-1.

A todos, minha eterna gratidão!

RESUMO

As secas configuram um dos desastres naturais mais recorrentes e impactantes, podendo desencadear crises hídricas com sérias consequências para a segurança alimentar, a oferta de água e os sistemas socioambientais. Diante do cenário de intensificação desses eventos, impulsionadas pelas mudanças climáticas e pelo uso insustentável dos recursos naturais, torna-se fundamental a análise de sua frequência, duração e severidade. Este estudo tem como objetivo investigar o comportamento das secas meteorológicas em 21 estações pluviométricas e hidrológicas em 4 estações fluviométricas localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba durante o período de 1993 a 2023 com base na aplicação de índices padronizados. Foram utilizados os índices SPI (Standardized Precipitation Index) para a caracterização das secas meteorológicas e o índice SSI (Standardized Streamflow Index) para a análise das secas hidrológicas. Os índices permitiram identificar padrões temporais e espaciais dos eventos de seca a partir de séries históricas de precipitação e vazão, contribuindo para a compreensão da vulnerabilidade hídrica regional e subsidiando ações de monitoramento e gestão dos recursos hídricos. Adicionalmente, a análise de tendência indicou comportamento estatisticamente significativo nas estações de Salto de Pirapora (E4-025), Piedade (E4-130), Laranjal Paulista (E4-150), Anhembí (D5-044) e Sorocaba (ANA), evidenciando alterações relevantes no regime hidrológico da bacia ao longo do período analisado.

Palavras-chave: secas; índices padronizados de precipitação; Bacia do Rio Sorocaba.

ABSTRACT

Droughts are one of the most recurrent and impactful natural disasters, capable of triggering water crises with serious consequences for food security, water supply, and socio-environmental systems. Given the intensification of these events, driven by climate change and the unsustainable use of natural resources, analyzing their frequency, duration, and severity becomes fundamental. This study aims to investigate the behavior of meteorological droughts at 21 rainfall and hydrological stations in 4 streamflow gauging stations located in the Sorocaba River Basin during the period from 1993 to 2023, based on the application of standardized indices. The SPI (Standardized Precipitation Index) was used to characterize meteorological droughts, and the SSI (Standardized Streamflow Index) was used to analyze hydrological droughts. The indices made it possible to identify temporal and spatial patterns of drought events from historical precipitation and flow series, contributing to the understanding of regional water vulnerability and supporting monitoring and management actions for water resources.

Keywords: droughts; standardized precipitation indices; Sorocaba River Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das estações pluviométricas da Bacia Hidrográfica do rio Sorocaba e Médio Tietê.....	25
Figura 2. Localização das estações fluviométricas da Bacia Hidrográfica do rio Sorocaba e Médio Tietê.....	27
Figura 3. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Cotia E4-012 (a), Mairinque E4-043 (b), Ibiúna E4-131 (c), Piedade E4-130 (d).....	34
Figura 4. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Sorocaba (e), Salto de Pirapora E4-025 (f), Porto Feliz E4-118 (g), Iperó E4-019 (h).....	36
Figura 5. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Tatuí E4026 (i), Tatuí E5062 (j), Tietê E4120 (k), Laranjal Paulista E4050 (l).....	38
Figura 6. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Conchas E5001 (m), Porangaba E5063 (n), Bofete E5016 (o) e Bofete E5064 (p).....	40
Figura 7. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Anhembi D5037 (q), Anhembi D5044 (r), Botucatu D5019 (s), Botucatu D5075 (t) e Indaiatuba (u).....	42
Figura 8. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Cotia E4-012 (a), Mairinque E4-043 (b), Ibiúna E4-131 (c) e Piedade E4-130 (d).....	45
Figura 9. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Sorocaba (e), Salto de Pirapora E4-025 (f), Porto Feliz E4-118 (g), Iperó E4-019 (h).....	47
Figura 10. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Tatuí E4026 (i), Tatuí E5062 (j), Tietê E4120 (k), Laranjal Paulista E4050 (l).....	49

Figura 11. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Conchas E5001 (m), Porangaba E5063 (n), Bofete E5016 (o) e Bofete E5064 (p).....	51
Figura 12. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Anhembi D5037 (q), Anhembi D5044 (r), Botucatu D5019 (s), Botucatu D5075 (t) e Indaiatuba (u).....	53
Figura 13. Gráfico de tendência trimestral do SPI para estação Salto de Pirapora E4-025 - 2º Trimestre.....	56
Figura 14. Gráfico de tendência trimestral do SPI para estação Piedade E4-130 - 2º Trimestre.....	57
Figura 15. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Laranjal Paulista E4-050 - 2º Trimestre.....	59
Figura 16. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Anhembi D5-044 - 2º Trimestre.....	61
Figura 17. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Sorocaba (ANA) - 2º Trimestre.....	63
Figura 18. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Sorocaba (ANA) - 3º Trimestre.....	65
Figura 19. Comportamento da variabilidade do 1º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.....	67
Figura 20. Comportamento da variabilidade do 2º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.....	69
Figura 21. Comportamento da variabilidade do 3º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.....	71
Figura 22. Comportamento da variabilidade do 4º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.....	73

Figura 23. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico Americana Velha (4E-004).....	75
Figura 24. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico Sarapu (4E-006).....	76
Figura 25. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico São João – Rio do Peixe (5E-012).....	78
Figura 26. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico Tatuí (4E-019).	80
Figura 27. Distribuição da média anual do SSI, em boxplots, nas estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c) e Tatuí 4E019 (d).....	82
Figura 28. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (e), Sarapu 4E006 (f), São João – Peixe 5E012 (g), Tatuí 4E019 (h) – 1º Trimestre.....	84
Figura 29. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (i), Sarapu 4E006 (j), São João – Peixe 5E012 (k), Tatuí 4E019 (l) – 2º Trimestre.....	86
Figura 30. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (m), Sarapu 4E006 (n), São João – Peixe 5E012 (o), Tatuí 4E019 (p) – 3º Trimestre.....	88
Figura 31. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (q), Sarapu 4E006 (r), São João – Peixe 5E012 (s), Tatuí 4E019 (t) – 4º Trimestre.....	90
Figura 32. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação Americana Velha (4E-004) a partir da análise por gráfico boxplot.....	92

Figura 33. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação Sarapu (4E-006) a partir da análise por gráfico boxplot.....	94
Figura 34. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação São João – Peixe (5E-012) a partir da análise por gráfico boxplot.....	96
Figura 35. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação Tatuí (4E-019) a partir da análise por gráfico boxplot.....	98
Figura 36. Distribuição de frequência do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) na bacia do rio Sorocaba.....	103
Figura 37. Distribuição de frequência do Índice Padronizado de Vazão (SSI) na bacia do rio Sorocaba.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo dos Índices Padronizados de Seca.....	30
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estações pluviométricas utilizadas na análise.....	26
Tabela 2. Estações fluviométricas utilizadas na análise.....	27
Tabela 3. Classificação dos períodos secos e úmidos de acordo com MCKEE <i>et. al.</i> (1993)	29
Tabela 4. Resumo de secas por município e por classificação de SPI.....	43
Tabela 5. Distribuição estatística do SPI Anual.....	54
Tabela 6. Distribuição estatística do SPI trimestral no 1º trimestre.	67
Tabela 7. Distribuição estatística do SPI trimestral no 2º trimestre.....	69
Tabela 8. Distribuição estatística do SPI trimestral no 3º trimestre.....	71
Tabela 9. Distribuição estatística do SPI trimestral no 4º trimestre.....	73
Tabela 10. Distribuição estatística do SSI Anual.....	82
Tabela 11. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação Americana Velha (43-004).....	91
Tabela 12. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação Sarapu (4E-006)	93
Tabela 13. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação São João – Peixe (5E-012).....	95
Tabela 14. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação Tatuí (4E-019)	97

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CBH-SMT - Comitê da Bacia Hidrográfica do Sorocaba e Médio Tietê

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

INMET - Instituto de Meteorologia

IPA - Instituto de Pesquisas Ambientais do Estado de São Paulo

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

UGRHI-10 - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Sorocaba e Médio Tietê

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos.....	20
2.2. Eventos Climáticos Extremos e Recursos Hídricos no Estado de São Paulo...21	
2.3. A Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê.....	21
3. OBJETIVOS.....	23
4. METODOLOGIA.....	24
4.1. Área de estudo.....	24
4.2. Coleta de dados.....	25
4.3. Índices Padronizados.....	28
4.3.1. Índice Padronizado de Precipitação (SPI).....	28
4.3.2. Índice Padronizado de Vazão (SSI).....	28
4.3.3. O Teste de Mann-Kendall (MK).....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1. Análise anual do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) com base em gráficos de tendência.....	33
5.2. Avaliação da variabilidade anual do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) a partir da análise de gráficos boxplot e da tabela de distribuição.....	44
5.3. Análise Trimestral do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) com base em gráficos de tendência.....	55
5.3.1. Estação E4-025 (Salto de Pirapora) - 2º Trimestre.....	55

5.3.2. Estação Piedade E4-130 - 2º Trimestre.....	56
5.3.3. Estação Laranjal Paulista E4-050 - 2º Trimestre.....	58
5.3.4. Estação Anhembi D5-044 - 2º Trimestre.....	60
5.3.5. Estação Sorocaba (ANA) - 2º Trimestre.....	62
5.3.6. Estação Sorocaba (ANA) - 3º Trimestre.....	64
5.4. Avaliação da variabilidade trimestral do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) a partir da análise de gráficos boxplot.....	66
5.4.1. Análise integrada SPI – 1º trimestre.....	66
5.4.2. Análise integrada SPI – 2º trimestre.....	68
5.4.3. Análise integrada SPI – 3º trimestre.....	70
5.4.4. Análise integrada SPI – 4º trimestre.....	72
5.5. Análise anual do Índice Padronizado de Vazão (SSI) com base em gráficos de tendência.....	74
5.5.1. Estação Americana Velha (4E-004).....	74
5.5.2. Estação Sarapu (4E-006).....	76
5.5.3. Estação São João – Rio do Peixe (5E-012).....	77
5.5.4. Estação Tatuí (4E-019).....	79
5.6. Avaliação da variabilidade anual Índice Padronizado de Vazão (SSI) a partir da análise de gráficos boxplot e da tabela de distribuição.....	81
5.7. Análise Trimestral do Índice Padronizado de Vazão (SSI) com base em gráficos de tendência das estações Americana Velha 4E004, Sarapu 4E006, São João – Peixe 5E012, Tatuí 4E019.....	83
5.7.1. 1º Trimestre.....	83

5.7.2. 2º Trimestre.....	85
5.7.3. 3º Trimestre.....	87
5.7.4. 4º Trimestre.....	89
5.8. Avaliação da variabilidade trimestral do Índice Padronizado de Vazão (SSI) a partir da análise de gráficos boxplot.....	91
5.8.1. Estação Americana Velha (4E-004).....	91
5.8.2. Estação Sarapu (4E-006).....	93
5.8.3. Estação São João – Peixe (5E-012).....	95
5.8.4. Estação Tatuí (4E-019).....	97
5.9. Integração dos índices SPI e SSI e implicações hidrológicas.....	99
5.10. Avaliação da normalidade estatística do SPI e SSI.....	102
6. CONCLUSÃO.....	105
REFERÊNCIAS.....	107

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas provocam eventos extremos principalmente no que diz respeito a precipitação e temperatura. Esses efeitos trazem diversos riscos para os seres humanos e para todas as outras formas de vida do planeta, pois desestabilizam o equilíbrio natural. Nos últimos anos tem se observado modificações no ciclo hidrológico impactando diretamente na disponibilidade e na qualidade da água, além de alterar a intensidade e a frequência dos eventos climáticos extremos, como por exemplo, inundações e secas. Enquanto as inundações são eventos imediatos e visíveis, as secas são fenômenos silenciosos que podem contribuir para a escassez de água, afetando o abastecimento e a agricultura, resultando em consideráveis impactos sociais, econômicos e ambientais (PEREIRA, 2022).

As secas são eventos climáticos naturais que acontecem quando há uma diminuição considerável das chuvas ao longo de um período de tempo. Para compreender melhor suas características como a frequência, intensidade, duração e a abrangência é necessário dispor de um conjunto detalhado de dados históricos e atualizados sobre as condições meteorológicas e hidrológicas de uma região específica (GONÇALVES *et al.* 2021). As secas são classificadas em: meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e socioeconômicas baseada no tipo de impacto que provocam. A seca meteorológica acontece quando há uma queda significativa na precipitação associada a um aumento considerável na evapotranspiração em relação à média histórica de uma região. Seus impactos afetam o sistema hidrológico e a utilização dos recursos hídricos. Já a seca hidrológica refere-se a um período em que os níveis de água dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos diminuem de forma considerável. Esse fenômeno está diretamente ligado a longos períodos de estiagem, ocasionando problemas em diversos setores da sociedade. As interações entre os tipos de seca meteorológica e hidrológica estão diretamente relacionadas aos impactos na agricultura resultando dessa forma na seca agrícola. A seca agrícola ocorre quando a falta de precipitação e a escassez de água no solo impactam na agricultura comprometendo tanto o plantio quanto a colheita (EMBRAPA, 2009).

As consequências das secas são profundas e diversas. Em primeiro lugar, a agricultura é gravemente afetada resultando na perda de colheitas e na escassez de alimentos, o que pode provocar aumento nos preços e até a fome especialmente em regiões mais vulneráveis. A redução dos níveis dos reservatórios, rios, lagos e oceanos

prejudica a vida aquática e diminui a biodiversidade. Para combater os efeitos das secas exige-se uma abordagem integrada, que envolva a conservação de recursos hídricos, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e a implementação de políticas públicas eficazes. A conscientização e a educação ambiental também desempenham um papel crucial para preparar as comunidades e mitigar os impactos futuros. Em suma, as secas representam um desafio crescente que exige ação coletiva, inovação e uma gestão responsável dos recursos naturais, a fim de garantir a sustentabilidade e a segurança hídrica para as futuras gerações.

Diante desse cenário, a escassez hídrica necessita do monitoramento de secas que pode ser realizado a partir de informações fornecidas por indicadores estatísticos denominados índices de secas. Os índices de seca foram criados com a finalidade de medir e identificar a frequência, duração e intensidade das secas. Eles são úteis para que haja um planejamento de ações emergenciais e para que desenvolvam ferramentas que possam ser utilizadas para controlar os riscos de ocorrência desse fenômeno (MCKEE *et al.*, 1993; GUTTMAN, 1998; WILKS, 2011; ANA, 2021)

Os índices de seca são representações numéricas que quantificam a severidade e amplitude das secas, facilitando a identificação e análise do fenômeno. Foram desenvolvidos com o objetivo de identificar, avaliar e monitorar a intensidade e a duração das secas. Eles são considerados importantes ferramentas, pois possibilitam o acompanhamento e a caracterização temporal e espacial do evento climático (MARENGO *et al.*, 2017; PBMC, 2016). Segundo VICENTE-SERRANO *et al.* (2012), os índices padronizados de seca possibilitam a comparação de episódios de seca entre regiões diversas, independentemente das características climáticas locais. Foram desenvolvidos diversos índices de mensuração de seca, no entanto, o Índice de Precipitação Padronizado – SPI (*Standardized Precipitation Index*) desenvolvido pelos autores MCKEE, DOESKEN e KLEIST em 1993, é um dos índices mais utilizados como ferramenta determinar as secas meteorológicas com o propósito de monitorar e avaliar eventos de seca. Esse índice foi empregado em diversos estudos em mais de 50 países ao redor do mundo devido a sua capacidade de mensurar o excesso e o déficit de precipitação em diversas escalas de tempo e espaço, possibilitando assim comparações entre regiões com características climáticas distintas com o objetivo de proporcionar uma análise mais precisa da seca (MACEDO, M.J.H.; GUEDES, R.V.S.; SOUZA, F.A.S.; DANTAS, F.R.C., 2010). Para o monitoramento da seca é

fundamental considerar mais de um indicador, pois a combinação de diferentes índices possibilita uma avaliação mais abrangente e precisa, aumentando a confiabilidade dos resultados (FERNANDES *et al.*, 2021). No entanto, o SPI não considera os efeitos da temperatura sobre a seca, apesar de diversos estudos indicarem a importância da temperatura nesse contexto.

O Índice Padronizado de Vazão – SSI (Standardized Streamflow Index) foi proposto por SHUKLA e WOOD (2008) com o propósito de investigação de secas hidrológicas, pois permite realizar comparações espaciais e temporais entre dados de vazão independentemente dos regimes fluviais e magnitudes de vazão. O índice de vazão é estatisticamente semelhante ao SPI utilizado na análise de seca meteorológica. O SSI é calculado como a diferença entre a vazão observada e a vazão média, dividida pelo desvio padrão para um período específico (FERNANDES, V. R.; CUNHA, A. P. M. A.; PINEDA, L. A. C. LEAL, K. R. D.; COSTA, LIDIANE, C.O.; BROEDEL, E.; FRANÇA, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J., 2021).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mudanças Climáticas e Eventos Extremos

As mudanças climáticas são hoje um dos maiores desafios ambientais do mundo, pois seus efeitos afetam cada vez mais os sistemas naturais e a sociedade. Diversos estudos indicam que o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera tem provocado aumento da temperatura média global resultando em alterações significativas nos padrões climáticos (MARENGO, 2014; PBMC, 2016).

De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016), o Brasil apresenta grande vulnerabilidade às mudanças climáticas especialmente em razão da forte dependência dos recursos hídricos e da agricultura em relação às condições meteorológicas. Entre os principais efeitos destacam-se as modificações nos regimes de precipitação, o aumento da temperatura e a intensificação de eventos climáticos extremos como secas e chuvas intensas.

Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021), as mudanças climáticas correspondem a alterações no clima através de variações na média ao longo do tempo. Essas mudanças têm causado impactos diretos no ciclo da água, afetando a disponibilidade de água na superfície e no subsolo, além de aumentar a frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos.

Nesse contexto, MARENGO *et al.* (2017) destacam que o aquecimento global tem contribuído para o aumento da evapotranspiração e para a irregularidade das chuvas, ampliando o risco de falta de água especialmente em bacias hidrográficas localizadas em regiões muito urbanizadas e com elevada demanda hídrica como aquelas presentes no estado de São Paulo.

De acordo com TUCCI (2015), eventos extremos podem ser entendidos como fenômenos hidrometeorológicos que ultrapassam o comportamento natural do sistema causando impactos significativos no uso da água. Entre esses eventos, destacam-se as secas caracterizadas por longos períodos de redução das precipitações e as cheias associadas a precipitações intensas concentradas em curtos intervalos de tempo.

Segundo VICENTE-SERRANO *et al.* (2010), nas últimas décadas tem-se observado a intensificação das secas em diversas regiões do mundo, associada ao aumento da temperatura e à maior perda de água para a atmosfera. Esses fatores contribuem para

a ampliação da severidade e da duração dos eventos de estiagem com consequência direta sobre a disponibilidade hídrica e os sistemas de abastecimento.

2.2. Eventos Climáticos Extremos e Recursos Hídricos no Estado de São Paulo

O estado de São Paulo apresenta elevada suscetibilidade frente aos eventos climáticos extremos em função da intensa urbanização, da concentração populacional e da elevada demanda hídrica para abastecimento público, indústria e agricultura (DAEE, 2019). As alterações no regime de chuvas e o aumento da frequência de períodos secos têm refletido diretamente no funcionamento hidrológico das bacias paulistas.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Ambientais do Estado de São Paulo (IPA, 2020), nas últimas décadas observou-se uma tendência de maior irregularidade das precipitações marcada pela concentração de chuva em eventos intensos e pelo aumento dos períodos de seca. Esse comportamento compromete a recarga dos aquíferos, reduz as vazões dos rios e intensifica conflitos pelo uso da água.

MARENGO e ALVES (2016) destacam que os episódios recentes de escassez hídrica registrados no Sudeste brasileiro, especialmente entre os anos de 2013 e 2015, evidenciaram a fragilidade dos sistemas de gestão de recursos hídricos diante de eventos climáticos extremos, ressaltando a importância do monitoramento hidrometeorológico e do planejamento da gestão da bacia hidrográfica.

Segundo dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, 2020), diversas bacias do interior paulista apresentaram reduções expressivas nas vazões mínimas durante períodos de estiagem prolongada, afetando tanto o abastecimento urbano quanto os usos múltiplos da água.

2.3. A Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10) possui grande importância ambiental, social e econômica no estado de São Paulo abrangendo municípios com elevado crescimento urbano e intenso desenvolvimento industrial e agrícola (CBH-SMT, 2020).

A bacia sofre forte pressão sobre os recursos hídricos devido à alta demanda por abastecimento público, sendo o Rio Sorocaba o principal manancial utilizado por

diversos municípios da região. De acordo com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Sorocaba e Médio Tietê (CBH-SMT, 2020), a disponibilidade hídrica regional já se encontra próxima ao limite, especialmente durante períodos de estiagem.

Estudos realizados por SILVA *et al.* (2018) e NUNES *et al.* (2021) indicam que a bacia tem apresentado grande variação de precipitações interanual com ocorrência frequente de períodos de chuva abaixo da média. Esses episódios resultam na redução das vazões do Rio Sorocaba e de seus principais afluentes, aumentando os riscos ao abastecimento humano e à preservação dos ecossistemas aquáticos. Segundo o Plano de Bacia da UGRHI-10 (CBH-SMT, 2020), os eventos de estiagem registrados nos últimos anos evidenciaram a necessidade de fortalecimento das estratégias de gestão integrada, incluindo o monitoramento contínuo das variáveis climáticas, a ampliação da segurança hídrica e o planejamento de ações de adaptação às mudanças climáticas.

Dessa forma, a análise da ocorrência e da intensidade dos eventos de seca na Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê é fundamental para compreender a dinâmica hidrológica da região.

3. OBJETIVO

Avaliar o comportamento das secas meteorológicas e hidrológicas na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba por meio do emprego de índices de seca padronizados durante o período de 1993 à 2023 de modo a verificar se a alteração nos padrões de precipitação influencia nos padrões de vazão.

4. METODOLOGIA

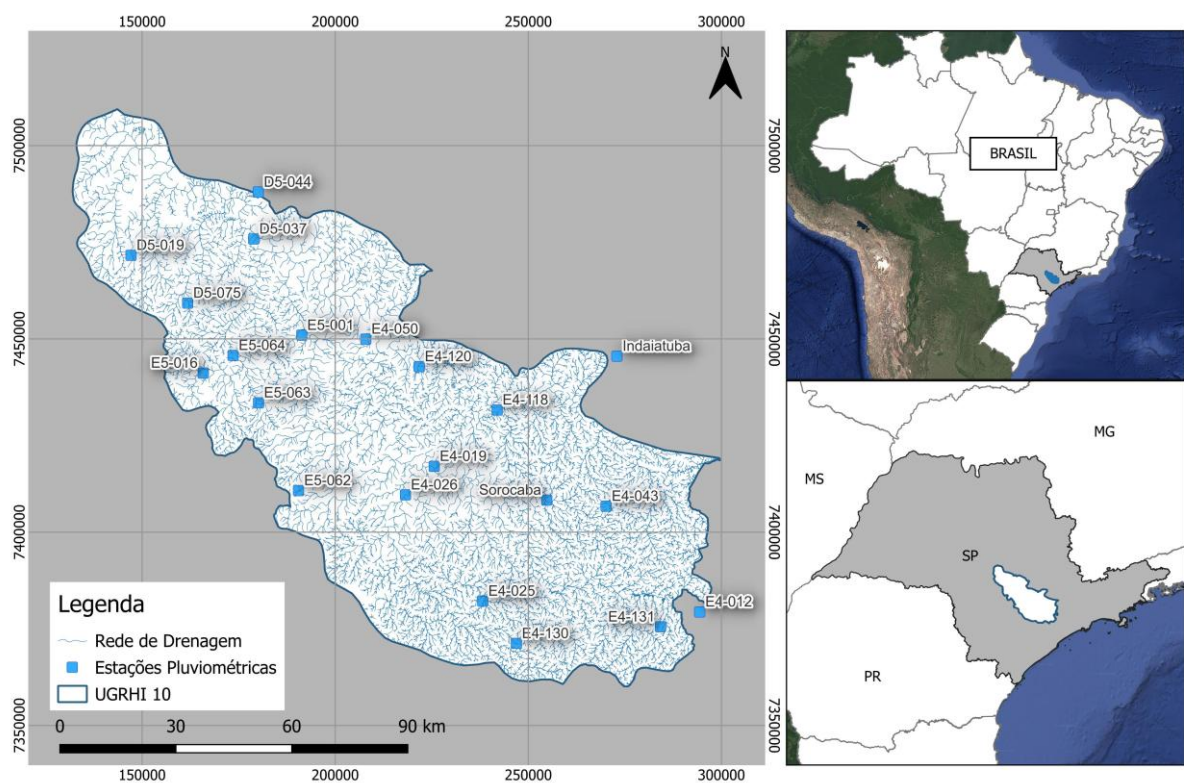
4.1 Área de estudo

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Sorocaba e Médio Tietê (BH-SMT) que está situada no centro-sudeste do Estado de São Paulo (Figura 1), cobrindo uma área de 5.273 km² e abrangendo 28 municípios dos quais 20 têm sua sede dentro de sua extensão territorial. O rio Sorocaba possui cerca de 230 km de comprimento, sendo o principal afluente pela margem esquerda do rio Tietê formado pelos ribeirões Sorocamirim e Sorocabuçu. Seus principais afluentes incluem os rios Sarapuí, Tatuí e da Onça, além dos ribeirões Aleluia e Guarapó. A represa de Itupararanga, localizada no trecho superior do rio Sorocaba próximo à sua nascente é o principal reservatório da bacia (ABREU; TONELLO, 2017).

4.2 Coleta e análise de dados

A pesquisa foi conduzida com base em dados secundários obtidos nos bancos de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, São Paulo, 2025), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025) e do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2025). Foram utilizados dados mensais de 21 postos pluviométricos (Figura 1), referentes ao período comum entre 1993 e 2023, selecionado por apresentar o maior número de registros contínuos. As estações pluviométricas utilizadas para o cálculo do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) estão descritas na Tabela 1.

Figura 1: Localização das estações pluviométricas da Bacia Hidrográfica do Sorocaba e Médio Tietê.



Fonte: o autor, 2025.

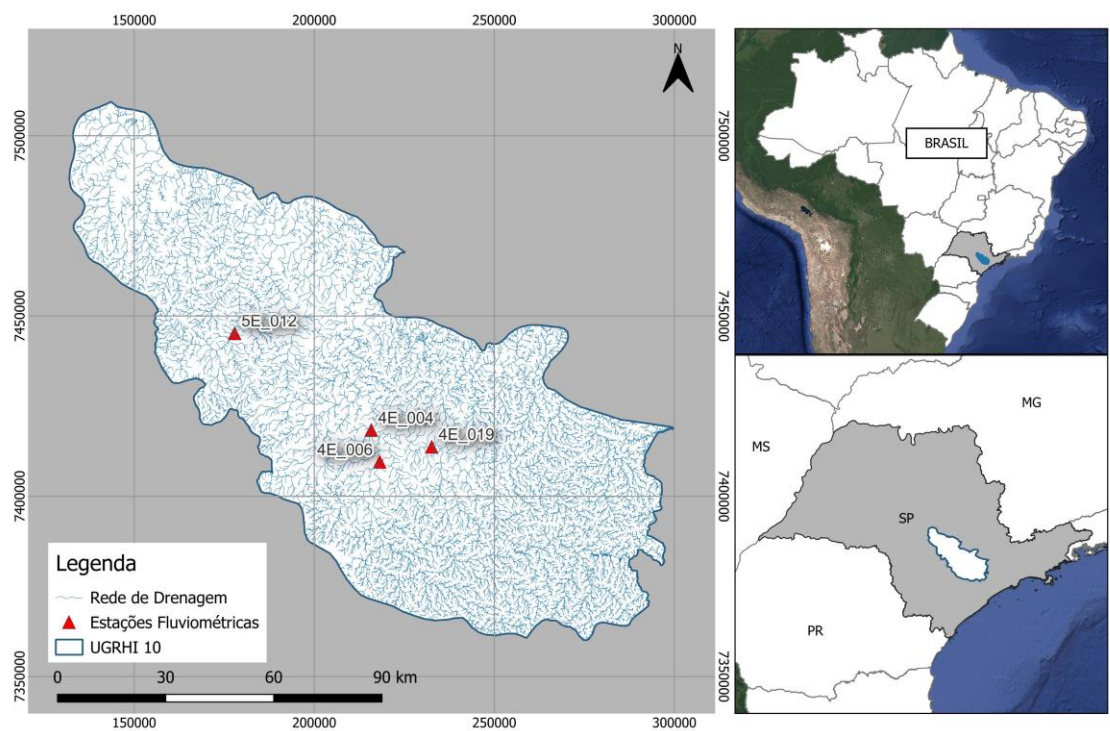
Tabela 1- Estações pluviométricas utilizadas na análise.

