

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia – Câmpus de Ilha Solteira

OLAVO TOZETE TERCINI

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DAS CHUVAS E DE EVENTOS DE
SECAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ**

Ilha Solteira-SP
2024

OLAVO TOZETE TERCINI

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DAS CHUVAS E DE
EVENTOS DE SECAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Avaliação, Preservação e Quantificação de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima

Ilha Solteira-SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T315v Tercini, Olavo Tozete.
Variabilidade espacial e temporal das chuvas e de eventos de secas na bacia hidrográfica do rio Tietê / Olavo Tozete Tercini. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
144 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2024

Orientador: César Gustavo da Rocha Lima

Inclui bibliografia

1. El Niño – oscilação sul. 2. Gestão hídrica. 3. Índice de porcentagem normal. 4. Krigagem. 5. Segurança hídrica. 6. Escassez hídrica.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9081
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DAS CHUVAS E DE EVENTOS DE SECAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ

AUTOR: OLAVO TOZETE TERCINI

ORIENTADOR: CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

A blue ink signature of Cesar Gustavo da Rocha Lima, written in a cursive style.

Profa. Dra. JULIANA HELOISA PINÊ AMÉRICO PINHEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Ciencia Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrômicas - UNESP

A blue ink signature of Juliana Heloisa Pinê Américo Pinheiro, written in a cursive style.

Profa. Dra. GISELE FIGUEIREDO ORTIZ PORANGABA (Participação Virtual)
Programa de Pós-Graduação em Geografia / Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS

A blue ink signature of Gisele Figueiredo Ortiz Porangaba, written in a cursive style.

Ilha Solteira, 20 de fevereiro de 2024

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O presente trabalho analisa o comportamento das chuvas e de secas na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê entre os anos de 1988 e 2017, uma das bacias mais importantes do Brasil. Os resultados e conclusões ajudam na gestão hídrica das sub-bacias englobadas, com mapas da pluviosidade e de secas ao longo do período estudado e uma metodologia nova para avaliação do risco hídrico de bacias sobre a questão de secas. Além disso, a integração dos resultados com os eventos ENOS evidencia a sua atualidade do estudo, visto que o assunto se encontra em diversas análises climáticas atuais. Isto posto, esta pesquisa alinha-se com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 da Organização das Nações Unidas, o qual visa combater as alterações climáticas e seus impactos.

POTENCIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The present study analyzes the rainfall and drought behavior in the Tietê River Basin between the years 1988 and 2017, one of the most important basins in Brazil. The results and conclusions contribute to the water management of the encompassed sub-basins, providing maps of rainfall and droughts throughout the studied period and introducing a novel methodology for assessing the hydrological risk of basins regarding droughts. Moreover, the integration of results with El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events highlights the relevance of the study, considering the ongoing discussions in contemporary climatic analyses. Thus, this research aligns with the United Nations Sustainable Development Goal 13, which aims to combat climate change and its impacts.

AGRADECIMENTOS

À UNESP pela oportunidade de cursar o programa de pós-graduação e representar esta instituição que eu tanto amo.

Ao meu orientador professor Doutor César Gustavo da Rocha Lima, por todos os ensinamentos, paciência e plena disponibilidade em me auxiliar no desenvolvimento do projeto e demais questões.

Ao professor Doutor José Augusto di Lollo, pelo suporte e olhar crítico incisivo nas disciplinas e na banca de qualificação.

À Geometrisa, empresa em que tive a oportunidade de conhecer a área de geoprocessamento e afins, despertando meu interesse no assunto. Gostaria de destacar os diretores da Geometrisa, Euclydes Cestari Junior, Wilerson Antonio Cestari e Washington Aparecido Cestari, os quais nunca negaram suporte e demonstraram plena compreensão ao longo do mestrado.

Aos meus pais e amigos que, de maneira geral, sempre me apoiaram nesse desafio, por mais que me custasse tempo e energia junto deles. Em especial, à minha namorada Camila Aguiar que me ajudou na construção do projeto e sempre entendeu os momentos que me distanciei para finalizá-lo.

RESUMO

A variabilidade espacial e temporal das chuvas pode gerar desequilíbrios hídricos, aumentando ou diminuindo a disponibilidade de água em diferentes partes do globo terrestre, o que pode causar impactos de caráter social e econômico. Por conta disto, o estudo da variabilidade das precipitações é de extrema importância para diversas áreas do conhecimento, principalmente em bacias hidrográficas, como a bacia do rio Tietê, que, ao longo de seu percurso, se destaca por possuir em sua área de drenagem um grande potencial hidroenergético instalado, bem como elevado potencial agrícola, industrial e de abastecimento humano. Um dos fatores que podem influenciar a variabilidade espacial e temporal das chuvas é a ocorrência de eventos El Niño – Oscilação Sul (ENOS), que alteram a temperatura do Oceano Pacífico. Devido ao recente histórico de secas na bacia hidrográfica do rio Tietê (BHRT), o objetivo do presente estudo foi avaliar a variabilidade espacial e temporal das chuvas (entre 1988 e 2017), bem como analisar as características das secas com base no Índice de Porcentagem Normal (IPN) de modo a contribuir com a gestão de água na bacia. A partir dos bancos de dados hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e do HidroWeb, foram obtidos dados pluviométricos de 560 postos de monitoramento dentro da área de interesse, os quais passaram pela análise descritiva e geoestatística. Posteriormente, foram gerados mapas a partir da técnica de krigagem e, por meio de operações de álgebra de mapas, foi aplicado o IPN, o que possibilitou a geração de mapas de secas. Os resultados obtidos possibilitaram identificar que a bacia em questão tem maiores precipitações na parcela sudeste (próximo do litoral paulista) e menores precipitações na parcela oeste, além do fato das sub-bacias não apresentarem necessariamente comportamento hidrológico análogo. Os mapas de secas tornaram claro que as classificações com maiores porcentagens foram a Normal -, Normal +, Seca Inicial e Umidade Inicial, com 967,9%, 727,4%, 629,5% e 586,3% de área inserida, respectivamente. Os anos que apresentaram mais de 50% da área em IPNs de umidade foram 1991, 1995, 2009 e 2015, enquanto os que apresentaram mais de 50% da área em IPNs de seca foram 1994, 2002 e 2014. Para os 30 anos estudados, a sub-bacia que apresentou a maior porcentagem de área seca acumulada foi a Tietê-Batalha com 746,3%, seguida pela Baixo Tietê (709,1%), Sorocaba/Médio Tietê (668,6%), Tietê-Jacaré (634,9%), Alto Tietê (621,7%) e Piracicaba/Capivari/Jundiaí (620,7%). Em relação a influência dos eventos ENOS com as secas da bacia, os dados não indicam interação entre estes parâmetros, tanto na bacia como um todo quanto nas suas sub-bacias. Por fim, foi proposta uma metodologia para classificação das sub-bacias quanto ao risco de escassez hídrica baseada na distribuição das secas e outros fatores socioeconômicos e ambientais, o qual indicou que a bacia com maior risco é a Baixo Tietê (UGRHI-19), enquanto a com menor risco é a Alto Tietê (UGRHI-06).

Palavras-chave: El Niño – Oscilação Sul; gestão hídrica; índice de Porcentagem Normal; krigagem; segurança hídrica; escassez hídrica.

ABSTRACT

The spatial and temporal variability of rainfall can create water imbalances, increasing or decreasing water availability in distinct parts of the Earth, leading to social and economic impacts. Therefore, studying precipitation variability is of utmost importance for various fields, especially in hydrographic basins like the Tietê River basin. This basin stands out for its significant hydroenergy potential, as well as high agricultural, industrial, and human supply potential along its course. One factor influencing spatial and temporal rainfall variability is the occurrence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events, which affect the Pacific Ocean's temperature. Due to the recent history of droughts in the Tietê River basin (TRB), this study aimed to assess the spatial and temporal variability of rainfall (between 1988 and 2017) and analyze drought characteristics based on the Percent of Normal Index (PNI) to contribute to water management in the basin. Using hydrological databases from Department of Water and Electric Energy (DAEE) and HidroWeb, rainfall data from 560 monitoring stations within the area of interest were obtained, undergoing descriptive and geostatistical analysis. Subsequently, maps were generated using kriging, and the PNI was applied through map algebra, producing drought maps. Results revealed higher precipitation in the southeastern portion (near the São Paulo coast) and lower precipitation in the western portion of the basin. Sub-basins did not necessarily exhibit analogous hydrological behavior. Drought maps indicated that classifications with the highest percentages were Normal -, Normal +, Initial Drought, and Initial Moisture, covering 967.9%, 727.4%, 629.5%, and 586.3% of the area, respectively. Years with over 50% of the area in PNI moisture categories were 1991, 1995, 2009, and 2015, while those with over 50% in PNI drought categories were 1994, 2002, and 2014. Over the 30 years studied, the Tietê-Batalha sub-basin had the highest cumulative dry area percentage (746.3%), followed by Lower Tietê (709.1%), Sorocaba/Middle Tietê (668.6%), Tietê-Jacaré (634.9%), Upper Tietê (621.7%), and Piracicaba/Capivari/Jundiaí (620.7%). Regarding the influence of ENSO events on basin droughts, data did not indicate significant interaction between these parameters, both in the entire basin and its sub-basins. Finally, a methodology for classifying sub-basins based on the risk of water scarcity was proposed, considering drought distribution and other socioeconomic and environmental factors. Results indicated that the basin with the highest risk is Lower Tietê (UGRHI-19), while the one with the lowest risk is Upper Tietê (UGRHI-06).

Keywords: El Niño-Southern Oscillation; water management; percent of normal index; kriging; water security; water scarcity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico global	17
Figura 2 – Mapa da TSM no oceano Pacífico durante fases fortes de La Niña (imagem superior, em dezembro de 1988) e El Niño (imagem inferior, em dezembro de 1997)	20
Figura 3 – Região utilizada na definição de Índices para classificar os eventos ENOS	21
Figura 4 – Classificação do ONI entre 1990 e 2022	22
Figura 5 – Efeitos climáticos locais decorrentes do El Niño e da La Niña	23
Figura 6 – Evolução e classificação das secas em função da duração e dos impactos	25
Figura 7 – Esquema mostrando o processo da geoestatística a partir do processo de inferência do fenômeno espacial com base na amostragem	28
Figura 8 – Semivariograma típico e parâmetros intrínsecos	29
Figura 9 – Conceituação teórica de risco	34
Figura 10 – Matriz de risco FMEA adaptada	35
Figura 11 – Bacia do rio Tietê inserida na Bacia do rio Paraná	39
Figura 12 – Bacia Hidrográfica do Rio Tietê no estado de São Paulo e identificação das sub-bacias	40
Figura 13 – Classes de Clima na bacia do rio Tietê	42
Figura 14 – Evolução da vazão outorgada (superficial ou subterrânea) nas sub-bacias do rio Tietê em 2021	43
Figura 15 – Vazão outorgada por finalidade de uso nas sub-bacias do rio Tietê em 2021	44
Figura 16 – Classificação pedológica da bacia do rio Tietê	45
Figura 17 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Tietê	46
Figura 18 – Malha hidroviária da bacia do rio Tietê	48
Figura 19 – Aproveitamentos hidrelétricos em operação na BHRT	49
Figura 20 – Postos pluviométricos utilizados no estudo	57
Figura 21 – Matriz de Risco para obtenção do IRS	62
Figura 22 – Fluxograma dos procedimentos realizados ao longo do trabalho	66
Figura 23 – Médias pluviométricas anuais e média dos 30 anos estudados	68
Figura 24 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 1988 a 1992	72
Figura 25 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 1993 a 1997	73
Figura 26 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 1998 a 2002	74
Figura 27 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 2003 a 2007	75
Figura 28 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 2008 a 2012	76
Figura 29 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 2013 a 2017 e precipitação média	77
Figura 30 – Porcentagens da área da BHRT por intervalo de precipitação total anual de 1988 a 2017	79
Figura 31 – Médias pluviométricas em cada UGRHI inserida na bacia do rio Tietê entre os anos de 1988 e 2017	81
Figura 32 – Comparação da precipitação total anual na BHRT com a média anual do Índice Oceânico Niño entre 1988 e 2017	84
Figura 33 – IPN na bacia do rio Tietê de 1988 a 1992	86

Figura 34 – IPN na bacia do rio Tietê de 1993 a 1997	87
Figura 35 – IPN na bacia do rio Tietê de 1998 a 2002	88
Figura 36 – IPN na bacia do rio Tietê de 2003 a 2007	89
Figura 37 – IPN na bacia do rio Tietê de 2008 a 2012	90
Figura 38 – IPN na bacia do rio Tietê de 2013 a 2017	91
Figura 39 – Porcentagens da área da BHRT por intervalo de IPN	92
Figura 40 – Porcentagens da área da sub-bacia do Alto Tietê (06) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017	94
Figura 41 – Porcentagens da área da sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê (10) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017	95
Figura 42 – Porcentagens da área da sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017	96
Figura 43 – Porcentagens da área da sub-bacia do Tietê-Jacaré (13) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017	97
Figura 44 – Porcentagens da área da sub-bacia do Tietê-Batalha (16) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017	98
Figura 45 – Porcentagens da área da sub-bacia do Baixo Tietê (19) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017	99
Figura 46 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Alto Tietê (06)	106
Figura 47 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê (10)	106
Figura 48 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05)	107
Figura 49 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Tietê-Jacaré (13)	107
Figura 50 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Tietê-Batalha (16)	108
Figura 51 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Baixo Tietê (19)	108
Figura 52 – Probabilidade de ocorrer secas na BHRT (porcentagem da seca acumulada em 30 anos, de 1988 a 2017)	111
Figura 53 – Dano potencial associado ao abastecimento hídrico na BHRT (vazão outorgada entre parênteses)	112
Figura 54 – Dano potencial associado ao uso agrícola (porcentagem das áreas destinadas à agricultura entre parênteses)	113
Figura 55 – Dano potencial associado à geração hidrelétrica (potencial de geração de energia em megawatt entre parênteses)	114
Figura 56 – Dano potencial associado à malha hidroviária (extensão da malha em quilômetro entre parênteses)	115
Figura 57 – Classificação final do risco à secas das sub-bacias do rio Tietê	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos que aplicaram a krigagem para análise de chuvas.....	32
Quadro 2 – Caracterização da UGRHI Alto Tietê.....	50
Quadro 3 – Caracterização da UGRHI Piracicaba/Capivari/Jundiaí.....	51
Quadro 4 – Caracterização da UGRHI Sorocaba/Médio Tietê	52
Quadro 5 – Caracterização da UGRHI Tietê/Jacaré	53
Quadro 6 – Caracterização da UGRHI Tietê/Batalha.....	54
Quadro 7 – Caracterização da UGRHI Baixo Tietê	55
Quadro 8 – Estudos que obtiveram resultados análogos em relação aos mapas de IPN	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de climatologia inseridas na BHRT	41
Tabela 2 – Classificação do Avaliador da Dependência Espacial - ADE	59
Tabela 3 – Classificação do IPN	60
Tabela 4 – Períodos de eventos ENOS e sua respectiva intensidade	61
Tabela 5 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente ao Abastecimento Hídrico na BHRT	63
Tabela 6 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente ao uso Agrícola na BHRT	63
Tabela 7 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente à Geração Hidroelétrica na BHRT	64
Tabela 8 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente à Malha Hidroviária na BHRT	64
Tabela 9 – Proposta de classificação do dano potencial associado à Secas.....	65
Tabela 10 - Análise estatística descritiva das precipitações anuais nos postos coletados (1988-2017)	67
Tabela 11 - Modelos e parâmetros de ajuste dos semivariogramas experimentais das precipitações anuais nos postos coletados (1988-2017)	70
Tabela 12 – Precipitações anuais médias dos anos caracterizados pela seca na BH Tietê	80
Tabela 13 – Probabilidade referente à Seca Acumulada para um período de referência de 30 anos.....	100
Tabela 14 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Alto Tietê (06) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS	101
Tabela 15 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê (10) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS.....	102
Tabela 16 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS	102
Tabela 17 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Tietê-Jacaré (13) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS	103
Tabela 18 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Tietê-Batalha (16) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS	103
Tabela 19 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Baixo Tietê (19) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS	104
Tabela 20 – Valores obtidos para cada sub-bacia do rio Tietê.....	110
Tabela 21 – Classificação de cada parâmetro em cada sub-bacia do rio Tietê e DPA obtido	110
Tabela 22 – IRS para cada sub-bacia do rio Tietê	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Variações climáticas, mudanças climáticas e as influências hidrológicas	15
2.1.1	El Niño Oscilação Sul (ENOS)	18
2.1.2	Eventos Extremos (Secas e Umidade)	24
2.1.3	Índices para Mensurar Secas	26
2.2	Geoestatística aplicada à precipitação	27
2.2.1	Geoestatística	27
2.2.2	Semivariograma e Krigagem	29
2.2.3	Geoestatística aplicada na variabilidade de precipitações	31
2.3	Segurança hídrica a secas em bacias hidrográficas	33
2.3.1	Segurança hídrica e definições terminológicas	33
2.3.2	Análise de Segurança Hídrica em relação a secas	34
3	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ	38
3.1	Aspectos da BHRT	41
3.1.1	Climatologia	41
3.1.2	Disponibilidade, demanda e uso dos recursos hídricos	42
3.1.3	Pedologia	45
3.1.4	Uso e Cobertura do Solo	45
3.1.5	Navegação	46
3.1.6	Potencial Hidráulico-energético	49
3.2	Caracterização das sub-bacias do rio tietê	50
3.2.1	UGRHI 06 – Alto Tietê	50
3.2.2	UGRHI 05 – Piracicaba/Capivari/Jundiaí	50
3.2.3	UGRHI 10 – Sorocaba/Médio Tietê	51
3.2.4	UGRHI 13 – Tietê/Jacaré	52
3.2.5	UGRHI 16 – Tietê/Batalha	53
3.2.6	UGRHI 19 – Baixo Tietê	54
4	MATERIAL E MÉTODOS	56
4.1	Obtenção dos dados pluviométricos	56
4.2	Análise estatística descritiva	58
4.3	Aplicação da geoestatística	58
4.4	Índice de porcentagem normal (IPN)	59
4.5	Análise da influência dos eventos ENOS na bacia do rio tietê	60
4.6	Proposta de índice de risco a secas - IRS	61

4.6.1	Probabilidade de ocorrer Secas (Perigo)	62
4.6.2	Dano Potencial Associado (DPA) à Secas (Vulnerabilidade e Exposição)	62
4.7	Fluxograma dos procedimentos	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.1	Análise geoestatística e variabilidade espaço temporal das chuvas	69
5.2	Influência dos eventos ENOS nas chuvas anuais	82
5.3	Mapeamento do índice de porcentagem normal (IPN) e influência dos eventos ENOS	85
5.4	Classificação pelo índice de risco à secas - IRS	109
6	CONCLUSÃO	119
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
APÊNDICE A – AJUSTES SEMIVARIOGRÁFICOS DAS CHUVAS TOTAIS ANUAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ		137
APÊNDICE B – VALIDAÇÕES CRUZADAS DAS CHUVAS TOTAIS ANUAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ		142

1 INTRODUÇÃO

A chuva, um componente vital do ciclo hidrológico, tem um papel importante no planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos (Gupta; Kamble; Machiwal, 2017; Jaman; Adhikary, 2020). Dados do Núcleo de Assuntos Estratégicos (NAE, 2005), indicam que, desde 1960, o clima no mundo vem sofrendo mudanças (possivelmente alavancadas pelas ações humanas) que alteram o ciclo hidrológico de maneira drástica, atingindo bacias de drenagem, causando eventos prejudiciais ao ser humano e ao meio ambiente.

Monitorar e analisar a distribuição das chuvas é relevante para uma boa gestão hídrica, ainda mais com as alterações no comportamento do clima, como citado anteriormente. Cada vez mais trabalhos investigam o comportamento espacial e temporal das chuvas e buscam compreender possíveis tendências entre períodos secos ou chuvosos e os eventos ENOS - El Niño Oscilação Sul (Ferreira et al., 2018; Rafee et al., 2019).

De maneira geral, é conhecido os efeitos gerais dos eventos ENOS, como por exemplo, aumento das precipitações durante o El Niño e diminuição das chuvas durante a La Niña nas regiões sul e sudeste (CPTEC, 2022). Porém há pouca informação a respeito dos impactos locais e regionais, como em bacias ou sub-bacias.

Estes impactos pontuais podem se tornar eventos extremos que, consequentemente, causam diversos efeitos negativos (Di Giulio et al., 2019). Dentre os eventos extremos, destacam-se negativamente as secas, que geralmente apresentam longa duração e grande área atingida (Freitas, 1998).

Como exemplo, tem-se os eventos de secas do início dos anos 2000 e de 2013/2014, que atingiram principalmente a região sudeste do Brasil. Elas geraram graves consequências, como crise energética e diminuição do calado do corredor Tietê-Paraná e problemas para abastecimento público (Lobel et al., 2014; Melo, 2017).

No evento de seca de 2021, alguns reservatórios de importância energética e de navegação para o Brasil atingiram níveis iguais ou inferiores aos da seca de 2013/2014, como o da UHE Ilha Solteira, UHE Três Irmãos e UHE Nova Avanhandava, todos localizados no estado de São Paulo (Brasil, 2016; ONS, 2023). Destaca-se que todos estes empreendimentos se encontram inseridos na região hidrográfica do rio Paraná, uma das bacias mais importantes economicamente e localizada na região centro-sul do Brasil

Dentre as sub-bacias do rio Paraná, uma das mais significativas é a bacia do rio Tietê. Ela é a maior bacia inserida do estado de São Paulo (73.548 km²) e atravessa todo o estado de leste a oeste, abrangendo mais de 31 milhões de habitantes e responsável por cerca de 20% do PIB nacional (SIGRH, 2023; IBGE, 2021). Além disso, a disponibilidade dos seus recursos hídricos tem papel essencial em diversas áreas, como abastecimento público, uso industrial, uso rural e navegação (SIGRH, 2023). Logo, conhecer a variabilidade espaço-temporal das chuvas desta bacia hidrográfica é um dado fundamental para a gestão sustentável dos recursos hídricos local.

Analisar e classificar as precipitações de regiões ajuda no planejamento para mitigar os impactos de escassez hídrica. O Índice de Porcentagem Normal – IPN, consegue detectar eventos de umidade ou seca com extrema facilidade e apenas com o emprego de dados de precipitação, sendo um dos mais simples e eficazes métodos. O fato do IPN, assim como outros dados climáticos, resultar de dados pontuais faz com que a geoestatística se adequa devidamente como forma de análise, o que possibilita a geração de dados espaciais de grande importância para gestão hídrica.

A geoestatística, ferramenta que correlaciona valores de uma amostragem de um parâmetro (como a chuva) com a distância entre as amostras, tem sido muito empregada para a análise de precipitações, obtendo resultados satisfatórios e gerando mapas que dão suporte na tomada de decisões para a gestão hídrica e facilitam o emprego do IPN (Landim, 2006; Bertoni; Tucci, 2009; Yamamoto; Landim; 2013).

Desse modo, a aplicação de técnicas de análise espacial aos dados de chuva e do IPN pode oferecer importantes resultados e informações técnicas para a gestão das águas na Bacia Hidrográfica do rio Tietê.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade espacial e temporal das chuvas e de eventos de secas com vistas a gestão hídrica na Bacia Hidrográfica do rio Tietê (BHRT), no estado de São Paulo, entre os anos de 1988 e 2017.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Analisar a variabilidade temporal e espacial das chuvas na bacia do Rio Tietê durante o período de 1988 e 2017;
- ii. Identificar eventos de secas e caracterizar sua abrangência no período por meio do IPN;
- iii. Analisar a interação do ENOS no comportamento pluviométrico e dos eventos de secas da região; e
- iv. Propor uma classificação de risco hídrica às secas nas sub-bacias pautada nas informações dos mapas de secas gerados e demais informações de caráter socioeconômico e ambiental.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Variações climáticas, mudanças climáticas e as influências hidrológicas

O clima apresenta variabilidade tanto espacial quanto temporal, sendo necessário a realização de estudos, independente da área de interesse, com vista a aperfeiçoar o conhecimento e minimizar os danos sociais, ambientais e econômicos ocasionados pelas secas e cheias passíveis de ocorrência (Jiang et al., 2021; Kvitsjoen et al., 2021).

Segundo Moore et al. (2010), em termos climatológicos, a palavra tempo pode ser definida como a condição específica da atmosfera que pode mudar a cada instante em um determinado tempo e espaço, incluindo variáveis como o vento, temperatura, umidade, chuva entre outros. Já o clima é uma caracterização estatística do tempo em uma determinada região, observada ao longo de vários anos, sendo uma média dos parâmetros observado no tempo.

As mudanças climáticas podem ser influenciadas por ações antrópicas, como com o aumento da impermeabilização do solo, que gera diminuição da infiltração e aumento da temperatura. Todo o processo de urbanização e crescimento populacional acelera estas mudanças, que altera significativamente os balanços hidrológicos de bacias hidrográficas (Zhang et al., 2021).

Diferente das mudanças climáticas, as variações climáticas correspondem ao clima em suas condições naturais e normais, não tendo, portanto, influência da atuação humana (Tucci, 2002). As variações climáticas se manifestam tanto no tempo (podendo ser sazonais, interanuais e interdecenais), como no espaço (podendo ser em micro ou macroescala).

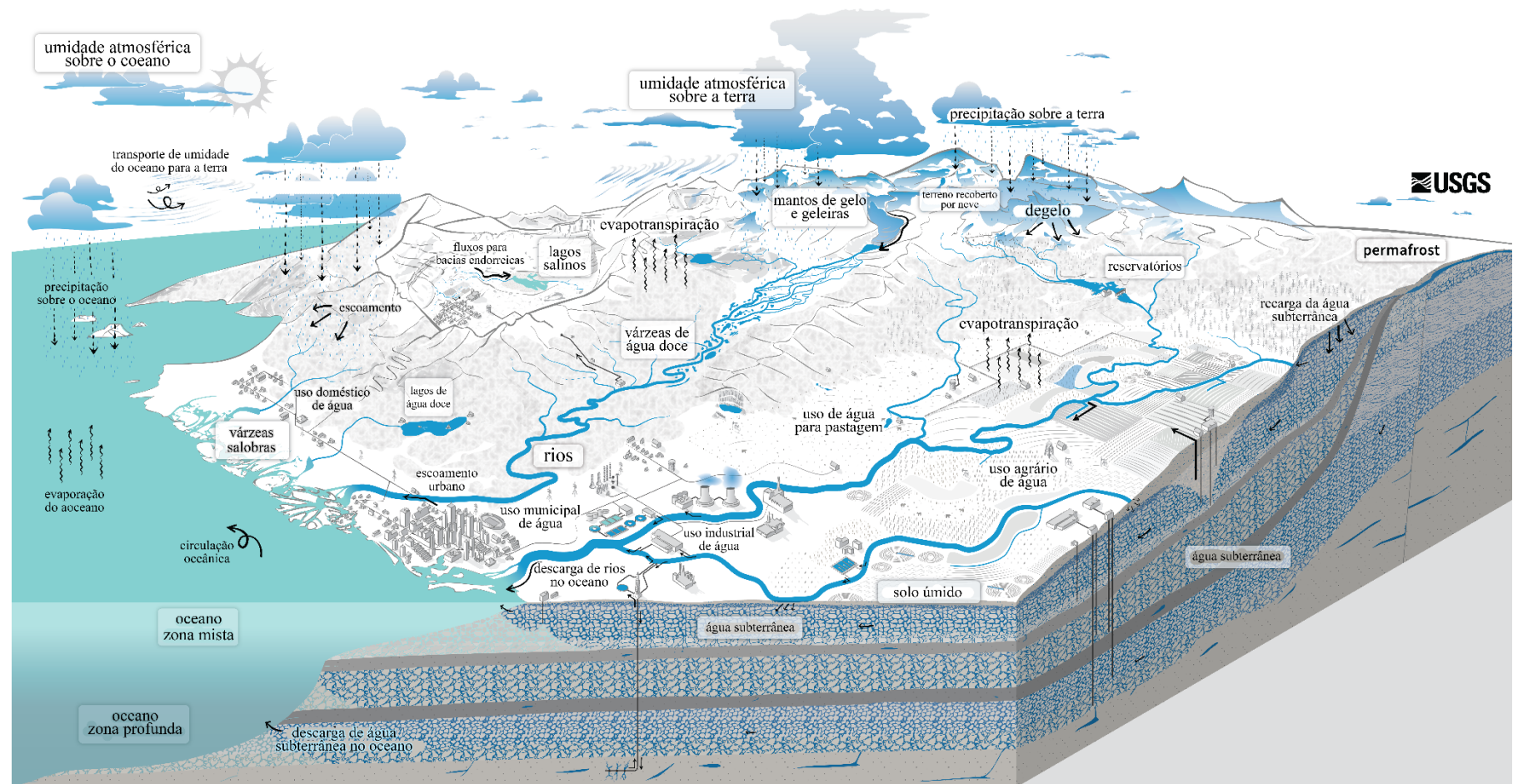
Os maiores impactos causados pelas alterações climáticas (que abrangem as mudanças e variações) acontecem no ciclo hidrológico e nos balanços hídricos, atingindo as bacias de drenagem, unidades de estudo relacionadas a gestão de recursos hídricos e delimitados pela geografia (Teodoro et al., 2007). Segundo Acosta (2014) e Alcântara (2004), as bacias recebem uma quantidade de água que varia conforme com a disposição geográfica da unidade, sofrendo grande influência das características do solo, cobertura vegetal, ocupação urbana e, principalmente, das condições climáticas.

Assim, as alterações climáticas modificam o ciclo hidrológico como um todo, acarretando eventos possivelmente danosos para a sociedade e meio ambiente, como eventos secas e cheias (NAE, 2005).

Segundo Kundzewicz et al. (2018), o ciclo hidrológico pode ser interpretado como um conjunto de fluxos de água (processos hidrológicos) que transferem água entre depósitos (reservatórios) na geosfera (mais precisamente na hidrosfera, criosfera e litosfera, como oceanos, mares, lagos, rios, pântanos, gelo, neve, água subterrânea, água nas rochas e atmosfera) e, por fim, na biosfera (água contida em seres vivos, plantas e animais). Os fluxos d'água movem a água entre os depósitos, podendo alterar a sua forma entre líquida, sólida ou gasosa. Estas movimentações podem ocorrer por meio de diversos processos, como a evaporação, escoamento, degelo, recarga de água subterrânea, precipitação, entre outros (Corson-Dosch et al., 2022).

Estes processos ocorrem principalmente devido a energia solar e a energia potencial gravitacional, sendo capazes de transformar a forma física da água e realizar o deslocamento da água (Kundzewicz et al., 2018). A Figura 1 apresenta o ciclo hidrológico global com todos os processos físicos envolvidos. Nela, pode-se observar que qualquer alteração no ciclo pode causar um efeito dominó no restante da hidrologia.

Figura 1 – Ciclo hidrológico global



Fonte: Adaptado de Corson-Dosch et al. (2022).

Um dos componentes mais importantes no ciclo hidrológico são as precipitações (e indiretamente os escoamentos superficiais – vazões dos rios), sendo que qualquer alteração quantitativa neste parâmetro pode causar diversos problemas como inundações, diminuição na geração de energia ou dificuldade de abastecimento humano.

Alguns estudos têm examinado os efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológicos, como em vazões de rios ao longo do planeta. Em rios localizados no Canadá, Sibéria, além do norte e nordeste da Europa observou-se o aumento de suas vazões e, em contrapartida, nos rios situados no Mediterrâneo, na América Central, Brasil e no centro, sul e sudeste da Europa, a observação foi da diminuição delas. É importante destacar, por fim, que as variações observadas foram significantes ao ponto de serem superiores ao desvio médio padrão, o que constata que essas alterações, nelas ocasionadas, são classificadas como mudanças climáticas (Hattermann et al., 2012; Arnell; Gosling, 2013; Huang; Krysanova; Hattermann, 2013).

De acordo com autores que analisaram o impacto das mudanças climáticas nas precipitações, diversas regiões vêm sofrendo alterações bruscas, como o aumento de chuvas na divisa do Pará e Maranhão até o aumento da ocorrência de secas em áreas subtropicais. De maneira geral, todas estas alterações apontam que mudanças climáticas acarretam desastres sociais, ambientais e econômicos (Loureiro; Fernandes, 2013; Dai; Zhao; Chen, 2018; Alcântara et al., 2020; Royer et al., 2021).

Tais estudos remetidos nos parágrafos anteriores objetivaram observar e dimensionar os impactos das mudanças do clima (causadas pela ação humana) em processos hidrológicos como as vazões e precipitações.

Em contrapartida, existem diversos estudos publicados observando as variações climáticas (causadas naturalmente) em diversas áreas do globo durante eventos El Niño Oscilação Sul (ENOS), como por exemplo, Tsonis, Hunt e Elsner (2003), Ingram e Dawson (2005), Evangelista et al. (2007), Souza et al. (2015), Ferreira et al. (2018).

2.1.1 El Niño Oscilação Sul (ENOS)

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) é o principal fenômeno interanual que causa variação nas chuvas na Terra e, mais especificamente, na América do Sul (Lin; Qian, 2019; De Souza et al., 2021). O ENOS acontece devido a interações complexas entre

o oceano e a atmosfera. As variações, de temperatura no oceano Pacífico Equatorial Ocidental mudam a convecção atmosférica no Pacífico Tropical e causam anomalias climáticas mudando a circulação das massas de ar (Hu et al., 2021).

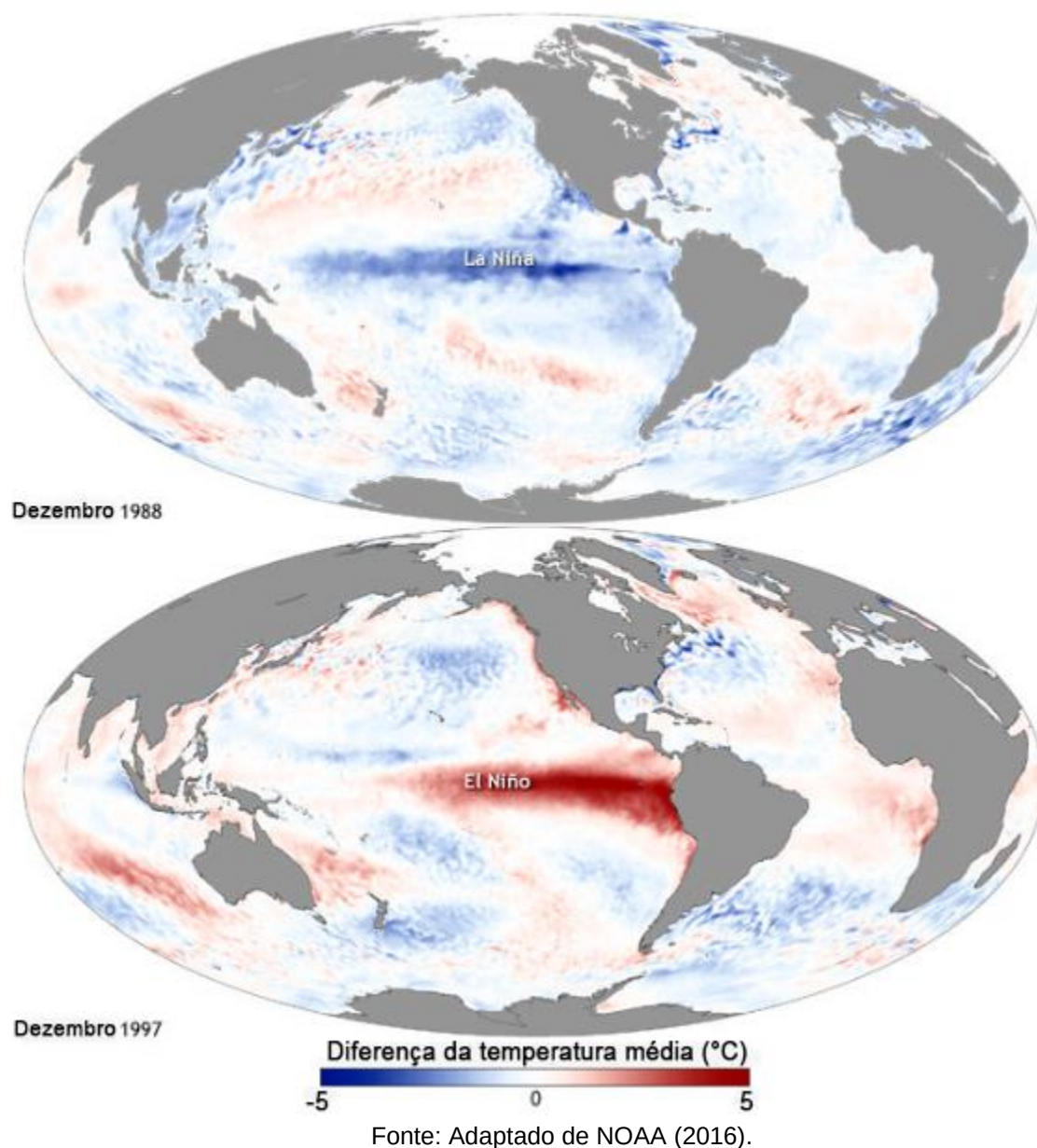
O fenômeno ocorre devido as flutuações anuais de pressão, conhecidas como Oscilação Sul (OS). Estas flutuações geram uma fraca corrente quente oceânica que altera a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), podendo ocorrer o aquecimento na fase quente (El Niño) ou resfriamento na fase fria (La Niña) (IPCC, 2013; NOAA, 2016; Trenberth, 1997). Além das fases quente e fria, o ENOS pode apresentar uma condição neutra, de modo que cada uma das três fases pode durar entre 1 e 2 anos, alternando-se irregularmente (Wu; Okumura; Dinezio, 2019).

Conforme NOAA (2016), as fases quente e fria do ENOS geram mudanças significantes não apenas na TSM, mas também nos ventos, pressão atmosférica e precipitação na região do Pacífico Tropical. A condição neutra indica que as condições de temperatura estão similares à sua média histórica.

As mudanças geradas pelos ENOS variam conforme com a intensidade da fase, sendo que existem diversos métodos para classificar estas fases. De acordo com o Índice Oceânico Niño (Oceanic Niño Index - ONI), metodologia definida por Null (2022) e principal método utilizado pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) para mensurar a intensidade da fase do ENOS no Pacífico Tropical Oriental, a fase pode ser classificada em: Fraca (anomalias entre 0,5 e 0,9 °C), Moderada (anomalias entre 1,0 e 1,4 °C), Forte (anomalias entre 1,5 e 1,9 °C) e Muito Forte (anomalias acima de 2,0 °C).

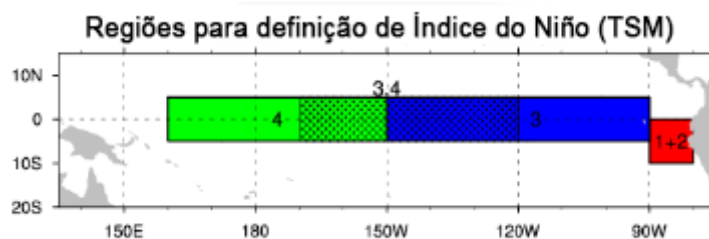
A Figura 2 apresenta a TSM no oceano Pacífico ao longo de eventos ENOS, podendo-se averiguar a diferença de temperatura negativa ao longo da La Niña e positiva ao longo do El Niño.

Figura 2 – Mapa da TSM no oceano Pacífico durante fases fortes de La Niña (imagem superior, em dezembro de 1988) e El Niño (imagem inferior, em dezembro de 1997)



O ONI é baseado na média dos últimos três meses da TSM na região Niño 3.4 (localizada entre 5° N -5° S e 120° - 170° W), localizada entre a Oceania e a América do Sul. A localização desta região pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Região utilizada na definição de Índices para classificar os eventos ENOS

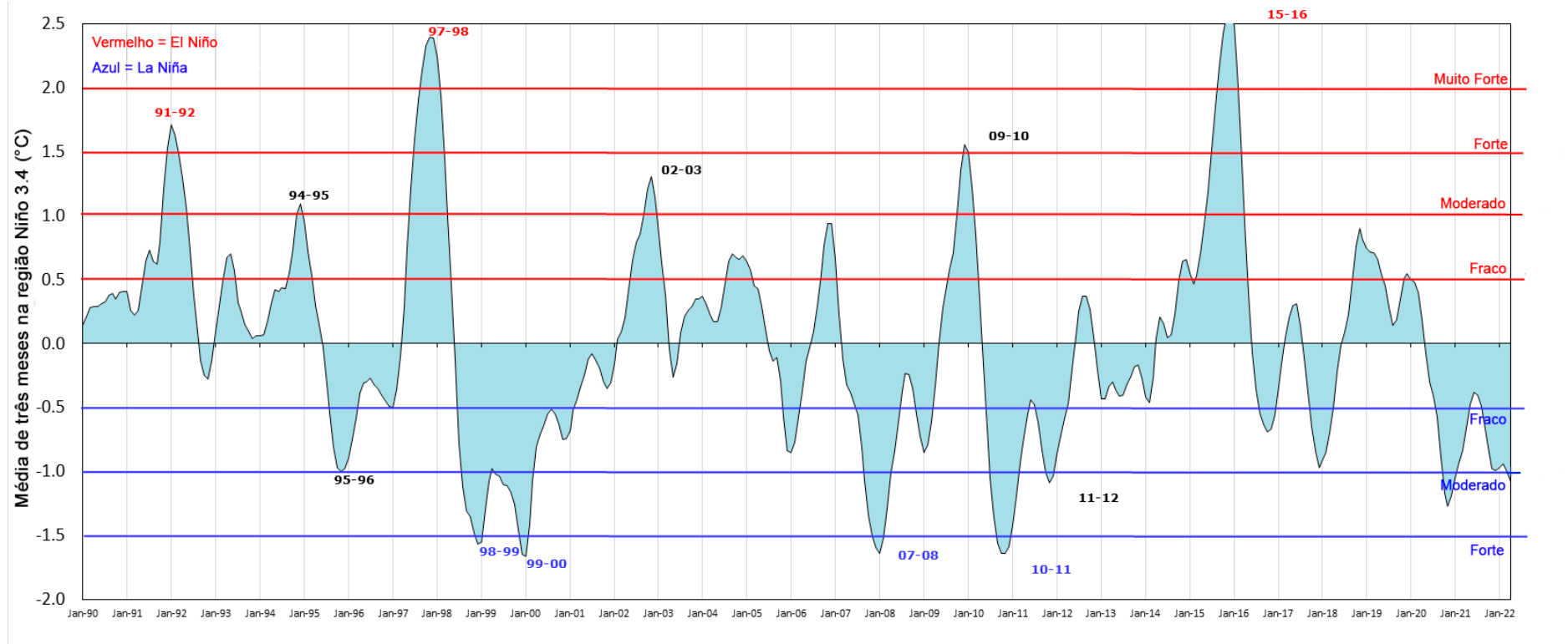


Fonte: Adaptado de Trenberth e NCAR (2022).

Quando a média dos últimos três meses apresenta anomalias positivas de 0,5 °C por pelo menos cinco períodos, é definido o El Niño, e quando a média apresenta anomalias negativas de 0,5 °C neste mesmo intervalo, é definida a La Niña. Em períodos em que a média se encontra entre +0,5 °C e -0,5°C, é definida a condição neutra do ENOS (Null, 2022).

Além de calcular e classificar os eventos ENOS, o ONI armazena o histórico dos eventos desde 1950 (Null, 2022). Uma vista geral dos últimos fenômenos pode ser observada na Figura 4, a qual apresenta os eventos ENOS e sua respectiva duração e intensidade.

Figura 4 – Classificação do ONI entre 1990 e 2022



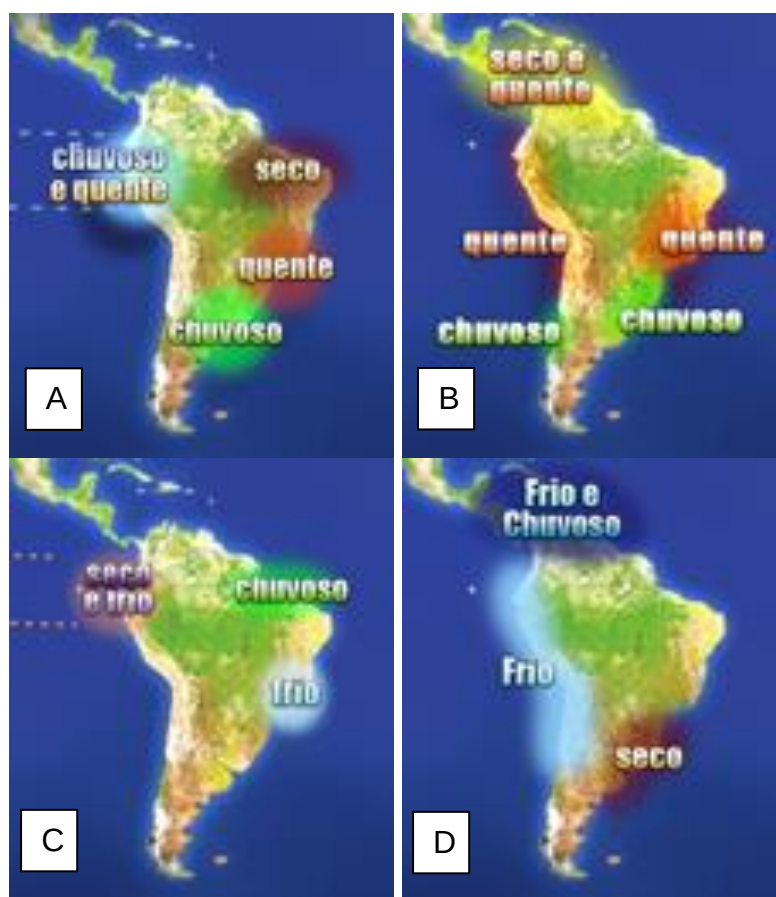
Fonte: Adaptado de Null (2022).

2.1.1.1 Influência do ENOS no Brasil

No Brasil, a ocorrência do ENOS impacta em diversas regiões causando inúmeras variações no clima. Vários estudos conectam estes fenômenos com anomalias pluviais em diferentes regiões do Brasil, como apresentam Grimm, Barros e Doyle (2000), Araújo et al. (2013), Dias (2014), Terassi et al. (2018).

Segundo CPTEC (2022), durante a La Niña, as regiões sul e sudeste passam por período seco entre junho e agosto, enquanto entre dezembro e fevereiro, passam por período com temperaturas menores que o normal. As alterações que ocorrem nas demais regiões do país e durante os eventos ENOS podem ser observadas na Figura 5.

Figura 5 – Efeitos climáticos locais decorrentes do El Niño e da La Niña



Fonte: Adaptado de CPTEC (2022).

A. Efeitos causados pelo El Niño entre dezembro e fevereiro; B. Efeitos causados pelo El Niño entre junho e agosto; C. Efeitos causados pela La Niña entre dezembro e fevereiro; D. Efeitos causados pela La Niña entre junho e agosto.

