

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA UTILIZANDO
MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS NO MUNICÍPIO DE
ARARAQUARA-SP**

HELTON ALVES DE GALVÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA UTILIZANDO
MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS NO MUNICÍPIO DE
ARARAQUARA-SP**

HELTON ALVES DE GALVÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa

São Carlos
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Helton Alves de Galvão, realizada em 28/11/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Daniel Jadyr Leite Costa (UFSCar)

Profa. Dra. Katia Sakihama Ventura (UFSCar)

Profa. Dra. Simone Cristina de Oliveira (DAAE)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, prof. Dr. Daniel, pela seriedade, confiança e paciência durante o desenvolvimento da pesquisa. Obrigado pelo desafio.

À minha família, em especial a minha esposa Ana Patrícia e ao meu filho Júlio, pelo apoio integral e pelo incentivo nesta jornada.

Aos colegas e amigos de jornada do Departamento Autônomo de Água e Esgotos de Araraquara, pelo apoio e pelo compartilhamento de suas experiências e conhecimento.

E a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O aumento populacional e da urbanização trouxeram desafios mais complexos para a gestão das cidades e dos recursos hídricos. A frequência com que surgem novas crises hídricas mostra que o problema não é exclusivo das grandes aglomerações urbanas, nem de regiões com problemas históricos de escassez. No Brasil, em nível nacional, a relação entre disponibilidade e demanda hídrica não indica cenários de estresse ou escassez, no entanto, ao tratar da questão em escalas regionais ou locais, verificam-se cenários mais suscetíveis a esta condição. Isto faz com que a tomada de decisões sobre recursos hídricos necessite de uma compreensão mais assertiva dos contextos locais e regionais, bem como da capacidade de estimar com maior grau de certeza os cenários futuros de disponibilidade hídrica. Desta forma, esta pesquisa se propõe a analisar a disponibilidade hídrica no município de Araraquara-SP, considerando uma abordagem local da relação entre as demandas e a dinâmica de uso e ocupação do solo. Neste sentido, realizou-se uma revisão sistemática da bibliografia, uma pesquisa documental sobre a área de estudo e elaborou-se um modelo conceitual, com o uso de dinâmica de sistemas, para a análise da disponibilidade hídrica no município. As principais relações estabelecidas no modelo foram baseadas na oferta hídrica local, na variação da demanda e no tipo de uso da água, no aumento populacional e nas variações no uso e na ocupação do solo, no âmbito urbano e rural. Considerou-se para os cenários simulados a redução progressiva no índice de perdas de água no sistema de abastecimento urbano e a redução da demanda per capita na área urbana como medidas de intervenção na disponibilidade hídrica. Os resultados obtidos foram positivos e demonstraram a viabilidade destas ações para promover a melhoria da disponibilidade hídrica no município a médio e longo prazo. Por fim, se verificou a viabilidade do uso da dinâmica de sistemas como método de análise da disponibilidade hídrica num contexto local e da modelagem dinâmica como ferramenta de gestão para a análise da disponibilidade hídrica em escala municipal.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica. Uso e ocupação do solo. Dinâmica de sistemas. Simulação dinâmica. Modelagem hídrica.

ABSTRACT

Population growth and urbanization have brought more complex challenges to the management of cities and water resources. The frequency with which new water crises emerge shows that the problem is not exclusive to large urban agglomerations, nor to regions with historical scarcity problems. In Brazil, at the national level, the relationship between water availability and demand does not indicate scenarios of stress or scarcity, but when the issue is addressed at the regional or local level, there are scenarios that are more susceptible to this condition. This means that decision-making on water resources requires a better understanding of local and regional contexts, as well as the ability to estimate future water availability scenarios with a greater degree of certainty. In this way, this research aims to analyze water availability in the municipality of Araraquara-SP, considering a local approach to the relationship between demands and the dynamics of land use and occupation. To this end, a systematic literature review and documentary research on the study area were conducted, and a conceptual model using system dynamics was developed to analyze water availability in the community. The main relationships established in the model were based on the local water supply, variations in demand and type of water use, population growth, and variations in land use and occupation, both urban and rural. For the simulated scenarios, a progressive reduction in the rate of water loss in the urban supply system and a reduction in per capita demand in the urban area were considered as intervention measures for water availability. The results obtained were positive and demonstrated the viability of these actions to improve water availability in the municipality in the medium and long term. Finally, the feasibility of using system dynamics as a method for analyzing water availability in a local context and dynamic modeling as a management tool for analyzing water availability at the municipal level was verified.

Keywords: Water availability. Land use and occupation. System dynamics. Dynamic simulation. Water modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxos de água verde e água azul.	18
Figura 2: Tipos de reservas de águas subterrâneas.	20
Figura 3: Relação entre DEA e ICRH.	25
Figura 4: Simbologia utilizada em modelos causais.	36
Figura 5: Modelo de Diagrama de Loop Causal – Vensim PLE.	36
Figura 6: Modelo simplificado de Diagrama de Estoque e Fluxo de um sistema de abastecimento urbano – Vensim PLE.	37
Figura 7: Mapa de localização do município de Araraquara.	43
Figura 8: Diagrama Causal para a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.	47
Figura 9: Diagrama Causal para análise do uso de água potável em Ebbsfleet, no Reino Unido.	47
Figura 10: Outorgas de uso da água em Araraquara.	51
Figura 11: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 09.	52
Figura 12: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 13.	52
Figura 13: Demanda total outorgada por tipo de uso em Araraquara.	53
Figura 14: Demanda total / $Q_{média}$ - UGRHI 09 e 13.	55
Figura 15: Demanda total / $Q_{95\%}$ - UGRHI 09 e 13.	55
Figura 16: Demanda superficial / $Q_{7,10}$ - UGRHI 09 e 13.	56
Figura 17: Demanda subterrânea / $Q_{explotável}$ - UGRHI 09 e 13.	56
Figura 18: Indicadores de pressão em Araraquara.	57
Figura 19: Variação nas vazões de retirada em Araraquara, de 1980 a 2020.	59
Figura 20: Estratégia de Gestão de Planejamento (MAPA 09), Plano Diretor Municipal.	63
Figura 21: Mancha urbana em Araraquara.	65
Figura 22: Mapa de uso e ocupação do solo de Araraquara.	67
Figura 23: Mapa de zonas isodensas x macrozoneamento municipal.	68
Figura 24: Diagrama Causal para o modelo de disponibilidade hídrica de Araraquara.	80
Figura 25: Estimativa de crescimento populacional.	91
Figura 26: Diagrama de Estoques e Fluxos do modelo de disponibilidade hídrica em Araraquara.	93
Figura 27: Estimativa da variação na ocupação das áreas classificadas como "áreas urbanizadas" em Araraquara, de 2020 a 2050.	97
Figura 28: Estimativa da variação na ocupação das áreas classificadas como "áreas rurais" em Araraquara, de 2020 a 2050.	97
Figura 29: Estimativa da variação na quantidade de áreas classificadas como "áreas de formações naturais" em Araraquara, de 2020 a 2050.	97
Figura 30: Estimativa da variação na quantidade de áreas classificadas como "áreas não vegetadas" em Araraquara, de 2020 a 2050.	97

Figura 31: Estimativa da variação na composição de uso, por tipo de atividade agrícola, das áreas destinadas uso agropecuário em Araraquara, de 2020 a 2050.	98
Figura 32: Estimativa da variação da população residente em Araraquara, de 2020 a 2050.	99
Figura 33: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica agrícola em Araraquara, de 2020 a 2050.....	101
Figura 34: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.....	102
Figura 35: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda "DIA" em Araraquara, de 2020 a 2050.	102
Figura 36: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica superficial total em Araraquara, de 2020 a 2050.....	103
Figura 37: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.	103
Figura 38: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica subterrânea em Araraquara, de 2020 a 2050.	105
Figura 39: Comparação entre os cenários para a estimativa de extrapolação do limite explotável para as águas subterrâneas em Araraquara, de 2020 a 2050.....	105
Figura 40: Comparação entre os cenários para a estimativa de geração de efluentes urbanos em Araraquara, de 2020 a 2050.	106
Figura 41: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação do Índice de Escassez Hídrica em Araraquara, de 2020 a 2050.	108
Figura 42: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação do Índice de Estresse Hídrico em Araraquara, de 2020 a 2050.....	108
Figura 43: Disponibilidade hídrica superficial total.....	134
Figura 44: Disponibilidade hídrica superficial urbana.	134
Figura 45: Disponibilidade hídrica subterrânea.....	135
Figura 46: Disponibilidade hídrica urbana.....	135
Figura 47: Demanda urbana	135
Figura 48: Demanda total (Doméstica, industrial e agrícola – DIA).....	136
Figura 49: Áreas rurais.....	136
Figura 50: Áreas destinadas à agricultura.	137
Figura 51: Índice de escassez hídrica.....	137
Figura 52: Índice de estresse hídrico.	138
Figura 53: Curva característica método da Taxa de Decrescimento Populacional.	140

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais características dos tipos de gestão da água urbana.....	31
Quadro 2: Etapas da modelagem.	46
Quadro 3: Faixas de referência: disponibilidade per capita.	50
Quadro 4: Faixas de referência.	57
Quadro 5: Matriz de Falkenmark para Araraquara, por tipo de vazão.	61
Quadro 6: Zoneamento urbano de Araraquara.	64
Quadro 7: Definição das zonas isodensas.	69
Quadro 8: Caracterização da gestão das águas urbanas no município de Araraquara.	78
Quadro 9: Cenários de simulação dinâmica.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índice de Estresse Hídrico e Escassez hídrica.	23
Tabela 2: Índice de uso relativo local da água (Estresse hídrico).	23
Tabela 3: Tabela de referência entre os tipos de escassez.	24
Tabela 4: DEA e ICRH por município na UGRHI 13.	26
Tabela 5: Etapas da modelagem.	34
Tabela 6: Relação entre Araraquara e as subUGRHIs.	43
Tabela 7: Disponibilidade hídrica per capita de água na UGRHI 09.	49
Tabela 8: Disponibilidade hídrica per capita de água na UGRHI 13.	49
Tabela 9: Disponibilidade hídrica per capita de água em Araraquara.	50
Tabela 10: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 09.	51
Tabela 11: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 13.	52
Tabela 12: Demanda total outorgada por tipo de uso em Araraquara.	53
Tabela 13: Disponibilidade e demanda outorgada na UGRHI 09.	54
Tabela 14: Disponibilidade e demanda outorgada na UGRHI 13.	54
Tabela 15: Disponibilidade e demanda outorgada em Araraquara.	54
Tabela 16: Indicadores de pressão “disponibilidade x demanda outorgada” na UGRHI 09.	54
Tabela 17: Indicadores de pressão “disponibilidade x demanda outorgada” na UGRHI 13.	55
Tabela 18: Indicadores de pressão “disponibilidade x demanda outorgada” em Araraquara.	57
Tabela 19: Demanda estimada de retiradas de água por uso em Araraquara.	58
Tabela 20: Demanda estimada de retiradas de água por uso em Araraquara.	60
Tabela 21: Balanço hídrico em Araraquara.	60
Tabela 22: Variação média da população e da urbanização em Araraquara.	61
Tabela 23: Evolução populacional em Araraquara.	62
Tabela 24: Uso e ocupação do solo em Araraquara.	66
Tabela 25: Zonas Isodensas, Plano Diretor da Água (PDA).	69
Tabela 26: Produção média de água para abastecimento em Araraquara.	70
Tabela 27: Captação média por mananciais superficiais em Araraquara.	71
Tabela 28: Evolução do sistema de abastecimento de água em Araraquara.	71
Tabela 29: Economias e consumo de água em Araraquara (2020)	71
Tabela 30: Evolução da do consumo e da demanda para o abastecimento público em Araraquara. .	72
Tabela 31: Índice de perdas no município de Araraquara.	73
Tabela 32: Evolução do sistema de esgoto em Araraquara.	74
Tabela 33: Geração per capita de esgotos em Araraquara.	75
Tabela 34: Disponibilidade hídrica superficial em Araraquara.	81

Tabela 35: Produção hídrica em Araraquara.....	82
Tabela 36: Vazão dos mananciais de abastecimento urbano em Araraquara.	82
Tabela 37: Demanda outorgada por tipo de captação na área urbana de Araraquara.....	83
Tabela 38: Demanda subterrânea outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.	84
Tabela 39: Demanda superficial outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.	84
Tabela 40: Demanda total outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.....	84
Tabela 41: Demanda total outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.....	84
Tabela 42: Demanda outorgada por tipo de captação na área rural de Araraquara.....	85
Tabela 43: Demanda subterrânea outorgada na área rural de Araraquara, por tipo de uso.	85
Tabela 44: Demanda superficial outorgada na área rural de Araraquara, por tipo de uso.	85
Tabela 45: Coeficiente de irrigação e de dessedentação animal para uso rural.	86
Tabela 46: Captações superficiais de água em Araraquara, capacidade instalada em 2.020.	87
Tabela 47: Estações de tratamento de água e esgoto, capacidade instalada em 2020.....	87
Tabela 48: Captações subterrâneas de água em Araraquara, capacidade instalada em 2020.	87
Tabela 49: Produção de água em Araraquara.	88
Tabela 50: Variação na ocupação do solo em Araraquara.....	88
Tabela 51: Variação na ocupação do solo em Araraquara por tipo de uso.....	89
Tabela 52: Evolução da ocupação urbana em Araraquara.	90
Tabela 53: Projeção da população para Araraquara – 2020 a 2050.....	91
Tabela 54: Estimativas de variação no uso e ocupação do solo em Araraquara, de 2020 a 2050.	96
Tabela 55: Estimativa da variação da população residente em Araraquara, de 2020 a 2050.....	99
Tabela 56: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica agrícola em Araraquara, de 2020 a 2050.....	101
Tabela 57: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.....	101
Tabela 58: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda "DIA" em Araraquara, de 2020 a 2050.	102
Tabela 59: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica total em Araraquara, de 2020 a 2050.	103
Tabela 60: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.	103
Tabela 61: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica subterrânea em Araraquara, de 2020 a 2050.	105
Tabela 62: Comparação entre os cenários para a estimativa de extrapolação do limite explotável para as águas subterrâneas em Araraquara, de 2020 a 2050.....	105
Tabela 63: Comparação entre os cenários para a estimativa de geração de efluentes urbanos em Araraquara, de 2020 a 2050.	106
Tabela 64: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação no Índice de Escassez Hídrica em Araraquara, de 2020 a 2050.	107

Tabela 65: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação no Índice de Estresse Hídrico em Araraquara, de 2020 a 2050.....	107
Tabela 66: População de saturação, Plano Diretor da Água (PDA).	141
Tabela 67: Determinação do coeficiente Kd.....	141
Tabela 68: Projeção da população para Araraquara.....	142
Tabela 69: Descrição dos parâmetros e variáveis do modelo de dinâmica de sistemas.....	143

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2.	HIPÓTESES	17
1.3.	OBJETIVOS	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1.	DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	18
2.2.	ESCASSEZ E ESTRESSE HÍDRICO	21
2.3.	DISPONIBILIDADE ESPECÍFICA DE ÁGUA	24
2.4.	GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS	27
2.4.1.	<i>Gestão da Água Urbana.....</i>	<i>29</i>
2.5.	USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS PARA A ANÁLISE DOS RECURSOS HÍDRICOS	31
2.5.1.	<i>Modelagem em dinâmica de sistemas por meio do software Vensim PLE</i>	<i>34</i>
2.5.1.1.	<i>Modelos matemáticos no software Vensim PLE.....</i>	<i>38</i>
3	METODOLOGIA	41
3.1.	ÁREA DE ESTUDO	41
3.2.	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	44
3.3.	PESQUISA DOCUMENTAL E COLETA DE DADOS.....	44
3.4.	DEFINIÇÃO E SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS DE INTERESSE	45
3.5.	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DINÂMICO	45
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	49
4.1.	DISPONIBILIDADE HÍDRICA LOCAL E REGIONAL	49
4.2.	DEMANDAS OUTORGADAS.....	50
4.3.	BALANÇO HÍDRICO	53
4.4.	USO CONSUNTIVO DA ÁGUA.....	58
4.5.	INDICADORES DE ESCASSEZ E ESTRESSE HÍDRICO	60
4.6.	POPULAÇÃO	61
4.7.	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	62
4.7.1.	<i>Evolução da ocupação urbana e do uso e ocupação do solo</i>	<i>65</i>
4.7.2.	<i>Zonas isodensas</i>	<i>68</i>
4.8.	SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS	70
4.8.1.	<i>Sistema de Abastecimento de Água</i>	<i>70</i>
4.8.2.	<i>Consumo per capita</i>	<i>72</i>
4.8.3.	<i>Sistema de Esgotamento Sanitário.....</i>	<i>73</i>
4.8.4.	<i>Sistema de Drenagem Urbana.....</i>	<i>75</i>
4.8.5.	<i>Gestão das águas urbanas</i>	<i>76</i>
5	RESULTADOS	80
5.1.	MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA A DISPONIBILIDADE HÍDRICA	80
5.1.1.	<i>Etapa de conceitualização</i>	<i>80</i>
5.1.1.1.	<i>Dados de interesse e de calibração do modelo</i>	<i>81</i>
5.1.2.	<i>Etapa de formalização.....</i>	<i>92</i>
5.1.3.	<i>Etapa de avaliação e exploração</i>	<i>94</i>
6	DISCUSSÕES	95
6.1.	VARIAÇÃO NA POPULAÇÃO E NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	96
6.2.	VARIAÇÃO NA DEMANDA E NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	100
6.3.	VARIAÇÃO NOS ÍNDICES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA	107
7	CONCLUSÃO	111

8	REFERÊNCIAS.....	114
	ANEXO A: ARRANJOS ENTRE OS COMPONENTES DO MODELO DINÂMICO	134
	ANEXO B: METODOLOGIA DE ESTIMATIVA POPULACIONAL	139
	ANEXO C: PARÂMETROS E VARIÁVEIS DO MODELO DINÂMICO	143

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade as mudanças nos sistemas ecológicos ocorreram em função de eventos naturais e antrópicos, no entanto, as transformações econômicas e sociais dos últimos séculos tem acelerado essas mudanças, alterando fluxos de energia, modificando *habitats* e interferindo nos processos hidrológicos (ALBERTI *et al.*, 2003). Como consequência, tem-se o aumento da ocorrência de eventos que impactam o meio ambiente e afetam a sobrevivência das populações.

Tanto o aumento populacional quanto a urbanização trouxeram desafios mais complexos para o gerenciamento das cidades e para a gestão de seus recursos naturais. A frequência com a qual surgem novas crises hídricas demonstra que o problema não é exclusivo das grandes aglomerações urbanas, tão pouco de regiões com problemas históricos de escassez. A indisponibilidade física de água, em conjunto com problemas de gerenciamento, desafia os municípios a buscarem soluções cada vez mais complexas para lidar com os recursos hídricos. E, parte destes desafios tem origem na incapacidade de conciliar o planejamento urbano com o crescimento populacional e de planejar o crescimento para que a capacidade dos sistemas urbanos não seja superada.

A urbanização induz mudanças ecológicas que influenciam os ciclos hidrológicos, alteram a composição do solo e diminuem a disponibilidade hídrica. À medida que os territórios urbanos crescem, o seu entorno é influenciado por estas mudanças, afetando os estoques naturais e comprometendo a disponibilidade dos serviços ecossistêmicos (IPCC, 2022; MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005; MURADIAN *et al.*, 2010; PARRON; GARCIA, 2015; WWAP, 2012).

Embora, muitas vezes, o planejamento urbano possa ser ecologicamente motivado ou baseado em fundamentos ecológicos, raramente são vinculados às funções ecológicas do ambiente. Para Andersson *et al.* (2021), a complexidade urbana requer uma compreensão sofisticada dos sistemas urbanos e de sua relação com os sistemas naturais. Para serem aplicáveis, as soluções precisam ser compreensíveis, contextualizadas e adaptáveis para atuarem nas estruturas e processos de governanças locais (ANDERSSON *et al.*, 2021; STADDON *et al.*, 2018).

Os sistemas urbanos estão conectados aos sistemas ambientais e os fluxos de serviços ecossistêmicos conectam territórios, populações e ecossistemas (YANG *et al.*, 2016). Estudos apontam, por exemplo, que a pegada hídrica de uma cidade ou

região pode extrapolar em muito os limites de suas fronteiras políticas e naturais (INGRAO *et al.*, 2023; PICKETT *et al.*, 2001). Assim, se faz necessária uma abordagem socioecológica dos sistemas hídricos urbanos, que considere sua complexidade, sua capacidade de adaptação e sua resiliência (CUMMING, 2011; FARHAD; GUAL; RUIZ-BALLESTEROS, 2015; OLIVEIRA, 2018).

No Brasil, de forma geral, a relação entre a oferta de recursos hídricos e demanda não indica situações globais de estresse ou escassez hídrica, no entanto, ao tratar da questão em escalas regionais ou locais, surgem cenários suscetíveis ao estresse e à escassez, seja pela influência de eventos climáticos, por problemas de gerenciamento ou pelo uso intenso dos recursos hídricos (TUCCI; HESPANHOL; CORDEIRO NETTO, 2000).

Esta situação, faz com que a tomada de decisões sobre os recursos hídricos necessite de uma compreensão mais assertiva dos contextos locais e regionais, bem como, da capacidade em estimar com maior grau de certeza os cenários futuros de disponibilidade hídrica. Desta forma, o uso da dinâmica de sistemas no gerenciamento dos recursos hídricos pode possibilitar, com a construção de cenários mais complexos e assertivos sobre o comportamento dos sistemas hídricos, um planejamento mais eficaz a longo prazo.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A partir da análise da literatura, observa-se que diversos estudos sobre a disponibilidade hídrica estão focados em escalas globais ou nacionais, o que traz diagnósticos generalistas sobre as condições hídricas dos territórios. No Brasil, verifica-se que estudos sobre os sistemas hídricos tem utilizados a dinâmica de sistemas como método de análise, mas com foco na análise de bacias hidrográficas (SOUZA *et al.*, 2010; CORREIA DE ARAÚJO *et al.*, 2019; RIBEIRO *et al.*, 2022) ou de sistemas de abastecimentos (FREITAS; SANTOS; BAHIA, 2018) (GONZALEZ *et al.*, 2008).