Estações Pluviométricas	Prefixo	Nome	Altitude(m)	Latitude	Longitude
BOTUCATU	D5-019	SAO JOAO DO MORRO VERMELHO	781	22° 49' 34"	48° 26' 15"
ANHEMBI	D5-037	ANHEMBI	520	22° 47' 40"	48° 07' 39"
ANHEMBI	D5-044	FAZENDA DO BARREIRO RICO	570	22° 41' 06"	48° 06' 49"
BOTUCATU	D5-075	BAIRRO ANHUMAS	529	22° 56' 26"	48° 17' 51"
COTIA	E4-012	CAUCAIA DO ALTO	936	23° 41' 00"	47° 01' 00"
IPERO	E4-019	IPERO	540	23° 20' 00"	47° 41' 00"
SALTO DE PIRAPORA	E4-025	SALTO DE PIRAPORA	600	23° 39' 00"	47° 34' 00"
TATUI	E4-026	BAIRRO SARAPU	530	23° 23' 55"	47° 45' 27"
MAIRINQUE	E4-043	DONA CATARINA	810	23° 26' 00"	47° 15' 00"
LARANJAL PAULISTA	E4-050	LARANJAL PAULISTA	490	23° 02' 00"	47° 51' 00"
PORTO FELIZ	E4-118	PORTO FELIZ	540	23° 12' 16"	47° 31' 18"
TIETE	E4-120	TIETE	470	23° 06' 00"	47° 43' 00"
PIEDADE	E4-130	SITIO FRUTOLANDIA	960	23° 45' 00"	47° 29' 00"
IBIUNA	E4-131	MATO DO GADO	950	23° 43' 00"	47° 07' 00"
CONCHAS	E5-001	CONCHAS	546	23° 01' 16"	48° 00' 41"
BOFETE	E5-016	BOFETE	539	23° 06' 17"	48° 15' 43"
TATUI	E5-062	CAMPO DO PAIOL	640	23° 23' 01"	48° 01' 40"
PORANGABA	E5-063	PORANGABA	554	23° 10' 37"	48° 07' 27"
BOFETE	E5-064	FAZENDA SANTA TEREZINHA	590	23° 03' 54"	48° 11' 09"
SOROCABA	2347059	EDEN (PIRAJIBU)	570	23° 25' 00"	47° 24' 00"
INDAIATUBA	2347007	INDAIATUBA	630	23° 05' 00"	47° 13' 00"

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para a análise de vazão, empregaram-se dados de quatro estações fluviométricas (Figura 2) no mesmo período de 1993–2023. As estações fluviométricas empregadas para o cálculo do Índice Padronizado de Vazão (SSI) estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 2: Localização das estações fluviométricas da Bacia Hidrográfica do rio Sorocaba e Médio Tietê.



Fonte: o autor, 2025

Tabela 2- Estações fluviométricas utilizadas na análise.

Estações Fluviométricas	Prefixo	Município	Curso d'água	Área (Km ²)	Latitude	Longitude
AMERICANA VELHA	4E- 004	TATUÍ	RIO SOROCABA	3.924,00	23° 19' 10"	47° 46' 44"
BAIRRO SARAPU	4E- 006	TATUÍ	RIO SARAPUÍ	1.542,00	23° 23' 58"	47° 45' 27"
CONCHAS	5E- 012	SAO JOAO	RIO DO PEIXE	584,00	23° 04' 13"	48° 08' 38"
CORUMBA	4E- 019	IPERÓ	RIO SOROCABA	2.018,00	23° 21' 51"	47° 36' 57"

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.3 Índices Padronizados

4.3.1. Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) é um instrumento utilizado para detectar secas com base no déficit de precipitação considerando diferentes escalas temporais. Ele é amplamente empregado no monitoramento da duração e intensidade de eventos de seca. Sua metodologia de cálculo foi originalmente proposta por MCKEE *et al.* (1993) e, posteriormente, aprimorada por diversos pesquisadores (OLIVEIRA *et al.*, 2024).

O cálculo do SPI exige uma série de dados com no mínimo trinta anos. Ele é realizado com base nos dados mensais de precipitação acumulada para um intervalo de tempo de n meses. Primeiramente, essas séries são ajustadas por meio de uma distribuição Gama. Após esse ajuste são calculadas as probabilidades de ocorrência de cada valor de precipitação. Em seguida, utiliza-se a inversa da distribuição normal para determinar os desvios de precipitação em relação à média para os intervalos analisados (SANTOS, 2020; MARTINS *et al.*, 2015; PATEL *et al.*, 2007; MCKEE *et al.*, 1993).

$$SPI = \frac{(t - C_0 + C_1t + C_2t^2)}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} \quad \text{Se } 0 < H(x) < 0,5. \quad (1)$$

$$SPI = \frac{(t - C_0 + C_1t + C_2t^2)}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} \quad \text{Se } 0,5 < H(x) < 1. \quad (2)$$

em que $t = \sqrt{\ln [1 / (H(x))^2]}$ para $0 < H(x) < 0,5$ e $t = \sqrt{\ln [1 / (1 - (H(x))^2)]}$ para $0,5 < H(x) < 1$; $H(x)$ = distribuição de probabilidade acumulada; C_0 , C_1 , C_2 , d_1 , d_2 e d_3 são constantes e equivalem respectivamente aos valores: 2,515517; 0,802853; 0,010328; 1,432788; 0,189269; 0,001308. Após o cálculo do SPI, foi determinada para a escala mensal, a frequência em número de meses das categorias definidas pelos intervalos deste índice. A Tabela 3 apresenta a classificação dos períodos secos e chuvosos, conforme os critérios estabelecidos por MCKEE *et al.* (1993).

Tabela 3. Classificação dos períodos secos e úmidos de acordo com MCKEE *et. al.* (1993).

SPI	Classificação
$\geq 2,00$	Extremamente úmido
1,99 a 1,50	Muito úmido
1,49 a 1,00	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

4.3.2. Índice Padronizado de Vazão (SSI)

De acordo com MCVICAR *et al.* (2012), o Índice Padronizado de Vazão (SSI) é uma ferramenta eficaz para a análise e comparação das condições de seca hidrológica em diferentes regiões. Derivado do Índice Padronizado de Precipitação (SPI), o SSI incorpora o efeito do armazenamento de água no solo e nas bacias hidrográficas (OLIVEIRA *et. al.*, 2024).

O índice foi proposto por SHUKLA e WOOD (2008) com base na metodologia do SPI desenvolvida por MCKEE *et al.* (1993) com o objetivo de avaliar o impacto das secas sobre a vazão dos rios. Seu cálculo segue os mesmos princípios estatísticos do SPI, o que garante simplicidade, padronização e permite a comparação direta entre variáveis meteorológicas e hidrológicas (TURKAN *et. al.*, 2021).

$$SSI = (X_i - X_j) / \sigma \quad (1)$$

$$SPI = (X_i - X_m) / \sigma \quad (2)$$

Onde X_i para SSI (m^3/s) e X_i para SPI (mm) são a vazão e a precipitação em um período de tempo de referência, respectivamente; X_j (m^3/s) e X_m (mm) são a vazão média e a precipitação média, respectivamente; e σ é o desvio padrão.

Foi realizada uma comparação entre os índices padronizados de seca empregados neste estudo, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparativo dos Índices Padronizados de Seca

Índice	Variável Base	Equação Principal	Distribuição Ajustada	Referência
SPI (Standardized Precipitation Index)	Precipitação acumulada em n meses	$SPI_t = \Phi^{-1}(F(P_t))$ • P_t: precipitação acumulada • $F(P_t)$: função de distribuição acumulada	Gama (ou Pearson Tipo III)	McKee et al. (1993)
SSI (Standardized Streamflow Index)	Vazão de rios (mensal ou diária)	$SSI_t = \Phi^{-1}(F(Q_t))$ • Q_t: vazão observada • $F(Q_t)$: distribuição acumulada da vazão	Log-Normal, Gama ou Pearson Tipo III	Shukla e Wood (2008)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Legenda:

Φ^{-1} : Inversa da função de distribuição normal padrão (z-score)

$F(X)$: Distribuição acumulada da variável X

P_t : Precipitação no tempo t

Q_t : Vazão no tempo t

4.3.3. O Teste de Mann-Kendall (MK)

A significância da tendência foi analisada através de um método proposto por Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975). Trata-se de um teste não paramétrico utilizado para detectar tendências em séries temporais. Sob a hipótese de estabilidade da série, assume-se que os valores sejam independentes. Por essa razão, o teste é considerado robusto frente à presença de valores extremos e pouco sensível à ausência de dados em séries incompletas (JÚNIOR *et. al.*, 2020) estatística do teste possui média igual a zero e sua variância (S) é expressa da seguinte forma:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{ sinal } (x_j - x_i) \quad (1)$$

Em que S representa a soma dos sinais das diferenças entre os pares de valores $x_j - x_i$; sendo x_j o primeiro valor após x_i , e n o número total de dados da série temporal. Atribui-se os seguintes valores para cada par de dados:

$$\text{Sinal} = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

A distribuição de probabilidade da estatística S aproxima-se da distribuição normal à medida que o tamanho da amostra (n) aumenta, apresentando média igual a zero e variância expressa por:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (2)$$

Em que “ t_p ” representa o número de dados com valores iguais em um determinado grupo e “ q ” corresponde ao número total de grupos com valores repetidos na série de dados. A estatística do teste de Mann-Kendall baseia-se no valor da variável Z calculado conforme a Equação 4:

$$Z = \frac{s+m}{\sqrt{\text{var}(S)}} \quad (3)$$

Quando $S=0$, a estatística Z também assume o valor zero. O resultado do teste Z indica a presença de tendência na série temporal: valores positivos de Z apontam para uma tendência crescente, enquanto valores negativos indicam uma tendência decrescente.

Para melhor visualização e compreensão dos resultados, realizou-se a análise estatística por meio de gráficos boxplot.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

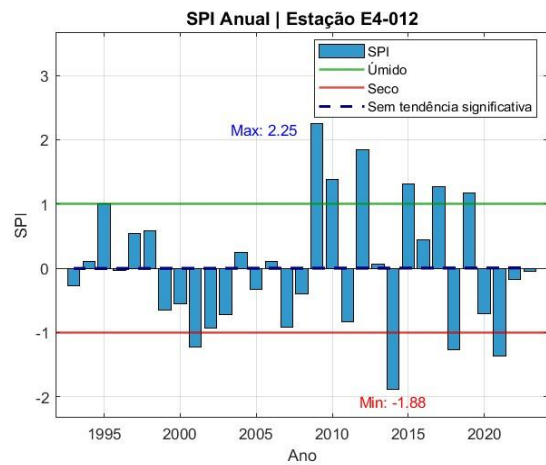
5.1. Análise anual do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) com base em gráficos de tendência

A análise anual das séries históricas de precipitação aplicada em diversas estações pluviométricas da Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê no período de 1993 a 2023, foi realizada por meio do cálculo SPI (Índice Padronizado de Precipitação) desenvolvido por MCKEE *et al.* (1993), conforme demonstrado nas figuras das estações estudadas abaixo.

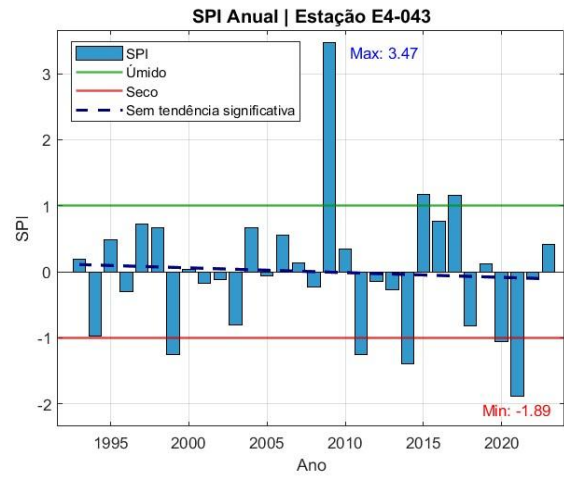
Observou-se na Figura 3 que o teste estatístico de Mann-Kendall não revelou tendências estatisticamente negativas durante o período considerado (1993-2023) com indicativos de agravamento de seca, demonstrando apenas variações anuais sem padrão significativo de eventos de seca. Trabalhos como os de BLAIN (2014) BLAIN *et al.* (2019) identificaram elevada variabilidade interanual da precipitação sem tendências estatisticamente significativas de intensificação das secas, comportamento semelhante ao observado neste estudo a partir do teste de Mann-Kendall. Os gráficos das quatro estações apontaram uma distribuição uniforme, porém com índices abaixo de -1,0 (linha vermelha) e acima de 1,0 (linha verde) ultrapassando os limites (1,00 e -1,00) segundo a classificação de MCKEE (1993). A ocorrência de eventos extremos isolados como o ano extremamente úmido de 2008 na estação de Mairinque E4-043 (b) com SPI 3,4 é compatível com os resultados de COELHO *et al.* (2016) e GRIMM *et al.* (2021), que associam episódios de chuvas intensas no Sudeste do Brasil à atuação de sistemas atmosféricos de grande escala como a ZCAS e eventos de El Niño.

Quanto aos períodos secos recentes, especialmente em 2021, quando a estação Piedade E4-130 (d) atingiu condição de seca extrema SPI de -2,19, os resultados foram semelhantes aos estudos de CUNHA *et al.* (2019) e da ANA (2021) que apontaram esse intervalo como um dos mais críticos em termos de escassez hídrica no Sudeste brasileiro. Entretanto, diferentemente de alguns trabalhos que identificaram tendências significativas de agravamento das secas como o de ALVES *et al.* (2022) os resultados dessas estações indicaram ausência de tendência estatística evidenciando predominância da variabilidade climática interanual na bacia estudada.

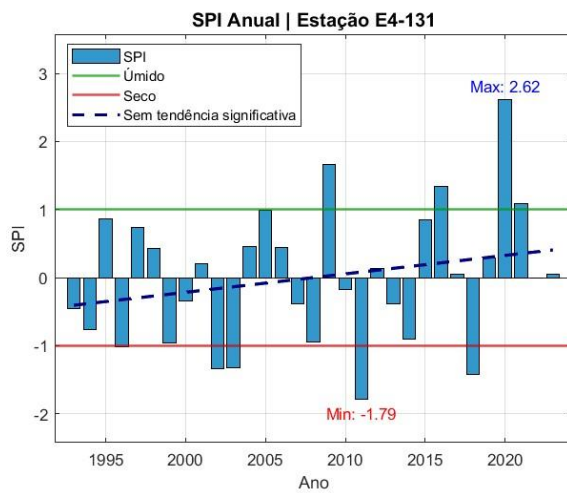
Figura 3. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Cotia E4-012 (a), Mairinque E4-043 (b), Ibiúna E4-131 (c), Piedade E4-130 (d).



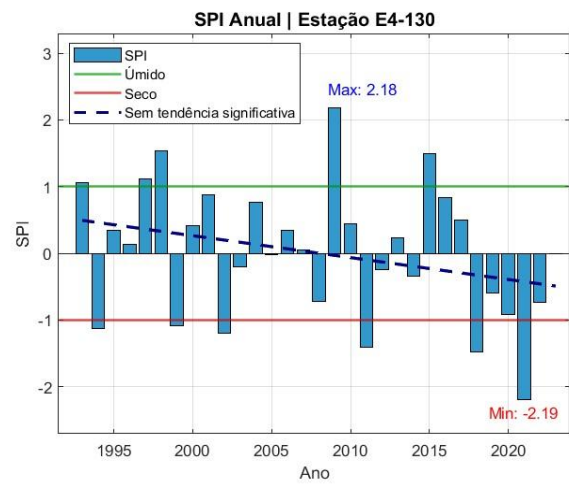
a)



b)



c)



d)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

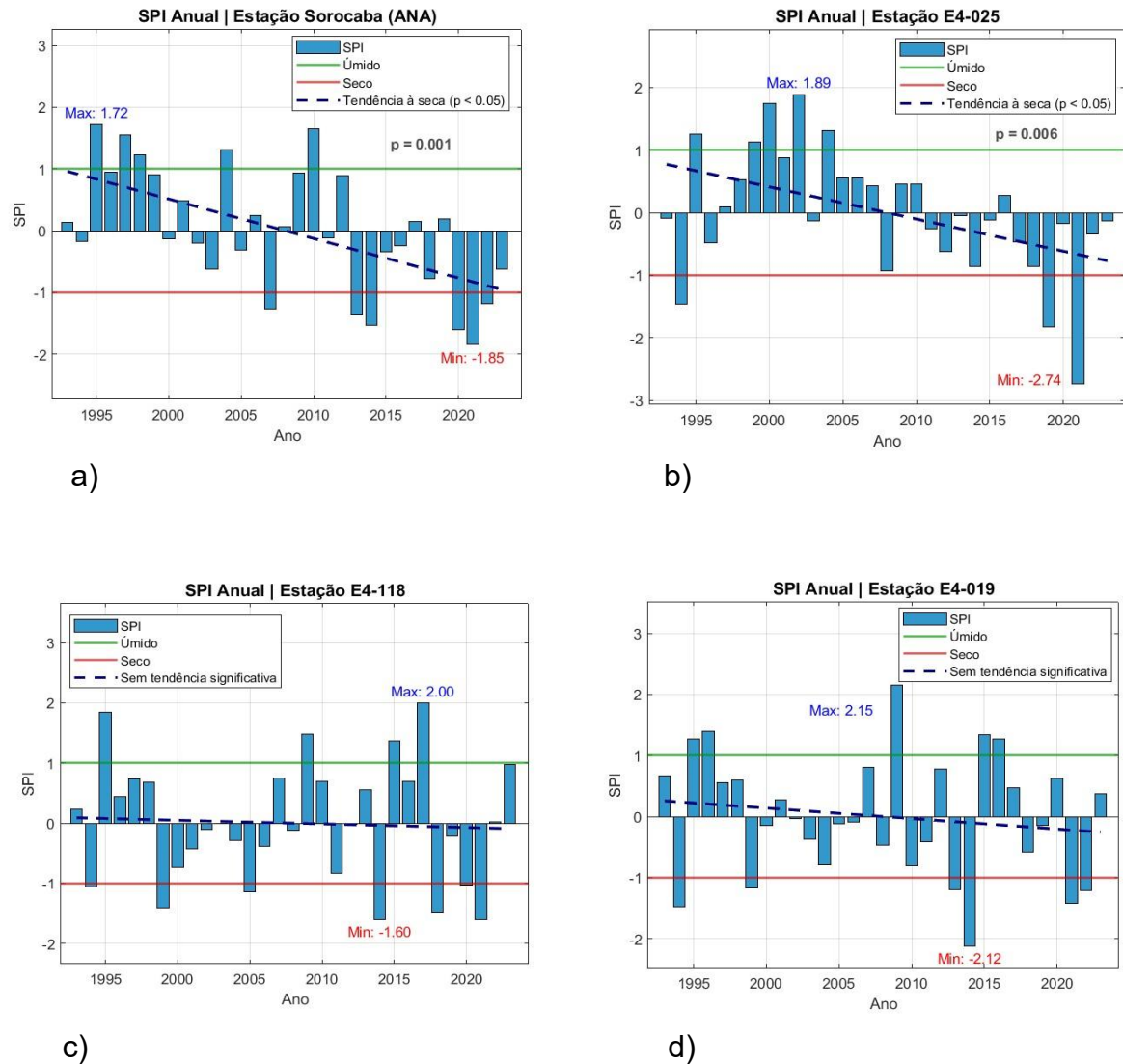
Os gráficos representados pela Figura 4, revelaram comportamentos distintos entre as estações pluviométricas. Os resultados indicaram em algumas das localidades, a presença de tendências estatisticamente significativas de intensificação das secas, enquanto outras regiões apresentaram um comportamento mais estável entre os anos.

As estações Sorocaba (e) e Salto de Pirapora E4025 (f) apresentaram tendências negativas estatisticamente significativas nos valores anuais de SPI ($p = 0,001$ e $p = 0,006$, respectivamente), evidenciando um agravamento nas condições de seca ao longo do tempo. O aumento da frequência de anos com SPI negativo aliado à intensificação dos eventos de seca observados a partir dos anos 2000 apontou um cenário de redução da umidade disponível nessas regiões. Esse cenário pode estar relacionado tanto a mudanças climáticas globais quanto a transformações locais como a urbanização, mudanças no uso do solo e degradação ambiental (MARENGO *et al.*, 2020; ALVALÁ *et al.*, 2019).

A estação Salto de Pirapora E4025 (f) se destacou por apresentar o menor valor de SPI (-2,74) entre todas as analisadas no ano de 2021, evidenciando sua vulnerabilidade a eventos de estiagem extrema. A queda consistente nos valores de SPI ao longo do tempo aponta para uma tendência de seca crônica com possíveis impactos negativos sobre os recursos hídricos e a produção agrícola.

Em contraste, as estações Porto Feliz E4-118 (g) e Iperó E4-019 (h) não apresentaram tendências estatisticamente significativas. No entanto, a estação Iperó E4-019 (h) registrou o maior valor de SPI positivo (2,15) em 2009, indicando a ocorrência de um ano excepcionalmente úmido. Essa variação reflete em uma oscilação natural entre períodos secos e chuvosos. A distribuição dos valores de SPI nessas duas localidades foi relativamente equilibrada, o que pode estar associado a uma maior estabilidade climática regional.

Figura 4. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Sorocaba (a), Salto de Pirapora E4-025 (b), Porto Feliz E4-118 (c), Iperó E4-019 (d).



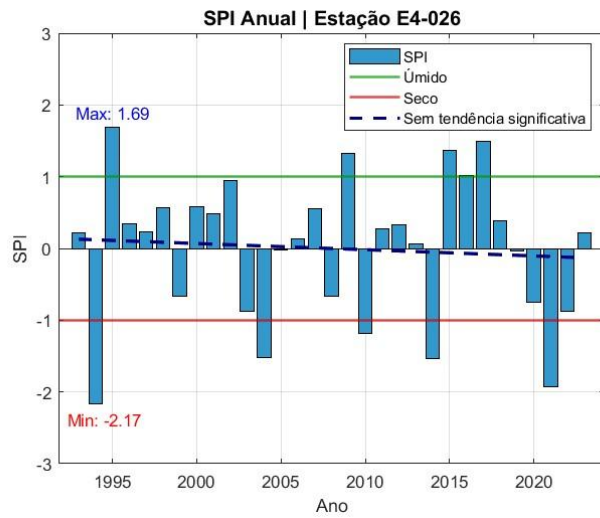
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O comportamento observado na estação Laranjal Paulista E4050 (l) da Figura 5 apresentou tendência negativa estatisticamente significativa do SPI ($p = 0,008$) e é compatível com resultados encontrados pelos autores CUNHA *et al.* (2019), MARENGO *et al.* (2020) e ALVES *et al.* (2022), que identificaram aumento na frequência e severidade das secas, especialmente a partir dos anos 2000, em áreas do Sudeste brasileiro. A intensificação dos valores negativos do SPI e a ocorrência de eventos extremos recentes como o registrado em 2021 em que o SPI resultou em $-2,12$ caracterizado como seca extrema conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993) também são amplamente descritas na literatura como resultado da interação entre a variabilidade climática natural e alterações nas condições atmosféricas da região da bacia.

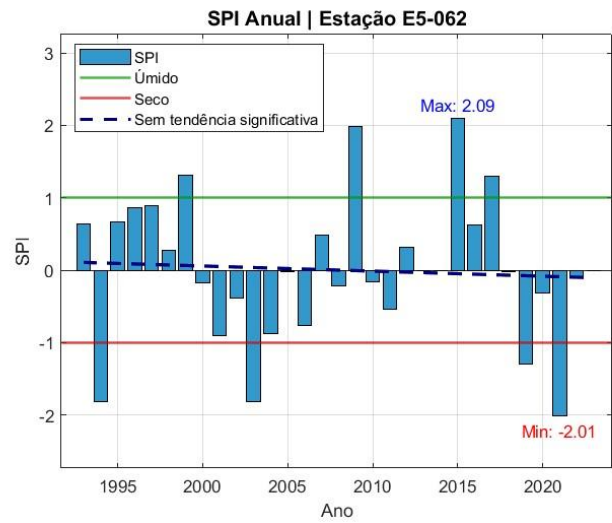
Por outro lado, a ausência de tendência estatisticamente significativa nas estações Tatuí E4026 (i), Tatuí E5062 (j), Tietê E4120 (k), coincide com estudos como os de BLAIN (2014) e BLAIN *et al.* (2019) que destacaram que mesmo diante da ocorrência de eventos extremos muitas séries pluviométricas do estado de São Paulo não apresentaram tendência linear significativa. A presença de valores extremos isolados como a seca intensa observada na estação Tatuí E4026 (i) com menor valor de SPI ($-2,17$) e o evento extremamente úmido registrado na estação Tatuí E5062 (j) com SPI ($2,09$), reforça a elevada variabilidade interanual da precipitação, característica recorrente apontada por GRIMM *et al.* (2021).

Dessa forma, os resultados evidenciaram um comportamento espacialmente heterogêneo no qual uma estação apresentou tendência significativa de seca enquanto as outras foram dominadas por flutuações interanuais.

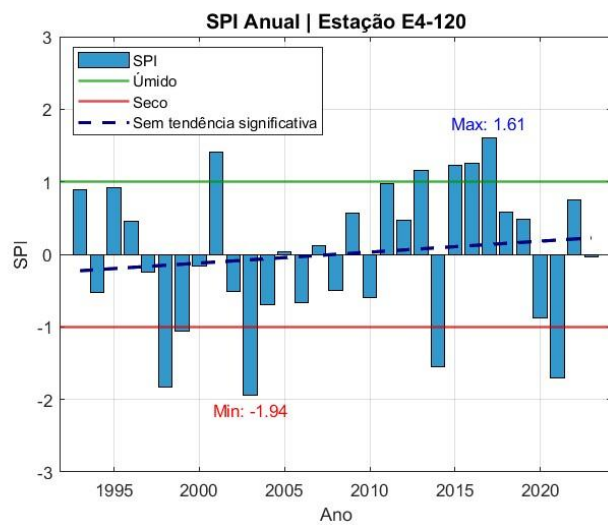
Figura 5. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Tatuí E4026 (a), Tatuí E5062 (b), Tietê E4120 (c), Laranjal Paulista E4050 (d).



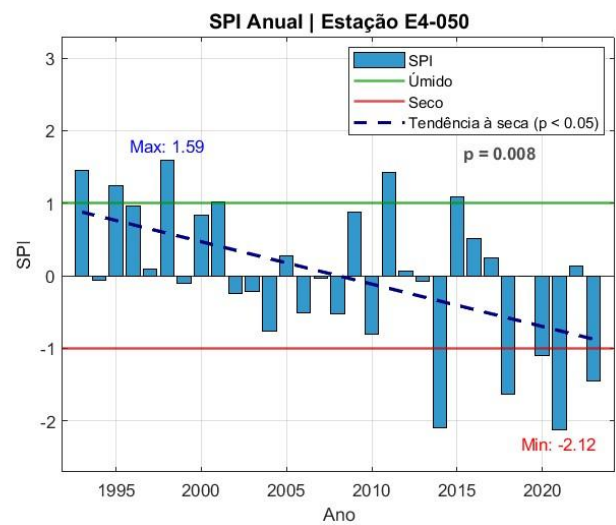
a)



b)



c)



d)

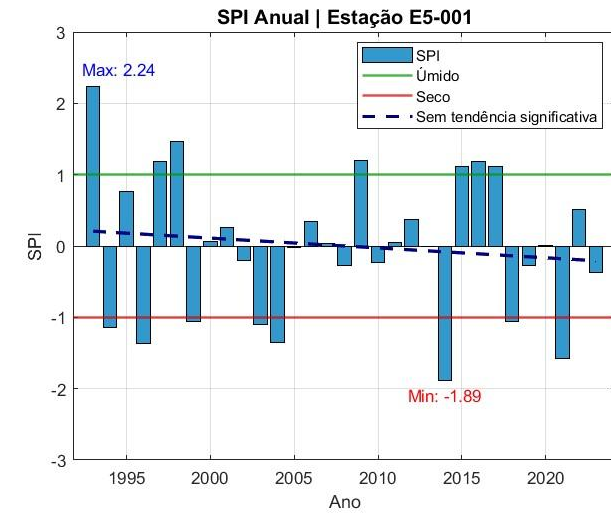
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A ausência de tendências estatisticamente significativas nas quatro estações analisadas na Figura 6 é semelhante aos resultados encontrados por SANTOS *et al.* (2020) e SILVA *et al.* (2021), que identificaram elevada variabilidade interanual da precipitação em bacias hidrográficas do Sudeste do Brasil. Esses autores destacaram que oscilações anuais do SPI refletem predominantemente a variabilidade climática natural.

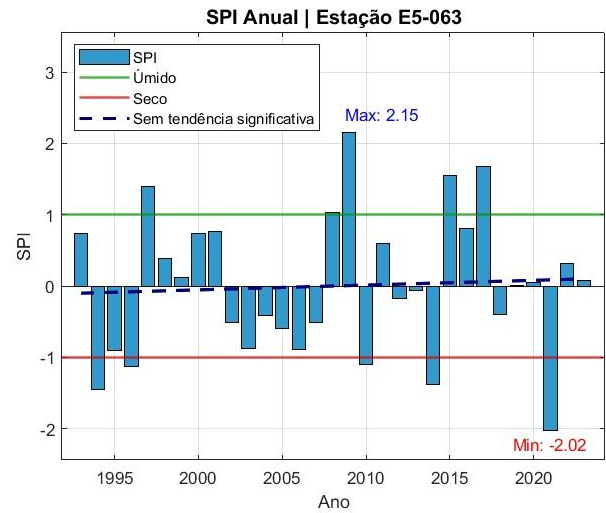
A ocorrência de eventos extremos pontuais como a seca extrema (SPI -2,02) registrada no ano de 2021 na estação Porangaba E5063 (b) e o evento de extrema umidade (SPI = 2,29) observado em 2009 na estação Bofete E5016 (c), segundo a classificação de MCKEE *et al.* (1993) foi descrito por SOUZA *et al.* (2019) e TEIXEIRA *et al.* (2022) que destacaram a alternância entre períodos secos e úmidos mesmo em regiões onde não se observa tendência estatística significativa.