Em se tratando especificamente da região sudeste, estudos revelaram aumento da altura pluviométrica durante episódios de El Niño e diminuição durante episódios de La Niña, o que pode gerar eventos extremos com consequência ligadas

diretamente à geração de energia por meio de hidrelétricas, produção agrícola e transporte hidroviário (Ferreira, 2006; Gonçalves et al., 2019; Silva et al., 2019; Marengo et al., 2021).

2.1.2 Eventos Extremos (Secas e Umidade)

Segundo Dunlop (2008), um evento extremo é a ocorrência de valores, significativamente maiores ou menores que a média histórica, específicos de um parâmetro meteorológico para o período em análise. Este termo também pode ser associado à magnitude dos impactos causados pelo fenômeno, os quais quase sempre são comparados à desastres naturais (Jahn, 2015).

Atrelados às alterações climáticas e intensificada pelas atividades antrópicas, os eventos extremos estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos (Marengo, 2009; IPCC, 2014). Estes eventos podem ser inundações, enchentes, alagamentos, deslizamentos, escorregamentos de terras e secas, todos podendo causar diversos impactos ambientais, sociais e econômicos (Oliveira; Mafra; Soares, 2012; Di Giulio et al., 2019).

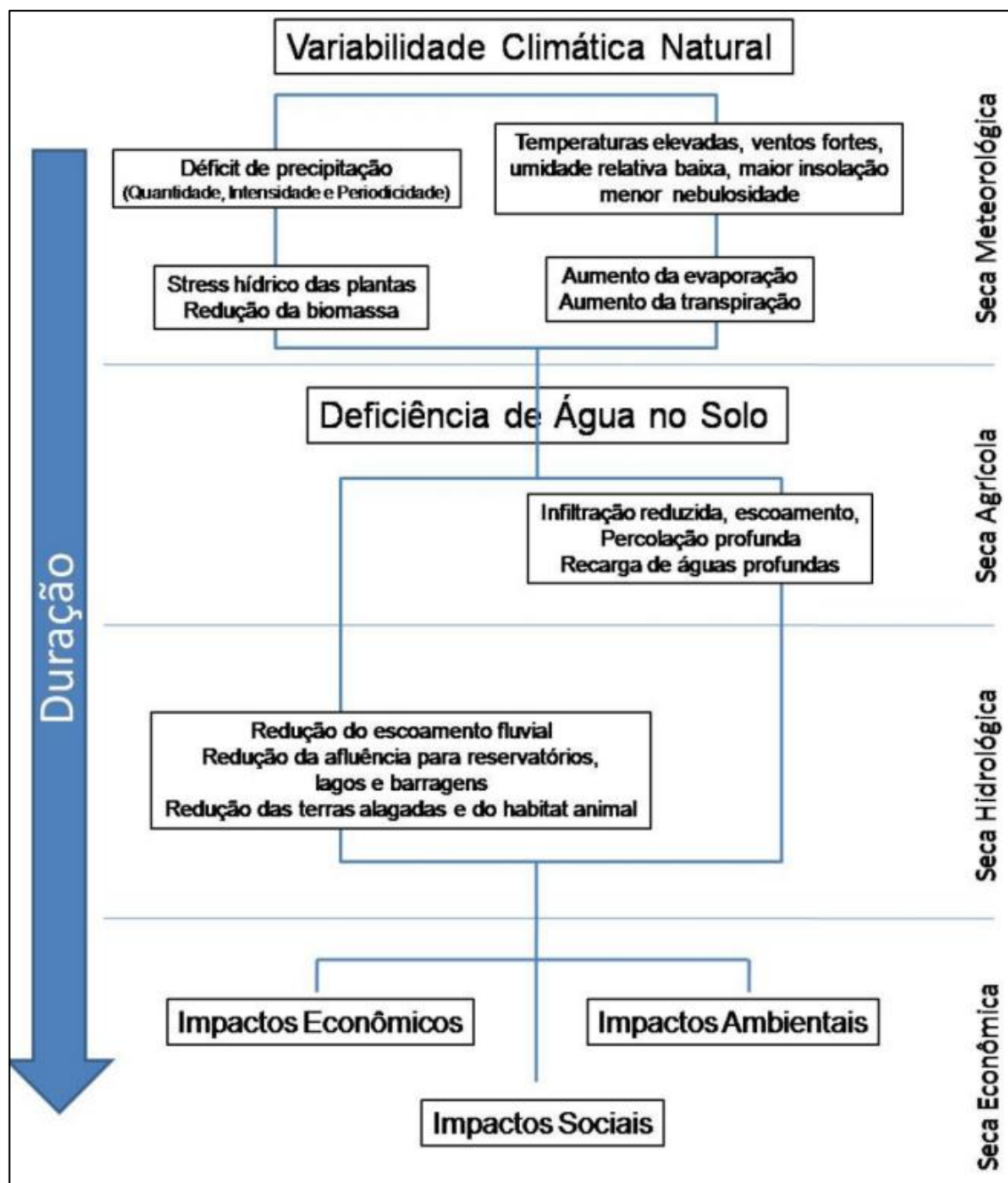
Ressalta-se, ainda, que entre os tipos de eventos supracitados, as secas se destacam, sendo o evento mais presente no estado de São Paulo nos últimos anos, além de gerar os maiores impactos na população, economia e saúde quando comparadas aos demais eventos (Di Giulio et al., 2019).

Para corroborar com esta informação, Andreoli e Kayano (2005) expõem que anteriormente aos anos 2000, as intensidades dos eventos de La Niña eram predominantemente fracas e, após este marco temporal, passaram a se apresentar de forma consideravelmente mais expressiva.

Conforme Freitas (1998), a seca é um fenômeno natural peculiar, visto que apresenta, normalmente, longa duração e uma grande área atingida, além de poder ser classificada por quatro tipos: seca meteorológica, seca agrícola, seca hidrológica e seca econômica (Wilhite; Glantz, 1985; Byun; Wilhite, 1999).

Observa-se, vide Figura 6, que a seca meteorológica desempenha a função estopim para outros eventos que resultam nas demais secas, como a agrícola, hidráulica e econômica (Fernandes et al., 2009).

Figura 6 – Evolução e classificação das secas em função da duração e dos impactos



Fonte: Fernandes et al., 2009.

Configuram-se como indispensáveis, portanto, estudos aprofundados referentes às secas meteorológicas, objetivando o planejamento de ações eficazes para os recursos hídricos afetados. Para tanto, índices que classificam, monitoram e caracterizam estes eventos extremos devem ser aplicados (Uliana et al., 2015; Silva et al., 2020).

2.1.3 Índices para Mensurar Secas

Os índices para mensurar secas objetivam medir sua intensidade por meio de números e seus resultados se tornam significativamente úteis para auxiliar na tomada de decisões, apoiando em planejamentos mais eficazes que visam mitigar os impactos da escassez hídrica (Yihdegol; Vaheddoost; Al-Wesha, 2019; Gonçalves et al., 2021).

Estes índices necessitam de extensas séries históricas para a quantificação da seca em diferentes escalas temporais, permitindo análises em regiões de interesse em intervalos longos, como meses ou anos. A análise mensal é mais empregada em situações relacionadas a agricultura, águas subterrâneas e abastecimento de água (Panu; Sharma, 2002; Mishra; Singh, 2010).

A análise temporal é de extrema importância para um melhor conhecimento do fenômeno no local estudado, e, quando empregada juntamente a outras técnicas analíticas, como por exemplo a geoestatística, permite a averiguação da variabilidade espaço temporal da seca (Rosa, 2011; Gonçalves et al., 2021).

Um dos índices que avaliar os eventos de secas trata-se do Índice de Porcentagem Normal – IPN (Willeke; Hosking; Wallis, 1994), que, devido a sua simplicidade, alta eficácia em detectar eventos de seca meteorológica e fácil aplicabilidade, foi empregado neste trabalho. O emprego do IPN requer uma série histórica mínima de 30 anos de dados de precipitação, sejam elas semanais, mensais ou anuais (Costa et al., 2018).

As características mencionadas justificam a atual utilização em larga escala do IPN para detecção de eventos chuvosos ou secos. No Brasil, Nunes e Medeiros (2020) avaliaram as secas no período entre 1912 e 2018 no Ceará, para posteriormente discorrerem sobre os efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a região estudada.

Souza et al. (2018) também estudaram a influência do ENOS nas precipitações da região amazônica do Mato Grosso a partir do IPN. Como conclusão, foi observado que eventos ENOS causam alterações nas chuvas de algumas regiões da região amazônica estudada.

Internacionalmente, Ballah e Benaabidate (2021), observaram, após estudo em uma região no extremo sudeste da Argélia, que o IPN é um índice de alta eficácia para monitoramento de secas meteorológicas do local.

Böhnisch et al. (2021) também estudaram a quantidade, duração e intensidade das secas na Europa com auxílio do IPN, que analisou dados de chuva para o período

entre 1955 e 2019 e deu suporte na previsão de secas até o ano de 2099 a partir do modelo CRCM5-LE. Como conclusão, o estudo apontou que futuramente os Alpes, o Mediterrâneo, a França e a Península Ibérica podem se tornar focos recorrentes de secas.

Jokar e Masoudi (2018), empregaram o IPN para estudar a análise espacial das secas no Irã, sendo utilizados dados de chuva entre 1967 e 2014. Como resultado, foi observado que, ao longo de todo o país, as secas aumentaram e devem manter este comportamento no futuro.

O fato do IPN, assim como outros dados climáticos, resultar de dados pontuais faz com que a geoestatística se adequa devidamente como forma de análise, o que possibilita a geração de dados espaciais de grande importância para gestão hídrica.

2.2 Geoestatística aplicada à precipitação

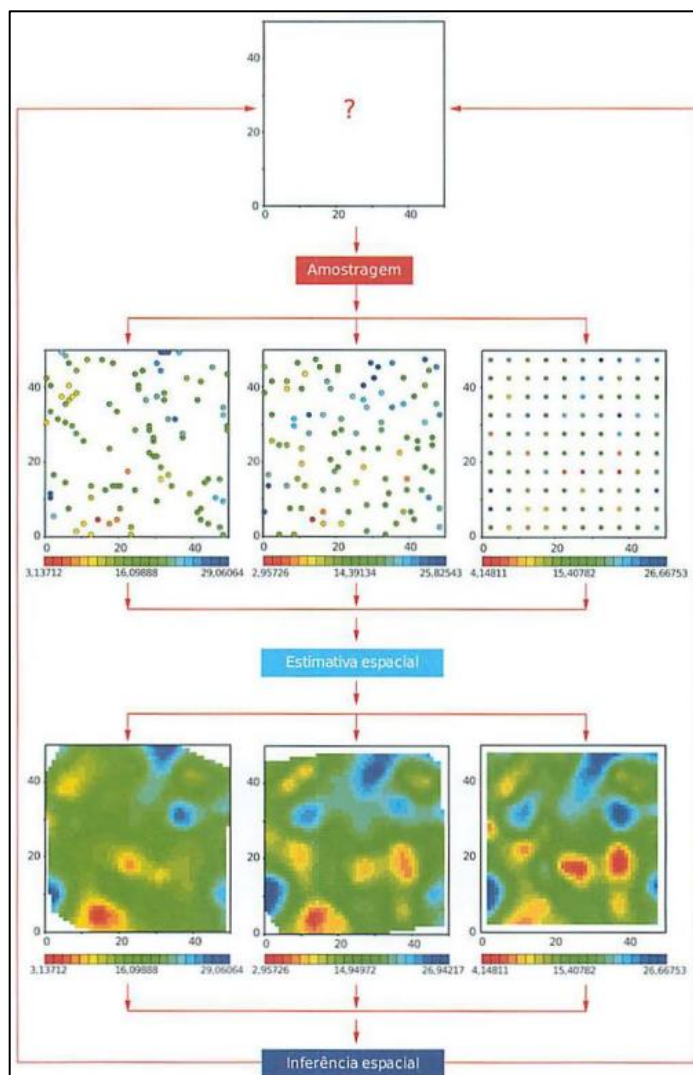
2.2.1 Geoestatística

Segundo Grego, Oliveira e Vieira (2014), a geoestatística tem como finalidade a caracterização espacial de uma variável a partir de amostras destas mesmas variáveis em uma determinada área de interesse. Foi originada em meados do século XX, quando Daniel G. Krige (1951) e Georges Matheron (1962) desenvolveram e sistematizaram técnicas para analisar o comportamento de variáveis distribuídas no espaço.

A geoestatística estima valores da variável examinada a partir de uma amostragem, tendo, como resultado, mapas que apresentam o comportamento espacial do parâmetro estudado, sendo tal metodologia também conhecida como inferência espacial (Srivastava, 1996; Goovaerts, 1997; Yamamoto; Landim, 2013).

A Figura 7 apresenta um esquema básico da geoestatística, onde pode ser observado que, dentro de uma área de interesse qualquer, devem ser coletados uma série de amostras, podendo ser homogeneamente distribuídas ou não. Cada uma das amostras deve contar o valor da variável que se deseja conhecer o comportamento espacial. A partir da amostragem é realizada uma estimativa espacial por meio de modelos matemáticos, as quais resultam em mapas da variável estudada.

Figura 7 – Esquema mostrando o processo da geoestatística a partir do processo de inferência do fenômeno espacial com base na amostragem



Fonte: YAMAMOTO e LANDIM, 2013.

A técnica foi empregada inicialmente para solucionar as adversidades na área da mineração, e, a partir de 1980, esta ferramenta teve sua aplicação expandida e seu uso difundido em outras áreas, como na agricultura, cartografia, climatologia, análise de precipitações, entre outros (Yamamoto; Landim, 2013; Santos, 2018).

Assim sendo, a geoestatística se destaca como método de expressiva importância e aplicabilidade na análise de variáveis regionalizadas, definidas como variáveis que se transformam conforme a posição ocupada no espaço (Matheron, 1962; Santos, 2018).

Segundo Landim (2006), as variáveis regionalizadas, também denominadas como parâmetros de estudo, são constituídas por um duplo sentido contraditório, dado

que apresentam valores aleatórios (independentes entre si), mas também indicam relações entre os as demais amostras.

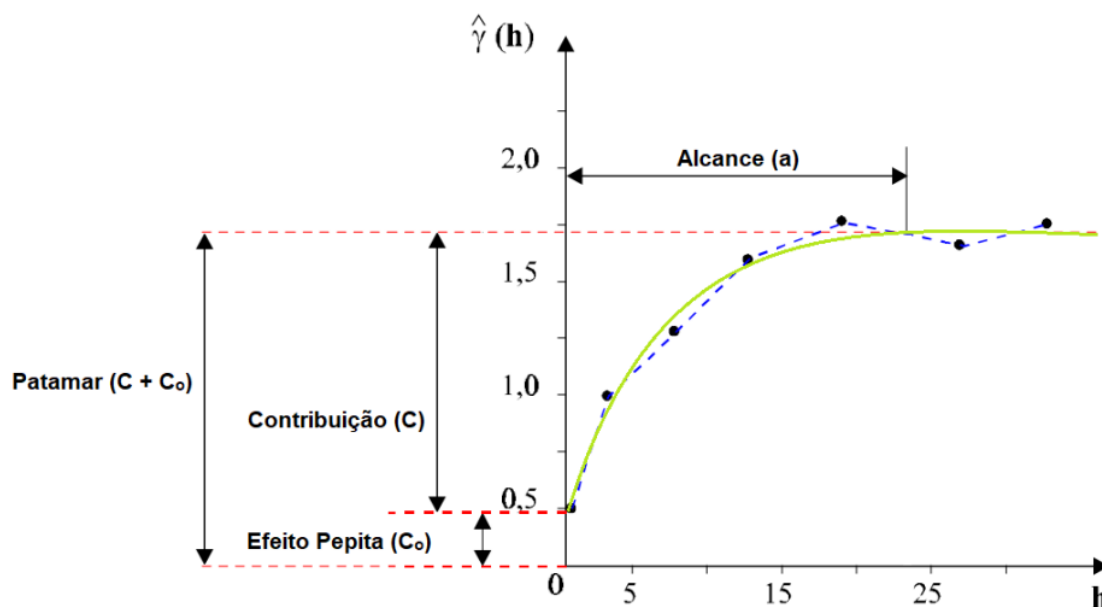
Isto posto, o objetivo da geoestatística é correlacionar a variabilidade espacial destes parâmetros, de modo a se estabelecer uma função que correlacione espacialmente as amostras desta variável. Para isto, são empregadas duas ferramentas essenciais da geoestatística: o semivariograma e a krigagem (Landim, 2006; Yamamoto; Landim, 2013).

2.2.2 Semivariograma e Krigagem

O semivariograma é uma representação gráfica do modelo matemático que mais se assemelha a relação entre os valores do parâmetro estudado com as suas respectivas distâncias (Matheron, 1963; Lima, 2007; Ricardi, 2020).

Após o semivariograma ser estabelecido, alguns parâmetros intrínsecos podem ser definidos: efeito pepita (C_0), alcance (a), patamar ($C + C_0$) e a contribuição ou variância estrutural (C), os quais podem ser visualizados na Figura 8 (Landim, 2006).

Figura 8 – Semivariograma típico e parâmetros intrínsecos



Fonte: Ricardi, 2020.

O valor da semivariância onde ocorre a estabilização do semivariograma é chamado de patamar. O alcance (ou amplitude) é a distância onde o gráfico atinge o patamar. A partir desta distância, os pares de amostras não manifestam dependência

espacial, perdendo a sua correlação (Isaaks; Srivastava, 1989; Santos, 2018; Ricardi, 2020).

O semivariograma pode ser ajustado por diversos modelos matemáticos, porém os mais utilizados são o esférico, exponencial e gaussiano (Landim, 2006; Mello e Silva, 2013).

Nos semivariogramas ajustados, o valor da semivariância pode não ser nula quando a distância for zero (próximo da origem), evidenciando uma diferença não prevista entre as amostras com distâncias baixas (Cambardella et al., 1994; Santos, 2015). Essa situação é conhecida como efeito pepita e pode ser atribuída a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados com intervalos suficientemente pequenos para demonstrar o seu comportamento espacial (Webster, 1985; Lima, 2007; Landim, 2006).

Quando o patamar tem o mesmo valor do efeito pepita e um alcance muito curto em relação as distâncias das amostras, obtendo um semivariograma muito semelhante a uma reta horizontal, este fenômeno é denominado efeito pepita puro (Journel; Huijbregts, 1978).

No caso do semivariograma ser estabelecido sem a ocorrência do efeito pepita puro e com patamar e alcance bem definidos, servirá de base para a krigagem (Santos, 2018). Essa, com auxílio de análise de regressão, é uma técnica que ilustra a variabilidade do parâmetro estudado por meio de mapas (Santos, 2015). Dentre os diversos tipos de krigagem existentes, a krigagem ordinária é a mais empregada (Yamamoto; Landim, 2013).

Por meio da dependência e variância espacial deduzida no semivariograma, a krigagem estima valores em pontos onde não há amostras (Salgueiro, 2005; Miranda; Paranhos Filho; Lastoria, 2015).

A estimativa dos cálculos pode ser avaliada por meio da validação cruzada, onde cada amostra é removida do domínio espacial estudado e, utilizando-se as demais, um novo valor é atribuído para esta amostra, sendo possível estabelecer uma relação entre valores reais e estimados para todas a amostragem presente (Landim, 2006).

A validação cruzada gera o coeficiente de correlação (r), que demonstra a eficiência do modelo matemático na amostragem em questão, provando que ele não é inteiramente incorreto (Landim, 2006; Vicente; Lima; Marques, 2018). Quando este

coeficiente for igual a um (máxima correlação), significa que o ajuste foi assertivo em todos os pontos amostrais (Yamamoto; Landim, 2013).

2.2.3 Geoestatística aplicada na variabilidade de precipitações

Com o objetivo de auxiliar órgãos de planejamento como a ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, órgãos ambientais e comitês de bacias hidrográficas regionais, é de extrema importância compreender a distribuição espacial das precipitações em uma área de interesse (Perin et al., 2015, Gupta; Kamble; Machiwal, 2017). Entre os métodos de espacialização, a técnica de krigagem vem apresentando resultados mais precisos que os demais métodos (Veer et al., 2009; Wanderley et al., 2010).

Diante ao exposto, o Quadro 1 traz um compilado dos resultados de alguns estudos que aplicaram a krigagem para análise de chuvas.

Quadro 1 – Estudos que aplicaram a krigagem para análise de chuvas

Área de Estudos	Anos analisados	Resultados	Referência
Noroeste da Índia	1971-2013	Foram gerados mapas para todos os anos estudados, sendo verificado altos valores de coeficiente de determinação e baixos valores de raiz do erro quadrático médio. Na região foi observada uma alta variância de chuvas entre os anos, sendo todas alturas pluviométricas inferiores a 150 mm anuais. Os resultados podem servir de base para decisões e planejamento de escassez hídrica.	Guptsa, Kamble e Machiwal (2017)
Bacia do rio Grande, Estado da Bahia.	2016-2019	Estudara, partir da krigagem ordinária, a variabilidade espacial das chuvas na bacia do rio Grande. Como conclusão, foram observados resultados coerentes com as informações da bacia e uma intensa variabilidade espacial. As informações obtidas nos trabalhos podem servir de dado de entrada para modelagens chuva-vazão.	Fortunato et al. (2017); Fortunato et al. (2019)
Faridpur, centro de Bangladesh	1980-2013	O estudo provou que a interpolação pela técnica de krigagem é uma ótima opção para estimar valores onde não há amostragem, sendo que estes resultados podem ser utilizados em futuros estudos hidráulicos e hidrológicos.	Jaman e Adhikary (2020)
Bacia do baixo rio Iguaçu, sudoeste do Paraná	1976-2016	Analísaram a influência dos fenômenos ENOS no regime de chuvas na bacia hidrográfica do baixo rio Iguaçu. Resultados do trabalho evidenciaram que os períodos chuvosos e secos da área de estudo estão relacionados com eventos de El Niño e La Niña respectivamente.	Borges, Binda e Fujita (2021)
Estado do Havaí, EUA	1990-2019	A utilização da krigagem gerou interpolações satisfatórias, porém algumas estimativas tiveram valores subestimados por conta do efeito de suavização que a ferramenta realiza.	Lucas et al. (2022)
Região de Asir, Arábia Saudita	1966-2013	Empregaram a geoestatística para a obtenção de mapas de máxima precipitação anual e precipitação anual total na região. Os resultados foram satisfatórios e auxiliaram na melhora de gestão e classificação hídrica do local.	Helmi et al. (2023)
Bacia do rio Brígida, estado do Pernambuco	1981-2017	Utilizaram a geoestatística para estimar a distribuição espacial anual das chuvas. Os autores concluíram que o método empregado é extremamente poderoso como suporte nas análises hidrológicas, principalmente em áreas onde a chuva é irregular e tem alta variabilidade, como é o caso da região estudada.	Sousa et al. (2023)

Fonte: Organizado pelo autor.

O conhecimento da variabilidade espacial e temporal deste parâmetro é fundamental, visto que ele é a principal forma de suprimento hídrico para diversas atividades, como agricultura, geração de energia e abastecimento humano (Santos et al., 2010; Almeida et al., 2011). Os estudos supracitados ratificam com esta afirmação, evidenciando a importância de estudos que aplicam geoestatística, visando compreender a variabilidade espaço temporal das chuvas, os eventos de seca e a vulnerabilidade hídrica das bacias hidrográficas.

2.3 Segurança hídrica a secas em bacias hidrográficas

2.3.1 Segurança hídrica e definições terminológicas

Para melhor entender a questão da segurança hídrica, é necessário a estruturação de alguns componentes, como o risco, perigo, exposição e vulnerabilidade. O risco pode ser definido como o potencial para consequências adversas em sistemas ecológicos e humanos. Perigo pode ser definido como a ocorrência de futuros eventos físicos (naturais ou induzidos pelo homem) que podem ter efeitos adversos em elementos vulneráveis e expostos. Exposição considera que existem elementos em uma área na qual eventos de perigo podem ocorrer. Por fim, a vulnerabilidade refere-se a propensão de elementos expostos de sofrerem efeitos adversos quando impactados por eventos de perigo (Cardona et al., 2012; Hagenlocher et al., 2019; Villani et al., 2022).

Fernandes (2020) também descreve estes mesmos parâmetros de forma similar: a condição de perigo é uma situação com potencial para provocar danos, sendo que o evento perigoso envolve um perigo; o risco é a combinação da probabilidade de ocorrência e da consequência de um evento perigoso, considerando a severidade e a frequência da situação, ou seja, é a relação entre perigo e consequência. O perigo também pode ser resumido como a probabilidade temporal da ocorrência de uma ameaça, enquanto a consequência é uma composição da vulnerabilidade e exposição dos elementos analisados ao risco.

Uma visão gráfica da relação do risco com o perigo, vulnerabilidade e exposição pode ser observada pela Figura 9.

Figura 9 – Conceituação teórica de risco



Fonte: ANA, 2019.

Isto posto, a ANA (2019) definiu o Índice de Segurança Hídrica – ISH, com a finalidade de incorporar o conceito de risco aos usos da água e retratar as diferentes dimensões da segurança hídrica: humana (garantia de água para abastecimento humano); econômica (garantia de água para irrigação, pecuária e atividade industrial); ecossistêmica (quantidade adequada de água para usos naturais, qualidade adequada de água para usos naturais e segurança das barragens de rejeito de mineração); e resiliência (reservação artificial, reservação natural, potencial de armazenamento subterrâneo e variabilidade pluviométrica).

O ISH serve como base para o Programa de Segurança Hídrica – PSH, que visa minimizar os riscos associados à escassez de água e ao controle de cheias a partir de obras, projetos e estudos (ANA, 2019).

2.3.2 Análise de Segurança Hídrica em relação a secas

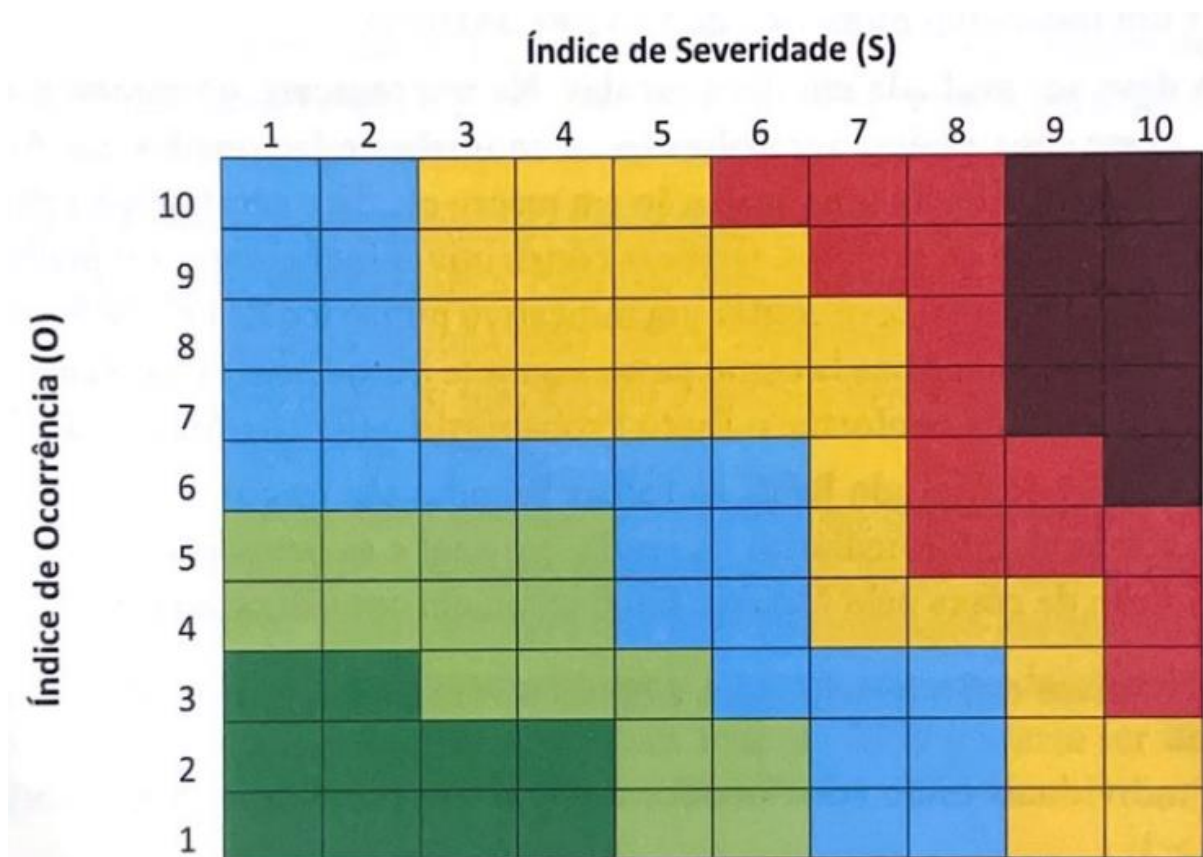
Na literatura não há um índice (ou alguma metodologia semelhante) para mensurar a segurança hídrica com foco em secas, onde se analisa o risco hídrico nas bacias hidrográficas, sendo o ISH o mais próximo encontrado. Como ressalva, tem-se apenas o trabalho de Mendes (2008), que elaborou uma matriz de risco de seca para a margem esquerda do rio Guadiana em Portugal, correlacionando a probabilidade de ocorrer seca meteorológica com os danos esperados pela seca.

O ISH tem como uma das vertentes a análise da variabilidade pluviométrica e diversos elementos ligados a seca, como a garantia de água na dimensão humana e

econômica, porém também analisa vertentes irrelevantes ao assunto, como a qualidade d'água e aspectos de segurança de barragens.

O Modo de Falha e Análise de Efeitos (Failure Mode and Effect Analysis – FMEA), é um método amplamente empregado em análises de risco e que integra a chance de ocorrer uma anomalia com a severidade dos impactos gerados (Mikulak; Mcdermott; Beauregard, 2017; Fernandes, 2020). A Figura 10 ilustra uma matriz adaptada do FMEA, onde o índice de ocorrência (eixo vertical) e o índice de severidade (eixo horizontal) se interligam e é encontrado o risco para estes parâmetros, sendo a cor verde escuro o menor risco e o vermelho escuro o maior risco envolvendo a atividade analisada.

Figura 10 – Matriz de risco FMEA adaptada



Fonte: FERNANDES, 2020.

A junção do ISH (sem os parâmetros irrelevantes), o trabalho de Mendes (2008) e do FMEA poderia gerar um índice para avaliar a segurança e o risco hídrico à secas em bacias hidrográficas. Os parâmetros que estão diretamente ligados às ocorrências de secas e suas consequências (conforme as referências deste parágrafo) foram apresentados a seguir.

2.3.2.1 Seca Acumulada

A seca acumulada visa compreender e quantificar qual das sub-bacias estudadas têm mais probabilidade de ser atingida pela escassez hídrica.

Sugere-se a utilização deste fator, pois quanto maior o seu valor, maior é a área afetada pelo evento na bacia em questão, aumentando o perigo (índice de ocorrência) e, conseqüentemente, o risco nestas regiões (Mendes, 2008).

2.3.2.2 Abastecimento Hídrico (humano, industrial e rural)

O abastecimento hídrico visa compreender e quantificar qual das sub-bacias sofreria maiores conseqüências devido à falta de abastecimento hídrico, o qual é usualmente retirado de recursos hídricos superficiais. Este fator é diretamente atrelado às vazões outorgadas para uso humano, industrial ou rural de cada sub-bacia, visto que a escassez hídrica pode diminuir drasticamente a disponibilidade de água superficial e em alguns casos gerar restrição de captação prevista por órgãos ambientais (Moreira; Andrade; Gonçalves, 2020).

Conforme Marengo et al. (2015), a seca hídrica de 2014-2015 no estado de São Paulo afetou os três pilares comentados no parágrafo anterior: diminuição do abastecimento de água à população da região metropolitana de São Paulo; prejuízo em cerca de 60 mil estabelecimentos industriais, causando impactos nas economias regionais; e aumento dos preços de produtos agrícolas.

2.3.2.3 Uso Agrícola

O uso agrícola visa compreender e quantificar qual das sub-bacias têm a maior área destinada a agriculturas. Eventos de seca afetam diretamente a produção agrícola por conta da redução dos volumes pluviométricos, diminuindo a produção de alimentos e gerando aumento dos seus respectivos preços (Giacomin; Ohnuma Júnior, 2012; Carmo; Johansen; Anazawa, 2016).

2.3.2.4 Geração Hidroelétrica

A geração hidroelétrica visa compreender e quantificar qual das sub-bacias têm maior capacidade de potencial de geração de energia, somando o potencial de todas as usinas que utilizam a água como força motriz (usinas hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas e centrais de geração hidrelétrica). Conforme ANA (2021b) e

ONS (2023), os últimos eventos de seca causaram uma drástica redução na geração de energia na região sudeste ao longo da sua duração, causando aumento do preço da energia.

2.3.2.5 Malha Hidroviária

A malha hidroviária visa compreender e quantificar qual das sub-bacias têm maior malha hidroviária e maior movimentação de carga pela hidrovia, informações que estão diretamente ligadas a impactos positivos na economia. Segundo São Paulo (2023), em anos de estiagem hídrica, a carga transportada na hidrovia do Tietê-Paraná pode diminuir em até 26% em relação ao ano anterior sem estiagem, o que pode causar um aumento de aproximadamente 8,5% no custo do frete dos produtos (Trevisan, 2019). Isto ocorre por conta de a hidrovia ter a possibilidade de ficar interditada devido aos baixos níveis dos reservatórios na região (Amorim, 2022).

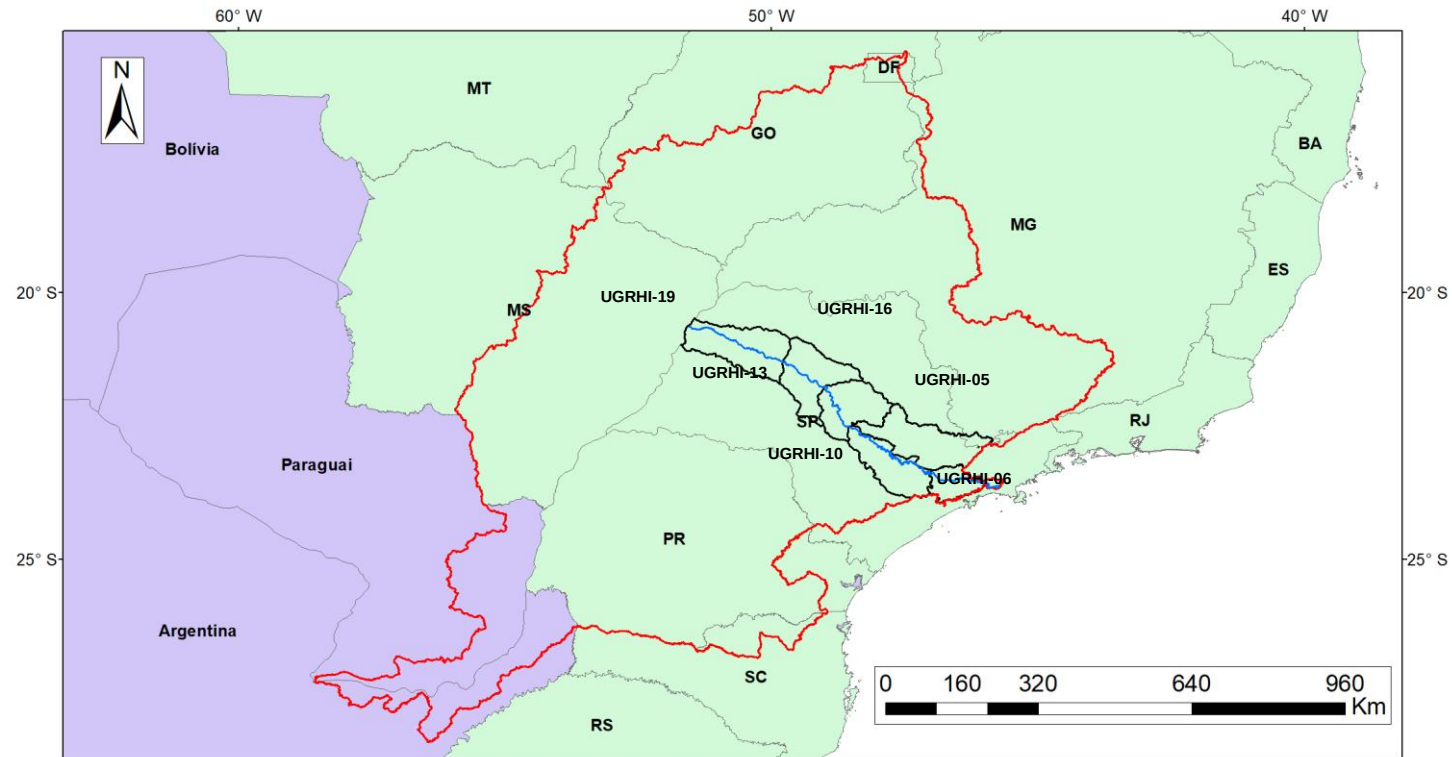
3 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ

A bacia hidrográfica do rio Tietê (área de aproximadamente 73.548 km²) está inserida na região hidrográfica do Paraná (uma bacia internacional, abrangendo Brasil, Paraguai e Argentina), se destacando como a maior bacia do estado de São Paulo (com cerca de 72.409 km²), além de ter uma pequena parte da sua área (1139 km²) dentro do estado de Minas Gerais. É uma região hídrica extremamente importante por diversos motivos: por conter empreendimentos geradores de energia elétrica; por conter vários pontos de abastecimento humano; ter diversos pontos de abastecimento industrial; ter pontos de coleta para irrigação de agriculturas; e por formar uma hidrovia (corredor Tietê-Paraná) com capacidade de carga de 20 milhões de tonelada ao ano (ANA, 2015b; SIGRH, 2023; São Paulo, 2023).

A bacia hidrográfica do rio Tietê (BHRT) é uma unidade de gestão e planejamento de recursos hídricos abrangendo seis sub-bacias hidrográficas: UGRHI 06-Alto Tietê (AT), nascente do rio, onde está inserida a Região Metropolitana de São Paulo; UGRHI 10–Sorocaba/Médio Tietê (SMT); UGRHI 13-Tietê/Jacaré (TJ); UGRHI 16-Tietê/Batalha (TB), UGRHI 19-Baixo Tietê (BT); e UGRHI 05-Piracicaba/Capivari/Jundiaí (PCJ), interestadual, que se inicia em território mineiro e importante bacia de contribuição do Rio Tietê. Os principais rios que formam esta bacia são o rio Tietê, rio Sorocaba, rio Piracicaba, rio Capivari, rio Batalha e rio Jacaré-Pepira (SIGRH, 2023).

As regiões citadas nos parágrafos anteriores podem ser mais bem observadas nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Bacia do rio Tietê inserida na Bacia do rio Paraná



Legenda

- rio Tietê
- Bacia Hidrográfica do rio Paraná
- Sub-bacias do rio Tietê
- Estados Brasil

BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ INSERIDA
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

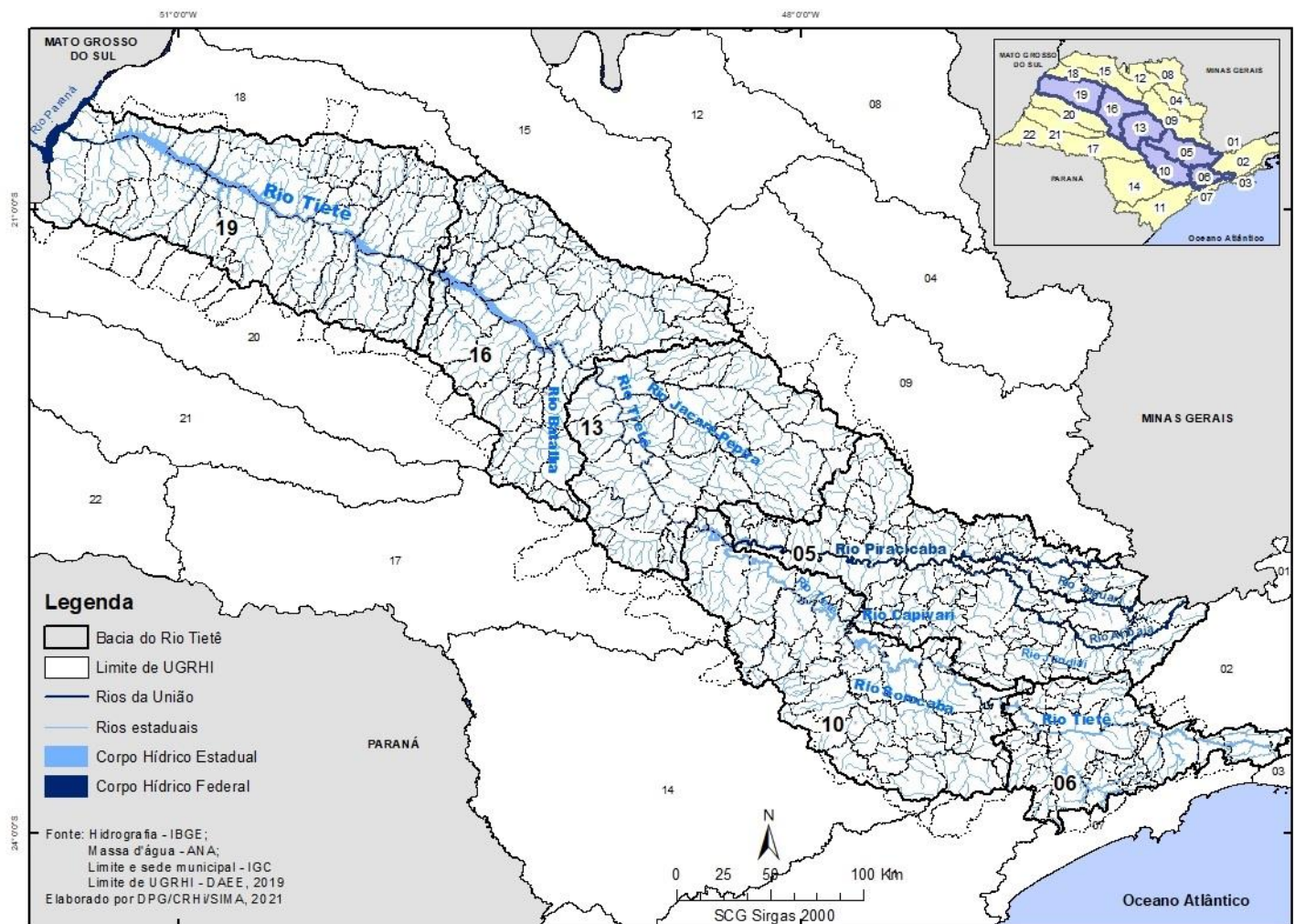
DATUM SIRGAS 2000
Coordenadas Geográficas
Fonte: ANA (2023)
Elaborado por: TERCINI, O. T. (2023)



Fonte: SIGRH (2023).

06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré; 16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

Figura 12 – Bacia Hidrográfica do Rio Tietê no estado de São Paulo e identificação das sub-bacias



Fonte: ANA (2023).

06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré; 16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

Segundo o SIGRH (2023), a área de estudo abrange 31,8 milhões de habitantes, sendo 98% população urbana e 2% rural, inseridos em 239 municípios. Além disto, o PIB da região equivale a R\$ 1,7 trilhão, sendo 78% do PIB estadual e aproximadamente 17% do PIB nacional (IBGE, 2022; SIGRH, 2023).

Com as informações citadas no presente item, se torna evidente a importância da BHRT para a economia não apenas do estado de São Paulo, mas para todo o país. As crises hídricas atuais podem causar diversos danos econômicos e sociais e, por isto, compreendê-las é de principal importância.

3.1 Aspectos da BHRT

3.1.1 Climatologia

A climatologia da bacia é devidamente diversificada por conta da sua grande extensão e, conforme Alvares et al. (2014), abrange cinco classes, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de climatologia inseridas na BHRT

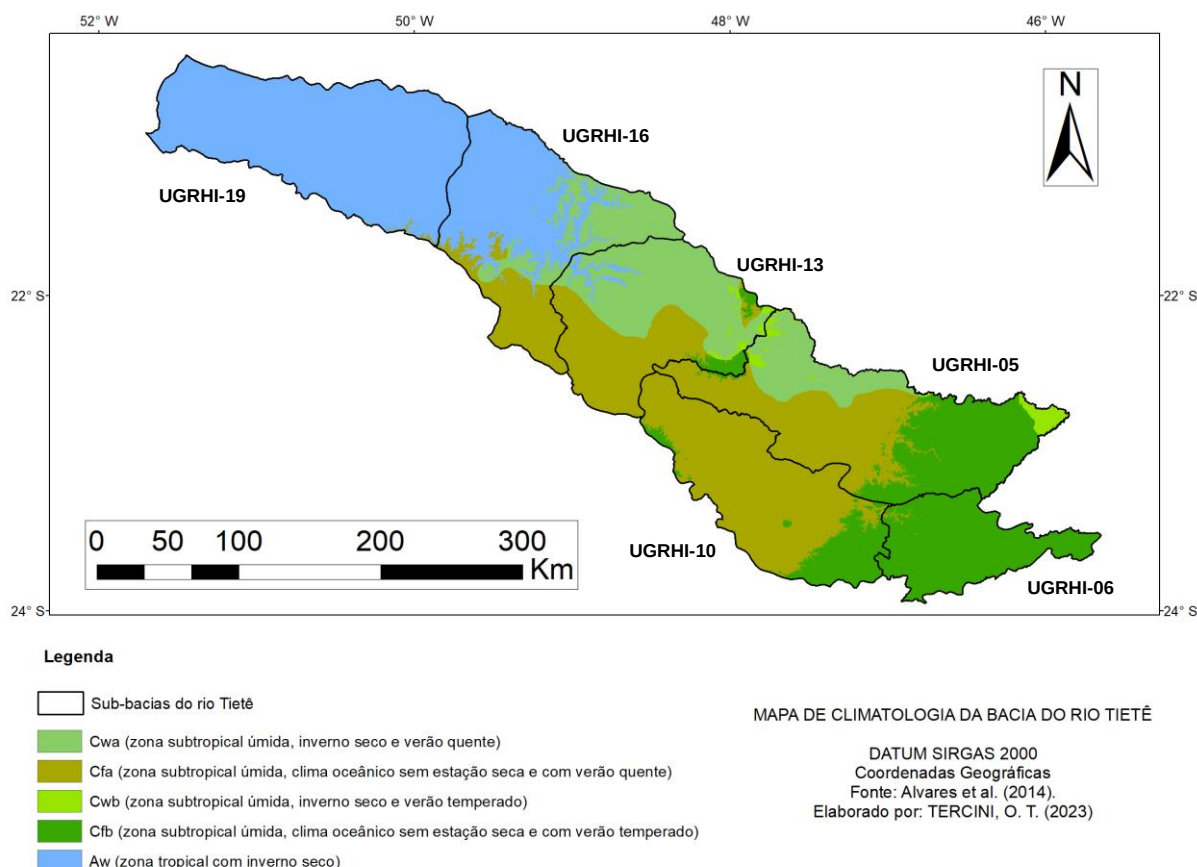
CLASSE	Porcentagem da área inserida
Aw (zona tropical com inverno seco)	31,0
Cfa (zona subtropical úmida, clima oceânico sem estação seca e com verão quente)	32,0
Cwa (zona subtropical úmida, inverno seco e verão quente)	16,4
Cwb (zona subtropical úmida, inverno seco e verão temperado)	1,2
Cfb (zona subtropical úmida, clima oceânico sem estação seca e com verão temperado)	19,4

Fonte: Alvares et al. (2014) - Organizado pelo autor.