Embora as diferentes análises partam de situações semelhantes, como balanço hídrico, disponibilidade hídrica e variação populacional, fica evidente a importância da regionalidade nas análises apresentadas, reforçando a necessidade de estudos em escala local para fornecer análises que reflitam com maior precisão as interações entre os usuários e recursos hídricos.

Neste sentido, dado os desafios que envolvem a gestão dos recursos hídricos em âmbito local e a dificuldade em se conciliar o aumento da demanda com as deficiências estruturais dos municípios e, ainda, com as limitações ambientais destes recursos. Torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que possibilitem analisar as complexas relações que envolvem os múltiplos usuários da água e os cenários cada vez mais restritivos de disponibilidade hídrica

Mediante o exposto, o problema de pesquisa que este estudo se propõe a analisar é: a modelagem com o uso de dinâmica de sistemas é uma ferramenta adequada para a análise da disponibilidade hídrica e das relações entre oferta e demanda em um contexto local?

1.2. HIPÓTESES

Esta pesquisa parte das seguintes hipóteses para o seu desenvolvimento: (a) a dinâmica de sistemas é um método válido para a análise da disponibilidade hídrica num contexto local; (b) a modelagem em dinâmica de sistemas pode ser utilizada como ferramenta de gestão para a elaboração de diagnósticos e criação de cenários de disponibilidade hídrica em escala municipal.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar a disponibilidade hídrica no município de Araraquara a partir de uma abordagem de dinâmica de sistemas.

Os objetivos específicos são:

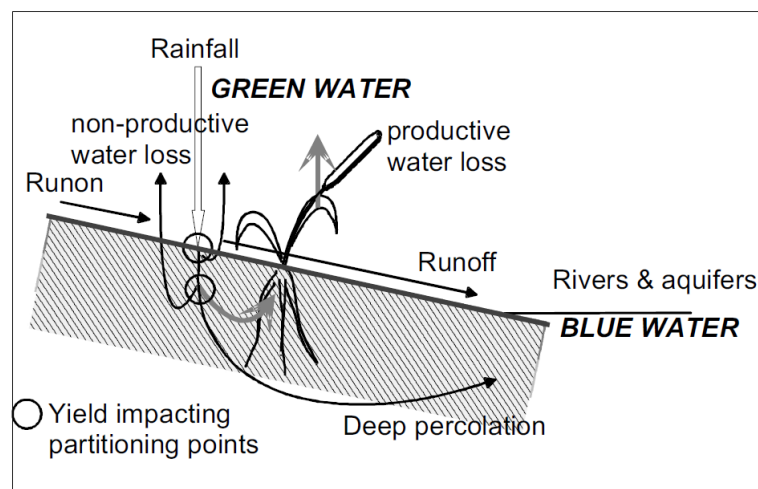
- Identificar os componentes e as variáveis envolvidos com a disponibilidade hídrica no município;
- Gerar um modelo de simulação dinâmica, por meio do software Vensim PLE, da disponibilidade hídrica no município;
- Gerar cenários que correlacionem a disponibilidade hídrica e o uso e ocupação do solo no município.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Os recursos hídricos são compostos por dois fluxos principais, o fluxo de água azul e o fluxo de água verde. O fluxo de água azul, Figura 1, é a parte da água que forma os sistemas hídricos superficiais e subterrâneos, disponíveis para o uso consuntivo. O fluxo de água verde, Figura 1, é a parte devolvida à atmosfera pelos processos de evaporação e evapotranspiração. É a água retida na zona não saturada do solo, formada pela infiltração e disponível para as plantas (FALKENMARK, 2000, 2003; HOFF *et al.*, 2010; QUINTEIRO *et al.*, 2015). De acordo com Falkenmark (2000), apesar da ampla interação entre os fluxos de água verde e azul e da interdependência ecológica e social de ambos, a abordagem convencional dos recursos hídricos tem se concentrado apenas nos fluxos de água azul.

Figura 1: Fluxos de água verde e água azul.



Fonte: Falkenmark (2000).

A disponibilidade hídrica constitui a parcela dos recursos hídricos disponíveis para uso da sociedade, apresenta variação no tempo e no espaço e não está limitada ao uso consuntivo. A disponibilidade de água não é uniforme e a maior parte da água disponível para consumo está concentrada em grandes bacias hidrográficas, distantes dos centros consumidores. Em nível global, cerca de três quartos das chuvas anuais ocorrem em áreas onde vivem menos de um terço da população mundial (BOBERG, 2005; CRUZ; TUCCI, 2008).

A disponibilidade hídrica em uma determinada localidade é verificada pelo seu balanço hídrico que avalia o nível de comprometimento da condição hídrica local por meio da relação entre as “entradas” e as “saídas” de água em um sistema, trata-se de uma análise crítica, pois, possibilita verificar a sustentabilidade hídrica local ou regional.

Para a verificação das “entradas” de água no sistema são utilizadas as vazões de referência, ou seja, a disponibilidade hídrica natural da bacia é representada pela vazão média associada a uma ou mais vazões típicas de tempo seco e configura o potencial de exploração dos recursos hídricos da bacia, delimitada através de seus limites máximos e mínimos (SÃO PAULO, 2020b).

As vazões de referência são utilizadas para definir os limites outorgáveis de um corpo hídrico ou bacia, garantindo que seja mantida uma vazão mínima, uma vez que é outorgável apenas uma fração das vazões de referência, com o intuito de garantir a finalidade ecológica do corpo hídrico e a sustentabilidade do ecossistema. A vazão de referência $Q_{95\%}$ é determinada a partir de observações em um posto fluviométrico onde se verifica, em um dado período, a vazão igualada ou superada em um ponto do rio em 95% do tempo. A vazão de referência $Q_{7,10}$ é a menor vazão média consecutiva de sete dias que ocorreria em um período de retorno de 10 anos. O cálculo da $Q_{7,10}$ é probabilístico, enquanto a $Q_{95\%}$ decorre de uma análise de frequências (ANA, 2011).

Para a disponibilidade hídrica superficial, são considerados apenas o sistema hídrico natural da bacia, não sendo computados os dados de transposição ou das vazões recebidas de outras bacias. A disponibilidade hídrica subterrânea é calculada com base no parâmetro $Q_{95\%}$ das bacias hidrográficas, ou seja, à vazão superficial mínima de permanência com frequência de 95% do tempo (DAAE, 2022b; SÃO PAULO, 2020b).

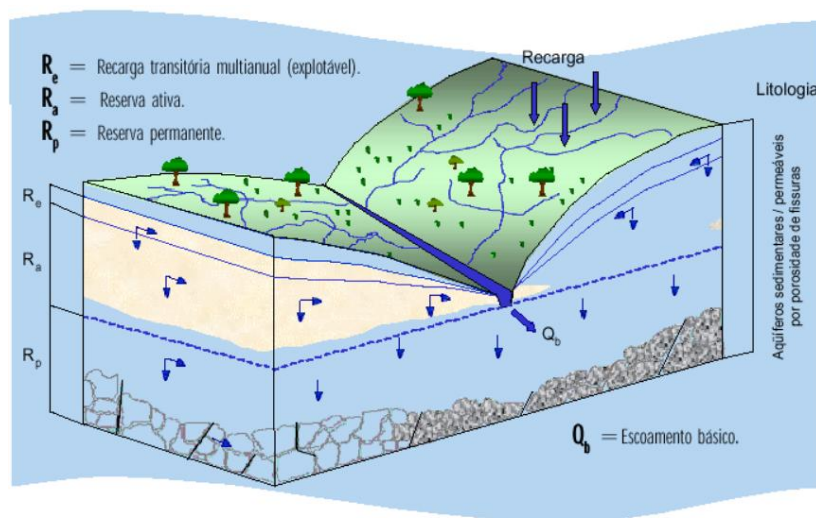
Para definir a disponibilidade hídrica subterrânea, são utilizados os valores das reservas reguladoras e explotáveis. Esta metodologia considera os aquíferos livres e sua interação com os cursos d'água superficiais, não considera as reservas permanentes dos aquíferos, porções confinadas ou recargas profundas (SÃO PAULO, 2020b).

A disponibilidade subterrânea é calculada através da estimativa do volume de água que está disponível para consumo, sem comprometimento das reservas totais, ou seja, a reserva explotável é semelhante ao volume infiltrado. De acordo com CORHI (2000), a disponibilidade no aquífero relaciona-se diretamente com o

escoamento básico da bacia de drenagem instalada sobre a área de ocorrência (CORHI, 2000).

Desta forma, um consumo acima de 100% significa que a demanda está acima do volume de recarga do aquífero (CBH-TJ, 2020). Conforme a Figura 2, a reserva transitória multianual (R_e) corresponde à reserva explotável do aquífero ou disponibilidade potencial de água subterrânea. Ela é calculada a partir do escoamento básico da bacia, multiplicado pela fração da área do aquífero na bacia e pelo índice de utilização definido para cada aquífero¹.

Figura 2: Tipos de reservas de águas subterrâneas.



Fonte: CORHI (2000).

Para as saídas de água do sistema, são consideradas as demandas pelo uso da água, classificadas por tipo de captação, superficial ou subterrânea, e pela finalidade de uso, tais como abastecimento público², industrial ou para irrigação. Estas demandas são verificadas a partir do cadastro das outorgas de uso da água que, no Estado de São Paulo, são concedidas pela Agência de Águas do Estado de São Paulo (SP-ÁGUAS)³ e sistematizadas nos relatórios de situação das bacias pelos Comitês

¹ Por razões hidrogeológicas dos aquíferos e pelas técnicas disponíveis para a captação de águas subterrâneas, foram estabelecidos índices de utilização dos volumes estocados, correspondentes à recarga transitória média multianual para diferentes tipos de aquífero. Sendo: Cenozoico, Bauru, Paraná-Furnas e Tubarão, de 25 a 27%; Guarani, Bauru-Caiuá, litorâneo e Quaternário, 30%; cristalino e Serra Geral, 20%, e; Passa-Dois, 15% (CORHI, 1999).

² A demanda urbana considera a demanda comercial e a demanda para abastecimento público (CBH-TJ, 2011).

³ A Lei Complementar nº 1413, de 23 de setembro de 2024, transformou o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), do Estado de São Paulo, na Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-ÁGUAS.

de Bacias Hidrográficas (CBH). No entanto, e acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019), apenas o inventário de cadastro de outorgas pode não ser o suficiente para a estimativa do uso da água em uma determinada localidade, dado a imprecisão em se estimar as vazões efetivamente utilizadas. Uma alternativa é a aplicação de metodologias indiretas para o cálculo do uso da água, conforme, por exemplo, os dados apresentados no Levantamento do Uso Consultivo da Água (ANA, 2019) e disponibilizados no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2022).

2.2. ESCASSEZ E ESTRESSE HÍDRICO

A escassez hídrica, seja por eventos naturais ou induzidos pelo homem, cria cenários de instabilidades econômicas, sociais e ambientais que, em nível global, refletem em crises humanitárias, de insegurança alimentar e em ondas migratórias (FALKENMARK; LUNDQVIST; WIDSTRAND, 1990). A escassez não está relacionada apenas à disponibilidade física de água, pode ser induzida por questões sociais, políticas e econômicas e pode ocorrer tanto por perturbações nos fluxos de água azul quanto nos fluxos de água verde (WATKINS *et al.*, 2006).

A identificação do tipo e das causas da escassez é fundamental para ações de controle e enfrentamento. Neste sentido, pode-se dividir a escassez hídrica em dois tipos principais (DAMKJAER; TAYLOR, 2017; FALKENMARK, 2013; FALKENMARK *et al.*, 2007; KUMMU *et al.*, 2010, 2016; TAYLOR, 2009):

- a) **escassez hídrica ou escassez real**, que ocorre quando a disponibilidade física de água é insuficiente para o atendimento das demandas sociais e ecológicas. Está relacionada à quantidade de pessoas que compartilham uma determinada quantidade de água em um período. Pode ser verificada por meio do Índice de Aglomeração de Água (*water crowding index* ou *water stress index*), de Falkenmark, que mede a quantidade de pessoas que compartilham uma unidade de fluxo (DAMKJAER; TAYLOR, 2017; FALKENMARK, 2013; FALKENMARK *et al.*, 2007; KUMMU *et al.*, 2010, 2016; TAYLOR, 2009), e;
- b) **escassez aparente ou estresse hídrico**, que ocorre quando a disponibilidade física de água é suficiente para o atendimento das

demandas, mas o consumo é elevado. Pode ser verificada examinando a quantidade de água retirada dos sistemas hídricos, por meio do “Índice de Utilização até a Disponibilidade” (*use-to-availability index*), que mede a quantidade de água retirada em relação à disponibilidade. (DAMKJAER; TAYLOR, 2017; FALKENMARK, 2013; FALKENMARK *et al.*, 2007; KUMMU *et al.*, 2010, 2016; TAYLOR, 2009).

Falkenmark (1992) propôs o uso da “unidade anual de fluxo”, equivalente a 1 milhão de metros cúbicos de água por ano, para classificar a disponibilidade hídrica de uma determinada região. A classificação se dá pela relação entre uma unidade de fluxo e a quantidade de pessoas que compartilham, anualmente, esta unidade (FALKENMARK, 1992).

De acordo com Vörösmarty *et al.* (2005), entre os primeiros pesquisadores a chamar a atenção para a escassez hídrica global estão Falkenmark e Lindh, quando apresentaram, durante a Conferência Mundial sobre População realizada pela ONU em 1974, o indicador “*Water Stress Index (WSI)*”, para verificar se a escassez hídrica que ocorriam em diversas regiões do planeta estava relacionada a eventos naturais ou antrópicos (VÖRÖSMARTY *et al.*, 2005). Posteriormente, novas abordagens foram aplicadas para a verificação do “*Water Stress Index (WSI)*”, com a adição de novas variáveis às análises, tais como a influência climática, da governança da água e dos fluxos de água virtual (AL RASHED *et al.*, 2023; ALLOUCHE, 2011; FALKENMARK, 2003, 2013, 1997; INGRAO *et al.*, 2023; KARIMI *et al.*, 2024; KUMMU *et al.*, 2016).

Para Vörösmarty *et al.* (2005), apesar da importância dos estudos em escalas global ou nacionais, é necessário problematizar também as questões hídricas em escalas locais, onde são verificadas as consequências das ações de governança da água e onde se vivencia com mais contundência os efeitos da influência climática, da densidade populacional e dos conflitos decorrentes do uso.

Os estudos sobre a escassez hídrica, de acordo com Taylor (2009), utilizam, em sua maioria, duas metodologias. Ambas baseadas no escoamento médio anual dos rios⁴, como, por exemplo, o “*Water Stress Index (WSI)*” de Falkenmark *et al.* (1989) que avalia a disponibilidade per capita anual de água e o “*Index of Local Relative Water Use*”, proposto por Vörösmarty *et al.* (2005), obtido a partir da relação

⁴ Mean annual river runoff (MARR).

entre o uso estimado de água e a disponibilidade local. Falkenmark *et al.* (1989) estabeleceram a quantidade per capita de água de 1.700 m³/pessoa.ano como o mínimo necessário para uma condição ideal de disponibilidade hídrica, Tabela 1. Qualquer valor abaixo desta condição cria a possibilidade de variados graus de escassez hídrica. Vörösmarty *et al.* (2005) estabeleceram que uma situação de estresse hídrico pode ser verificada a partir da relação entre o uso da água e a disponibilidade hídrica local, o “*Index of Local Relative Water Use*” que utiliza a relação entre a soma das vazões necessárias para atender as demandas (“*domestic, industrial and agricultural – DIA*”) e a vazão superficial disponível (Q) em um corpo hídrico ou bacia, para determinar o grau de estresse hídrico, conforme Tabela 2.

Tabela 1: Índice de Estresse Hídrico e Escassez hídrica.

Categoria	Índice de estresse hídrico "invertido" ⁵	Limites atuais do índice de estresse hídrico
	(pessoas/unidades de fluxo)	(m ³ /pessoa.ano)
Sem estresse	>600 pessoas/unidade de fluxo	>1700
Escassez de água	600-1000 pessoas/unidade de fluxo	1700-1000
Estresse hídrico	1000-2000 pessoas/unidade de fluxo	1000-500
Estresse hídrico absoluto	<2000 pessoas/unidade de fluxo	<500

Fonte: Adaptado de Damkjaer e Taylor (2017).

Tabela 2: Índice de uso relativo local da água (Estresse hídrico).

DIA/Q	Classificação
<10%	estresse hídrico baixo
10%-20%	estresse hídrico moderado
20%-40%	estresse hídrico moderado-alto
>40%	estresse hídrico alto

Fonte: Adaptado de Vörösmarty *et al.* (2005).

Kummu *et al.* (2016), em um estudo sobre as trajetórias subnacionais da escassez hídrica durante o século XX, unificou as propostas de análise da escassez de Falkenmark (FALKENMARK *et al.*, 1989), Tabela 1, e do estresse hídrico de Vörösmarty (VÖRÖSMARTY *et al.*, 2005), Tabela 2, de forma estruturada em uma adaptação da matriz de Falkenmark (FALKENMARK, 2013, 1997; FALKENMARK *et*

⁵ A unidade de fluxo na coluna para “índice de estresse hídrico invertido” é igual a 10⁶ m³. Para obter os “Limites atuais do índice de estresse hídrico”, uma unidade de fluxo deve ser dividida pelo número de pessoas que estão competindo por esta água (DAMKJAER E TAYLOR, 2017).

al., 2007), conforme demonstrado na Tabela 3. Segundo o autor, a análise conjunta destes eventos, a partir de uma trajetória histórica, permite determinar a ordem de ocorrência de cada evento hídrico, bem como a categoria da escassez.

Tabela 3: Tabela de referência entre os tipos de escassez.

Estresse hídrico (%)	Escassez hídrica (m³/pessoa.ano)	Estado da escassez hídrica e correlação entre as condições de estresse e escassez hídrica
0,2–0,4	> 1700	Estresse hídrico moderado
> 0,4	> 1700	Estresse hídrico alto
< 0,2	1000–1700	Escassez hídrica moderada
< 0,2	< 1000	Escassez hídrica alta
0,2–0,4	1000–1700	Estresse hídrico moderado + Escassez hídrica moderada
> 0,4	1000–1700	Estresse hídrico alto + Escassez hídrica moderada
0,2–0,4	< 1000	Estresse hídrico moderado + Escassez hídrica alta
> 0,4	< 1000	Estresse hídrico alto + Escassez hídrica alta
> 0,2	< 1700	Sem escassez

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Kummu *et al.* (2016).

2.3. DISPONIBILIDADE ESPECÍFICA DE ÁGUA

Baseado nos trabalhos de Falkenmark (FALKENMARK, 1992), para problemas associados ao gerenciamento dos recursos hídricos, Mierzwa (2002) propôs uma correlação entre a disponibilidade hídrica e o potencial de surgimento de conflitos decorrentes da competição pelo uso da água, com a aplicação conjunta de dois indicadores:

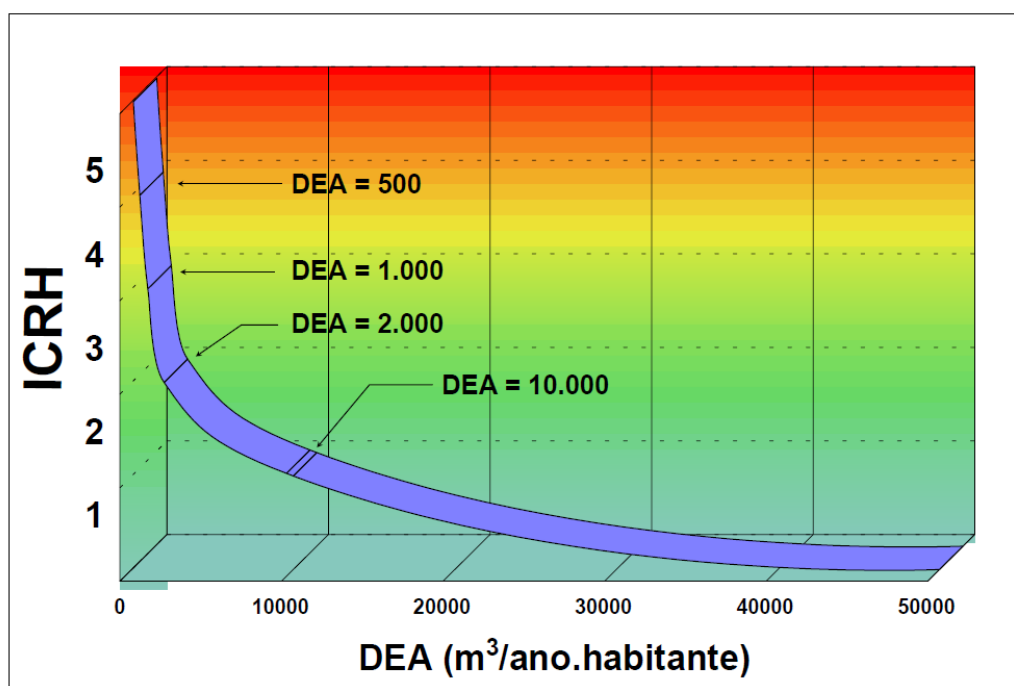
- Disponibilidade Específica de Água (DEA)**⁶, que relaciona a disponibilidade anual de água por habitante, expressa em “m³/habitante.ano.”, e;
- Índice de Comprometimento dos Recursos Hídricos (ICRH)**, associado à tendência de surgimento de conflitos pelo uso da água, expresso em uma escala adimensional de 1 a 5. Sendo que o valor “1” indica um cenário “sem tendência para o surgimento de estresse

⁶ Embora a expressão empregada inicialmente seja “Demanda Específica de Água (DEA)” (MIERZWA, 2002, p. 12), no decorrer da análise se adotou a expressão “Disponibilidade Específica de Água (DEA)”, mais adequado para a discussão apresentada.

ambiental ou conflito” e “5” um cenário com “condição crítica com relação ao estresse ambiental e a geração de conflitos”.