Dessa forma, os resultados da análise dessas estações indicaram relativa estabilidade do regime de precipitação ao longo da série histórica, embora marcada por extremos climáticos pontuais.

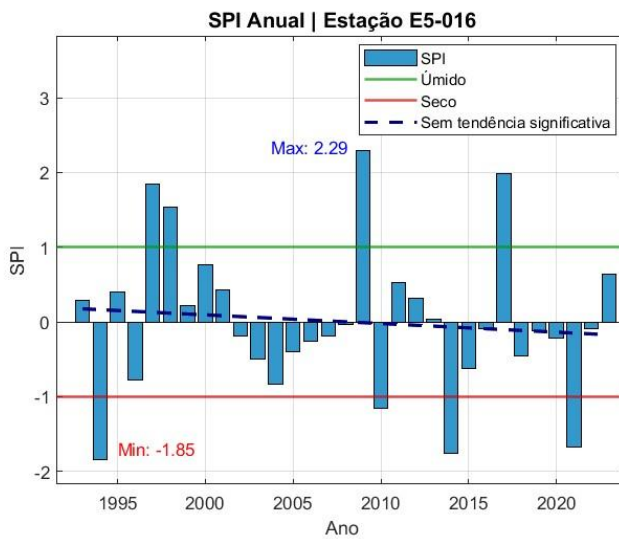
Figura 6. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Conchas E5001 (a), Porangaba E5063 (b), Bofete E5016 (c) e Bofete E5064 (d).



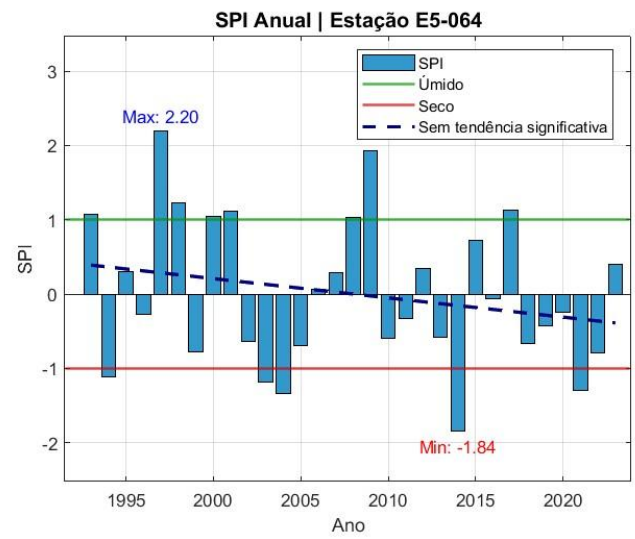
a)



b)



c)



d)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

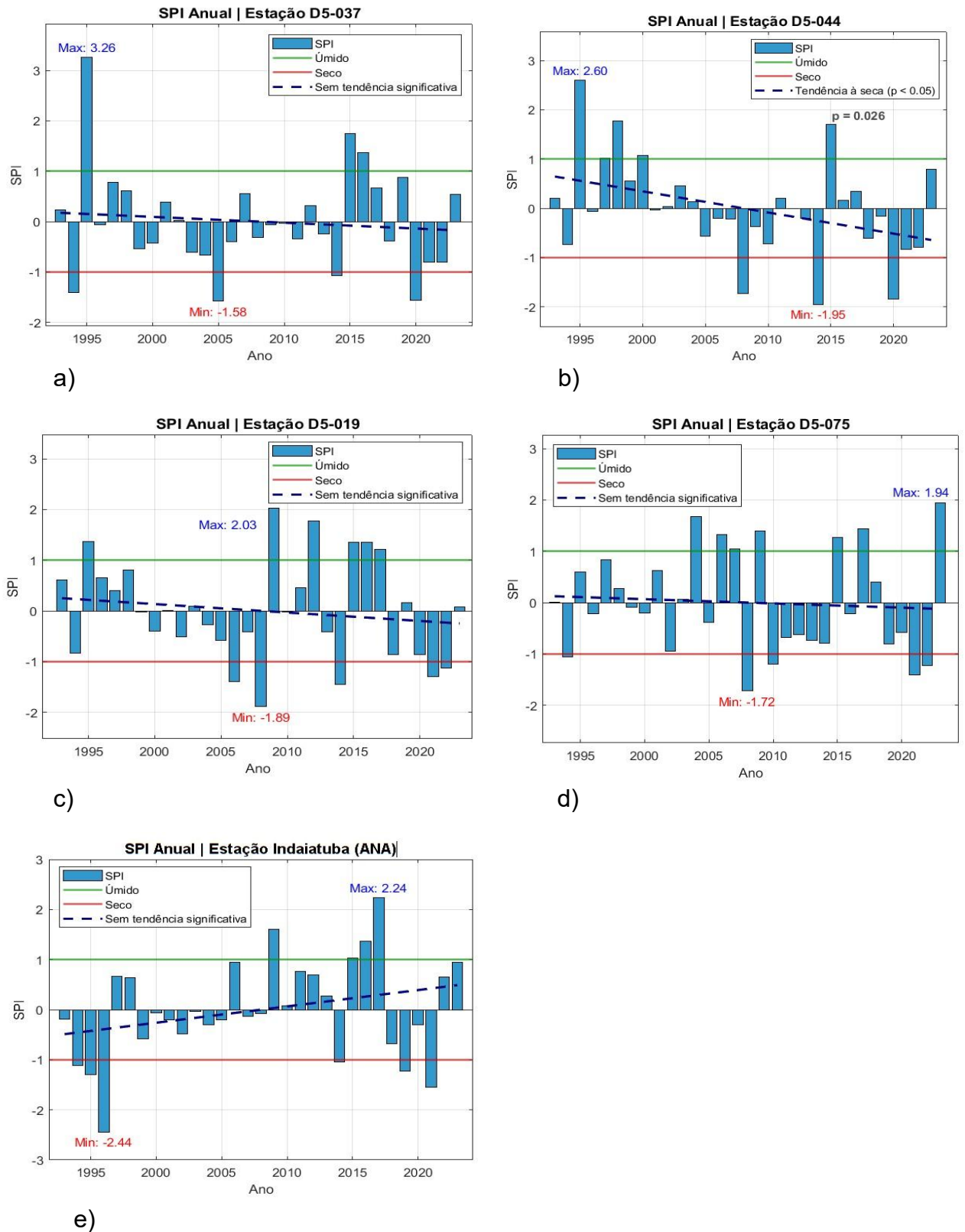
Entre as cinco estações analisadas na Figura 7, apenas a estação Anhembi D5044 (b) apresentou tendência negativa estatisticamente significativa ($p = 0,026$), indicando aumento progressivo da frequência e da intensidade dos eventos de seca ao longo da série histórica. Observou-se predominância de valores negativos do SPI, sobretudo a partir dos anos 2000 com recorrência de eventos classificados como seca moderada e seca severa, conforme a classificação proposta por MCKEE *et al.* (1993). Esse comportamento sugeriu um possível processo de redução da umidade na região.

As estações Botucatu D5019 (c), Botucatu D5075 (d), apresentaram tendências levemente negativas, porém sem significância estatística. Embora estatisticamente não significativas, essas ocorrências indicam um aumento da recorrência de condições secas, o que pode representar um sinal inicial de transição para um regime climático mais seco.

A estação Anhembi D5037 (a) destacou-se por apresentar o maior valor de SPI da série (3,26), caracterizando o ano de 1996 como extremamente úmido, conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993). Em contraste, a estação Indaiatuba (e) registrou o menor valor de SPI (-2,44), enquadrando o mesmo ano na categoria de seca extrema. A ocorrência simultânea de extremos opostos entre diferentes estações evidencia a elevada variabilidade espacial e interanual da precipitação na área de estudo.

De modo geral, a série histórica revelou significativa variabilidade interanual, marcada por eventos extremos de umidade e de seca. Apesar disso, os anos mais recentes apresentaram predominância de valores positivos do SPI, classificados como condições normais a úmidas, o que pode indicar uma possível recuperação temporária das condições de umidade na região. Assim, o resumo dos eventos de seca por município encontra-se apresentados na Tabela 4.

Figura 7. Precipitação média anual (mm) nos postos pluviométricos: Anhembi D5037 (a), Anhembi D5044 (b), Botucatu D5019 (c), Botucatu D5075 (d) e Indaiatuba (e).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Tabela 4 apresenta o resumo dos eventos de seca por município e sua classificação do SPI de acordo com o MCKEE (1993).

Tabela 4. Resumo de secas por município e por classificação de SPI

Município	Seca Moderada	Seca Severa	Seca extrema	Total de Eventos	Tendência
Cotia (E4-012)	3	1	0	4	NS
Mairinque (E4-012)	6	0	0	6	NS
Ibiúna (E4-131)	4	1	0	5	NS
Piedade (E4-130)	5	0	1	6	NS
Sorocaba	3	3	0	6	P=0,001
Salto de P. (E4-025)	1	1	1	3	P=0,006
Porto Feliz (E4-118)	5	2	0	7	NS
Iperó (E4-019)	4	1	1	6	NS
Tatuí (E4-026)	1	3	1	5	NS
Tatuí (E5-062)	1	2	1	4	NS
Tietê (E4-120)	1	4	0	5	NS
Laranjal P. (E4-050)	2	1	2	4	P=0,008
Conchas (E5-001)	6	2	0	8	NS
Porangaba (E5-063)	4	0	1	5	NS
Bofete (E5-016)	1	3	0	4	NS
Bofete (E5-064)	4	1	0	5	NS
Anhembi (D5-037)	2	2	0	4	NS
Anhembi (D5-044)	0	3	0	3	P=0,026
Botucatu (D5-019)	4	1	0	5	NS
Botucatu (D5-075)	4	1	0	5	NS
Indaiatuba	5	0	1	6	NS

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Legenda: NS - Não significativo

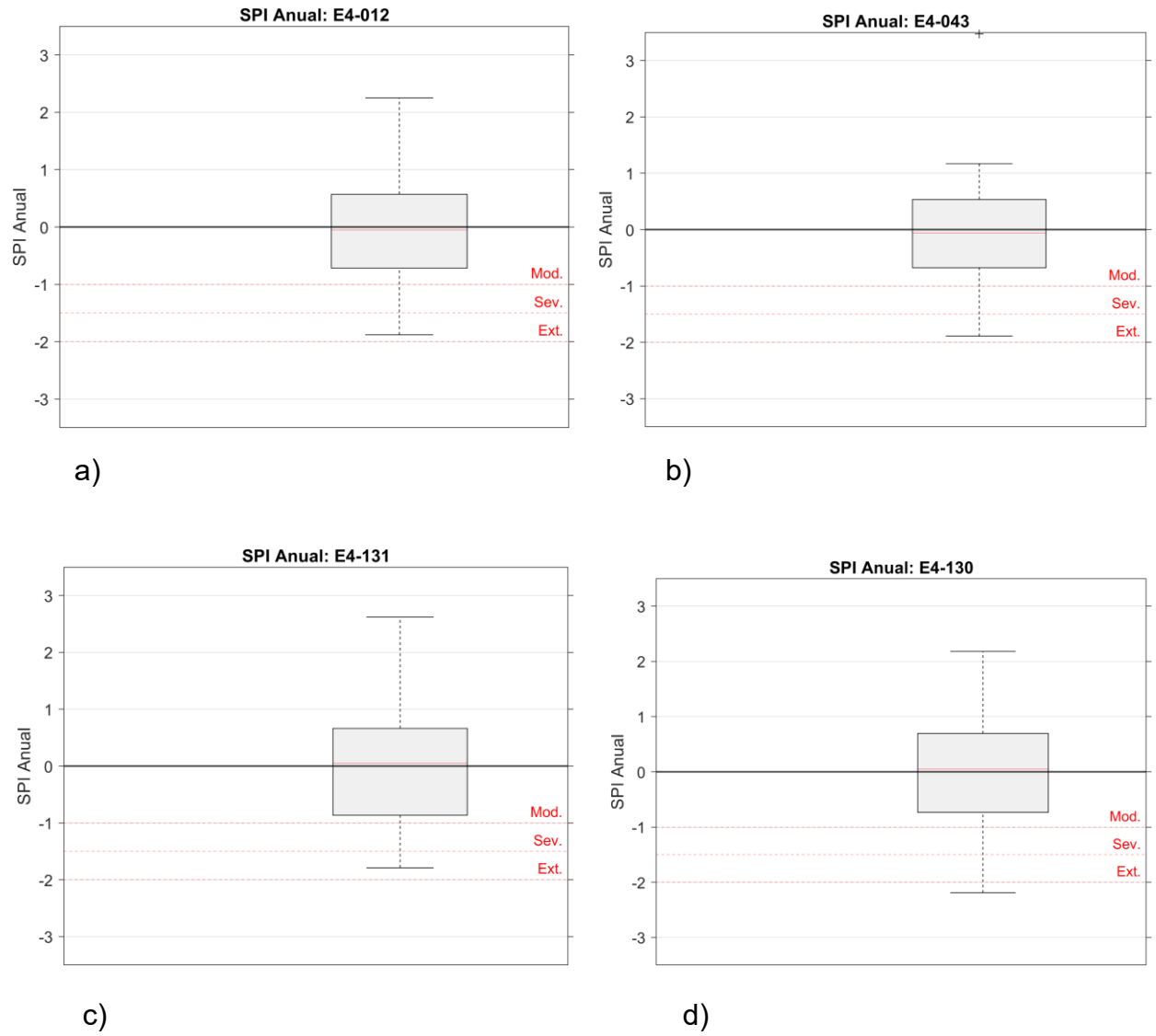
5.2. Avaliação da variabilidade anual do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) a partir da análise de gráficos boxplot e da tabela de distribuição

A leitura dos gráficos boxplots do SPI anual das estações Cotia E4-012 (a), Mairinque E4-043 (b), Ibiúna E4-131 (c), Piedade E4-130 (d) na Figura 8, mostrou medianas próximas de zero e distribuição dentro da normalidade indicando que em escala anual há alternância entre anos secos e úmidos sem predomínio persistente de uma condição específica. Esse comportamento é coerente com estudo de SVOBODA *et al.* (2012) que destacaram a capacidade do índice em representar a variabilidade climática em diferentes escalas de tempo.

Os limites inferiores alcançaram valores de SPI próximos ou abaixo de $-2,0$ e os superiores ultrapassando $+2,0$ revelando eventos extremos associados a secas severas e períodos de umidade elevada segundo a classificação de MCKEE *et al.* (1993).

Diferenças na altura das caixas indicaram variações na distribuição irregular das chuvas entre as estações. A recorrência de valores negativos de SPI abaixo de $-1,0$ nas quatro estações demonstrou que as secas são eventos frequentes mesmo que intercaladas por períodos úmidos. Esse padrão está de acordo com estudos regionais sobre a variabilidade das chuvas no Sudeste brasileiro conforme observado por NOBRE *et al.* (2016).

Figura 8. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Cotia E4-012 (a), Mairinque E4-043 (b), Ibiúna E4-131 (c) e Piedade E4-130 (d).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

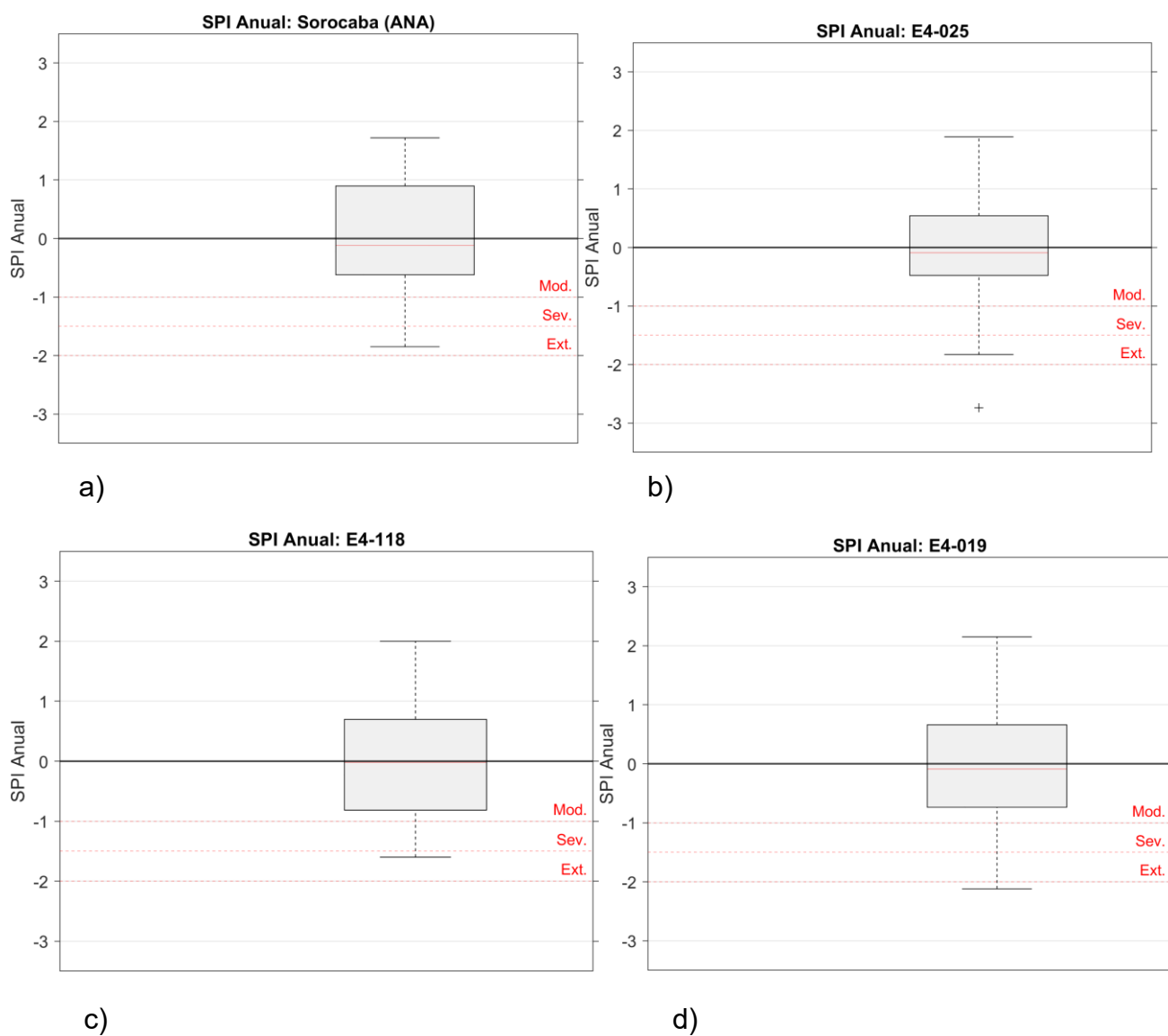
A análise dos boxplots do SPI anual das estações Sorocaba (a), Salto de Pirapora E4-025 (b), Porto Feliz E4-118 (c), Iperó E4-019 (d) notou-se que nas estações da Figura 9, a mediana está ligeiramente deslocada para valores negativos. Isso indicou maior quantidade de anos com SPI negativo, sugerindo leve predominância de condições secas ao longo da série. Esse tipo de assimetria é descrito por LANEN *et al.* (2016) como indicativo de persistência de secas em séries hidrológicas.

Na estação Salto de Pirapora E4-025 (b), observou-se a presença de um outlier abaixo de -2,5, caracterizando um evento de seca extrema isolado fora do padrão da distribuição conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993). A ocorrência de valores tão discrepantes é apontada por VILLARINI *et al.* (2011) como característica de eventos hidrometeorológicos raros, associados a condições atmosféricas excepcionais.

As caixas mais altas, especialmente em Porto Feliz E4-118 (c) e Iperó E4-019 (d), indicaram maior instabilidade pluviométrica anual, interpretação semelhante à abordagem de KATZ (2010), evidenciando maior instabilidade climática nessas estações.

Assim, a análise das estações da Figura 9 indicou não apenas uma variabilidade interanual, mas também uma leve dominância de anos secos e presença de evento extremo isolado.

Figura 9. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Sorocaba (a), Salto de Pirapora E4-025 (b), Porto Feliz E4-118 (c), Iperó E4-019 (d).



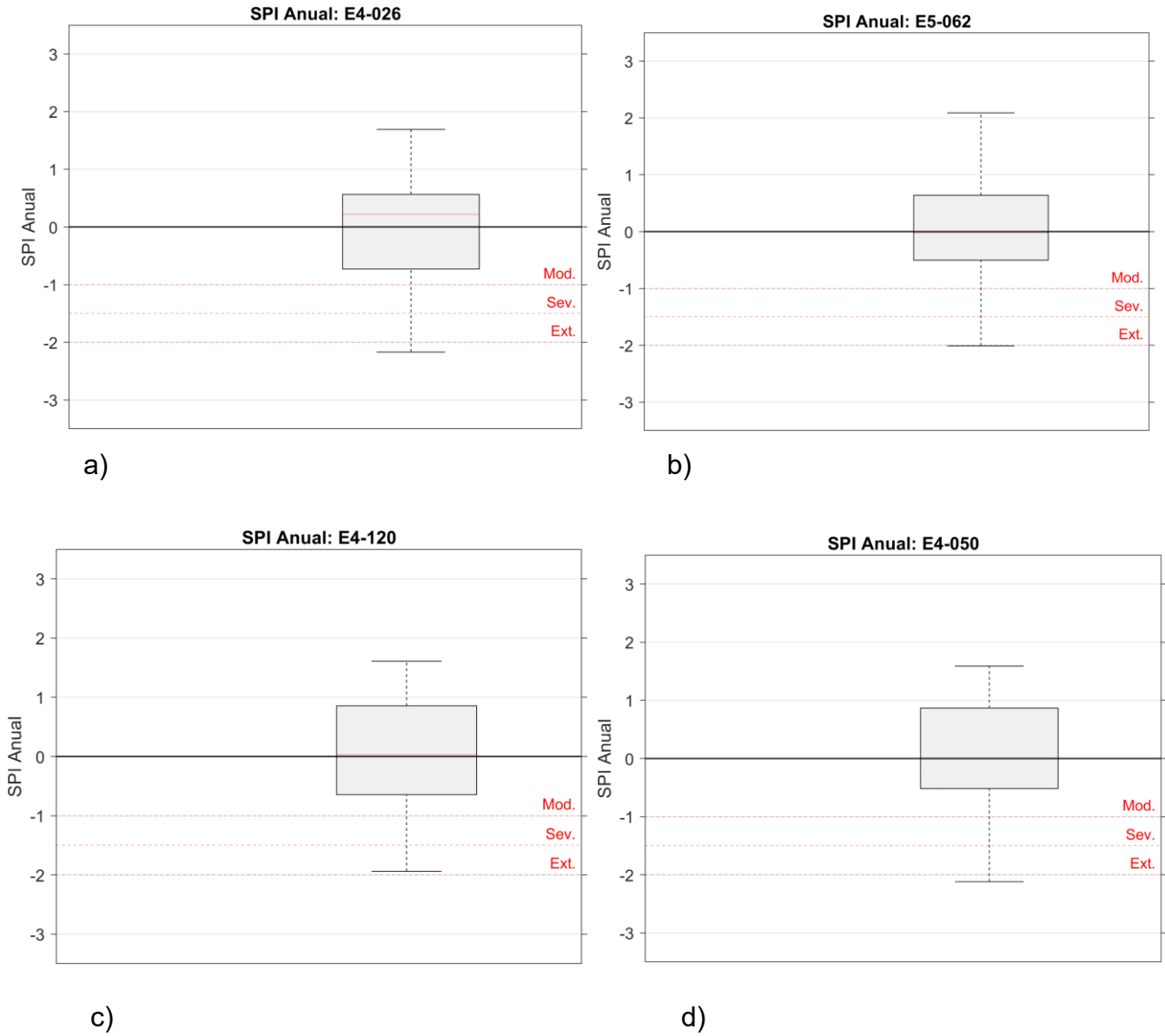
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Análise da Figura 10 do índice SPI anual das estações, Tatuí E4026 (a), Tatuí E5062 (b), Tietê E4120 (c), Laranjal Paulista E4050 (d), mostrou predominância de condições normais da precipitação através das medianas próximas de zero.

Os limites atingiram valores de SPI inferiores a $-2,0$ e superiores a $2,0$ que evidenciaram a ocorrência de secas severas a extremas e de umidade elevada segundo a classificação realizado por MCKEE *et. al.* (1993).

Observou-se ainda que as caixas apresentaram alturas moderadas e relativamente semelhantes entre as estações indicando variabilidade interanual equilibrada, interpretação compatível com estudos de séries climáticas descrita por WILKS (2011). De modo geral, os gráficos revelaram que embora o SPI anual apresentasse predominância de condições normais, houve ocorrência de eventos extremos secos e úmidos.

Figura 10. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Tatuí E4026 (a), Tatuí E5062 (b), Tietê E4120 (c), Laranjal Paulista E4050 (d).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A distribuição dos valores do SPI anual nas estações Conchas E5001 (a), Porangaba E5063 (b), Bofete E5016 (c) e Bofete E5064 (d) da Figura 11, indicaram medianas próximas de zero, evidenciando predominância de condições normais ao longo da série histórica.

Observou-se que a estação Bofete E5016 (c) apresentou outliers positivos, indicando anos excepcionalmente úmidos fora do padrão da série.

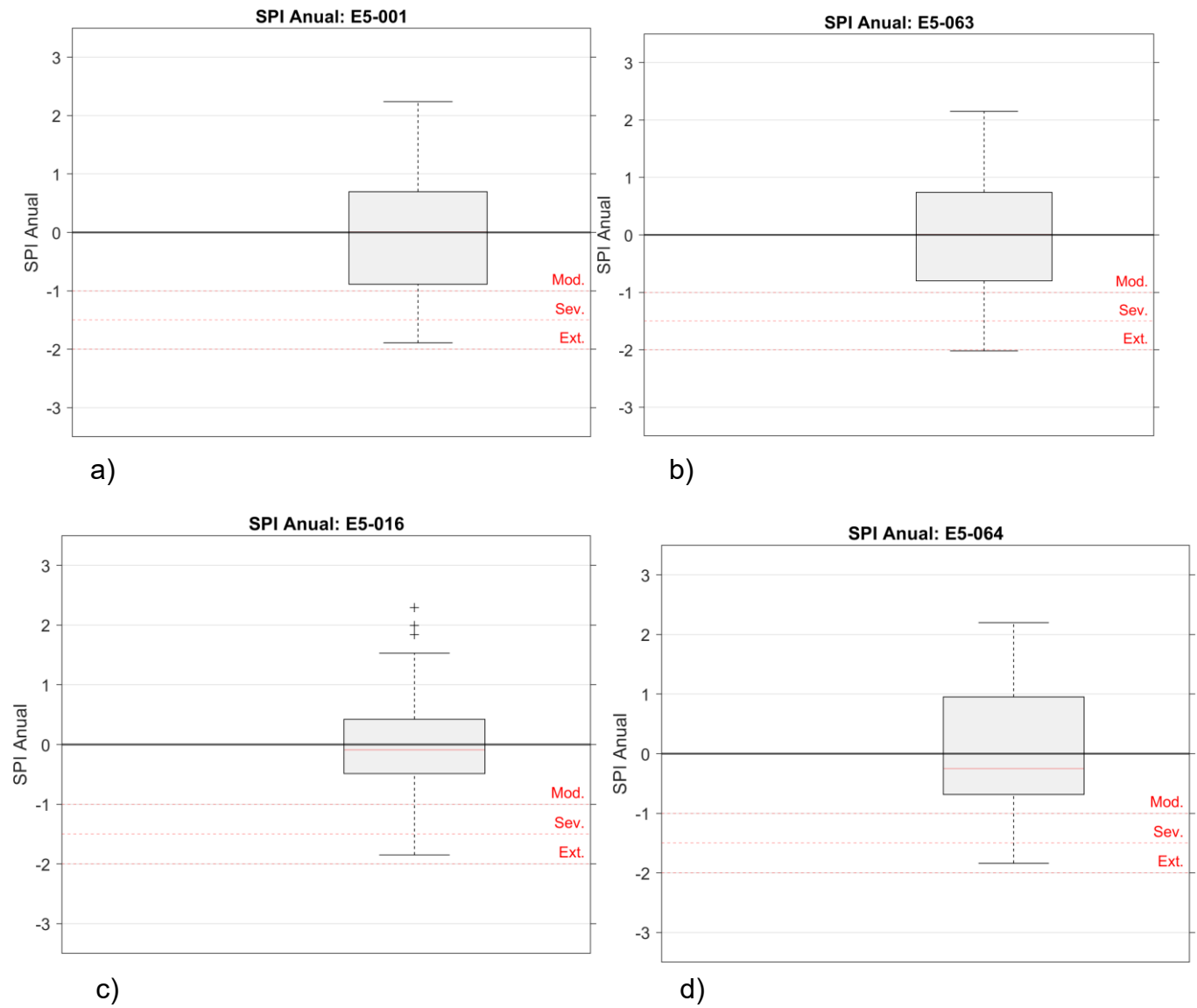
A estação Bofete E5064 (d) apresentou a maior amplitude revelando maior irregularidade pluviométrica interanual, conforme o estudo de séries climáticas proposta por WILKS (2011).