Segundo Köppen (1936), a classe Aw é caracterizada por ter: 1) a temperatura média do mês mais frio acima de 18°C e; 2) a diferença entre 100 e a chuva acumulada no mês mais seco do inverno, o resultado multiplicado por 25 deve ser superior à chuva anual acumulada. A classe Cfa é caracterizada por ter: 1) a temperatura média do mês mais frio maior que -3°C e menor que 18°C; 2) temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e; 3) chuva acumulada do mês mais seco maior que 40 mm. A classe Cfb é caracterizada por ter: 1) a temperatura média do mês mais frio maior que -3°C e menor que 18°C; 2) temperatura média do mês mais quente inferior

a 22°C; 3) pelo menos quatro meses em que a temperatura média é acima de 10°C e; 4) chuva acumulada do mês mais seco maior que 40 mm. A classe Cwa é caracterizada por ter: 1) a temperatura média do mês mais frio maior que -3°C e menor que 18°C; 2) temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e; 3) chuva acumulada do mês mais seco menor que 40 mm. A classe Cwb é caracterizada por ter: 1) a temperatura média do mês mais frio maior que -3°C e menor que 18°C; 2) temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C; 3) pelo menos quatro meses em que a temperatura média é superior a 10°C e; 4) chuva acumulada do mês mais úmido no verão maior que dez vezes multiplicado a chuva acumulada do mês mais seco no inverno. Por fim, a Figura 13 ilustra as classes ao longo da BHRT.

Figura 13 – Classes de Clima na bacia do rio Tietê



Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2014) – Editado pelo autor.

06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré;
16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

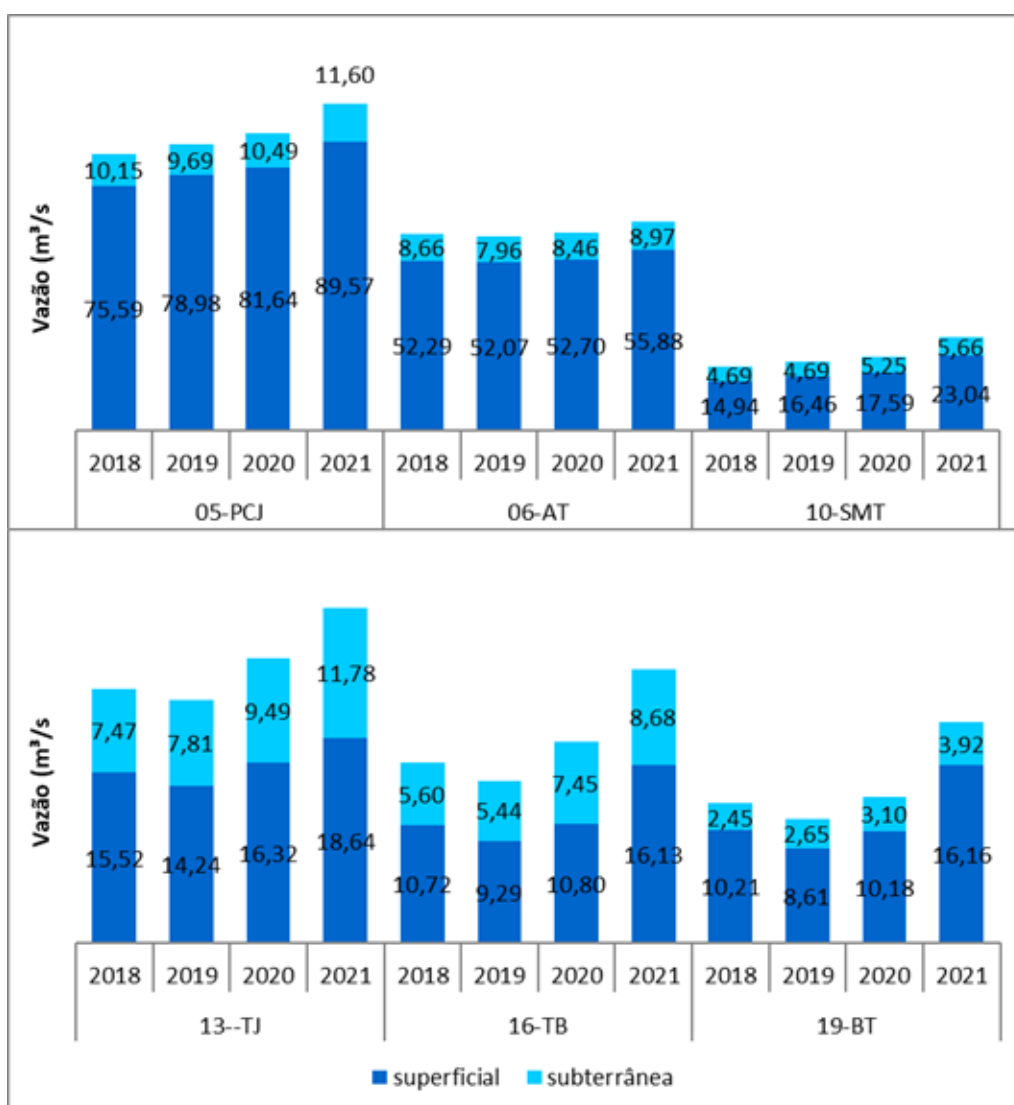
3.1.2 Disponibilidade, demanda e uso dos recursos hídricos

A malha hidrográfica da bacia é extensa e diversa, sendo possível observar que cada sub-bacia apresenta um comportamento diferente sobre a disponibilidade hídrica

e as outorgas de captação (superficial ou subterrânea) e a finalidade de uso (SIGRH, 2023). Conforme Maia (2022), a média da BHRT, de maneira geral, varia entre 1346 mm e 1422 mm, porém é evidente que algumas sub-bacias tem uma disponibilidade hídrica superior às demais, como é o caso das sub-bacias 06-AT, 05-PCJ e 13-TJ (Marcuzzo, 2020).

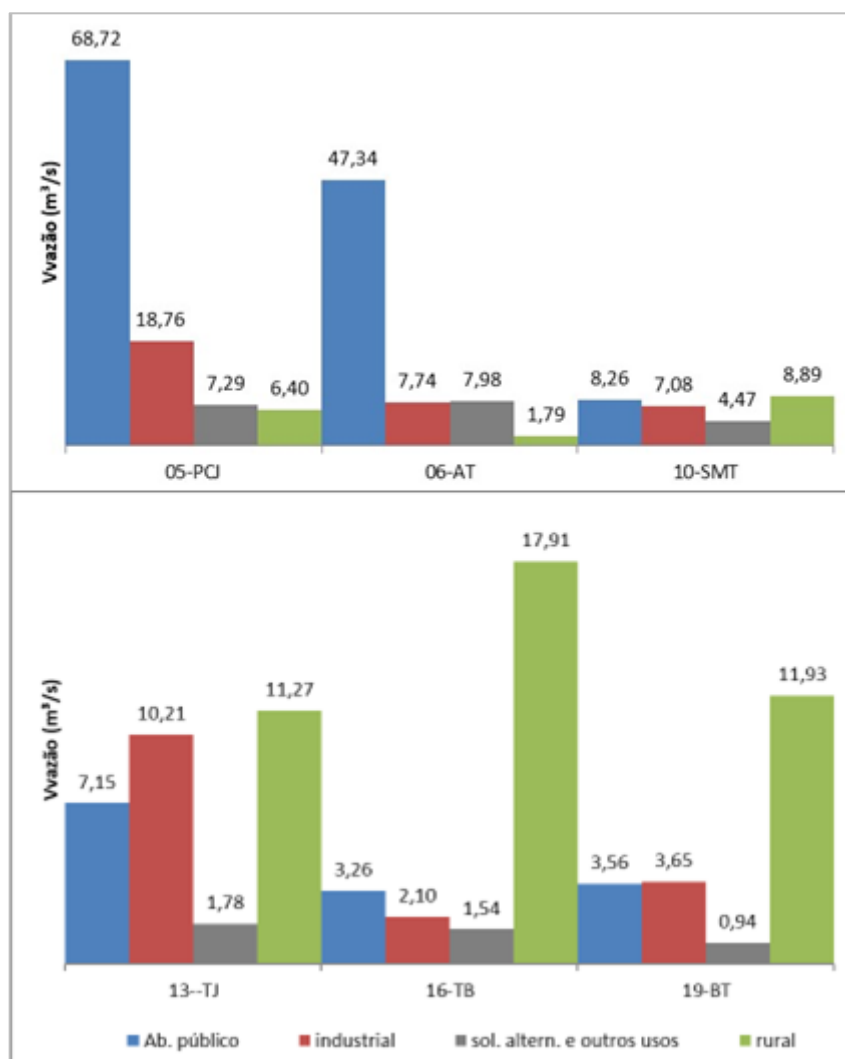
As Figuras 14 e 15 apresentam um resumo sobre as outorgas de captação e finalidade de uso nas sub-bacias do rio Tietê, respectivamente.

Figura 14 – Evolução da vazão outorgada (superficial ou subterrânea) nas sub-bacias do rio Tietê em 2021



Fonte: SIGRH (2023).

Figura 15 – Vazão outorgada por finalidade de uso nas sub-bacias do rio Tietê em 2021



Fonte: SIGRH (2023).

Isto posto, é possível averiguar que as sub-bacias 05-PCJ e 06-AT apresentam tipos e usos de outorgas semelhantes: majoritariamente superficial e com foco em abastecimento público, devido as altas populações nestas regiões. As sub-bacias 16-TB e 19-BT também se assemelham por apresentarem parcelas de captação subterrâneas maiores que as demais (apesar de ainda ser inferior a captação superficial) e foco em uso da água para serviços rurais.

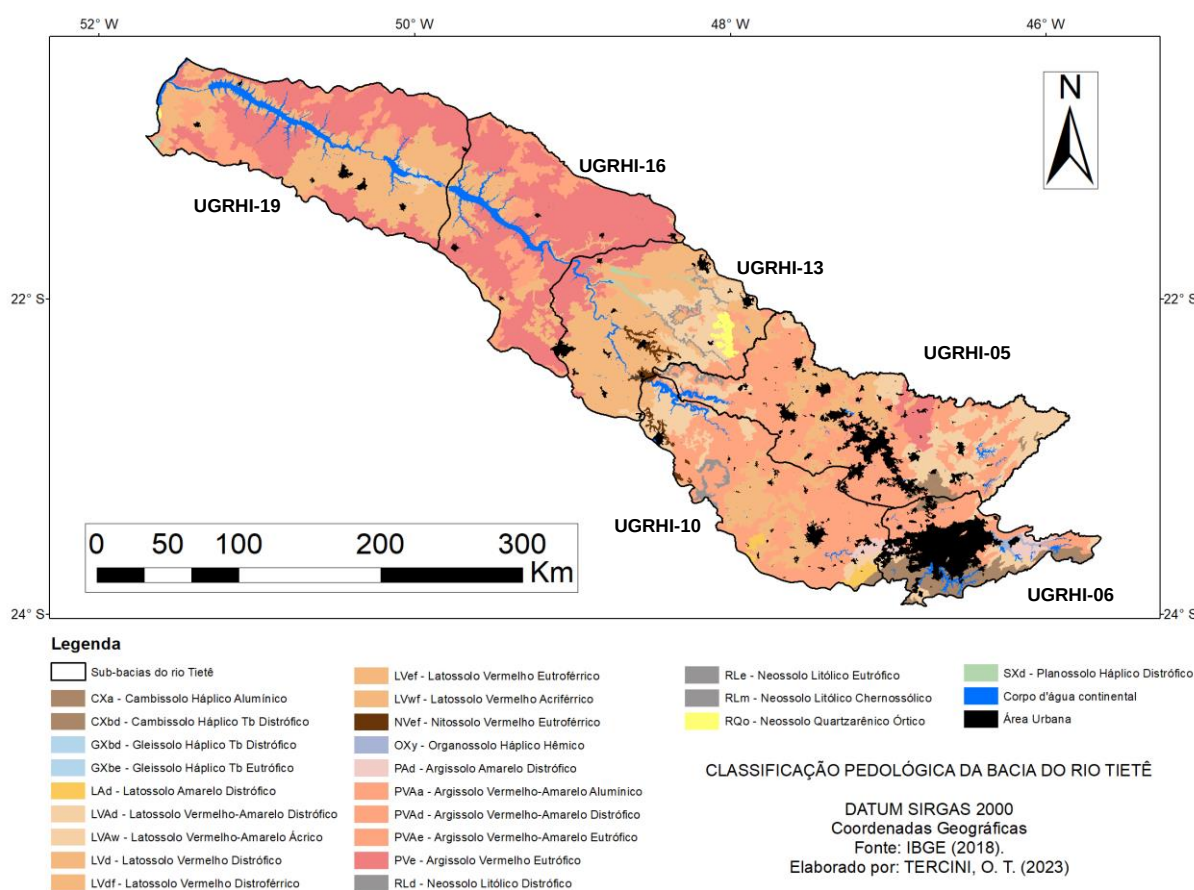
De maneira geral, o abastecimento público é o uso com maior vazão outorgada (cerca de 51% da vazão total outorgada). Segundo a ANA (2021a), mais de 47% dos municípios abrangidos pela bacia são atendidos por água superficiais, incluindo cidades de alta relevância como São Paulo, Campinas, Guarulhos e São Bernardo do Campo.

3.1.3 Pedologia

Conforme a Figura 16, os argissolos e latossolos abrangem mais de 80% da área total da bacia, com as maiores áreas para as classes Argissolo Vermelho Eutrófico (22,1%), Latossolo Vermelho Distrófico (21,4%), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (19,5%) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (9,6%).

Analisando por uma vertente mais hidrológica, segundo a classificação de Sartori et al. (2005), a BHRT seria majoritariamente do grupo hidrológico A e B, caracterizada por solos mais profundos, com alta/moderada taxa de infiltração e textura argilosa/muito argilosa.

Figura 16 – Classificação pedológica da bacia do rio Tietê



Fonte: Adaptado de IBGE (2018) – Editado pelo autor.

06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré; 16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

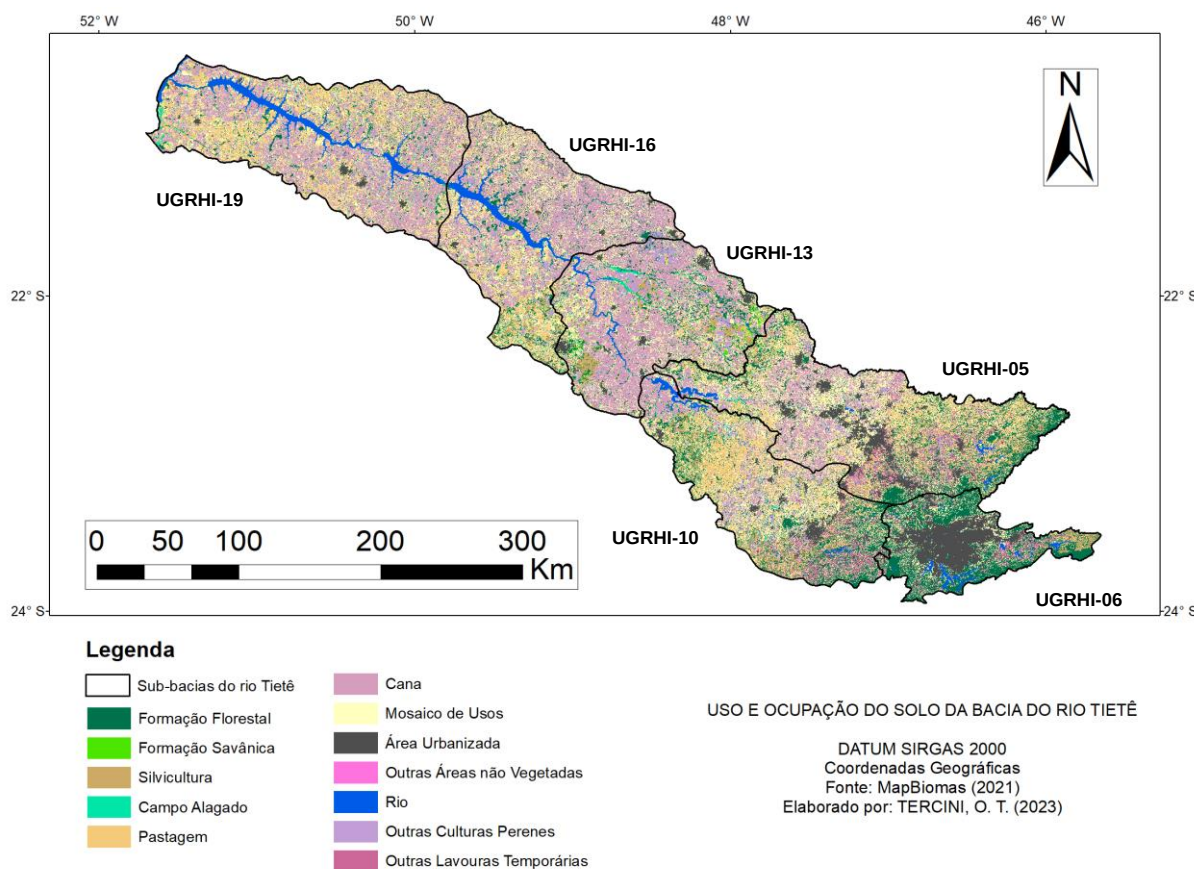
3.1.4 Uso e Cobertura do Solo

De acordo com MapBiomas (2021), o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Tietê é majoritariamente composta por cultivos de cana (24,9%),

mosaico de usos (23,6%), formação florestal (14,9%) e pastagem (14,7%). A Figura 17 ilustra todo o uso e ocupação da região em questão.

De maneira geral, pode-se observar que cerca de 60% da região é ocupada por cultivos dos diversos tipos (cana, soja, café, frutas cítricas, silvicultura, entre outros), exibindo a importância da agricultura para a área, principalmente nas sub-bacias 13-TJ, 16-TB e 19-BT.

Figura 17 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Tietê



Fonte: Adaptado de MapBiomias (2021) – Editado pelo autor.

06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré; 16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

3.1.5 Navegação

O rio Tietê desemboca no rio Paraná e forma a hidrovia Tietê-Paraná, que possui 2.400 quilômetros de extensão e é uma alternativa de logística para transportes em diversos estados, abrangendo áreas como agricultura, indústria, comércio e serviços (Felipe Junior, 2008). Segundo Torres e Souza Filho (2006) e Amorim (2002), a região dos rios Tietê e Paraná abrangem 18 das 30 melhores cidades para negócio do Brasil, sendo uma região bastante rica e com economia diversificada.

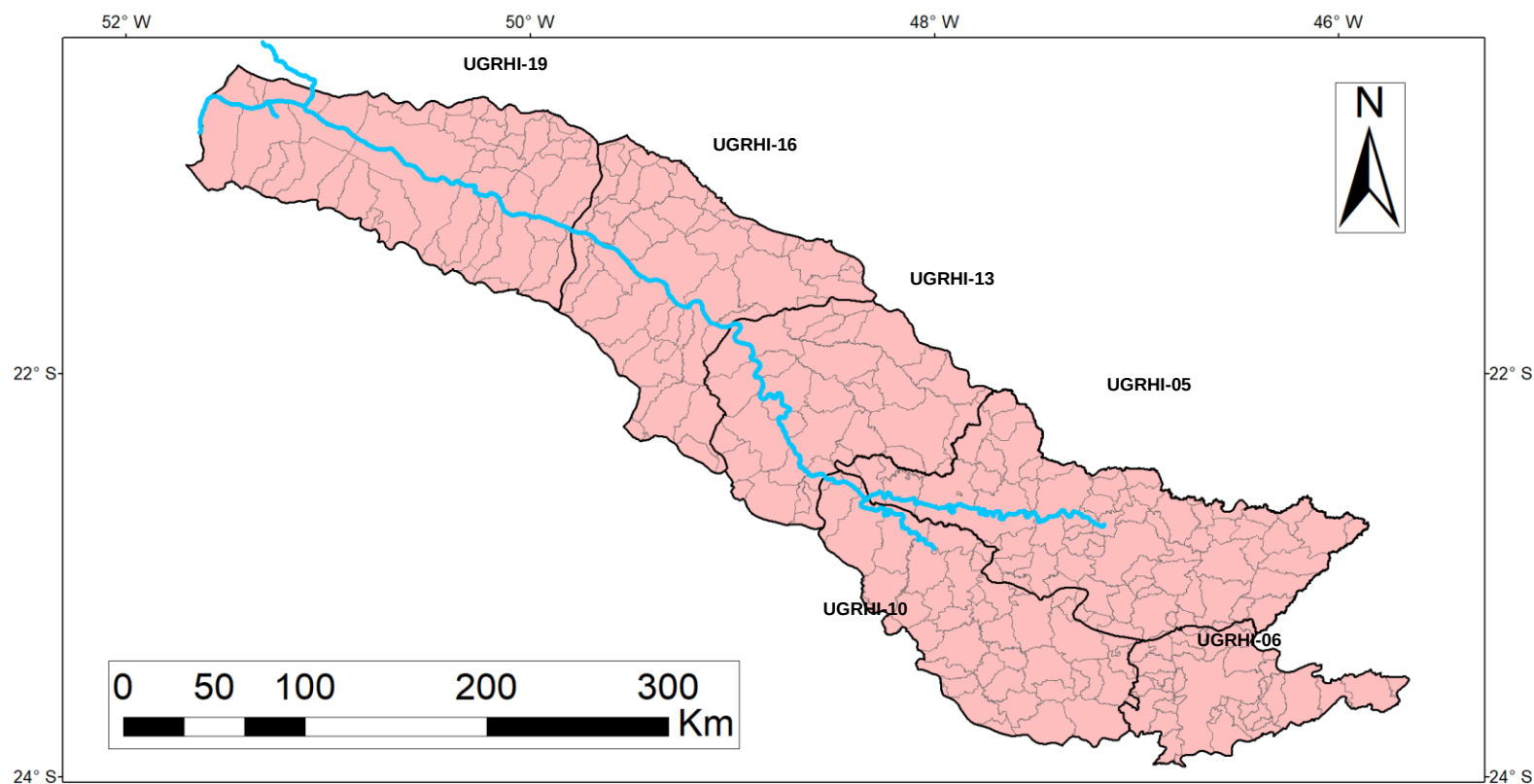
Os rios que compõem o trecho navegável da BHRT são o rio Tietê e o rio Piracicaba, além do canal de Pereira Barrero que interliga o rio Tietê com o rio São José dos Dourados (Amorim, 2022).

A extensão da hidrovia no rio Tietê é de aproximadamente 715 quilômetros, tendo início no município de Conchas/SP e finalizando quando o rio desagua no rio Paraná, nos municípios de Castilho/SP e Itapura/SP. Os produtos mais transportados no curso hídrico, entre 2012 e 2020, foram areia, cana de açúcar, soja e milho (Torres; Souza Filho, 2006; Freitas Junior, 2017; Dnit, 2018; São Paulo, 2023).

O calado máximo oficial ao longo do rio Tietê é de 2,70 m, porém ele pode aumentar ou diminuir de acordo com a variação dos níveis dos reservatórios inseridos no rio (Brasil, 2016). Segundo Amorim (2022), em várias secas o nível teve um rebaixamento tão significativo que tornou a navegação impraticável.

Por fim, a Figura 18 apresenta um mapa da malha hidroviária na BHRT.

Figura 18 – Malha hidroviária da bacia do rio Tietê



Legenda

- Sub-bacias do rio Tietê
- Malha Hidroviária
- Municípios

MALHA HIDROVIÁRIA DA BACIA DO RIO TIETÊ

DATUM SIRGAS 2000
Coordenadas Geográficas
Fonte: MapBiomias (2021)
Elaborado por: TERCINI, O. T. (2023)

Fonte: Adaptado de MapBiomias (2021) – Editado pelo autor.

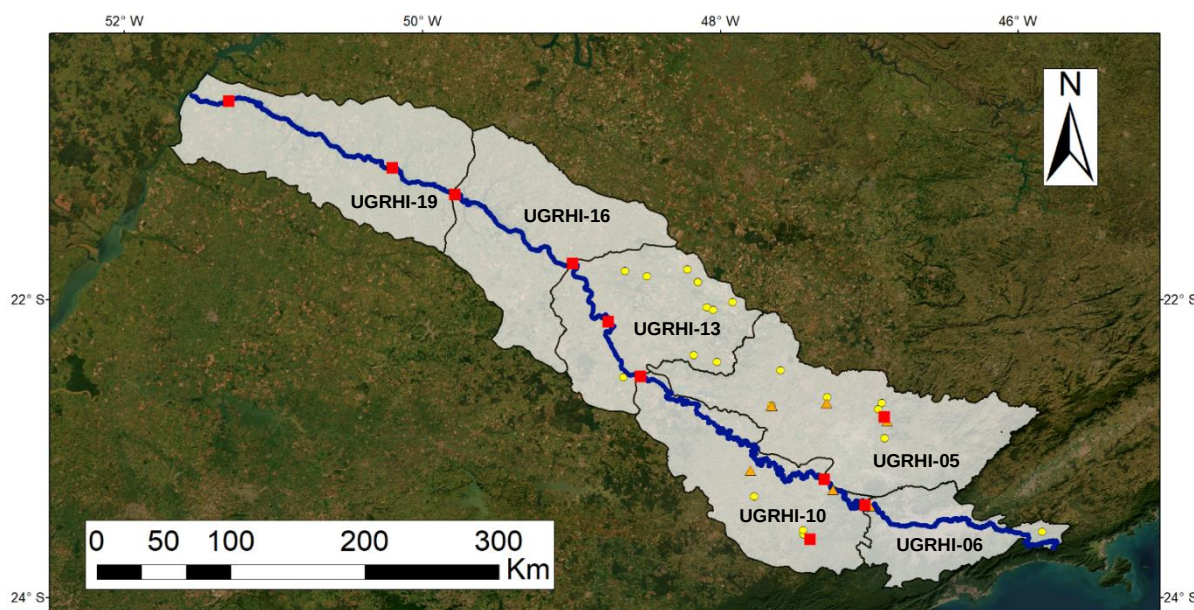
06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré; 16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

3.1.6 Potencial Hidráulico-energético

A Figura 19 representa todos os aproveitamentos hidrelétricos instalados na bacia estudada. Ela soma 35 empreendimentos, sendo dez usinas hidrelétricas (UHEs), seis pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 19 centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), concentrados praticamente nas sub-bacias 13-TJ, 10-SMT e 05-PCJ. Somados, os aproveitamentos hidrelétricos têm capacidade de gerar 2.046 Mw, que equivale cerca de 8% da capacidade de geração do estado de São Paulo e 1% da capacidade de geração do país (ANEEL, 2022).

Segundo a ANEEL (2005), a região do rio Tietê sempre foi devidamente aproveitada para geração de energia hidrelétrica, visto o seu grande potencial. Ainda assim, o local vem sofrendo com dificuldades para armazenamento dos reservatórios durante as secas dos últimos anos, prejudicando a eficiência energética dos empreendimentos (ANA, 2021b).

Figura 19 – Aproveitamentos hidrelétricos em operação na BHRT



Legenda

- Usina Hidrelétrica
- ▲ Pequena Central Hidrelétrica
- Central Geradora Hidrelétrica
- Sub-bacias do rio Tietê
- Rio Tietê

APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NA REGIÃO DO RIO TIETÊ
DATUM SIRGAS 2000
Coordenadas Geográficas
Fonte: ANEEL (2022).
Elaborado por: TERCINI, O. T. (2023)

Fonte: Adaptado de ANEEL (2022) – Editado pelo autor.
06=Alto Tietê; 10=Sorocaba/Médio Tietê; 05=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 13=Tietê/Jacaré;
16=Tietê/Batalha; 19=Baixo Tietê.

3.2 Caracterização das sub-bacias do rio tietê

3.2.1 UGRHI 06 – Alto Tietê

As características gerais da UGRHI Alto Tietê (UGRHI 06) foram apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Caracterização da UGRHI Alto Tietê

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI ALTO TIETÊ (06)			
População	21.067.299 hab. (99,1% urbana)	Área de drenagem	5.868 km²
Disponibilidade hídrica superficial	Vazão média: 84 m³/s	Vazão mínima (Q7,10): 20 m³/s	Vazão Q95%: 31 m³/s
Aquíferos livres:	Pré-cambriano e São Paulo.		
Principais rios:	Tietê, Pinheiros, Tamanduatei, Claro, Paraitinga, Jundiaí, Biritiba-Mirim, Taiaçupeba, Guaió, Baquirivú Guaçu, Cabuçu de Cima, Cabuçu de Baixo, Juqueri, Itaquera, Jucu, Aricanduva, Meninos, Couros e Pirajusara.		
Municípios	Arujá, Biritiba-Mirim, Barueri, Cajamar, Caieiras, Carapicuíba, Cotia, Diadema, Embu, Embu-Guaçu, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guarulhos, Itapeçerica da Serra, Itapevi, Itaquaquecetuba, Jandira, Juquitiba*, Mairiporã, Mauá, Mogi das Cruzes, Osasco, Pirapora do Bom Jesus, Poá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Salesópolis, Santana de Parnaíba, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, São Lourenço da Serra*, São Paulo, Suzano, Taboão da Serra.		
Principais atividades econômicas	Maior polo econômico do país, centralizando a sede dos mais importantes complexos industriais, comerciais e financeiros do País. Abriga uma série de serviços sofisticados, definidos pela interdependência dos setores, que se integram e se complementam. O setor de serviços é o mais expressivo e mostra uma grande complementaridade com a indústria. Ressalta-se ainda o setor de transporte, de serviços técnicos às empresas, de saúde e de telecomunicações.		
Principais usos dos recursos hídricos	Abastecimento público (cerca de 83% das vazões outorgadas)		
Vegetação remanescente	Apresenta 1.773 km² de vegetação natural remanescente, que ocupa aproximadamente 30% da área da UGRHI. A categoria de maior ocorrência é a Floresta Ombrófila Densa.		
* Inserido parcialmente.			

Fonte: São Paulo, 2021; CBH-AT, 2022. Organizado pelo autor.

3.2.2 UGRHI 05 – Piracicaba/Capivari/Jundiaí

As características gerais da UGRHI Piracicaba/Capivari/Jundiaí (UGRHI 05) foram apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Caracterização da UGRHI Piracicaba/Capivari/Jundiaí

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI PICARICABA/CAPIVARI/JUNDIAÍ (05)			
População	5.743.939 hab. (97% urbana)	Área de drenagem	14.358 km²
Disponibilidade hídrica superficial	Vazão média: 172 m³/s	Vazão mínima (Q7,10): 43 m³/s	Vazão Q95%: 65 m³/s
Aquíferos livres:	Guarani, Pré-cambriano, Serra Geral e Tubarão.		
Principais rios:	Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Capivari, Corumbataí, Jaguari, Jundiaí e Piracicaba.		
Municípios	Águas de São Pedro, Americana, Amparo*, Analândia*, Artur Nogueira, Atibaia, Bom Jesus dos Perdões, Bragança Paulista, Cabreúva, Camanducaia, Campinas, Campo Limpo Paulista, Capivari, Charqueada, Cordeirópolis, Corumbataí*, Cosmópolis, Dois Córregos*, Elias Fausto*, Extrema, Holambra, Hortolândia, Ipeúna, Iracemápolis, Itapeva, Itatiba, Itirapina, Itu*, Itupeva, Jaguariúna, Jarinu, Joanópolis, Jundiaí*, Limeira, Louveira, Mairiporã*, Mogi-Mirim*, Mombuca, Monte Alegre do Sul, Monte Mor, Morungaba, Nazaré Paulista*, Nova Odessa, Paulínia, Pedra Bela, Pedreira, Pinhalzinho, Piracaia, Piracicaba*, Rafard*, Rio Claro*, Rio das Pedras*, Saltinho*, Salto*, São Pedro, Santa Bárbara D'Oeste, Santa Gertrudes, Santa Maria da Serra, Santo Antonio de Posse, São Pedro*, Socorro, Sumaré, Toledo, Torrinha*, Tuiuti, Valinhos, Vargem, Várzea Paulista, Vinhedo.		
Principais atividades econômicas	As principais atividades econômicas são a agropecuária e a produção industrial. Destacam-se em Paulínia, o polo petroquímico composto pela Refinaria do Planalto; em Americana, Nova Odessa e Santa Bárbara d'Oeste, o parque têxtil; em Campinas e Hortolândia, o polo de alta tecnologia; em Piracicaba, indústrias sucroalcooleiras e do setor metal-mecânico; em Jundiaí, parque industrial com mais de 500 empresas atuando em variados setores; em Limeira, produção de folheado; em Rio Claro, indústrias sucroalcooleiras; em Santa Gertrudes e Cordeirópolis, polo cerâmico nacional.		
Principais usos dos recursos hídricos	Abastecimento público (cerca de 68% das vazões outorgadas) e uso industrial (18%).		
Vegetação remanescente	Apresenta 2.954 km² de vegetação natural remanescente que ocupa, aproximadamente, 20,6% da área da UGRHI. As categorias de maior ocorrência são a Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Estacional Semidecidual.		
* Inserido parcialmente.			

Fonte: São Paulo, 2021; CBH-PCJ, 2022. Organizado pelo autor.

3.2.3 UGRHI 10 – Sorocaba/Médio Tietê

As características gerais da UGRHI Sorocaba/Médio Tietê (UGRHI 10) foram apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Caracterização da UGRHI Sorocaba/Médio Tietê

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI SOROCABA/MÉDIO TIETÊ (10)			
População	2.081.983 hab. (90,05% urbana)	Área de drenagem	11.829 km²
Disponibilidade hídrica superficial	Vazão média: 107 m³/s	Vazão mínima (Q7,10): 22 m³/s	Vazão Q95%: 39 m³/s
Aquíferos livres:	Guarani, Pré-cambriano, Serra Geral e Tubarão.		
Principais rios:	Sorocaba, Tietê, Sorocabuçu, Sorocamirim, Pirajibu, Jundiuvira, Murundu, Sarapuí, Tatuí, Guarapó, Macacos, Ribeirão do Peixe, Alambari, Capivara e Araqua.		
Municípios	Alambari, Alumínio, Anhembi*, Araçariguama, Araçoiaba da Serra, Barra Bonita*, Bofete*, Boituva, Botucatu*, Cabreúva*, Capela do Alto, Cerquilha, Cesário Lange, Conchas, Cotia*, Dois Córregos*, Elias Fausto*, Guareí*, Ibiúna*, Igarapu do Tietê*, Indaiatuba*, Iperó, Itapetininga*, Itapevi*, Itu*, Jumirim, Laranjal Paulista, Mairinque, Mineiros do Tietê*, Pereiras, Piedade*, Pilar do Sul*, Piracicaba*, Pirapora do Bom Jesus*, Porangaba, Porto Feliz, Quadra, Rafard*, Rio das Pedras*, Saltinho*, Salto*, Salto de Pirapora, Santana de Parnaíba*, São Manuel*, São Roque*, Sarapuí*, Sorocaba, Tatuí Tietê*, Torre de Pedra, Vargem Grande Paulista* e Votorantim.		
Principais atividades econômicas	Na UGRHI 10 predominam as atividades industriais na região da metrópole, com parque industrial variado, espalhado por vários municípios, contemplando a produção de componentes para telecomunicações e informática, montadoras de veículos automotivos, refinarias de petróleo, fábricas de celulose e papel, indústrias alimentícias e sucroalcooleiras, complexos industriais de base mineral ligados à produção de alumínio, de cimento etc. No setor primário destacam-se o cultivo da cana de açúcar e do citrus, além da pecuária.		
Principais usos dos recursos hídricos	É a sub-bacia com usos mais bem distribuídos, tendo vazões semelhantes para uso rural (cerca de 31% das vazões outorgadas), abastecimento público (29%) e uso industrial (25%). Soluções alternativas e outros usos ficam logo atrás, representando 15% das vazões outorgadas.		
Vegetação remanescente	Apresenta 2.104 km² de cobertura vegetal nativa que ocupa, aproximadamente, 17,5% da área da UGRHI. As categorias de maior ocorrência são a Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Estacional Semidecidual.		
* Inserido parcialmente.			

Fonte: São Paulo, 2021; CBH-SMT, 2022. Organizado pelo autor.

3.2.4 UGRHI 13 – Tietê/Jacaré

As características gerais da UGRHI Tietê/Jacaré (UGRHI 13) foram apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Caracterização da UGRHI Tietê/Jacaré

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI TIETÊ/JACARÉ (13)			
População	1.599.355 hab. (96,5% urbana)	Área de drenagem	11.749 km²
Disponibilidade hídrica superficial	Vazão média: 97 m³/s	Vazão mínima (Q7,10): 40 m³/s	Vazão Q95%: 50 m³/s
Aquíferos livres:	Guarani, Bauru e Serra Geral.		
Principais rios:	Tietê, Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira		
Municípios	Agudos*, Analândia*, Araraquara, Arealva, Areiópolis, Bariri*, Barra Bonita*, Bauru, Boa Esperança do Sul, Bocaina, Boracéia*, Borebi, Brotas*, Dois Córregos, Dourado, Gavião Peixoto, Jacanga*, Ibaté*, Ibitinga*, Igaraçu do Tietê, Itajú, Itapuí, Itirapina, Jaú*, Lençóis Paulista, Macatuba*, Matão, Mineiros do Tietê, Nova Europa, Pederneiras*, Ribeirão Bonito*, São Carlos*, São Manuel*, São Pedro, Tabatinga*, Torrinha* e Trabijú.		
Principais atividades econômicas	As principais atividades econômicas estão ligadas principalmente à agroindústria (açúcar, álcool e processamento de cítricos). Nos maiores municípios como Bauru, São Carlos, Araraquara e Jaú outros setores da indústria como papel, bebidas, calçados e metal mecânica também se destacam.		
Principais usos dos recursos hídricos	Uso rural (cerca de 37% das vazões outorgadas) e uso industrial (34%).		
Vegetação remanescente	Apresenta 1.106 km² de vegetação natural remanescente que ocupa, aproximadamente, 9% da área da UGRHI. As categorias de maior ocorrência são a Floresta Estacional Semidecidual e a Savana.		
* Inserido parcialmente.			

Fonte: São Paulo, 2021; CBH-TJ, 2021. Organizado pelo autor.

3.2.5 UGRHI 16 – Tietê/Batalha

As características gerais da UGRHI Tietê/Batalha (UGRHI 16) foram apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Caracterização da UGRHI Tietê/Batalha

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI TIETÊ/BATALHA (16)			
População	537.122 hab. (93,3% urbana)	Área de drenagem	13.149 km²
Disponibilidade hídrica superficial	Vazão média: 98 m³/s	Vazão mínima (Q7,10): 31 m³/s	Vazão Q95%: 40 m³/s
Aquíferos livres:	Bauru e Serra Geral.		
Principais rios:	Tietê, Dourado, São Lourenço, Batalha e Ribeirão dos Porcos.		
Municípios	Adolfo, Agudos*, Avaí, Bady Bassitt, Balbinos, Bauru*, Borborema, Cafelândia*, Cândido Rodrigues*, Catanduva*, Cedral*, Dobrada*, Duarte*, Elisiário, Fernando Prestes*, Gália*, Guaíçara*, Guarantã*, Jacanga*, Ibirá, Ibitinga*, Irapuã, Itajobi, Itápolis, Jaci, José Bonifácio*, Lins*, Marapoama, Matão, Mendonça, Mirassol*, Neves Paulista*, Nova Aliança, Novo Horizonte, Pindorama*, Pirajuí*, Piratininga*, Pongaí, Potirendaba, Presidente Alves*, Promissão*, Reginópolis, Sabino, Sales, Santa Adélia*, Santa Ernestina*, Tabatinga*, Taquaritinga*, Ubarana*, Uru, Urupês.		
Principais atividades econômicas	Entre as principais atividades econômicas estão a agricultura e a pecuária, destacando-se as culturas de cana-de-açúcar e laranja; e as atividades industriais nas áreas de mecânica e de alimentos, predominando a sucroalcooleira. A UHE Mário Lopes Leão, no município de Promissão, contribui para o desenvolvimento de toda a região, pois ao longo da área de inundação é possível observar o crescimento de atividades de recreação e lazer, o que demonstra o potencial turístico da região.		
Principais usos dos recursos hídricos	Uso rural (cerca de 72% das vazões outorgadas).		
Vegetação remanescente	Apresenta 893 km² de vegetação natural remanescente que ocupa, aproximadamente, 6,5% da área da UGRHI. As principais formações são a Floresta Estacional Semidecidual e a Savana.		
* Inserido parcialmente.			

Fonte: São Paulo, 2021; CBH-TB, 2021. Organizado pelo autor.

3.2.6 UGRHI 19 – Baixo Tietê

As características gerais da UGRHI Baixo Tietê (UGRHI 19) foram apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 – Caracterização da UGRHI Baixo Tietê

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI BAIXO TIETÊ (19)			
População	803.312 hab. (92,9% urbana)	Área de drenagem	15.588 km²
Disponibilidade hídrica superficial	Vazão média: 113 m³/s	Vazão mínima (Q7,10): 27 m³/s	Vazão Q95%: 36 m³/s
Aquíferos livres:	Bauru e Serra Geral.		
Principais rios:	Tietê, Paraná, Água Fria, Rio das Oficinas, Ribeirão Santa Bárbara, Ribeirão dos Ferreiros, Ribeirão Mato Grosso, Rio dos Patos, Ribeirão Lajeado, Córrego dos Baixotes e Ribeirão Baguaçu.		
Municípios	Alto Alegre*, Andradina, Araçatuba*, Avanhandava, Barbosa, Bento de Abreu*, Bilac*, Birigui, Braúna*, Brejo Alegre, Buritama, Castilho*, Coroados, Gastão Vidigal, Glicério, Guaraçaí*, Guararapes*, Itapura, José Bonifácio, Lavínia*, Lourdes, Macaubal, Magda*, Mirandópolis*, Monções, Murutinga do Sul*, Nipoã, Nova Castilho, Nova Luzitânia, Penápolis, Pereira Barreto*, Planalto, Poloni*, Promissão*, Rubiácea*, Santo Antônio do Aracanguá, Sud Mennucci*, Turiúba, Ubarana*, União Paulista, Valparaíso* e Zacarias.		
Principais atividades econômicas	A base da economia regional é a agropecuária. Já foi considerado o principal centro estadual de comercialização de bovinos (Araçatuba), e atualmente, vem se configurando como fronteira de expansão do cultivo de cana de açúcar no Estado (álcool hidratado para fins carburantes). A agroindústria é o segmento mais representativo da atividade industrial, destacando-se as indústrias sucroalcooleiras, frigoríficas, calçadista, de massas, de polpas de frutas, de processamento de leite em pó, de curtimento de couro, de desidratação de ovos, entre outras, concentradas, particularmente, em Araçatuba, Birigui, Penápolis e Andradina.		
Principais usos dos recursos hídricos	Uso rural (cerca de 59% das vazões outorgadas).		
Vegetação remanescente	Apresenta 874 km² de vegetação natural remanescente que ocupa, aproximadamente, 5,7% da área da UGRHI. As principais formações são a Floresta Estacional Semidecidual e a Formação Arbórea/ Arbustiva em regiões de várzea.		
* Inserido parcialmente.			

Fonte: São Paulo, 2021; CBH-BT, 2021. Organizado pelo autor.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção dos dados pluviométricos

Primeiramente, foi definida uma área de interesse a partir do shapefile da bacia hidrográfica do rio Tietê, disponibilizado pela ANA (2015a). Em seguida, foi aplicada a ferramenta buffer com o software ARCGIS, a qual cria áreas a partir de pontos, linhas ou polígonos a partir de distâncias definidas (ESRI, 2013). Para este trabalho, empregou-se um buffer de 50 km ao redor da bacia em questão, obtendo-se uma nova área de interesse.

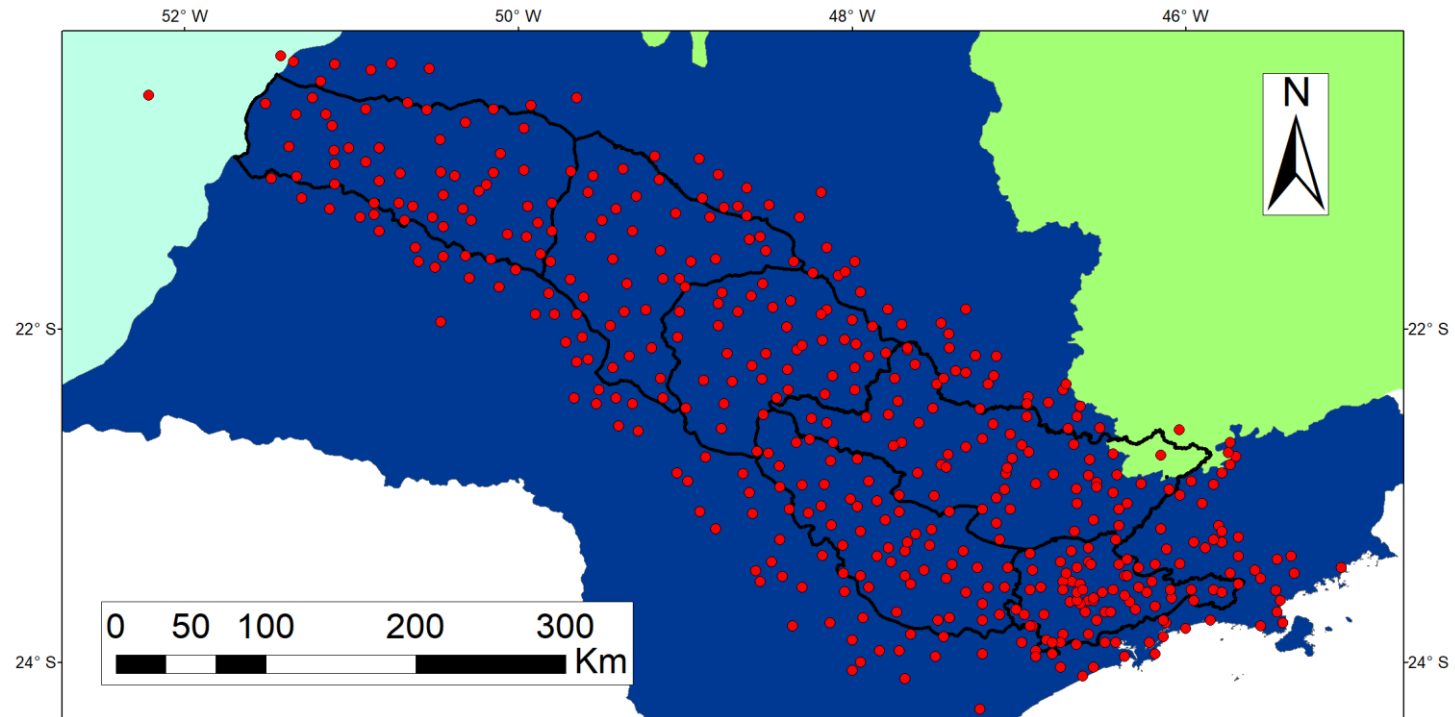
Esse procedimento é importante pois na coleta dos dados os postos pluviométricos ao longo de toda a área de interesse, os postos fora da bacia podem servir como pontos de referências (“âncoras”) durante a modelagem geoestatística. Isso garante que toda a bacia será abrangida pela krigagem, além de ampliar a quantidade de dados, o que diminui os erros da estimativa.