A associação entre DEA e ICRH⁷, Figura 3, possibilita identificar regiões onde há maior probabilidade do surgimento de conflitos relacionados ao uso da água (MIERZWA, 2002, p. 35). Considerando a disponibilidade hídrica⁸ das Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI) do Estado de São Paulo, para o ano de 2010, Mierzwa (2002) identificou que 8 das 22 UGRHIs do Estado apresentavam uma situação de potencial estresse hídrico e surgimento de conflitos pelo uso da água.

Figura 3: Relação entre DEA e ICRH.



Fonte: Mierzwa (2002).

A partir do trabalho de Mierzwa (2002), aplicou-se à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13), na qual se localiza o município de Araraquara, a classificação dos indicadores DEA e ICRH. Verificou-se que alguns municípios, apesar de não apresentarem cenários de escassez, apresentam criticidade referente ao DEA e ao ICRH, conforme Tabela 4. No entanto, para uma

⁷ Tabela "Associação para as tendências para o surgimento de estresse ambiental e geração de conflitos e os problemas associados à competição pelo uso da água" (MIERZWA, 2002, p. 13).

⁸ Mierzwa (2002) utilizou a vazão média de longo período para estimar a maior vazão possível de ser regularizada.

avaliação mais detalhada é preciso considerar outros aspectos que não apenas as vazões médias, mas, tanto a DEA quanto o ICRH apresentam um diagnóstico importante para a verificação da conjuntura hídrica destes municípios.

Tabela 4: DEA e ICRH por município na UGRHI 13.

Municípios	Disponibilidade superficial			População	DEA (Q _{média})	ICRH
	Q _{7.10}	Q _{95%}	Q _{média}	Ano base 2022	2022	
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(Habitantes)	(m³/habitante.ano)	
Agudos	3,54	4,45	8,6	37.680	7.197,71	2
Araraquara	3,40	4,50	10,0	242.228	1.301,91	3
Arealva	1,72	2,15	4,2	8.130	16.291,66	1
Areiópolis	0,30	0,38	0,7	10.130	2.179,19	2
Bariri	1,49	1,86	3,6	31.595	3.593,28	2
Barra Bonita	0,46	0,61	1,3	34.346	1.193,64	3
Bauru	1,78	2,27	5,2	379.146	432,52	5
Boa Esperança do Sul	2,27	2,83	5,5	12.978	13.364,77	1
Bocaina	1,22	1,52	3,0	11.259	8.402,88	2
Boracéia	0,40	0,50	1,0	4.715	6.688,44	2
Borebi	1,32	1,65	3,2	2.713	37.196,90	1
Brotas	3,76	4,69	9,1	23.898	12.008,44	1
Dois Córregos	2,02	2,75	6,2	24.510	7.977,28	2
Dourado	0,70	0,88	1,7	8.096	6.621,94	2
Gavião Peixoto	0,83	1,03	2,0	4.702	13.413,87	1
Iacanga	1,72	2,16	4,4	10.437	13.294,85	1
Ibaté	0,99	1,27	2,6	32.178	2.548,13	2
Ibitinga	2,19	2,75	5,5	60.033	2.889,21	2
Igaraçu do Tietê	0,28	0,37	0,8	23.106	1.091,87	3
Itajú	0,76	0,95	1,9	3.618	16.561,19	1
Itapuí	0,48	0,60	1,2	13.659	2.770,57	2
Itirapina	1,79	2,48	5,7	16.148	11.131,73	1
Jaú	2,34	2,91	5,6	133.497	1.322,89	3
Lençóis Paulista	2,86	3,59	6,9	66.505	3.271,91	2
Macatuba	0,76	0,94	1,8	16.829	3.373,03	2
Mineiros do Tietê	0,52	0,76	1,8	11.230	5.054,75	2
Nova Europa	0,55	0,68	1,3	9.311	4.403,05	2
Pederneiras	2,46	3,09	6,0	44.827	4.221,03	2
Ribeirão Bonito	1,59	1,98	3,8	10.989	10.905,16	1
São Carlos	3,79	5,27	13,0	254.857	1.608,62	3
São Manuel	1,67	2,43	5,7	37.289	4.820,60	2
Tabatinga	1,19	1,49	3,0	14.769	6.405,85	2
Torrinha	1,02	1,37	3,1	9.335	10.472,59	1
Trabijú	0,30	0,39	0,7	1.682	13.124,38	1
UGRHI-13	40,00	50,00	97,0	1.606.425	1.904,22	3

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Mierzwa (2002), IBGE (2023) e CBH-TJ (2016, 2023).

2.4. GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS

A Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH)⁹ é um processo que promove o desenvolvimento coordenado da gestão da água, da terra e dos recursos relacionados, a fim de maximizar o bem-estar econômico e social, sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas (AGARWAL *et al.*, 2000; HASSING *et al.*, 2009). Conceitualmente, desde a apresentação na primeira conferência global sobre água em Mar Del Plata (UN, 1977), a GIRH teve sua importância reforçada na Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente em Dublin (UN, 1992) e a água teve o reconhecimento de seu valor econômico e ambiental (UN, 1993), de seu papel social e de sua relação com os direitos humanos (UN, 2000).

A GIRH pressupõe o uso sustentável dos recursos, uma abordagem multissetorial e o emprego de medidas estruturais e não estruturais. Esta concepção integra a gestão dos recursos hídricos ao desenvolvimento urbano e conecta os sistemas hídricos urbanos aos sistemas ambientais (SILVA; PORTO, 2003).

Para Falkenmark (2003), tendo em vista a mudança acelerada nos cenários de escassez e o aumento da competição para o uso da água, uma mudança de paradigma se faz necessária, no sentido de incorporar à gestão dos recursos hídricos as demandas ecossistêmicas e não apenas as demandas consuntivas.

A gestão dos recursos hídricos envolve uma abordagem integrada e multidisciplinar dos sistemas naturais que, apesar da literatura e da legislação enfatizarem a importância da gestão integrada, o que se observa é um desalinhamento entre a gestão hídrica e a gestão dos territórios, com ações locais desconectadas da realidade regional e cenários incertos quanto a sustentabilidade dos sistemas hídricos (SILVA; PORTO, 2003; TUCCI, 2008a).

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos é definida pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), que adotou como princípios a gestão compartilhada, a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento, o uso múltiplo e o uso prioritário dos recursos hídricos. Também instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). No Estado de São Paulo, a gestão dos recursos hídricos também é orientada pela Política Estadual de Recursos Hídricos

⁹ Integrated Water Resources Management (IWRM) (UN, 1977).

(SÃO PAULO, 1991), que entre outros dispositivos, instituiu o Sistema Estadual de Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos (PORTO, 2012).

Em escala local, a gestão é realizada pelos municípios de forma compartilhada com o Estado e a União, com a aplicação da legislação municipal (planos diretores, planos municipais de saneamento, lei de zonamento e parcelamento do solo, etc.), estadual e federal, tais como o Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001), a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981), Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), a Política Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007), a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), o Código Florestal (BRASIL, 2012), entre outras.

Apesar da existência dos arranjos institucionais, no Brasil, a incompatibilidade entre a gestão dos territórios e a gestão dos recursos hídricos dificulta a sua implantação da GIRH (TUCCI, 2008a). As ocupações urbanas tendem a reforçar esta condição, com a formação de áreas desconectadas e ineficientes quanto ao aproveitamento dos recursos naturais. No ambiente urbano, a GIRH deve atender às condicionantes definidas pelos contextos locais e regionais do município e ser definida conforme as relações de dependência da água e das bacias hidrográficas (TUCCI, 2008a).

Para Van Den Brandeler (2020), a Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas (GIBH) é um subconjunto da GIRH focada na escala da bacia. A ideia principal é combinar a condição ecológica da bacia com a escala de gestão, ou seja, internalizar questões que de outras formas seriam externalizadas, como, por exemplo, a demanda à jusante da bacia. A GIRH é um conceito mais amplo, com dimensões políticas e administrativas que integram diferentes níveis e escalas de governança.

A GIBH deve compreender que, além dos fluxos de água azul, também se deve prestar atenção aos fluxos de água verde (FALKENMARK, 2003). A bacia hidrográfica é consumidora de água e suas áreas de jusante são dependentes das áreas de montante. Desta forma, a bacia hidrográfica é um dos principais cenários para a construção de relações de colaboração e de interação entre os componentes da paisagem, as ações antrópicas e o papel da água nos efeitos destas interações (FALKENMARK, 2003; PICKETT *et al.*, 2001; VAN DEN BRANDELER, 2020).

No Brasil, em escala nacional, a gestão das bacias hidrográficas é definida pelo Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH), que estabeleceu a divisão hidrográfica nacional em 12 regiões hidrográficas principais. No Estado de São Paulo,

a gestão das bacias hidrográficas está estruturada em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs)¹⁰. As UGRHs são unidades de gestão territorial que atuam de forma compatibilizada com as divisões políticas e administrativas dos territórios (SÃO PAULO, 2020a).

2.4.1. Gestão da Água Urbana

De acordo com Van Den Brandeler (2020), a gestão da água urbana passou por mudanças importantes nas últimas décadas, evoluindo do conceito de Gestão da Água Urbana (GAU) para Gestão Integrada da Água Urbana (GIAU) e também Gestão Sustentável da Água Urbana (GSAU).

Nas áreas urbanas, a gestão dos recursos hídricos está associada aos sistemas de abastecimento, esgotamento sanitário e drenagem urbana, bem como aos serviços de manejo dos resíduos sólidos e de limpeza urbana (TUCCI, 2008a, b). O conceito de GAU reflete uma visão de planejamento urbano que busca controlar os fluxos de água, promover a saúde pública e a segurança das propriedades, sem preocupações aprofundadas quanto às interações sociais e ambientais que envolvem os recursos hídricos.

Em contraponto, a GIAU e a GSAU exigem abordagens que considerem os sistemas hídricos urbanos como componentes de um sistema integrado e inserido em um sistema ecológico mais amplo. Deve-se passar de uma abordagem mais centralizada e tecnocrática para uma abordagem mais alinhada ao paradigma do desenvolvimento sustentável (MITCHELL, 2006; VAN DEN BRANDELER, 2020).

Na prática, a transição da GAU para a GIAU implica em integrar a GAU à política de uso do solo e o planejamento urbano, considerando o ciclo da água urbana e a relação entre a oferta e as demandas ambientais, sociais e econômicas. Implica em diversificar a infraestrutura urbana com tecnologias de pequena escala e em níveis menores que o “municipal”, tais como a implantação de soluções distritais, de bairro ou comunitárias. Também implica em integrar as atividades urbanas com a gestão das bacias e dos ecossistemas locais (DAIGGER, 2011; MITCHELL, 2006; VAN DEN BRANDELER, 2020).

¹⁰ Instituído pela Lei Estadual n.º 9.034, de 27 de dezembro de 1994, posteriormente revogada pela Lei Estadual n.º 16.337, de 14 de dezembro de 2016.

Para Mitchell (2006), a abordagem convencional da GAU, baseada em sistemas centralizados e de transporte, não é sustentável a longo prazo, dado os seus impactos sociais, econômicos e ambientais, além dos elevados custos para a implantação e manutenção das infraestruturas. Desta forma, para Mitchell (2006), a transição para uma abordagem de gestão integrada da água urbana é o caminho natural para se implantar sistemas urbanos mais resilientes e cidades mais sustentáveis.

No entanto, de acordo com Susana Neto (2016), apesar da multiplicidade de fóruns sobre a gestão integrada da água, não há um quadro comum para avaliar a governança da água e seu impacto na esfera urbana. Mitchell (2006) e Susana Neto (2016), a partir da análise da gestão da água em diversos contextos urbanos, elencaram alguns princípios que podem ser observados em experiências de implantação da GIAU, tais como:

- a) atenção para o contexto local e a escala espacial da ação;
- b) necessidade de diálogo institucional entre as diferentes esferas e níveis de decisão com relação à água;
- c) necessidade de incluir as partes interessadas nos processos de planejamento e tomada de decisão;
- d) a importância de desenvolver sinergias entre a gestão da água e outras ações de desenvolvimento urbano;
- e) atenção a todas as etapas do ciclo da água, e;
- f) considerar todos os usos da água, tanto antrópicos como ecológicos.

Van Den Brandeler (2020), a partir da revisão da literatura e da análise comparativa da gestão da água urbana entre as regiões metropolitanas da cidade de São Paulo (Brasil) e da Cidade do México (México), apresentou um quadro analítico das principais características que diferenciam as abordagens da Gestão da Água Urbana (GAU) da Gestão Integrada da Água Urbana (GIAU), conforme Quadro 1.

Quadro 1: Principais características dos tipos de gestão da água urbana.

Parâmetro	Gestão da Água Urbana	Gestão Integrada da Água Urbana
Objetivos	Acessibilidade, universalização dos serviços e saúde pública. Controle de enchentes e inundações.	Além das metas abordadas pela gestão da água urbana, também se preocupa com a sustentabilidade, adaptação e bem-estar humano.
Escala principal de implantação das ações	Urbano.	Sub-bacia urbana (dentro dos limites municipais)
Abordagem	Tecnocrática e centralizada; gestão separada de diferentes etapas do ciclo urbano da água; abordagem linear de captação, utilização e descarte rápido de água.	Integração da infraestrutura cinza e verde. Busca combinar as abordagens centralizada e participativa e combinar medidas convencionais e alternativas; combinação de medidas estruturais e não estruturais.
Atores	Órgãos municipais, concessionárias de água.	Órgãos municipais (incluindo departamento ambiental, transporte, etc.), concessionárias de água, organizações da sociedade civil, setor privado.
Objeto	Fornecimento de água potável, coleta e tratamento de esgoto, gestão de águas pluviais, proteção contra inundações e controle da poluição.	Além dos objetos abordados pela gestão da água urbana, busca sinergias com a gestão/conservação ambiental e com outros atores urbanos (planejamento, habitação, etc.)
Usuários	Todos os usuários na área urbana.	Todos os usuários na área urbana, usuários a montante, jusante e usuários não-urbanos; usuários de uma mesma bacia; demandas ambientais de água (<i>Environment Water Requirements (EWR)</i>).
'Inputs' de água	Água azul (águas subterrâneas e águas superficiais; importação de água); atendimento irrestrito da demanda.	Água azul, incluindo fontes de água locais após reabilitação e águas pluviais; água cinza (águas residuais tratadas); manutenção de um atendimento sustentável da demanda.
'Outputs' de águas residuais / águas pluviais	Afastamento da área urbana; foco na higiene e no controle dos riscos de enchentes/deslizamentos urbanos.	Reciclagem, reutilização ou infiltração; a adaptação às alterações climáticas é cada vez mais considerada.

Fonte: Adaptado de Van Den Brandeler (2020).

2.5. USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS PARA A ANÁLISE DOS RECURSOS HÍDRICOS

A Dinâmica de Sistemas (DS) é uma metodologia que permite, por meio da simulação e da modelagem, identificar e analisar o comportamento dos componentes em um sistema dinâmico (STERMAN, 2002). A capacidade em criar cenários com simulação computacional é o que permite à DS antecipar análises que de outras

formas seriam inviabilizadas ou muito difíceis de serem executadas (SEHLKE; JACOBSON, 2005).

A DS oferece uma abordagem eficiente para a modelagem de uma infinidade de problemas dinamicamente complexos. O seu uso na gestão de recursos hídricos permite incorporar aos modelos uma dimensão temporal, diversidade de parâmetros e variáveis em diferentes níveis de complexidade. A DS permite a conexão dos sistemas hídricos a eventos e fenômenos climáticos, sociais e econômicos, contribuindo para a criação de cenários mais próximos às condições reais de funcionamento (PLUCHINOTTA *et al.*, 2021; WEI *et al.*, 2016).

A abordagem de DS tem se demonstrado útil para atuar como suporte à decisão em sistemas de gestão, uma vez que permite relacionar dados hidrológicos complexos com eventos diversos, tais como as mudanças climáticas, questões políticas e regulatórias, ambientais, econômicas e sociais. É uma ferramenta promissora para auxiliar no planejamento dos recursos hídricos (RYU *et al.*, 2012; SEHLKE; JACOBSON, 2005; ZARGHAMI; AKBARIYEH, 2012).

De acordo com Zarghami e Akbariyeh (2012), com a aplicação da DS, a análise dos recursos hídricos passou da verificação de sistemas isolados para a análise de sistemas complexos. É a “complexidade dinâmica encontrada nos sistemas hídricos urbanos que apresenta grandes dificuldades para a gestão das águas urbanas. Isso ocorre porque geralmente não conseguimos relacionar causas com efeitos removidos pelo tempo ou pela distância” (ZARGHAMI; AKBARIYEH, 2012, p. 99).

O uso da DS permitiu uma análise mais aprofundada dos sistemas hídricos e reforçou a viabilidade de soluções factíveis para os problemas causados pela escassez hídrica, como, por exemplo, a adoção do reúso de águas pluviais, da reabilitação de águas residuais e de sistemas descentralizados de abastecimento (NASIRI *et al.*, 2013; PLUCHINOTTA *et al.*, 2021; WEI *et al.*, 2016; WILLUWEIT; O’SULLIVAN, 2013).

Sehlke e Jacobson (2005) aplicaram um modelo de DS na bacia transfronteiriça do rio Bear, nos Estados Unidos, cujos recursos hídricos estão sendo pressionados pelo aumento da demanda para abastecimento e irrigação. O modelo integrou aos sistemas hidrológicos, fatores climáticos e de oferta e demanda hídrica (SEHLKE; JACOBSON, 2005). Ryu *et al.* (2012) analisaram a dinâmica de recarga e descarga do sistema aquífero Eastern Snake Plain, localizado no Estado de Idaho, nos Estados Unidos (RYU *et al.*, 2012). Zarghami e Akbariyeh (2012) estudaram o sistema de água

no município de Tabriz, no Irã. A modelagem apresentou alternativas para o enfrentamento da escassez hídrica local, tais como a incorporação de fontes alternativas para abastecimento em conjunto com ações de controle da demanda (ZARGHAMI; AKBARIYEH, 2012).

Pluchinotta *et al.* (2021) utilizaram DS para analisar a integração de sistemas de reúso de águas aos sistemas de abastecimento convencionais (PLUCHINOTTA *et al.*, 2021). Gohari *et al.* (2022) exploraram o conceito de *nexus*¹¹ para abordar as interrelações que envolvem a gestão das águas urbanas. Para o autor, o uso da água e do solo são os principais fatores que conectam os espaços urbanos aos recursos naturais e propõem a adoção do *nexus* urbano “água-terra-sociedade¹²” como base conceitual para o uso sustentável dos recursos naturais (GOHARI *et al.*, 2022).

No Brasil, Souza *et al.* (2010) utilizaram DS para relacionar o uso da água em uma bacia hidrográfica com a mudança no uso do solo. O estudo verificou que a troca da vegetação nativa por culturas agrícolas pode influenciar o ciclo hidrológico local (SOUZA *et al.*, 2010). De Freitas *et al.* (2018) simularam o balanço hídrico dos subsistemas que compõem o sistema de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte-MG, para verificar os cenários de oferta e demanda hídrica (FREITAS; SANTOS; BAHIA, 2018). González *et al.* (2008) analisaram a sustentabilidade dos recursos hídricos no município de São Miguel do Anta-MG.

Correia de Araújo *et al.* (2019) utilizaram DS para avaliar o sistema hídrico na região semiárida do Estado da Paraíba. O modelo considerou estratégias de gestão da demanda e opções alternativas para o abastecimento, tais como o reúso de águas residuárias e a transferência de água entre bacias (GONZALEZ *et al.*, 2008). Ribeiro *et al.* (2022) avaliaram a sustentabilidade da bacia do Rio Palma, no Estado de Tocantins, sob cenários de mudanças climáticas e do aumento da área irrigada (RIBEIRO *et al.*, 2022).

A utilização da DS demonstra que a gestão dos recursos hídricos requer a capacidade de estabelecer correlações entre a oferta e a demanda de recursos hídricos e de antecipar cenários que demandam intervenções preventivas.

¹¹ O nexo urbano Água-Terra-Sociedade, inclui as sinergias entre os recursos hídricos, o uso do solo e atividades socioeconômicas, fornece um quadro integrado para a gestão sustentável dos recursos naturais (GOHARI *et al.*, 2022).

¹² Water-Land-Society (WLS).

2.5.1. Modelagem em dinâmica de sistemas por meio do software Vensim PLE

Existem diversos softwares que desenvolvem modelos de sistemas dinâmicos, tais como Stella, iThink, PowerSim e o Vensim, desenvolvido pela empresa Ventana Systems, Inc. Nesta pesquisa foi utilizado o software Vensim PLE (Personal Learning Edition) uma versão gratuita do software Vensim, voltada para fins públicos e acadêmicos. O Vensim PLE possibilita a modelagem dinâmica por meio da criação de modelos causais, ou diagramas de loop causal, e de diagramas de estoques e fluxos que permite estabelecer relações matemáticas entre as variáveis, o que torna o modelo dinâmico (VENTANA SYSTEMS INC., 2023).

De acordo com Ford (1999), o processo de modelagem envolve etapas crescentes de complexidade, até que o modelo seja capaz de replicar o comportamento observado no sistema real. Em seguida o modelo é utilizado para verificar se o comportamento observado pode ser melhorado por mudança em suas variáveis. Para Ford (1999) e Orellana Gonzalez (2010) *apud* Ford (1999), são oito as etapas de uma modelagem em dinâmica de sistemas, conforme Tabela 5, e que Orellana Gonzalez (2010) sintetizou da seguinte forma:

- a) etapa de conceitualização;
- b) etapa de formalização, e;
- c) etapa de avaliação e exploração (simulação).

Tabela 5: Etapas da modelagem.