Por outro lado, Conchas E5001 (a) e Porangaba E5063 (b), exibiram caixas mais concentradas e distribuição mais simétrica indicando maior estabilidade pluviométrica anual.

Os limites alcançaram valores inferiores a -2 e superiores a $+2$ em algumas estações demonstrando a ocorrência de eventos extremos de seca severa e de elevada umidade conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993).

Dessa forma, a Figura 11 apresentou tendência a anos mais úmidos em uma estação, maior instabilidade em outra e maior equilíbrio nas demais.

Figura 11. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Conchas E5001 (a), Porangaba E5063 (b), Bofete E5016 (c) e Bofete E5064 (d).



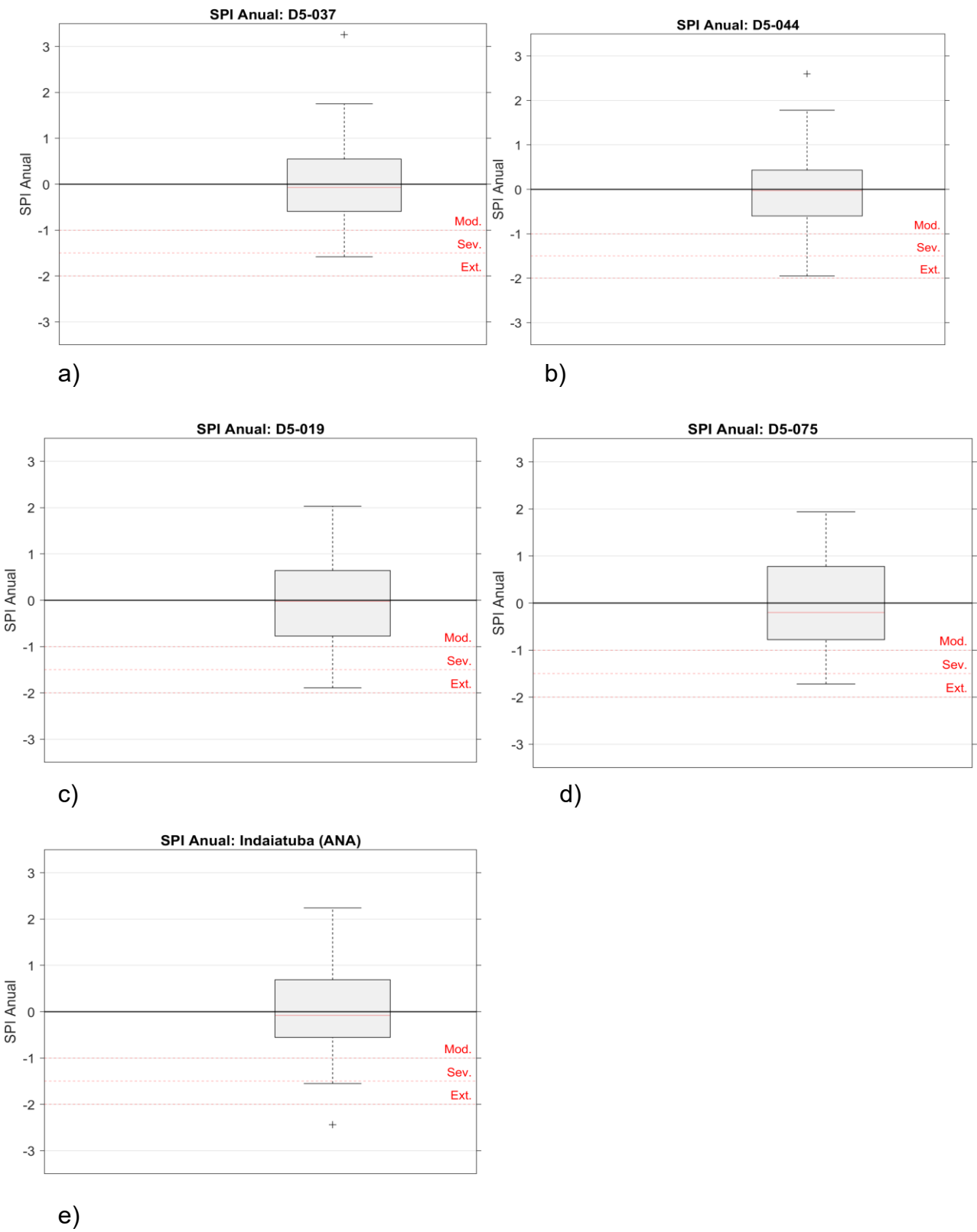
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A avaliação das estações da Figura 12: Anhembi D5037 (a), Anhembi D5044 (b), Botucatu D5019 (c), Botucatu D5075 (d) e Indaiatuba (e), apresentaram medianas próximas de zero, isso significa que as estações apresentaram padrões de precipitação dentro da normalidade visto que as caixas apresentaram alturas moderadas e semelhantes, sugerindo variabilidade interanual equilibrada, alinhada à análise estatística de séries hidrológicas descrita por LALL (1995) e WILKS (2011).

Observou-se a presença de outliers positivos em Anhembi D5037 (a) e Anhembi D5044 (b), indicando anos excepcionalmente úmidos, e obteve-se também a presença de um outlier negativo em Indaiatuba (e), representando seca extrema isolada.

Em geral, os gráficos evidenciaram normalidade predominante, presença de extremos pontuais e padrão de variabilidade anual típico de regiões com elevada irregularidade pluviométrica.

Figura 12. Distribuição da média anual do SPI apresentada por boxplots para as estações: Anhembi D5037 (a), Anhembi D5044 (b), Botucatu D5019 (c), Botucatu D5075 (d) e Indaiatuba (e).



Por fim, segundo a Tabela 5, o SPI anual permaneceu predominantemente dentro da faixa de normalidade ao longo da série histórica com médias e medianas próximas de zero. Isso indica que na maior parte dos anos, distribuição pluviométrica oscilou em torno do padrão esperado sem predomínio de seca ou de umidade.

Entretanto, o SPI anual não se manteve estável, pois ocorreram variações interanuais marcantes com registros de secas moderadas, severas e até extremas e também de anos muito úmidos, conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993). Esses episódios pontuais explicam a dispersão observada nos dados.

Além disso, foram observadas estações com leve predominância de anos secos e outras com tendência a anos mais úmidos, evidenciada por maior amplitude interquartil, indicando diferenças espaciais no comportamento do regime de chuvas.

Assim, o SPI anual dessas estações revelou um cenário de normalidade predominante, porém com elevada variabilidade interanual e ocorrência recorrente de eventos extremos, refletindo a dinâmica irregular das chuvas na região ao longo do período analisado.

Tabela 5. Distribuição estatística do SPI Anual.

Estação	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1ºQ	2ºQ	3ºQ
D5-037	31	0	-0,07	0,99873253	-1,58	3,26	-0,5925	-0,07	0,5475
D5-044	31	-1,07441E-17	-0,03	0,999603255	-1,95	2,6	-0,6	-0,03	0,4325
E5-016	31	0,000645161	-0,09	1,000096447	-1,85	2,29	-0,4875	-0,09	0,4225
E5-064	31	1,07441E-17	-0,25	1,000099995	-1,84	2,2	-0,685	-0,25	0,9525
D5-019	31	0,000290323	-0,023	1,000610787	-1,891	2,031	-0,7723	-0,023	0,6423
D5-075	31	-0,000322581	-0,2	0,999674893	-1,72	1,94	-0,7775	-0,2	0,7775
E5-001	31	0,000322581	0,01	1,000134937	-1,89	2,24	-0,8875	0,01	0,6975
E4-012	31	-0,000322581	-0,05	1,000408196	-1,88	2,25	-0,7175	-0,05	0,57
E4-131	31	-1,56685E-17	0,05	1,000153322	-1,79	2,62	-0,865	0,05	0,6625
Indaiatuba (ANA)	31	0,000322581	-0,08	0,999258004	-2,44	2,24	-0,555	-0,08	0,69
E4-019	31	1,07441E-17	-0,09	0,999929998	-2,12	2,15	-0,7375	-0,09	0,66
E4-050	31	0,000967742	0	0,999884509	-2,12	1,59	-0,5175	0	0,8675
E4-043	31	0,000967742	-0,06	1,000194497	-1,89	3,47	-0,675	-0,06	0,535
E4-130	31	0,000322581	0,05	1,000191595	-2,19	2,18	-0,735	0,05	0,695
E5-063	31	-0,000645161	0,01	0,999296204	-2,02	2,15	-0,8	0,01	0,74
E4-118	31	-0,000645161	-0,02	1,000439688	-1,6	2	-0,815	-0,02	0,6975
E4-025	31	-0,001290323	-0,09	0,999422306	-2,74	1,89	-0,4775	-0,09	0,5425
Sorocaba (ANA)	31	5,37205E-17	-0,12	0,999656608	-1,85	1,72	-0,62	-0,12	0,8975
E4-026	31	-0,000645161	0,22	1,000006452	-2,17	1,69	-0,73	0,22	0,565
E5-062	31	0,000645161	-0,02	0,999753088	-2,01	2,09	-0,5025	-0,02	0,6375
E4-120	31	0,000322581	0,03	0,99963488	-1,94	1,61	-0,645	0,03	0,855

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.3. Análise Trimestral do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) com base em gráficos de tendência

Os resultados da análise trimestral do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) nas estações da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba indicaram relativo equilíbrio no regime pluviométrico com predominância de condições classificadas como normais ($-0,99 \leq \text{SPI} \leq 0,99$), conforme a classificação proposta por MCKEE *et al.* (1993). Entretanto, algumas estações apresentaram tendências negativas estatisticamente significativas, evidenciando possível intensificação da frequência e da severidade de seca, especialmente nas estações Salto de Pirapora (E4-025), Piedade (E4-130), Laranjal Paulista (E4-150), Anhembi (D5-044) e Sorocaba (ANA).

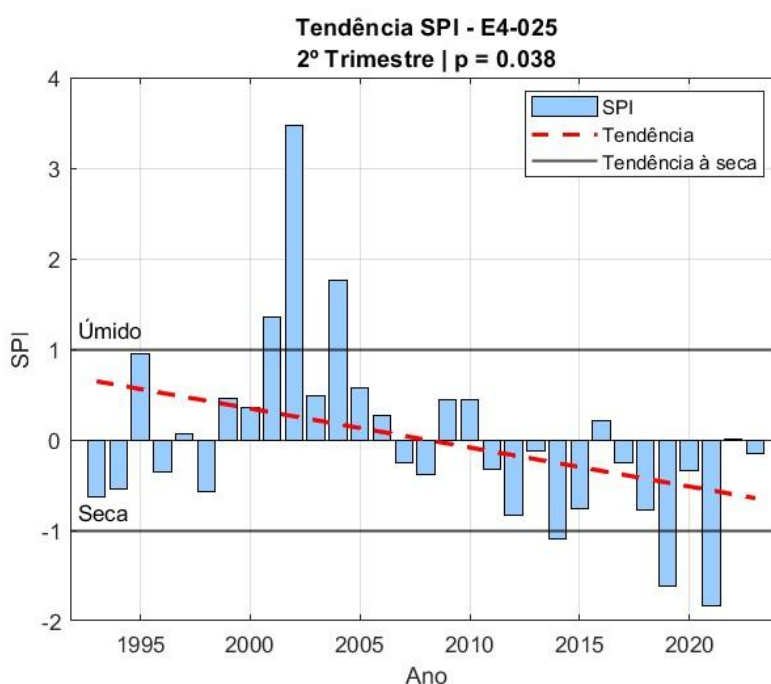
5.3.1. Estação E4-025 (Salto de Pirapora) - 2º Trimestre

A análise do SPI da estação Salto de Pirapora E4-025 referente ao segundo trimestre apresentada na Figura 13, apontou elevada variabilidade interanual. Durante a década de 1990 e o início dos anos 2000, observou-se predominância de valores positivos do SPI com destaque para o ano de 2002, definido como extremamente úmido segundo a classificação de MCKEE *et al.* (1993). A partir de 2006, observou-se aumento da frequência de valores negativos do SPI com maior recorrência de secas moderadas a severas. A análise de tendência indicou redução estatisticamente significativa negativa do SPI ($p = 0,038$), sugerindo avanço progressivo de condições mais secas no segundo trimestre, possivelmente associado à variabilidade climática como a atuação de eventos climáticos de grande escala como El Niño e La Niña, bem como a possíveis efeitos das mudanças climáticas regionais.

Esses resultados são consistentes com estudos realizados no Sudeste brasileiro que também identificaram tendência negativa do índice e aumento da frequência de eventos secos nas últimas décadas: LOPES e SANTOS (2019) verificaram redução significativa dos valores de SPI em diversas estações do estado de São Paulo, especialmente após 2005, associando essa tendência ao predomínio de eventos climáticos como o El Niño e à diminuição da precipitação anual. De forma semelhante, MARENGO e ALVES (2005) observaram uma diminuição da precipitação e intensificação da variabilidade climática no Sudeste, destacando períodos mais secos a partir do início dos anos 2000. Além disso, NOBRE *et al.* (2016) apontaram que a

maior frequência e severidade de secas no Sudeste está relacionada tanto à variabilidade natural quanto aos efeitos das mudanças climáticas. Esses resultados confirmam a tendência estatisticamente significativa de redução do SPI observada indicando um possível avanço das condições de aridez na região de Salto de Pirapora.

Figura 13. Gráfico de tendência trimestral do SPI para estação Salto de Pirapora E4-025 - 2º Trimestre.



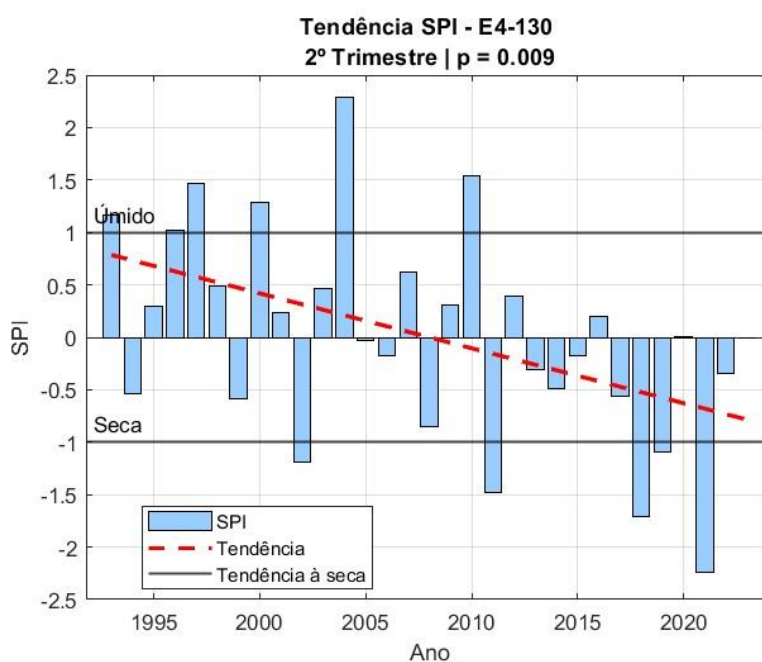
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.3.2. Estação Piedade E4-130 - 2º Trimestre

Assim como a estação anterior, a estação Piedade E4-130 apresentada na Figura 14, revelou uma tendência negativa estatisticamente significativa no SPI ($p = 0.009$) no 2º semestre indicando redução progressiva da umidade e intensificação das secas nas últimas décadas. Os primeiros anos da série histórica prevaleceram valores positivos do SPI caracterizando condições úmidas com destaque para o ano de 2004, classificado como extremamente úmido conforme a classificação proposta por MCKEE *et al.* (1993). Entretanto, após 2008, observou-se aumento da frequência de valores negativos do SPI resultando em secas mais intensas e persistentes o que caracterizou transição de um regime úmido para um regime seco no segundo trimestre.

Os resultados obtidos para a estação Piedade E4-130 são semelhantes aos estudos de GOZZO *et al.* (2019), que identificaram o aumento da frequência e severidade das secas no estado de São Paulo. De forma semelhante, os autores NUNES *et al.* (2023), apontaram um aumento de eventos extremamente secos entre 1993 e 2012 compatível com a intensificação de valores negativos do SPI após 2010 na região. Além disso, as evidências apresentadas por CUMPLIDO *et al.* (2023) sobre crises hídricas no Sudeste (2001, 2014 e 2021) reforçaram que a tendência de seca observada em Piedade segue o mesmo comportamento regional de aumento da falta de chuva na região.

Figura 14. Gráfico de tendência trimestral do SPI para estação Piedade E4-130 - 2º Trimestre.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

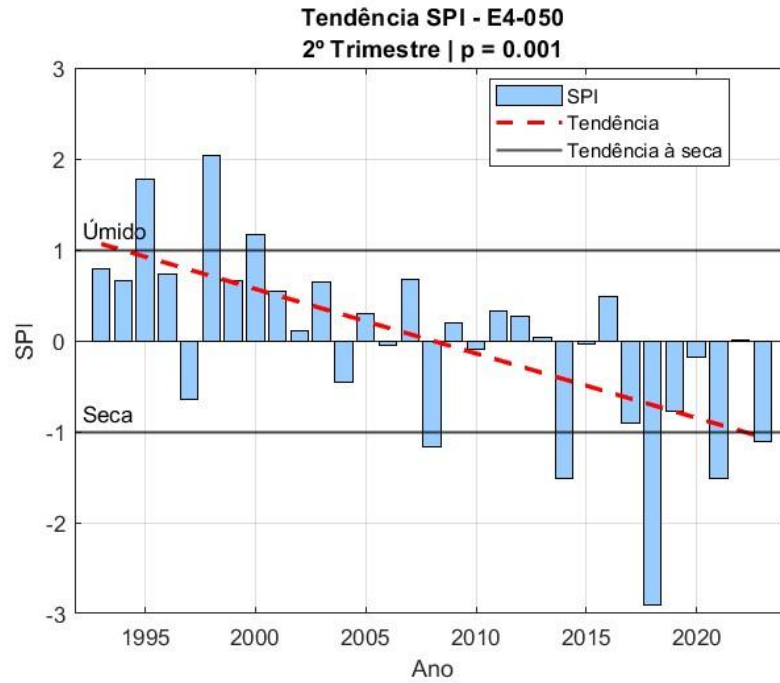
5.3.3. Estação Laranjal Paulista E4-050 - 2º Trimestre

No segundo trimestre, a estação Laranjal Paulista E4-050 apresentada na Figura 15, mostrou predominância de valores positivos do SPI até aproximadamente 2007, indicando condições úmidas a extremamente úmidas e precipitações acima da média $SPI > 2,0$, enquadrados na classe extremamente úmida, conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993).

A partir de 2008, observou-se uma mudança marcante no comportamento da série histórica dessa estação, através do aumento na frequência e na intensidade de valores negativos do SPI, especialmente em 2018 quando o índice atingiu valores próximos a $-3,0$, caracterizando um evento de seca extrema, associado à ocorrência de períodos prolongados de estiagem.

A tendência estatisticamente significativa negativa ($p = 0.001$) confirmou a intensificação das secas ao longo das últimas décadas. As alterações no regime das chuvas e a intensificação de anomalias secas na região estão associados à diminuição da precipitação durante o segundo trimestre. Esse comportamento foi consistente com diversos estudos como de BLAIN (2009, 2012) que descreveu comportamento semelhante no interior paulista com redução progressiva do SPI após os anos 2000. Da mesma forma, SILVA *et al.* (2017, 2020) e MARTINS *et al.* (2019) observaram maior persistência e intensidade das secas no estado de São Paulo, apresentando resultados semelhantes aos observados nessa estação. Por fim, os resultados estão em consonância com SANTOS e BRITO (2021), que destacaram o agravamento das secas meteorológicas no Sudeste brasileiro nas últimas décadas.

Figura 15. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Laranjal Paulista E4-050 - 2º Trimestre



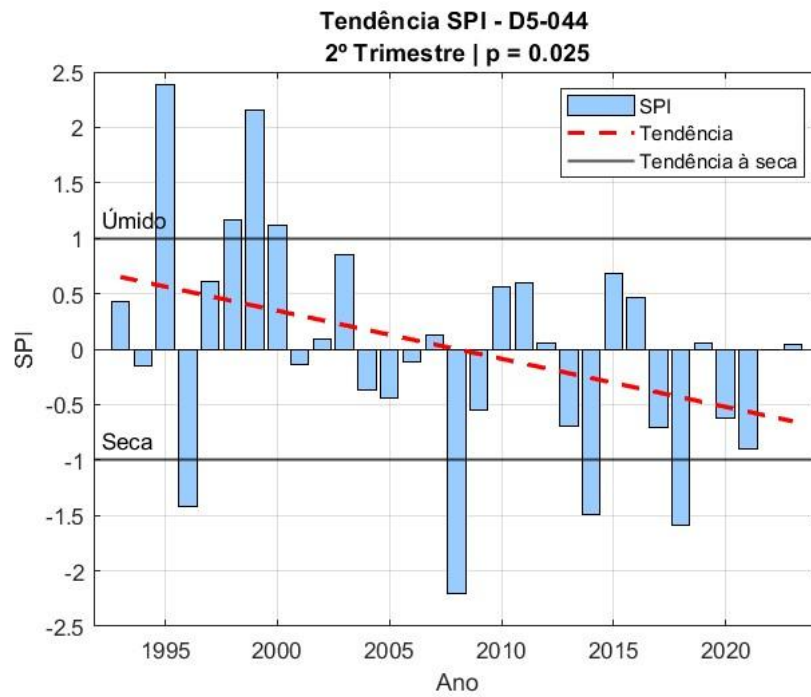
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.3.4. Estação Anhembi D5-044 - 2º Trimestre

Assim como nas estações anteriores, a estação Anhembi D5-044 apresentou uma tendência negativa estatisticamente significativa no SPI ($p = 0,025$) conforme ilustrado na Figura 16, indicando redução gradual da umidade e intensificação das condições secas ao longo da série histórica. Durante os anos 1990 e início dos anos 2000 predominaram valores positivos do índice com destaque para 1995 e 1999 quando o SPI ultrapassou 2,0, sendo classificados como evento extremamente úmido.

A partir de 2004, observou-se uma mudança no regime de chuvas marcada pelo aumento da frequência de valores negativos do SPI. O ano de 2008 apresentou valores inferiores a $-2,0$, evidenciando um período de seca severa ($SPI \leq -2,0$) conforme MCKEE *et al.* (1993). Os estudos recentes reforçam a tendência de intensificação da seca observada nesta estação. CUMPLIDO *et al.* (2023) apontaram que as secas de 2001, 2014 e 2021 refletem em mudanças no comportamento pluviométricos do Sudeste, associadas ao aumento das temperaturas regionais, o que concorda com o aumento de valores negativos do SPI registrado após 2004 na estação analisada. De forma complementar, FERREIRA *et al.* (2023) mostraram que a região deve enfrentar reduções de precipitação e maior frequência de secas hidrológicas influenciadas por alterações na circulação atmosférica e pela variabilidade interanual relacionada ao El Niño. Além disso, ALMEIDA *et al.* (2023) evidenciaram aumento da incidência de secas meteorológicas no interior paulista, especialmente após 2000 com predominância de valores negativos do SPI.

Figura 16. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Anhembi D5-044 - 2º Trimestre



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

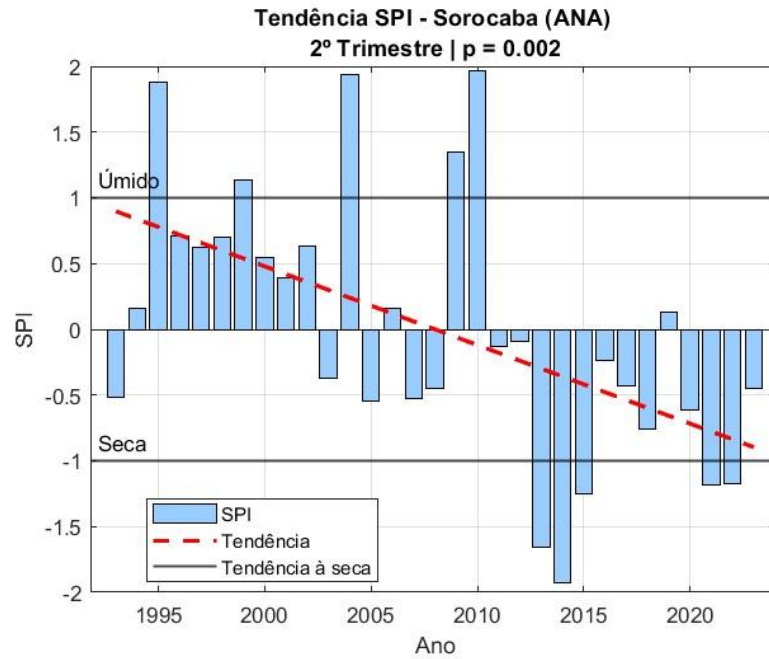
5.3.5. Estação Sorocaba (ANA) - 2º Trimestre

No início da série histórica, a estação Sorocaba, conforme apresentado na Figura 17, predominou precipitações acima da média e valores positivos do SPI refletindo em condições úmidas. Apesar de pequenas variações negativas esse período inicial foi marcado por um regime favorável à umidade. Esse comportamento é consistente com os resultados de ALMEIDA *et al.* (2023) e CUMPLIDO *et al.* (2023), que identificaram comportamento semelhante em diferentes regiões do Estado de São Paulo e no Sudeste brasileiro, associado a uma maior disponibilidade hídrica.

Contudo, a partir de 2011, ocorreu uma mudança significativa no padrão pluviométrico, marcada pelo aumento de valores negativos do SPI e pela intensificação de períodos secos, especialmente em 2014, quando o índice SPI atingiu o valor de $-2,0$ sendo classificado como seca extrema conforme MCKEE *et al.* (1993). A tendência negativa estatisticamente significativa ($p = 0,002$) evidenciou redução progressiva da umidade e maior recorrência de condições de seca. Essa alteração é compatível com as análises de BALLARIN *et al.* (2024), que descreveram o aumento das secas meteorológicas no Brasil associado à variabilidade climática e às mudanças globais.

Assim, a estação Sorocaba evidencia uma mudança no comportamento do SPI, passando de um regime predominantemente úmido para outro marcado por secas moderadas a severas.

Figura 17. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Sorocaba (ANA) - 2º Trimestre



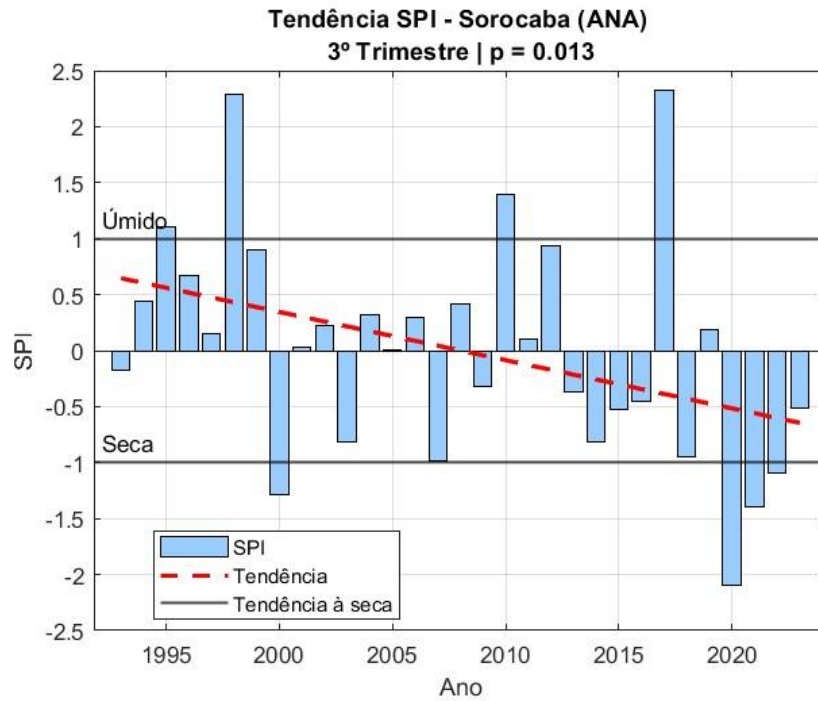
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.3.6. Estação Sorocaba (ANA) - 3º Trimestre

De modo semelhante, a estação de Sorocaba no terceiro trimestre também apresentou variabilidade interanual, conforme observado na Figura 18, com alternância entre períodos úmidos e secos. Nos primeiros anos da série predominaram valores positivos do SPI associados a condições úmidas e precipitações acima da média. Entretanto, a partir de meados dos anos 2000, especialmente após 2012, verificou-se maior frequência e intensidade de valores negativos, indicando secas mais recorrentes e severas conforme MCKEE *et al.* (1993). A tendência negativa estatisticamente significativa ($p = 0,013$) evidenciou redução progressiva dos valores de SPI e aumento da aridez ao longo do período analisado, possivelmente influenciados por variabilidades climáticas de grande escala e por mudanças climáticas regionais.