Todos os postos pluviométricos dos municípios inseridos na área de interesse foram coletados para análise. Os postos que não apresentaram nenhum dado entre os anos de 1988 e 2017 foram descartados. Ao final, foram selecionadas 560 estações para o banco de dados do presente estudo.

Os dados de chuvas foram obtidos por meio do banco de dados hidrológicos do DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, onde é permitido consultar e baixar os dados de postos fluviométricos e pluviométricos ao longo de todo o estado de São Paulo (DAEE, 2022). Também foram obtidos alguns pontos de referência em estados adjacentes à São Paulo, como Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Estes dados foram obtidos por meio da ferramenta Hidroweb v.3.2.7 (ANA, 2022). O único posto coletado fora de um município da área de interesse foi o posto localizado no estado do Mato Grosso do Sul mais a oeste, visando garantir um ponto de referência mais a oeste da bacia.

A Figura 20 ilustra os 560 postos pluviométricos obtidos e empregados para o presente estudo.

Figura 20 – Postos pluviométricos utilizados no estudo



Legenda

• 560 Postos Pluviométricos selecionados

Sub-bacias do rio Tietê

Estados

Mato Grosso do Sul

Minas Gerais

São Paulo

POSTOS PLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS NO ESTUDO
DATUM SIRGAS 2000
Coordenadas Geográficas
Fonte: DAEE (2023) e ANA (2022)
Elaborado por: TERCINI, O. T. (2023)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2 Análise estatística descritiva

Este procedimento visa organizar e descrever a amostragem por meio de representações numéricas, tendo como resultado as características do comportamento dos dados utilizados (Naguettini; Pinto, 2007; Serra, 2013). Assim, foram realizadas as análises estatísticas descritivas para cada ano no intervalo entre 1988 e 2017.

Os parâmetros calculados nesse processo foram a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose.

4.3 Aplicação da geoestatística

Os dados pluviométricos, separados anualmente, foram inseridos no programa GeoStatistics for the Environmental Sciences – Gamma Design (GS+) versão 7.0. (ROBERTSON, 2004). O software permite analisar a dependência espacial das amostragens e aplicar a técnica de interpolação e mapeamento por Krigagem.

Para o cálculo do semivariograma experimental, foi aplicada a Equação 1 aos dados de cada ano estudado.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

onde, $N(h)$ refere-se ao número de pares experimentais de observação $Z(X_i)$ e $Z(X_i + h)$ distantes entre si a uma medida regular h .

As equações dos modelos matemáticos mais empregados nos ajustes semivariográficos são apresentados a seguir nas Equações 2, 3 e 4.

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{a} \right) \right] \right\}; h > 0 \quad (2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 \leq h \leq A_0 \quad \text{então} \quad \hat{\gamma}(h) = C_0 + C; h \geq a \quad (3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h^2}{a} \right) \right] \right\}; 0 < h < d \quad (4)$$

sendo a Equação 2 referente ao modelo exponencial, a Equação 3 ao modelo esférico e a Equação 4 ao modelo gaussiano.

Para determinação dos melhores ajustes dos semivariogramas, foram observados os valores mais pertinentes dos seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C + C_0$), alcance (a), coeficiente de determinação espacial (R^2), soma dos quadrados dos resíduos (SQR), avaliador da dependência espacial (ADE) e o coeficiente de correlação da validação cruzada (r).

O ADE é um parâmetro de acentuada importância, pois caso a dependência espacial seja nula, não é possível aplicar as ferramentas da geoestatística para analisar a amostragem. Segundo Robertson (2008), a Equação 5 representa a formulação do ADE.

$$ADE = \frac{C}{C_o + C} \quad (5)$$

onde, C refere-se à variância estrutural e C_o refere-se ao efeito pepita.

Esta grandeza pode ser classificada de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do Avaliador da Dependência Espacial - ADE

ADE	Amostragem
$\leq 25\%$	Fraca dependência
$> 25\% \text{ e } \leq 75\%$	Moderada
$> 75\%$	Forte dependência

Fonte: Zimback (2001).

Definido os melhores ajustes para cada ano, foi aplicada a krigagem ordinária, representada pela Equação 6, e obtido os mapas de chuvas anuais ao longo de toda a bacia do rio Tietê.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(X_i) \quad (6)$$

sendo z^* , o valor a ser estimado no ponto não amostrado x_0 ; N , o número de valores medidos $z(X_i)$ envolvidos na estimativa e λ_i os pesos associados a cada valor medido $z(X_i)$.

Após esta etapa, exportou-se os dados de chuvas no formato grade numérica, sendo estes dados importados no programa ArcMap versão 10.3 (ESRI, 2013) para devida análise e edição dos mapas finais

4.4 Índice de porcentagem normal (IPN)

O IPN foi calculado a partir a Equação 7 (Gois, 2005).

$$P = \left(\frac{Pr(atual)}{Pr(normal)} \times 100\% \right)$$

(7)

Onde, P é a porcentagem da precipitação normal, $Pr(atual)$ é a chuva média em um dado local ou estação (ou, para este estudo, um ano) e $Pr(normal)$ é a média pluviométrica de longo prazo do local considerado (ou, para este estudo, a média pluviométrica entre 1988 e 2017), sendo as duas últimas expressas em mm.

Para a obtenção do IPN deve-se ainda subtrair 100 do valor obtido de *P*. Assim, o parâmetro pode ser classificado conforme a Tabela 3. Os mapas de IPN foram obtidos a partir a ferramenta “raster calculator” do programa ArcMap versão 10.3, na qual é possível inserir e executar expressões algébricas, como a Equação 7 (ESRI, 2013).

Tabela 3 – Classificação do IPN

IPN (%)	Classificação
90 a 100	Umidade extrema
70 a 89,9	Umidade alta
50 a 69,9	Umidade moderada
30 a 49,9	Umidade baixa
10 a 29,9	Umidade inicial
-9,9 a 9,9	Normal
-29,9 a -10	Seca inicial
-49,9 a -30	Seca suave
-69,9 a -50	Seca moderada
-89,9 a -70	Seca severa
-100 a -90	Seca extrema

Fonte: Adaptado de Gois (2005).

4.5 Análise da influência dos eventos ENOS na bacia do rio tietê

Os mapas de chuvas e de IPN foram então comparados com as intensidades dos eventos ENOS entre os anos de 1988 e 2017, com o objetivo de averiguar relações entre estes eventos e as chuvas e períodos secos/úmidos. A Tabela 4 apresenta os eventos que ocorreram no intervalo estudado. Os períodos não apresentados são neutros, ou seja, sem influência do El Niño ou La Niña.

Tabela 4 – Períodos de eventos ENOS e sua respectiva intensidade

PERÍODO	Evento - Intensidade
1987-88	El Niño - Forte
1988-89	La Niña - Forte
1991-92	El Niño - Forte
1994-95	El Niño - Moderado
1995-96	La Niña - Moderado
1997-98	El Niño – Muito Forte
1998-99	La Niña - Forte
1999-2000	La Niña - Forte
2000-01	La Niña - Fraca
2002-03	El Niño – Moderado
2004-05	El Niño - Fraco
2005-06	La Niña – Fraca
2006-07	El Niño – Fraco
2007-08	La Niña – Forte
2008-09	La Niña – Fraca
2009-10	El Niño - Moderado
2010-11	La Niña - Forte
2011-12	La Niña – Moderada
2014-15	El Niño - Fraco
2015-16	El Niño – Muito Forte
2016-17	La Niña – Fraca
2017-18	La Niña - Fraca

Fonte: Adaptado de Null (2022).

4.6 Proposta de índice de risco a secas - IRS

Os eventos de seca, ao longo da bacia hidrográfica, podem gerar diversas consequências nos principais usos d'água, como o setor agrícola, o abastecimento hídrico (urbano, rural e industrial), setor hidrelétrico e setor hidroviário.

Foi proposto um índice para mensurar o risco hídrico a secas entre sub-bacias, o qual aborda a probabilidade de ocorrência de secas e as consequências negativas geradas por elas. O índice foi baseado no ISH, no FMEA, que integra a probabilidade de ocorrer o evento e a severidade das consequências causadas (dano potencial causado pela seca) e na análise de risco a secas elaborado por Mendes (2008).

A probabilidade está diretamente ligada a Seca Acumulada, sendo que quanto maior a seca acumulada nos anos analisados neste trabalho, maior é a probabilidade de ocorrer seca. As consequências estão ligadas ao Abastecimento Hídrico (A_H): Humano, Industrial e Rural, Uso Agrícola (U_A), Geração Hidroelétrica (G_H) e Malha Hidroviária (M_H), que são setores extremamente afetados pelas secas, principalmente no sudeste brasileiro, conforme Marengo et al. (2015) e Tundisi e Tundisi (2015).

Destaca-se que todos estes setores foram integrados na análise de risco proposta por Mendes (2008).

A probabilidade do evento ocorrer e suas consequências são correlacionados a partir de uma matriz, onde o cruzamento destes identifica o risco. A matriz, ilustrada pela Figura 21, foi elaborada baseando-se na matriz de risco FMEA adaptada por Fernandes (2020), que adaptou a matriz para riscos hídricos e geotécnicos em barragens. Baixas probabilidades com baixo dano potencial geram um risco mínimo à bacia analisada e, conforme a probabilidade e/ou o dano potencial aumentam, o risco aumenta gradativamente, podem chegar ao risco máximo. É possível observar que apenas uma bacia com dano potencial máximo pode indicar o risco máximo, assim como na matriz de Fernandes (2020), evidenciando que, nesta análise de risco a secas, o dano potencial associado (DPA) tem um peso maior do a probabilidade. Ou seja, por mais alta que seja a probabilidade de ocorrer a seca, se ela não estiver associada a um alto dano potencial, o risco será mitigado.

Figura 21 – Matriz de Risco para obtenção do IRS

Potencial de ocorrer Seca (Perigo)	Matriz de Risco à Secas					Legenda
	Máxima					
	Alta					
	Média					
	Baixa					
	Mínima					
	Mínimo	Baixo	Médio	Alto	Máximo	
	Dano Potencial Associado à Secas (Vulnerabilidade e Exposição)					

Fonte: Adaptado de Fernandes (2020) – Editado pelo autor.

4.6.1 Probabilidade de ocorrer Secas (Perigo)

Segundo Mendes (2008), a probabilidade está diretamente ligada a possibilidade de ocorrer seca na região, e, no presente estudo, a probabilidade foi conectada com a seca acumulada, a qual foi quantificada a partir dos dados espaciais anuais de IPN obtidos ao longo do trabalho. Ela foi calculada pela soma das porcentagens da área da sub-bacia com IPN relativos à seca (entre -10 e -100).

4.6.2 Dano Potencial Associado (DPA) à Secas (Vulnerabilidade e Exposição)

Este fator está ligado ao Abastecimento Hídrico (A_H), Uso Agrícola (U_A), Geração Hidroelétrica (G_H) e Malha Hidroviária (M_H).

O abastecimento hídrico abrange diversas áreas importantes socioeconomicamente, como o abastecimento público, industrial e rural. Conforme Mendes (2008), secas sempre causam danos no abastecimento hídrico. Ele foi quantificado a partir das vazões outorgadas por finalidade de uso em cada sub-bacia, conforme o SIGRH (2023), sendo somada as vazões outorgadas para abastecimento público, uso industrial e uso rural. A proposta de classificação de dano potencial associado foi apresentada na Tabela 5. O valor máximo (100 m³/s) foi definido a partir da sub-bacia com maior vazão (Piracicaba/Capivari/Jundiaí-05 com 93,88 m³/s).

Tabela 5 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente ao Abastecimento Hídrico na BHRT

Vazão outorgada somada: abastecimento público, industrial e rural (m³/s)	Dano Potencial Associado
80-100	Máximo (1)
60-80	Alto (2)
40-60	Médio (3)
20-40	Baixo (4)
0-20	Mínimo (5)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O uso agrícola foi determinado a partir da porcentagem de área da sub-bacia destinada a agricultura, conforme MapBiomas (2021). Este fator é extremamente afetado pelas secas e aumentam os impactos na região, aumentando os preços de produtos agrícolas (Mendes, 2008). A proposta de classificação de dano potencial associado foi apresentada na Tabela 6. Os intervalos foram definidos a partir da distribuição de áreas destinadas a agricultura observada nas sub-bacias avaliadas, as quais variam entre 24,76% e 74,52%.

Tabela 6 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente ao uso Agrícola na BHRT

Área destinada a agricultura (%)	Dano Potencial Associado
> 70,0	Máximo (1)
57,5-70,0	Alto (2)
45,0-57,5	Médio (3)
32,5-45,0	Baixo (4)
< 32,5	Mínimo (5)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A geração hidroelétrica foi determinada a partir da soma do potencial de geração em cada sub-bacia, conforme a ANEEL (2023). Segundo Mendes (2008), um dos impactos das secas é a diminuição de produção de energia hidrelétrica. A proposta de dano potencial associado foi apresentada na Tabela 7. Os intervalos foram definidos a partir dos potenciais de geração de energia hidrelétrica observada nas sub-bacias avaliadas, as quais variam entre 48 MW e 1155 MW.

Tabela 7 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente à Geração Hidroelétrica na BHRT

Potencial de Geração de Energia Hidroelétrica (MW)	Dano Potencial Associado
> 1000	Máximo (1)
600-800	Alto (2)
400-600	Médio (3)
200-400	Baixo (4)
0-200	Mínimo (5)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A malha hidroviária foi inicialmente proposta a partir da carga transportada em cada sub-bacia. Entretanto, conforme ANTAQ (2022), ANTAQ (2023) e São Paulo (2023), não há uma diferença significativa das cargas transportadas entre os trechos da hidrovia do rio Tietê. Sendo assim, o fator foi atrelado à extensão do trecho navegável em cada sub-bacia. Assim como os demais fatores, a navegabilidade também é um fator impactado pelas secas (Mendes, 2008). A proposta de classificação de dano potencial associado foi apresentada na Tabela 8. Os intervalos foram definidos a partir das malhas hidroviárias observada nas sub-bacias avaliadas, as quais variam entre 0 e 245 km.

Tabela 8 – Proposta de classificação do dano potencial associado referente à Malha Hidroviária na BHRT

Extensão do trecho navegável (km)	Dano Potencial Associado
> 200	Máximo (1)
160-200	Alto (2)
120-160	Médio (3)
80-120	Baixo (4)
< 80	Mínimo (5)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Logo, cada um dos parâmetros acima deve ser classificados e obtido um valor de dano potencial associado (1 a 5). Posteriormente deve-se aplicar a Equação 8 para a obtenção do Dano Potencial a Secas e classificá-lo a partir da Tabela 9.

$$DPA = \left(\frac{A_H + U_A + G_H + M_H}{4} \right) \quad (8)$$

Onde, DPA é o Dano Potencial Associado à Secas, A_H é o Abastecimento Hídrico, U_A é o Uso Rural, G_H é a Geração Hidroelétrica, M_H é a Malha Hidroviária.

Tabela 9 – Proposta de classificação do dano potencial associado à Secas

Dano Potencial Associado à Secas
Máximo (1,00-1,49)
Alto (1,50-2,49)
Médio (2,50-3,49)
Baixo (3,50-4,49)
Mínimo (4,50-5,00)

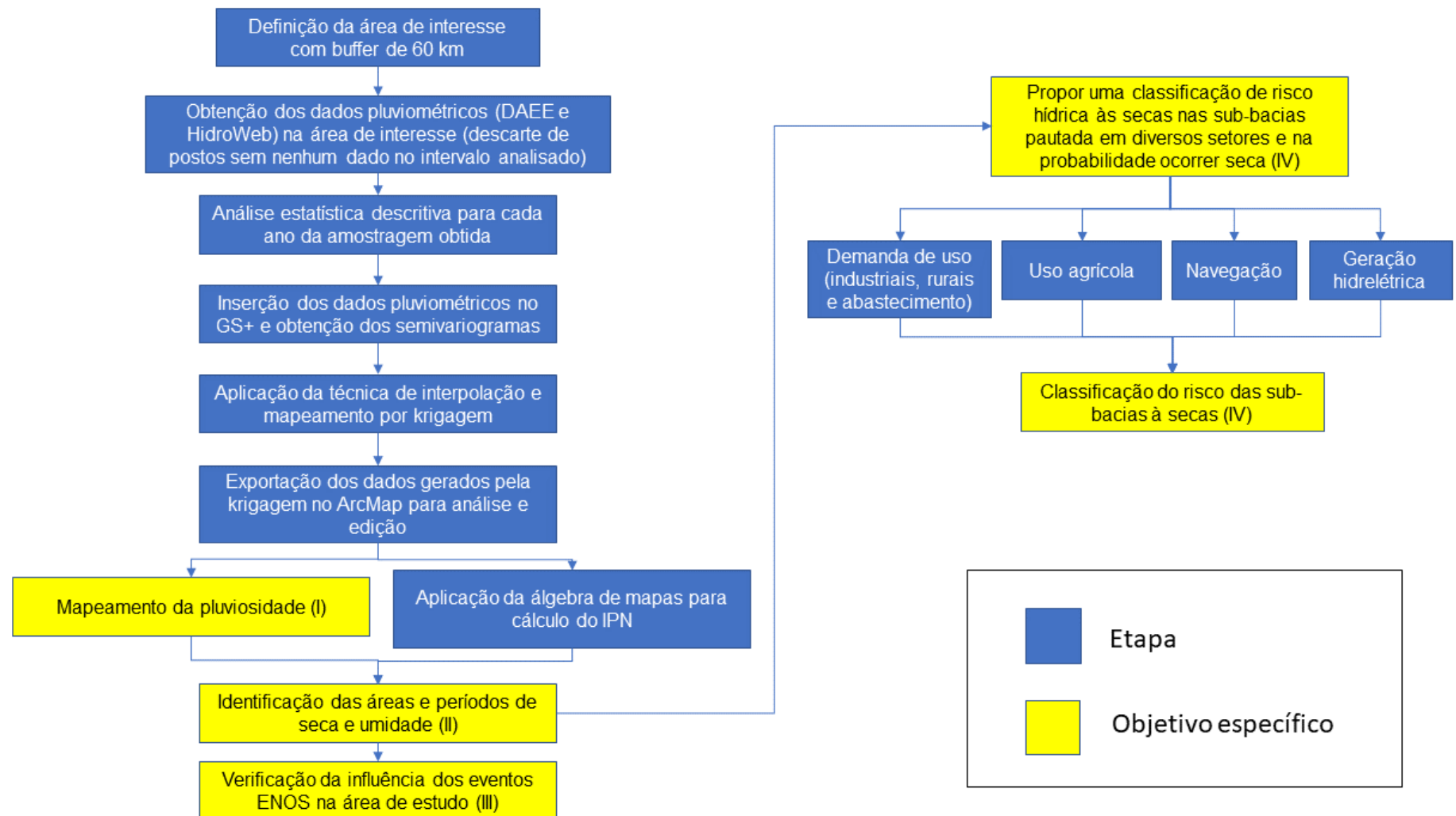
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com o dano potencial e probabilidade de ocorrer secas classificadas, os resultados são organizados na matriz exposta pela Figura 21 e definido o risco para cada região examinada. Ao final, foi elaborado um mapa ilustrando as sub-bacias e suas respectivas classificações referente ao risco a secas.

4.7 Fluxograma dos procedimentos

A Figura 22 resume todos os métodos e materiais utilizados no decorrer deste trabalho, com a finalidade de apresentar os procedimentos de forma concisa e cronológica.

Figura 22 – Fluxograma dos procedimentos realizados ao longo do trabalho



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à análise estatística descritiva para os dados pluviométricos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise estatística descritiva das precipitações anuais nos postos coletados (1988-2017)

Medidas da Estatística Descritiva das chuvas totais anuais								
Ano ^(a)	Média (mm)	Mediana (mm)	Valor (mm)		Desvio Padrão	Coeficiente		
			Min.	Max.		Variação (%)	Curtose	Assimetria
1988 ⁽⁴⁵⁰⁾	1483,78	1371	816	5013	457,64	30,84	17,14	3,42
1989 ⁽⁴⁴⁸⁾	1583,19	1536	764	3491	328,10	20,72	18,77	3,28
1990 ⁽⁴⁴⁸⁾	1383,90	1351	714	3026	297,53	21,50	16,08	2,98
1991 ⁽⁴²⁷⁾	1613,81	1597	947	2632	329,77	20,43	4,71	1,40
1992 ⁽⁴⁴⁰⁾	1416,39	1364	761	3772	366,89	25,90	23,78	3,92
1993 ⁽⁴³²⁾	1472,18	1439	340	4058	369,79	25,12	21,71	3,49
1994 ⁽³⁹⁹⁾	1287,74	1212	150	4230	404,42	31,41	21,85	3,80
1995 ⁽³⁸⁷⁾	1648,82	1576	294	4431	466,46	28,29	13,57	2,97
1996 ⁽³⁷⁴⁾	1549,32	1460	525	4154	501,36	32,36	9,31	2,42
1997 ⁽³⁵⁹⁾	1511,25	1476	689	3904	307,88	20,37	29,56	3,63
1998 ⁽³⁷¹⁾	1514,33	1467	473	3730	363,43	24,00	18,04	3,21
1999 ⁽³⁵⁷⁾	1331,80	1278	637	3726	349,16	26,22	22,14	3,45
2000 ⁽²⁸⁴⁾	1456,03	1448	735	3076	318,39	21,87	12,76	2,22
2001 ⁽²⁵⁰⁾	1387,62	1364	672	2429	217,69	15,69	3,21	1,00
2002 ⁽²⁵²⁾	1321,90	1258	778	3523	356,97	27,00	26,65	4,08
2003 ⁽²³⁶⁾	1281,71	1251	641	3621	319,76	24,95	16,34	2,98
2004 ⁽²²⁸⁾	1444,00	1394	579	4142	379,17	26,26	16,27	3,13
2005 ⁽²²⁴⁾	1397,33	1301	819	4176	461,68	33,04	24,73	4,30
2006 ⁽²¹⁵⁾	1413,34	1349	912	3270	362,21	25,63	19,47	3,54
2007 ⁽²¹⁶⁾	1399,32	1355	426	3179	291,58	20,84	16,86	2,73
2008 ⁽²⁰⁸⁾	1374,02	1306	827	3181	352,78	25,67	20,26	3,45
2009 ⁽¹⁹⁷⁾	1833,66	1808	863	3934	392,45	21,40	18,30	2,96
2010 ⁽¹⁹⁸⁾	1446,49	1277	889	5260	605,41	41,85	21,47	3,89
2011 ⁽²⁰⁰⁾	1587,43	1517	889	3936	447,36	28,18	18,76	3,37
2012 ⁽²⁰⁰⁾	1525,85	1482	892	2777	354,41	23,23	8,96	2,29
2013 ⁽²⁰³⁾	1441,19	1348	519	4325	456,38	31,67	19,58	3,58
2014 ⁽²⁰⁸⁾	1088,84	1023	440	2483	316,17	29,04	8,77	2,39
2015 ⁽²⁰⁸⁾	1652,46	1578	974	4966	459,58	27,81	18,02	3,64
2016 ⁽¹⁴²⁾	1526,73	1518	1111	3061	270,45	17,71	10,34	2,16
2017 ⁽¹²⁶⁾	1555,53	1451	1038	4085	412,39	26,51	16,16	3,41

Fonte: Elaboração do próprio autor.

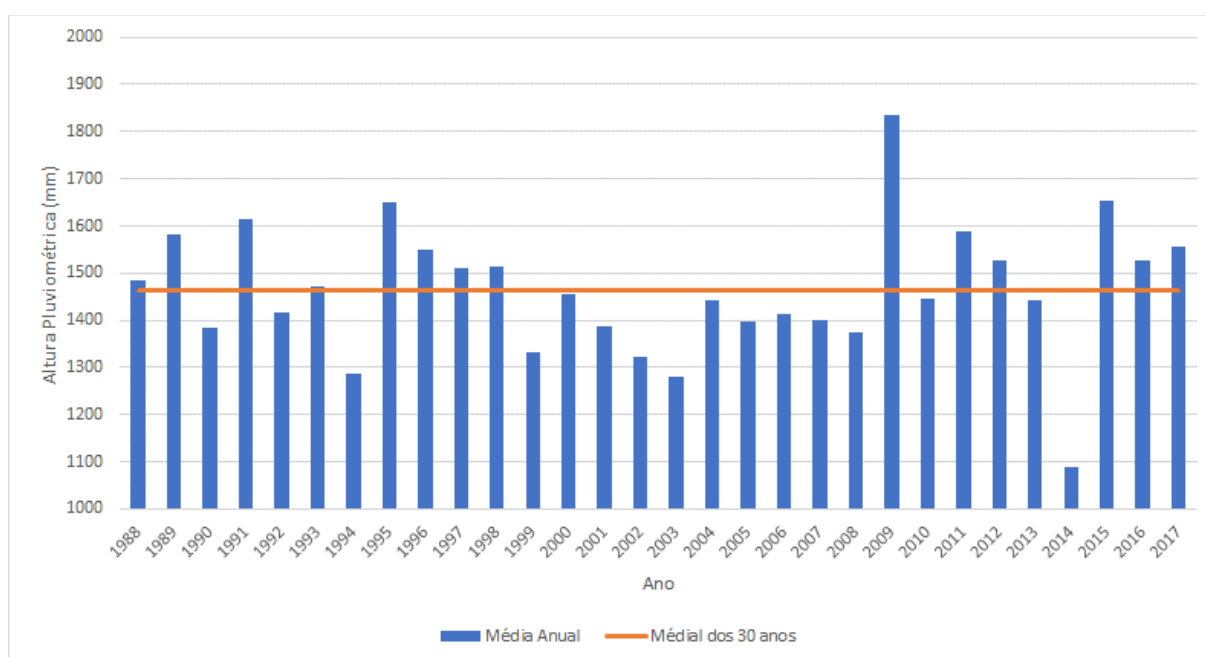
(a) = Número de amostras (postos pluviométricos); Mín. = mínimo; Máx. = Máximo.

Antes da análise estatística descritiva propriamente dita, é importante destacar que conforme os anos estudados se aproximam do presente, há uma diminuição de postos pluviométricos disponíveis para análise. Isto evidencia uma das maiores carências do Brasil que é o monitoramento hidrológico, seja de chuvas (postos

pluviométricos) ou de vazões (postos fluviométricos). A falta destes postos torna mais complicado a gestão das águas por não ter informações consistentes, visto que o país é extremamente dependente de obras hidráulicas em diversas áreas (geração de energia, agricultura, abastecimento humano, entre outros).

A média anual da amostragem (Tabela 10) variou entre 1088,84 mm (2014) e 1833,66 mm (2009), com uma média geral de 1464 mm. Este valor é considerado um pouco acima da média, pois, conforme Maia (2022), a média da BH do rio Tietê variou entre 1346 mm e 1422 mm entre os anos de 1981 e 2020. Destaca-se, ainda, que os dados na Tabela 10 são consistentes, visto que 2014 foi uma das piores secas hídricas do estado de São Paulo, enquanto 2009 foi um dos anos com maior altura pluviométrica registrada (Marengo et al., 2015; Carmello; Neto, 2015). A Figura 23 ilustra as médias anuais e média ao longo dos 30 anos obtidas.

Figura 23 – Médias pluviométricas anuais e média dos 30 anos estudados



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na tabela 10, os valores de CV situam-se entre 15,69 e 41,85%. De acordo com a classificação proposta por Pimental-Gomes e Garcia (2002), 2 anos (6,67%) apresentam variabilidade média dos dados, 22 anos (73,33%) variabilidade alta e 6 anos (20%) variabilidade muito alta. Isto evidencia que a aplicação de técnicas geoestatísticas com o objetivo de mapear e representar a variabilidade espaço-temporal das precipitações ao longo da área de estudo é extremamente importante.

Outro fator identificado através da análise estatística é a ocorrência de assimetria positiva para todos os anos analisados (Tabela 10), sendo recomendada a transformação dos dados da amostragem para a aplicação da ferramenta quando este fato ocorre (Lundgren; Silva; Ferreira, 2017). Porém, conforme Cressie (1991), tal resultado não é impeditivo ao uso das técnicas de geoestatística uma vez que a normalidade dos dados não restringe sua aplicação.

Isto posto, enquanto a estatística clássica necessita da normalidade e da independência espacial entre os dados, em contrapartida, a geoestatística requer apenas a correlação espacial dos mesmos (Grego; Oliveira; Vieira, 2014). Nesse contexto, o uso dos dados originais em estudos geoestatísticos vem sendo praticados sem prejuízo aos resultados (Frazier et al., 2016; Oliveira; Antônio, 2017; Lundgren et al., 2017; Lima et al., 2020; Moreira et al., 2020; Pirani; Modarres, 2020). Diante o exposto, considerando a não obrigatoriedade da transformação dos dados, a análise geoestatística foi realizada inicialmente com os dados originais.

5.1 Análise geoestatística e variabilidade espaço temporal das chuvas

Os resultados encontrados para a análise geoestatística dos dados de chuva estão expostos na Tabela 11. Nota-se que os dados originais apresentaram ajustes variográficos satisfatórios para todos os anos avaliados, atendendo a hipótese intrínseca mediante a estabilização dos variogramas e confirmando a alta dependência espacial dos atributos não sendo necessário conversões.

Os gráficos semivariogramas ajustados e das validações cruzadas podem ser observadas nos Apêndices A e B, respectivamente.

Tabela 11 - Modelos e parâmetros de ajuste dos semivariogramas experimentais das precipitações anuais nos postos coletados (1988-2017)

Ano(amostragem) ^(a)	Modelo ^(b)	Medidas de Ajuste dos Semivariogramas								
		C ₀	C ₀ +C	A (km)	R ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	Validação Cruzada		
							%	a	B	r
1988 ⁽⁴³⁴⁾	esf	1400	6,854x10 ⁴	56,8	0,92	5,55x10 ⁸	98,8	-0,62	1,00	0,737
1989 ⁽⁴³³⁾	exp	5200	6,090x10 ⁴	86,7	0,90	5,87x10 ⁸	91,5	22,45	0,98	0,514
1990 ⁽⁴³²⁾	esf	100	4,250x10 ⁴	43,6	0,84	4,37x10 ⁸	99,8	113,22	0,91	0,542
1991 ⁽⁴⁰⁹⁾	exp	10300	5,938x10 ⁴	112,5	0,97	1,25x10 ⁸	82,7	5,36	0,99	0,661
1992 ⁽⁴²¹⁾	esf	2500	5,475x10 ⁴	48,7	0,78	1,01x10 ⁹	95,4	188,80	0,86	0,459
1993 ⁽⁴¹¹⁾	exp	9100	4,261x10 ⁴	112,2	0,92	1,75x10 ⁸	78,6	14,15	0,99	0,512
1994 ⁽³⁷⁵⁾	exp	8100	4,871x10 ⁴	134,4	0,91	3,39x10 ⁸	83,4	42,73	0,96	0,512
1995 ⁽³⁶⁹⁾	exp	13400	7,232x10 ⁴	132,9	0,92	4,89x10 ⁸	81,5	-30,12	1,01	0,642
1996 ⁽³⁶⁵⁾	exp	18700	1,432x10 ⁵	134,4	0,95	1,18x10 ⁹	86,9	10,46	0,99	0,724
1997 ⁽³³⁷⁾	exp	2800	3,937x10 ⁴	59,7	0,76	4,67x10 ⁸	92,9	32,14	0,97	0,464
1998 ⁽³⁵⁸⁾	exp	100	9,340x10 ⁴	78,0	0,60	8,42x10 ⁸	99,9	52,49	0,96	0,495
1999 ⁽³⁴¹⁾	exp	600	5,399x10 ⁴	95,7	0,88	6,86x10 ⁸	98,9	46,82	0,96	0,510
2000 ⁽²⁷¹⁾	esf	14500	5,488x10 ⁴	116,7	0,68	2,14x10 ⁹	75,6	8166	0,94	0,438
2001 ⁽²³⁷⁾	exp	4160	2,802x10 ⁴	39,3	0,85	6,99x10 ⁷	85,2	-136,80	1,10	0,378
2002 ⁽²⁴²⁾	exp	4900	3,726x10 ⁴	86,1	0,89	1,84x10 ⁸	86,8	-10,52	1,00	0,576
2003 ⁽²²³⁾	gau	4100	4,554x10 ⁴	39,5	0,69	1,48x10 ⁹	91,0	127,57	0,90	0,524
2004 ⁽²¹⁸⁾	gau	3400	7,780x10 ⁴	39,1	0,67	4,34x10 ⁹	95,6	125,95	0,91	0,563
2005 ⁽²¹⁵⁾	gau	7100	7,458x10 ⁴	58,9	0,75	3,15x10 ⁹	90,5	168,17	0,87	0,612
2006 ⁽²⁰³⁾	exp	10400	6,616x10 ⁴	207,6	0,75	2,77x10 ⁹	84,3	-62,37	1,04	0,656
2007 ⁽²⁰⁴⁾	exp	3300	4,230x10 ⁴	68,4	0,73	5,52x10 ⁸	92,2	133,39	0,90	0,326
2008 ⁽¹⁹⁸⁾	exp	4200	5,725x10 ⁴	100,8	0,79	1,03x10 ⁹	92,7	82,53	0,94	0,454
2009 ⁽¹⁸⁷⁾	esf	8900	6,380x10 ⁴	76,0	0,65	2,52x10 ⁹	86,1	189,89	0,89	0,354
2010 ⁽¹⁹¹⁾	esf	13900	1,850x10 ⁵	178,8	0,90	7,91x10 ⁹	92,5	38,68	0,97	0,745
2011 ⁽¹⁸⁷⁾	esf	900	8,130x10 ⁴	71,2	0,63	4,68x10 ⁹	98,9	14,00	0,98	0,678
2012 ⁽¹⁸⁵⁾	esf	12500	5,355x10 ⁴	105,1	0,65	1,51x10 ⁹	76,7	-69,00	1,04	0,501
2013 ⁽¹⁹³⁾	gau	13300	8,690x10 ⁴	56,8	0,71	4,06x10 ⁹	84,7	166,85	0,88	0,528
2014 ⁽²⁰³⁾	exp	1100	8,300x10 ⁴	129,9	0,71	4,09x10 ⁹	98,7	-11,98	1,01	0,640
2015 ⁽¹⁹⁸⁾	esf	100	8,050x10 ⁴	54,6	0,46	7,25x10 ⁹	99,9	149,32	0,90	0,576
2016 ⁽¹³²⁾	exp	10	2,821x10 ⁴	51,6	0,78	7,35x10 ⁷	100,0	10,83	0,98	0,370
2017 ⁽¹¹⁷⁾	exp	3400	5,971x10 ⁴	169,8	0,66	2,17x10 ⁹	94,3	-64,33	1,04	0,581

Fonte: Elaboração do próprio autor.

(a) = todos os anos avaliados apresentaram no mínimo 30 pares no primeiro lag; (b) = modelos ajustados, onde: esf = esférico, exp = exponencial e gau = gaussiano; (c) = SQR = soma dos quadrados dos resíduos; (d) = ADE - avaliador da dependência espacial.

Os valores apresentados para o ADE, encontrados na Tabela 11, corroboram que a geoestatística tem alta eficácia em análises a amostragem deste estudo, uma vez que todos os anos estudados indicaram uma forte dependência espacial dos dados de chuva segundo classificação de Zimback (2001). O ajuste variográfico que melhor se adequou a amostragem foi o modelo exponencial (17 ajustes), seguido do esférico (9 ajustes) e gaussiano (4 ajustes).

Os ajustes semivariográficos apresentaram coeficientes de determinação espacial (R^2) com valores entre 0,63 e 0,97, alcances que variaram entre 39,1 km e 207,6 km, além do coeficiente de correlação (r) da validação cruzada variando de 0,32 a 0,74.

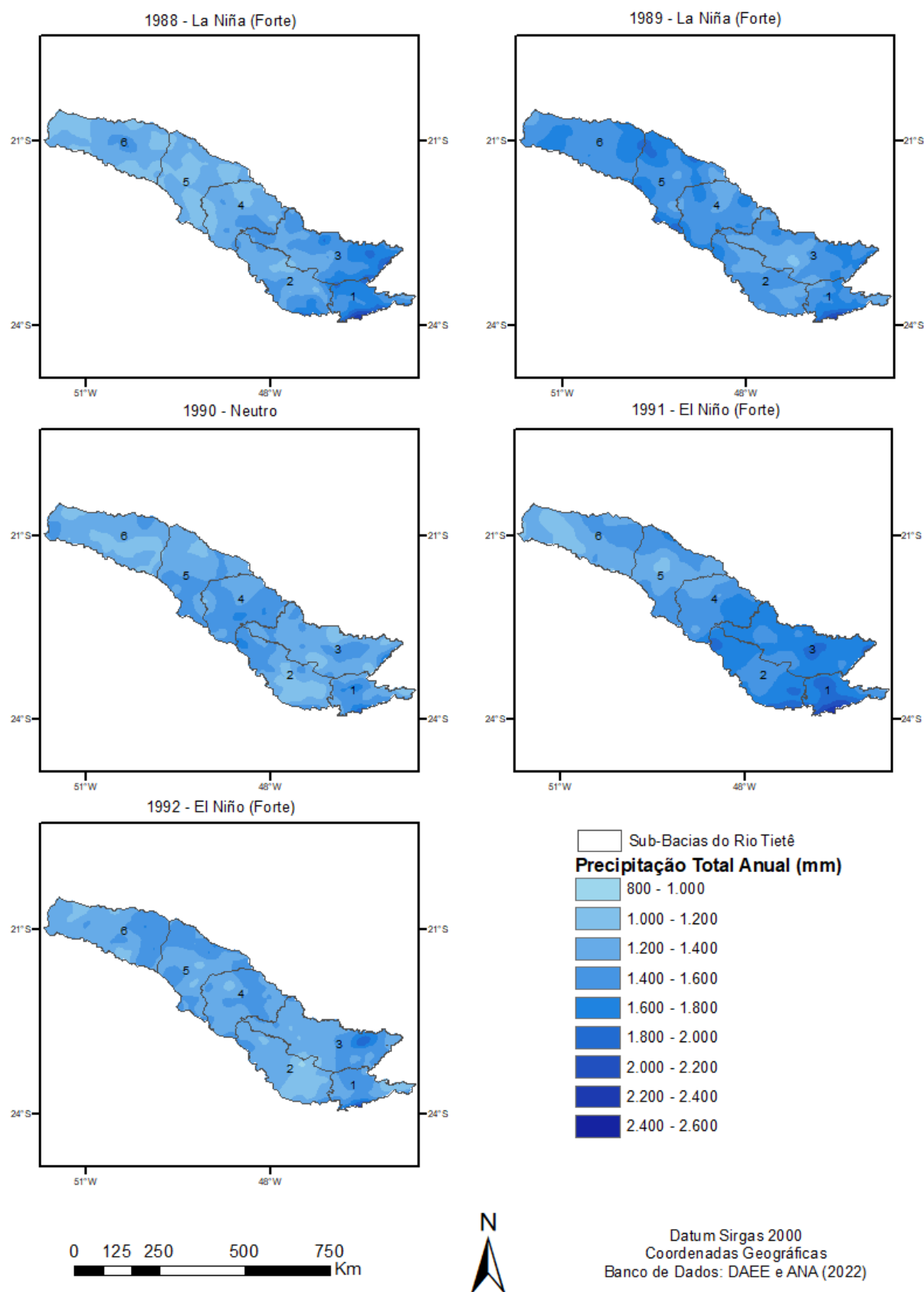
Apesar do parâmetro Alcance ter uma certa relação com o tamanho da área de estudo, pode-se aqui realizar algumas comparações. Na análise espacial de eventos máximos de chuva na bacia do alto São Francisco e alto rio Doce, Amaral, Gripp e Versiani (2007) obtiveram alcances entre 180 km e 250 km, sendo o ajuste exponencial o que melhor se adequou nas amostras. Nos trabalhos de Furtunato et al. (2017) e Furtunato et al. (2019), a análise geoestatística das chuvas na bacia do rio Grande (Bahia) evidenciou o ajuste exponencial como o melhor modelo matemático para a região, com alcances que variaram entre 102,5 km e 127,5 km.

Com base nos Alcances obtidos (Tabela 11), observou-se que os menores valores tendem a indicar maior recorte espacial com a presença de "ilha" ou fragmentos espaciais. Já os alcances maiores tendem a representar efeitos mais contínuos e com variações menos bruscas na pluviometria.

Os anos com menores alcances foram os 1990, 1992, 2001, 2003 e 2004, enquanto os de maiores alcances foram os 1994, 1996, 2006, 2010 e 2017. Ao comparar com a análise descritiva, foi possível denotar que os anos com menores alcances tiveram os menores desvios padrão e menores coeficiente de variação, enquanto os com maiores alcances tiveram os maiores desvios padrão e maiores coeficientes de variação. No estudo de Silva (2019), concluiu-se que, para a região do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, o alcance em épocas chuvosas foi bem superior aos demais alcances, fato que, apesar de observado em alguns dos anos com alto índice pluviométrico, não é uma regra para a bacia hidrográfica do rio Tietê.

Considerando que a análise semivariográfica indicou apreciáveis ajustes, nas Figuras 24 a 29 são apresentados os mapas resultantes da krigagem ordinária para a pluviometria de cada período e a sua respectiva fase do ENOS (classificado por intensidade).