Etapa 01	Conhecer o sistema a ser analisado e definir de forma clara e objetiva o problema dinâmico a ser abordado
Etapa 02	Definição das relações de causa e efeito, elaboração do diagrama de loop causal
Etapa 03	Construção do diagrama de estoque e fluxo
Etapa 04	Definição do modelo matemático que reflita o funcionamento do sistema
Etapa 05	Estimar os valores dos parâmetros
Etapa 06	Executar um modelo de referência
Etapa 07	Realizar análise de sensibilidade
Etapa 08	Testar os resultados

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ford (1999) e Orellana Gonzalez (2010).

São três os princípios fundamentais de uma abordagem de dinâmica de sistemas: (i) **existência de laços de retroalimentação ou feedbacks**; (ii) **existência de não linearidade entre as variáveis**, e; (iii) **existência de atrasos nas relações entre as variáveis** (GONZALEZ, 2010; VILLELA, 2005).

A retroalimentação é o retorno da informação. Em sistemas abertos, os resultados não influenciam no evento gerador, o que não gera retroalimentação. Em sistemas fechados, os resultados influenciam no fato gerador, que voltam a influenciar novos resultados, gerando retroalimentação. Existem dois tipos de retroalimentação: (+) positiva ou de reforço, quando a variação de um elemento reforça a variação inicial; (-) negativa ou de balanço, quando a variação de um elemento se contrapõe à variação inicial, estabilizando o sistema (GONZALEZ, 2010; VILLELA, 2005).

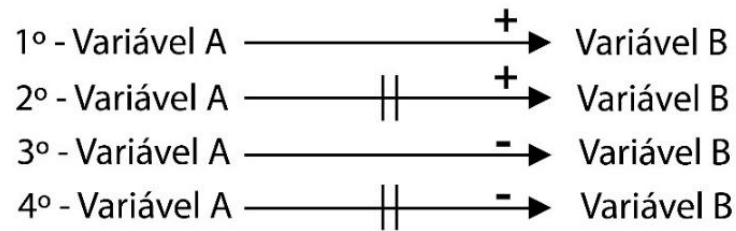
A não linearidade entre as variáveis, pressupõe que as relações entre as variáveis ocorrem nos laços de retroalimentação em cadeias abertas ou fechadas de relações causais, onde a mudança de uma variável não reflete, necessariamente, em uma mudança proporcional de outra variável. A mudança de uma variável dependente, pode resultar da variação de um conjunto de variáveis independentes (GONZALEZ, 2010; VILLELA, 2005).

A existência de atraso na relação entre as variáveis reflete o tempo de resposta da variável, ou do sistema, à determinada medida ou intervenção, ou seja, uma ação nem sempre produz um efeito imediato sobre o meio, gerando respostas distantes no tempo e no espaço (GONZALEZ, 2010; VILLELA, 2005).

Os modelos causais, ou conceituais, são representados pelos **Diagramas de Loop Causal (DLC)** que servem para descrever graficamente uma situação-problema. São modelos que procuram explicitar as relações de causa e efeito no contexto do problema. No DLC cada relação tem uma interpretação causal, um conector (*seta*) indo de **A** para **B**, indica que **A** causa **B**.

Conforme a Figura 4, no primeiro e segundo diagrama, a variável **A** influencia a variável **B** positivamente (+), ou seja, se **A** cresce, **B** cresce, se **A** decresce, **B** decresce. No terceiro e quarto diagrama, a variável **A** influencia a variável **B** negativamente (-), ou seja, se **A** cresce, **B** decresce, se **A** decresce, **B** cresce. Nos segundo e quarto diagramas, o duplo traço (||) significa um atraso no tempo de resposta no comportamento da variável **B** em relação ao estímulo da variável **A**.

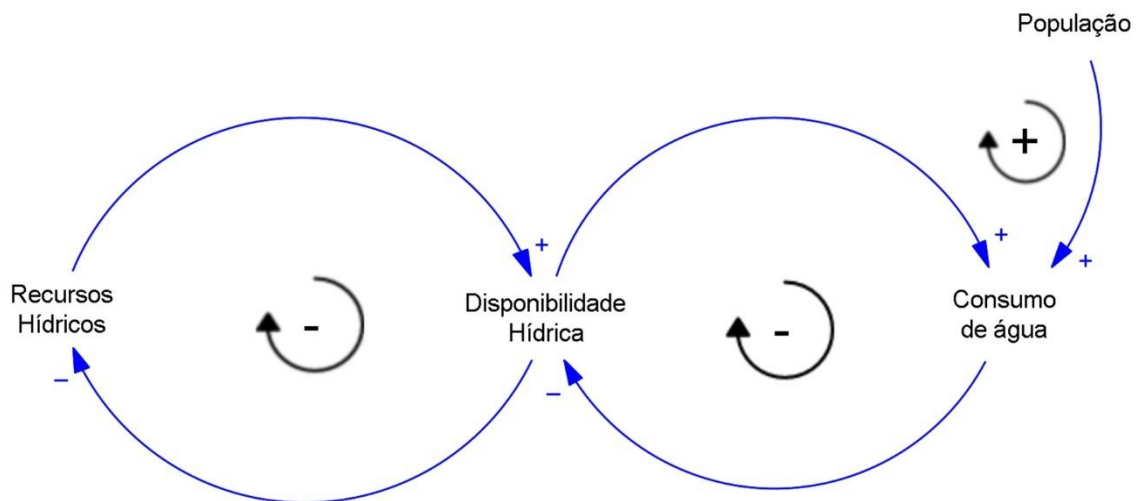
Figura 4: Simbologia utilizada em modelos causais.



Fonte: Villela (2005).

Na Figura 5, é apresentado um modelo simplificado da relação entre a disponibilidade hídrica e o consumo de água. Os componentes do modelo são variáveis, mas condicionados ao limite dos recursos hídricos. Assim, quanto maior a quantidade de água disponível (recursos hídricos), maior a disponibilidade hídrica (fração disponível para consumo) e, conseqüentemente, maior estímulo ao consumo. Quanto maior o consumo, menor a disponibilidade hídrica, o que requer mais recursos hídricos. Uma vez que os recursos hídricos são limitados, cria-se um cenário de indisponibilidade hídrica, o que pode levar a uma situação de equilíbrio do sistema.

Figura 5: Modelo de Diagrama de Loop Causal – Vensim PLE.



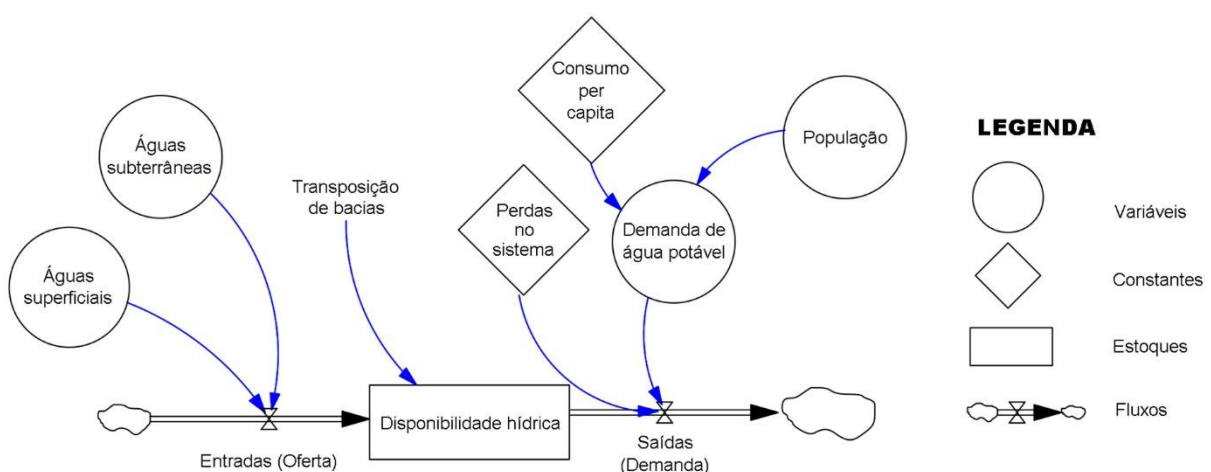
Fonte: Elaborado pelo autor com base em Villela (2005).

O **Diagrama de Estoque e Fluxo**, Figura 6, apresenta a estrutura do sistema com maior aprofundamento que o DLC, apresentado na Figura 5. São semelhantes aos modelos causais, no entanto, suas relações são expressas por fórmulas lógico-matemáticas.

O modelo de estoque e fluxo é composto por 5 elementos básicos: (i) **parâmetros**, que indicam componentes variáveis (representados por círculos) ou constantes (representados por losangos) no tempo; (ii) **fluxos**, (setas de traço duplo com válvula) que representam a movimentação de recursos no sistema, o fluxo vai da origem (nuvem) para o estoque e do estoque para o destino (nuvem). São determinados por equações e definidos por qualquer unidade de grandeza por unidade de tempo; (iii) **estoques**, (retângulos) que representam acumulações; (iv) **informações**, (setas simples) que interligam os elementos do sistema e explicam a relação entre eles; (v) **fontes externas**, (também podem ser representados por uma nuvem) indicam que o recurso lançado no estoque vem de uma fonte externa (VILLELA, 2005).

Na Figura 6, a disponibilidade hídrica é definida como “estoque”, ou seja, é o resultado da relação entre as “entradas” e “saídas” de água no sistema. A “entrada” é a soma da quantidade de água superficial e subterrânea disponível no território. A “saída” é a soma da demanda por água potável com as perdas do sistema. O aumento da demanda leva à diminuição da disponibilidade hídrica, que pode ser controlada pela variação nos parâmetros da demanda ou pela adoção de novas fontes de águas, neste caso, representada pelo parâmetro “transposição de bacias”.

Figura 6: Modelo simplificado de Diagrama de Estoque e Fluxo de um sistema de abastecimento urbano – Vensim PLE.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Villela (2005).

Neste modelo, o sistema hídrico urbano é representado como um sistema fechado. Os laços de retroalimentação demonstram o limite do sistema hídrico em

lidar com demandas hídricas crescentes. No modelo, a “disponibilidade hídrica” é proposta como “estoque”, que concentra a fração dos recursos hídricos disponível para suprir a demanda. A demanda hídrica é o elemento que desencadeia a relação entre os recursos hídricos e o sistema de abastecimento urbano. A variável “população” é a principal impulsionadora da demanda.

2.5.1.1. Modelos matemáticos no software Vensim PLE

Um modelo matemático pode ser entendido como um conjunto de símbolos e relações matemáticas que traduzem, de alguma forma, um fenômeno ou um problema de situação real. Os métodos utilizados na resolução dos modelos matemáticos, nos vários ramos das engenharias ou ciências aplicadas, baseiam-se, sobretudo, em duas categorias: métodos analíticos e métodos numéricos (CUNHA; CASTRO, 2010).

Os métodos analíticos permitem estabelecer uma relação direta entre as variáveis dependentes e independentes, mediante funções válidas em um determinado intervalo (FONTANA, 2018). São aplicados a problemas mais simples e apresentam grande dificuldade para a resolução de problemas mais complexos, uma vez que a resolução pode exigir aproximações que afastam os resultados da realidade ou podem envolver resoluções complexas demais para serem calculadas (CARREIRA; BRANDI, 2022).

Os métodos numéricos, por sua vez, oferecem soluções aproximadas que, partindo de aproximações iniciais, vão gerando novas aproximações, até que apresentam uma aproximação considerada aceitável para os problemas estudados. Permitem que a solução seja estimada para uma dada condição inicial (CHAPRA; CANALE, 2010; CUNHA; CASTRO, 2010; FONTANA, 2018).

Na engenharia, para a descrição do comportamento dinâmico de sistemas físicos, são utilizadas equações diferenciais ordinárias (CARREIRA; BRANDI, 2022). Uma equação diferencial (ED) possui derivadas ou diferenciais de uma, ou mais variáveis dependentes em relação a uma, ou mais variáveis independentes. Uma equação diferencial ordinária (EDO) é aquela que possui derivadas de uma ou mais variáveis dependentes em relação a uma única variável independente. Para classificar uma EDO também se deve observar a sua ordem e o grau.

A ordem da EDO se refere à ordem de sua derivada mais alta e o grau se refere ao grau da derivada de ordem mais alta. Uma EDO de primeira ordem, ou problema

de valor inicial (PVI), é um problema de evolução, na qual o valor inicial é conhecido e sua solução numérica é um conjunto de pontos que representam a função de maneira aproximada (AMENT, 2022).

Uma EDO de primeira ordem é escrita da seguinte forma:

$$y' = f(t, y), \quad t \in [t_0, t_f] \quad (1)$$

Onde t é a variável independente que evolui continuamente de t_0 para t_f e, em geral, está associada ao tempo, f é uma função dada que depende de t e y , sendo definida de, $[t_0, t_f] \times \mathbb{R}$ em $\mathbb{R}$, y' é a derivada y em relação a t e y é a incógnita da equação. A solução da EDO é uma função contínua, diferencial e deve satisfazer a equação para todo o $t \in [t_0, t_f]$ (AMENT, 2022).

Entre os métodos numéricos aplicados para as soluções de uma EDO, temos o método de Euler, ou método da reta tangente, e o método de Runge-Kutta. O método de Euler é o método mais simples e pressupõe estimar a solução para uma função em um determinado ponto, a partir de um “passo” ou distância do ponto inicial. $t_1 = t_0 + \Delta t$. A partir deste valor, pode-se estimar o valor para o ponto t_2 e assim sucessivamente até se obter uma aproximação para solução (FONTANA, 2018).

O método de Runge-Kutta consiste em um aperfeiçoamento do método de Euler, uma vez que se busca uma melhor estimativa da derivada com a avaliação da função em mais pontos do intervalo, com o aumento do número de avaliações da função a cada “passo” do intervalo. O resultado são soluções mais aproximadas do valor inicial (CARREIRA; BRANDI, 2022).

O Vensim PLE fornece vários métodos para a solução numérica dos modelos, tais como Euler e Runge-Kutta. Para os problemas que envolvem menos precisão ou muitas simplificações, é recomendado o uso do método de Euler.

Para modelos de sistemas físicos ou para modelos conceituais simples, especialmente aqueles que envolvem oscilação, a integração de Runge-Kutta é recomendada. O método Runge-Kutta de 4ª ordem, no Vensim PLE, executa o ajuste automático do tamanho do “passo” para garantir maior precisão aos resultados (VENTANA SYSTEMS INC., 2023).

Conforme o *Guia de referência Vensim PLE*:

[...] O ajuste automático do tamanho do passo usa uma abordagem de redução pela metade. Um passo Runge-Kutta de segunda ou quarta ordem é feito e, em seguida, repetido duas vezes na metade do tamanho do passo. Os resultados são então comparados. Se, para qualquer Nível, a diferença entre os dois cálculos for maior que a TOLERÂNCIA ABSOLUTA e a diferença implícita sobre o PASSO DE TEMPO for maior que o valor do Nível (do menor tamanho do passo) vezes a TOLERÂNCIA RELATIVA, o passo é declarado uma falha. O tamanho do passo inicial é dividido por dois e o processo é repetido. Se, por outro lado, o processo não detectar nenhum erro em um PASSO DE TEMPO inteiro, o tamanho do passo inicial é dobrado. O tamanho do passo nunca é maior que o PASSO DE TEMPO (VENTANA SYSTEMS INC., 2023).

3 METODOLOGIA

Quanto a natureza deste trabalho, trata-se de uma pesquisa de natureza empírica e aplicada cujo objeto é de natureza exploratória e descritiva (DA SILVA, 2015). Uma pesquisa aplicada, caracteriza-se pelo seu interesse prático, onde os resultados podem ser aplicados a problemas que ocorrem na realidade (DA SILVA, 2015). A natureza exploratória do objeto da pesquisa visa criar maior conhecimento sobre um tema ou problema levantado (LAKATOS e MARCONI, 2003). A pesquisa descritiva, por sua vez, tem como objetivo a descrição de determinado fenômeno e o estabelecimento de relações entre variáveis. A pesquisa descritiva pode ser realizada de forma complementar à pesquisa exploratória (GIL, 2008).

Para a análise da disponibilidade hídrica do município de Araraquara, esta pesquisa está organizada em duas fases principais, sendo a primeira a realização de uma revisão bibliográfica sobre o tema e de uma pesquisa documental sobre a área de estudo. E, a segunda, no desenvolvimento de um modelo computacional com o uso da dinâmica de sistemas sobre a disponibilidade hídrica no município de Araraquara, por meio do software Vensim PLE. Para isso, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

Etapa 01: Revisão sistemática da literatura;

Etapa 02: Pesquisa documental e coleta de dados;

Etapa 03: Definição e sistematização dos dados de interesse;

Etapa 04: Desenvolvimento do modelo dinâmico, e;

Etapa 06: Resultados e conclusões.

3.1. ÁREA DE ESTUDO

Araraquara, Figura 7, está localizada na região central do Estado de São Paulo e compõe a Região Administrativa Central (RA12), possui uma área territorial de 1.003,63 km² e uma área urbana de 155,68 km² (ARARAQUARA, 2014a), o que corresponde a 15,51% do território. A área urbanizada é de 80,17 km², cerca de 51,49% da área urbana (IBGE, 2022). Conforme a Lei n.º 16.337/2016, que dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) (SÃO PAULO, 2016), o município compõe a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré

(UGRHI13), na qual possui 65,16% de seu território, incluído a sede municipal. No entanto, parte de sua área rural, cerca 34,84% de seu território, compõe a de Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Mogi-Guaçu (UGRHI 9) (CBH-MOGI, 2023; CBH-TJ, 2023). A taxa de urbanização de Araraquara é de 97,20% (SEADE, 2024) e a população urbana está concentrada na sede municipal.

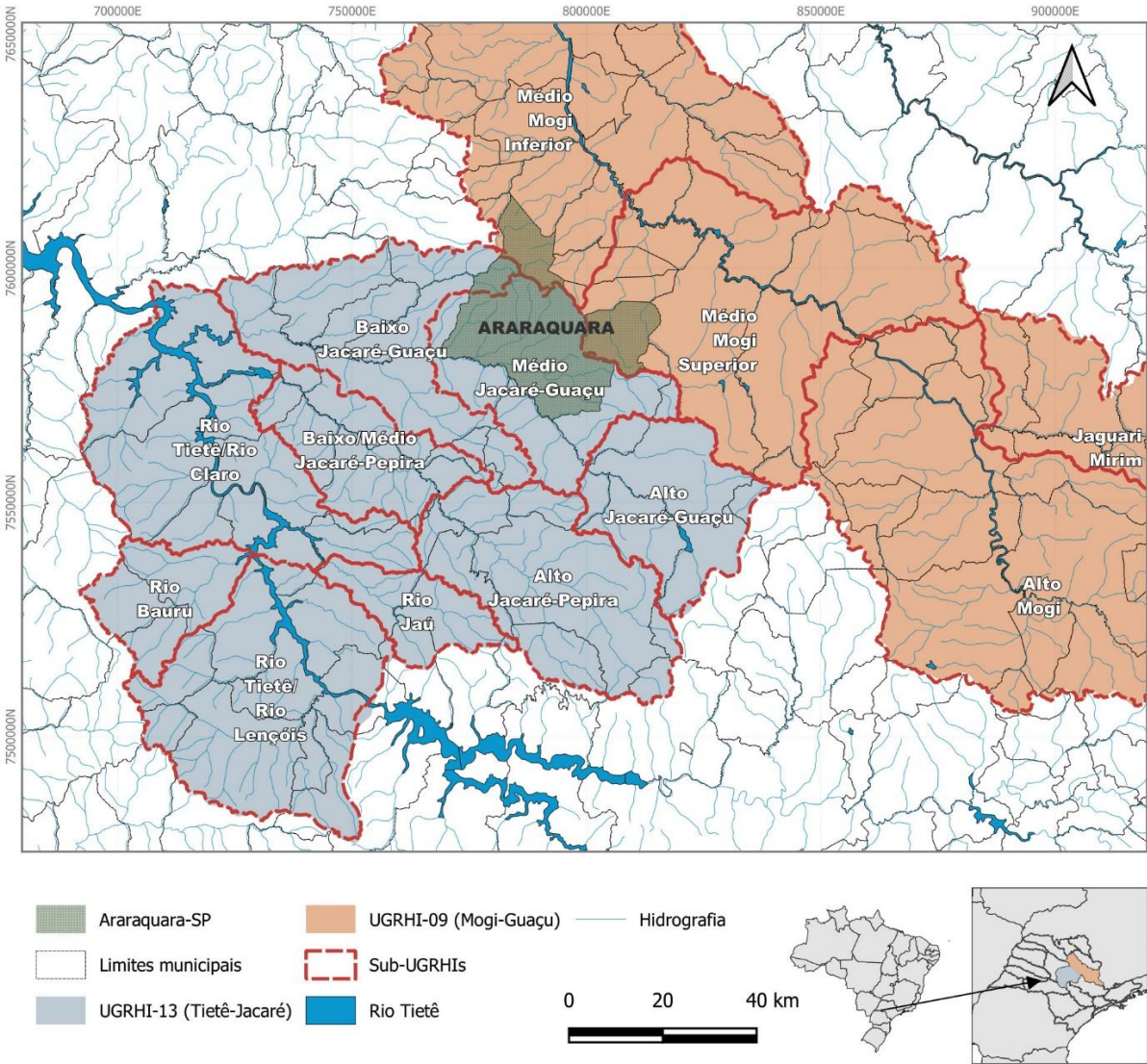
A UGRHI 13 ocupa a região central do Estado de São Paulo e compõe a Região Hidrográfica do Rio Tietê (SÃO PAULO, 2019). É composta por 34 municípios e abriga cerca de 3,6% da população do Estado. Dispõe de uma área territorial de 15.918,3 km² e de uma área de drenagem de 11.749 km² (CBH-TJ, 2023). A sua taxa de urbanização é de 96,5% (SEADE, 2024). Suas principais atividades econômicas estão ligadas à agroindústria e ao setor industrial, sendo classificada pelo Governo do Estado de São Paulo como “em industrialização” (SEADE, 2024).