Os resultados observados para o terceiro trimestre em Sorocaba estão de acordo com estudos que apontaram intensificação das secas no Sudeste brasileiro. Além disso, os trabalhos de FERREIRA *et al.* (2023) e análises de BALLARIN *et al.* (2024) reforçam que tanto a variabilidade climática quanto processos de mudança do clima têm contribuído para a intensificação das condições secas confirmando a tendência negativa estatisticamente significativa registrada no terceiro trimestre na estação analisada.

Figura 18. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SPI da estação Sorocaba (ANA) - 3º Trimestre



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.4. Avaliação da variabilidade trimestral do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) a partir da análise de gráficos boxplot

5.4.1. Análise integrada SPI – 1º trimestre

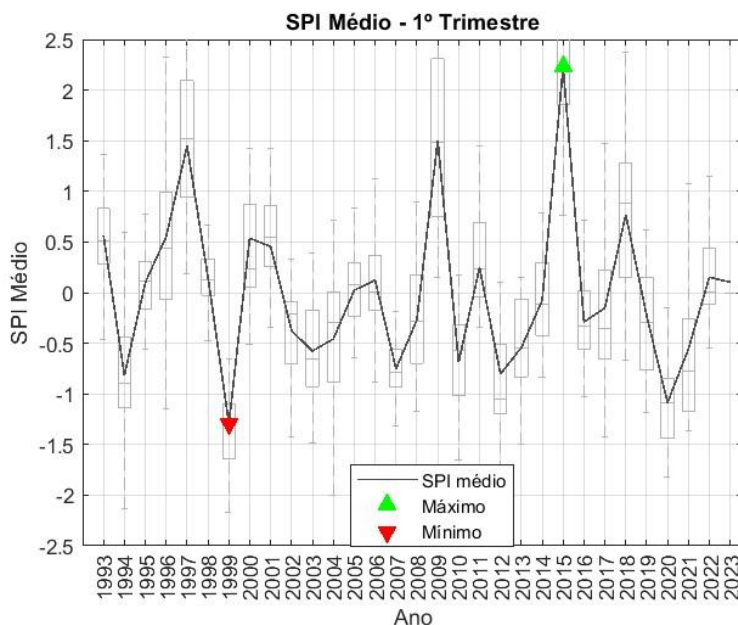
Comportamento da variabilidade do 1º trimestre do índice SPI a partir da análise por gráfico boxplot apresentado na Figura 19 apresentou variabilidade ao longo de todo o período analisado. No 1º trimestre, evidenciou um comportamento marcado por elevada variabilidade pluviométrica com alternância entre condições secas, normais e úmidas ao longo da série histórica.

Os valores de média e mediana do SPI manteve-se próximos de zero, conforme indicado na Tabela 6, refletindo a predominância de condições próximas à normalidade climática. Esse padrão é visualmente confirmado na Figura 19, onde a série do SPI médio oscila em torno da linha de referência zero durante grande parte do período analisado.

Entretanto, os valores mínimos e máximos apresentados na Tabela 6 revelaram a ocorrência de eventos extremos, os quais foram identificados na Figura 19. O valor mínimo do SPI ocorreu no final da década de 1990 indicando a seca mais intensa com forte desvio negativo do SPI médio, e as medianas dos boxplots apresentaram valores negativos com predominância de dados abaixo de zero. Esse comportamento indica predominância de condições secas durante o trimestre classificadas como seca severa segundo MCKEE *et al.* (1993). Por outro lado, o valor máximo registrado na Tabela 6 indica um evento extremamente úmido a partir de 2015 quando SPI médio ultrapassa valores superiores a 2,0 e o boxplots com maior extensão superior, evidenciando valores elevados associada ao excesso de precipitação.

A análise dos quartis (1ºQ, 2ºQ e 3ºQ) indicou mediana próxima de zero na maior parte da série com variações na distribuição dos dados ao longo dos anos. Essas variações são representadas na Figura 19 por diferenças na altura das caixas dos boxplots refletindo mudanças na dispersão dos valores do SPI no 1º trimestre. Dessa forma, a Tabela 6 e a Figura 19 mostraram predominância de condições normais no 1º trimestre com ocorrências pontuais de eventos extremos, evidenciando a sensibilidade do SPI na identificação da variabilidade pluviométrica, conforme proposto por MCKEE *et al.* (1993) e GUTTMAN (1998).

Figura 19. Comportamento da variabilidade do 1º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 6. Distribuição estatística do SPI trimestral no 1º trimestre.

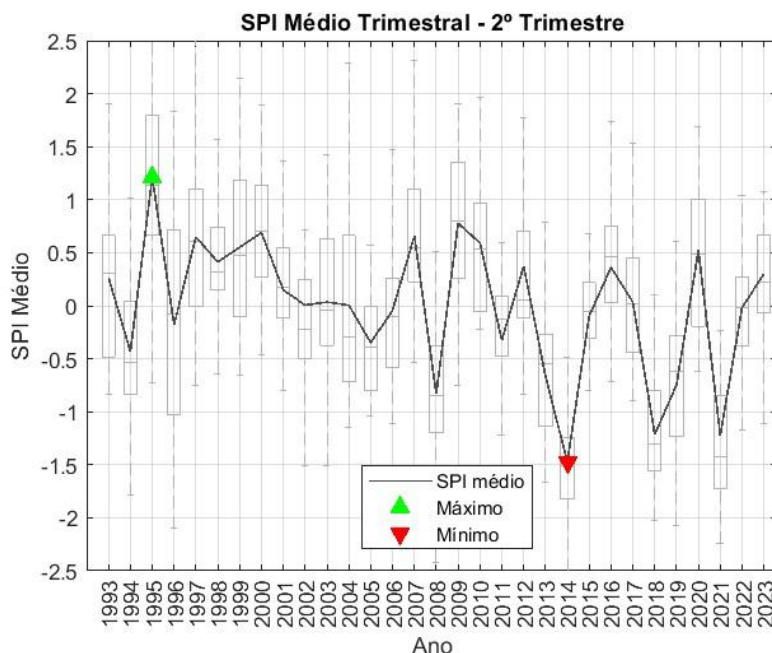
Estação	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1ºQ	2ºQ	3ºQ
D5-019	31	0,000322581	-0,15	1,000744669	-1,87	2,51	-0,625	-0,15	0,6
D5-037	31	-0,000322581	-0,17	0,999951612	-1,72	2,34	-0,6275	-0,17	0,625
D5-044	31	0,000645161	-0,02	1,000579617	-1,98	2,32	-0,5875	-0,02	0,505
D5-075	31	1,43255E-17	0,1	0,999846655	-2,17	1,77	-0,8275	0,1	0,7875
E4-012	31	2,14882E-17	0	0,998959459	-1,32	2,86	-0,82	0	0,4575
E4-019	31	-0,000645161	-0,13	1,000463011	-1,66	2,52	-0,565	-0,13	0,285
E4-025	31	0,000322581	0,15	0,999968279	-1,69	3,62	-0,6175	0,15	0,23
E4-026	31	-1,46053E-17	0,01	0,999583246	-1,51	2,84	-0,82	0,01	0,4025
E4-043	31	0,000322581	-0,06	1,000618089	-1,82	2,65	-0,6275	-0,06	0,53
E4-050	31	0,000322581	-0,02	0,999314711	-1,51	2,25	-0,785	-0,02	0,685
E4-118	31	-0,000645161	0	1,000136442	-1,37	3,33	-0,6975	0	0,3825
E4-120	31	0	-0,02	1,000239971	-1,79	2,45	-0,6875	-0,02	0,6525
E4-130	31	0,000645161	-0,12	1,000176436	-1,17	3	-0,7375	-0,12	0,425
E4-131	31	0,000322581	-0,14	1,00057145	-1,33	2,46	-0,63	-0,14	0,29
E5-001	31	0,000322581	0	0,999984946	-2	2,62	-0,5525	0	0,295
E5-016	31	0,000322581	-0,1	0,99958486	-1,78	2,39	-0,5425	-0,1	0,64
E5-062	31	-7,16273E-18	-0,11	0,99998	-1,34	3,76	-0,6375	-0,11	0,265
E5-063	31	0,000322581	-0,1	0,999197958	-1,53	3,47	-0,6625	-0,1	0,38
E5-064	31	0,000322581	0	0,999594864	-1,78	2,57	-0,8275	0	0,715
Indaiatuba (ANA)	31	1,43255E-17	-0,02	0,99930309	-2,13	2,41	-0,57	-0,02	0,64
Sorocaba (ANA)	31	-0,000322581	0,05	0,999958279	-1,66	2,27	-0,655	0,05	0,5225

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.4.2. Análise integrada SPI – 2º trimestre

No 2º trimestre também houve predominância de condições próximas da normalidade do SPI médio como observado na Figura 20 e na Tabela 7 com média e mediana próximas de zero, indicando ausência de tendência definida e forte variabilidade interanual, conforme descrito e GUTTMAN (1998). Assim como no 1º, o 2º trimestre registrou episódios extremos pontuais com anos muito úmidos e períodos de secas severas a extremas que aumentaram a dispersão dos dados evidenciada pelo desvio padrão e pelos diferentes tamanhos das caixas dos boxplots. A partir da década de 2010, notou-se uma maior frequência de valores negativos mais intensos como observado no ano de 2014 na Figura 20, compatível com estudos de MARENGO *et al.* (2017; 2020) sobre o aumento das secas no Sudeste brasileiro.

Figura 20. Comportamento da variabilidade do 2º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 7. Distribuição estatística do SPI trimestral no 2º trimestre.

Estação	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1ºQ	2ºQ	3ºQ
D5-019	31	-0,000322581	0,01	1,00033489	-2,18	1,77	-0,5925	0,01	0,6575
D5-037	31	0,000322581	-0,23	1,000368212	-1,15	4	-0,625	-0,23	0,345
D5-044	31	-0,000322581	0,04	1,000608095	-2,2	2,38	-0,6025	0,04	0,59
D5-075	31	0,000322581	0,04	0,999871605	-1,83	2,36	-0,77	0,04	0,7775
E4-012	31	1,52208E-17	0,01	1,000259966	-1,6	2,73	-0,825	0,01	0,745
E4-019	31	-0,000645161	-0,19	1,000123111	-1,79	2,36	-0,6225	-0,19	0,6125
E4-025	31	0,000322581	-0,15	1,000661394	-1,84	3,47	-0,5625	-0,15	0,44
E4-026	31	-1,07441E-17	-0,11	0,999693286	-1,88	2,31	-0,6325	-0,11	0,545
E4-043	31	-0,000322581	0,08	0,999281355	-1,89	3,05	-0,52	0,08	0,4625
E4-050	31	0,000967742	0,11	1,000717592	-2,9	2,03	-0,6025	0,11	0,655
E4-118	31	-2,50696E-17	0,05	1,000759711	-2,02	2,84	-0,515	0,05	0,52
E4-120	31	0,001290323	0,1	1,00000914	-2,42	2,05	-0,66	0,1	0,8275
E4-130	31	0,000322581	0	1,000681381	-2,24	2,29	-0,555	0	0,4825
E4-131	31	-2,14882E-17	0,06	0,999686618	-1,51	3,48	-0,695	0,06	0,475
E5-001	31	1,61161E-17	-0,03	0,999229703	-2,61	1,91	-0,505	-0,03	0,775
E5-016	31	-0,000322581	-0,1	0,999391428	-2,1	2,18	-0,635	-0,1	0,5575
E5-062	31	-0,000322581	-0,23	1,001044401	-2,07	1,91	-0,635	-0,23	0,785
E5-063	31	-0,000645161	0,03	0,999966451	-1,7	2,63	-0,78	0,03	0,67
E5-064	31	-0,000645161	-0,19	0,999776427	-2,15	1,91	-0,4075	-0,19	0,6525
Indaiatuba (ANA)	31	0,000322581	0,06	1,000518145	-2,11	1,77	-0,57	0,06	0,5025
Sorocaba (ANA)	31	0,000322581	-0,13	1,000271576	-1,93	1,97	-0,545	-0,13	0,6275

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.4.3. Análise integrada SPI – 3º trimestre

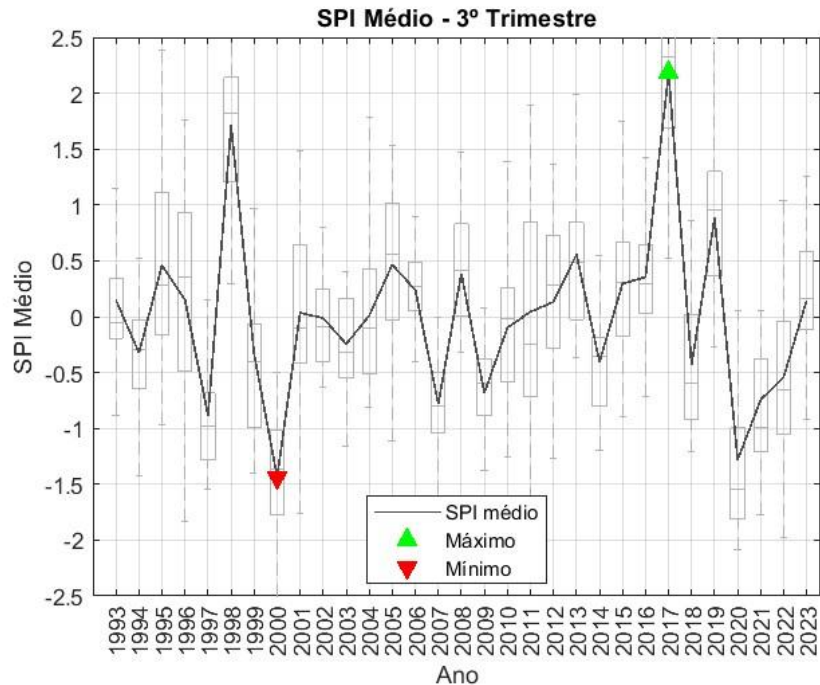
O comportamento do SPI médio no 3º trimestre revelou um padrão semelhante ao do 1º trimestre. De acordo com a Figura 21 e a Tabela 8 houve a predominância de condições próximas da normalidade evidenciada pela média e mediana próximas de zero em que indicou ausência de tendência linear marcada e forte variabilidade interanual.

Os valores de mínimo e máximo apontou, na Figura 21, a ocorrência de eventos extremos pontuais: um episódio de seca severa a extrema (mínimo) e um de umidade extrema (máximo). Esses valores extremos ajudam a explicar o desvio padrão apresentado na Tabela 8, pois aumentam a dispersão dos dados mesmo que a média e a mediana permaneçam próximas de zero.

Os quartis (1ºQ, 2º Q e 3ºQ), revelaram anos com maior variabilidade (caixas mais altas) e anos mais homogêneos (caixas menores).

A tabela confirma estatisticamente a centralidade dos dados (média/mediana próximas de 0) e a dispersão (desvio padrão e quartis), enquanto o gráfico da Figura 21 evidenciou temporalmente os anos críticos, reforçando a eficiência do SPI para detectar a variabilidade no 3º trimestre.

Figura 21. Comportamento da variabilidade do 3º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 8. Distribuição estatística do SPI trimestral no 3º trimestre.

Estação	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1ºQ	2ºQ	3ºQ
D5-019	31	-0,000645161	-0,18	0,999603039	-1,77	2,49	-0,665	-0,18	0,795
D5-037	31	0,000322581	0,01	0,999288026	-2,06	1,77	-0,6425	0,01	0,84
D5-044	31	0,000322581	0	0,999828265	-1,86	2,14	-0,46	0	0,375
D5-075	31	0,000645161	-0,16	0,999569692	-1,98	2,64	-0,6425	-0,16	0,5275
E4-012	31	0,000322581	0,13	1,000724684	-2,69	1,98	-0,735	0,13	0,805
E4-019	31	2,86509E-17	-0,25	1,000616477	-1,88	2,57	-0,685	-0,25	0,5675
E4-025	31	-0,000645161	0,03	1,000316402	-1,68	2,89	-0,7425	0,03	0,27
E4-026	31	-1,11918E-18	-0,36	0,999293083	-1,54	2,8	-0,6625	-0,36	0,4275
E4-043	31	-0,000645161	0,06	1,00009978	-1,79	2,81	-0,6725	0,06	0,4425
E4-050	31	-1,43255E-17	-0,07	0,99949654	-1,81	2,56	-0,6575	-0,07	0,52
E4-118	31	-0,000322581	-0,07	1,001051061	-1,75	3,44	-0,5375	-0,07	0,28
E4-120	31	0,000322581	-0,07	1,000368212	-2,09	2,8	-0,63	-0,07	0,4875
E4-130	31	-0,000322581	-0,08	1,000151601	-1,88	2,15	-0,71	-0,08	0,6675
E4-131	31	0,000322581	-0,22	0,999788257	-1,92	1,85	-0,86	-0,22	0,7625
E5-001	31	-0,000645161	-0,03	0,999449633	-1,82	2,85	-0,6175	-0,03	0,475
E5-016	31	-0,000322581	-0,26	1,00036488	-1,38	2,68	-0,845	-0,26	0,7725
E5-062	31	-1,52208E-17	-0,06	0,999569908	-2,25	1,98	-0,54	-0,06	0,5975
E5-063	31	-1,25348E-17	-0,05	0,999046212	-1,4	1,97	-0,8375	-0,05	0,7475
E5-064	31	0,000322581	-0,18	0,999364744	-1,38	2,75	-0,655	-0,18	0,3625
Indaiatuba (ANA)	31	0,000645161	-0,15	1,000029785	-1,83	3,61	-0,545	-0,15	0,465
Sorocaba (ANA)	31	0,000645161	0,03	0,999833104	-2,09	2,32	-0,7375	0,03	0,435

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

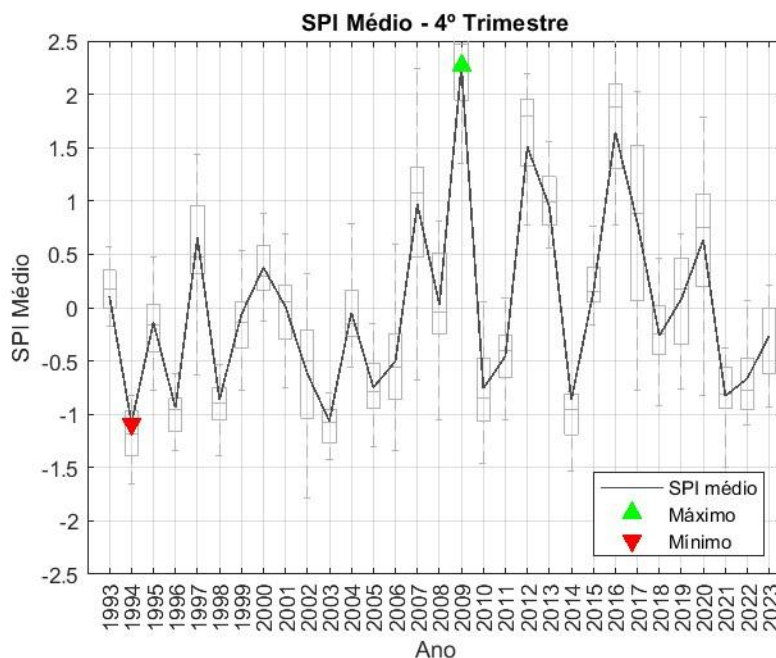
5.4.4. Análise integrada SPI – 4º trimestre

A análise conjunta do SPI médio do 4º trimestre indicou predominância de condições próximas à normalidade constatado através da média e mediana próximas de zero. Observou-se alternância entre anos secos e úmidos com picos de umidade no fim dos anos 2000 e meados da década de 2010, padrão compatível com a irregularidade das chuvas no Sudeste descrita por MARENGO *et al.* (2017, 2020).

Os valores extremos explicam o desvio padrão observado na Tabela 9, enquanto os boxplots da Figura 22 evidenciaram anos com maior ou menor irregularidade pluviométrica, conforme a abordagem de WILKS (2011).

O que diferencia os trimestres não é o comportamento geral do SPI que se mantém parecido ao longo da série, mas sim a intensidade e o momento em que os eventos extremos ocorrem em cada período. Assim, pode-se afirmar que os trimestres são estatisticamente semelhantes, variando apenas quanto à distribuição temporal dos episódios secos e úmidos.

Figura 22. Comportamento da variabilidade do 4º trimestre do SPI a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 9. Distribuição estatística do SPI trimestral no 4º trimestre.

Estação	N	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1ºQ	2ºQ	3ºQ
D5-019	31	0,000322581	0,02	0,999217974	-1,47	2,18	-0,72	0,02	0,6875
D5-037	31	0,000967742	-0,13	0,999514398	-1,53	2,43	-0,7575	-0,13	0,2625
D5-044	31	0,000645161	-0,15	0,998949233	-1,44	2,19	-0,815	-0,15	0,5225
D5-075	31	0,000322581	-0,03	0,998634013	-1,65	3,73	-0,6475	-0,03	0,555
E4-012	31	3,9395E-17	-0,22	0,999879993	-1,15	2,47	-0,7725	-0,22	0,3475
E4-019	31	0,000967742	-0,14	0,999904512	-1,21	2,96	-0,8775	-0,14	0,3775
E4-025	31	0,000322581	-0,09	0,9996949	-1,46	2,32	-0,87	-0,09	0,4575
E4-026	31	-0,000645161	0	0,999643055	-1,45	2,71	-0,845	0	0,3625
E4-043	31	0,000322581	-0,3	0,999111218	-1,36	2,98	-0,75	-0,3	0,4575
E4-050	31	0,000967742	-0,29	1,000004516	-1,21	3,08	-0,7525	-0,29	0,435
E4-118	31	8,95341E-18	-0,3	1,000862961	-1,18	2,3	-0,8425	-0,3	0,6075
E4-120	31	-0,000322581	-0,16	0,999027807	-1,28	2,31	-0,7675	-0,16	0,655
E4-130	31	-0,000322581	0	0,999978279	-1,5	3,13	-0,8075	0	0,66
E4-131	31	0,000322581	0	0,999798259	-1,46	2,59	-0,795	0	0,385
E5-001	31	0,000645161	-0,27	1,000053117	-1,65	2,84	-0,5675	-0,27	0,7275
E5-016	31	1,96975E-17	-0,03	1,000466558	-1,39	2,8	-0,7175	-0,03	0,3975
E5-062	31	0,001612903	-0,08	0,999580234	-1,3	2,47	-0,83	-0,08	0,34
E5-063	31	-0,000967742	-0,35	0,999797829	-1,21	2,33	-0,775	-0,35	0,545
E5-064	31	-0,000322581	-0,2	0,999658221	-1,25	3,13	-0,745	-0,2	0,775
Indaiatuba (ANA)	31	-0,000645161	-0,27	1,000979305	-1,41	2,15	-0,785	-0,27	0,625
Sorocaba (ANA)	31	0,000967742	-0,09	1,000064514	-1,79	2,66	-0,65	-0,09	0,4825

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.5. Análise anual do Índice Padronizado de Vazão (SSI) com base em gráficos de tendência

5.5.1. Estação Americana Velha (4E-004)

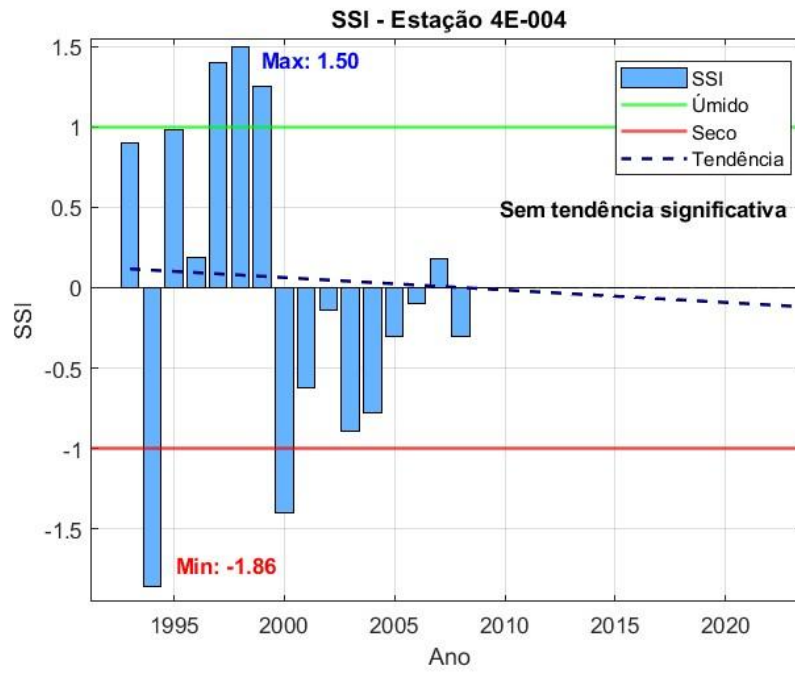
De acordo com a análise do índice de vazão (SSI) da estação fluviométrica Americana Velha (4E-004) entre 1993 à 2008 na Figura 23 exibiu um relativo equilíbrio entre períodos úmidos e secos durante a série histórica estudada. A alternância de eventos úmidos e secos ao longo da série, comportamento típico de índices padronizados aplicados à hidrologia conforme discutido por HUGHES *et. al.* (2002).

O valor mínimo observado do índice SSI (-1,86) em 1994 enquadrou-se na classe de seca severa, enquanto o valor máximo de 1,50 no ano de 1998 caracterizou umidade moderada de segundo a classificação MCKEE *et al.* (1993).

A década de 1990 foi marcada por uma maior frequência de condições úmidas indicando maior disponibilidade hídrica. Porém, entre os anos de 2000 e 2006 prevaleceram valores negativos do índice, caracterizando estiagens de moderadas a severas. Essa oscilação interanual é coerente com a variabilidade hidrológica natural descrita por LALL (1995) em séries temporais de vazão.

A linha de tendência revelou discreto declínio ao longo do período, porém a análise estatística não demonstrou significância, reforçando que o comportamento observado está associado à variabilidade natural da série. Ressalta-se que os dados disponíveis se estendem apenas até o ano de 2008, inexistindo registros posteriores que possibilitem avaliar o comportamento da vazão em anos mais recentes.

Figura 23. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico Americana Velha (4E-004).



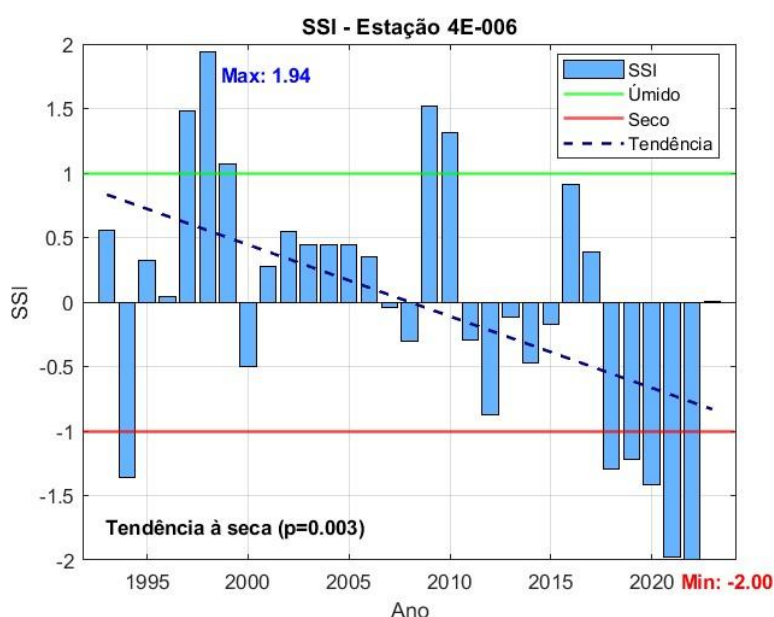
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.5.2. Estação Sarapu (4E-006)

Análise da tendência anual do índice de vazão (SSI) da estação fluviométrica Sarapu (4E-006) apresentou mudança no comportamento hidrológico ao longo do período analisado como observado na Figura 24. Os anos iniciais da série histórica exibiram valores positivos de vazão com destaque para 1998 (1,94) associados a excesso hídrico classificado como umidade moderada a severa. Entretanto os anos finais concentraram valores negativos de -2,00 em 2022, caracterizando um evento de seca extrema conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993). A análise da linha de tendência mostra uma queda significativa ($p = 0,003$), indicando que ao longo do período avaliado houve uma mudança constante para condições mais secas. A concentração de valores negativos nos anos mais recentes é semelhante aos resultados do trabalho de SEAGER *et al.* (2010) que descreveram como intensificação de secas associadas a mudanças nos padrões climáticos regionais e à variabilidade atmosférica de grande escala.

Assim, a linha de tendência do gráfico mostrou que o SSI passou de uma dinâmica entre anos úmidos e secos para um cenário com predominância de secas e menor disponibilidade hídrica ao longo da série histórica.