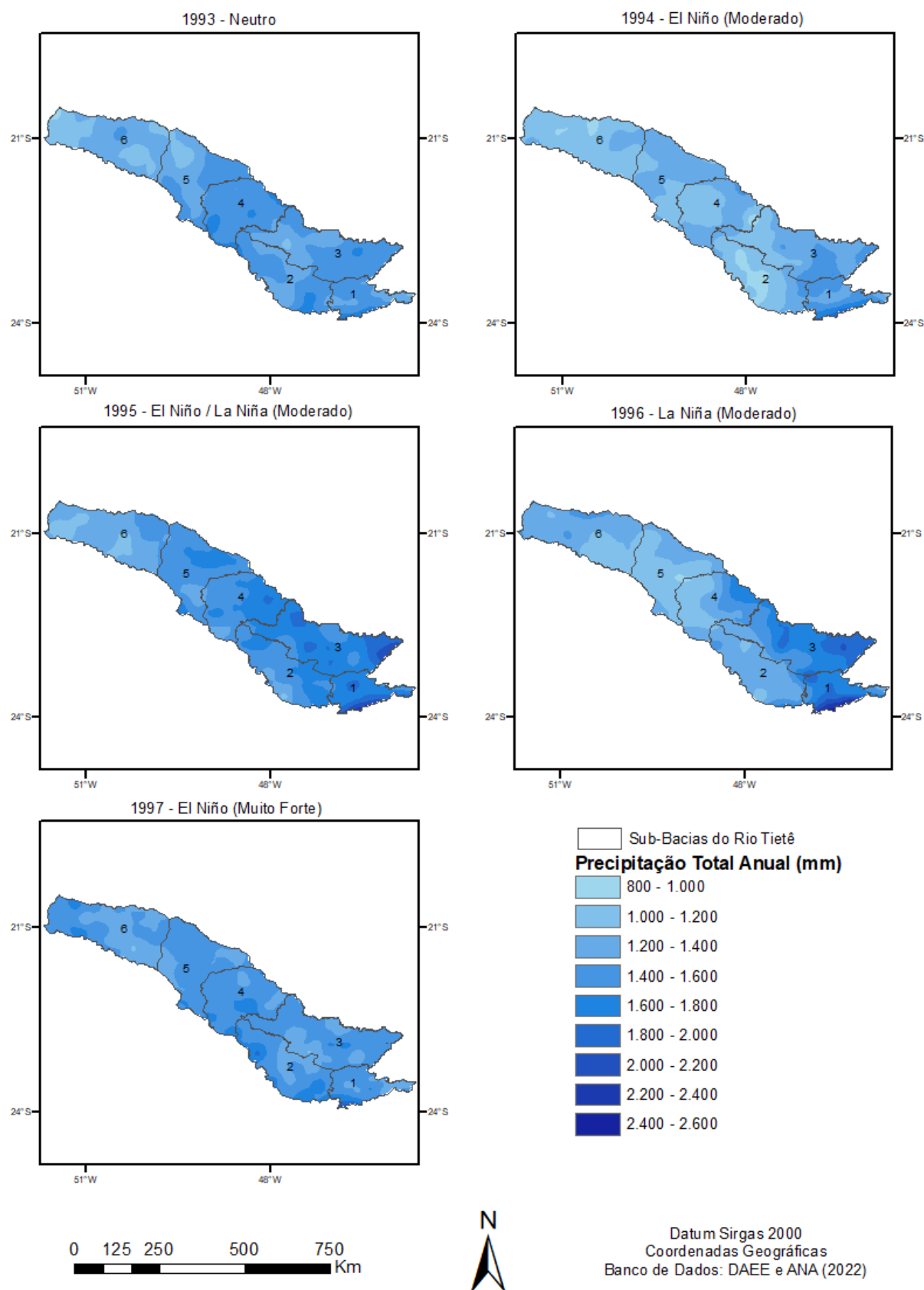
Figura 24 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 1988 a 1992



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

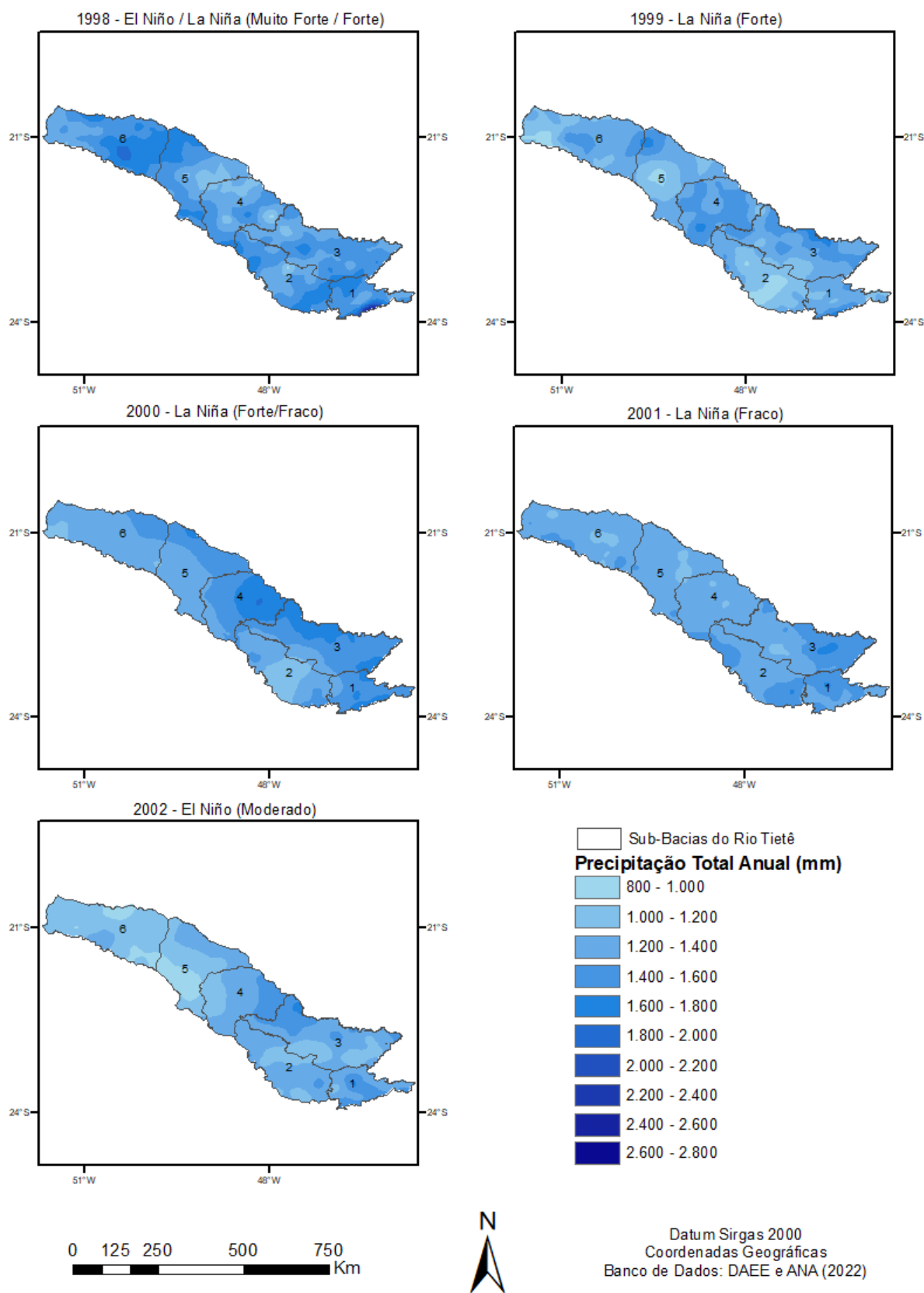
Figura 25 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 1993 a 1997



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

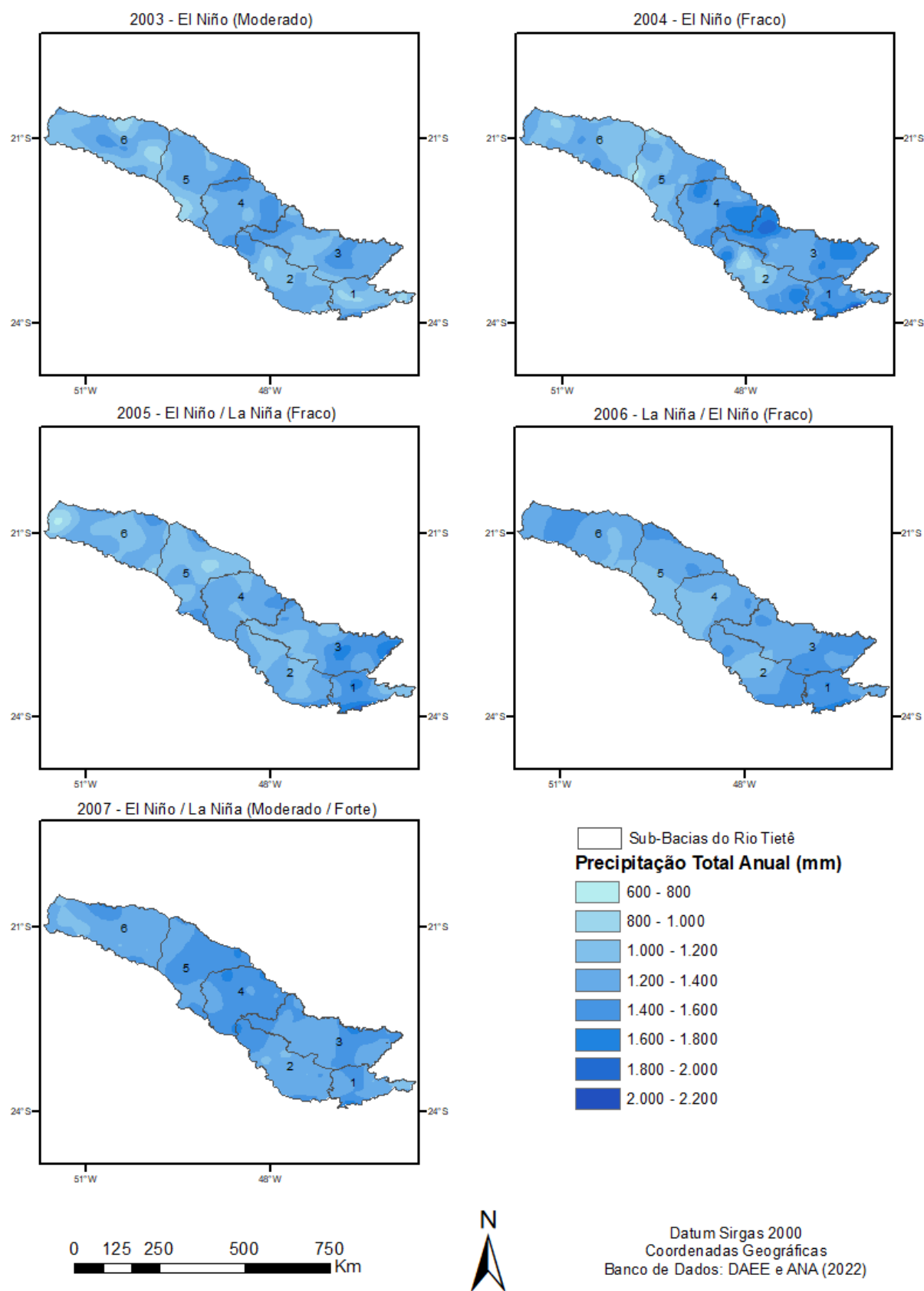
Figura 26 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 1998 a 2002



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

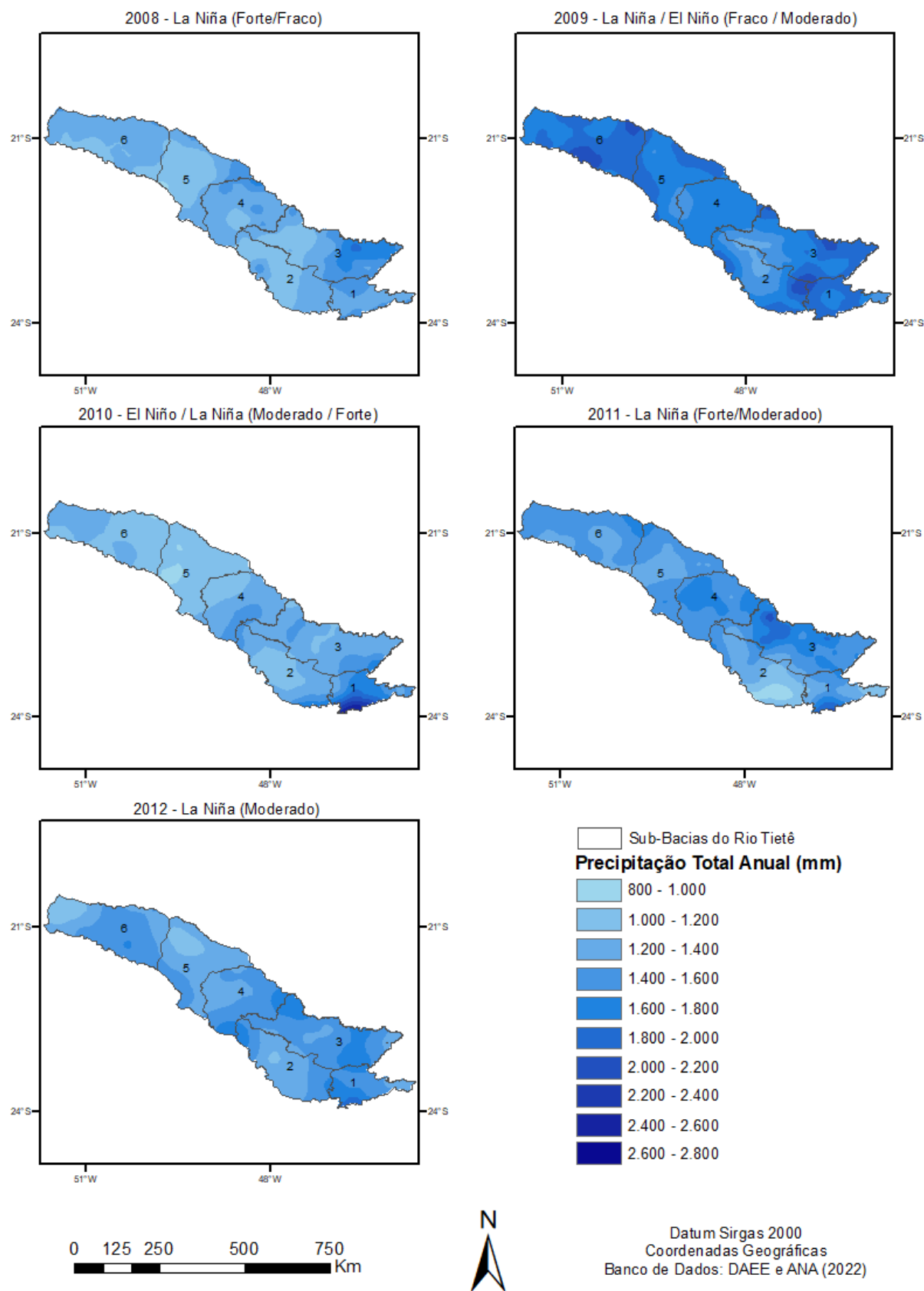
Figura 27 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 2003 a 2007



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
 5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

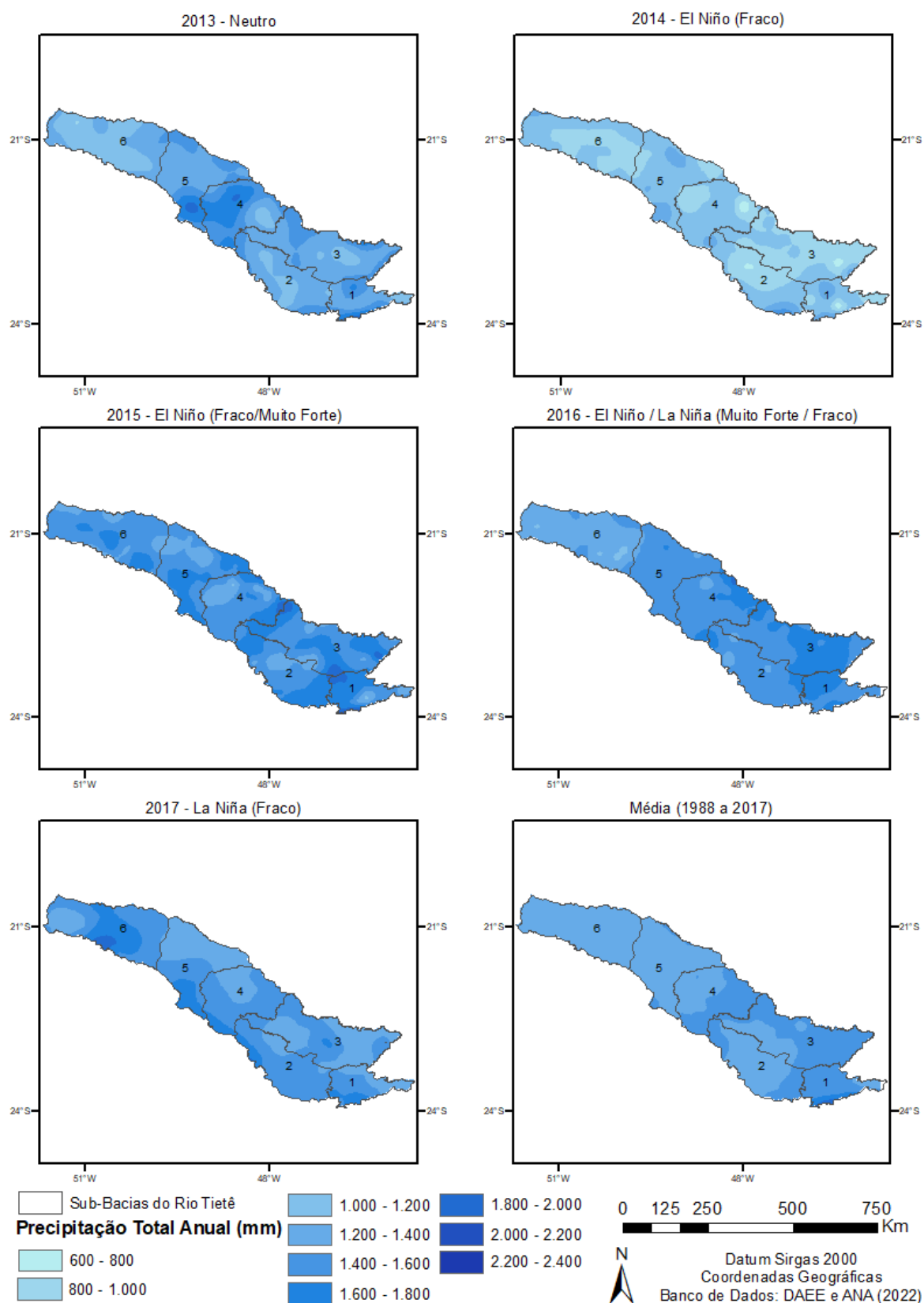
Figura 28 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 2008 a 2012



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

Figura 29 – Precipitação total anual na bacia do rio Tietê de 2013 a 2017 e precipitação média



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

Os mapas gerados (Figuras 24 a 29) evidenciaram que as chuvas anuais variaram entre 600 mm e 2800 mm nos 30 anos estudados, sendo que os maiores índices pluviométricos estão atrelados a região sudeste da bacia, localizada mais próximo do litoral paulista. Em contrapartida, os menores índices pluviométricos situaram-se na parcela oeste da bacia e na sub bacia do Sorocaba/Médio Tietê. Estas análises são confirmadas visto que os estudos de Alvares et al. (2014), Lemes (2019) e Marcuzzo (2020) apresentaram valores e conclusões análogas.

A variabilidade temporal das chuvas ao longo da bacia foi analisada, sendo observados maiores volumes pluviométricos nos anos de 1889, 1991, 1995, 1996, 2009, 2011 e 2015, e menores volumes nos anos de 1994, 1999, 2002, 2003, 2004, 2005 e 2014.

Uma quantificação da porcentagem das áreas para cada intervalo de chuva total anual de cada ano estudado pode ser consultada na Figura 30. As células em coloração azul representam altas porcentagens da área no intervalo, as em coloração vermelha representam baixas porcentagem.

[illegible]

		Intervalo de Precipitação (mm)																															
		2600-2800	2400-2600	2200-2400	2000-2200	1800-2000	1600-1800	1400-1600	1200-1400	1000-1200	800-1000	600-800	400-600	200-400	0-200	0-100	0-50	0-25	0-10	0-5	0-2	0-1	0-0,5	0-0,25	0-0,1	0-0,05	0-0,025	0-0,01	0-0,005	0-0,0025	0-0,001		
Precipitação Média	2600-2800	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
	2400-2600	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
	2200-2400	0,1%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,5%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
	2000-2200	0,4%	0,2%	0,0%	0,8%	0,0%	0,0%	1,1%	0,8%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,6%	0,6%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
	1800-2000	1,9%	2,2%	0,1%	5,9%	0,6%	0,0%	0,2%	5,5%	6,6%	0,4%	1,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,3%	0,0%	0,0%	0,3%	33,1%	1,0%	2,9%	0,6%	0,6%	0,0%	2,4%	0,1%	0,9%	0,2%	
	1600-1800	10,2%	21,0%	1,7%	33,0%	1,5%	4,0%	1,1%	33,7%	15,0%	7,9%	19,0%	1,7%	14,3%	0,9%	0,4%	0,0%	9,9%	2,8%	0,8%	1,8%	4,8%	47,0%	3,7%	17,0%	11,9%	8,5%	0,0%	30,7%	20,4%	12,9%	0,9%	
	1400-1600	19,6%	56,8%	30,0%	31,2%	30,6%	49,5%	9,9%	37,4%	12,3%	65,4%	42,2%	21,9%	37,1%	22,2%	12,0%	13,1%	23,2%	13,8%	25,8%	39,8%	12,5%	12,6%	9,8%	50,5%	44,8%	21,5%	0,3%	52,9%	58,2%	51,7%	35,8%	
	1200-1400	46,6%	19,2%	52,9%	23,4%	57,1%	35,1%	38,8%	18,1%	38,6%	26,3%	31,4%	48,3%	41,5%	72,6%	42,2%	50,1%	39,7%	45,4%	53,5%	54,5%	52,0%	2,7%	42,1%	21,8%	36,2%	49,8%	6,3%	13,9%	20,7%	34,5%	63,1%	
	1000-1200	21,2%	0,5%	15,3%	5,5%	10,1%	11,0%	45,4%	4,2%	25,7%	0,1%	6,0%	23,6%	7,0%	4,4%	37,9%	32,7%	22,6%	34,9%	19,9%	3,9%	30,2%	0,0%	40,6%	5,6%	6,5%	19,6%	53,4%	0,1%	0,6%	0,0%	0,0%	
	800-1000	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	4,5%	0,0%	0,3%	0,0%	0,1%	4,5%	0,0%	0,0%	7,4%	4,2%	3,3%	2,5%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	1,6%	2,0%	0,0%	0,1%	39,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
600-800	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		

Legenda (corres das células):

Porcentagens mais altas

Porcentagens mais baixas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme Melo et al. (2016) e Maia (2022), os anos caracterizados pela seca na bacia foram 1994, 1999, 2001, 2002, 2003, 2008 e 2014. Segundo a Figura 30, todos estes sete anos apresentaram médias inferiores à média anual da bacia, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Precipitações anuais médias dos anos caracterizados pela seca na BH Tietê

Ano	Média (mm)	Média da BH Tietê (mm)
1994	1287,74	1346-1422
1999	1331,80	
2001	1387,62	
2002	1321,90	
2003	1281,71	
2008	1374,02	
2014	1088,84	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O intervalo com a maior porcentagem de área na média geral dos anos foi entre 1200 mm e 1400 mm (63,1%). Usando este intervalo como referência, dos 30 anos examinados, 16 apresentaram a maior porcentagem da área dentro do intervalo, 12 apresentaram maior porcentagem de área acima e dois (1994 e 2014) apresentaram maior porcentagem de área abaixo.

O ano que apresentou o maior intervalo com a maior porcentagem de área foi 2009 (intervalo entre 1600 mm e 1800 mm com 47% da área) e o ano que apresentou o menor intervalo com a maior porcentagem de área foi 2014 (intervalo entre 1000 mm e 1200 mm com 53,4% da área).

Os anos com maiores amplitude de chuva foram 2010 (variando entre 2800 mm e 800 mm), 1996 e 1998 (os dois últimos variando entre 2600 mm e 800 mm). Os de menor amplitude foram 2017 (variando entre 2000 mm e 1200 mm), 2001 e 2007 (os dois últimos variando entre 1800 mm e 1000 mm).

Visando uma análise individual das sub-bacias da região, a Figura 31 apresenta as médias pluviométricas obtidas por cada UGRHI em cada ano. Quanto mais forte a tonalidade do azul na célula, maior é a altura pluviométrica e quanto mais forte for a tonalidade do vermelho na célula, menor é a altura pluviométrica para a sub-bacia em questão.

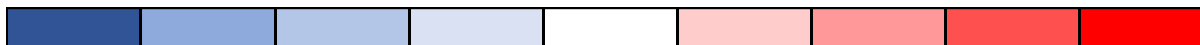
Figura 31 – Médias pluviométricas em cada UGRHI inserida na bacia do rio Tietê entre os anos de 1988 e 2017

	MÉDIA PLUVIOMÉTRICA ANUAL (mm)																														
Sub-bacia do rio Tietê	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	MÉDIA
06-Alto Tietê	1676	1586	1422	1801	1406	1454	1480	1753	1787	1487	1557	1306	1529	1430	1370	1147	1484	1432	1479	1346	1390	1821	1718	1426	1568	1386	1083	1624	1594	1458	1500,0
10-Sorocaba-Médio Tietê	1366	1443	1311	1661	1243	1442	1117	1532	1310	1505	1466	1145	1266	1390	1248	1216	1298	1230	1397	1341	1202	1647	1253	1241	1387	1288	1028	1554	1506	1496	1351,0
05-Piracicaba-Capivari-Jundiá	1506	1449	1322	1675	1375	1445	1282	1717	1662	1434	1433	1356	1523	1387	1308	1299	1476	1354	1373	1381	1396	1732	1328	1615	1521	1338	975	1587	1591	1399	1441,3
13-Tietê-Jacaré	1284	1498	1436	1503	1369	1516	1200	1589	1311	1508	1342	1417	1563	1285	1286	1343	1432	1282	1222	1472	1305	1686	1263	1579	1460	1511	1045	1505	1543	1457	1407,1
16-Tietê-Batalha	1207	1585	1335	1388	1385	1358	1224	1514	1164	1450	1431	1234	1395	1279	1121	1223	1212	1161	1255	1427	1200	1754	1065	1447	1302	1403	1104	1522	1487	1417	1335,0
19-Baixo Tietê	1235	1563	1245	1304	1348	1220	1101	1283	1259	1417	1539	1253	1310	1280	1086	1185	1184	1182	1325	1291	1244	1850	1075	1452	1387	1186	1033	1497	1329	1534	1306,6

Legenda (cores das células)

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A UGRHI 06-AT apresentou a maior média pluviométrica entre as sub-bacias (1500 mm) com amplitude de 738 mm (1821 mm em 2009 e 1083 mm em 2014). A UGRHI 10-SMT apresentou uma média pluviométrica de 1351 mm com amplitude de 633 mm (1661 mm em 1991 e 1028 mm em 2014). A UGRHI 05-PCJ apresentou uma média pluviométrica de 1441 mm com amplitude de 757 mm (1732 mm em 2009 e 975 mm em 2014). A UGRHI 13-TJ apresentou uma média pluviométrica de 1407 mm com amplitude de 641 mm (1686 mm em 2009 e 1045 mm em 2014). A UGRHI 16-TB apresentou uma média pluviométrica de 1335 mm com amplitude de 689 mm (1754 mm em 2009 e 1065 mm em 2010). A UGRHI 19-BT apresentou a menor média pluviométrica (1307 mm) com amplitude de 817 mm (1850 mm em 2009 e 1033 mm em 2014).

Os dados da Figura 31 corroboram com a classificação climatológica proposta por Köppen (1936) e apresentada na Figura 13, onde se observa que as sub-bacias com menores índices pluviométricos são das classes Aw e Cfa, enquanto a classe com maiores índices foi a Cfb. No estudo de Alvares et al. (2014), observou-se que, no Brasil, as regiões com classes Aw e Cfa tendem a ter chuvas anuais menores que as regiões com classe Cfb.

Além disso, foi observado que a média total pluviométrica da BHRT entre os anos 1988 e 2017 vale cerca de 1379,4 mm, um valor dentro do intervalo obtido por Maia (2022).

Conforme a Figura 31, fica evidente que as sub-bacias compartilharam comportamentos hidrológicos, como baixas pluviometrias em alguns anos: 2002, 2003, 2014; e altas pluviometrias em 1995, 2009, 2015. Porém, em contrapartida, em outros anos as sub-bacias tiveram comportamentos diferentes, como em 1988, 2010, 2011. Um comportamento similar foi observado por Teixeira, Leivas e Bayma-Silva (2017), em um estudo que analisou o balanço hídrico do estado de São Paulo nos anos de 2013 e 2015, sendo observado que balanços hídricos positivos (umidade) em uma região não caracteriza umidade para as áreas vizinhas.

5.2 Influência dos eventos ENOS nas chuvas anuais

Visando verificar a possível influência dos eventos ENOS nos índices pluviométricos na bacia hidrográfica do rio Tietê, foi elaborado a Figura 32, que compara os valores da média anual do Índice Oceânico Niño (ONI) com as alturas totais anuais para cada sub-bacia. Os valores (tanto de média anual quanto do índice

ONI) com células com mais intensidade na cor azul indicam maiores valores para a coluna em questão, enquanto as células com mais intensidade na cor vermelha indicam menores valores.

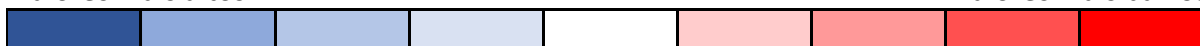
Figura 32 – Comparação da precipitação total anual na BHRT com a média anual do Índice Oceânico Niño entre 1988 e 2017

ANO	Índice ONI (°C)	Bacia do rio Tietê (mm)	06-Alto Tietê (mm)	10-Sorocaba-Médio Tietê (mm)	05-Piracicaba-Capivari-Jundiaí (mm)	13-Tietê-Jacaré (mm)	16-Tietê-Batalha (mm)	19-Baixo Tietê (mm)
1988	-0,8	1351	1676	1366	1506	1284	1207	1235
1989	-0,6	1515	1586	1443	1449	1498	1585	1563
1990	0,3	1333	1422	1311	1322	1436	1335	1245
1991	0,6	1526	1801	1661	1675	1503	1388	1304
1992	0,6	1351	1406	1243	1375	1369	1385	1348
1993	0,3	1394	1454	1442	1445	1516	1358	1220
1994	0,5	1210	1480	1117	1282	1200	1224	1101
1995	-0,2	1542	1753	1532	1717	1589	1514	1283
1996	-0,5	1386	1787	1310	1662	1311	1164	1259
1997	1,2	1460	1487	1505	1434	1508	1450	1417
1998	-0,1	1455	1557	1466	1433	1342	1431	1539
1999	-1,2	1285	1306	1145	1356	1417	1234	1253
2000	-0,8	1422	1529	1266	1523	1563	1395	1310
2001	-0,3	1333	1430	1390	1387	1285	1279	1280
2002	0,6	1220	1370	1248	1308	1286	1121	1086
2003	0,3	1243	1147	1216	1299	1343	1223	1185
2004	0,5	1333	1484	1298	1476	1432	1212	1184
2005	0,0	1260	1432	1230	1354	1282	1161	1182
2006	0,1	1318	1479	1397	1373	1222	1255	1325
2007	-0,6	1376	1346	1341	1381	1472	1427	1291
2008	-0,8	1284	1390	1202	1396	1305	1200	1244
2009	0,3	1748	1821	1647	1732	1686	1754	1850
2010	-0,5	1259	1718	1253	1328	1263	1065	1075
2011	-0,9	1471	1426	1241	1615	1579	1447	1452
2012	-0,2	1427	1568	1387	1521	1460	1302	1387
2013	-0,3	1342	1386	1288	1338	1511	1403	1186
2014	0,1	1039	1083	1028	975	1045	1104	1033
2015	1,5	1542	1624	1554	1587	1505	1522	1497
2016	0,3	1497	1594	1506	1591	1543	1487	1329
2017	-0,2	1460	1458	1496	1399	1457	1417	1534

Legenda (cores das células)

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As maiores médias do ONI, que correspondem a eventos El Niño de maior intensidade, ocorreram nos anos de 1991, 1992, 1997, 2002 e 2015. Destes anos, foram observadas anomalias positivas apenas em 1991, 1992, 1997 e 2015, apesar de não ocorrer em toda a bacia do rio Tietê. Não obstante, o ano de 2002 apresentou anomalias negativas. Já nas menores médias de ONI (1988, 1999, 2000, 2008 e 2011), foram observadas anomalias negativas em todos os anos, apesar de não ocorrer em toda a bacia do rio Tietê.

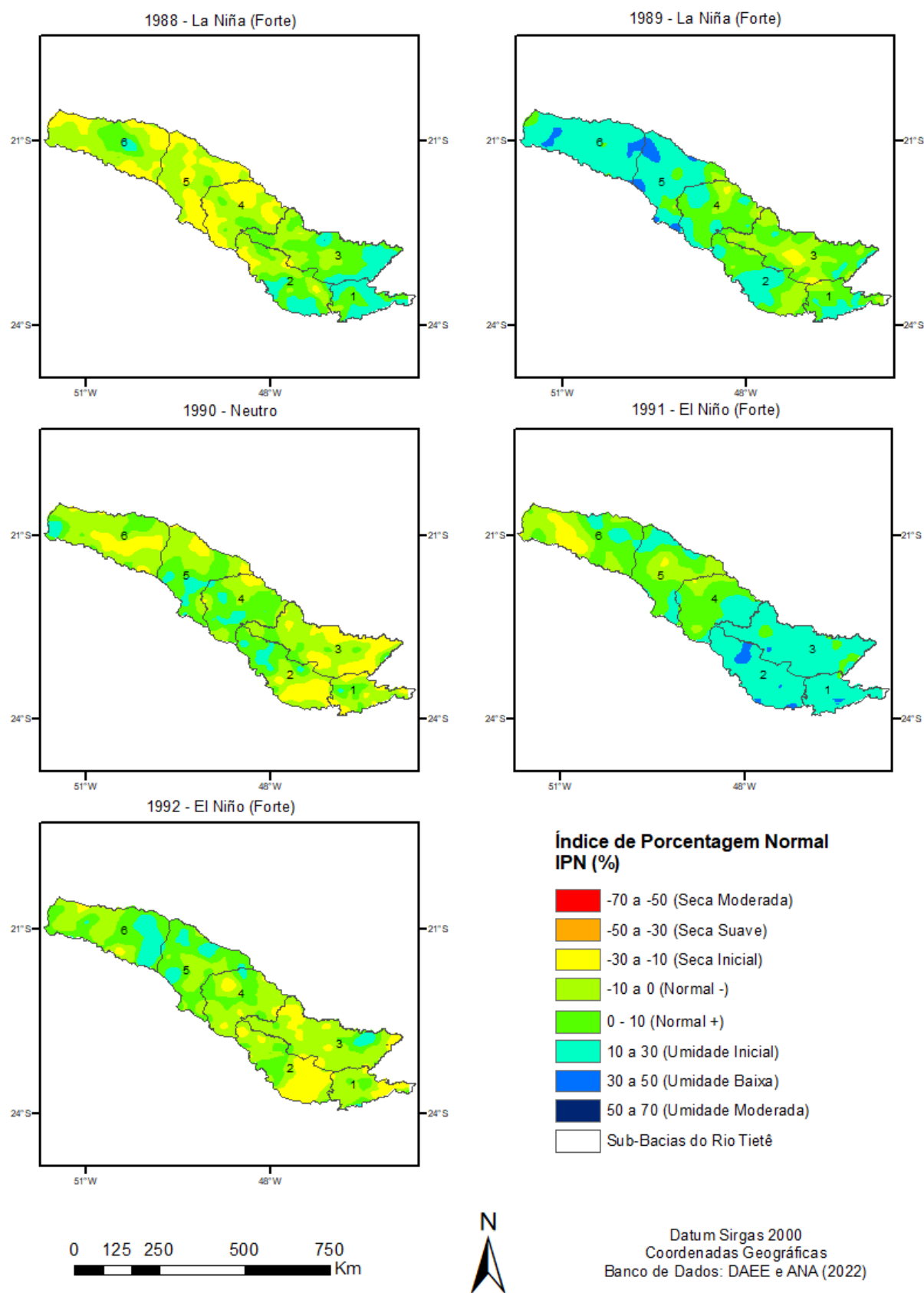
Os anos com maiores alturas pluviométricas foram 1991, 1995, 2009, 2015, os quais ocorreram em anos de El Niño (forte), transição de El Niño (moderado) para La Niña (moderada), transição de La Niña (fraca) para El Niño (moderado) e transição de El Niño (fraco) para El Niño (muito forte), respectivamente. Os anos com as menores alturas pluviométricas foram 1994, 2002, 2003 e 2014, os quais ocorreram em anos de El Niño (moderado), El Niño (moderado), El Niño (moderado) e El Niño (fraco), respectivamente.

Os parágrafos anteriores e a Figura 32 deixam evidente que não há uma relação direta entre os eventos ENOS e os índices pluviométricos da BHRT, podendo ser uma característica mais local do que regional. Este aspecto foi observado por Maia (2022), na mesma área de estudo e por Terassi et al. (2018), na região norte do estado do Paraná.

5.3 Mapeamento do índice de porcentagem normal (IPN) e influência dos eventos ENOS

Os mapas do IPN obtidos ao longo da bacia hidrográfica do rio Tietê foram apresentados nas Figuras 33 a 38. Com os resultados destes mapas e melhor análise dos IPNs foi elaborada a Figura 39, a qual identifica a porcentagem da área da bacia em cada intervalo de intensidade do índice. Na Figura 39, as células em coloração azul representam altas porcentagens da área no intervalo, as em coloração vermelha representam baixas porcentagem.

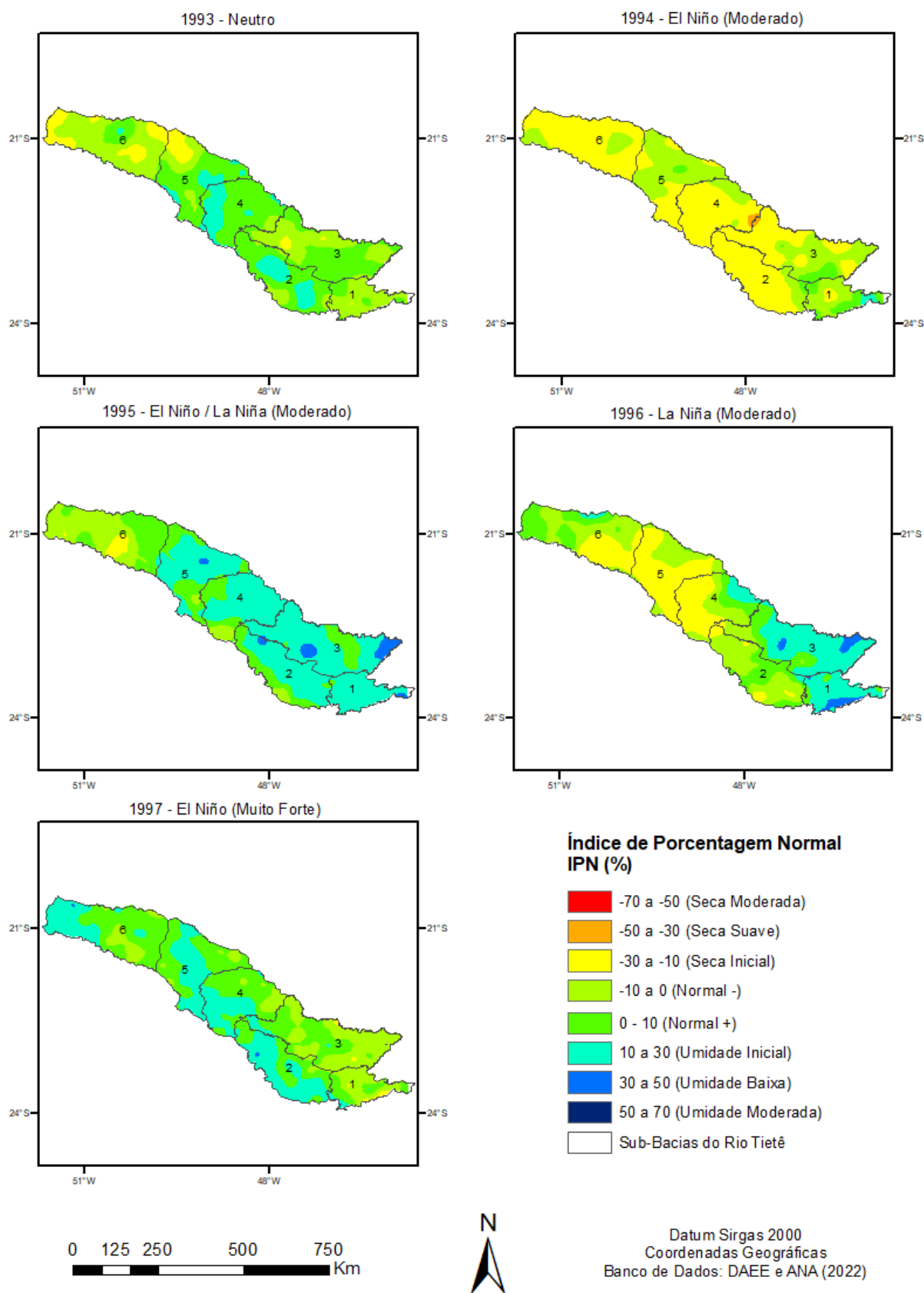
Figura 33 – IPN na bacia do rio Tietê de 1988 a 1992



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

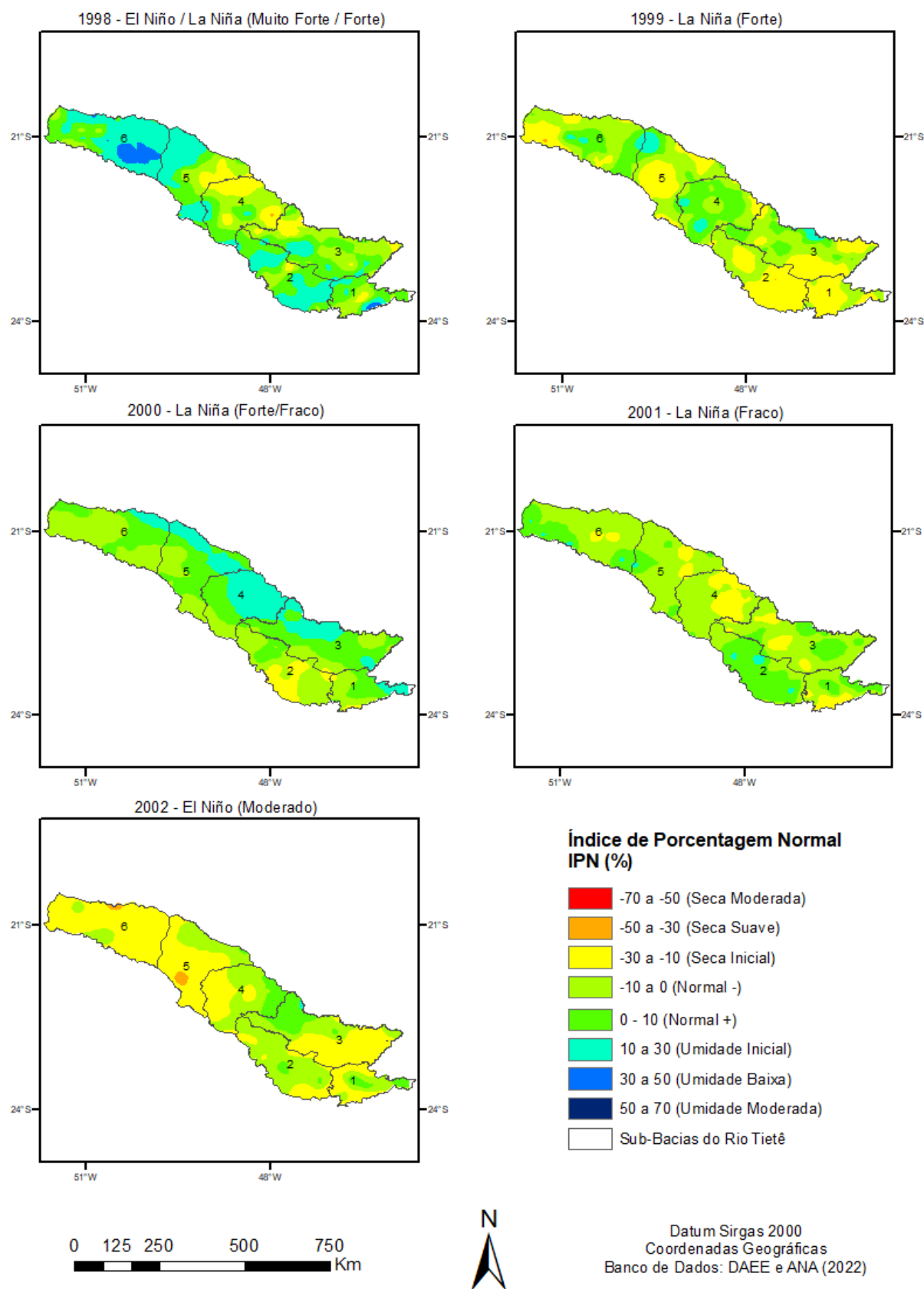
Figura 34 – IPN na bacia do rio Tietê de 1993 a 1997



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

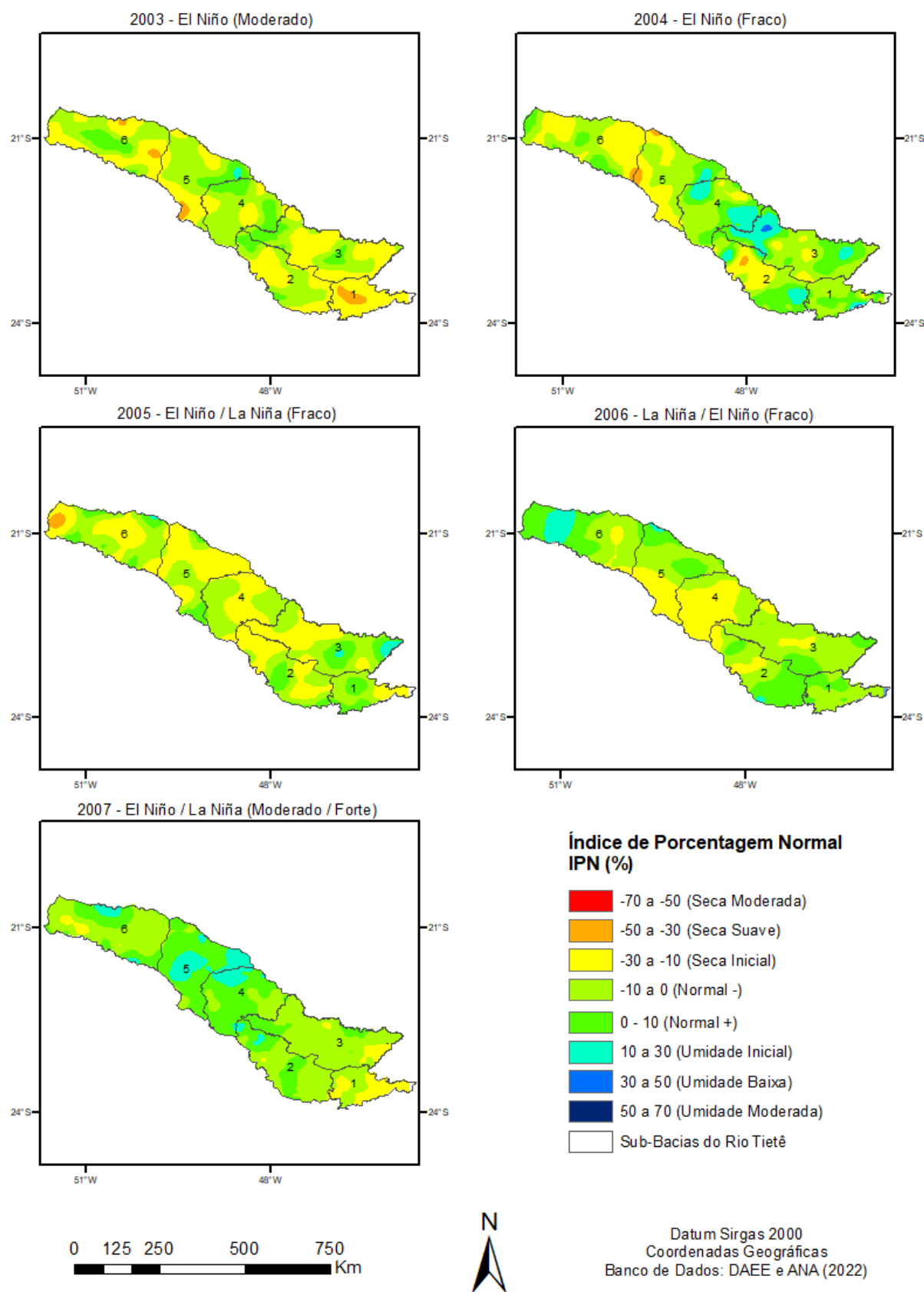
Figura 35 – IPN na bacia do rio Tietê de 1998 a 2002



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

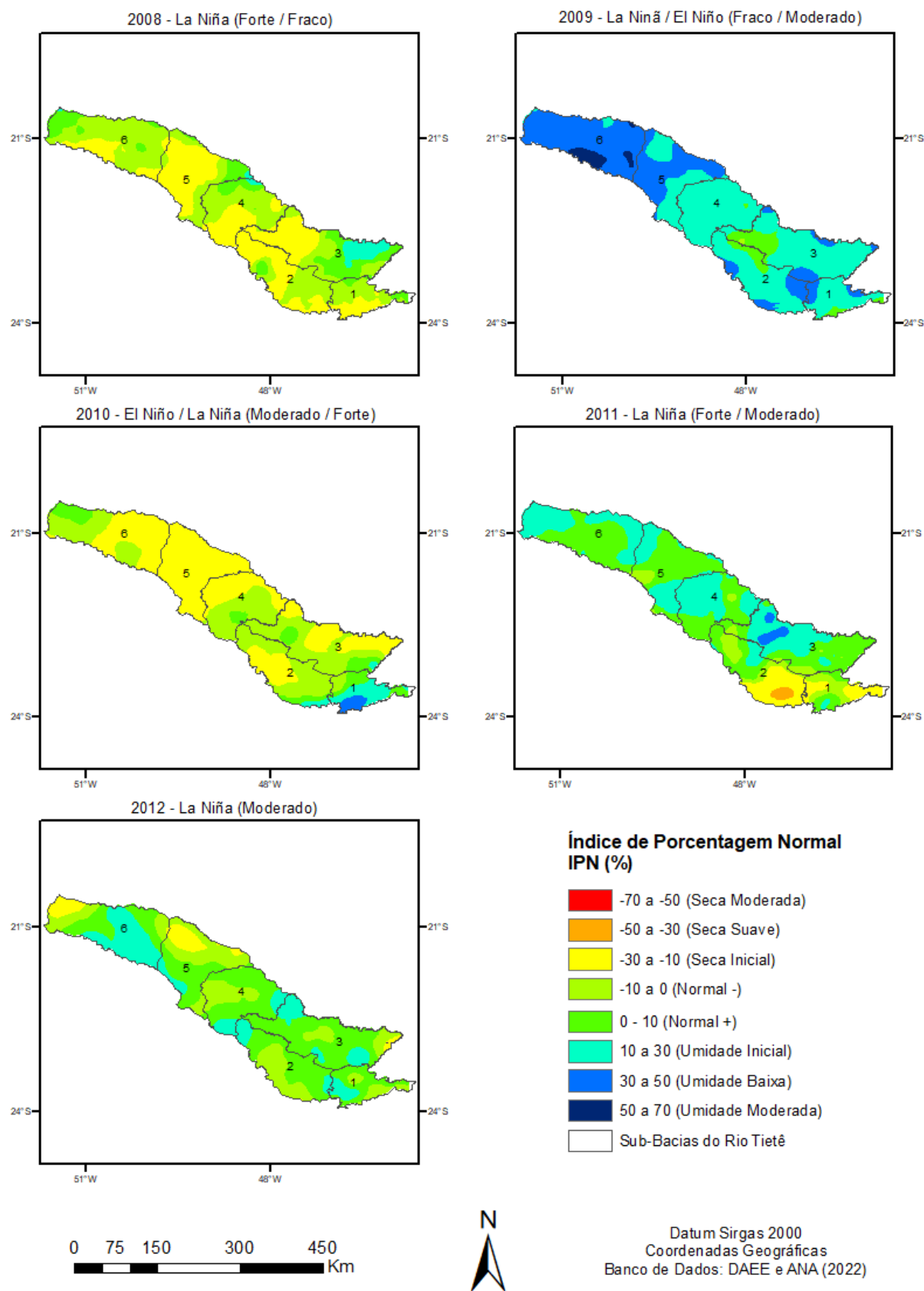
Figura 36 – IPN na bacia do rio Tietê de 2003 a 2007



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

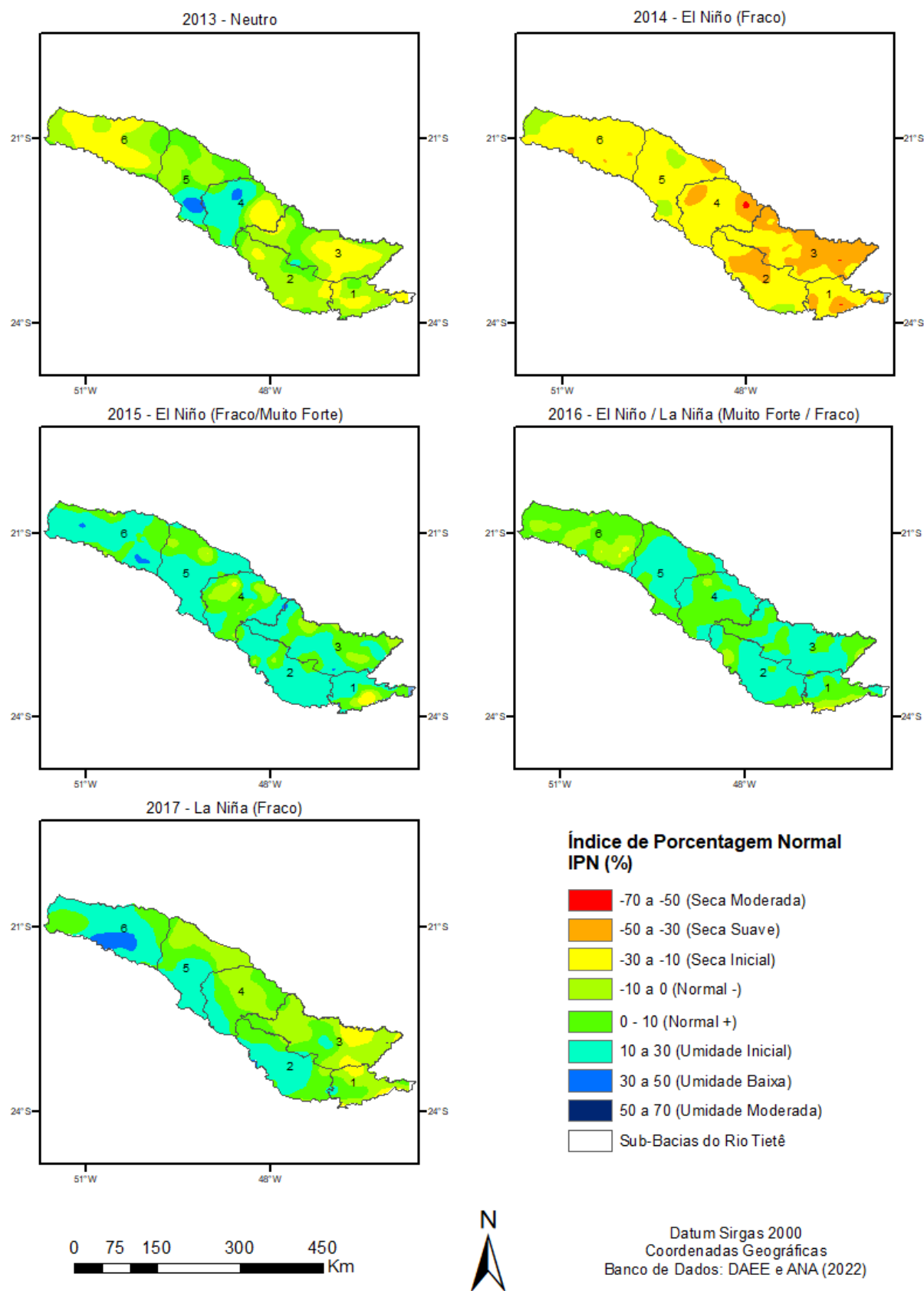
Figura 37 – IPN na bacia do rio Tietê de 2008 a 2012



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

Figura 38 – IPN na bacia do rio Tietê de 2013 a 2017



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1=Alto Tietê; 2=Sorocaba/Médio Tietê; 3=Piracicaba/Capivari/Jundiaí; 4=Tietê/Jacaré;
5=Tietê/Batalha; 6= Baixo Tietê.