A UGRHI 09 ocupa a região nordeste do Estado de São Paulo e compõe a Região Hidrográfica do Rio Grande (SÃO PAULO, 2019). É composta por 59 municípios, sendo que 38 tem toda a sua área na UGRHI 09, e abriga cerca de 3,58% da população do Estado. Dispõe de uma área territorial de 13.061 km² e de uma área de drenagem de 15.004 km² (CBH-MOGI, 2023). A taxa de urbanização é de 95,1 (SEADE, 2024). Suas principais atividades econômicas estão ligadas à agricultura e à pecuária (SEADE, 2024).

Tanto a UGRHI 13 quanto o município de Araraquara estão situados sobre os sistemas de aquíferos Bauru, Guarani e Serra Geral. A UGRHI 09 está sobre os aquíferos Pré-Cambriano, Serra Geral, Serra Geral Intrusivas, Tubarão, Guarani, Bauru e o Aquiclube Passa Dois.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) 2020-2023 (SÃO PAULO, 2020b), após revisão da base cartográfica das UGRHIs e a adoção da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) (ANA, 2022a), subdividiu as 22 UGRHIs do Estado de São Paulo em 114 subUGRHIs (SÃO PAULO, 2020b). Desta forma, conforme a Tabela 6, Araraquara passou a compor 4 subUGRHIs, com a maior parte de seu território, inclusive sua área urbana, concentrada na subUGRHI 13.2 Médio Jacaré-Guaçu, conforme Figura 7. O território de Araraquara que compõe a UGRHI 09, está inserido nas subUGRHIs Médio Mogi Inferior e Médio Mogi Superior, onde o município possui um importante manancial de abastecimento urbano, o Ribeirão Anhumas, responsável por aproximadamente 28% da captação superficial do município em 2.020 (DAAE, 2022c).

Figura 7: Mapa de localização do município de Araraquara.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Araraquara (2014a); CBH-MOGI (2023); CBH-TJ (2016) e São Paulo (2020b).

Tabela 6: Relação entre Araraquara e as subUGRHIs.

UGRHI	Sub-UGRHI	Área (km²)	
		SubUGRHI	Araraquara ¹³
13 - Tietê-Jacaré	13.2 - Médio Jacaré-Guaçu	1.287,03	639,16
	13.3 - Baixo Jacaré-Guaçu	1.572,67	52,26
9 - Mogi Guaçu	9.3 - Médio Mogi Superior	3.117,96	177,16
	9.4 - Médio Mogi Inferior	4.234,95	135,05

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Araraquara (2014a); CBH-MOGI (2023); CBH-TJ (2023) e São Paulo (2020b).

¹³ Fração do território urbano que compõe cada subUGRHI.

3.2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Realizou-se uma revisão bibliográfica sistemática sobre os principais temas do estudo, ou seja, a gestão dos recursos hídricos, a disponibilidade hídrica e a utilização da dinâmica de sistemas para a análise dos recursos hídricos. Para isso, utilizou-se da busca por publicações em periódicos e bases de dados científicas, entre as quais, a *Web of Science*, a *Scopus* e a *SciELO (Scientific Electronic Library Online)*. Também se consultou estudos e publicações produzidos por agências e organizações governamentais e não governamentais, como, por exemplo, as publicações realizadas pelo *World Water Assessment Programme (WWAP)*, vinculado à Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) e as publicações realizadas pela Agência Nacional de Saneamento Básico (ANA).

3.3. PESQUISA DOCUMENTAL E COLETA DE DADOS

Para o levantamento de dados sobre a área de estudos, realizou-se pesquisas documentais e bibliográficas sobre a disponibilidade hídrica, a dinâmica de uso e ocupação do solo e sobre os sistemas hídricos locais e regionais. Os dados sobre os recursos hídricos e as demandas, são de natureza secundária e foram reunidos a partir de documentos e bases de dados governamentais, vinculadas ao Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH) e ao Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Também foram utilizados dados populacionais (IBGE, 1983, 1992, 2001, 2010, 2023), de uso e ocupação do solo (IBGE, 2022; MAPBIOMAS PROJECT, 2023) e indicadores municipais (SEADE, 2016, 2022; SNIS, 2023).

As principais fontes de dados regionais foram os Planos Estaduais de Recursos Hídricos (PERH) (CERH, 1990, 2006; SÃO PAULO, 2020b, 2020a; SÃO PAULO, 2013b, 2017), os relatórios de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo (CERH, 1999; SÃO PAULO, 2009, 2013b) e os relatórios de situação das bacias referente à UGRHI 13 (CBH-TJ, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023) e à UGRHI 09 (CBH-MOGI, 2011, 2018, 2022, 2023).

As principais fontes de dados locais foram os planos e estudos municipais, elaborados pela Prefeitura Municipal (ARARAQUARA, 1967, 2014a, 1971, 2014b, 2021b, 1969b) e pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE) (DAAE,

1972, 1984, 1991, 2007, 2012a, 2012b, 2012c, 2018, 2022). Entre os quais o Plano Diretor Municipal (ARARAQUARA, 2014a), o Plano Municipal de Saneamento Básico (DAAE, 2012b, 2012c, 2012a) e o Plano Diretor da Água (DAAE, 2022c, 2022b).

Para este tópico, também foram gerados dados a partir de técnicas de geoprocessamento, por meio do software livre QGIS. Para a sistematização e tratamento dos dados foi utilizado o software de planilha eletrônica Excel.

3.4. DEFINIÇÃO E SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS DE INTERESSE

Após o levantamento bibliográfico e a pesquisa documental, passou-se para a definição dos dados relevantes para o modelo. A modelagem proposta está fundamentada em dois grupos principais de informações: a disponibilidade hídrica e o uso e ocupação do solo no município de Araraquara. Desta forma, executou-se um diagnóstico do município em termos da condição hídrica e do uso e ocupação do solo. Os resultados desta etapa compõem o item "Caracterização da Área de Estudo".

Entre as principais informações apresentadas, encontram-se dados locais e regionais sobre a disponibilidade hídrica, as demandas e tipos de usos da água no município, na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Mogi-Guaçu (UGRHI 9) e na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13), das quais Araraquara faz parte. Apresentou-se também indicadores de pressão sobre os recursos hídricos, de escassez e de estresse hídrico em Araraquara, um diagnóstico do uso e ocupação do solo no município e dos sistemas hídricos urbanos.

Esta etapa foi importante para a definição dos componentes, dos dados de entrada, das variáveis e parâmetros do modelo, discutidos no tópico "desenvolvimento o modelo dinâmico".

3.5. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DINÂMICO

O modelo desenvolvido busca demonstrar o comportamento da demanda e a variação da disponibilidade hídrica em Araraquara para o intervalo de tempo de 30 anos, entre os anos de 2020 a 2050. Trata-se da análise do balanço hídrico municipal e da verificação, por meio da simulação dinâmica, de seu comportamento ao longo do período abordado.

Metodologicamente, a modelagem envolveu a execução sequencial de etapas que, de acordo com Gonzalez (2010), podem ser definidas como: a) etapa de conceitualização; b) etapa de formalização, e; c) etapa de avaliação e exploração (simulação). Para tanto, cada etapa ocorreu envolveu as seguintes ações, conforme demos no Quadro 2.

Quadro 2: Etapas da modelagem.

Etapas	Ações desenvolvidas
Etapa de conceitualização	Definição do modelo conceitual
	Definição da escala da abordagem
	Definição dos componentes do modelo
	Definição dos dados de interesse
Etapa de formalização	Elaboração do diagrama de estoques e fluxos e do modelo matemático
Etapa de avaliação e exploração	Definição de cenários e análise dos dados

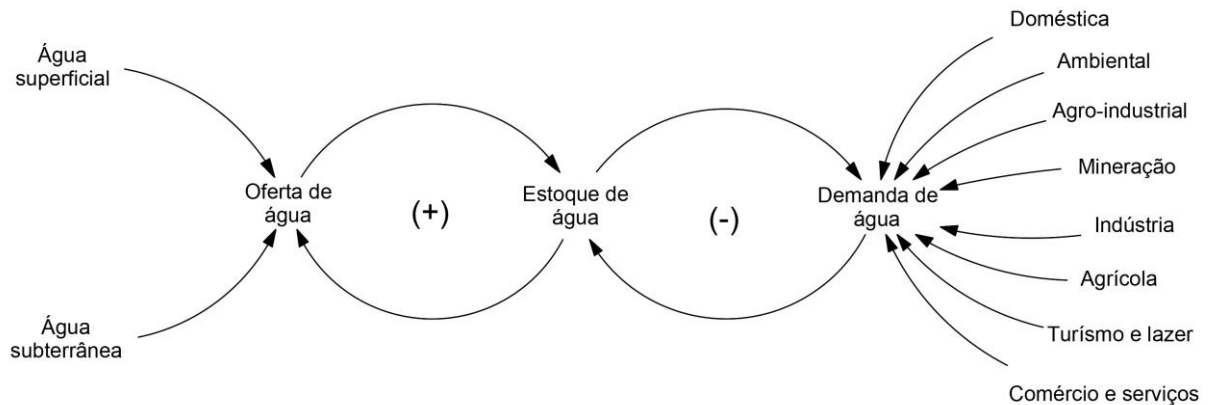
Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ford (1999) e Orellana Gonzalez (2010).

Na etapa de conceitualização desenvolveu-se o modelo conceitual, a identificação dos seus principais componentes e das relações estabelecidas entre eles, a definição da escala da análise e dos dados de interesse.

Para o modelo conceitual, adotamos como referência o trabalho de Sánchez-Román *et al.* (2010), que analisou a oferta e a demanda de água nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (BH-PCJ), Figura 8, e o modelo apresentado por Pluchinotta *et al.* (2021) para o uso de água não potável em Ebbsfleet Garden City, no Reino Unido, Figura 9. (PLUCHINOTTA *et al.*, 2021; SÁNCHEZ-ROMÁN; FOLEGATTI; GONZALEZ, 2007) Também foram verificados os trabalhos de Souza *et al.* (2010), Correia de Araujo, Oliveira Esquerre e Sahin (2019), Freitas, Santos, Bahia (2018), Gonzalez (2010) e Ribeiro *et al.* (2022).

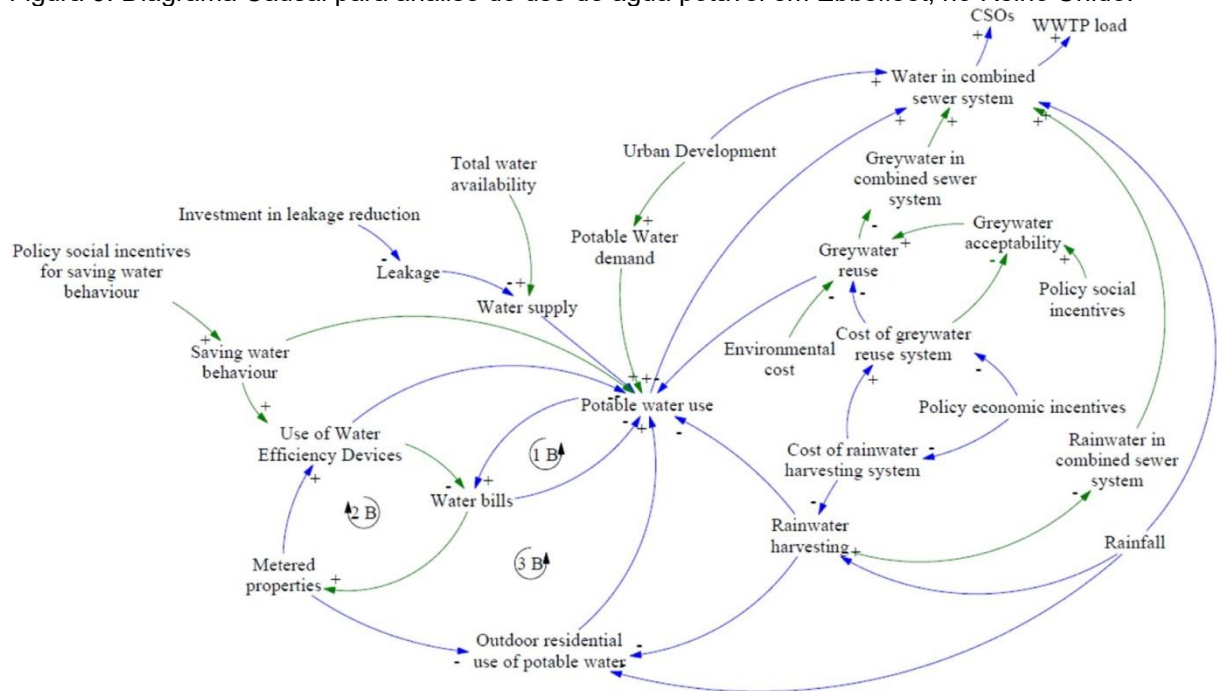
Do ponto de vista metodológico, adotou-se com escala de abordagem escala municipal, composta pelas áreas urbana e rural. Em nível municipal, os sistemas hídricos podem ser identificados em duas categorias principais: os sistemas urbanos e os sistemas rurais que, apesar de apresentarem definições claras em termos de gestão e localização espacial, são dependentes enquanto sistema.

Figura 8: Diagrama Causal para a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.



Fonte: Sánchez-Román *et al.* (2010).

Figura 9: Diagrama Causal para análise do uso de água potável em Ebbsfleet, no Reino Unido.



Fonte: Pluchinotta *et al.* (2021).

Para a definição dos componentes do modelo, buscou-se processos e variáveis que reproduzissem, com a maior proximidade possível, a dinâmica de funcionamento dos sistemas hídricos e do uso do solo no município. Nesta etapa foram definidos os parâmetros e as variáveis que compõem o modelo, bem como as relações entre as variáveis, a existência de laços de retroalimentação e atrasos nas relações entre as variáveis (GONZALEZ, 2010; VILLELA, 2005).

Quanto aos dados de interesse, diferente do diagnóstico apresentado na caracterização da área de estudo, nesta etapa, desenvolveu-se os dados relacionados com os componentes do modelo. Desta forma, determinou-se valores de referência,

coeficientes e índices para a produção e disponibilidade hídrica, para as demandas, para a capacidade operacional dos sistemas municipais e para as variações no uso e ocupação do solo.

Na etapa de formalização, após o desenvolvimento do modelo conceitual, elaborou-se o diagrama de estoques e fluxos e desenvolveu-se as relações matemáticas entre os componentes. O modelo tem como base o balanço hídrico urbano (MITCHELL; MCMAHON; MEIN, 2003; RODRIGUES; MENDIONDO, 2013), e considera uma abordagem integrada das águas urbanas e do uso do solo para intervir na disponibilidade e na demanda hídrica local (MITCHELL, 2006; SILVA; PORTO, 2003; TUCCI, 2008b; VAN DEN BRANDELER, 2020).

Na etapa de avaliação e exploração, elaborou-se os cenários de simulação, com a introdução de intervenções que refletissem em variações nos cenários futuros de disponibilidade hídrica. Nesta etapa, também foram realizadas a análise dos dados obtidos e apresentados no item “discussões”.

Os resultados foram sistematizados em tabelas e gráficos que demonstram as variações nos cenários simulados. Os resultados da modelagem foram agrupados conforme o comportamento das variáveis no modelo em relação ao tempo e em relação ao comportamento de outras variáveis.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

4.1. DISPONIBILIDADE HÍDRICA LOCAL E REGIONAL

Conforme demonstrado na Tabela 7, a UGRHI 09 apresenta uma situação confortável com relação à disponibilidade hídrica per capita, acima da faixa de referência de 2.500 m³/hab.ano para o ano de 2022, de acordo com a classificação apresentada no Quadro 3. A UGRHI 13, conforme a Tabela 8, apresenta uma classificação de “atenção” e avança rapidamente para uma classificação “crítica”. O município de Araraquara, Tabela 9, também apresenta uma classificação “crítica”. Apesar da condição mais favorável com relação à disponibilidade hídrica per capita, de 1980 a 2022, a UGRHI 09 teve a sua disponibilidade hídrica superficial reduzida em 49,63%, próxima à redução observada na UGRHI 13 que foi de 50,73%. Em Araraquara, a disponibilidade per capita superficial diminui cerca de 47,10% no período.

Tabela 7: Disponibilidade hídrica per capita de água na UGRHI 09.

Ano	População	Disponibilidade per capita	
		Superficial	Subterrânea
	(habitantes)	(m ³ /hab.ano)	(m ³ /hab.ano)
1980	800.218	7842,44	945,82
1991	1.096.194	5724,96	690,45
2000	1.318.335	4760,30	574,11
2010	1.448.886	4331,37	522,38
2020	1.571.933	3992,32	481,49
2022	1.588.644	3950,33	476,42

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1990, 1999, 2006) e CBH-MOGI (2011, 2023).

Tabela 8: Disponibilidade hídrica per capita de água na UGRHI 13.

Ano	População	Disponibilidade per capita	
		Superficial	Subterrânea
	(habitantes)	(m ³ /hab.ano)	(m ³ /hab.ano)
1980	851.475	3.592,58	370,37
1991	1.031.000	2.967,01	305,88
2000	1.331.874	2.296,76	236,78
2010	1.479.207	2.067,99	213,20
2020	1.599.355	1.912,64	197,18
2022	1.728.303	1.769,94	182,47

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1990, 1999, 2006), CBH-TJ (2013, 2016, 2023) e IBGE (2023).

Tabela 9: Disponibilidade hídrica per capita de água em Araraquara.

Ano	População	Disponibilidade per capita	
		Superficial	Subterrânea
	(Habitantes)	(m³/hab.ano)	(m³/hab.ano)
1980	128.122	2.458,94	270,75
1991	166.732	1.889,53	208,06
2000	182.238	1.728,75	190,35
2010	208.662	1.509,83	166,25
2020	238.662	1.320,05	145,35
2022	242.228	1.300,61	143,21

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2013), IBGE (1983, 1992, 2001, 2011, 2022, 2023).

Quadro 3: Faixas de referência: disponibilidade per capita.

Faixa de referência	Classificação
≥ 2.500 m³/hab.ano	Boa
≥ 1.500 m³/hab.ano < 2.500 m³/hab.ano	Atenção
< 1.500 m³/hab.ano	Crítica

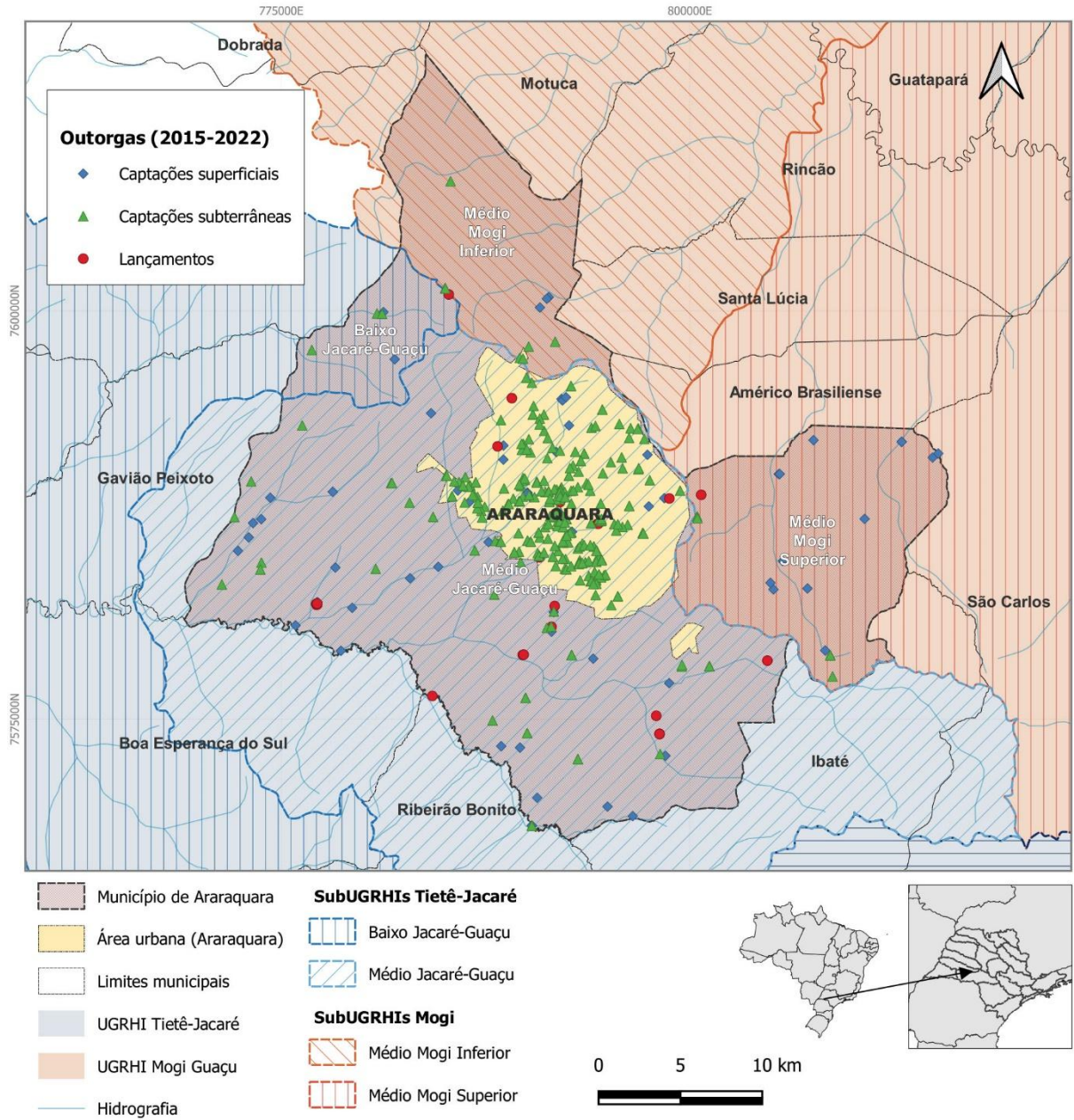
Fonte: CERH (1999, 2006).