Figura 24. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico Sarapu (4E-006).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

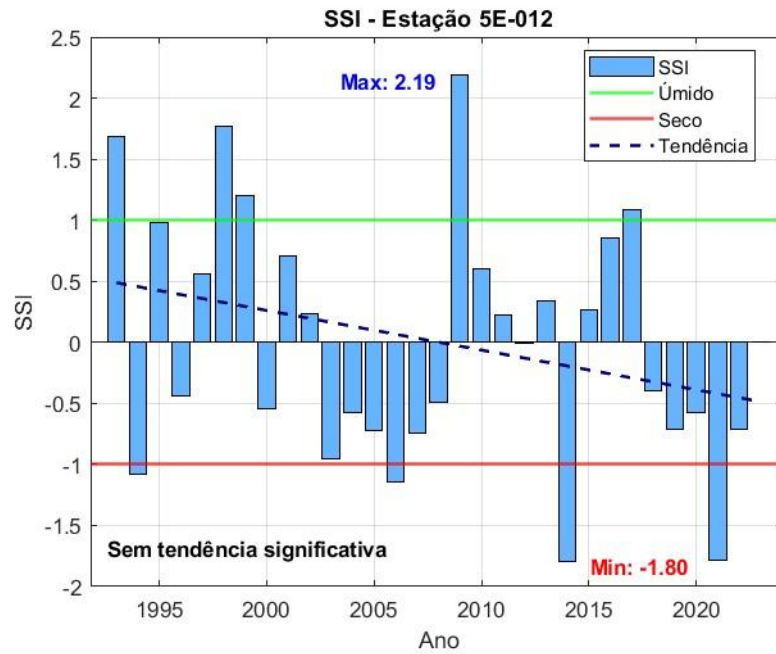
5.5.3. Estação São João – Rio do Peixe (5E-012)

De acordo com a Figura 25, o gráfico de tendência da estação fluviométrica de São João – Rio do Peixe (5E-012), exibiu uma acentuada variabilidade interanual com alternância entre anos úmidos e secos. O registro máximo registrado foi de 2,19 no ano de 2009 onde indicou episódio de umidade extrema, enquanto o valor mínimo registrado atingiu -1,80 em 2014 associado a uma seca severa, conforme a classificação proposta por MCKEE et al. (1993). A análise temporal sugere que entre 1993 e o início dos anos 2000, predominaram condições relativamente úmidas. Em contrapartida, após 2010 observou-se maior frequência de valores negativos do índice, destacando-se o período entre 2018 a 2022 com condições de seca mais intensas.

A alternância entre valores positivos e negativos ao longo do tempo reforçou a capacidade do SSI em registrar eventos hidrológicos extremos, conforme discutido por HUGHES (2002), além de se alinhar à interpretação estatística de extremos climáticos apresentada por KATZ (2010).

A linha de tendência indica declínio dos valores ao longo da série, entretanto, a análise estatística aponta ausência de tendência significativa de modo que não se pode afirmar alteração consistente no regime hidrológico da estação.

Figura 25. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico São João – Rio do Peixe (5E-012).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

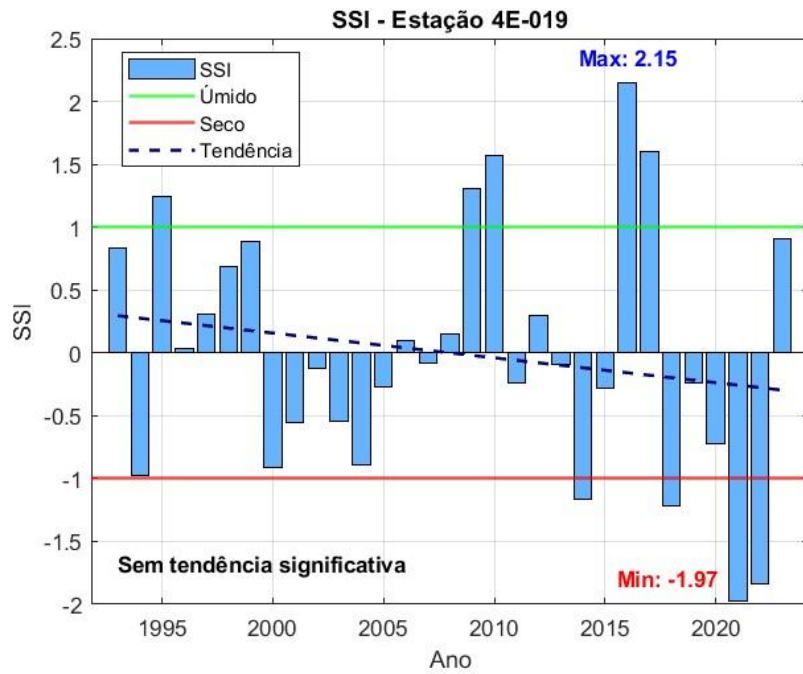
5.5.4. Estação Tatuí (4E-019)

A estação Tatuí (4E-019) revelou, na Figura 26, que durante a série houve alternância entre eventos úmidos e secos de vazão. Observou-se um pico do SSI máximo de 2,15 no ano de 2016 representando um evento de excesso hídrico, enquanto o valor mínimo de índice foi de -1,97 em 2021 indicando um período de seca acentuada, caracterizando episódios de umidade muito elevada e seca severa, respectivamente, segundo a classificação de MCKEE et. al. (1993).

No início da série (1993–2005) houve alternância entre anos levemente úmidos e secos sem eventos extremos. A partir de 2010, os eventos tornaram-se mais intensos e frequentes com destaque para condições úmidas intensas em 2016 e 2017 e períodos de secas severas em 2014 e entre 2018 a 2022.

Apesar dessa oscilação a análise estatística não identificou significância sugerindo que não há alteração consistente no regime hidrológico da estação. Esse padrão de flutuação sem tendência definida é compatível com estudos de séries hidrológicas discutida por LALL (1995) que destaca a forte influência da variabilidade climática interanual nas vazões. Assim, o gráfico demonstrou que o SSI da estação 4E-019 foi marcado por grande variabilidade interanual e ocorrência recorrente de extremos, porém sem indicação de tendência significativa de aumento ou redução da disponibilidade hídrica ao longo da série histórica.

Figura 26. Análise da tendência anual do SSI com base na vazão média do posto fluviométrico Tatuí (4E-019).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.6. Avaliação da variabilidade anual Índice Padronizado de Vazão (SSI) a partir da análise de gráficos boxplot e da tabela de distribuição

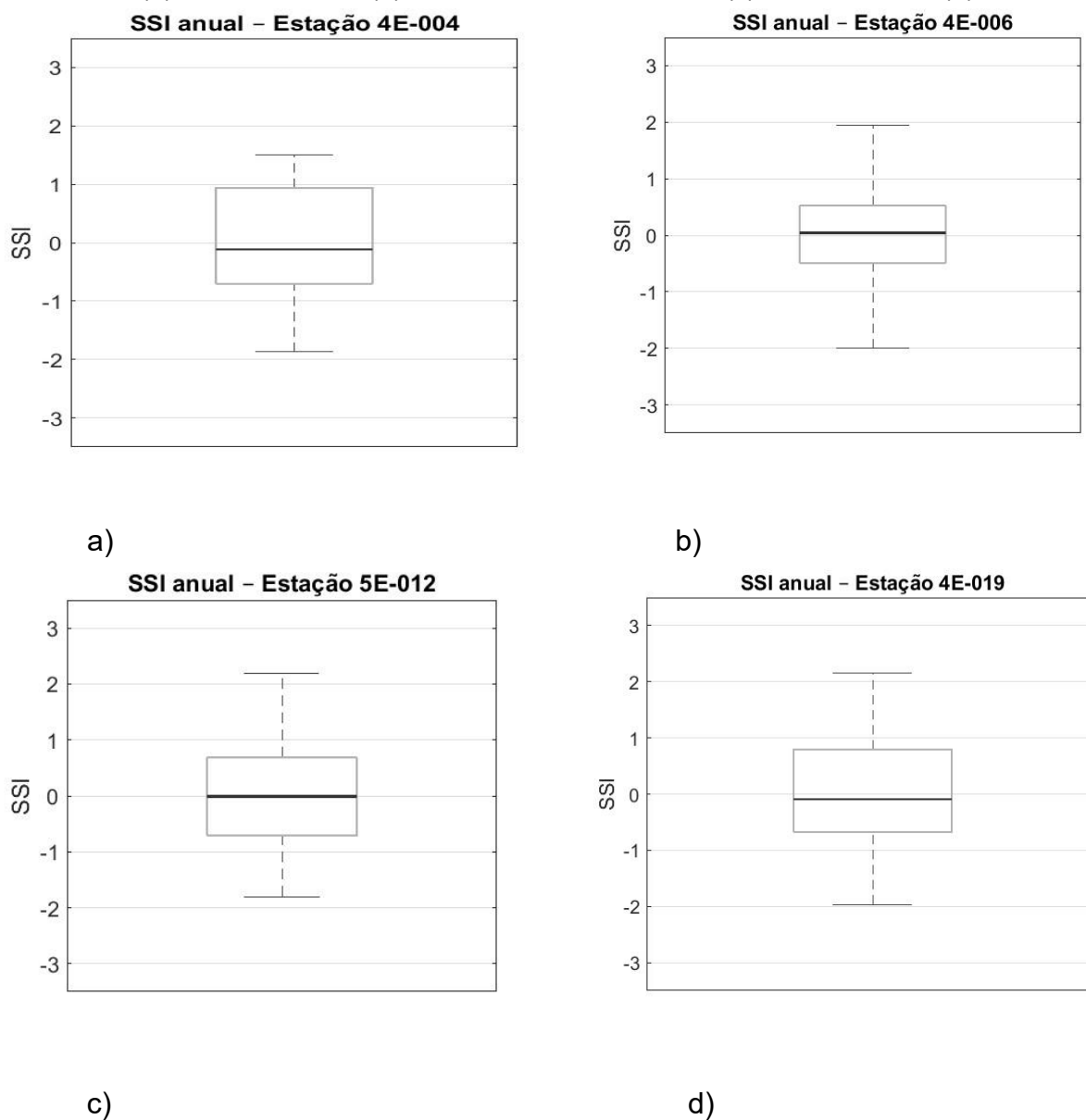
A análise integrada da distribuição da média anual do SSI nas estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c) e Tatuí 4E019 (d) presentes na Figura 27 e da Tabela 10 permitiu compreender a variabilidade hidrológica ao longo da série histórica. As médias e medianas permaneceram próximas de zero, indicando predominância de condições normais de vazão e o regime hidrológico oscilou em torno do padrão esperado na maior parte dos anos. Os valores mínimos inferiores de SSI a $-1,8$ e os valores máximos superiores a $+2,0$ observados tanto nos gráficos quanto na tabela, confirmaram a ocorrência de secas severas e períodos de umidade extrema conforme a classificação de MCKEE *et al.* (1993).

A amplitude entre os quartis representada pela altura das caixas e descrita na tabela, evidenciou diferenças na irregularidade interanual entre as estações.

A estação Sarapu 4E-006 apresentou maior dispersão e tendência à redução do SSI ao longo do tempo, enquanto que a estação Tatuí 4E-019 e São João – Peixe 5E-012 mostraram grande variabilidade, porém sem tendência significativa. Essa leitura está alinhada à abordagem estatística de séries hidrológicas discutida por LALL (1995), que ressalta a importância da análise da variabilidade e não apenas da média. Observou-se ainda que a estação Sarapu 4E-006 apresentou comportamento diferenciado com tendência significativa à seca, enquanto as demais estações mantiveram padrão de alternância entre anos secos e úmidos sem tendência definida. Esse tipo de persistência de secas hidrológicas é discutido nos trabalhos de LANEN *et al.* (2016), ao analisarem séries temporais de vazão.

Assim, a leitura conjunta dos gráficos e da tabela dessas estações demonstrou que o SSI anual foi caracterizado dentro de normalidade mesmo com grande variabilidade entre os anos e ocorrência recorrente de extremos com destaque para a estação Sarapu 4E006 que apresentou tendência à redução da disponibilidade hídrica.

Figura 27. Distribuição da média anual do SSI, em boxplots, nas estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c) e Tatuí 4E019 (d).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 10. Distribuição estatística do SSI Anual

Estatísticas	Estação 4E-004	Estação 4E-006	Estação 5E-012	Estação 4E-019
N	16	31	31	31
Média	0,000625	0,00032258	-0,00032258	0,0096774
Mediana	-0,12	0,04	-0,09	-0,01
Desvio Padrão	1,0008	0,99988	0,99959	0,99955
Mínimo	-1,86	-2	-1,97	-1,8
Máximo	1,5	1,94	2,15	2,19
1° Q	-0,7	-0,4925	-0,6775	-0,71
2° Q	-0,12	0,04	-0,09	-0,01
3° Q	0,94	0,5225	0,795	0,6825

5.7. Análise Trimestral do Índice Padronizado de Vazão (SSI) com base em gráficos de tendência das estações Americana Velha 4E004, Sarapu 4E006, São João – Peixe 5E012, Tatuí 4E019

5.7.1. 1º Trimestre

A análise de tendências do SSI para o 1º trimestre (setembro a novembro) nas quatro estações fluviométricas: Americana Velha (4E004), Sarapu (4E006), São João – Peixe (5E012), Tatuí (4E019) apresentada na Figura 28 revelou um comportamento decrescente ao longo da série histórica, embora com diferenças quanto à intensidade, variabilidade e significância estatística entre as estações.

Na estação Americana Velha (4E004) entre 1992 e 2008 observou-se elevada variabilidade interanual com ocorrência de anos extremamente úmidos (1993, 1997 e 1998) alternando com períodos secos (1994 e 2003). Verificou-se uma tendência negativa mais evidente a partir dos anos 2000, indicando aumento da aridez embora sem significância estatística. Esse comportamento é compatível com as discussões de LALL (1995) sobre a forte influência da variabilidade climática natural e do papel de eventos extremos nas séries históricas.

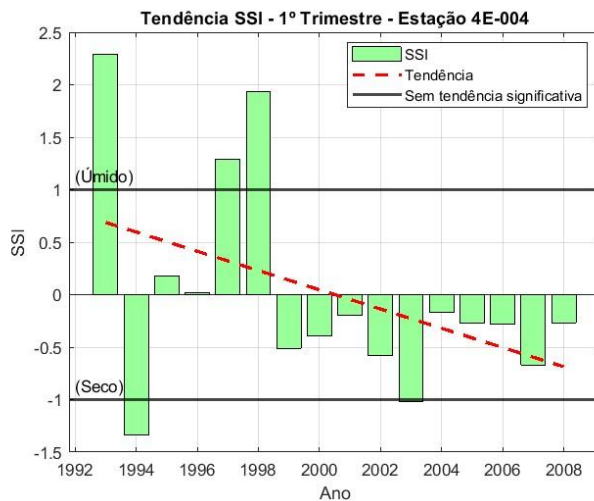
Em seus estudos KATZ (2010) discutiu a abordagem estatísticas de extremos, fato observado na estação 4E-006 (Sarapu) em que apresentou resultados de forte variabilidade interanual com registros de eventos úmidos (1997, 1998, 2009 e 2015) contrastando com secas acentuadas em 2019, 2021 e 2022. A tendência é negativa e significativa ($p=0,011$), confirmou a intensificação das secas neste período do ano caracterizando a consolidação de um cenário de déficit hídrico.

Por sua vez, a estação 5E-012 (São João – Rio do Peixe) registrou a maior variabilidade interanual com registros de SSI próximo a 2,0 em 1993, além de ocorrência de eventos extremamente úmidos em 2009 ($SSI > 3,0$) e 2015 ($SSI > 2,5$). Entretanto, o predomínio de valores negativos após 2002 sustenta a tendência de redução da vazão principalmente em 2020.

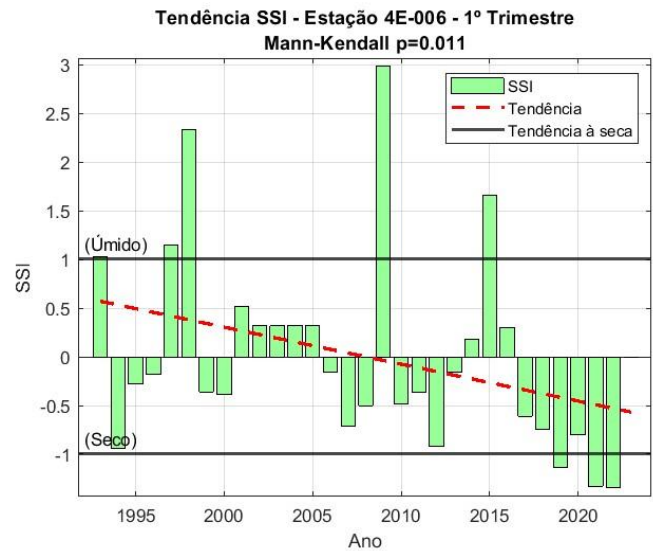
Por fim, a estação 4E-019 (Tatuí) apresentou tendência negativa mais discreta e sem significância estatística. Foram registrados episódios de extrema umidade semelhantes ao da estação anterior com destaque para o valor de SSI superior a 3,0 no ano de 2009. Apesar desses eventos pontuais, o padrão geral indicou redução na

frequência de anos úmidos ao longo das últimas décadas com maior ocorrência de secas recentes como em 2021 e 2022.

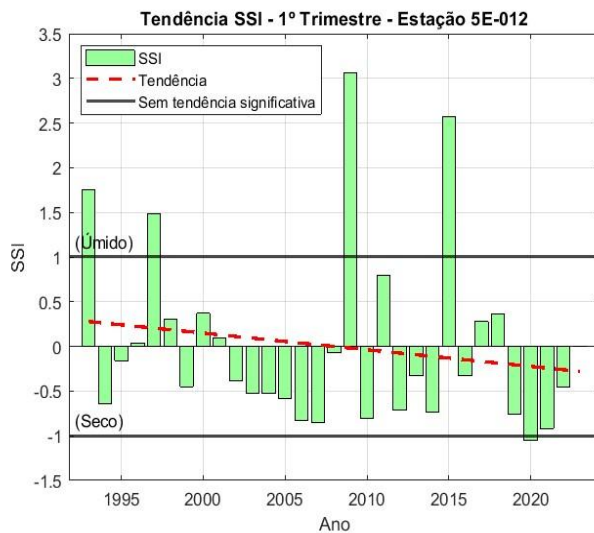
Figura 28. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c), Tatuí 4E019 (d) – 1º Trimestre.



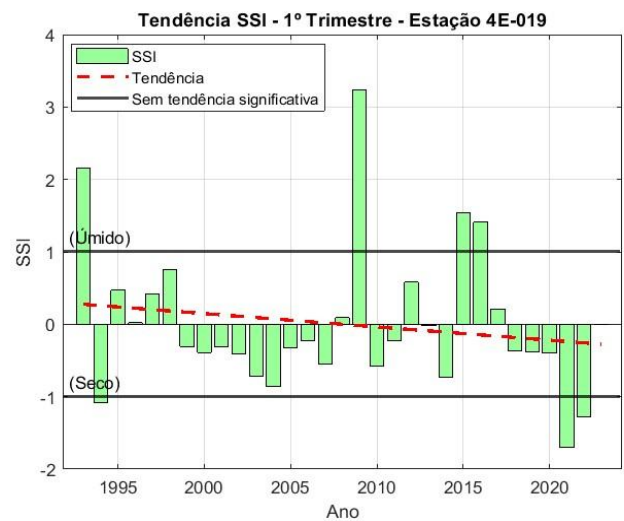
a)



b)



c)



d)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.7.2. 2º Trimestre

No segundo trimestre (dezembro a fevereiro) as estações fluviométricas apresentaram comportamentos diferentes quanto à variabilidade hidrológica e à presença de tendências temporais conforme observado na Figura 29.

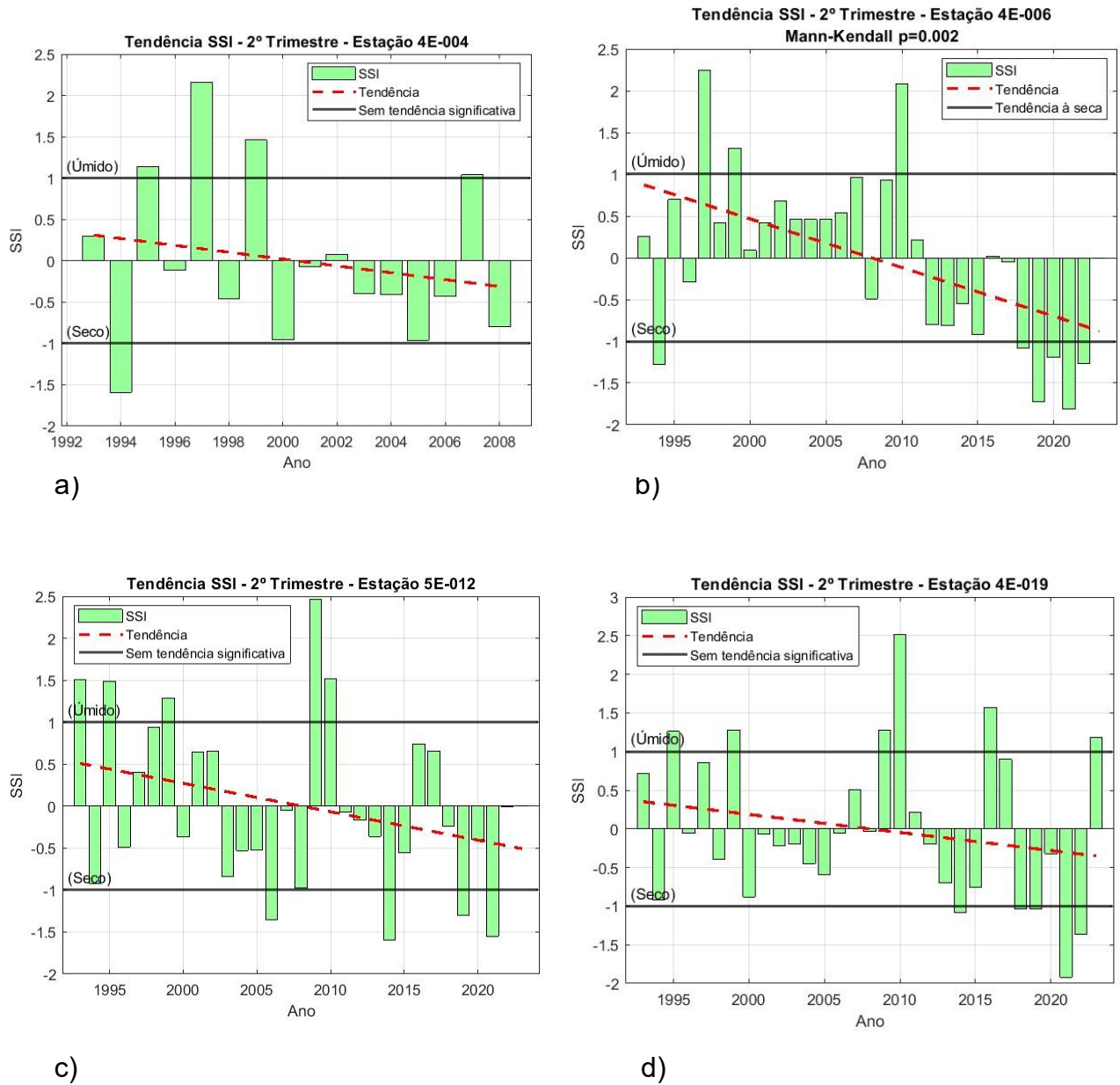
A estação fluviométrica de Americana Velha (4E-004) apresentou alternância entre períodos úmidos e secos com maior predominância de eventos úmidos em 1995, 1997, 1999 e 2007. A tendência linear também apontou redução da umidade ao longo do tempo, porém, sem significância estatística conforme por ABREU *et al.* (2017) e Rodrigues *et al.* (2022) ao analisarem a forte oscilação sazonal das vazões em bacias do Estado de São Paulo.

Já a estação 4E-006 (Sarapu) apresentou uma tendência linear negativa e estatisticamente significativa para o teste de Mann-Kendall ($p = 0,002$), mostrando um aumento claro das secas no período avaliado o que indica mudanças no regime de vazão da bacia possivelmente ligadas ao clima regional ou a ações antrópicas. Estudos recentes no Sudeste brasileiro, como ALVES *et al.* (2022) e CUMPLIDO *et al.* (2023), descrevem comportamento semelhante associado às secas recentes da região.

Segundo estudos de KATZ (2010), a alternância entre extremos sem tendência significativa indica maior instabilidade hidrológica conforme observado na estação São João – Rio do Peixe (5E-012) onde se constatou elevada variabilidade interanual com ocorrência de extremos úmidos em toda a série. Esse tipo de comportamento também foi observado por BLAIN (2014) e GONÇALVES *et al.* (2021) ao analisarem a variabilidade do SPI no interior paulista.

Nesse mesmo ano de 2021, a estação Tatuí (4E-019) registrou episódios seca quando o SSI atingiu valor próximo de -2,0 apontando uma tendência estatística significativa associada à redução das condições úmidas ao longo do período. De modo geral, o cenário evidenciou maior frequência de secas nas últimas décadas, ainda dentro da variabilidade natural do regime hidrológico. Resultados semelhantes foram apresentados por XAVIER *et al.* (2021) e NUNES *et al.* (2021) para bacias do Estado de São Paulo.

Figura 29. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c), Tatuí 4E019 (d) – 2º Trimestre.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.7.3. 3º Trimestre

A leitura dos gráficos das séries temporais do SSI do 3º trimestre (Março a Maio) conforme a Figura 30, mostrou comportamento predominantemente negativo nas quatro estações analisadas sugerindo redução gradual da disponibilidade hídrica ao longo do tempo.

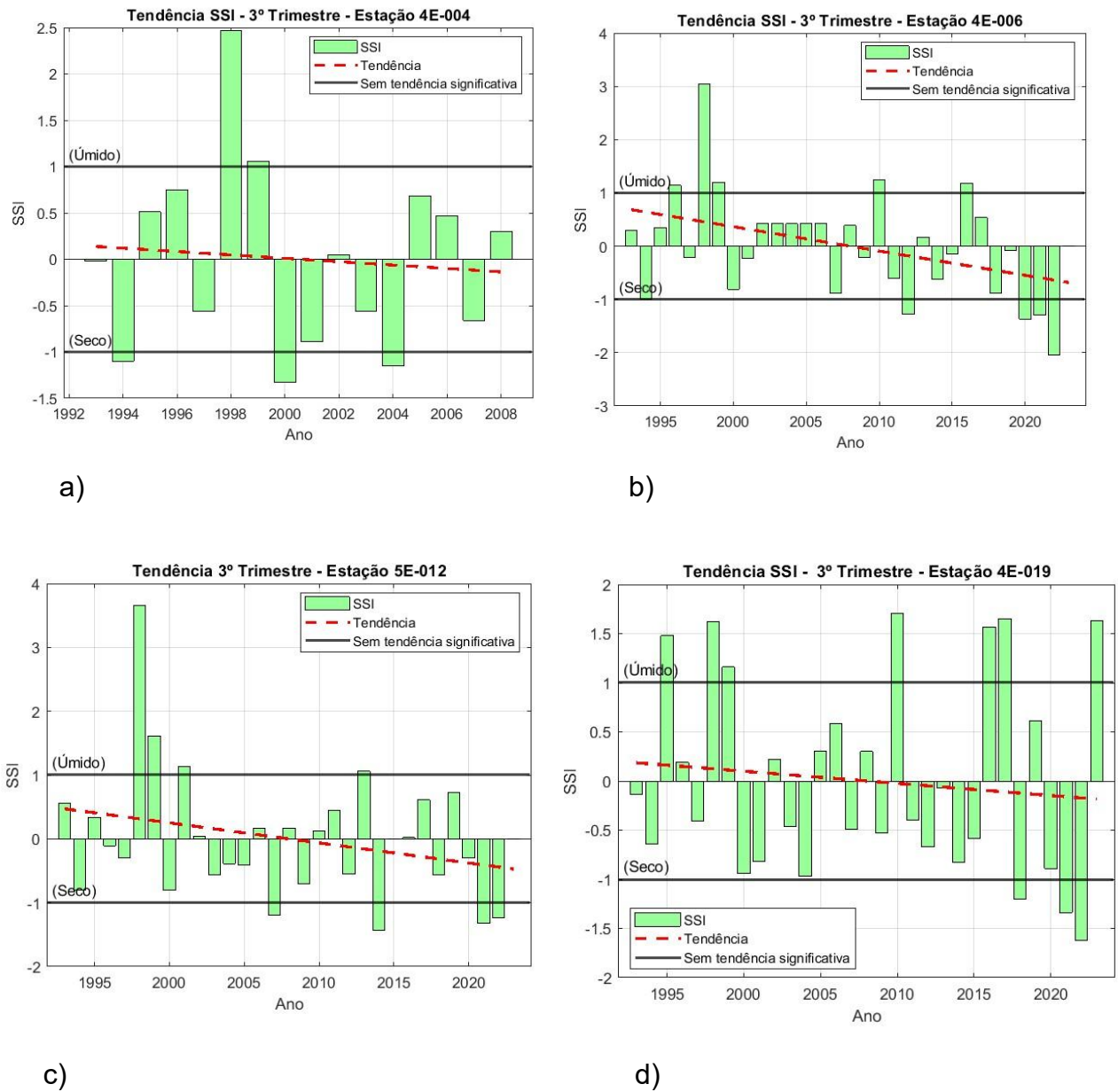
Notou-se na estação Americana Velha (4E-004) predominância de valores positivos nos anos 1990, especialmente em 1998 ($SSI > 2,5$), seguida por maior ocorrência de anos secos principalmente em 2000 e 2004, entretanto sem tendência estatisticamente significativa. Esse comportamento de oscilação é compatível com trabalhos desenvolvidos por NUNES *et al.* (2021) para o Sudeste brasileiro e para vazões em bacias paulistas.