Figura 39 – Porcentagens da área da BHRT por intervalo de IPN

		ANO																														
		1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	MÉDIA
IPN (%)	50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	
	30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	4,0%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,7%	2,0%	0,1%	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	35,4%	1,3%	1,6%	0,0%	1,5%	0,0%	0,6%	0,0%	2,8%	1,9%	
	10 a 30 (Umidade Inicial)	12,4%	43,0%	5,5%	52,7%	8,4%	10,5%	0,4%	56,0%	22,7%	30,1%	31,1%	3,7%	22,1%	1,0%	0,1%	0,4%	8,4%	1,1%	3,9%	9,3%	3,9%	55,5%	3,9%	35,8%	19,9%	10,4%	0,0%	58,6%	43,2%	32,3%	19,5%
	0 a 10 (Normal +)	21,9%	32,6%	27,2%	27,4%	27,3%	41,6%	4,8%	25,4%	18,7%	43,6%	29,3%	19,3%	33,7%	24,7%	7,5%	11,7%	21,9%	10,2%	22,7%	32,7%	12,8%	6,5%	7,5%	42,2%	45,5%	19,7%	0,0%	31,2%	48,2%	29,6%	24,2%
	-10 a 0 (Normal -)	41,9%	18,8%	46,2%	15,2%	49,9%	39,5%	32,2%	14,4%	29,1%	25,6%	26,7%	41,4%	39,2%	62,0%	35,6%	41,9%	44,1%	43,8%	50,8%	50,9%	43,6%	0,2%	38,5%	10,6%	29,0%	43,3%	5,2%	8,9%	8,2%	31,2%	32,3%
	-30 a -10 (Seca Inicial)	23,8%	1,7%	21,1%	3,6%	14,4%	8,4%	62,1%	1,5%	27,6%	0,6%	9,8%	35,5%	4,9%	12,4%	55,8%	43,5%	24,1%	44,0%	22,6%	7,1%	39,7%	0,0%	48,8%	8,8%	5,6%	25,1%	71,6%	0,8%	0,4%	4,2%	21,0%
	-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,9%	2,5%	1,2%	0,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	23,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%
	-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda (cores das células):

Porcentagens mais altas

Porcentagens mais baixas



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir das Figuras 33 a 39, é possível averiguar que o IPN variou de umidade moderada a seca moderada. As classificações que obtiveram as maiores somas de porcentagens ao longo dos trinta anos foram a Normal –, Normal +, Seca inicial e Umidade inicial, com 967,9%, 727,4%, 629,5% e 586,3% de área inserida respectivamente.

Os anos que apresentaram mais de 50% da área em IPNs de umidade foram 1991, 1995, 2009 e 2015, enquanto os que apresentaram mais de 50% da área em IPNs de seca foram 1994, 2002 e 2014. Essa análise corrobora com as médias encontradas calculadas na Tabela 10, onde os anos com mais de 50% da área em condições úmidas apresentaram valores acima da média da bacia, enquanto os anos com mais de 50% da área em condições secas apresentaram valores abaixo da média da bacia.

O Quadro 8, apresentado a seguir, apresenta diversos estudos que obtiveram resultados semelhantes aos obtidos neste estudo para a mesma região.

Quadro 8 – Estudos que obtiveram resultados análogos em relação aos mapas de IPN

Área de Estudo	Anos analisados	Resultados	Referência
Estado de São Paulo	2014	Período de seca em 2014	Marengo et al. (2015)
Estado de São Paulo	2013 e 2015	Período de seca leve em 2013 e umidade em 2015	Teixeira, Leivas e Bayma-Silva (2017)
Bacia Hidrográfica do rio Tietê	1981-2020	Período de seca em 1994, 2002, 2003 e 2014. Período úmido em 1995, 2009 e 2015	Maia (2022)

Fonte: Organizado pelo autor.

Partindo para uma comparação com os eventos ENOS, em 1991 ocorreu El Niño de intensidade forte, em 1995 ocorreu El Niño e La Niña de intensidade moderadas, em 2009 ocorreu La Niña fraca e El Niño moderado e em 2015 ocorreu El Niño entre as intensidades fraca e muito forte. Para os anos com período seco, observou-se que em 1994 ocorreu El Niño moderado, em 2002 ocorreu El Niño moderado e em 2014 ocorreu El Niño fraco.

As análises anteriores focaram no comportamento da bacia hidrográfica como um todo. As Figuras 40 a 45 ilustram os intervalos de IPN obtidos para cada sub-bacia e as médias do índice ONI para cada ano. Em todas as figuras, as células com mais intensidade na cor azul indicam maiores valores para o ano em questão, enquanto as células com mais intensidade na cor vermelha indicam menores valores.

Figura 40 – Porcentagens da área da sub-bacia do Alto Tietê (06) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017

	ANO																													
IPN (%)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	0,0%	0,0%	0,0%	1,4%	8,4%	0,0%	2,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	17,0%	16,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10 a 30 (Umidade Inicial)	53,2%	18,4%	0,0%	95,8%	0,6%	0,0%	5,1%	94,6%	77,7%	3,5%	9,4%	0,0%	12,9%	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	72,7%	39,7%	0,1%	16,8%	0,0%	0,0%	48,1%	23,9%	1,9%
0 a 10 (Normal +)	43,1%	63,4%	19,3%	2,8%	11,1%	15,7%	28,9%	3,9%	13,0%	29,0%	50,2%	0,0%	36,2%	22,6%	13,6%	0,0%	25,7%	22,0%	21,3%	0,0%	5,5%	10,3%	29,8%	25,5%	50,5%	4,3%	0,0%	30,9%	54,2%	27,3%
-10 a 0 (Normal -)	3,7%	16,5%	56,0%	0,0%	66,3%	84,3%	58,5%	0,0%	0,8%	63,3%	33,2%	28,5%	45,8%	56,0%	36,5%	0,0%	68,0%	56,1%	78,7%	45,9%	62,0%	0,0%	14,3%	36,7%	32,7%	61,1%	0,0%	12,2%	18,7%	56,7%
-30 a -10 (Seca Inicial)	0,0%	1,7%	24,7%	0,0%	22,0%	0,0%	7,5%	0,0%	0,0%	4,1%	4,7%	71,5%	5,1%	21,4%	49,9%	84,2%	2,2%	21,9%	0,0%	54,1%	32,5%	0,0%	0,0%	37,7%	0,0%	34,6%	72,9%	8,8%	3,2%	14,1%
-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	15,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	26,8%	0,0%	0,0%	0,0%
-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%
Índice ONI (°C)	-0,8	-0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,5	-0,2	-0,5	1,2	-0,1	-1,2	-0,8	-0,3	0,6	0,3	0,5	0,0	0,1	-0,6	-0,8	0,3	-0,5	-0,9	-0,2	-0,3	0,1	1,5	0,3	-0,2

Legenda (cores das células):

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 41 – Porcentagens da área da sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê (10) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017

	ANO																													
IPN (%)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	0,0%	0,0%	5,4%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%
10 a 30 (Umidade Inicial)	17,8%	33,0%	7,1%	94,3%	0,0%	24,1%	0,0%	60,9%	1,5%	52,0%	41,1%	0,0%	0,0%	3,6%	0,0%	0,0%	1,3%	0,0%	1,1%	4,2%	0,0%	68,8%	3,4%	8,4%	12,6%	0,0%	0,0%	80,7%	71,7%	54,5%
0 a 10 (Normal +)	32,6%	42,8%	34,2%	0,3%	13,4%	60,2%	1,7%	32,3%	26,6%	42,4%	42,6%	0,0%	10,7%	65,5%	2,4%	11,6%	36,6%	10,9%	40,5%	28,1%	3,2%	10,9%	6,2%	23,8%	46,8%	14,1%	0,0%	17,4%	22,3%	39,7%
-10 a 0 (Normal -)	39,9%	24,0%	32,2%	0,0%	44,2%	15,7%	13,0%	5,6%	63,8%	5,1%	14,8%	33,8%	61,2%	30,6%	75,7%	41,5%	31,4%	39,2%	41,5%	66,9%	41,4%	0,0%	58,9%	25,0%	40,6%	76,4%	6,1%	1,8%	6,0%	5,7%
-30 a -10 (Seca Inicial)	9,6%	0,2%	26,5%	0,0%	42,4%	0,0%	85,4%	0,0%	8,2%	0,0%	1,5%	66,1%	28,0%	0,2%	22,0%	46,9%	28,9%	49,8%	16,9%	0,8%	55,4%	0,0%	31,5%	36,5%	0,0%	9,5%	71,1%	0,0%	0,0%	0,0%
-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,3%	0,0%	0,0%	22,8%	0,0%	0,0%	0,0%
-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Índice ONI (°C)	-0,8	-0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,5	-0,2	-0,5	1,2	-0,1	-1,2	-0,8	-0,3	0,6	0,3	0,5	0,0	0,1	-0,6	-0,8	0,3	-0,5	-0,9	-0,2	-0,3	0,1	1,5	0,3	-0,2

Legenda (cores das células):

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 42 – Porcentagens da área da sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017

	ANO																													
IPN (%)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	10,1%	6,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,6%	0,0%	7,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%
10 a 30 (Umidade Inicial)	22,5%	3,0%	0,2%	91,7%	4,3%	0,0%	0,0%	74,0%	64,8%	4,2%	9,6%	3,3%	27,2%	0,1%	0,5%	0,0%	16,7%	4,7%	0,0%	0,0%	15,6%	70,7%	1,0%	41,9%	19,6%	0,9%	0,0%	47,9%	56,2%	3,6%
0 a 10 (Normal +)	43,1%	43,7%	7,7%	7,9%	7,7%	42,6%	6,6%	15,9%	19,1%	31,2%	32,6%	15,4%	46,2%	17,5%	17,9%	9,7%	30,5%	14,2%	13,7%	10,7%	22,4%	17,8%	9,6%	41,3%	61,6%	16,9%	0,0%	38,0%	41,6%	22,9%
-10 a 0 (Normal -)	33,3%	47,2%	56,3%	0,0%	70,4%	54,6%	39,6%	0,0%	8,8%	63,4%	47,7%	48,5%	26,0%	69,7%	30,8%	35,5%	43,7%	44,4%	76,2%	81,6%	27,3%	0,9%	51,6%	9,1%	17,8%	48,1%	0,0%	13,6%	2,2%	59,4%
-30 a -10 (Seca Inicial)	1,1%	6,1%	35,8%	0,0%	17,6%	2,7%	52,7%	0,0%	1,2%	1,2%	10,2%	32,8%	0,5%	12,8%	50,8%	54,8%	7,8%	36,7%	10,1%	7,7%	34,7%	0,0%	37,8%	0,0%	1,0%	34,1%	40,6%	0,0%	0,0%	14,1%
-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	59,3%	0,0%	0,0%	0,0%
-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Índice ONI (°C)	-0,8	-0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,5	-0,2	-0,5	1,2	-0,1	-1,2	-0,8	-0,3	0,6	0,3	0,5	0,0	0,1	-0,6	-0,8	0,3	-0,5	-0,9	-0,2	-0,3	0,1	1,5	0,3	-0,2

Legenda (cores das células):

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

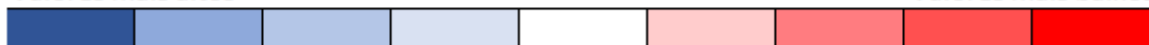
Figura 43 – Porcentagens da área da sub-bacia do Tietê-Jacaré (13) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017

	ANO																													
IPN (%)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	3,1%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%
10 a 30 (Umidade Inicial)	0,0%	27,1%	10,1%	28,4%	2,1%	27,9%	0,0%	70,5%	12,0%	37,8%	6,6%	5,9%	55,3%	0,0%	0,0%	0,1%	23,3%	0,0%	0,0%	14,3%	1,9%	98,7%	0,0%	57,5%	14,1%	49,4%	0,0%	33,6%	39,4%	22,5%
0 a 10 (Normal +)	5,6%	52,6%	49,1%	53,1%	24,1%	65,8%	0,0%	20,4%	13,8%	47,9%	21,0%	46,5%	28,9%	0,7%	12,1%	20,8%	21,8%	0,6%	0,3%	54,1%	9,1%	1,0%	0,3%	40,4%	51,1%	18,1%	0,0%	43,3%	58,1%	33,4%
-10 a 0 (Normal -)	48,9%	18,9%	34,9%	18,1%	65,2%	6,2%	15,1%	9,1%	26,3%	14,3%	41,0%	42,9%	15,7%	65,8%	47,7%	59,3%	50,5%	57,8%	32,5%	31,6%	53,0%	0,0%	56,3%	2,0%	34,8%	11,8%	0,0%	22,4%	2,5%	44,2%
-30 a -10 (Seca Inicial)	45,5%	1,3%	5,9%	0,4%	8,6%	0,0%	83,0%	0,0%	48,0%	0,0%	31,0%	4,6%	0,0%	33,6%	40,2%	19,8%	4,5%	41,6%	67,2%	0,0%	35,9%	0,0%	43,4%	0,0%	0,0%	17,6%	77,0%	0,5%	0,0%	0,0%
-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	22,0%	0,0%	0,0%	0,0%
-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Índice ONI (°C)	-0,8	-0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,5	-0,2	-0,5	1,2	-0,1	-1,2	-0,8	-0,3	0,6	0,3	0,5	0,0	0,1	-0,6	-0,8	0,3	-0,5	-0,9	-0,2	-0,3	0,1	1,5	0,3	-0,2

Legenda (cores das células):

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 44 – Porcentagens da área da sub-bacia do Tietê-Batalha (16) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017

	ANO																													
IPN (%)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	12,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	58,4%	0,0%	0,0%	0,0%	5,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10 a 30 (Umidade Inicial)	0,0%	70,8%	10,8%	21,9%	15,7%	11,8%	0,0%	65,4%	0,0%	43,8%	46,1%	7,0%	27,1%	0,8%	0,0%	1,9%	3,3%	0,0%	1,4%	29,1%	0,8%	41,6%	0,0%	34,7%	7,3%	13,5%	0,0%	66,9%	62,9%	38,3%
0 a 10 (Normal +)	1,2%	13,0%	36,8%	44,7%	51,9%	50,9%	4,5%	31,1%	2,0%	48,8%	19,9%	11,9%	34,3%	7,8%	1,7%	10,4%	7,9%	5,8%	20,5%	67,6%	9,0%	0,0%	0,0%	57,9%	38,9%	48,2%	0,0%	28,7%	36,8%	27,7%
-10 a 0 (Normal -)	52,1%	3,4%	42,7%	32,0%	32,4%	23,5%	64,1%	2,3%	28,7%	7,4%	22,3%	42,3%	38,6%	82,5%	26,9%	51,0%	47,0%	30,3%	46,9%	3,3%	26,9%	0,0%	0,5%	7,4%	36,2%	32,7%	11,1%	4,4%	0,2%	33,7%
-30 a -10 (Seca Inicial)	46,8%	0,0%	9,8%	1,3%	0,0%	13,8%	31,3%	0,0%	69,3%	0,0%	11,7%	38,8%	0,0%	9,0%	67,9%	33,3%	37,9%	63,9%	31,2%	0,0%	63,3%	0,0%	99,5%	0,0%	17,6%	0,0%	84,1%	0,0%	0,0%	0,3%
-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,5%	3,4%	4,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%
-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Índice ONI (°C)	-0,8	-0,6	0,3	0,6	0,6	0,3	0,5	-0,2	-0,5	1,2	-0,1	-1,2	-0,8	-0,3	0,6	0,3	0,5	0,0	0,1	-0,6	-0,8	0,3	-0,5	-0,9	-0,2	-0,3	0,1	1,5	0,3	-0,2

Legenda (cores das células):

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 45 – Porcentagens da área da sub-bacia do Baixo Tietê (19) por intervalo de IPN com a média anual do ONI entre 1988 e 2017

	ANO																													
IPN (%)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
50 a 70 (Umidade Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
30 a 50 (Umidade Baixa)	0,0%	7,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	13,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	85,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	0,0%	12,8%
10 a 30 (Umidade Inicial)	2,9%	88,6%	3,8%	10,2%	20,1%	0,8%	0,0%	0,7%	2,4%	32,5%	59,3%	3,8%	7,9%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	16,6%	5,7%	0,5%	2,7%	0,0%	48,0%	41,9%	0,0%	0,0%	68,6%	2,2%	58,4%
0 a 10 (Normal +)	14,0%	3,6%	20,3%	42,8%	45,3%	10,3%	0,0%	36,9%	32,2%	55,0%	22,4%	30,8%	40,2%	34,5%	0,0%	12,5%	12,5%	12,2%	37,9%	25,3%	19,2%	0,0%	9,7%	51,4%	28,0%	9,9%	0,0%	27,7%	73,9%	28,7%
-10 a 0 (Normal -)	52,5%	0,0%	54,2%	31,5%	30,6%	63,5%	15,2%	55,2%	36,6%	12,2%	4,9%	42,8%	51,9%	59,7%	8,5%	43,6%	37,9%	42,6%	38,5%	64,1%	61,8%	0,0%	37,8%	0,6%	19,8%	39,4%	10,7%	1,7%	23,0%	0,0%
-30 a -10 (Seca Inicial)	30,6%	0,0%	21,7%	15,5%	4,0%	25,5%	84,8%	7,3%	28,8%	0,0%	0,0%	22,3%	0,0%	4,7%	90,2%	40,8%	48,7%	40,5%	7,0%	4,9%	18,5%	0,0%	52,5%	0,0%	10,4%	50,7%	88,2%	0,0%	0,9%	0,0%
-50 a -30 (Seca Suave)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	1,3%	3,1%	1,0%	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%
-70 a -50 (Seca Moderada)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Índice ONI (°C)	-0.8	-0.6	0.3	0.6	0.6	0.3	0.5	-0.2	-0.5	1.2	-0.1	-1.2	-0.8	-0.3	0.6	0.3	0.5	0.0	0.1	-0.6	-0.8	0.3	-0.5	-0.9	-0.2	-0.3	0.1	1.5	0.3	-0.2

Legenda (cores das células):

Valores mais altos

Valores mais baixos



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com as Figuras 40 a 45, foram identificadas algumas características de cada sub-bacia e a ocorrência de períodos secos e úmidos em cada uma. A sub-bacia do Alto Tietê manifestou 58,4% da área em condições normais, 20,9% em condições úmidas e 20,7% em condições secas. A Sorocaba/Médio Tietê manifestou 55,4% da área em condições normais, 22,3% em condições úmidas e 22,3% em condições secas. A Piracicaba/Capivari/Jundiaí manifestou 60,5% da área em condições normais, 20,7% em condições úmidas e 18,8% em condições secas, sendo a bacia com maior porcentagem de condição normal. A Tietê-Jacaré manifestou 57,4% da área em condições normais, 21,4% em condições úmidas e 21,2% em condições secas. A Tietê-Batalha manifestou 51,8% da área em condições normais, 23,4% em condições úmidas e 24,9% em condições secas, sendo a bacia com menor porcentagem de condição normal entre todas as estudadas. Por fim, a Baixo Tietê manifestou 55,9% da área em condições normais, 20,4% em condições úmidas e 23,6% em condições secas.

A sub-bacia que apresentou a maior porcentagem de área seca acumulada para os 30 anos analisados foi a Tietê-Batalha com 746,3%, seguida pela Baixo Tietê (709,1%), Sorocaba/Médio Tietê (668,6%), Tietê-Jacaré (634,9%), Alto Tietê (621,7%) e Piracicaba/Capivari/Jundiaí (620,7%). Considerando os valores observados nas seis sub-bacias examinadas, foi proposta a classificação da probabilidade para a matriz de risco a partir da Tabela 13.

Tabela 13 – Probabilidade referente à Seca Acumulada para um período de referência de 30 anos

Seca Acumulada (%)	Probabilidade
720-750	Máxima (1)
690-720	Alta (2)
660-690	Média (3)
630-660	Baixa (4)
600-630	Mínima (5)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

As Tabelas 14 a 19 apresentam um compilados dos anos com eventos extremos observados e a ocorrência dos eventos ENOS em cada sub-bacia.

Tabela 14 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Alto Tietê (06) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS

PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES ÚMIDAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1988	-0,8	La Niña (forte)
1991	0,6	El Niño (forte)
1995	-0,2	El Niño / La Niña (moderado)
1996	-0,5	La Niña (moderado)
2009	0,3	La Niña / El Niño (fraco / moderado)
2010	-0,5	El Niño / La Niña (moderado / forte)
PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES SECAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1999	-1,2	La Niña (forte)
2003	0,3	El Niño (moderado)
2007	-0,6	El Niño / La Niña (moderado / forte)
2014	0,1	El Niño (fraco)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 15 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê (10) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS

PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES ÚMIDAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1991	0,6	El Niño (forte)
1995	-0,2	El Niño / La Niña (moderado)
1997	1,2	El Niño (Muito Forte)
2009	0,3	La Niña / El Niño (fraco / moderado)
2015	1,5	El Niño (fraco / muito forte)
2016	0,3	El Niño / La Niña (muito forte / fraco)
2017	-0,2	La Niña (fraco)
PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES SECAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1994	0,5	El Niño (moderado)
1999	-1,2	La Niña (forte)
2008	-0,8	La Niña (forte / fraco)
2014	0,1	El Niño (fraco)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 16 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS

PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES ÚMIDAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1991	0,6	El Niño (forte)
1995	-0,2	El Niño / La Niña (moderado)
1996	-0,5	La Niña (moderado)
2009	0,3	La Niña / El Niño (fraco / moderado)
2016	0,3	El Niño / La Niña (muito forte / fraco)
PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES SECAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1994	0,5	El Niño (moderado)
2002	0,6	El Niño (moderado)
2003	0,3	El Niño (moderado)
2014	0,1	El Niño (fraco)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 17 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Tietê-Jacaré (13) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS

PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES ÚMIDAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1995	-0,2	El Niño / La Niña (moderado)
2000	-0,8	La Niña (forte / fraco)
2009	0,3	La Niña / El Niño (fraco / moderado)
2011	-0,9	La Niña (forte / moderado)
2013	-0,3	Neutro
PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES SECAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1994	0,5	El Niño (moderado)
2006	0,1	La Niña / El Niño (fraco)
2014	0,1	El Niño (fraco)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 18 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Tietê-Batalha (16) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS

PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES ÚMIDAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1989	-0,6	La Niña (forte)
1995	-0,2	El Niño / La Niña (moderado)
2009	0,3	La Niña / El Niño (fraco / moderado)
2015	1,5	El Niño (fraco / muito forte)
2016	0,3	El Niño / La Niña (muito forte / fraco)
PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES SECAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1996	-0,5	La Niña (moderado)
2002	0,6	El Niño (moderado)
2005	0,0	El Niño / La Niña (fraco)
2008	-0,8	La Niña (forte / fraco)
2010	-0,5	El Niño / La Niña (moderado / forte)
2014	0,1	El Niño (fraco)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 19 – Períodos de umidade e seca na sub-bacia do Baixo Tietê (19) entre 1988 e 2017 e seus respectivos eventos ENOS

PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES ÚMIDAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1989	-0,6	La Niña (forte)
1998	-0,1	El Niño / La Niña (muito forte / forte)
2009	0,3	La Niña / El Niño (fraco / moderado)
2015	1,5	El Niño (fraco / muito forte)
2017	-0,2	La Niña (fraco)
PERÍODOS COM MAIS DE 50% DA ÁREA EM CONDIÇÕES SECAS		
ANO	MÉDIA ANUAL DO ONI (°C)	EVENTO ENOS OBSERVADO
1994	0,5	El Niño (moderado)
2002	0,6	El Niño (moderado)
2010	-0,5	El Niño / La Niña (moderado / forte)
2013	-0,3	Neutro
2014	0,1	El Niño (fraco)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com base nas Tabelas 14 a 19, as sub-bacias com maior ocorrência de anos com mais de 50% da área em condições úmidas ou secas foram a Sorocaba/Médio Tietê e a Tietê-Batalha (11 anos). A sub-bacia com menos ocorrências foi a Tietê-Jacaré, com 8 anos em situações extremas. Em todas as sub-bacias ocorreu eventos de seca no ano de 2014 e eventos de umidade no ano de 2009.

A sub-bacia do Alto Tietê, durante anos em condições úmidas, teve ocorrência de El Niño em quatro dos seis anos, sendo todos eles de intensidade pelo menos moderada. A La Niña ocorreu em cinco dos seis anos, com fraca até forte intensidade. A média do ONI foi de -0,18, sendo correlacionado com eventos La Niña. Em quatro dos seis anos foram observados uma média anual do ONI negativa, porém em baixos valores. Nos anos em condições secas, houve El Niño em três dos quatro anos, enquanto a La Niña ocorreu em dois dos quatro anos, ambos em forte intensidade. A média do ONI foi de -0,35, um valor que remete à La Niña.

A sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê, durante anos em condições úmidas, teve ocorrência de El Niño em seis dos sete anos, sendo cinco deles de intensidade pelo menos moderada. A La Niña ocorreu em quatro dos sete anos. A média do ONI foi de 0,5, um valor que remete à eventos El Niño. Em cinco dos sete anos foram observados

uma média anual do ONI positiva. Nos anos em condições secas, houve El Niño em dois dos quatro anos, assim como a La Niña, ambos em diversas intensidades. A média do ONI foi de -0,35, um valor que remete à La Niña.

A sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí, durante anos em condições úmidas, teve ocorrência de El Niño em quatro dos cinco anos, sendo todos eles de intensidade pelo menos moderada. A La Niña também ocorreu em quatro dos cinco anos, porém com intensidades fraca e moderada. A média do ONI foi de 0,1, um valor praticamente neutro. Nos anos em condições secas, houve El Niño em todos os anos (quatro), enquanto a La Niña não ocorreu em nenhum ano. A média do ONI foi de 0,375, um valor que remete ao El Niño.

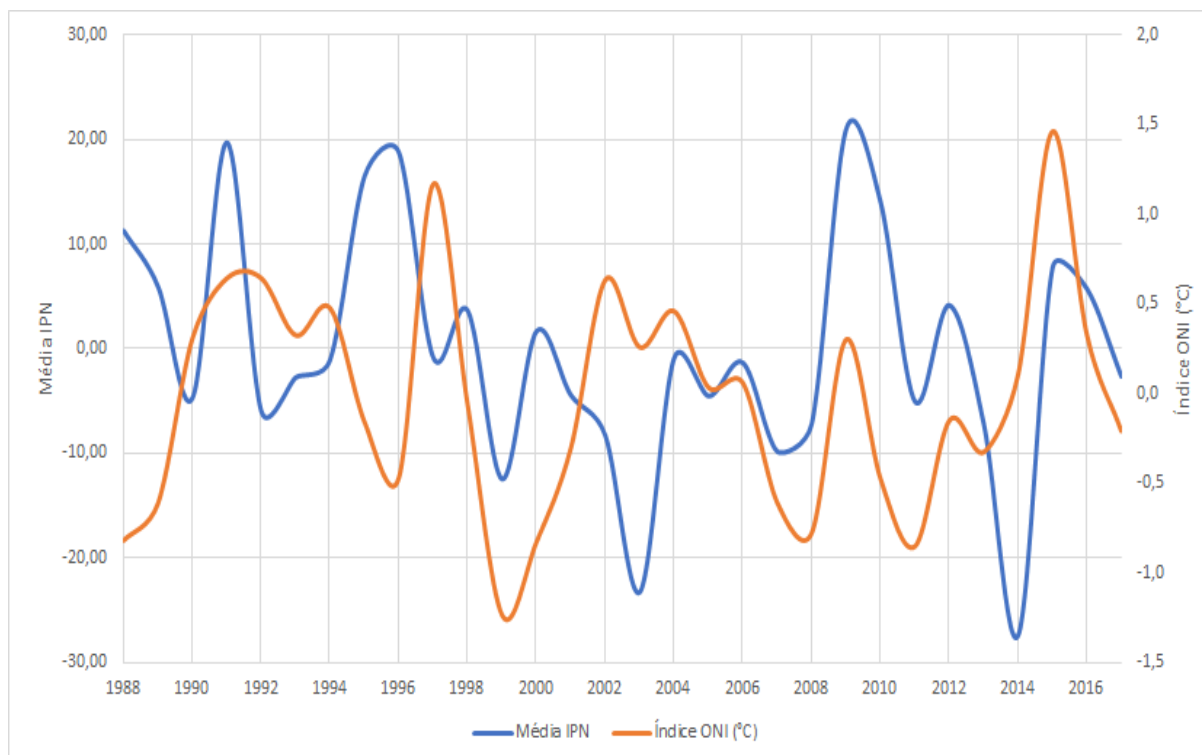
A sub-bacia do Tietê-Jacaré, durante anos em condições úmidas, teve ocorrência de El Niño em dois dos cinco anos, sendo todos eles de intensidade moderada. A La Niña ocorreu em quatro dos cinco anos. A média do ONI foi de -0,38, um valor que remete à La Niña. Nos anos em condições secas, houve El Niño em todos os anos (três), enquanto a La Niña ocorreu em apenas um ano. A média do ONI foi de 0,23, um valor que remete ao El Niño.

A sub-bacia do Tietê-Batalha, durante anos em condições úmidas, teve ocorrência de El Niño em quatro dos cinco anos, assim como a La Niña. A média do ONI foi de 0,26, um valor que remete ao El Niño. Nos anos em condições secas, houve El Niño em quatro dos seis anos, assim como a La Niña. A média do ONI foi de -0,183, um valor que remete a La Niña.

A sub-bacia do Baixo Tietê, durante anos em condições úmidas, teve ocorrência de El Niño em três dos cinco anos. A La Niña ocorreu em quatro dos cinco. A média do ONI foi de 0,18, um valor que remete ao El Niño. Nos anos em condições secas, houve El Niño em quatro dos cinco anos, enquanto a La Niña ocorreu em apenas um. A média do ONI foi de 0,08, um valor neutro.

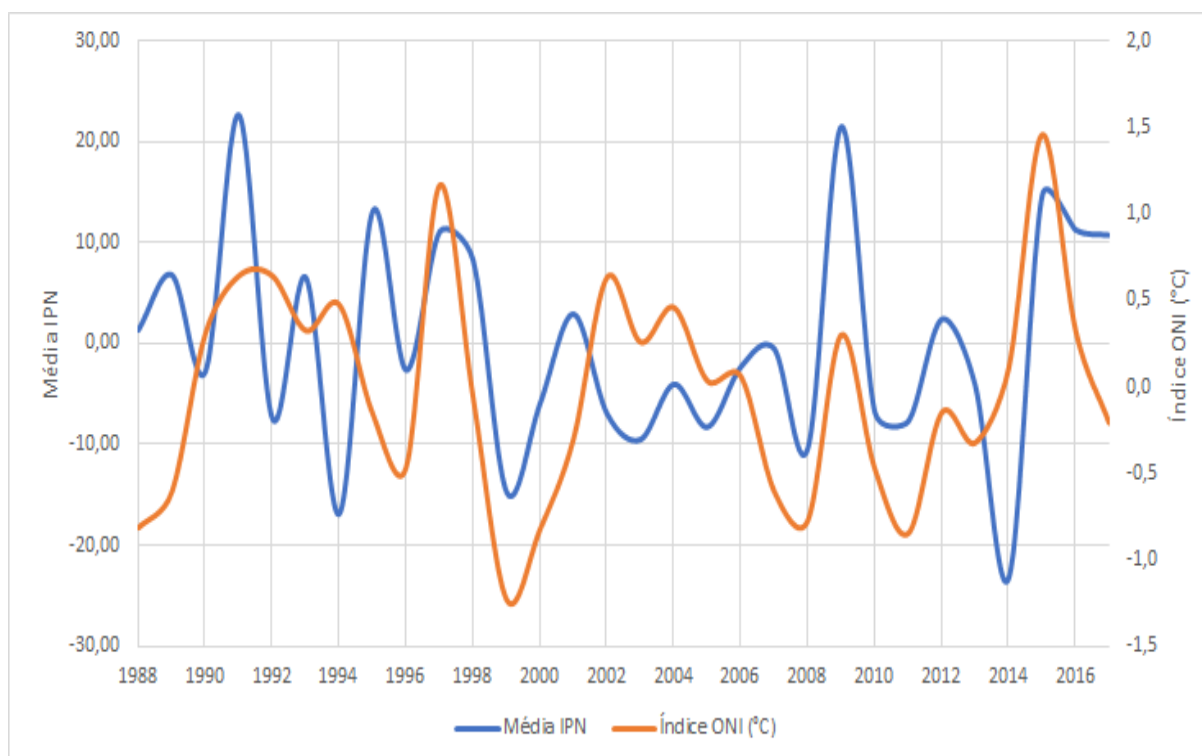
Visando uma representatividade gráfica, elaborou-se as Figuras 46 a 51, as quais ilustram a relação entre as médias de IPN com as médias do índice ONI para cada ano estudado em cada sub-bacia.

Figura 46 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Alto Tietê (06)



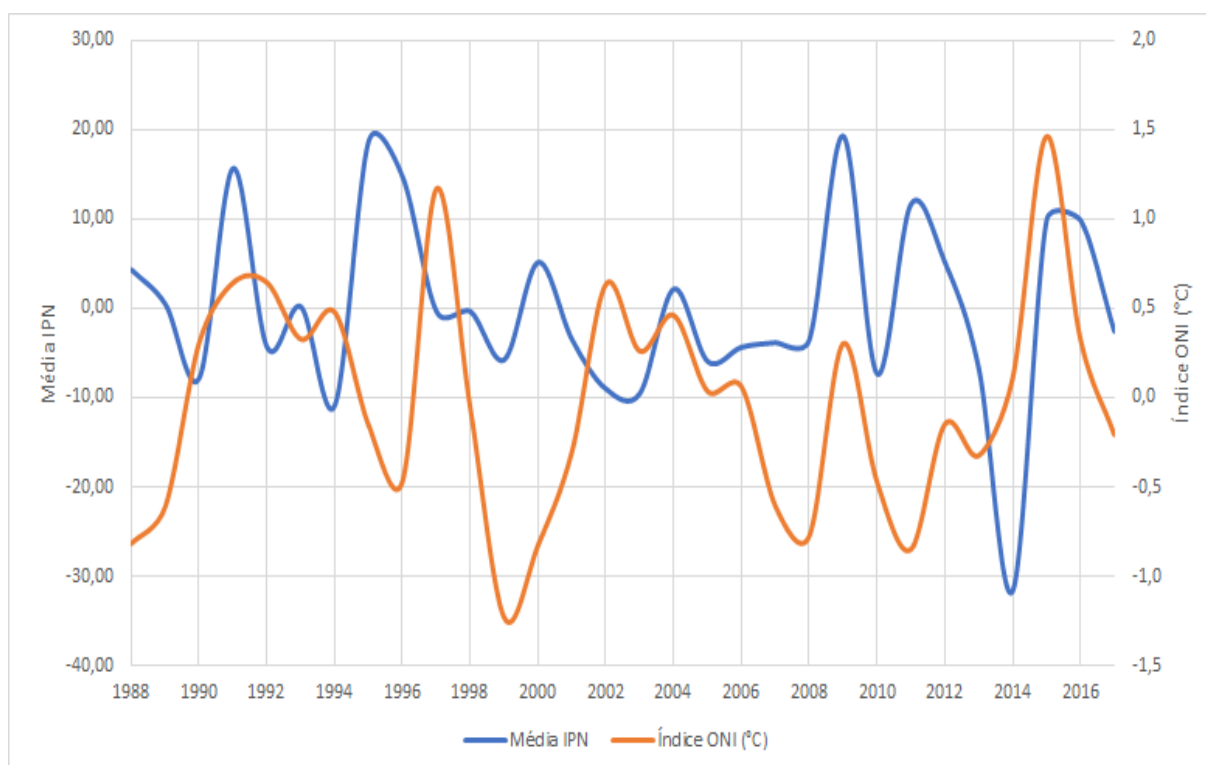
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 47 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê (10)



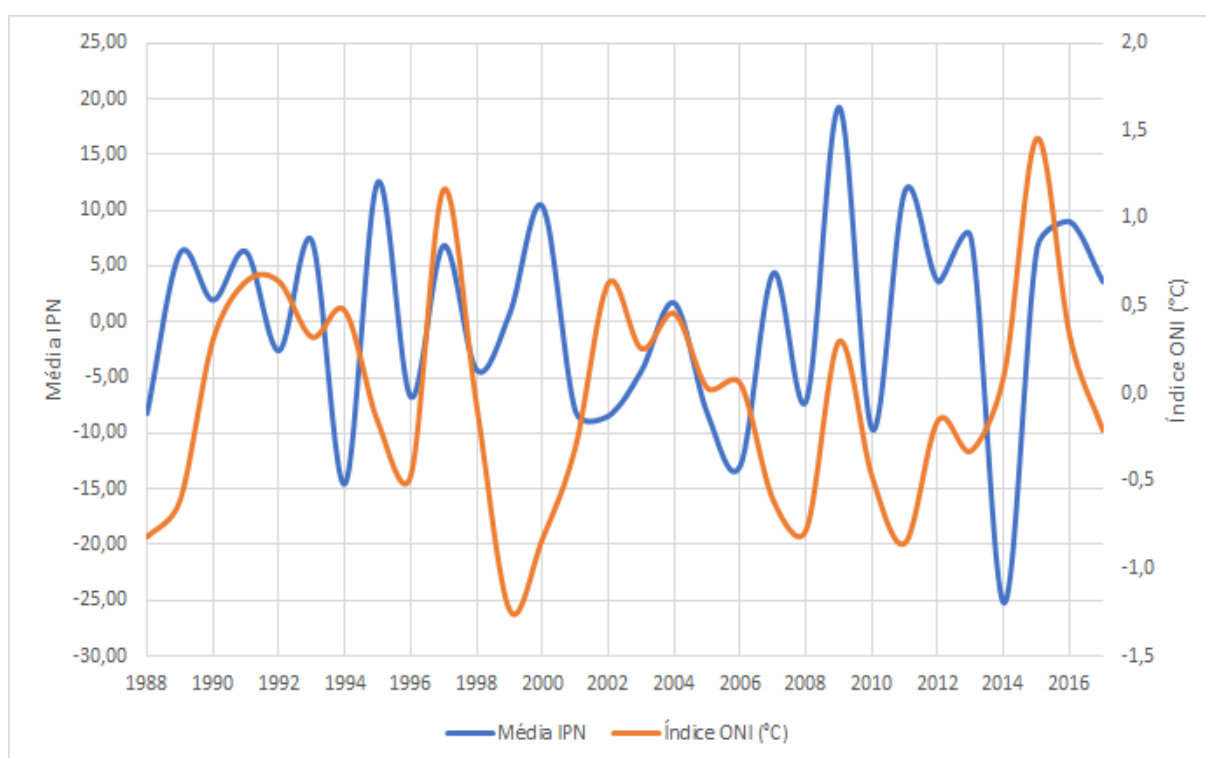
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 48 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiá (05)



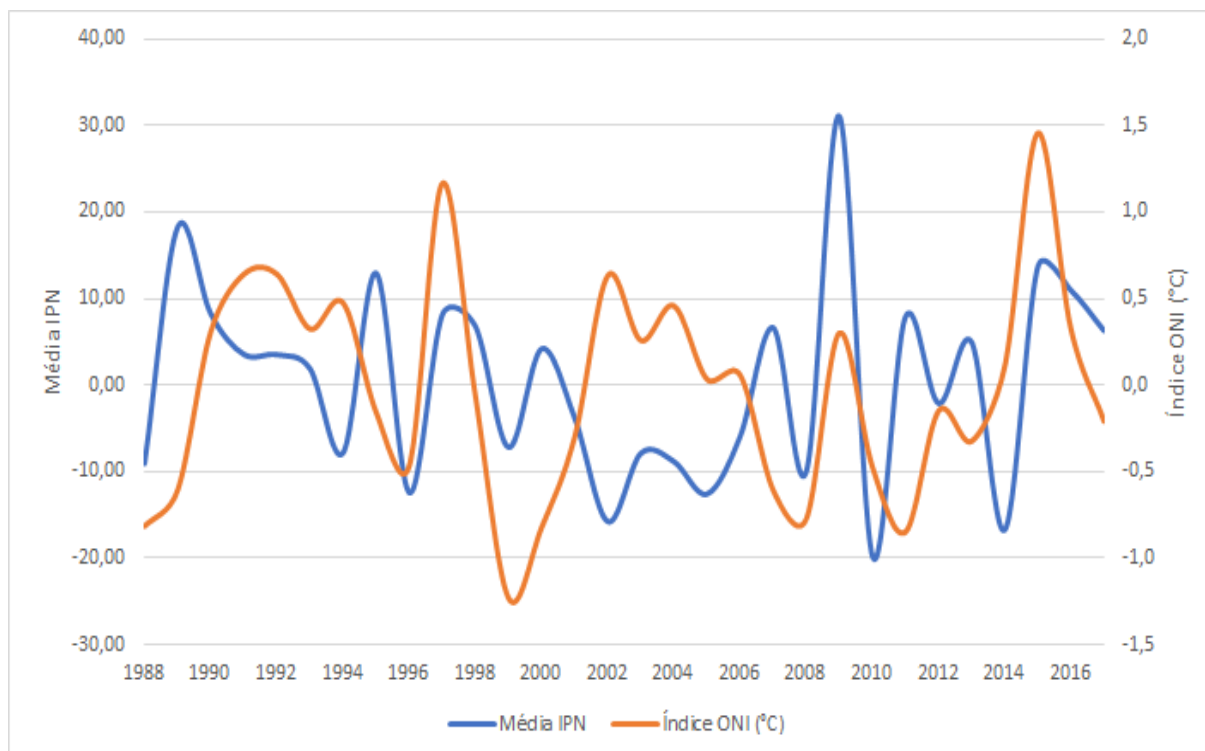
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 49 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Tietê-Jacaré (13)



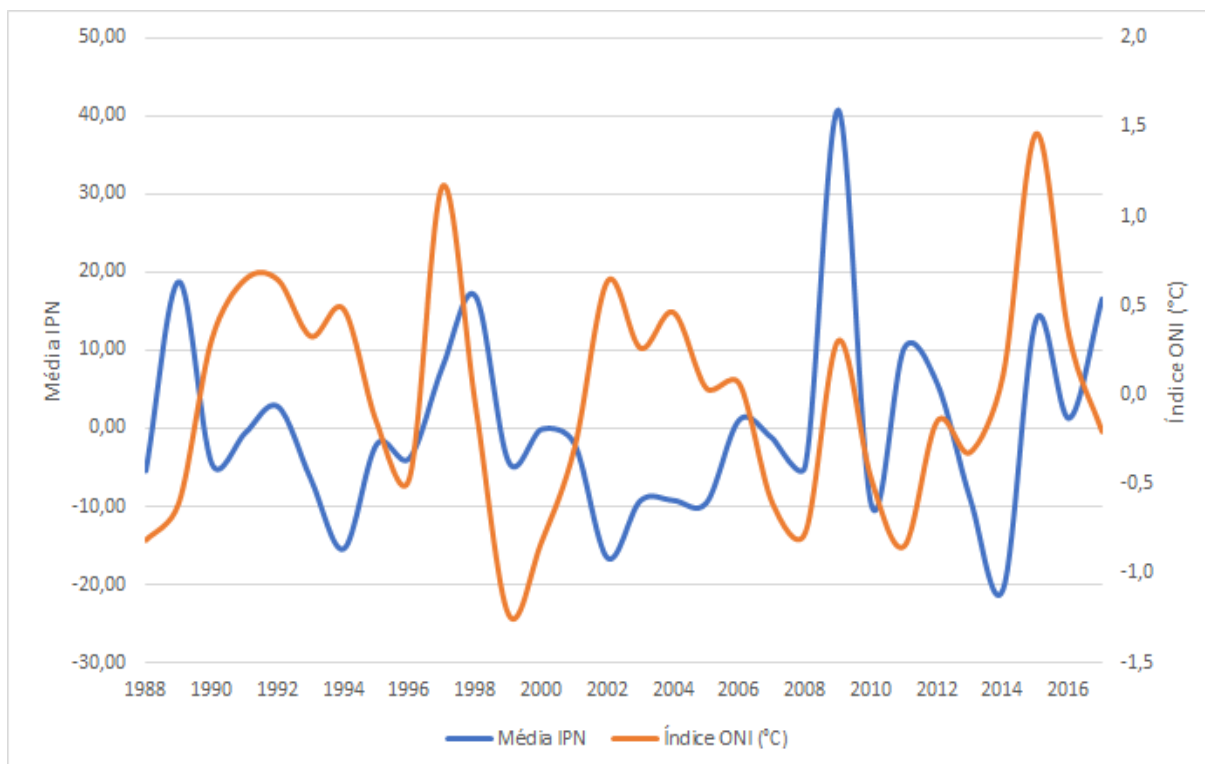
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 50 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Tietê-Batalha (16)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 51 – Relação entre Médias anuais de IPN com médias anuais do Índice ONI na sub-bacia do Baixo Tietê (19)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De maneira geral, nenhuma sub-bacia apresentou tendências bem definidas de ocorrência de eventos de umidade ou seca com os eventos ENOS, mais especificamente eventos úmidos durante o El Niño e eventos de seca durante a La Niña. Em todos os eventos úmidos e secos observados, tanto El Niño quanto a La Niña, evidenciam que não há uma correlação direta entre estes fenômenos e as variações na precipitação. Destaca-se apenas a bacia do Piracicaba/Capivari/Jundiaí, que durante os eventos de seca apenas foram observados eventos El Niño.