4.2. DEMANDAS OUTORGADAS

As demandas outorgadas apresentam um panorama do uso da água no município ou região. No caso de Araraquara, a Figura 10 mostra uma maior concentração de outorgas na área urbana e a predominância das outorgas subterrâneas sobre as outorgas superficiais. A nível municipal, verifica-se também que há uma quantidade maior de outorgas na porção do município que está localizada na UGRHI Tietê-Jacaré (UGRHI-13) em relação à parte do município pertencente à UGRHI Mogi Guaçu (UGRHI-09).

As Tabelas 10 e 11 e as Figuras 11 e 12 apresentam as outorgas por tipo de uso nas UGRHI 09 e 13. Tanto a UGRHI 09 como a UGRHI 13 apresentam um aumento das vazões totais outorgadas, considerando todos os usos discriminados, com maior avanço, no caso da UGRHI 09, das outorgas destinadas à agricultura irrigada e, no caso da UGRHI 13, das outorgas destinadas às demandas industriais.

Figura 10: Outorgas de uso da água em Araraquara.



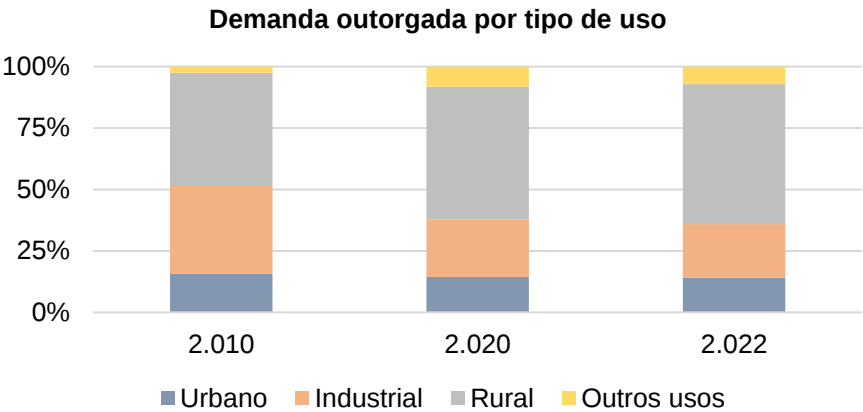
Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024); Araraquara (2014a), CBH-MOGI (2023), CBH-TJ (2016) e São Paulo (2020b).

Tabela 10: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 09.

Ano	Total	Urbano	Industrial	Rural	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2010	19,51	3,08	6,95	8,99	0,49
2020	31,89	4,61	7,46	17,2	2,62
2022	39,35	5,51	8,62	22,38	2,84

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1990, 1999, 2006) e CBH-MOGI (2011, 2023).

Figura 11: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 09.



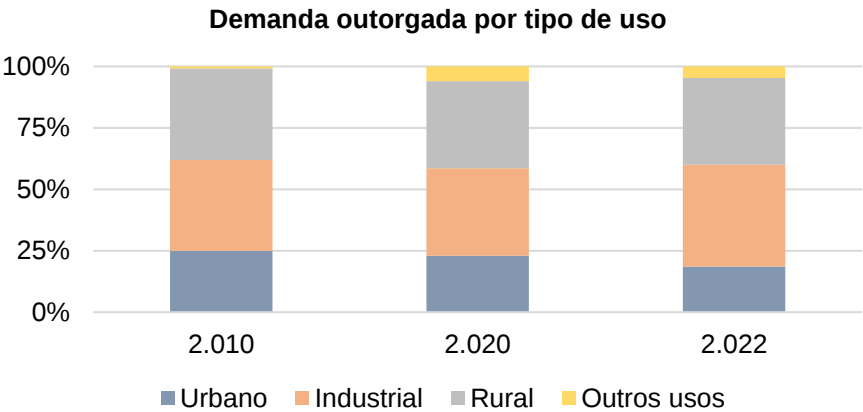
Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1990, 1999, 2006) e CBH-MOGI (2011, 2023).

Tabela 11: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 13.

Ano	Total	Urbano	Industrial	Rural	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2010	13,63	3,4	5,03	5,08	0,11
2020	25,81	5,95	9,16	9,16	1,55
2022	38,9	7,2	16,14	13,74	1,81

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2011, 2023).

Figura 12: Demanda outorgada por tipo de uso na UGRHI 13.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2011, 2023).

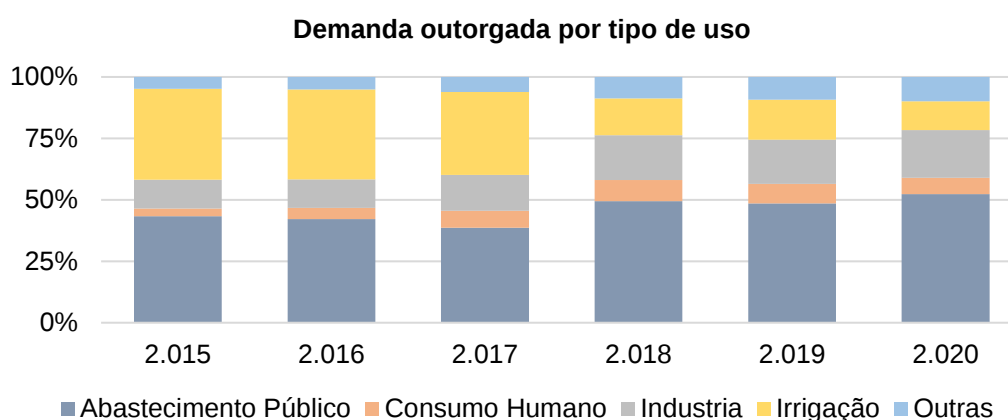
No caso de Araraquara, Tabela 12 e Figura 13, a utilização mais significativa é a urbana, para abastecimento público. Também se verifica uma diminuição do espaço ocupado pela agricultura de irrigação e um aumento da vazão destinada ao setor industrial. Um dado importante é o aumento da categoria "outras", que reflete, na maioria, outorgas urbanas que atendem a uma demanda que não passa pelo sistema de abastecimento público.

Tabela 12: Demanda total outorgada por tipo de uso em Araraquara.

ano	Total (m³/s)	Abastecimento Público (m³/s)	Consumo Humano (m³/s)	Indústria (m³/s)	Irrigação (m³/s)	Outras (m³/s)
2015	2,984	1,295	0,090	0,352	1,105	0,142
2016	3,072	1,295	0,142	0,353	1,125	0,156
2017	3,350	1,295	0,229	0,492	1,129	0,205
2018	2,619	1,295	0,224	0,479	0,391	0,230
2019	2,664	1,295	0,210	0,479	0,433	0,247
2020	2,474	1,296	0,163	0,479	0,292	0,244

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Figura 13: Demanda total outorgada por tipo de uso em Araraquara.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

4.3. BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico visa avaliar o nível de comprometimento de uma bacia hidrográfica, por meio da relação entre as entradas e as saídas do sistema. A análise do balanço hídrico é um tema crítico, pois, possibilita verificar a sustentabilidade hídrica da bacia.

Para o balanço hídrico da UGRHI-19, Tabela 13, e UGRHI-13, Tabela 14, foram utilizadas as vazões de referências para determinar a disponibilidade hídrica e as vazões outorgadas para determinar as saídas. Os dados foram obtidos nos relatórios de situação da bacia da UGRHI-09 e UGRHI-13. Para o município de Araraquara, ,

Tabela 15, as vazões outorgadas foram obtidas junto ao cadastro de outorgas da Agência Nacional de Saneamento Básico (ANA, 2019).

Tabela 13: Disponibilidade e demanda outorgada na UGRHI 09.

Ano	Disponibilidade				Demanda outorgada		
	Superficial			Subterrânea	Total	Superficial	Subterrânea
	Q _{média}	Q _{7,10}	Q _{95%}	Q _{Explotável}			
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2010	199	48	72	24	19,51	16,90	2,61
2020	199	48	72	24	31,89	25,88	6,01
2022	199	48	72	24	39,40	31,20	8,20

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-MOGI (2011, 2023).

Tabela 14: Disponibilidade e demanda outorgada na UGRHI 13.

Ano	Disponibilidade				Demanda outorgada		
	Superficial			Subterrânea	Total	Superficial	Subterrânea
	Q _{média}	Q _{7,10}	Q _{95%}	Q _{Explotável}			
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2010	97	40	50	10	13,63	8,54	5,09
2020	97	40	50	10	25,81	16,32	9,49
2022	97	40	50	10	38,90	26,11	12,79

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2011, 2023).

Tabela 15: Disponibilidade e demanda outorgada em Araraquara.

Ano	Disponibilidade (Vazão de referência)				Demanda outorgada		
	Superficial			Subterrânea	Total	Superficial	Subterrânea
	Q _{média}	Q _{7,10}	Q _{95%}	Q _{Explotável}			
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	9,00	3,40	4,50	1,10	2,98	1,53	1,45
2016	9,00	3,40	4,50	1,10	3,07	1,53	1,54
2017	9,00	3,40	4,50	1,10	3,35	1,53	1,82
2018	9,00	3,40	4,50	1,10	2,62	0,76	1,86
2019	9,00	3,40	4,50	1,10	2,66	0,76	1,90
2020	9,00	3,40	4,50	1,10	2,47	0,75	1,72

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2016) e ANA (2024).

Os indicadores sistematizados nas Tabelas 16 e 17, e comparados nas Figuras 14, 15, 16 e 17, apresentam uma análise das condições dos recursos hídricos da UGRHI-09 e 13.

Tabela 16: Indicadores de pressão “disponibilidade x demanda outorgada” na UGRHI 09.

Ano	Demanda total / Q _{média}	Demanda total / Q _{95%}	Demanda superf./ Q _{7,10}	Demanda sub./ Q _{Explotável}
	(%)	(%)	(%)	(%)
2010	9,81	27,10	35,21	10,88
2020	16,00	44,30	53,90	25,00
2022	19,80	54,60	64,90	34,10

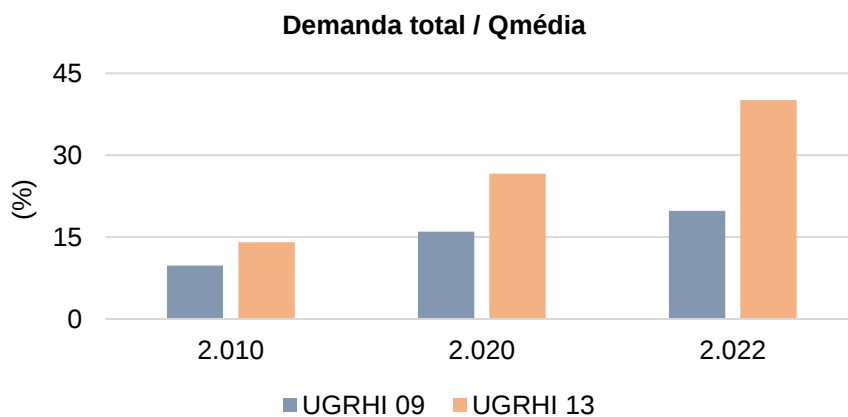
Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-MOGI (2011, 2023).

Tabela 17: Indicadores de pressão “disponibilidade x demanda outorgada” na UGRHI 13.

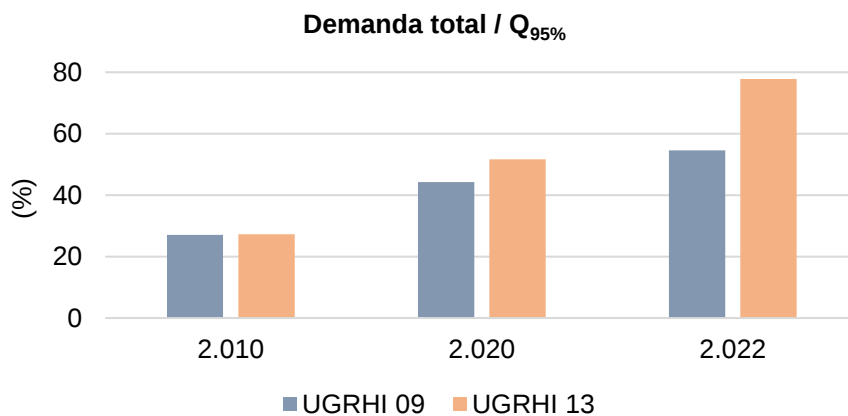
Ano	Demanda total / $Q_{\text{média}}$	Demanda total / $Q_{95\%}$	Demanda superficial / $Q_{7,10}$	Demanda subterrânea / $Q_{\text{explotável}}$
	(%)	(%)	(%)	(%)
2010	14,05	27,26	21,35	50,90
2020	26,61	51,62	40,80	94,90
2022	40,10	77,80	65,28	127,90

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1999, 2006) e CBH-TJ (2011, 2023).

De forma geral, a UGRHI-13 apresenta maior criticidade com relação à UGRHI-09, embora, quando considerado o ano de 2022, ambas estão em condição de “atenção”, Quadro 4, para os índices relacionados às vazões mínimas, Figuras 15 e 16.

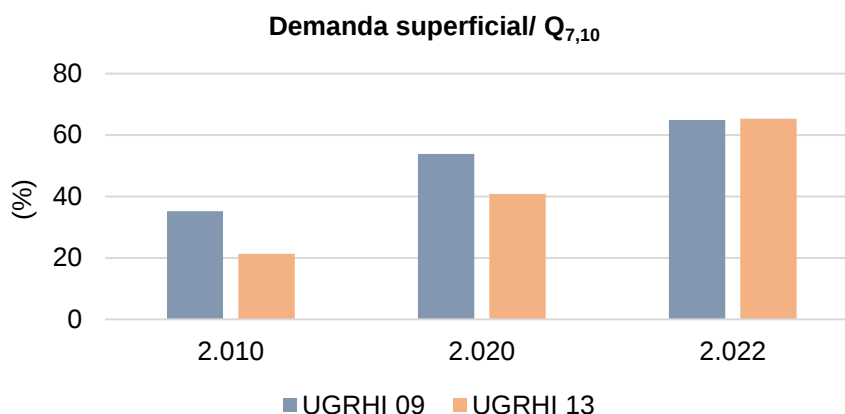
Figura 14: Demanda total / $Q_{\text{média}}$ - UGRHI 09 e 13.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1999, 2006) e CBH-TJ (2011, 2023).

Figura 15: Demanda total / $Q_{95\%}$ - UGRHI 09 e 13.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1999, 2006) e CBH-TJ (2011, 2023).

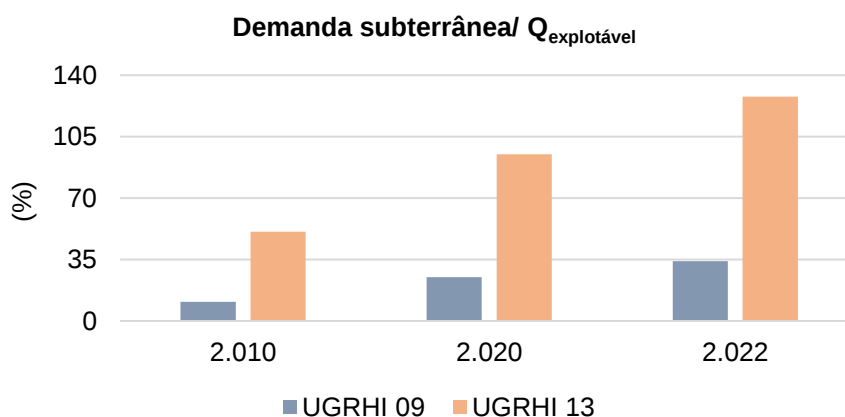
Figura 16: Demanda superficial / $Q_{7,10}$ - UGRHI 09 e 13.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1999, 2006) e CBH-TJ (2011, 2023).

Quanto as águas subterrâneas, Figura 17, a UGRHI-13 apresenta uma situação de alta criticidade, na qual a vazão outorgada já ultrapassou a marca de 100% da vazão explorável.

Figura 17: Demanda subterrânea / $Q_{\text{explotável}}$ - UGRHI 09 e 13.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CERH (1999, 2006) e CBH-TJ (2011, 2023).

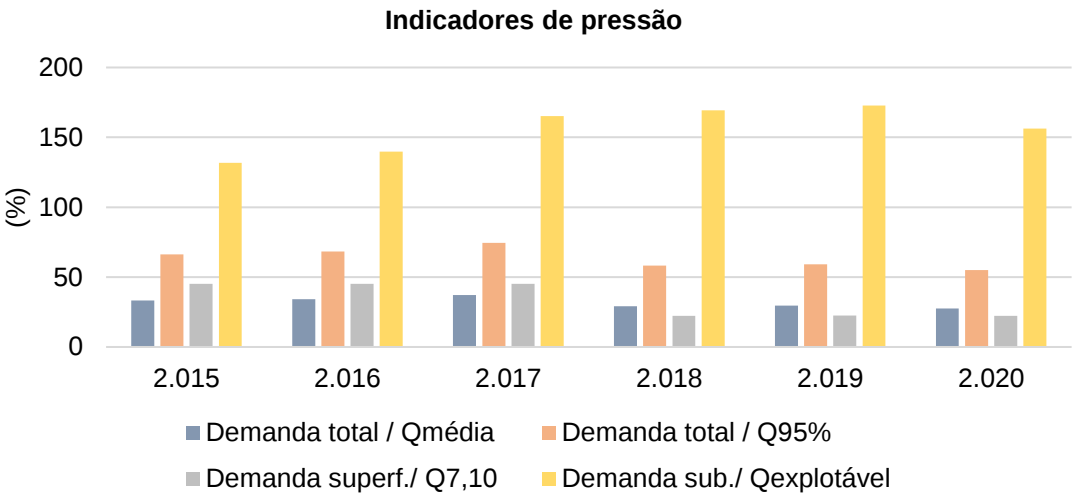
No que se refere a Araraquara, a Tabela 18 e a Figura 18 indicam que a criticidade é maior em relação às águas subterrâneas, que apresentam um cenário consolidado de superação do valor explorável. Verifica-se que há, no município, uma tendência de ampliação da exploração subterrânea, sobretudo no que se refere ao abastecimento público, em detrimento das captações superficiais.

Tabela 18: Indicadores de pressão “disponibilidade x demanda outorgada” em Araraquara.

Ano	Demanda total / $Q_{média}$	Demanda total / $Q_{95\%}$	Demanda superf./ $Q_{7,10}$	Demanda sub./ $Q_{explotável}$
	(%)	(%)	(%)	(%)
2015	33,16	66,32	45,12	131,84
2016	34,13	68,27	45,12	139,81
2017	37,23	74,46	45,12	165,12
2018	29,10	58,20	22,24	169,36
2019	29,60	59,21	22,48	172,73
2020	27,49	54,98	22,19	156,34

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2016) e ANA (2024).

Figura 18: Indicadores de pressão em Araraquara.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2016) e ANA (2024).

Quadro 4: Faixas de referência.

Indicador de pressão	Faixa de referência	Classificação
Demanda total / $Q_{média}$	< 10%	Boa
	10 a 20%	Atenção
	> 20%	Crítica
Demanda total / $Q_{95\%}$	< 30%	Boa
	30 a 50%	Atenção
	> 50%	Crítica
Demanda superf./ $Q_{7,10}$	< 30%	Boa
	30 a 50%	Atenção
	> 50%	Crítica
Demanda sub./ $Q_{explotável}$	< 30%	Boa
	30 a 50%	Atenção
	> 50%	Crítica

Fonte: CERH (1999, 2006).

4.4. USO CONSUNTIVO DA ÁGUA

Para as estimativas do uso consuntivo de água, Tabela 19, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) utiliza, além do inventário das outorgas de uso da água concedidas pelos Estados, um conjunto de metodologias para a estimativa de cada tipo de uso consuntivo, uma vez que, de acordo com ANA (2019). De acordo com ANA (2019), os inventários das outorgas podem não ser o suficiente para estimar os usos reais de água por localidade, dado a diferença existente entre as vazões outorgas e as retiradas reais de água dos sistemas hídricos (ANA, 2019).

Tabela 19: Demanda estimada de retiradas de água por uso em Araraquara.

Ano	Total	Humana urbana	Humana rural	Indústria	Mineração	Dessedentação animal	Agricultura irrigada
	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s
1.980	0,756	0,530	0,014	0,176	0,001	0,022	0,014
1.990	0,955	0,684	0,015	0,220	0,000	0,011	0,025
2.000	1,258	0,771	0,013	0,396	0,000	0,012	0,067
2.010	1,986	0,901	0,009	0,809	0,001	0,010	0,257
2.020	1,528	1,053	0,005	0,367	0,001	0,009	0,093

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2022).

Desta forma, a ANA (2019) considera, para o cálculo do consumo humano, as informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)¹⁴, tais como consumo per capita e o índice de perdas, em conjunto com os dados populacionais do IBGE.

Para a estimativa da dessedentação animal, é aplicado o método da contagem de rebanhos, juntamente com a aplicação de coeficientes técnicos de consumo per capita. Para determinar os rebanhos, foram utilizados dados dos censos agropecuários e das pesquisas pecuárias municipais realizadas pelo IBGE (ANA, 2019).

¹⁴ A partir de 2024, após a aprovação do Marco Regulatório do Saneamento no Brasil, pela Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), instituído pela Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, foi substituído pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA). No entanto, os dados utilizados nesta pesquisa, foram obtidos nas séries históricas disponibilizadas pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), atualizada até o ano de 2023 e tendo como não de referência o ano de 2022.