Apesar de registrar episódios úmidos em 1998, 1999, 2010 e 2016, a estação Sarapu (4E-006) apresentou tendência negativa e maior ocorrência de valores negativos nos anos recentes, especialmente em 2012, 2020, 2021 e 2022. Contudo, o gráfico indicou ausência de tendência estatisticamente significativa para o período. Esse comportamento foi evidenciado por SILVA *et al.* (2018; 2020) ao estudarem a variabilidade das secas em bacias brasileiras.

Observou-se episódios úmidos significativos na estação São João – Rio do Peixe (5E-012) no final da década de 1990 especialmente em 1998 e 1999 com destaque para 1998 quando o SSI ultrapassou o valor de 3,0. Entretanto, a partir de 2007 os eventos secos se tornaram mais recorrentes com destaque para 2014, 2020 e 2021 em que o índice ficou próximo ou inferior a -1,0.

Por fim, a estação Tatuí (4E-019) evidenciou forte variabilidade interanual do SSI alternando entre anos úmidos ($SSI > 1,0$) e anos secos recentes como 2018, 2021 e 2022 ao longo da série. Esse padrão está de acordo com as análises de variabilidade hidroclimática apresentadas por GRIMM *et al.* (2021) e REBOITA *et al.* (2010) em que destacam a influência da variabilidade climática regional sobre o regime de vazões.

Figura 30. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c), Tatuí 4E019 (d) – 3º Trimestre.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.7.4. 4º Trimestre

A leitura da Figura 31 sobre o 4º trimestre (junho a agosto) do índice de vazão mostrou diferentes comportamentos entre as estações, porém marcados por fortes variabilidade entre os anos.

A estação Americana Velha (4E-004) houve alternância entre eventos úmidos (1993, 1997, 1998 e 1999) e maior frequência de anos secos no início dos anos 2000. A linha de tendência apresentou leve declínio, porém sem significância estatística comportamento semelhante ao discutido por BLAIN (2014) para o estado de São Paulo.

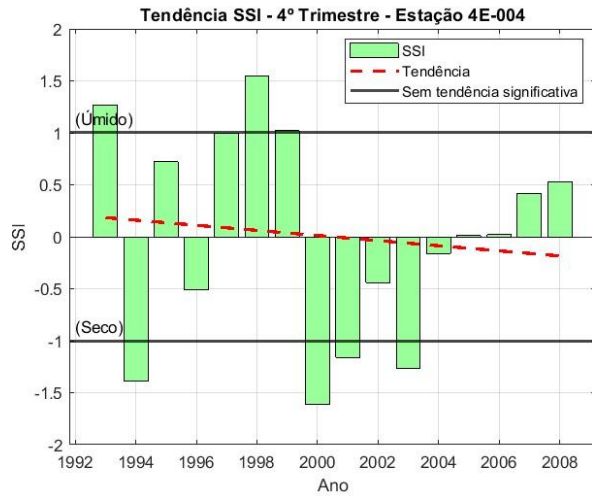
A estação 4E-006 (Sarapu) apresentou alternância mais equilibrada entre eventos úmidos (2009, 2016 e 2017) e secos (2000, 2018, 2020, 2021 e 2022), com registros de SSI inferiores a $-1,5$ caracterizando em secas moderadas a severas de acordo com a classificação de MCKEE (1993).

O SSI se mostrou relativamente mais estável na estação São João – Rio do Peixe (5E-012) apesar da alternância frequente entre anos úmidos e secos não há tendência clara de intensificação da seca. Os anos 1993, 2012, 2013, 2016 e 2017 destacaram-se por SSI positivo, enquanto 2014, 2021 e 2022 apresentam valores negativos, indicando seca moderada a intensa segundo a classificação de MCKEE (1993). Esse tipo de oscilação foi observado por LOPES e SANTOS (2019) ao analisarem a variabilidade do SPI em São Paulo.

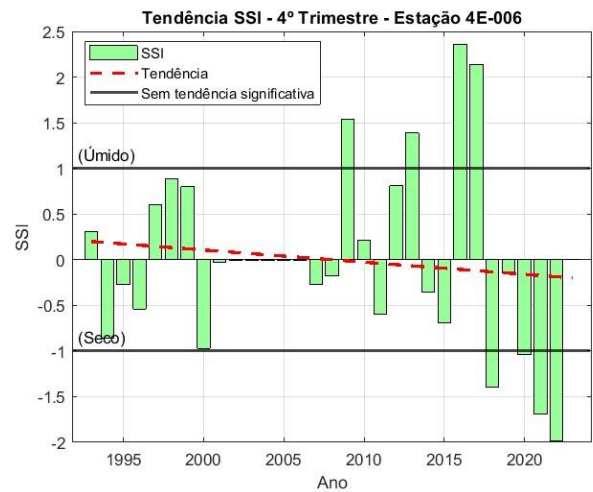
A estação 4E-019 (Tatuí) apresentou leve tendência negativa do SSI, sem significância estatística, (2014, 2018, 2021 e 2022) De modo geral,

Ao final, a estação 4E-019 (Tatuí) evidenciou leve tendência negativa do SSI, sugerindo discretos aumentos na frequência de eventos de seca, mas sem significância estatística, alternando entre anos secos (2014, 2018, 2021 e 2022) e anos relativamente úmidos (2012, 2016 e 2017). Dessa forma, o conjunto das estações revelou que no 4º trimestre não houve evidências de intensificação progressiva da seca, mas e um padrão de elevada variabilidade, mas sem uma mudança significativa no regime de vazões.

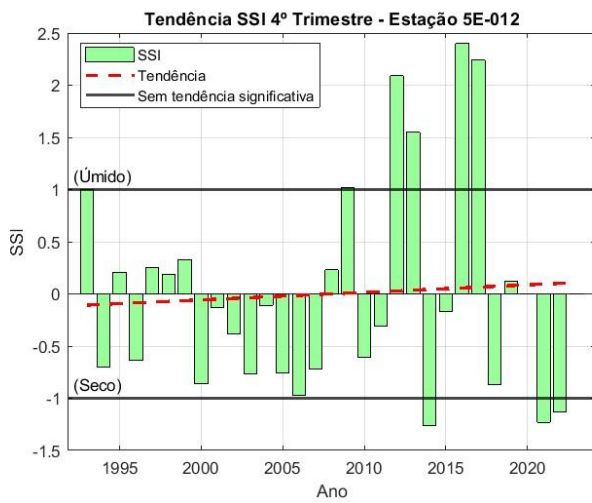
Figura 31. Gráfico de análise de tendência trimestral do índice SSI das estações Americana Velha 4E004 (a), Sarapu 4E006 (b), São João – Peixe 5E012 (c), Tatuí 4E019 (d) – 4º Trimestre.



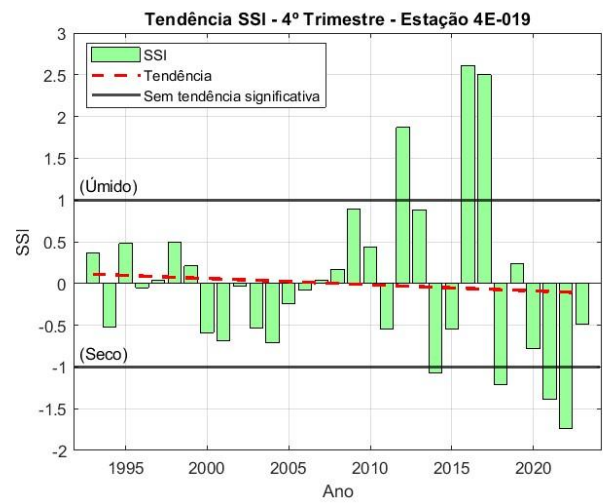
a)



b)



c)



d)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.8. Avaliação da variabilidade trimestral do Índice Padronizado de Vazão (SSI) a partir da análise de gráficos boxplot

5.8.1. Estação Americana Velha (4E-004)

A avaliação integrada do SSI trimestral da estação fluviométrica Americana Velha (4E-004) entre a Tabela 11 e a Figura 32, constatou que houve predominância de condições hidrológicas próximas da normalidade com médias próximas de zero e desvio-padrão em torno de 1.

Os quartis e a altura das caixas mostraram diferenças entre os trimestres: o 1º trimestre esteve mais estável e o 2º, 3º e 4º trimestres mais variáveis conforme a abordagem estatística WILKS (2011).

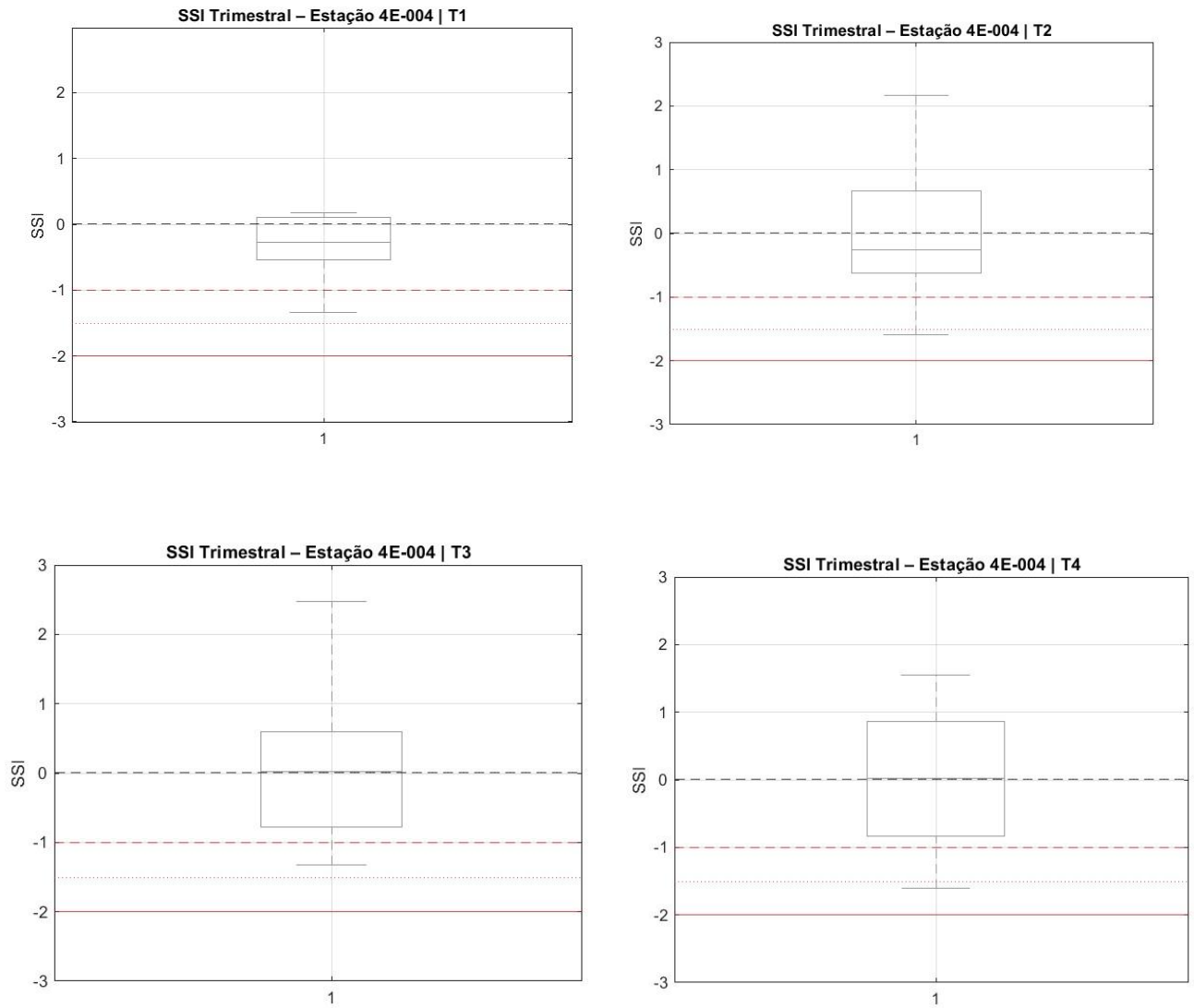
Os limites mínimos e máximos revelaram eventos extremos de seca e umidade que ampliaram a dispersão dos dados, mas sem indicar tendência ao longo da série, caracterizando alternância natural entre anos secos e úmidos.

Tabela 11. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação Americana Velha (43-004)

Estação 4E-004				
Variável	1º T	2º T	3º T	4º T
N	16	16	16	16
Média	0,00625	1,39E-17	0,00125	0
Mediana	-0,27	-0,255	0,015	0,015
Desvio Padrão	0,99975	1,0003	0,99932	0,9998
Mínimo	-1,34	-1,59	-1,33	-1,61
Máximo	2,29	2,16	2,47	1,55
1º Q	-0,545	-0,63	-0,775	-0,835
2º Q	-0,27	-0,255	0,015	0,015
3º Q	0,1	0,67	0,595	0,86

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 32. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação Americana Velha (4E-004) a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.8.2. Estação Sarapu (4E-006)

Na estação fluviométrica Sarapu (4E-006) o SSI trimestral os resultados relataram de acordo com a Tabela 12 e a Figura 33, um comportamento hidrológico marcado por forte variabilidade interanual, porém com predominância de condições próximas da normalidade. Valores do índice próximos de zero indicam condições normais conforme a classificação proposta por MCKEE *et al.* (1993). Essa condição é confirmada pelas médias praticamente nulas em todos os trimestres e pelos desvios-padrão muito próximos de 1.

O 2º e o 3º trimestres se mostraram mais suscetíveis a secas devido a maior variabilidade dos quartis e pela altura das caixas, entretanto, o 4º trimestre apresentou uma maior frequência de anos úmidos.

Os valores mínimos e máximos evidenciaram eventos extremos de seca e umidade, mas sem indicar tendência persistente ao longo da série.

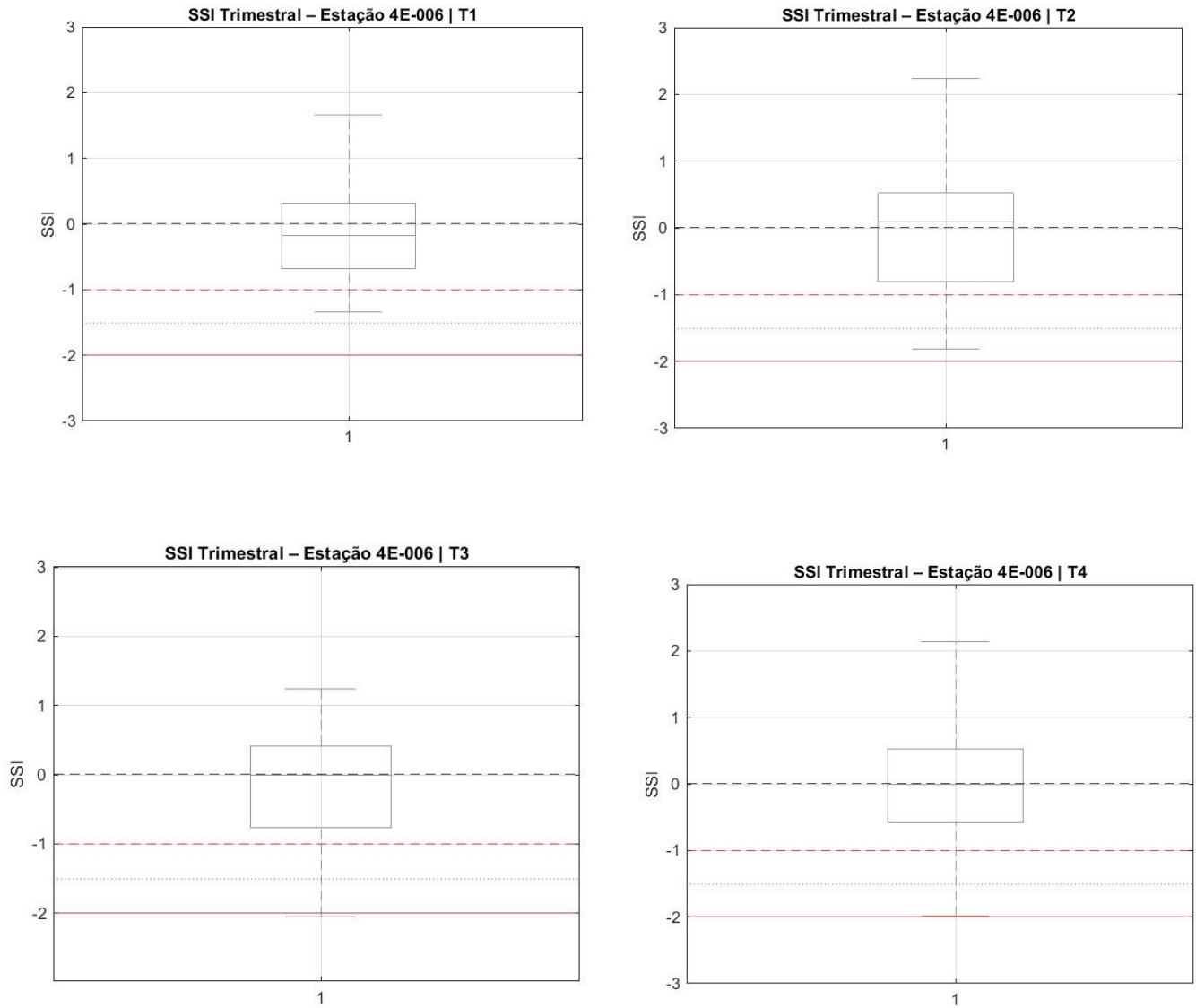
Portanto a estação Sarapu 4E-006 apresentou uma maior amplitude hidrológica com trimestres mais sensíveis a eventos extremos, especialmente 2º e 3º trimestres para secas e o 3º e o 4º trimestres para umidade, mas ainda assim sem indicar tendência persistente ao longo da série, refletindo alternância natural entre anos secos e úmidos sob influência da variabilidade climática interanual.

Tabela 12. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação Sarapu (4E-006).

Estação 4E-006				
Variável	1º T	2º T	3º T	4º T
N	31	31	31	31
Média	0,00064516	-0,00064516	0,00032258	-0,00032258
Mediana	-0,18	0,09	0	-0,01
Desvio Padrão	0,99962	1,0006	1,0002	0,99982
Mínimo	-1,34	-1,81	-2,05	-1,98
Máximo	2,98	2,24	3,05	2,36
1º Q	-0,685	-0,8075	-0,7625	-0,585
2º Q	-0,18	0,09	0,015	-0,01
3º Q	0,32	0,52	0,42	0,5275

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 33. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação Sarapu (4E-006) a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.8.3. Estação São João – Peixe (5E-012)

A leitura do SSI trimestral da estação São João – Peixe (5E-012) mostrou através da Tabela 13 e da Figura 34, predominância de condições hidrológicas normais, com medianas próximas de zero e desvio padrão também próximos de 1, conforme discutido nos trabalhos de GUTTMAN (1998).

Os quartis indicaram variabilidade interanual, sendo o 2º trimestre o que apresentou maior amplitude enquanto que o 1º e o 3º trimestres foram mais homogêneos. A análise dos quartis permitiu interpretar a variabilidade interanual conforme recomendado por WILKS (2011).

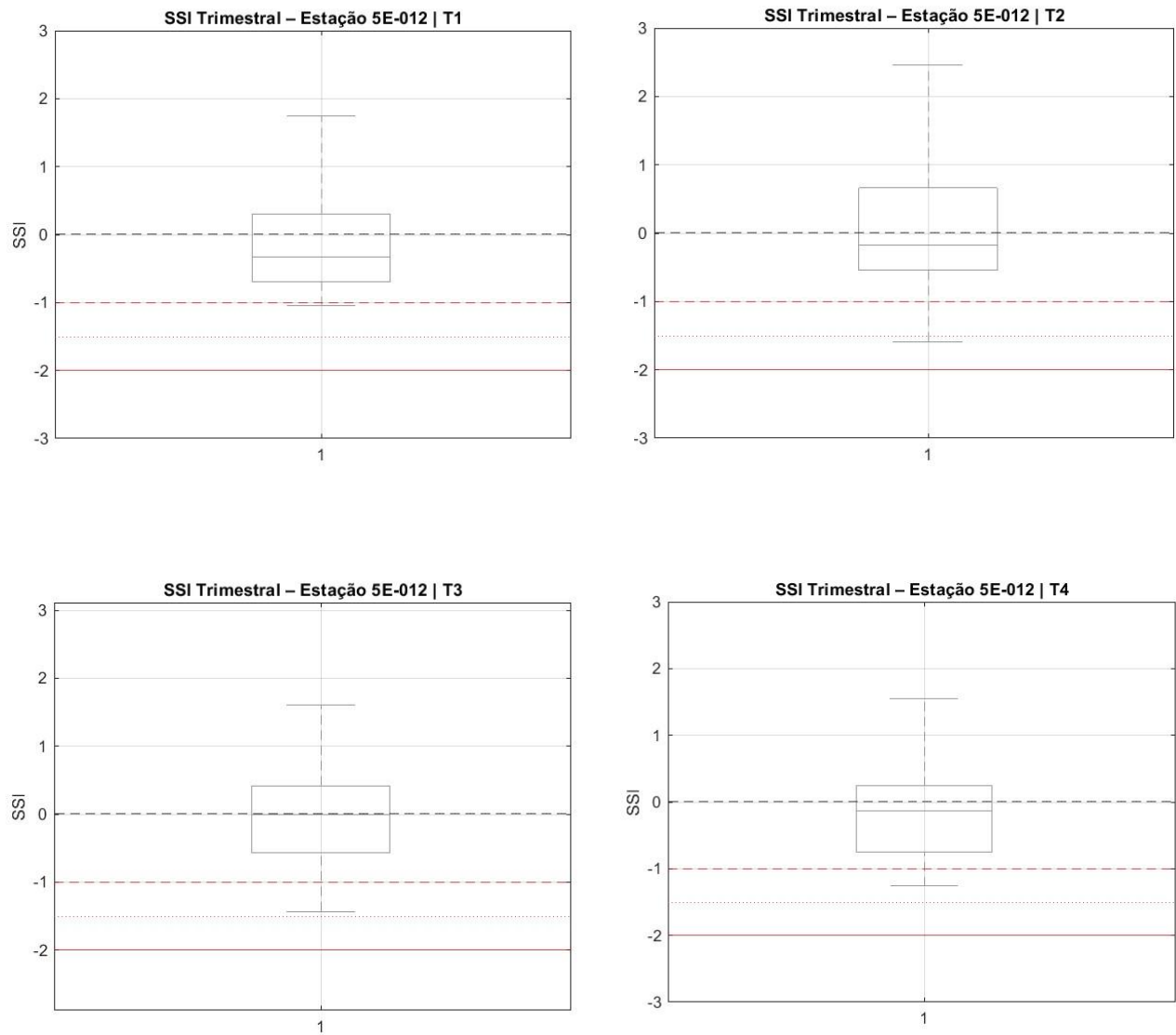
Os valores mínimos e máximos revelam eventos extremos específicos de seca moderada a severa e de umidade extrema conforme a classificação de MCKEE (1993), visualizados pelas hastes dos boxplots.

Tabela 13. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação São João – Peixe (5E-012).

Estação 5E-012				
Variável	1º T	2º T	3º T	4º T
N	31	31	31	31
Média	-3,4023E-17	0,00064516	-0,00032258	0,00032258
Mediana	-0,33	-0,17	0	-0,13
Desvio Padrão	1,0004	0,99947	0,99924	0,99969
Mínimo	-1,05	-1,59	-1,43	-1,26
Máximo	3,06	2,46	3,66	2,4
1º Q	-0,6925	-0,545	-0,5675	-0,75
2º Q	-0,33	-0,17	0	-0,13
3º Q	0,3025	0,66	0,415	0,245

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 34. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação São João – Peixe (5E-012) a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.8.4. Estação Tatuí (4E-019)

A análise dos boxplots do SSI trimestral para a estação Tatuí (4E-019) indicou, segundo a Tabela 14 e a Figura 35, predominância de condições hidrológicas secas, evidenciada pelas medianas negativas em todos os trimestres, especialmente no 3º, onde a mediana atinge -0,40.

Os quartis mostraram maior variabilidade interanual no 2º e no 3º trimestre com alternância entre anos secos e úmidos. O 4º trimestre é mais próximo da normalidade. Os valores mínimos do SSI (-1,92) evidenciaram ocorrência de secas severas, enquanto os valores máximos (3,23) indicaram eventos extremamente úmidos conforme a classificação MCKEE (1993). Nos boxplots, esses eventos aparecem nas hastes alongadas, mostrando que apesar da tendência ter sido de seca, houve episódios úmidos intensos e pontuais que ampliam a dispersão.

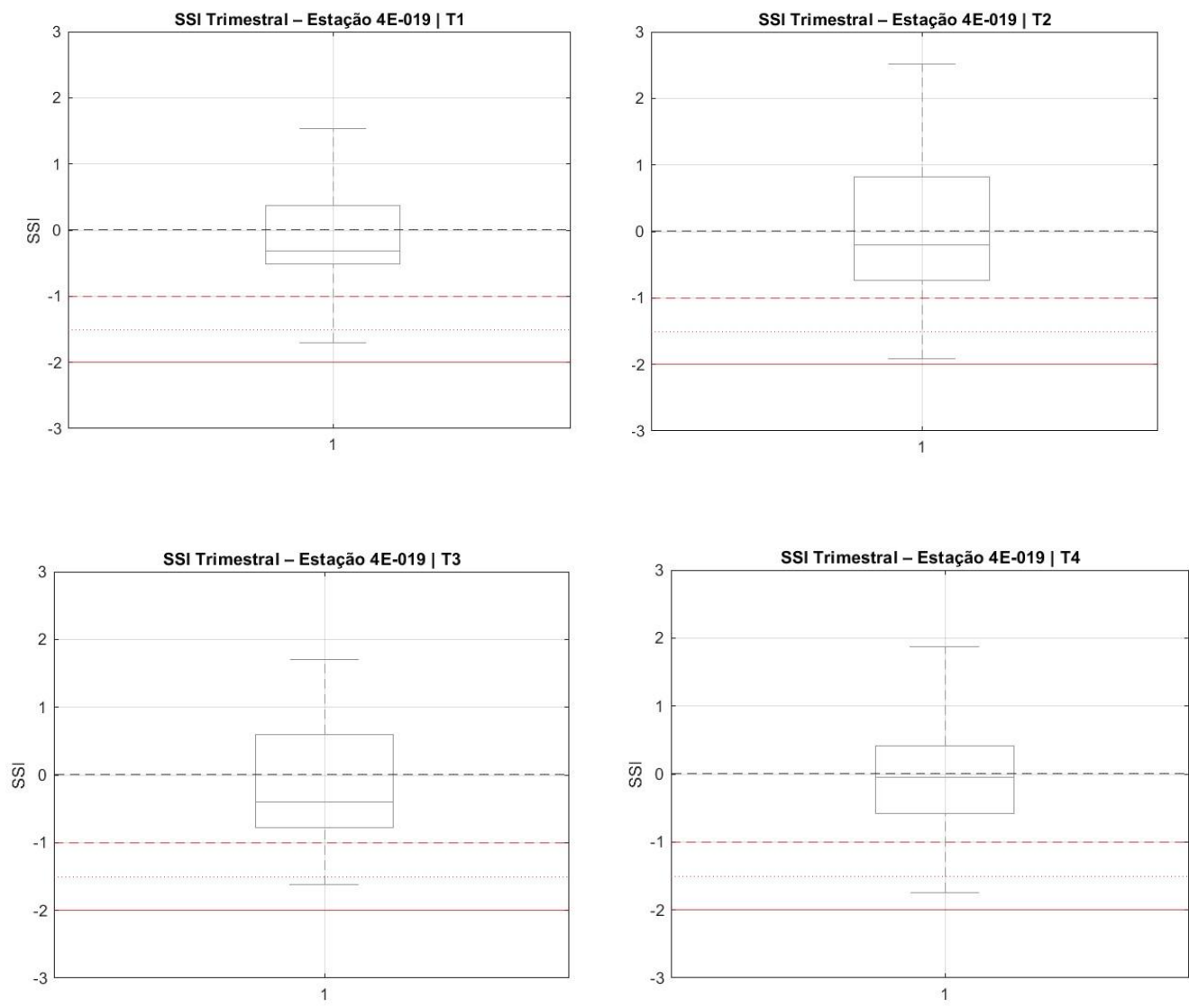
Essa alternância entre extremos é discutida em estudos hidrológicos recentes sobre variabilidade no Sudeste brasileiro por MARENGO (2020), que apontam aumento da irregularidade fluviométrica nas últimas décadas.