A sub-bacia que mais apresentou correlação de eventos úmidos com o El Niño e eventos de seca com a La Niña foi a Sorocaba/Médio Tietê, onde foi observada a maior média anual do ONI em eventos úmidos e a segunda menor média anual do ONI em evento de seca, além de graficamente as curvas da média do IPN com o Índice ONI estarem mais alinhadas que os demais gráficos.

Diante a todas ilustrações e análises expostas neste item, a relação dos eventos ENOS com os índices pluviométricos na BHRT é inconclusiva. Alguns estudos confirmam esta afirmação, conforme Azevedo et al. (2021), que concluiu que não se pode fazer uma associação linear entre a La Niña e alterações nos índices pluviométricos no Brasil, Maia (2022), que teve resultados inconclusivos sobre a relação entre os fenômenos ENOS e as chuvas na BHRT entre os anos de 1981 e 2020, De Freitas et al. (2023), que, ao estudar eventos chuvosos ao longo da seca de 2016-2021 na bacia hidrográfica do rio Paraná, não observou padrões ou tendências com os eventos ENOS e, por fim, Silva et al. (2012), que não observaram influência direta entre os fenômenos e as precipitações na bacia do Rio Araguari, em Minas Gerais (bacia próxima à BHRT), entre os anos de 1941 e 2011.

5.4 Classificação pelo índice de risco à secas - IRS

A partir da metodologia proposta no item 4.6, cada sub-bacia do rio Tietê foi classificada pelo Índice de Risco à Secas (IRS). A Tabela 20 ilustra os valores obtidos para cada sub-bacia, enquanto as Tabelas 21 e 22 apresentam as classificações obtidas.

Tabela 20 – Valores obtidos para cada sub-bacia do rio Tietê

Sub-bacia	S_A (%)	A_H (m³/s)	U_A (%)	G_H (MW)	M_H (km)
Alto Tietê (06)	621,7	56,87	24,76	48	0
Sorocaba/Médio Tietê (10)	668,6	24,23	52,02	234	94
Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05)	620,7	93,88	54,38	58	176
Tietê/Jacaré (13)	634,9	28,63	74,52	288	136
Tietê/Batalha (16)	746,3	23,27	69,25	264	109
Baixo Tietê (19)	709,1	19,14	60,61	1155	245

Fonte: Elaboração do próprio autor.

S_A = Seca Acumulada; A_H = Abastecimento Hídrico; U_A = Uso Agrícola; G_H = Geração Hidrelétrica; M_H = Malha Hidroviária.

Tabela 21 – Classificação de cada parâmetro em cada sub-bacia do rio Tietê e DPA obtido

Sub-bacia	S_A (%)	A_H (m³/s)	U_A (%)	G_H (MW)	M_H (km)	DPA
Alto Tietê (06)	5	3	5	5	5	4,50
Sorocaba/Médio Tietê (10)	3	4	3	4	4	3,75
Piracicaba/Capivari/Jundiaí (05)	5	1	3	5	2	2,75
Tietê/Jacaré (13)	4	4	1	4	3	3,00
Tietê/Batalha (16)	1	4	2	4	4	3,50
Baixo Tietê (19)	2	5	2	1	1	2,25

Legenda	
	Parâmetro com máximo risco
	Parâmetro com alto risco
	Parâmetro com médio risco
	Parâmetro com baixo risco
	Parâmetro com mínimo risco

Fonte: Elaboração do próprio autor.

S_A = Seca Acumulada; A_H = Abastecimento Hídrico; U_A = Uso Agrícola; G_H = Geração Hidrelétrica; M_H = Malha Hidroviária.

Tabela 22 – IRS para cada sub-bacia do rio Tietê

Matriz de Risco à Secas					
Potencial de ocorrer Seca (Perigo)	Máxima		TB-16		
	Alta			BT-19	
	Média		SMT-10		
	Baixa			TJ-13	
	Mínima	AT-06		PCJ-05	
	Mínimo	Baixo	Médio	Alto	Máximo
Dano Potencial Associado à Secas (Vulnerabilidade e Exposição)					

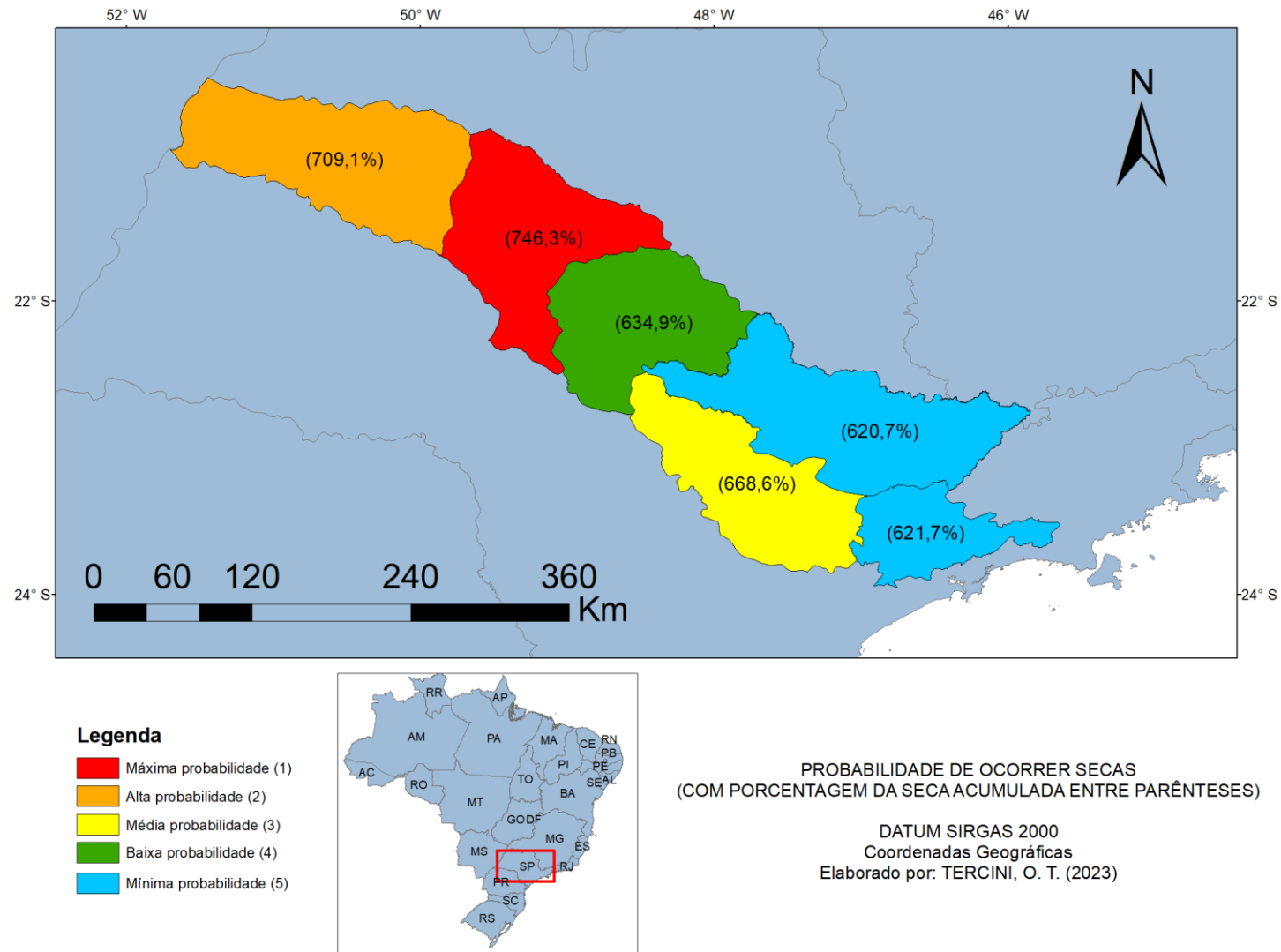
Legenda	
	Risco Máximo
	Risco Alto
	Risco Médio
	Risco Baixo
	Risco Mínimo

Fonte: Elaboração do próprio autor.

AT-06= Alto Tietê; SMT-10= Sorocaba/Médio Tietê; PCJ-05= Piracicaba/Capivari/Jundiaí; TJ-13= Tietê/Jacaré; TB-16= Tietê/Batalha; BT-19= Baixo Tietê.

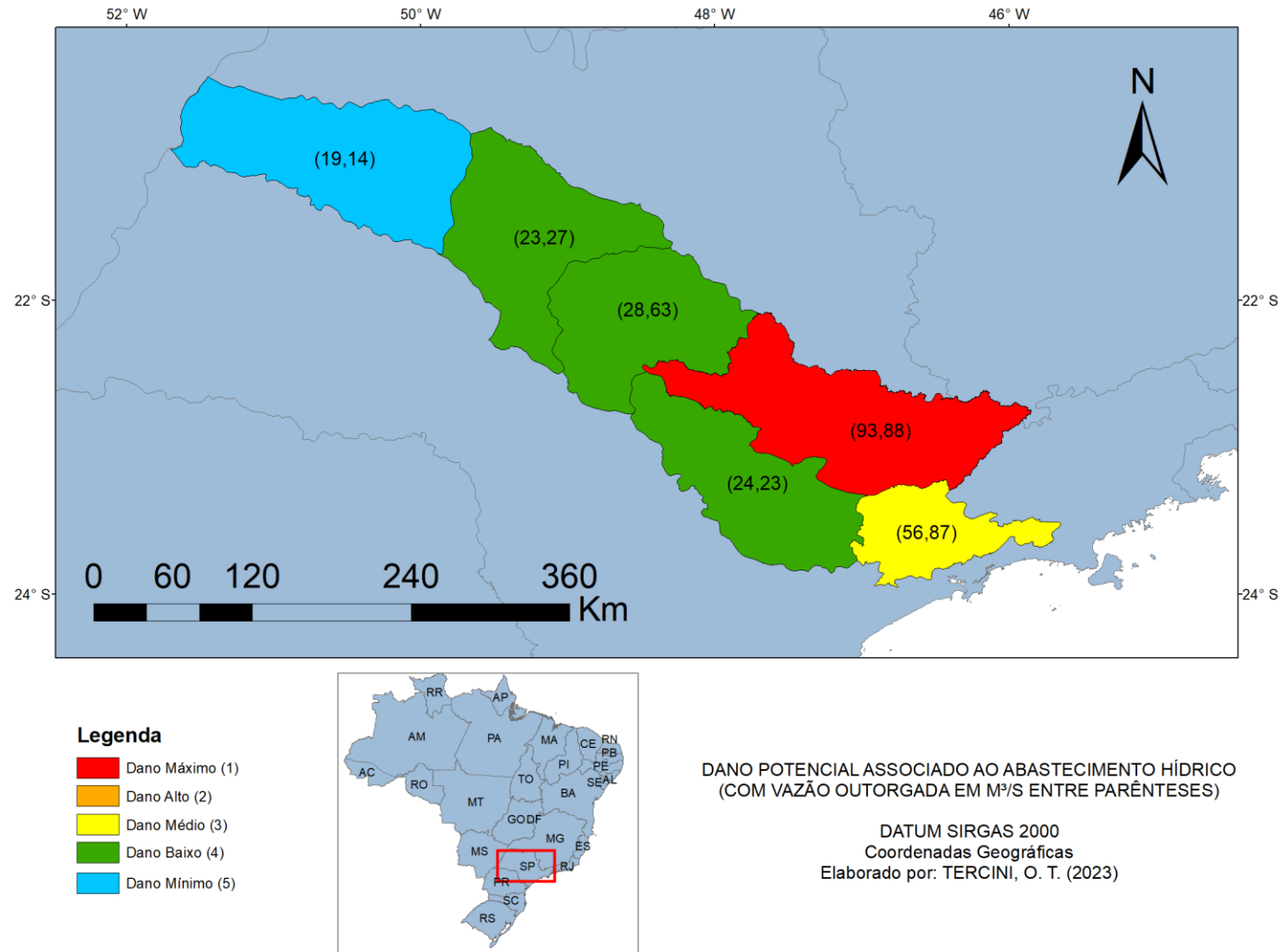
Os mapas referentes aos resultados das classificações são apresentados nas Figuras 52 a 57.

Figura 52 – Probabilidade de ocorrer secas na BHRT (porcentagem da seca acumulada em 30 anos, de 1988 a 2017)



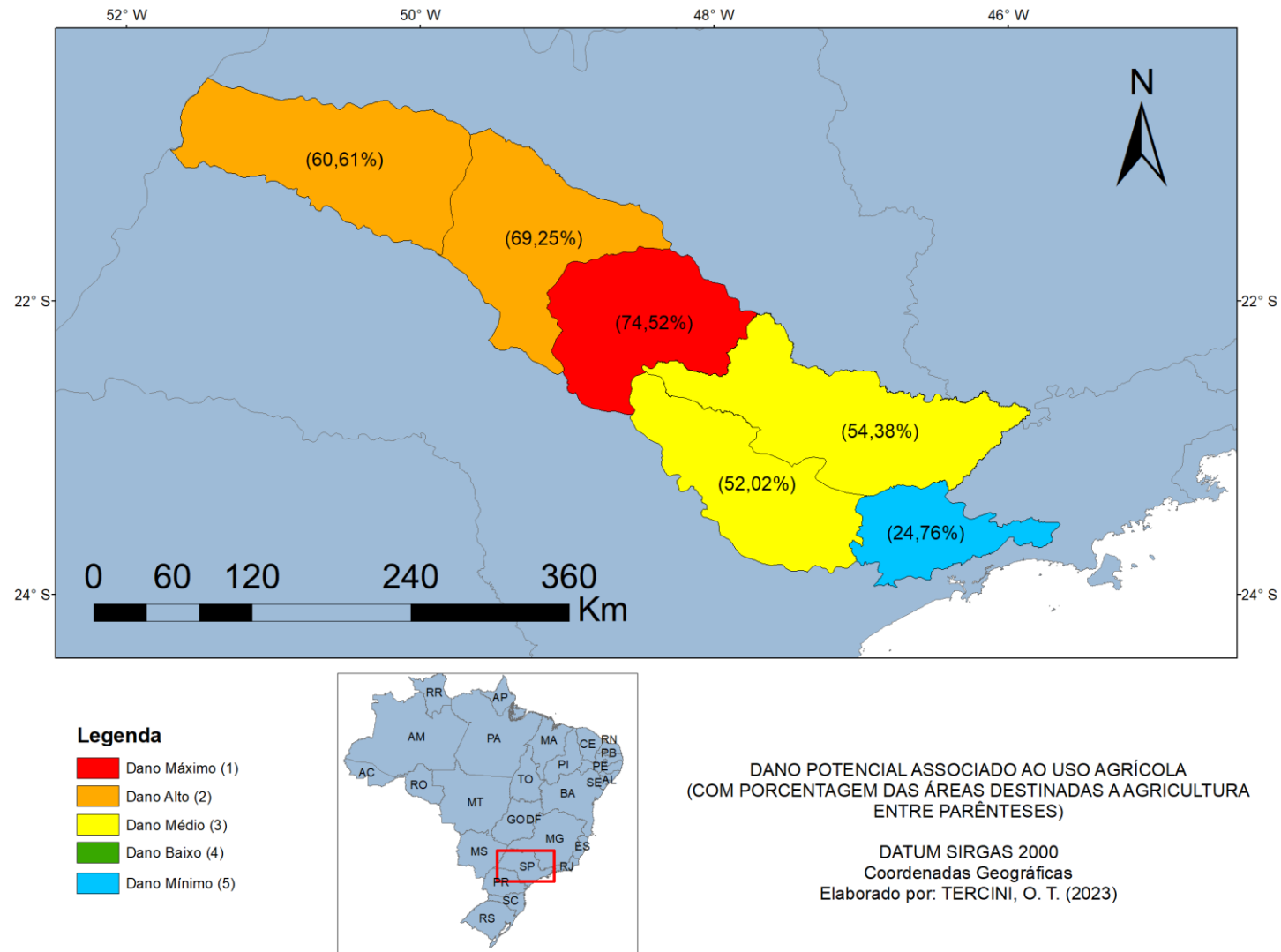
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 53 – Dano potencial associado ao abastecimento hídrico na BHRT (vazão outorgada entre parênteses)



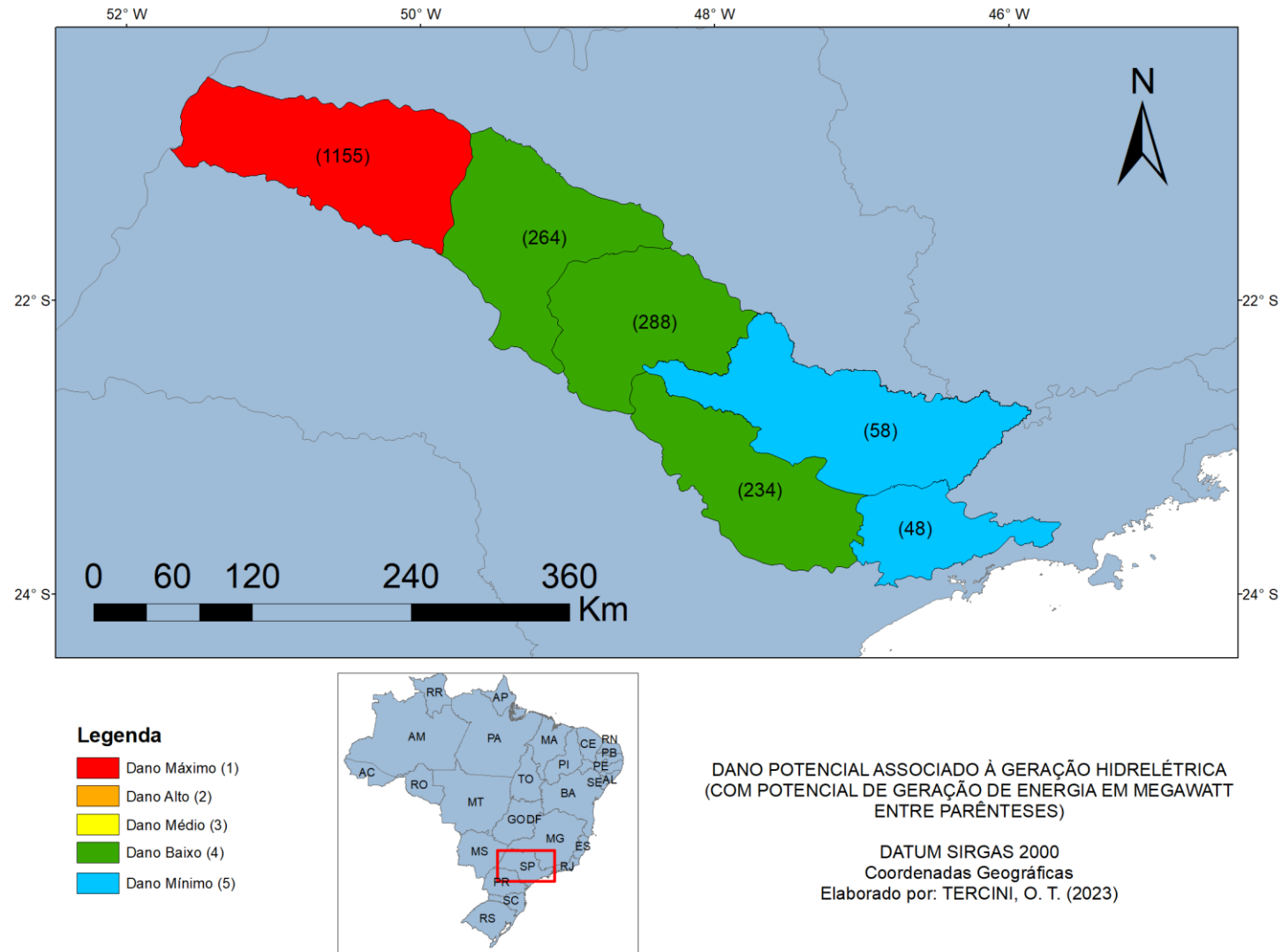
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 54 – Dano potencial associado ao uso agrícola (porcentagem das áreas destinadas à agricultura entre parênteses)



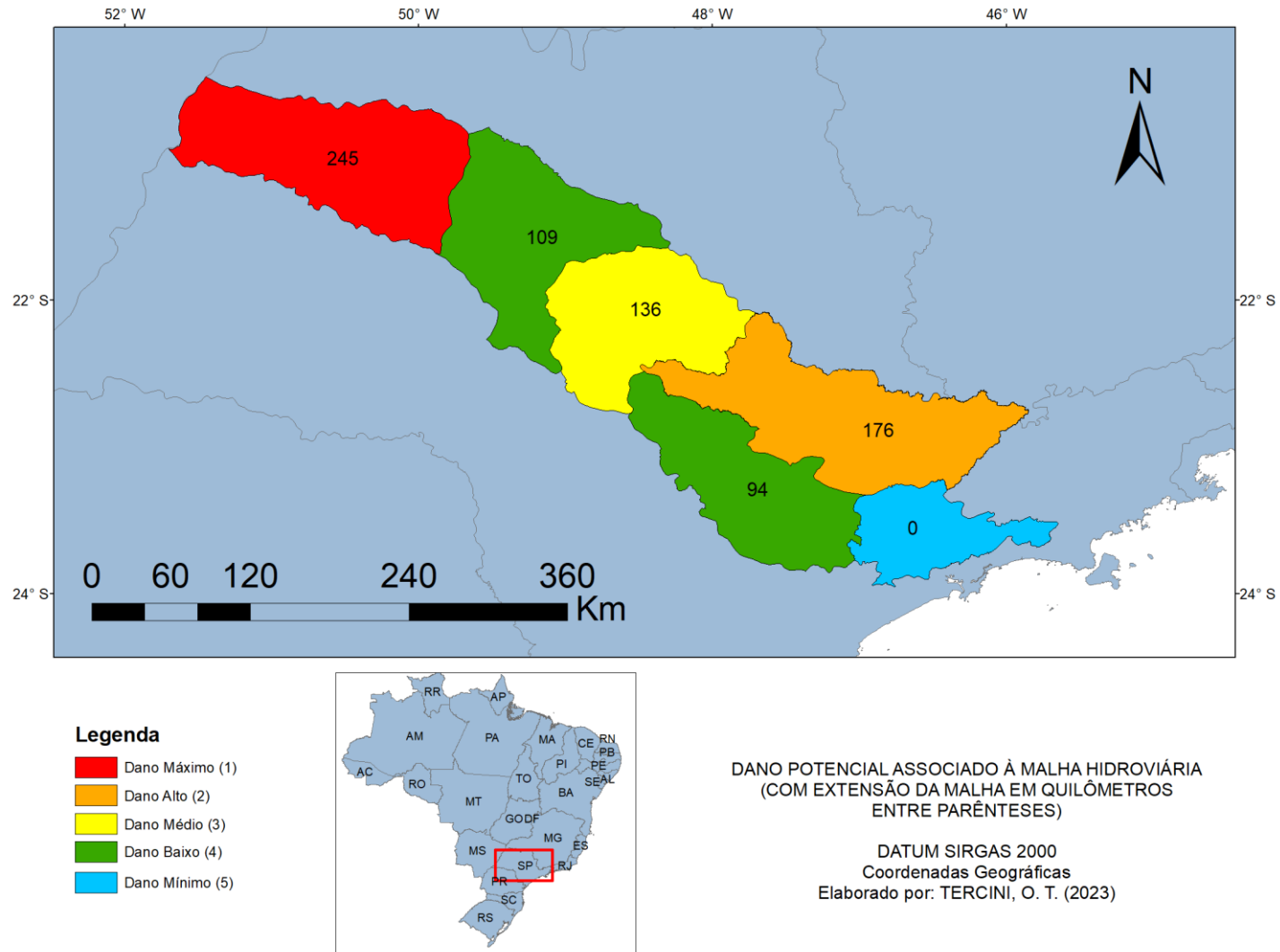
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 55 – Dano potencial associado à geração hidrelétrica (potencial de geração de energia em megawatt entre parênteses)



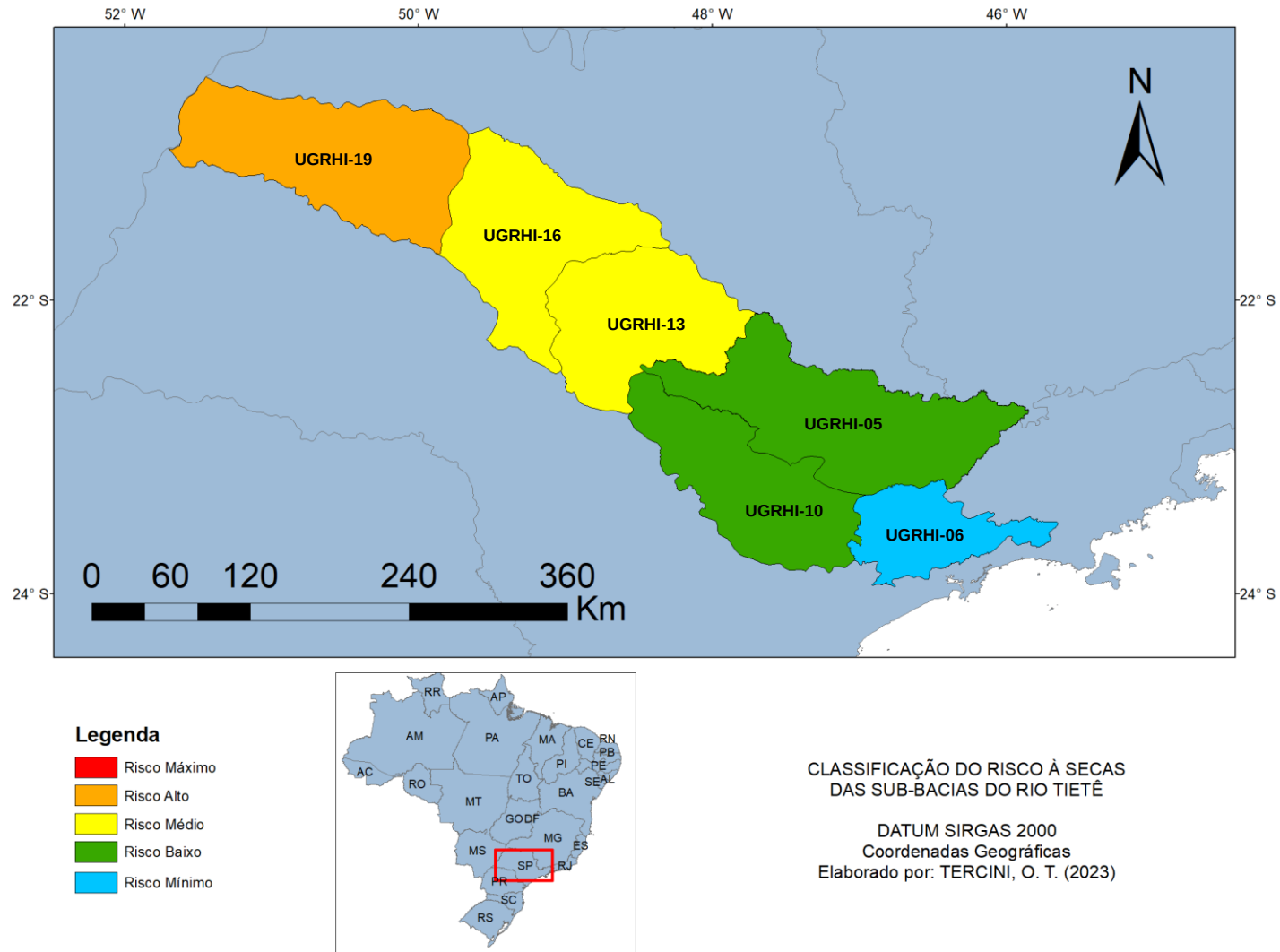
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 56 – Dano potencial associado à malha hidroviária (extensão da malha em quilômetro entre parênteses)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 57 – Classificação final do risco à secas das sub-bacias do rio Tietê



A Figura 52 apresenta a probabilidade de ocorrer secas na BHRT, sendo a precipitação acumulada o parâmetro correlacionado com a probabilidade. Observou-se que, as maiores probabilidade de ocorrer secas se concentraram na região oeste da bacia, onde tem-se as menores alturas pluviométricas e correlacionado com a zona tropical com inverno seco (Aw). As menores probabilidades ficaram nas parcelas com maiores alturas pluviométricas e com classe predominante de zona subtropical úmida com clima oceânico (Cfb). Um resultado semelhante foi encontrado por Petrucci et al (2022), onde foi verificado que, no estado de Minas Gerais, para o período de 1980 a 2017, a classe Aw obteve maiores ocorrências de déficit extremo de chuva, enquanto as classes Cfb, Cwa e Cwb obtiveram menores déficits.

A classificação do dano potencial devido ao abastecimento hídrico (Figura 53) evidenciou que as sub-bacias com maiores população e maiores porcentagens de vazão outorgada em relação à vazão média obtiveram os maiores danos, o que torna claro que bacias mais urbanizadas ou industrializadas têm alta demanda hídrica (São Paulo, 2021; CBH-AT, 2022; CBH-PCJ, 2022). Em secas a Região Metropolitana de São Paulo sofreu com rodízios, cortes de água e aumento nos preços (Mendes, 2008; Fontão, 2018).

A Figura 54 ilustra a classificação do dano potencial ao uso agrícola e manifesta que a área centro-oeste da BHRT tem altas porcentagens da sua área voltada à agricultura. Nestas regiões também se encontra grande parte da área de Argissolo Vermelho presente na bacia, considerado um solo com média infiltração e que auxilia no cultivo (Sartori et al., 2005; IBGE, 2018). Ressalta-se que as secas causam comprometimento da produção agrícola, gerando aumento nos preços (Mendes, 2008; Araújo, 2012).

A classificação do dano potencial referente à geração hidrelétrica foi ilustrada na Figura 55. Observa-se que a parcela centro-oeste apresenta usinas hidrelétricas com grandes potenciais, como UHE Três Irmãos, UHE Nova Avanhandava, UHE Promissão, UHE Ibitinga e UHE Bariri (ONS, 2023). A seca diminui e pode até interromper a geração de energia, fazendo com que as usinas térmicas sejam acionadas, aumentando o preço da energia e a poluição (Mendes, 2008; Gelinski Neto, 2014).

A classificação dos impactos associados à malha hidroviária pode ser observada na Figura 56. A malha hidroviária da BHRT é composta basicamente pelos rios Tietê e Piracicaba (DNIT, 2018). Foi averiguado que a maior bacia (Baixo Tietê)

teve o maior dano entre as bacias analisadas, enquanto a sub-bacia do Alto Tietê teve o menor dano. Principalmente devido ao fato de a hidrovia iniciar na sub-bacia do Sorocaba/Médio Tietê. O estudo de Amorim (2022), analisa os impactos das secas na hidrovia do rio Tietê, porém não é analisado comparando os impactos entre as sub-bacias. Destaca-se ainda que as secas prejudicam os deslocamentos de diversos produtos pelas hidrovias, elevando custos e provocando atrasos (Gelinski Neto, 2014; Amorim, 2022).

Desse modo, a partir da Tabela 21, o Baixo Tietê obteve DPA alto, seguido pelo Piracicaba/Capivari/Jundiaí e Tietê/Jacaré, que obtiveram DPAs médios. As bacias Tietê/Batalha e Sorocaba/Médio Tietê obtiveram DPAs baixos e, por fim, tem-se o Alto Tietê, que foi classificado com um DPA mínimo.

Atribuindo os respectivos DPAs e potencial de ocorrer secas na matriz ilustrada na Figura 21, obteve-se a Figura 57, onde o Baixo Tietê obteve risco alto, seguido pelo Tietê/Batalha e Tietê/Jacaré, que obtiveram risco médio. As bacias Sorocaba/Médio Tietê e Piracicaba/Capivari/Jundiaí foram classificadas com risco baixo enquanto a bacia do Alto Tietê foi classificada com risco mínimo.

Destaca-se que este índice visa classificar as bacias individualmente, com o objetivo de compreender qual delas está mais suscetível ao risco de eventos de secas em relação as demais. Como todas as sub-bacias deste estudo fazem parte de uma mesma bacia, tem-se também o efeito em cascata, ou seja, uma crise hídrica no Alto Tietê afeta as sub-bacias a jusante (Sorocaba/Médio Tietê, Tietê/Jacaré, Tietê/Batalha e Baixo Tietê). Isto traz uma importância ainda maior para as bacias de montante, como é o caso da bacia do Alto Tietê, apesar do seu risco a seca ser mínimo.

Por fim, o resultado do índice (Figura 57) demonstrou resultados satisfatórios, visto que a bacia com alto risco (BT-19) tem a segunda maior seca acumulada, maior potencial de geração hidrelétrica, maior extensão navegável, além de ter mais da metade do uso e ocupação do solo destinado à agricultura. Por outro lado, a bacia com risco mínimo (AT-06) tem o menor potencial de geração hidrelétrica, menor extensão navegável, menor área destinada à uso agrícola e segunda menor seca acumulada nos trinta anos avaliados.

6 CONCLUSÃO

Os dados de precipitação coletados ao longo do trabalho (de 1988 até 2017) têm forte dependência espacial, evidenciando que, para esta amostragem, a geoestatística pode gerar mapas satisfatórios na região estudada. Os semivariogramas e mapas gerados ao longo do estudo se mostraram confiáveis e condizentes com a realidade.

Com a metodologia exposta, foi possível analisar a distribuição das chuvas e de eventos de seca e umidade na Bacia Hidrográfica do rio Tietê.

Analisando a ocorrência dos eventos ENOS e correlacionando-os com as alturas pluviométricos e eventos extremos nos trinta anos estudados, indicou-se que estes eventos parecem não exercer uma influência direta na área de estudo, talvez pela magnitude e posicionamento da área de estudo.

O Índice de Risco a Secas, elaborado no decorrer do trabalho, apresentou-se como uma metodologia aceitável para análise do risco quanto às secas em bacias hidrográficas. Vale destacar que essa classificação permite ter uma visão geral do risco hídrico nas bacias analisadas quanto a escassez hídrica, sendo extremamente importante para agências pertinentes e/ou comitês de bacias na tomada de decisões, principalmente em regiões de grande importância econômica como a bacia hidrográfica do rio Tietê.

Por fim, conclui-se que a metodologia empregada neste trabalho obteve resultados satisfatórios, desde a obtenção dos dados, até na geração de mapas, análise das chuvas, análise dos eventos de seca e classificação do risco das bacias hidrográficas, servindo de informação para gestão hídrica nas sub-bacias do rio Tietê. Recomenda-se o emprego da metodologia proposta em outras bacias hidrográficas para verificação da sua aplicabilidade, com as devidas alterações nas tabelas de DPA e probabilidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, O. E. C. **Informação Hidrometeorológica na regulação do setor elétrico brasileiro**: indicadores de avaliação de disponibilidade hídrica. 2014. 72 p. Relatório final de projeto de pesquisa (Pós-doutorado em Ciências Atmosféricas) – Universidade de São Paulo, Instituto de astronomia, geofísica e ciências atmosféricas, São Paulo, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Catálogo de Metadados da ANA**: Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio Tietê. 2015a. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/29c5995f-5bbd-4698-b301-694a3c1ca748>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras. Brasília, ANA, 2015b. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília, ANA, 112p, 2019. Disponível em: <<https://sinapse.gife.org.br/download/plano-nacional-de-seguranca-hidrica>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Atlas águas**: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília, ANA, 2021a. Disponível em: <<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Monitor de Secas**. 2021b. Disponível em: <<https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=11&ano=2021>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Hidroweb. v. 3.2.7**. Sistema de informações hidrológicas, 2022. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022**: informe anual. Brasília, ANA, 2023. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. Ed. Brasília: ANEEL, 243 p, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**, Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração, 2022. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibjNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiJR9>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **TKU 2021: TKU da navegação interior, cabotagem e longo curso em vias interiores – 2021**, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Brasília: ANTAQ, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/antag/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antag-1>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS – ANTAQ. **Painél Estatístico Aquaviário versão 2.1.4**, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Brasília: ANTAQ, 2023. Disponível em: <<http://ea.antag.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantag%20-%20anuario%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true>>.

ALCÂNTARA, E. H. Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e vazão fluvial: o caso do estuário do rio Anil. **Caminhos da Geografia**, 8 (12), p. 158-173, 2004. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15345/8644>>.

ALCÂNTARA, L. R. P.; SILVA, M. E. R.; NETO, S. M. dos S.; LAFAYETTE, F. B.; COUTINHO, A. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D. Mudanças climáticas e tendências do regime pluviométrico do Recife. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, e178932583, p. 1-21, 2020. <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2583>>.

ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; PAIVA, Y. G.; RASCON, N. L.; LIMA, E. P. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 354-358, 2011. <<http://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400004>>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. Disponível em: <http://143.107.18.37/material/mftandra2/ACA0225/Alvares_etal_Koppen_climate_classificationBrazil_MeteoZei_2014.pdf>.

AMARAL, I. R.; GRIPP, A. H.; VERSIANI, B. R. Análise espacial de eventos máximos de precipitação pelo método geoestatístico: estudo para bacias do alto rio São Francisco e alto rio Doce. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=19&SUMARIO=4458&ST=analise_espacial_de_eventos_maximos_de_precipitacao_pelo_metodo_geoestatistico_estudo_para_bacias_do_alto_rio_sao_francisco_e_alto_rio_doce>.

AMORIM, V. H. do N. **Influência da crise hídrica no transporte hidroviário do trecho Tietê-Paraná**. 2022. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-Related Rainfall Anomalies in South America and Associated Circulation Features during Warm and Cold Pacific Decadal

Oscillation Regimes. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 2017-2030, 2005. <<https://doi.org/10.1002/joc.1222>>.

ARAÚJO, P. H. C. **Eventos climáticos extremos: os efeitos dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a produtividade agrícola das regiões nordeste e sul do Brasil**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/68>>.

ARAÚJO, R. G.; ANDREOLI, R. V.; CANDIDO, L. A.; KAYANO, M. T.; SOUZA, A. F. A influência do evento El Niño – Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Geociências Acta Amazonica**, v. 43 (4), p. 469-480, 2013. <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000400009>>.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 351-364, 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>>.

AZEVEDO, A.; MACHADO, A.; GONÇALVES, F.; TELES, P.; CUNHA, P. Perspectivas da crise hídrica em 2022: risco além dos modelos. **FGV Energia**, 2021. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/32079/artigo_crise_hidrica_rev4.pdf?sequence=1>.

BALLAH, A.; BENAABIDATE, L. Assessing the performance of various meteorological drought indices in capturing historic droughts in the south of Algeria. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, 1289, 2021. <<https://doi.org/10.1007/s12517-021-07556-8>>.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.), **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. Ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. p. 177-243.

BÖHNISCH, A.; MITTERMEIER, M.; LEDUC, M.; LUDWIG, R. Hot Spots and Climate Trends of Meteorological Droughts in Europe—Assessing the Percent of Normal Index in a Single-Model Initial-Condition Large Ensemble. **Frontiers in Water**, 3:716621, 2021. <<https://doi.org/10.3389/frwa.2021.716621>>.

BORGES, A.; FUJITA, R. H.; BINDA, A. L. As chuvas do baixo rio Iguaçu (Sudoeste do Paraná) no período de 1976 a 2016. **GEOSUL – Revista do Departamento de Geociências**, v. 36, n. 78, p. 64-85, 2021. <<https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e71496>>.

BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Roteiro hidrovia Tietê-Paraná**, 2ª edição, Niterói, Rio de Janeiro. 146 p. 2016. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1974/rot-tiete-par.pdf>>.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. **Journal of Climatology**, v. 12, p. 2747-2756, 1999. <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2)>.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M. GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 2, n. 3, p. 395-403, 1996. <[https://doi.org/10.1016/0097-8493\(96\)00008-8](https://doi.org/10.1016/0097-8493(96)00008-8)>.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994. <<https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>>.

CARDONA, O. D.; VAN AALST, M. K.; BIRKMAN, J.; FORDHAM, M.; MC GREGOR, G.; ROSA, P.; PULWARTY, R. S.; SHIPPER, E. L. F.; SINH, B. T. Determinants of risk: Exposure and vulnerability. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In: FIELD, C. B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDEA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G. K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (Ed.), **A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, Cambridge University Press, p. 65-108, 2012.

CARMELLO, V.; NETO, J. L. S. Variabilidades das chuvas na vertente paranaense da bacia do rio Paranapanema – 1999-200 a 2009-2010. **Raega – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 33, p. 225-247, 2015. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/34729>>.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. **Condições Atuais do ENOS: La Niña**. 2022. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br>>.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ – CBH-AT. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2022**: ano base 2021. 83 p. 2022.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO-TIETÊ – CBH-BT. **Relatório de situação 2021**: ano base 2020. 59 p. 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SOROCABA-MÉDIO TIETÊ – CBH-SMT. **Relatório de situação 2022**: ano base 2021. 122 p. 2022.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-BATALHA – CBH-TB. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2021**: ano base 2020. 29 p. 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ – CBH-TJ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2021**: ano base 2020. 173 p. 2021.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ – CBH-PCJ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2022** (ano base 2021). 154 p. 2022.

CORSON-DOSCH, H.; NELL, C.; VOLANTINE, R.; ARCHER, A. A.; BECHTEL, E.; BRUCE, J. L.; FELTS, N.; GROSS, T. A.; LOPEZ-TRUJILLO, D.; RIGGS, C. E.; READ, E. K. **The Water Cycle (Poster, PDF)**, Water Science School. 2022. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/media/files/water-cycle-poster-pdf#multimedia>>.

COSTA, L. F.; FARIAS JÚNIOR, J. E. F.; JOHNSON, R. M. F.; PETRUNGARO, A. C. N.; RAMOS, N. P. Análise da precipitação da bacia do rio Paraíba do Sul com enfoque nos anos de 2014 e 2017. **Anais III SRHPS – Simpósio de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul**, C4005, 2018. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=3857>>.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley & Sons, 920 p, 1991.

DAI, A.; ZHAO, T.; CHEN, J. Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective. **Current Climate Change Reports**, v. 4, p. 301-312, 2018. <<https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6>>.

DE FREITAS, A. A.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B.; DRUMOND, A.; FERRAZ, S. E. T.; DA SILVA, B. C.; DA ROCHA, R. P. Atmospheric and oceanic patterns associated with extreme drought events over the Paraná hydrographic region, Brazil. **Climate**, 11, 12, 2023. <<https://doi.org/10.3390/cli11010012>>.