Tabela 14. Distribuição estatística do SSI Trimestral da estação Tatuí (4E-019)

Estação 4E-019				
Variável	1º T	2º T	3º T	4º T
N	31	31	31	31
Média	0,00064516	0,00032258	0,00064516	0,00032258
Mediana	-0,31	-0,2	-0,4	-0,05
Desvio Padrão	1,0007	0,99883	1,0003	1,0001
Mínimo	-1,7	-1,92	-1,62	-1,74
Máximo	3,23	2,52	1,71	2,61
1º Q	-0,515	-0,7375	-0,7825	-0,58
2º Q	-0,31	-0,2	-0,4	-0,05
3º Q	0,3675	0,825	0,6025	0,42

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 35. Comportamento da variabilidade do SSI trimestral da estação Tatuí (4E-019) a partir da análise por gráfico boxplot.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.9. Integração dos índices SPI e SSI e implicações hidrológicas

A análise integrada dos Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e Índice Padronizado de Vazão (SSI) permitiu compreender a dinâmica de propagação das secas meteorológicas e secas hidrológicas na Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê. O estudo desses dois índices permitiu entender que embora a precipitação tenha apresentado valores dentro da normalidade, a ocorrência recorrente de eventos extremos secos e úmidos influencia significativamente no regime hidrológico regional. Os resultados indicaram que a Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10) apresentou uma variabilidade interanual acentuada, característica do clima do sudeste brasileiro, comportamento descrito BLAIN (2012) e ABREU e TONELLO (2017), que também identificaram a alternância no padrão de chuvas de um ano para outro, considerando esse comportamento uma característica marcante do regime de precipitação no interior paulista.

Durante o período analisado (1993 a 2023), eventos extremos como os de 2014-2015 e 2021 evidenciaram a vulnerabilidade da bacia. Nestes períodos, os valores de SPI e SSI atingiram patamares de "seca severa" e "extrema", impactando diretamente a disponibilidade de água para abastecimento e produção. A persistência de valores negativos de SSI, mesmo após o retorno de chuvas dentro da média, sugere segundo TUCCI (2015), uma resiliência hídrica comprometida em certas regiões da bacia.

De acordo com estudos de autores como MCKEE *et. al.* (1993) e SHUKLA e WOOD *et. al.* (2008), a redução da precipitação pode refletir na diminuição das vazões. A análise comparativa entre os índices revelou que o déficit de precipitação (seca meteorológica) com o tempo se manifestou na redução dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos (seca hidrológica). No caso da bacia estudada, a oscilação do índice SPI em escala de curto prazo (3 meses), refletiu na variabilidade climática, enquanto o SSI respondeu através da acumulação desses déficits ao longo de períodos mais longo de tempo.

Na UGRHI-10, observou-se que embora o SPI não aponte uma tendência de redução pluviométrica estatisticamente significativa em grande parte das estações, o SSI sinaliza períodos de estresse hídrico mais persistentes, evidenciando uma sensibilidade da bacia a eventos extremos como os ocorridos em 2014-2015 e 2021. A análise dos gráficos boxplots confirmou que mesmo em estações sem tendência significativa, os valores extremos ultrapassaram constantemente os limites de SPI 2,0

e -2,0 proposto por MCKEE (1993). A interpretação da dispersão estatística é essencial para o entendimento da dinâmica do clima segundo WILKS (2011) e LALL (1995).

O estudo também revelou que algumas estações apresentaram resultados com tendências negativas significativas do SPI, conforme discutido por MARENGO *et al.* (2020), ALVALÁ *et al.* (2019) e NOBRE *et al.* (2016), que afirmaram que o Sudeste passou por aumento da frequência e intensidade de secas após os anos 2000, influenciado simultaneamente por variabilidade oceânica, mudanças climáticas globais e modificações no uso e cobertura do solo. Estudos regionais de autores como BLAIN (2012), SANTOS *et al.* (2019) e ALMEIDA *et al.* (2023), reforçam que o interior de São Paulo vem apresentando redução contínua nos valores de SPI indicando uma tendência de maior aridez parecida com a observada na bacia analisada.

Os resultados afirmaram também que os períodos em que o SPI apresentou valores negativos seguidos, refletiu em quedas no índice SSI confirmando a dependência direta da falta de chuva ao longo do período. Estações como Americana Velha e Sarapu apresentaram tendência negativa mais evidente a partir dos anos 2000, refletindo a propagação da seca meteorológica para a seca hidrológica. Esse comportamento confirma o que é descrito por SHUKLA e WOOD *et al.* (2008) e MCVICAR *et al.* (2012), que apontam que a seca hidrológica é frequentemente uma consequência acumulada de períodos prolongados sem precipitação. Entretanto, a estação Americana Velha possui dados apenas até 2008, interrompendo o monitoramento antes dos eventos críticos recentes. Séries incompletas dificultam análises de tendência e comprometem a gestão de risco hídrico, segundo WILKS (2011) e LALL (1995).

Contudo, o estudo também apontou que a redução das vazões (SSI) em determinadas estações, não esteve associada somente a dinâmica de precipitação. É o caso da estação Sarapu, enquanto os dados pluviométricos (SPI) da região não indicaram tendência de declínio nas chuvas, o teste de Mann-Kendall aplicado ao SSI revelou uma tendência negativa significativa de redução da vazão ($p = 0,003$). Esta divergência é fundamental, pois sugere que a redução da água disponível no Rio Sarapuí não pode ser causada exclusivamente por fatores climáticos, tonando se evidentes que fatores não climáticos, especialmente ações antrópicas, podem estar afetando a resposta hidrológica da bacia. Processos como a urbanização, mudança

no uso e ocupação do solo, alterações no curso d'água podem alterar a capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento da água da bacia. Esse comportamento é discutido por TUCCI (2015) que destaca que a impermeabilização do solo reduz a recarga hídrica e altera significativamente o regime de vazões. Estudos regionais como os Instituto de Pesquisas Ambientais (2020) e do Departamento de Águas e Energia Elétrica (2020) apontam que a região da UGRHI-10 apresenta forte pressão antrópica sobre os recursos hídricos.

Outro fator que influencia diretamente no tempo de resposta hidrológica é a heterogeneidade espacial observada. TURKAN e BEKIR (2021) apontam que a resposta hidrológica depende das características físicas da bacia como a capacidade de armazenamento, usos do solo e geologia. A localização das estações (Figuras 1 e 2) mostra que parte delas situam-se em área de planalto, tais como, Cotia, Ibiúna, Piedade, Mairinque, onde o escoamento superficial é mais rápido e a vazão é mais sensível as variações de precipitação. Enquanto outras como Tatuí, Sarapu, Porto Feliz, Tietê, Conchas e Anhembi encontram-se em áreas de planície que apresentam menor declividade e solos mais profundos favorecendo o armazenamento de água conforme os trabalhos de LALL (1995), WILKS (2011) e TUCCI (2015).

A variabilidade temporal observada nos índices SPI e SSI na bacia não ocorre de forma isolada, sendo influenciada por fenômenos de escala global e regional. De acordo com WILHITE *et. al.* (1985), o entendimento da seca exige a análise das anomalias na circulação atmosférica. Estudos de COELHO *et. al.* (2016) e GRIMM *et. al.* (2021) revelam que a atuação das Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos principais fenômenos responsáveis pelos episódios de chuvas intensas e persistentes no Sudeste do Brasil. Esse mecanismo atmosférico explica os resultados extremamente úmidos observados em diversas estações em 2009 os valores de SPI ultrapassaram 2,0 em várias localidades, especialmente na estação de Mairinque (E4-043) em que o índice chegou a 3,47. A ZCAS é o principal sistema responsável pelas chuvas persistentes no verão da bacia. A sua falta ou o seu deslocamento das ZACS potencializado por anomalias de pressão e temperatura do Atlântico Sul, resulta em ausência de precipitação afetando diretamente o SSI conforme a memória hidrológica de acordo com VICENTE-SERRANO *et. al.* (2012).

Por outro lado, os períodos de seca severa e extrema, especialmente os observados entre 2014–2015 e 2021, com destaque para a estação Salto de Pirapora (E4-025)

em 2021 onde o SPI atingiu a -2,74, coincidem com a atuação do fenômeno climático El Niño associado à redução das chuvas no Sudeste brasileiro. Conforme discutido por MARENGO *et al.* (2017; 2020), esses eventos modificam a circulação atmosférica e deslocam os sistemas de umidade, reduzindo a atuação da ZCAS e, conseqüentemente, a precipitação na região. Além disso, fases de La Niña também contribuem para a irregularidade pluviométrica, podendo tanto intensificar chuvas em alguns períodos quanto prolongar secas em outros, conforme discutido por COELHO *et al.* (2016).

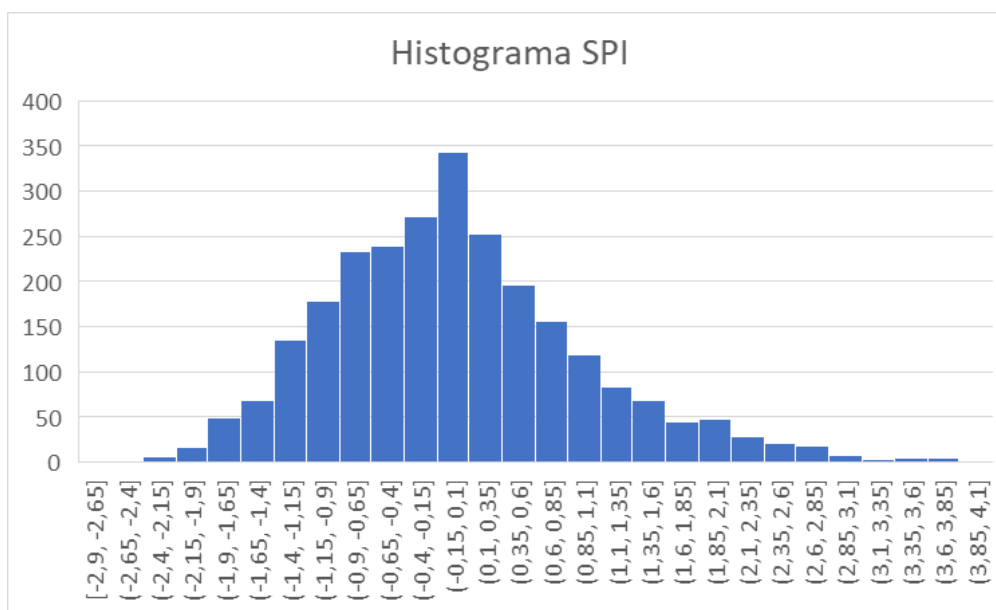
5.10. Avaliação da normalidade estatística do SPI e SSI

Observou-se através da Figura 36 o panorama geral dos dados na bacia do Rio Sorocaba em que no histograma reúne todos os dados analisados de todas as estações em todos os anos. Essa representação permite compreender o comportamento global do SPI. De acordo com WU *et al.* (2007), a série SPI será considerada como proveniente de uma distribuição normal padrão (média igual a zero e desvio padrão igual a um) se os critérios de Shapiro-Wilk e mediana forem atendidos.

Através da Figura 36, podemos constatar que o deslocamento negativo da mediana (-0,07 para SPI e -0,14 para SSI) é compreensível, dado que existe uma persistência maior de eventos de seca. A média é reconduzida ao valor próximo de zero pela ocorrência de poucos eventos úmidos extremos e isolados que atuam como compensadores estatísticos. Evidenciam-se os registros de SPI de +4,0 na estação D5-037 em 1995 e de +3,76 na estação E5-062 em 2015. Esses episódios, embora raros, possuem magnitude suficiente para equilibrar a média aritmética, mascarando a frequência predominante de meses secos representada pela mediana. Assim, a combinação de média próxima de zero e mediana negativa revela uma leve assimetria, sugerindo predominância de condições secas ao longo da série.

Essa assimetria pode ser explicada pela sazonalidade do clima da região estudada. Ao agrupar meses de períodos secos e úmidos em um único histograma, a distribuição tende a se afastar da forma simétrica. Segundo BLAIN (2012), as distribuições mensais do SPI no Estado de São Paulo costumam ser mais assimétricas no inverno e mais próximas da curva normal no verão.

Figura 36. Distribuição de frequência do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) na bacia do rio Sorocaba.



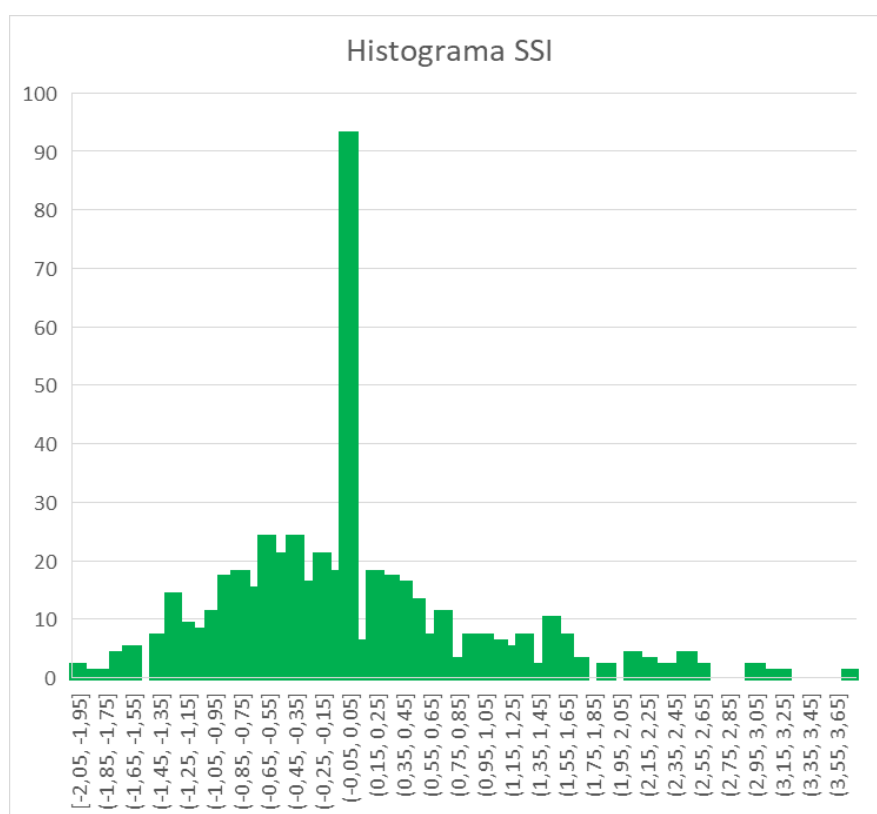
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

De maneira análoga, o SSI (Figura 37) também apresenta um comportamento assimétrico. No histograma, podemos observar que, enquanto a média é mantida próxima de zero por eventos de cheias excepcionais, como o pico de +3,66 observado em 1998 na estação 5E-012, o regime de vazão da bacia permanece a maior parte do tempo em níveis abaixo do normal. Isto pode indicar que a bacia está sofrendo os efeitos da propagação da seca, no qual déficits de precipitação recorrentes ou concentrados podem repercutir de forma mais persistente nas vazões devido à memória do sistema hidrológico (armazenamento no solo e aquíferos). Isso explica a mediana mais negativa (-0,14) em que indicou maior persistência de condições hidrológicamente secas quando comparado ao SPI. VICENTE-SERRANO *et al.* (2010) destacam que índices padronizados aplicados à vazão tendem a apresentar maior persistência temporal, refletindo o acúmulo de déficits sucessivos e a recuperação mais lenta do sistema hídrico. Além disso, TALLAKSEN e VAN LANEN (2004) ressaltam que a seca hidrológica pode manter-se mesmo após o retorno das chuvas à normalidade, devido à necessidade de recomposição dos reservatórios naturais da bacia.

De forma integrada, os gráficos indicam que a bacia do rio Sorocaba apresentou elevada variabilidade entre os anos com predominância estatística de valores abaixo

do normal e forte influência de eventos extremos na média das séries. Esses aspectos reforçam a importância de avaliar cuidadosamente os dados estatísticos dos índices e de interpretar os resultados considerando as características climáticas e hidrológicas da região.

Figura 37. Distribuição de frequência do Índice Padronizado de Vazão (SSI) na bacia do rio Sorocaba.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

6. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento das secas meteorológicas e hidrológicas na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba, por meio da aplicação dos índices padronizados SPI e SSI no período de 1993 a 2023, buscando compreender a relação entre as variações na precipitação e seus reflexos na dinâmica de vazão.

Os resultados obtidos evidenciaram que a bacia apresentou elevada variabilidade interanual tanto nos padrões de precipitação quanto de vazão caracterizada pela alternância entre períodos secos e úmidos. De modo geral, não foi identificada uma tendência estatisticamente significativa de intensificação das secas em grande parte das estações analisadas, indicando predominância da variabilidade climática natural. No entanto, algumas estações específicas como Sorocaba, Salto de Pirapora, Laranjal Paulista e Anhembi, apresentaram tendências negativas significativas no SPI, sugerindo um processo localizado de intensificação das condições de seca.

A ocorrência de eventos extremos como os registrados principalmente no ano de 2021, reforça a vulnerabilidade da região a episódios críticos de escassez hídrica. Esses eventos, embora pontuais, demonstram grande impacto sobre os recursos hídricos e evidenciam a importância do monitoramento contínuo. Além disso, a heterogeneidade espacial observada nos resultados indica que os efeitos das secas não ocorrem de maneira uniforme na bacia, sendo influenciados por fatores locais como uso e ocupação do solo, características fisiográficas e pressão antrópica.

A análise integrada dos índices SPI e SSI mostrou-se fundamental para uma compreensão mais abrangente do fenômeno, uma vez que permitiu identificar não apenas déficits de precipitação, mas também seus reflexos na disponibilidade hídrica superficial. A relação entre os índices evidenciou que períodos de seca meteorológica tendem a refletir ainda que com defasagem temporal em condições de seca hidrológica, reforçando a interdependência entre esses processos.

Os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica das secas na Bacia do Rio Sorocaba, fornecendo subsídios importantes para a gestão dos recursos hídricos. Do ponto de vista prático, destacam-se a necessidade de fortalecimento das estratégias de monitoramento hidrometeorológico, a implementação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica e a adoção de medidas de adaptação frente às mudanças climáticas.

Por fim, ressalta-se que embora não tenha sido observada uma tendência generalizada de agravamento das secas, a presença de eventos extremos e de tendências localizadas indica um cenário de atenção. Nesse contexto, recomenda-se a continuidade de estudos que incorporem outras variáveis climáticas como temperatura e evapotranspiração, bem como análises de cenários futuros, a fim de aprimorar a compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos regionais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. C.; TONELLO, K. C. Avaliação dos parâmetros hidrometeorológicos na Bacia do Rio Sorocaba/SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 99–109, 2017. DOI: 10.1590/0102-778632120150164.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021. Brasília: ANA, 2021.
- ALMEIDA, L. P. de et al. Análise multivariada do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) no Estado de São Paulo entre 1981 e 2020. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, p. 1–20, 2023.
- ALVALÁ, R. C. S. et al. Secas e gestão dos recursos hídricos no Brasil: impactos e políticas públicas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 24, p. 1–15, 2019.
- ALVES, L. M.; MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P. M. A. Caracterização e tendências de secas no Sudeste do Brasil a partir de índices climáticos. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 30, p. 1–18, 2022.
- BALLARIN, A. S. et al. Drought intensification in Brazilian catchments under climate change scenarios. *Environmental Research Letters*, v. 19, 054030, 2024.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações. São José dos Campos: INPE, 2019.
- BLAIN, G. C. Revisão da equação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 2, p. 225–233, 2009.
- BLAIN, G. C. Tendências nos valores do Índice Padronizado de Precipitação no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, p. 776–791, 2012.
- BLAIN, G. C. Tendências nos valores do Índice Padronizado de Precipitação no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 5, p. 776–791, 2012.
- BLAIN, G. C. Monthly values of the standardized precipitation index in the State of São Paulo, Brazil: trends and spectral features under the normality assumption. *Bragantia*,

Campinas, v. 71, n. 1, p. 122–131, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012000100016>.

BLAIN, G. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial no estado de São Paulo associada ao Índice Padronizado de Precipitação (SPI). *Bragantia*, Campinas, v. 73, n. 2, p. 213–222, 2014.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T.; CAMARGO, M. B. P. Variabilidade climática e ocorrência de eventos extremos de precipitação no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 3, p. 393–405, 2019.

BRASIL. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Rio de Janeiro: PBMC, 2016.

CBH-SMT – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA E MÉDIO TIETÊ. Plano de Bacia Hidrográfica da UGRHI 10 – Sorocaba e Médio Tietê. Sorocaba: CBH-SMT, 2020.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014 Southeast Brazil drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*, v. 46, p. 3737–3752, 2016.

CUMPLIDO, M. A. *et al.* Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: análise histórica dos eventos de 2001, 2014 e 2021. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 31, p. 1–20, 2023.

CUMPLIDO, M. A. *et al.* Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, p. 1–22, 2023.

CUMPLIDO, M. J. et al. Oscilações pluviométricas e eventos extremos no Estado de São Paulo. *Geosul*, v. 38, p. 278–300, 2023.

CUNHA, A. P. M. A.; TOMASELLA, J.; RIBEIRO-NETO, G. G. Monitoramento e impactos da seca no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 2, p. 1–15, 2019.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo. São Paulo: DAEE, 2019.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Banco de dados hidrológicos do Estado de São Paulo. São Paulo: DAEE, 2020.

FERNANDES, V. R. et al. Monitoramento das secas no Brasil com base em índices padronizados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, p. 177–191, 2021.

FERNANDES, D. S. F. et al. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 48 p. (ISSN 1678-9644).

FERREIRA, D. B. S.; LUCIO, P. S.; SILVA, C. M. S. Análise de tendências de secas no Sudeste do Brasil por meio do SPI. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, p. 1–18, 2021.

FERREIRA, Glauber W. S.; REBOITA, Michelle S.; RIBEIRO, João G. M.; SOUZA, Christie A. Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections. *Climate*, v. 11, n. 8, p. 1–18, 2023.

FERREIRA, R. J.; OLIVEIRA, P. P.; MELO, V. Projeções de precipitação e seca no Sudeste brasileiro com modelos CMIP6. *Environmental Modelling & Software*, v. 170, p. 105–132, 2023.

GONÇALVES, S. T. N. et al. Índices e metodologia de monitoramento de secas: uma revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 3, p. 495–511, 2021.

GOZZO, A.; PALMA, D.; CUSTÓDIO, M.; MACHADO, L. Climatology and Trend of Severe Drought Events in the State of São Paulo Using Different SPEI Time Scales. *Atmosphere*, v. 10, n. 4, p. 190, 2019. DOI: 10.3390/atmos10040190.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G.; PICKBRENNER, K. Variabilidade climática e eventos extremos no Sudeste da América do Sul. *International Journal of Climatology*, v. 41, p. 1–20, 2021.

GUTTMAN, N. B. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 113–121, 1998.

HUGHES, B.L. et. al. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1571–1592, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS AMBIENTAIS (IPA). Mudanças climáticas e recursos hídricos no Estado de São Paulo. São Paulo: IPA, 2020.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KATZ, R. W. Statistics of extremes in climate change. *Climatic Change*, v. 100, p. 71–76, 2010. DOI: 10.1007/s10584-010-9834-5.

LALL, U. Recent advances in nonparametric function estimation: hydrologic applications. *Reviews of Geophysics*, v. 33, p. 1093–1102, 1995.

LANEN, H. A. J. V. et al. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure. *Journal of Hydrology*, v. 526, p. 42–56, 2016.

LOPES, J. R.; SANTOS, C. A. C. Tendências do SPI no estado de São Paulo e associações com El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, p. 141–160, 2019.

MACEDO, M.J.H.; GUEDES, R.V.S.; SOUZA, F.A.S.; DANTAS, F.R.C. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. *Revista Ambiente & Água, Taubaté (SP)*, v.5, n.1, p. 201-2014, 2010.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Anaheim: AMS. p. 179–184, 1993.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas e de precipitação no Sudeste do Brasil. *Climanálise*, v. 20, n. 1, p. 1–12, 2005.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas e de precipitação no Brasil no século XX. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 193–204, 2005.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências de chuva no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, p. 1–18, 2005.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas, eventos extremos e impactos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 29, n. 2, p. 133–146, 2014.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo: impactos climáticos e vulnerabilidade. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 30, n. 88, p. 31–44, 2016.

MARENGO, J. A. et al. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, p. 1189–1200, 2017.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências de longo prazo e eventos extremos no regime de chuvas no Sudeste do Brasil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 130, p. 1–17, 2017.

MARENGO, J. A. et al. Eventos extremos no Brasil: tendências e impactos. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

MARENGO, J. A. et al. A seca de 2014–2015 em São Paulo: causas e impactos. *Revista USP*, n. 114, p. 31–44, 2017.

MARENGO, J. A., et al. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes and impacts. *International Journal of Climatology*, 41(S1), p. E1–E16, 2020.

MARENGO, J. A. et al. Extreme drought events in Brazil: past and future. *Weather and Climate Extremes*, v. 29, p. 1–14, 2020.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Climate change and drought in Brazil: historical patterns and future projections. *Weather and Climate Extremes*, v. 29, p. 100–105, 2020.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; TORRES, R. R. Regionalização e impactos das secas recentes no Sudeste do Brasil. *Climatic Change*, Dordrecht, v. 162, p. 1–18, 2020.

MARTINS, E.S.P.R.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R.F.V. *et al.* Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas. Brasília: Banco Mundial, Série Água, v. 10, n. 106302, p.1-128, 2015.

MCVICAR, T. R. *et al.* Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, v. 416–417, p. 182–205, 2012. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.024.

NOBRE, C. A. *et al.* The drought of 2014 in Southeast Brazil and its impacts. *Nature Climate Change*, v. 6, p. 177–181, 2016.

NUNES, L. H. *et al.* Variabilidade climática e impactos hidrológicos em bacias do interior paulista. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 28, p. 145–162, 2021.

NUNES, A.; GABRIEL, C.; MARENGO, J. A. More Erratic and More Extreme: Trends in Precipitation in the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2023.

OLIVEIRA, C. M. M.; ALVARENGA, L. A.; SILVA, V. O.; CARVALHO, V. S. O.; CAMINHA, A. R.; MELO, P. A. Projeção dos Eventos de Seca Meteorológica e Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Verde. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 39, 2024.

PATEL, N.R.; CHOPRA, P.; DADHWAL, V.K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using Standardized precipitation index. *Meteorological Applications: A Journal Of Forecasting, Practical Applications, Training Techniques And Modelling*, v. 14, n. 4, p. 329-336, 2007.

PEREIRA, G.S. Aplicações de índice padronizados de precipitação (SPI) e de vazão (SSI) para análise de eventos de seca na Bacia do Rio Suaçuí Grande/MG. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, p. 17. 2022.

REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão climatológica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

SANTOS, E. B.; OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E. Variabilidade espaço-temporal da precipitação no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, e14, 2020.

SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B. Agricultural drought assessment in Brazil using SPI and SPEI indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, p. 1–17, 2021.

SEAGER, R. et al. Climate change and drought: past, present, and future. *Journal of Climate*, v. 23, p. 3437–3458, 2010.

SILVA, R. M. et al. Drought characterization in Brazil using the SPI. *Water*, v. 9, p. 1–22, 2017.

SILVA, R. M. et al. Análise de secas meteorológicas na bacia do Rio Sorocaba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 23, p. 1–14, 2018.

SILVA, R. M. et al. Spatiotemporal analysis of droughts in Brazil based on climate indicators. *International Journal of Climatology*, v. 40, p. 119–136, 2020.

SILVA, F. C. et al. Persistent atmospheric blocking over South America and its hydrological impacts. *Atmosphere*, v. 12, p. 1–16, 2021.

SILVA, R. M.; MEDEIROS, P. H. A.; SANTOS, C. A. G. Avaliação de eventos extremos de precipitação no Sudeste brasileiro utilizando índices climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v. 36, n. 2, p. 245–258, 2021.

SOUZA, A. B.; AMBRIZZI, T.; COELHO, C. A. S. Eventos extremos de precipitação no Sudeste do Brasil e sua relação com a variabilidade climática. *Climanálise*, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 33–47, 2019.

SHUKLA, S.; WOOD, E. F. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, v. 35, L02405, 2008. DOI: 10.1029/2007GL032487.

SVOBODA, M. D. et al. Drought monitoring in the United States: new tools for drought management. In: *Drought and Water Crises*. Boca Raton: CRC Press, 2012.

TALLAKSEN, Lena M.; VAN LANEN, Henny A. J. (org.). *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Amsterdam: Elsevier, 2004.

TEIXEIRA, M. S.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Variabilidade climática e extremos hidrológicos no Sudeste do Brasil. *International Journal of Climatology*, Hoboken, v. 42, n. 5, p. 3120, 2022.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2015.

TÜRKAN, B. A.; BEKIR, N. A. Response of hydrological drought to meteorological drought in the eastern Mediterranean Basin of Turkey. *Journal of Arid Land*, v. 13, n. 5, p. 470–486, 2021. DOI: 10.1007/s40333-021-0014-2.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the SPEI. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E. Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; BAECK, M. L. Hydrological extremes and flood events: statistical and climatological perspectives. *Advances in Water Resources*, 34(9), p. 1179–1190, 2011.

XAVIER, A. C. et al. Tendências hidroclimáticas no estado de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 93, p. 1–19, 2021.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3. ed. Academic Press, 2011.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1985.

WU, Hong; SVOBODA, Mark D.; HAYES, Michael J.; WILHITE, Donald A.; WEN, Fujiang. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid

locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, v. 27, n. 1, p. 65–79, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1371>.