DE SOUZA, I. P.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T.; VARGAS, F. F.; CERÓN, W. L.; MARTINS, J. A.; FREITAS, E.; DE SOUZA, R. A. F. Seasonal precipitation variability modes over South America associated to El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and non-ENSO components during the 1951–2016 period. **International Journal of Climatology**, p. 1-18, 2021. <<https://doi.org/10.1002/joc.7075>>.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Banco de dados hidrológico**. 2022. Disponível em: <<http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br>>.

DI GIULIO, G. M.; TORRES, R. R.; VASCONCELLOS, M. da P.; BRAGA, D. R. G. C.; MANCINI, R. M.; LEMOS, M. C. Eventos Extremos, Mudanças Climáticas e Adaptação no estado de São Paulo. **Ambiente & Sociedade**, v. 22, 2019. <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc0277r1vu19L4AO>>.

DIAS, M. A. F. da S. Eventos climáticos extremos. **Revista USP**, n. 103, p. 33-40, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Hidrovia do Paraná-Tietê**. 2018. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/old/hidrovia-do-tiete-parana#:~:text=O%20rio%20Paraná%20suporta%20comboios>>.

DO CARMO, R. L.; JOHANSEN, I. C.; ANAZAWA, T. M. Metrópoles bipolares: aspectos da dinâmica socioambiental e demográfica do excesso e da falta de água. In: **Anais do XIX Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, 2016. Disponível em: <<http://www.abep.org.br/publicacoes/index.php/anais/article/view/2237>>.

DUNLOP, S. Definição de evento extremo. **A Dictionary of Weather**: Oxford University Press, January 01, 2008. Oxford Reference. Disponível em: <<http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199541447.001.0001/acref-9780199541447-e-2465>>.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. **ArcGIS for Desktop – ArcMap**, version 10.3. 2013. Disponível em: <<https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/index>>.

EVANGELISTA, H.; GODIVA, D.; SIFEDDINE, A.; LEÃO, Z. M. A. N.; RIGOZO, N. R.; SEGAL, B.; AMBRIZZI, T.; KAMPEL, M.; KIKUCHI, R. K. P.; LE CORNEC, F. Evidences linking ENSO and coral growth in the Southwestern-South Atlantic. **Climate Dynamics**, v. 29, p. 869-880, 2007. <10.1007/s00382-007-0271-8>.

FELIPE JUNIOR, N. F. **A hidrovia Tietê-Paraná e a intermodalidade no Estado de São Paulo**. 2008. 288 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2008.

FERNANDES, R. B. **Panorama geotécnico das rupturas de barragens e gestão de risco**. 1ª edição – Curitiba: Appris, 2020. 405 p.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; DA PAZ, R. L.; AMORIM, A. de O.; CARDOSO, A. S. **Índices para a quantificação da seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 48 p, 2009. Disponível em: <<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR20091663874>>.

FERREIRA, D. B. **Relações entre a variabilidade da precipitação e a produtividade agrícola de soja e milho nas regiões sul e sudeste do Brasil**. 2006. 126 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, 2006.

FERREIRA, P. dos S.; DE SOUZA, W. M.; DA SILVA, J. F.; GOMES, V. P. Variabilidade Espaço-Temporal das Tendências de Precipitação na Mesorregião Sul Cearense e sua Relação com as Anomalias de TSM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 141-152, 2018. <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786331006>>.

FONTÃO, P. A. B. **Variações do ritmo pluvial na Região Metropolitana de São Paulo: reflexos no armazenamento hídrico e impactos no abastecimento urbano**. 251 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro-SP, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/6227a666-f61b-4f2b-8bf4-011a8b911ff7>>.

FRAZIER, A. G.; GIAMBELLUCA, T. W.; DIAZ, H. F.; NEEDHAM, H. L. Comparison of geostatistical approaches to spatially interpolate month-year rainfall for the Hawaiian Islands. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 1459-1470, 2016. <10.1002/joc.4437>.

FREITAS, M. A. de S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 19-30, 1998. <<https://doi.org/10.5020/23180730.1998.1175>>.

FREITAS JUNIOR, M.; TOLOI, R. C.; REIS, J. G. M. Análise de viabilidade dos custos para a reativação do terminal de conchas na hidrovia Tietê Paraná. **South American Development Society Journal**, v. 3, n. 7, p. 81-100, 2017. <<http://dx.doi.org/10.24325/issn.2446-5763.v3i7p81-100>>.

FURTUNATO, O.; CIDREIRA, M.; NETO, G. G.; ARAUJO, G. R.; BERTAZO, V. Análise da variabilidade espacial da precipitação na bacia do rio Grande: Estudo para o período de outubro de 2016 a março de 2017. In: **Anais XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2532>>.

FURTUNATO, O.; NETO, G. G.; CIDREIRA, M.; PAIVA, R. F.; CAMPOS, J. M. Variabilidade espacial da precipitação na bacia do rio Grande: Estudo para o período de outubro de 2018 a fevereiro de 2019. In: **Anais XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6071&Name=variabilidade_espacial_da_precipitacao_na_bacia_do_rio_grande_estudo_para_o_periodo_de_outubro_de_2018_a_fevereiro_de_2019>.

GELINSKI NETO, F. Eventos climáticos extremos na agricultura e tecnologia para redução de danos na olericultura em Santa Catarina. **VIII Encontro de Economia Catarinense – APEC/UNIDA VI – Associação de Pesquisadores em Economis Catarinense**, Seção 8: Economia Rural, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Gelinski-Neto/publication/309761528_GELINSKI_NETO_F_Eventos_Climaticos_Extremos_n_a_Agricultura_e_Tecnologia_para_reducao_de_danos_na_agricultura_em_Santa_Catarina_In_VIII_Encontro_de_Economia_Catarinense_8_a_9_de_maio_de_2014_Rio_do_Sul/links/5821db6c08aece82e27f0d10/GELINSKI-NETO-F-Eventos-Climaticos-Extremos-na-Agricultura-e-Tecnologia-para-reducao-de-danos-na-agricultura-em-Santa-Catarina-In-VIII-Encontro-de-Economia-Catarinense-8-a-9-de-maio-de-2014-Rio-do.pdf>.

GIOACOMIN, G. S.; JÚNIOR, A. A. O. A pegada hídrica como instrumento de conscientização ambiental. **Revista Monografias Ambientais**, 7(7), p. 1517-1526, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/4979>>.

GOIS, G. **Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura do milho para as diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. 2005. 81 p. Dissertação (Mestrado e Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

GONÇALVES, F. C.; TOKUDA, E. N.; BEGA, J. M. M.; DE OLIVEIRA, J. N.; SOBRINHO, M. D.; MACIEL, G. de F. Verificação da influência do El Niño dos padrões de chuva em bacias do noroeste paulista. In: **Anais XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu, Brasil, novembro 2019. Disponível em: <https://eventos.abrh.org.br/xxiiisbrh/trabalhos/poster_regulares.php>.

GONÇALVES, S. T. N; JUNIOR, F. das C. V.; SAKAMOTO, M. S.; SILVEIRAS, C. da S.; MARTINS, E. S. P. R. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 495-511, 2021. <<https://doi.org/10.1590/0102-77863630007>>.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476 p.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. de C. et al (Ed.), **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**, Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1002959/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar>>.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 13, p. 35-58, 2000. <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)>.

GUPTA, A.; KAMBLE, T.; MACHIWAL, D. Comparison of ordinary and Bayesian kriging techniques in depicting rainfall variability in arid and semi-arid regions of north-west India. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, 512, 2017. <<https://doi.org/10.1007/s12665-017-6814-3>>.

HAGENLOCHER, M.; MEZA, I.; ANDERSON, C. C.; MIN, A.; RENAUD, F. G.; WALZ, Y.; SIEBERT, S.; SEBESVARI, Z. Drought vulnerability and risk assessment: state of the art, persistent gaps, and research agenda. **Environmental Research Letters**, 14, 083002, 2019. <[10.1088/1748-9326/ab225d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab225d)>.

HALTTERMANN, F. F.; KUNDZEWICS, Z. W.; HUANG, S.; VETTER, T.; KRON, W.; BURGHOFF, O.; MERZ, B.; BRONSTERT, A.; KRYSANOVA, V.; GERSTENGARBE, F.; WERNER, P.; HAUF, Y. Flood risk from a holistic perspective – Observed changes in Germany. In: KUNDZEWICS, Z. W. (Ed.), **Changes in flood risk in Europe**, Oxfordshire: IAHS Press, 2012. p. 212-237.

HELMİ, A. M.; ELGAMAL, M.; FAROUK, M. I.; ABDELHAMED, M. S.; ESSAWY, B. T. Evaluation of Geospatial Interpolation Techniques for Enhancing Spatiotemporal Rainfall Distribution and Filling Data Gaps in Asir Region, Saudi Arabia. **Sustainability**, v. 15, n. 8, 14028, 2023. <<https://doi.org/10.3390/su151814028>>.

HU, K.; HUANG, G.; HUANG, P.; KOSAKA, Y.; XIE, S. Intensification of El Niño-induced atmospheric anomalies under greenhouse warming. **Nature Geoscience**, 14, 377-382, 2021. <[10.1038/s41561-021-00730-3](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00730-3)>.

HUANG, S.; KRYSANOVA, V.; HATTERMANN, F. F. Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three REMs and a regional hydrological model. **Acta Geophysica**, v. 61, p. 151-193, 2013. <[10.2478/s11600-012-0065-1](https://doi.org/10.2478/s11600-012-0065-1)>.

INGRAM, J. C.; DAWSON, T. P. Climate change impacts and vegetation response on the island of Madagascar. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, 363, p. 55-59, 2005. <[10.1098/rsta.2004.1476](https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1476)>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produto Interno Bruto – PIB**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Resumo para Decisores. In.: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribuição do

Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas - Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NI, EUA, 2013. 203 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2014**: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Oxford University Press, New York, 413 p.

JAHN, M. Economics of extreme weather events: Terminology and regional impact models. **Weather and Climate Extremes**, p. 29-39, 2015. <<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.005>>.

JAMAN, N. I.; ADHIKARY, S. K. A positive kriging approach for missing rainfall estimation. In: **5th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD 2020)**, Khulna, Bangladesh, 2020. Disponível em: <http://www.iccesd.com/proc_2020/Papers/WRE-4908.pdf>.

JIANG, G.; GU, X.; ZHAO, D.; XU, J.; YANG, C.; WANG, S.; LI, Y.; LI, B. The Study of drought in Future Climate Scenarios in the Huang-Huai-Hai Region. **Water**, 13, 3474, 2021. <<https://doi.org/10.3390/w13233474>>.

JOKAR, P.; MASOUDI, M. Analyzing spatial pattern of drought in Iran, using percent of normal index (PNI). **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 27, n. 4, p. 2011-2018, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324684793_Analyzing_Spatial_Pattern_of_Drought_in_Iran_using_Percent_of_Normal_Index_PNI>.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. New York: Academic Press, London, 1978. 600 p.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. – In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Ed.), **Handbuch der Klimatologie**. – Gebruder Borntrager, Berlin, 1, 1–44, part C.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal South African**. Institute. Mining Metall, n. 52, p. 119-139, 1951.

KVITSJØEN, J.; KARLSSON, D.; TEIGENE, T.; FINSLAND, W. Tool for Quantitative Risk Analysis of Urban Flooding. **Water**, 13, 2771, 2021. <<https://doi.org/10.3390/w13192771>>.

KUNDZEWICZ, Z. W.; KRYSANOVA, V.; BENESTAD, R. E.; HOV, O.; PINIEWSKI, M.; OTTO, I. M. Uncertainty in climate change impacts on water resources.

Environmental Science & Policy, v. 79, p.1-8, 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>>.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terræ Didática**. 2 (1). 19-33 p. 2006. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>.

LEMES, M. C. R. **Caracterização climática das adjacências do rio Tietê-SP**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2102>>.

LIMA, C.G da R. **Correlação linear e espacial da produtividade de forragem de milho com atributos físicos de um latossolo vermelho distrófico**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2007.

LIMA, C. G. da R.; LOLLO, J. A.; BACANI, V. M.; COSTA, N. R. Variabilidade espaçotemporal das águas subterrâneas do aquífero Bauru impróprias para o consumo humano: concentrações de Bário, Crômio Total e Vanádio. **Pesquisas em Geociências**, v. 47, n. 2, e096380, 2020. <<https://doi.org/10.22456/1807-9806.108582>>.

LIN, J.; QIAN, T. Switch between El Niño and La Niña is caused by subsurface ocean waves likely driven by lunar tidal forcing. **Science Report**, 9, 13106. 2019. <<https://doi.org/10.1038/s41598-019-49678-w>>.

LOBEL, F; MAIA, D.; SOARES, M.; LEITE, M. Drought in Southeast Brazil Hits 133 Cities with consequences for the economy. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 11 mar. 2014. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/internacional/en/brazil/2014/11/1542425-drought-in-southeast-brazil-hits-133-cities-with-consequences-for-the-economy.shtml>>.

LOUREIRO, G. E.; FERNANDES, L. L. Variação da precipitação por método de interpolação geoestatística. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, 2013. <<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.997>>.

LUCAS, M. P.; LONGMAN, R. J.; GIAMBELLUCA, T. W.; FRAZIER, A. G.; MCLEAN, J.; CLEVELAND, S. B.; HUANG, Y.-F.; LEE, J. Optimizing automated kriging to improve spatial interpolation of Monthly rainfall over complex terrain. **Journal of Hydrometeorology**, v. 23, p. 561-572, 2022. <<https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0171.1>>.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. A precisão da estimativa do erro da krigagem pela validação cruzada. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p.1-12, 2017. <<https://doi.org/10.1590/2179-8087.124114>>.

MAIA, G. S. **Análise da precipitação na bacia do rio Tietê com dados de postos pluviométricos e sensoriamento remoto**. 2022. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

MARCUZZO, F. F. N. Bacia hidrográfica do rio Tietê: precipitação pluviométrica especializada. **Geographia Meridionalis**, v. 5, n. 3, p. 243-266, 2020. <<https://doi.org/10.15210/gm.v5i3.16926>>.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2241-2255, 2009. <<https://doi.org/10.1002/joc.1863>>.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31-44, 2015. <[10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44](https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44)>.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K. R. D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; MICHELIN, C. M.; BAIÃO, C. F. da P.; ÂNGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019-2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**, 3:639204, 2021. <<https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>>.

MATHERON, G. **Traité de Géostatistique Appliquée** – Tome I. Paris, Editions Technip. 333 p. 1962.

MATHERON, G. **Traité de Géostatistique Appliquée** – Tome II. Paris, Editions Technip. 172 p. 1963.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Ed. UFLA, 2013, 455p.

MELO, D. de C. D.; SCANLON, B. R.; ZHANG, Z.; WENDLAND, E.; YIN, L. Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paraná River basin, south-eastern Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, 20, p. 4673-4688, 2016. <[doi:10.5194/hess-20-4673-2016](https://doi.org/10.5194/hess-20-4673-2016)>.

MENDES, J. M. M. **Linhas para a elaboração de um plano de minimização dos riscos de seca em zonas com escassez de recursos hídricos: O caso da margem esquerda do Guadiana**. 2008. 162 f. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Hidráulica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

MIKULAK, R. J.; MCDERMOTT, R.; BEAUREGARD, M. **The basics of FMEA**. CRC press, 2017.

MIRANDA, C.; PARANHOS FILHO, A.; LASTORIA, G. Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade espacial da piezometria. In: **Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, 17, João Pessoa, 2015.

MISGRA, A. K.; SINGH, V. P. A Review of Drought Concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, p. 202-216, 2010. <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>>.

MOORE, R. D.; SPITTLEHOUSE, D. L.; WHITFIELD, P. H.; STAHL, K. Weather and Climate. In: PIKE, R. G. et al. (Org.), **Compendium of forest hydrology and geomorphology in British Columbia**, 2010. Disponível em: <<https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/lmh/Lmh66.htm>>.

MOREIRA, G. de B.; DE ANDRADE, C. B. S.; GONÇALVES, J. A. C. The inspection of the granted use of water resources in a basin declared in a critical situation of water scarcity. Case study: case study in the Suaçui River watershed – MG. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p.e81973729, 2020. <10.33448/rsd-v9i7.3729>.

MORERIA, E. V.; TAVARES FILHO, G. S.; OLIVEIRA, F. F.; JÚNIOR, F. A. P.; ARAÚJO, C. A. S.; MATIAS, S. S. R. Espacialidade dos atributos químicos de águas subterrâneas do município de Granito, PE. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p.e10091210779-e10091210779, 2020. <<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.10779>>.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. **El Niño and La Niña**: Frequently asked questions. 2016. <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-frequently-asked-questions>>.

NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – NAE. **Mudança do clima**, v.1. Brasília, 2005. Disponível em: <<https://livroaberto.ibict.br/handle/1/574>>.

NULL, J. **El Niño and La Niña years and intensities**. Golden Gate Weather Services. 2022. <<https://ggweather.com/enso/oni.htm>>.

NUNES, L. F. C. V.; MEDEIROS, P. H. A. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, e18, 2020. <<https://dx.doi.org/10.21168/reg.v17e18>>.

OLIVEIRA, B. R.; ANTÔNIO, G. B. Modelagem geoestatística aplicada a geologia de engenharia. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 46-53, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/43417>>.

OLIVEIRA, V. P.; MAFRA, M. V. P.; SOARES, A. P. A. Eventos climáticos extremos na Amazônia e suas implicações no município de Manaquiri (AM). **Revista Geonorte**, v. 1, n. 5, p. 977-987, 2012. Disponível em: <<https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2448/2258>>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Resultados da Operação**: Dados gerais. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais>>.

PANU, U. S.; SHARMA, T. C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. **Hydrological Sciences Journal**, 47:S1, S19-S30, 2002. <10.1080/02626660209493019>.

PERIN, E. B.; VIANNA, L. F. de N.; RICCE, W. da S.; MASSIGNAM, A. M.; PANDOLFO, C. Interpolação das variáveis climáticas temperatura do ar e precipitação: revisão dos métodos mais eficientes. **Geografia**, v. 40, p. 269-289, 2015. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/11139/7844>>.

PETRUCCI, E.; DE OLIVEIRA, L. A.; SILVA, R. C. Secas pluviométricas no estado de Minas Gerais, de 1980 a 2017. **RA'E GA-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 54, p. 129-153, 2022. <<https://dx.doi.org/10.5380/raega.v54i0.76135>>.

PIMENTAL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PIRANI, F. J.; MODARRES, R. Geostatistical and deterministic methods for rainfall interpolation in the Zayandeh Rud basin, Iran. **Hydrological Sciences Journal**, 2020. <10.1080/02626667.2020.1833014>.

PROJETO MAPBIOMAS – MAPBIOMAS. **Coleção v7.0 da Série Anual de Mapas de uso e Cobertura da Terra no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR>.

RAFEE, S. A. A.; UVO, C. B.; MARTINS, J. A.; DOMINGUES, L. M.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; FREITAS, E. D. Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. **Water**, v. 11(5), 882, p. 1-20, 2019. <<https://doi.org/10.3390/w11050882>>.

RICARDI, A. de M. **Variabilidade espacial e temporal da Erosividade das chuvas (EI30) no Estado de São Paulo, Brasil**. 2020. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2020.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for environmental sciences. 7.ed. Michigan: Gamma Design Software, 2004. 159 p.

ROSA, R. G. T. D. **Índices de Seca: Aplicação ao Continente Português**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônoma) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

ROYER, A. C.; FIGUEIREDO, T.; FONSECA, F.; SCHUTZ, F. C. A.; HERNANDEZ, Z. Trends of change in precipitation and in drought susceptibility as assessed by the standardized precipitation index (SPI) in northeast Portugal. **Territorium**, n. 18(II), p. 13-26, 2021. <https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-2_2>.

SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação de Rede Pluviométrica e Análise de Variabilidade Espacial de Precipitação: Estudo de Caso na bacia do rio Ipojuca em Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 124 p. 2005.

SANTOS, A.S. **Krigagem de Teores de Ouro da Mina de Caiamar – Goiás**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SANTOS, D. Uma Introdução do Semivariograma e sua Importância dentro da Geoestatística. In: **Anais do Simpósio Nacional de Geografia e Gestão Territorial**, 2018. Disponível em: <<http://anais.uel.br/portal/index.php/sinagget/article/view/400>>.

SANTOS, D. N.; SILVA, V. P. R.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, R. A. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 492-500, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/gGHVpPNZQBf85DJGQq9zygf/?lang=pt#:~:text=O%20estudo%20compreende%2089%20estações,nove%20estados%20do%20Nordeste%20brasileiro.&text=As%20séries%20temporais%20de%20dados,de%2030%20anos%20de%20observações>>.

SÃO PAULO (Estado). Departamento Hidroviário. **Sistema Hidroviário Paulista**. 2023. Disponível em: <<http://www.dh.sp.gov.br/sistema-hidroviario-paulista/>>.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Guia do sistema integrado de gerenciamento de recursos hídricos – SIGRH**, 4. Ed. 2021. Disponível em: <<https://sigrh.sp.gov.br/pageitems/450/news/11993>>.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos parte 1: classificação. **Revistas Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005. Disponível em: <<https://www.abrhydro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=26&SUMARIO=440>>.

SERRA, M. M. P. Como utilizar elementos da estatística descritiva na jurimetria. **Revista Ânima**, Ano IV, n. 10, p. 156-169, 2013. Disponível em: <<https://www.opet.com.br/faculdade/revista-anima/pdf/anima10/8-marcia-milena-jurimetria-anima10.pdf>>.

SILVA, M. M.; FERREIRA, V. O.; BRITO, J. L. S. Reconhecimento de possíveis influências dos eventos El Niño e La Niña no regime pluviométrico da bacia do rio Araguari, Minas Gerais. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v. 1, n. 5, p. 754-765, 2012. Disponível em: <<https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/2410>>.

SILVA, A. C.; RAUBER, L. P.; MANTOVANI, A.; ZILIO, M. El Niño e La Niña: Influências na produção agrícola. **SIEPE 2019 - Ciência e Inovação: Desafios e perspectivas para o Futuro**, 2019.

SILVA, L. R. T. **Análise da continuidade espacial do comportamento da precipitação em área que engloba as mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba - Minas Gerais e Sul goiano – Goiás.** 2019. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiás, 2019.

SILVA, D. F.; LIMA, M. J. da S.; NETO, P. F. de S.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. dos S.; ALMEIDA, H. R. R. de C.; PEREIRA, M. P. S.; COSTA, R. L. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020. <<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464>>.

SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SIGRH. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos de São Paulo: Ano-base 2021.** 2023. Disponível em: <<https://sigrh.sp.gov.br/relatoriosituacaodosrecursoshidricos>>.

SOUSA, A. M. L.; DA ROCHA, E. J. P.; VITORINO, M. I.; DE SOUZA, P. J. O. P.; BOTELHO, M. N. Variabilidade Espaço-Temporal da Precipitação na Amazônia Durante Eventos Enos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 13-24, 2015. <[10.13140/RG.2.1.4123.2401](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4123.2401)>.

SOUSA, L. B.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, M. V.; ALMEIDA, T. A. B.; CARVALHO, A. A.; SILVA, T. G. F.; LIMA, J. L. M. P. Spatiotemporal analysis of rainfall and droughts in a semiarid basin of Brazil: Land use and land cover dynamics. **Remote Sensing**, 15, 2550, 2023. <<https://doi.org/10.3390/rs15102550>>.

SOUZA, A. P.; ASCOLI, C. A.; ULIANA, E. M.; DE ALMEIDA, F. T.; CASAVECCHIA, B. H. Influência do ENOS nas chuvas anuais da região amazônica do Mato Grosso. **Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v. 6, n. 1, p.39-46, 2018. <<http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i1.4248>>.

SRIVASTAVA, R. M. Describing spatial variability using geostatistics analysis. In: SRIVASTAVA, R. M. et al (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications.** West Conshohocken: ASTM, 1996. p. 13-19. <<http://dx.doi.org/10.1520/STP16110S>>.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; BAYMA-SILVA, G. Índices de seca para o estado de São Paulo através do uso conjunto de imagens MODIS e estações climáticas. In: **Anais 2017 do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis-SC, 2017. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/170476/1/4906.pdf>>.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito da bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007. <<https://doi.org/10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236>>.

TERASSI, P. M. de B.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DE GÓIS, G.; GALVANI, E. Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 11-25, 2018. <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786331002>>.

TORRES, N. T.; SOUZA FILHO, E. M. Um enfoque logístico sobre a integrabilidade da infra-estrutura da hidrovía Tietê-Paraná. In: **Anais 2006 do SPOLM: Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha**, p. 317-331, 2006. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/arq0031_0.pdf>.

TRENBERTH, K. E. **The Definition of El Niño**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 78, n. 12, p. 2771-2777, 1997.

TRENBERTH, K. E. NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH – NCAR. **Niño SST Indices (Niño 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)**. 2022. Disponível em: <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>>.

TREVISAN, J. S. **Avaliação dos custos de transporte de carga no corredor noroeste do estado de São Paulo comparando-se os modos rodoviário e hidroviário**. 2019. 66f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2019.

TSONIS, A. A.; HUNT, A. G.; ELSNER, J. B. On the relation between ENSO and global climate change. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 84, 229,242, 2003. <<https://doi.org/10.1007/s00703-003-0001-7>>.

TUCCI, C. E. M. Impactos de variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. Brasília: Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002. 150 p.
TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. As múltiplas dimensões da crise hídrica. **Revista USP**, n. 106, p. 21-30, 2015. <10.11606/issn.2316-9036.v0i106p21-30>.

ULIANA, E. M.; DOS REIS, E. F.; DE SOUZA, A. P.; DA SILVA, J. G. F.; XAVIER, A. C. Utilização do Índice de Precipitação Padronizado para a Região Norte do Estado do Espírito Santo. **Irriga**, v. 20, n. 3, p. 414-428, 2015. <<https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p414>>.

VEER, G. V.; VOERKELIUS, S.; LORENTZ, G.; HEISS, G.; HOOGEWERFF, J. A. Spatial interpolation of the deuterium and oxygen-18 composition of global precipitation using temperature as ancillary variable. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 101, p. 175-184, 2009. <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.06.008>>.

VICENTE, G., LIMA, C.G., MARQUES, S. Variabilidade espacial e temporal do nitrato e cloreto no sistema Aquífero Bauru, estado de São Paulo. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 3, p. 295-306, 2018. <<https://doi.org/10.14295/ras.v32i3.29099>>.

VILLANI, L.; CASTELLI, G.; PIEMONTESE, L.; PENNA, D.; BRESCI, E. Drought risk assessment in Mediterranean agricultural watersheds: A case study in Central Italy. **Agricultural Water Management**, v. 271, 107748, 2022. <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.10774>>.

WANDERLEY, H. S.; CARVALHO, F. O.; AMORIM, R. C. F.; CAVALCANTI, J. R. de A.; SANTOS, R. R. C. Análise geoestatística da precipitação para o estado de Alagoas. In: **Anais XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande/MS, 2010.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in Soil Science**, v. 3, p. 1-70. Springer, New York, NY, 1985. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5090-6_1>.

WILHITE, D.A.; GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. **Water International**, v. 10, p. 111-120, 1985. <<https://doi.org/10.1080/02508068508686328>>.

WILLEKE, G.; HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. The national drought atlas. In: **Institute for Water Resources Report 94-NDS-4**. U.S Army Corp of Engineers. Norfolk, VA. 1994.

WU, X.; OKUMURA, Y. M.; DINEZIO, P. N. What controls the duration of El Niño and La Niña events? **Journal of Climate**, v. 32, p. 5941-5965, 2019. <<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0681.1>>.

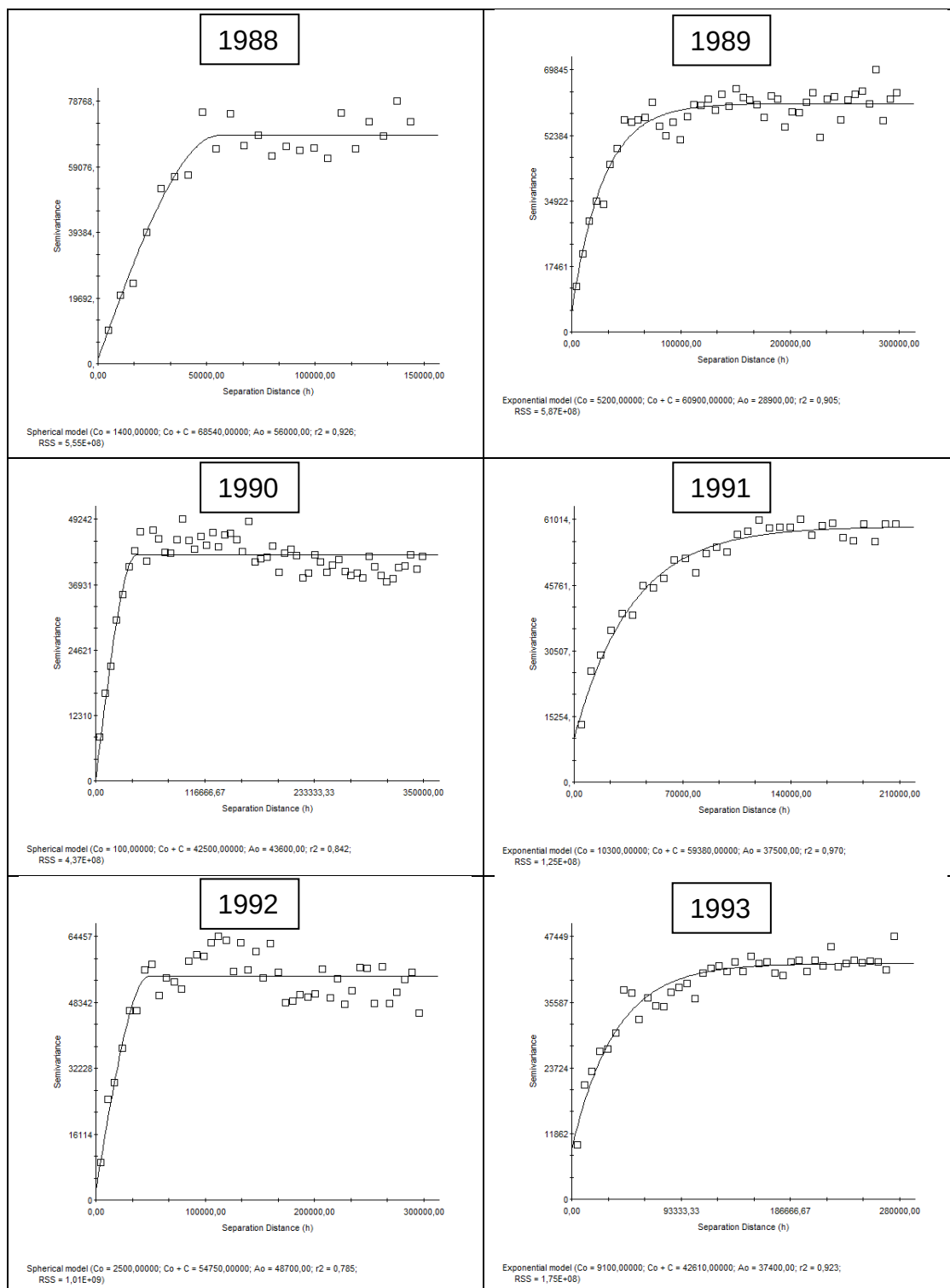
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

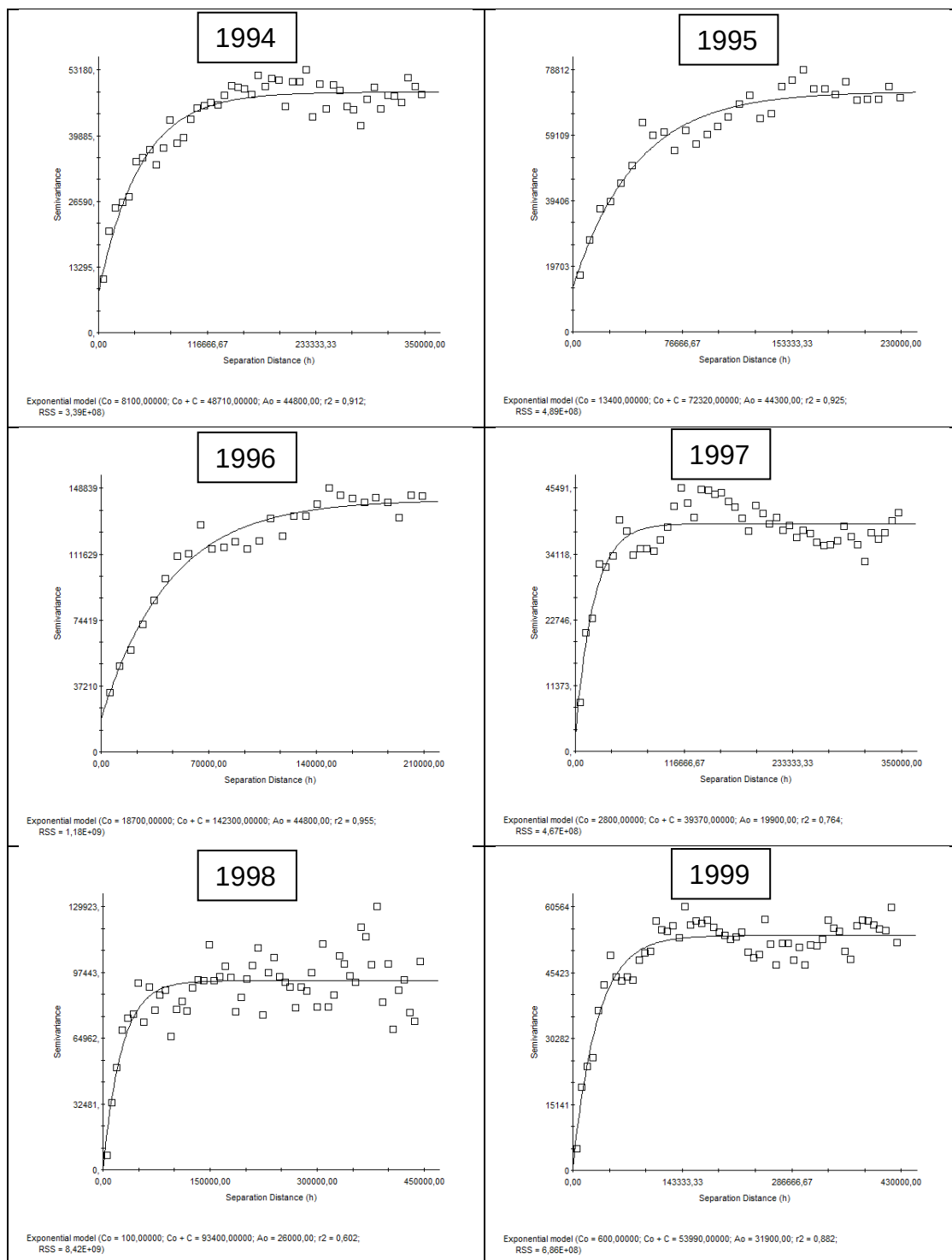
YIHDEGO, Y.; VAHEDDOOST, B.; AL-WESHA, R. A. Drought indices and indicators revisited. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 3, p. 69, 2019. <<https://doi.org/10.1007/s12517-019-4237-z>>.

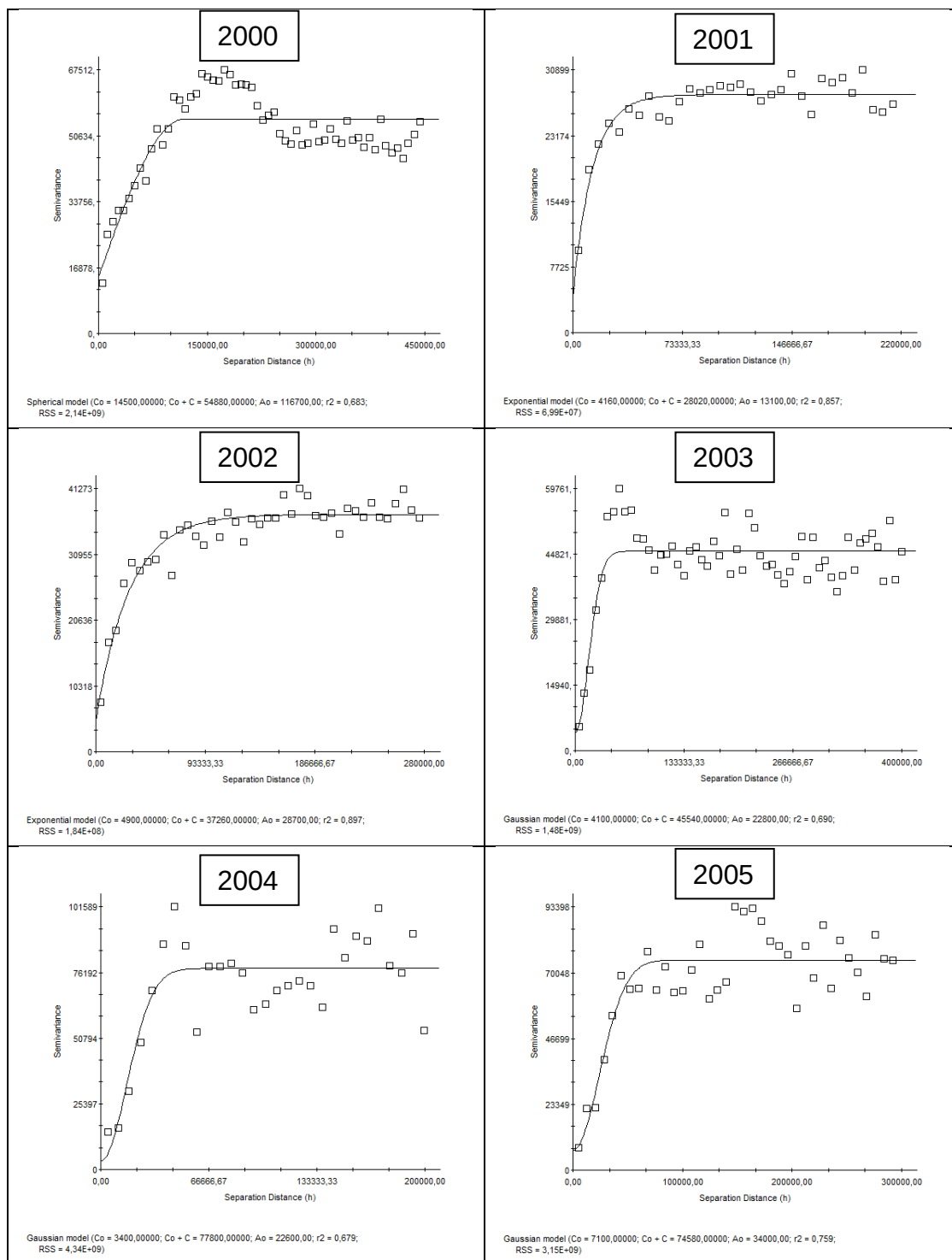
ZHANG, M.; STODOLAK, R.; XIA, JIANXIN. The Impact of the Changes in Climate, Land Use and Direct Human Activity on the Discharge in Qingshui River Basin, China. **Water**, 13, 3147, 2021. <<https://doi.org/10.3390/w13213147>>.

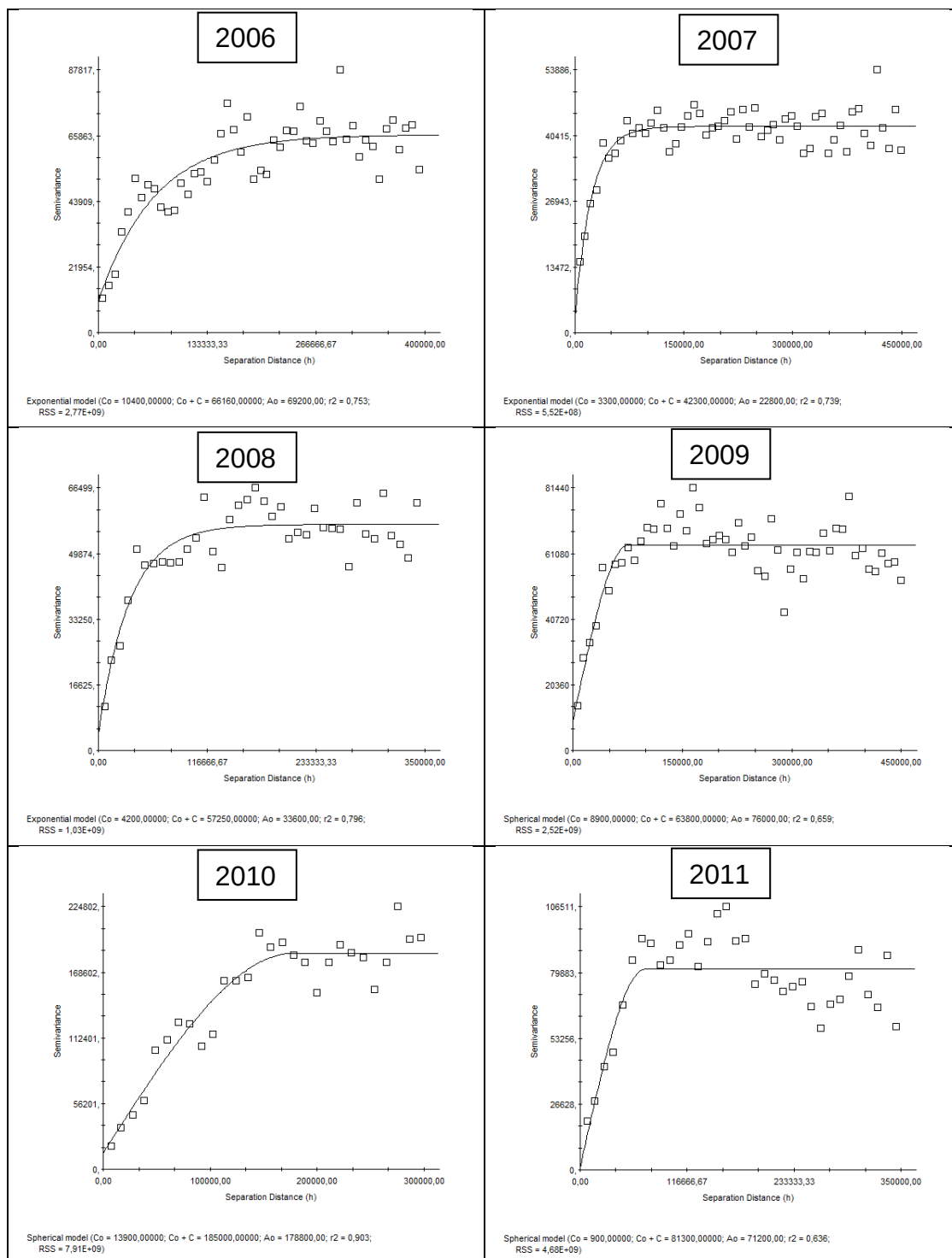
ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade solo**. 2001. 114f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

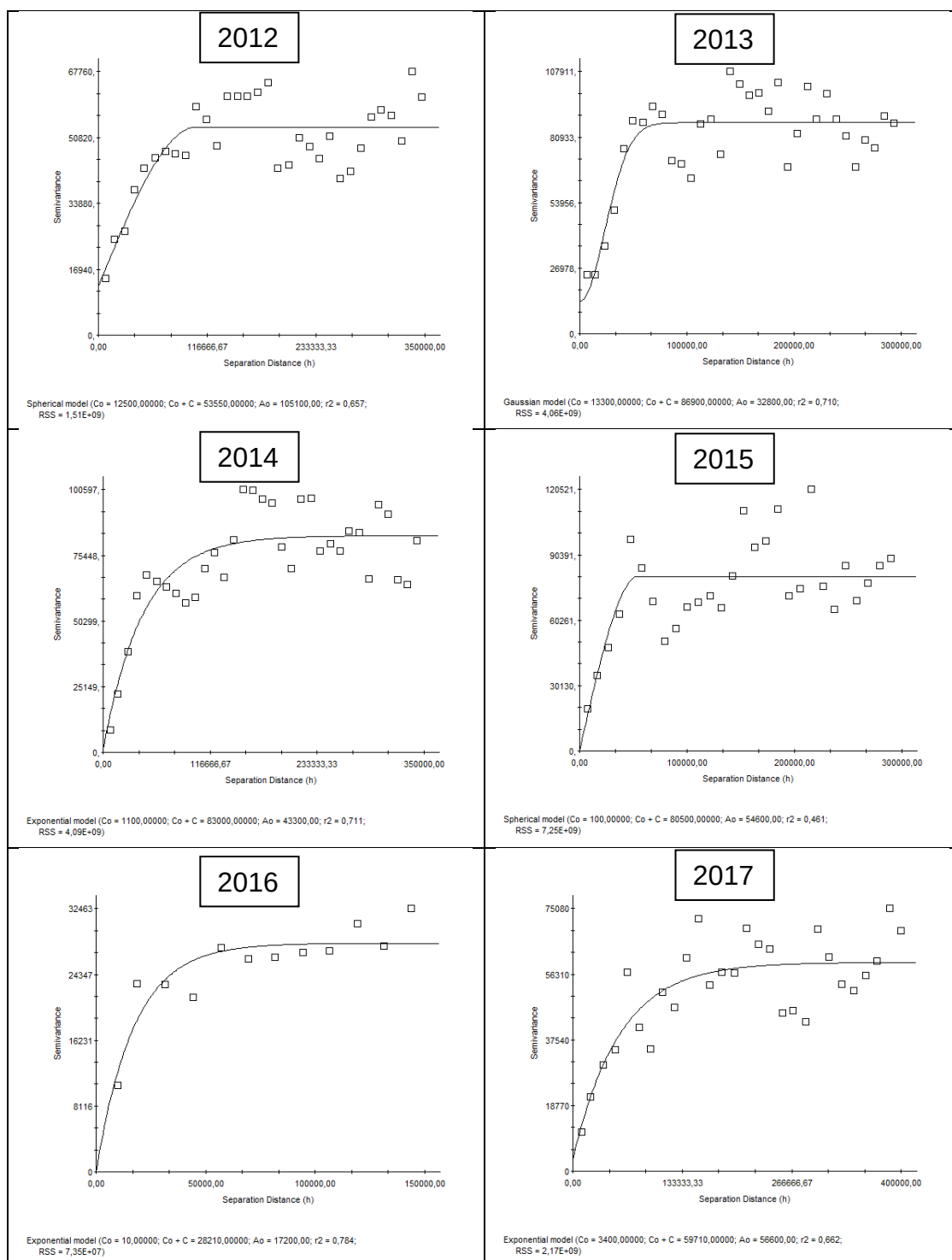
APÊNDICE A – AJUSTES SEMIVARIOGRÁFICOS DAS CHUVAS TOTAIS ANUAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ











APÊNDICE B – VALIDAÇÕES CRUZADAS DAS CHUVAS TOTAIS ANUAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ