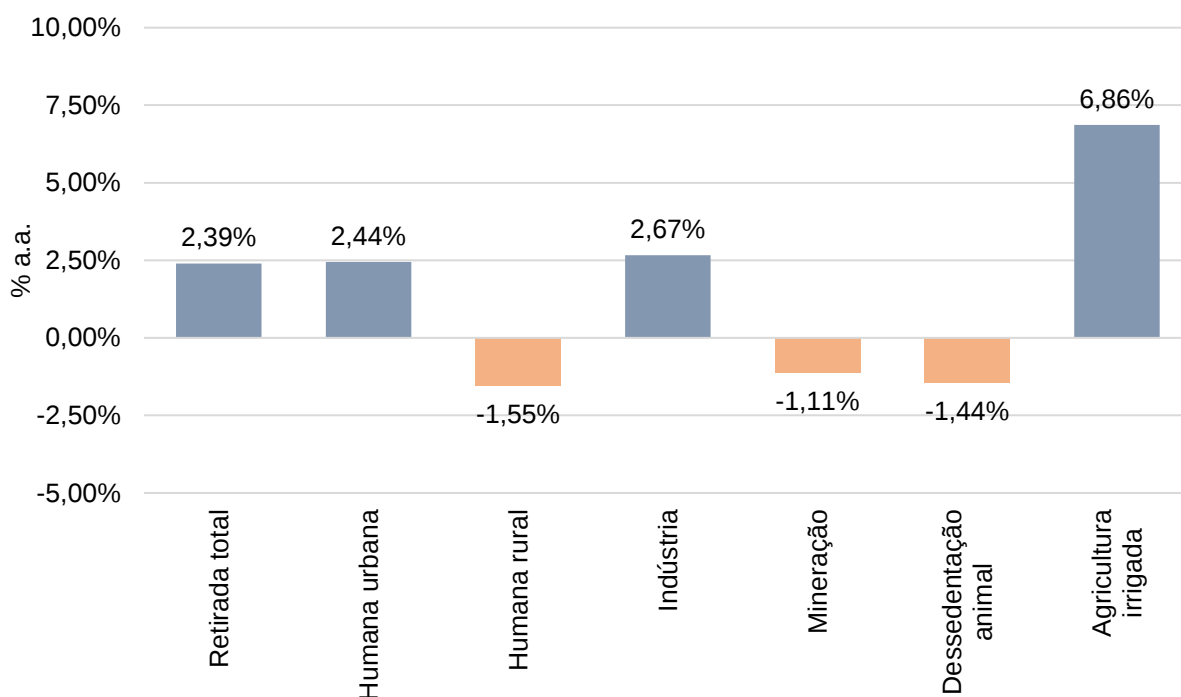
Para o uso na indústria, as estimativas são obtidas por meio da aplicação de coeficientes técnicos de consumo sobre o número de trabalhadores, em conjunto com informações sobre a tipologia da indústria e do município (ANA, 2019).

Para as estimativas de uso na mineração, foram utilizados dados de produção mineral efetiva, associados a coeficientes técnicos específicos (volume de água necessário para produzir uma tonelada, de acordo com a tipologia).

Para o uso na agricultura irrigada, as estimativas baseiam-se no balanço hídrico das áreas irrigadas, considerando a fração de água necessária para cada cultura e os valores não supridos pelas fontes naturais, como a chuva e o solo (ANA, 2019).

Na Figura 19, é possível verificar a variação das vazões de retirada em Araraquara, por tipo de uso, entre 1980 e 2020. Apesar do aumento populacional e da maior urbanização do município, verifica-se um aumento mais acentuado nas retiradas para a agricultura irrigada.

Figura 19: Variação nas vazões de retirada em Araraquara, de 1980 a 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2022).

4.5. INDICADORES DE ESCASSEZ E ESTRESSE HÍDRICO

Tabela 20: Demanda estimada de retiradas de água por uso em Araraquara.

Ano	População (Habitantes)	Disponibilidade hídrica					Demanda de retiradas (DIA)		
		P	E	Q _{média}	Q _{7,10}	Q _{95%}	Doméstica	Indústria	Agrícola
		(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
1980	128.122	42,39	33,36	9,03	3,40	4,50	0,544	0,1762	0,0360
1991	166.732	42,39	33,36	9,03	3,40	4,50	0,714	0,2134	0,0403
2000	182.238	42,39	33,36	9,03	3,40	4,50	0,783	0,3961	0,0790
2010	208.662	42,39	33,36	9,03	3,40	4,50	0,910	0,8096	0,2667
2020	242.228	42,39	33,36	9,03	3,40	4,50	1,059	0,3677	0,1016

Fonte: Elaborado pelo autor com base em CBH-TJ (2016) e ANA (2022).

Onde: P = Precipitação; E = Evapotranspiração; Q_{média} = vazão média superficial; Q_{7,10} = Vazão mínima superficial; Q_{95%} = vazão mínima superficial e subterrânea. Para a demanda “Doméstica”, foram considerados as demandas para o consumo humano urbano e rural (ANA, 2022); para a demanda “Indústria”, foram considerados a demanda para a indústria de transformação e mineração; para a demanda na “Agricultura”, foram consideradas a demanda para dessedentação animal e agricultura irrigada.

Tabela 21: Balanço hídrico em Araraquara.

Ano	Estresse hídrico (%)			Escassez hídrica (m³/hab.ano)		
	DIA /			habitantes / unidade de fluxo		
	Q _{média}	Q _{7,10}	Q _{95%}	Q _{média}	Q _{7,10}	Q _{95%}
1980	0,08	0,22	0,17	2222,65	836,88	1107,63
1991	0,11	0,28	0,22	1707,95	643,08	851,14
2000	0,14	0,37	0,28	1562,63	588,36	778,72
2010	0,22	0,58	0,44	1364,74	513,86	680,10
2020	0,17	0,45	0,34	1193,19	449,26	594,61

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Kumm et al. (2016), Damkjaer; Taylor (2017), Vörösmarty et al. (2005), CBH-TJ (2016) e ANA (2022).

O Quadro 5, apresenta o resultado para a Matriz de Falkenmark (KUMMU et al., 2016), para o município de Araraquara, conforme dados apresentados na Tabela 20 e Tabela 21. Observa-se que, com relação às vazões mínimas Q_{7,10} e Q_{95%}, há um cenário que indica a necessidade de medidas de controle e mitigatórias para o estresse e a escassez hídrica no município.

Quadro 5: Matriz de Falkenmark para Araraquara, por tipo de vazão.

Ano	Vazão média (Q _{média})	Vazão mínima superficial (Q _{7,10})	Vazão mínima superficial e subterrânea (Q _{95%})
1.980	Escassez hídrica moderada	Estresse hídrico moderado + Escassez hídrica alta	Escassez hídrica moderada
1.991			Estresse hídrico moderado + Escassez hídrica alta
2.000			
2.010	Estresse hídrico moderado + Escassez hídrica moderada	Estresse hídrico alto + Escassez hídrica alta	Estresse hídrico alto + Escassez hídrica alta
2.020	Escassez hídrica moderada		Estresse hídrico moderado + Escassez hídrica alta

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Kummu et al. (2016).

4.6. POPULAÇÃO

Tanto Araraquara quanto os municípios vizinhos apresentam tendências de declínio na velocidade das taxas de crescimento populacional, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22: Variação média da população e da urbanização em Araraquara.

Variável	1980-1991	1991-2000	2000-2010	2010-2022
População total (%a.a)	2,74	1,03	1,45	1,34
População urbana (%a.a)	2,93	1,20	1,70	-
População rural (%a.a)	0,40	-1,48	-3,34	-
Urbanização (%a.a)	0,14	0,14	0,20	-

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (1983, 1992, 2001, 2011, 2023).

A população urbana apresenta taxas contínuas de crescimento, Tabela 22, com tendência de desaceleração e a população rural tende a continuar decrescendo, porém, em taxas menores, dado o alto grau de urbanização do município, cerca de 97,20% (DAAE, 2012a; SEADE, 2024). A população urbana está majoritariamente

concentrada na sede municipal, com uma pequena parcela no Distrito de Bueno de Andrada, Tabela 23.

Tabela 23: Evolução populacional em Araraquara.

Ano	Araraquara			Sede Municipal			Distritos ^{15, 16}		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
1950	57.678	35.382	22.296	51.150	34.114	17.036	6.528	1.268	5.260
1960	78.775	59.441	19.334	72.887	58.076	14.811	5.888	1.365	4.523
1970	100.438	-	-	95.175	82.621	12.554	5.263	-	-
1980	128.122	-	-	121.941	115.848	6.093	6.181	-	-
1991	166.732	156.462	10.270	158.536	152.224	6.312	8.196	4.238	3.958
2000	182.238	173.335	8.903	180.520	173.078	7.442	1.718	257	1.461
2010	208.662	202.730	5.932	206.967	202.488	4.479	1.695	242	1.453
2020 ¹⁷	238.662	231.563	7.099	236.967	231.321	5.646	1.695	242	1.453
2022	242.228	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor com base em PMA (1967), IBGE (1983, 1992, 2001, 2011, 2023), DAAE (1991) e SNIS (2023).

4.7. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Conforme o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Araraquara (PDDUA) (ARARAQUARA, 2014a), o município está organizado em 3 (três) macrozoneamentos principais. Na escala urbano-regional, o território é organizado pelo Macrozoneamento de Gestão Ambiental (MGA), dividido em 6 (seis) Regiões de Planejamento Ambiental (RPA), conforme Figura 20, definidas pelas principais bacias hidrográficas do município. Na área urbana, o zoneamento é definido pela sobreposição de duas macrozonas, o Macrozoneamento de Gestão Urbana (MGU) e o Macrozoneamento de Gestão por Bairros (MGB). (ARARAQUARA, 2014a). A Macrozona de Gestão Urbana (MGU), definida como “estrutura político-territorial de gestão do planejamento”, é subdivida em 11 regiões, denominadas como Regiões de Orçamento Participativo (ROP). A Macrozona de Gestão por Bairros (MGB) é subdivida em 25 áreas, denominadas Regiões de Planejamento por Bairros (RPB) e

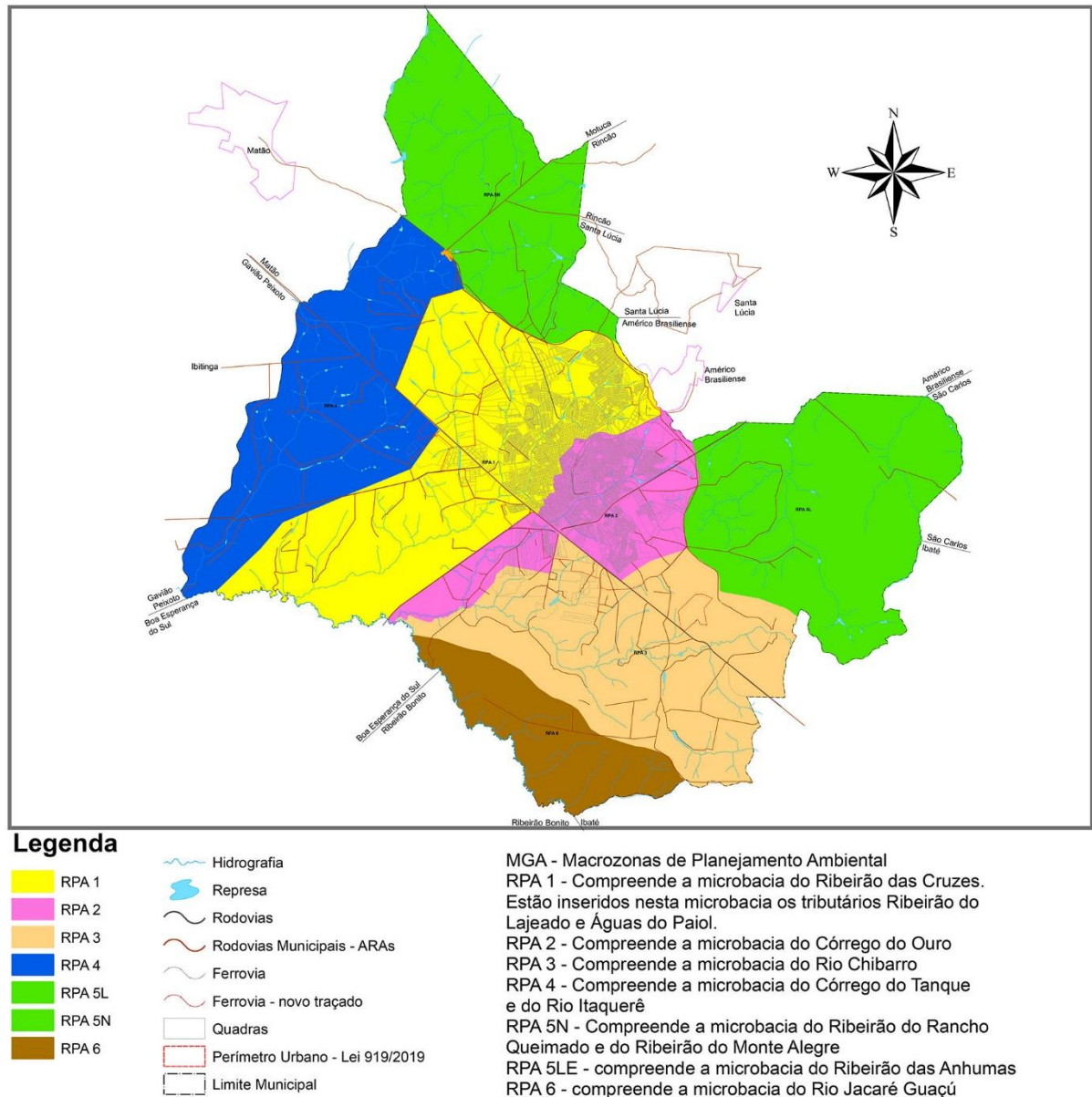
¹⁵ Até o censo de 1991, compunha a população de Araraquara a população dos distritos de Motuca e de Gavião Peixoto, desmembrados do município respectivamente em 1990 e 1995.

¹⁶ Para o ano de 2020, dado a ausências de dados sobre a população do Distrito de Bueno de Andrada, se considerou a população mensurada no censo de 2010 (IBGE, 2011).

¹⁷ Para o ano de 2020, foram utilizados os dados disponibilizados para Araraquara no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023). A população total do município correspondente ao campo G12A e a população urbana ao campo G06A.

definidas como “estrutura político-territorial de gestão do orçamento” (ARARAQUARA, 2014a).

Figura 20: Estratégia de Gestão de Planejamento (MAPA 09), Plano Diretor Municipal.



Fonte: Adaptado de Araraquara (2014a).

O zoneamento urbano, conforme pode ser observado no Quadro 6, é definido por 2 (duas) zonas principais: (i) Zonas Ambientais (ZAMB), caracterizadas por baixo índice de ocupação e alto índice de permeabilidade e cobertura vegetal, que representa cerca de 9,48% da zona urbana, e; (ii) Zonas de Estruturação Urbana Sustentável (ZEUS), caracterizadas por maiores índices de ocupação e menores índices de permeabilidade e cobertura vegetal, que representa cerca de 85,15% da

zona urbana. Outras estruturas presentes no zoneamento são os Corredores Estruturais de Urbanidade (CEU) e os Corredores de Integração Ecológica (CIECO), denominados como “Áreas Especiais de Intervenção Urbana”, que representam cerca de 4,9% da área urbana (ARARAQUARA, 2014a).

A área urbana de Araraquara está concentrada nas bacias do Ribeirão das Cruzes (RPA 01) e do Ribeirão do Ouro (RPA 02), Figura 20. Após alteração no perímetro urbano, em 2014, houve avanço da área urbana sobre novas bacias hidrográficas, que passou a ocupar trechos das bacias do Rio Chibarro (RPA 03) e do Ribeirão do Rancho Queimado e Ribeirão do Monte Alegre (RPA 05N). Em 2019, após nova alteração, houve o avanço sobre a RPA 04, que contempla as bacias do Córrego do Tanque e do Rio Itaquerê. Apesar do avanço do perímetro urbano sobre novas bacias hidrográficas, a dinâmica da ocupação urbana do município não indica uma urbanização massiva destas áreas em curto espaço de tempo, mas tendem a produzir efeitos a longo prazo (PIERINI, 2020), como, por exemplo, a ampliação da demanda hídrica.

Quadro 6: Zoneamento urbano de Araraquara.

Categorias	Subdivisões territoriais	
Zonas Ambientais (ZAMB)	Zonas de Proteção Ambiental (ZOPA)	
	Zonas Ambientais de Uso Sustentável (ZAUS)	
	Zonas de Conservação e Recuperação Ambiental (ZORA)	
Zonas de Estruturação Urbana Sustentável (ZEUS)	Zona Predominantemente Residencial (ZOPRE)	Áreas de Especial Interesse Urbanístico (AEIU)
		Áreas de Especial Interesse Social (AEIS)
		Áreas de Proteção de Mananciais (APRM)
	Zona Especiais Mistas (ZOEMI) / Áreas Especiais de Interesse Urbanístico (AEIU)	Área da Cidade Compacta de Ocupação Prioritária (ACOP)
		Área da Cidade de Transição e Expansão Urbana (ACITE)
		Áreas Especiais de Interesse Ambiental de Recarga do Aquífero (AEIRA)
	Zonas Especiais de Estruturação Predominantemente Produtivas (ZEPP)	Zona de Produção Industrial (ZOPI)
		Zona Especial de Produção Industrial (ZEPIS)
		Zona de Produção Agrícola (ZOPAG)
Zona Rurbana (ZORUR) ¹⁸		
Zona de Processamento de Exportação (ZPE) ¹⁹		

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Araraquara (2014a).

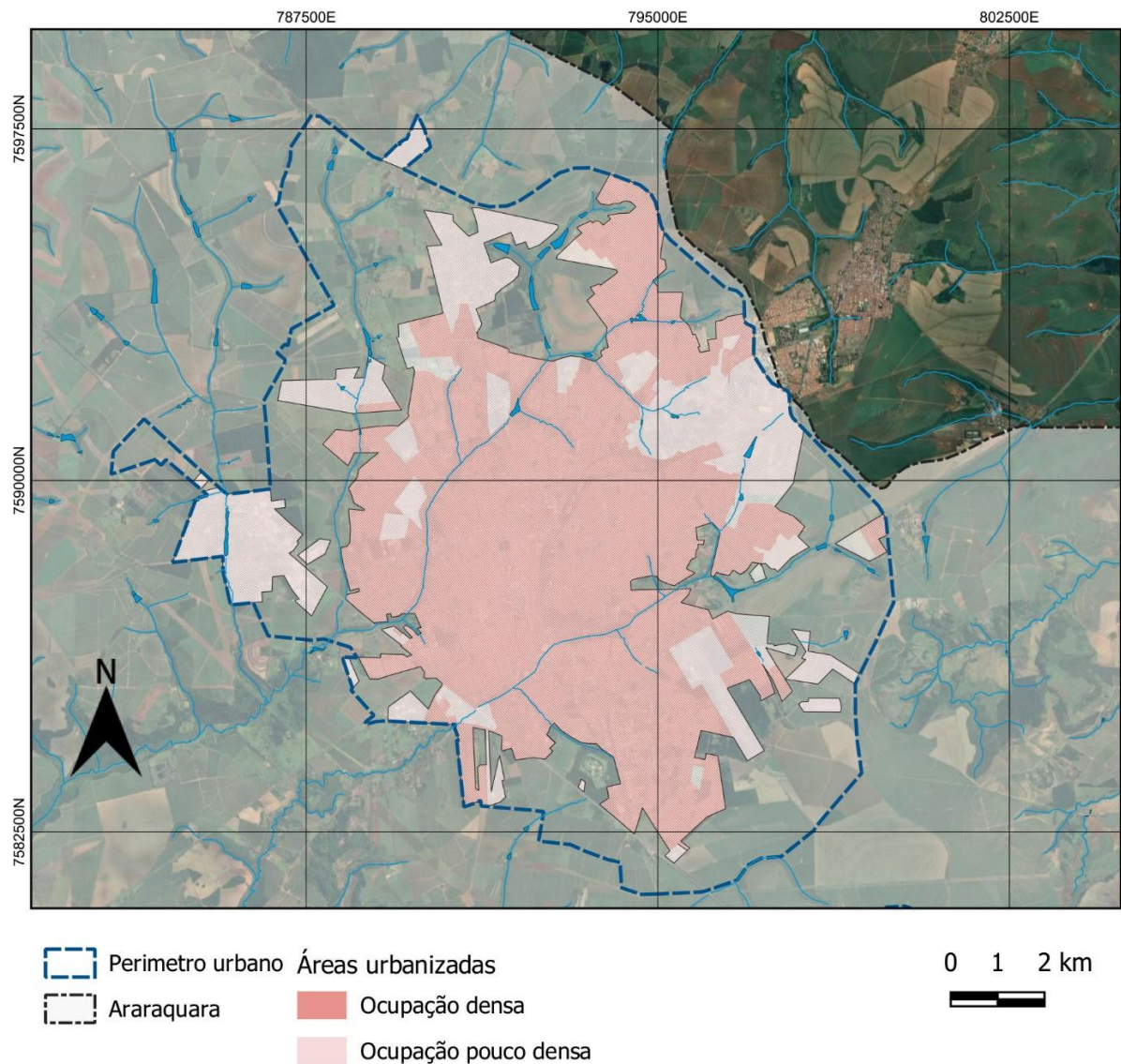
¹⁸ Área de urbanização e regulação controlada para atividades diversas, com características rurais, está inserida em uma parcela da área de expansão urbana e parte da área rural do município (Araraquara, 2014b).

¹⁹ Área classificada como “perímetro urbano isolado”, desconectada da zona urbana principal (Araraquara, 2014b).

4.7.1. Evolução da ocupação urbana e do uso e ocupação do solo

A ocupação urbana de Araraquara, de acordo com Pierini (2020), ocorreu de forma crescente, com picos na disponibilidade de áreas entre as décadas de 1970-1980 e 1991-2000, mas com uma queda na oferta nas décadas seguintes (PIERINI, 2020).

Figura 21: Mancha urbana em Araraquara.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Araraquara (2014a) e IBGE (2022).

A partir da década de 1970, iniciou-se um processo mais acentuado da expansão urbana, com a ocupação de áreas mais distantes do núcleo urbanizado e a

criação de grandes vazios urbanos, processo que praticamente definiu os limites atuais da área urbanizada. Estes vazios foram sendo ocupados nas décadas seguintes, no entanto, continuam presentes. Considerando os estudos de Pierini (2020), estima-se que o município possui na porção da área urbana ocupada por áreas loteadas, em média, cerca de 14,58% de vazios urbanos. Conforme o IBGE (2022), dos 80,17 km² de áreas urbanizadas, cerca de 65,57 km² são áreas de ocupação densa e 14,60 km² de ocupações pouco densas, conforme apresentado na Figura 21.

Entre as décadas de 1990 e 2020, Tabela 24, as áreas urbanizadas do município aumentaram cerca de 237%. Neste período, houve uma redução de 27,27% nas áreas de cobertura natural e de 54,10% na cobertura por corpos d'água.

Tabela 24: Uso e ocupação do solo em Araraquara.

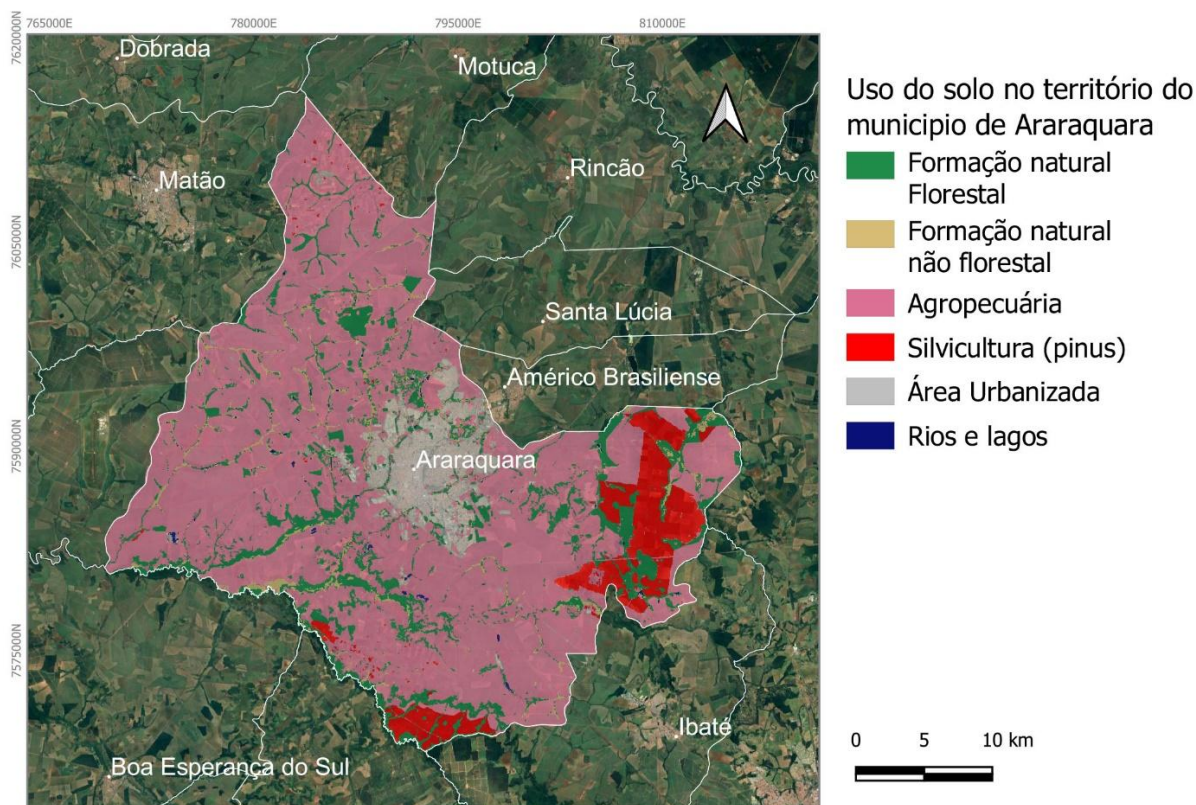
Tipo	1990	2000	2010	2020
1. Formação natural Florestal/ (ha)	12.949	10.828	10.853	10.645
1.1. Formação Florestal (ha)	12.533	10.269	10.172	10.030
1.2. Formação Savânica (ha)	416	559	681	616
2. Formação Natural não Florestal (ha)	1.313	1.415	1.466	1.797
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa (ha)	1.298	1.411	1.444	1.738
2.2. Formação Campestre (ha)	14	5	23	58
3. Agropecuária (ha)	82.786	83.344	82.343	81.072
3.1. Pastagem (ha)	9.007	7.516	2.767	2.657
3.2. Agricultura (ha)	32.408	38.331	50.448	49.054
3.2.1. Lavoura Temporária (ha)	32.025	37.158	49.142	48.784
3.2.1.1. Soja (ha)	772	893	1.875	5.014
3.2.1.2. Cana (ha)	30.941	36.036	46.868	43.217
3.2.1.5. Outras Lavouras Temporárias (ha)	311	230	399	553
3.2.2. Lavoura Perene (ha)	383	1.173	1.306	269
3.2.2.1. Café (ha)	-	-	-	65
3.2.2.2. Citrus (ha)	308	1.153	1.242	58
3.2.2.4. Outras Lavouras Perenes (ha)	75	20	64	146
3.3. Silvicultura (Pinus) (ha)	4.543	6.677	6.440	6.642
3.4. Mosaico de Usos (ha)	36.829	30.820	22.688	22.720
4. Área não vegetada (ha)	2.804	4.430	5.442	6.647
4.2. Área Urbanizada (ha)	2.487	4.221	5.277	6.429
4.4. Outras Áreas não vegetadas (ha)	317	209	165	218
5. Corpos d'água (ha)	509	345	258	201
5.1. Rios e lagos (ha)	509	345	258	201

Fonte: Elaborado pelo autor com base em MapBiomass Project (2023).

As áreas destinadas ao uso agropecuário apresentaram pouca variação na cobertura total, no entanto, passaram por mudanças em sua configuração, com a diminuição de 70,50% da cobertura por pastagens, a redução de 38,31% das áreas classificadas como “mosaico de usos” e aumento das áreas dedicadas à agricultura que cresceram cerca de 51,36% no período. A maior variação foi no cultivo de cana-de-açúcar que apresentou um crescimento 39,68% das áreas cultivadas. Em 2020, cerca de 43% do território municipal foi destinado ao cultivo canavieiro.

Conforme dados da iniciativa MapBiomas Brasil (MAPBIOMAS PROJECT, 2023), cerca de 80,78% do território municipal é dedicado ao uso agropecuário, 6,41% são áreas urbanizadas, 10,61% são referentes às formações naturais e 0,20% são referentes a corpos d’água. Das áreas de uso agropecuário, cerca de 88,5% pode ser classificado como de uso agrícola, considerando a somatória das áreas classificadas como “agricultura”, associadas ao cultivo de monoculturas (cana, soja, citrus, etc.), e “mosaico de usos” que no contexto do município estão associadas, em sua maioria, aos assentamentos rurais e a pequenas propriedades rurais, conforme Figura 22.

Figura 22: Mapa de uso e ocupação do solo de Araraquara.

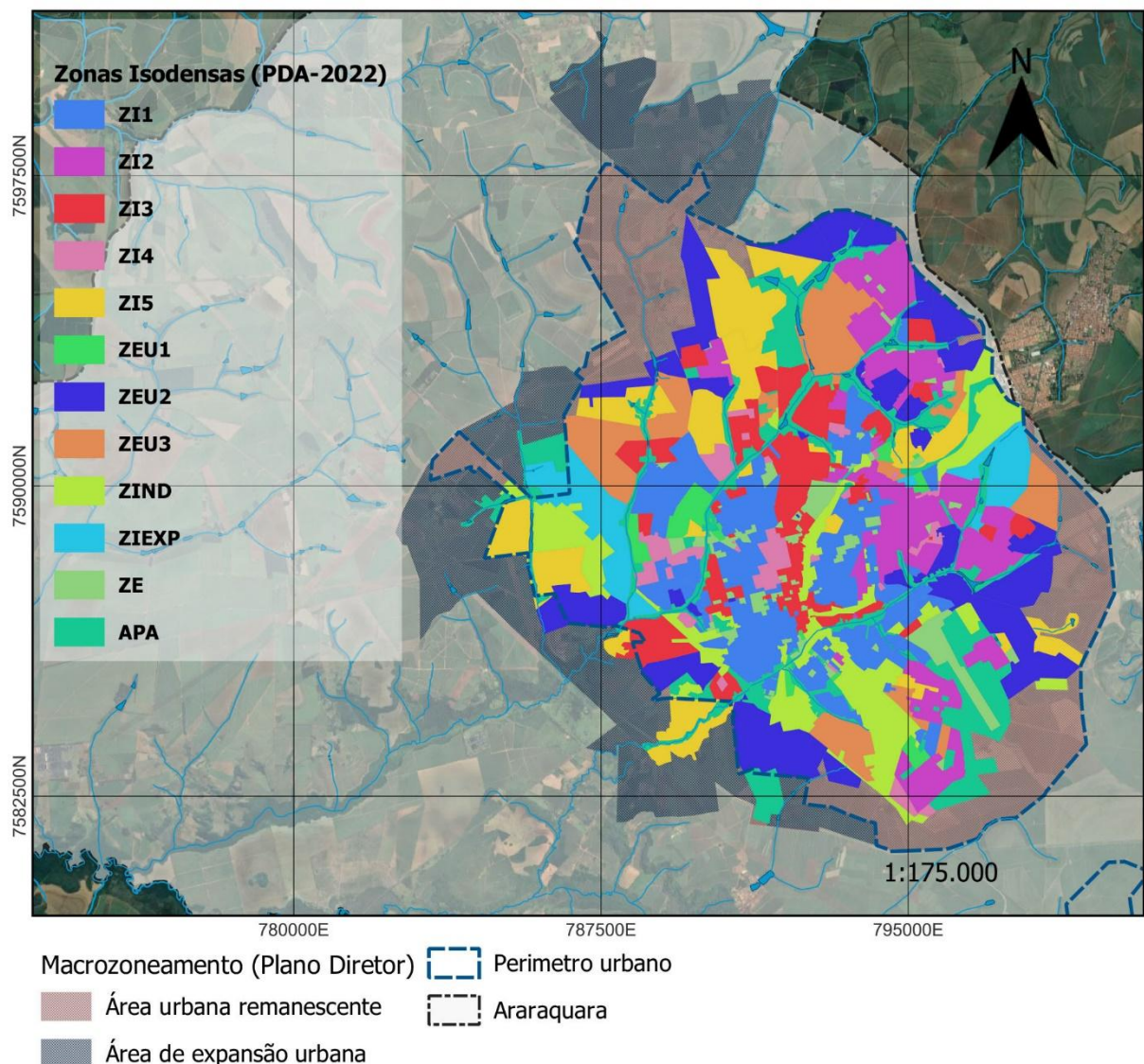


Fonte: Elaborado pelo autor com base em MapBiomas Project (2023), Araraquara (2014a).

4.7.2. Zonas isodensas

Para a construção de cenários futuros da ocupação urbana, o Plano Municipal de Saneamento Básico de Araraquara (PMSB) (DAAE, 2012a), aplicou o conceito de maior adensamento possível da área ocupável. A partir dos dados censitários, do zoneamento municipal e do cadastro técnico do sistema de abastecimento, definiu intervalos de densidade (economias/hectare) para a área urbana, classificados como “zonas homogêneas” de ocupação ou “zonas isodensas”. O Plano Diretor da Água (PDA) (DAAE, 2022b) adotou a mesma metodologia, revisou o crescimento da ocupação urbana e atualizou as delimitações e estimativas para as densidades demográficas das zonas isodensas, Quadro 7 e Figura 23.

Figura 23: Mapa de zonas isodensas x macrozoneamento municipal.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2022b) e Araraquara (2014a).

Quadro 7: Definição das zonas isodensas.

ZONA ISODENSA	DESCRIÇÃO
Zona Isodensa 1 (ZI-1)	Região central, com baixa expectativa de crescimento;
Zona Isodensa 2 (ZI-2)	Região predominantemente horizontal e comercial, com baixa expectativa de crescimento
Zona Isodensa 3 (ZI-3)	Região mais afastada do centro com ocupação, com expectativa de crescimento média
Zona Isodensa 4 (ZI-4)	Conjuntos habitacionais e pontos de verticalização, expectativa de crescimento média
Zona Isodensa 5 (ZI-5)	Região de chácaras e alto padrão
Zona Expansão Urbana 6 (ZEU1)	Região de expansão residencial das regiões ZI-3 e ZI-4, com alta taxa de crescimento
Zona Expansão Urbana 7 (ZEU2)	Região de expansão residencial das regiões ZI-1 e ZI-2, com alta taxa de crescimento
Zona Expansão Urbana 8 (ZEU3)	Região de expansão residencial da região ZI-5, com alta taxa de crescimento
Zona Industrial 9 (ZI)	Região industrial, com baixa taxa de crescimento
Zona de Expansão Industrial 10 (ZI Exp)	Região de expansão industrial, com alta taxa de crescimento
Área de Proteção Ambiental (APA)	Região de extensa área natural
Zona Especial 11 (ZE)	Regiões com demanda de consumo especiais, como shopping centers, cemitérios, clubes, Campus Universitário, etc. Apresentam densidades constantes

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2022b).

A Tabela 25 apresenta, de forma sucinta, as zonas isodensas definidas no PDA (DAAE, 2022b). Cada zona Isodensa foi subdividida em subzonas, as quais apresentam uma área definida (em hectares), um valor de densidade de saturação (habitantes/hectares) e a taxa de ocupação (%) para o ano de 2020.

Tabela 25: Zonas Isodensas, Plano Diretor da Água (PDA).

Zona	Subzonas	Área	Densidade saturação
		(ha)	(hab/ha)
Zona Isodensa 1 (ZI-1)	29	1.710	60-80
Zona Isodensa 2 (ZI-2)	13	1.427	55-75
Zona Isodensa 3 (ZI-3)	26	1.156	30-55
Zona Isodensa 4 (ZI-4)	23	341	60-120
Zona Isodensa 5 (ZI-5)	19	1.409	10-20
Zona Expansão Urbana 6 (ZEU1)	13	205	15-30
Zona Expansão Urbana 7 (ZEU2)	27	1.519	30-60
Zona Expansão Urbana 8 (ZEU3)	11	977	10-20
Zona Industrial 9 (ZI)	20	1.242	5-15
Zona de Exp. Industrial 10 (ZI Exp)	5	585	4

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2022b).

4.8. SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS

4.8.1. Sistema de Abastecimento de Água

O município dispunha, em 2022, de aproximadamente 1.519 km de redes de água, interligadas a 106 mil ligações residenciais, comerciais, industriais e públicas. O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) está organizado em 18 setores de abastecimento principais, divididos em 36 subsetores. Cada setor ou conjunto de setores e subsetores é composto por sistemas descentralizados de produção, reservação e distribuição de água (DAAE, 2012a, 2022; SNIS, 2023).

A área urbana é abastecida por 3 (três) mananciais superficiais e 27 poços profundos (DAAE, 2022b). Conforme Tabela 26, no ano de 2020, cerca de 34% do abastecimento público do município foi realizado por mananciais superficiais e 64% por mananciais subterrâneos (SNIS, 2023).

Tabela 26: Produção média de água para abastecimento em Araraquara.

Ano	Pop. Urbana (sede municipal) (habitantes)	Produção de água			Uso do manancial	
		Total (l/s)	Superficial (l/s)	Subterrânea (l/s)	Superficial (%)	Subterrâneo (%)
1950	34.114	-	-	-	100%	0%
1960	58.076	139,73	139,73	-	100%	0%
1970	82.621	294,04	294,04	-	100%	0%
1980	115.848	473,39	382,05	91,35	81%	19%
1991	152.224	776,95	520,00	256,95	67%	33%
2000	173.569	822,00	418,43	403,57	51%	49%
2010	202.730	935,69	429,76	505,93	46%	54%
2020	231.321	1116,19	380,90	735,29	34%	66%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (1972, 1984, 1991, 2012, 2022) e SNIS (2023).

Dos mananciais de superfície, Tabela 27, dois estão localizados na área urbana, o Ribeirão das Cruzes e o Córrego Águas do Paiol e um na área rural, o Ribeirão das Anhumas (DAAE, 2022b). A captação de água superficial do Ribeirão das Cruzes que responde por aproximadamente 30% da captação superficial para abastecimento público, tem toda a sua bacia de contribuição na área urbana. A captação do Córrego Águas do Paiol, apesar de também estar inserida na área urbana, possui uma bacia de contribuição localizada na área de expansão urbana, majoritariamente ocupada por áreas agrícolas. A captação do Ribeirão das Anhumas está localizada em área rural do município (DAAE, 2018, 2022b).

Tabela 27: Captação média por mananciais superficiais em Araraquara.

Ano	Total	Anhumas		Cruzes		Paíol	
	(l/s)	(l/s)	(%)	(l/s)	(%)	(l/s)	(%)
1991	520,00	220,00	42,31%	300,00	57,69%	0,00	0,00%
2011	456,68	113,49	24,85%	274,80	60,17%	68,39	14,98%
2020	393,13	110,86	28,20%	228,61	58,15%	53,66	13,65%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (1991, 2012, 2022) e SNIS (2023).

Todos os mananciais de abastecimento em uso apresentam, de acordo com DAAE (2022), fatores complicadores para a ampliação das vazões captadas, seja pela indisponibilidade hídrica ou pelos altos custos dos sistemas de captação e adução. Situação semelhante ocorre com outros mananciais que apresentam potencial para o abastecimento urbano que, para serem viabilizados, necessitam de investimentos substanciais em infraestrutura e custeio. As Tabelas 28 e 29, apresentam um panorama do sistema de abastecimento de água do município, indicando a evolução da infraestrutura e do volume anual da água produzida, em função, principalmente, do aumento da demanda, causado, em grande parte, pelo aumento populacional.

Tabela 28: Evolução do sistema de abastecimento de água em Araraquara.

Ano	População	População urbana atendida	Ligações de água		Redes de água	Produção de água
	(habitantes)	(habitantes)	Total	Ativas	(km)	(1.000 m³/ano)
2010	208.662	202.730	89.276	77.658	1.245	29.508
2011	210.673	204.684	93.209	81.636	1.258	32.267
2012	212.617	206.573	97.442	85.694	1.294	32.550
2013	222.036	215.724	102.211	89.267	1.307	32.405
2014	224.304	217.927	105.769	92.179	1.345	33.612
2015	226.508	220.069	110.357	96.293	1.380	32.800
2016	228.664	222.163	113.128	98.725	1.413	34.991
2017	230.770	224.209	117.828	100.826	1.417	35.823
2018	233.744	227.099	122.855	107.295	1.428	33.814
2019	236.072	229.361	126.194	99.189	1.441	33.965
2020	238.339	231.563	130.350	101.457	1.442	35.200

Fonte: Elaborado pelo autor com base em SNIS (2023).

Tabela 29: Economias e consumo de água em Araraquara (2020)

Categoria de consumo	Número de economias	Consumo médio mensal	Consumo médio mensal por economia
		(em m³)	(m³/economia)
Comercial	9.578	89.172	9,31
Industrial	225	4.296	19,09
Público	1.251	42.050	33,61
Residencial	99.851	1.224.969	12,27

Fonte: DAAE (2022b).

4.8.2. Consumo per capita

A definição do consumo per capita não se confunde, neste caso, com o mínimo necessário para a satisfação das necessidades básicas de um indivíduo que, conforme a Organização Mundial de Saúde (OMS), é de 50 a 100 l/hab.dia (HOWARD et al., 2020; OHCHR, 2010). Para esta pesquisa, adotou-se como “consumo per capita” urbano, a definição adotada pelo Plano Municipal de Saneamento (PMSB) (DAAE, 2012c) e pelo Plano Diretor da Água (PDA) (DAAE, 2022b), ou seja, o consumo médio per capita representa a média diária por indivíduo dos volumes requeridos para satisfazer aos consumos domésticos, comercial, público e industrial na área urbana.

A Tabela 30, apresenta a relação entre a demanda e o consumo de água no município. As informações referem-se aos valores observados para a população urbana residente apenas na sede municipal, ou seja, não inclui o Distrito de Bueno de Andrada.

Tabela 30: Evolução da do consumo e da demanda para o abastecimento público em Araraquara.

Ano	População urbana (sede municipal) habitantes	Índice de atendimento urbano ²⁰		Demanda média		Consumo médio per capita (l/hab.dia)
		Abastecimento de água	Coleta de Esgoto	Total	Consumo	
		(%)	(%)	(l/s)	(l/s)	
1950	34.114	-	-	-	-	-
1960	58.076	76,69	-	140,51	-	250
1970	82.621	79,30	72,80	282,63	152,62	372
1980	115.848	93,00	-	560,31	302,57	345
1991	152.224	99,04	98,00	776,95	427,32	255
2000	173.078	99,45	98,86	822,00	467,31	215
2010	202.488	99,43	98,89	935,69	543,08	232
2020	231.321	99,40	99,70	1116,19	605,09	224

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (1972, 1984, 1991, 2012, 2022) e SNIS (2023).

O consumo, no entanto, é apenas parte da demanda de água no município. As perdas de água no sistema de abastecimento urbano em Araraquara correspondem, em média, a 45% de toda a água distribuída, conforme Tabela 31.

²⁰ Para a determinação das demandas per capita e do índice de atendimento por abastecimento de água, para o ano de 1970, foram adotados os dados referentes ao ano de 1971 (DAAE, 1972); para o ano de 1980, foram adotados os dados referentes ao ano de 1983 (DAAE, 1984).

Tabela 31: Índice de perdas no município de Araraquara.

Ano	Índice de abastecimento urbano de água	Índice de perdas
	(%)	(%)
1970	79,30	46,0
1980	93,00	46,0
1991	99,04	45,0
2000	99,45	43,2
2010	99,43	42,0
2020	99,40	45,8

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (DAAE (1972, 1984, 1991) e SNIS (2023).

4.8.3. Sistema de Esgotamento Sanitário

A coleta de esgoto no município é realizada em 99,70% da área urbana (SEADE, 2024) e 100% do esgoto coletado recebe tratamento adequado. O sistema é do tipo separador absoluto e conta com aproximadamente 1.232 km de redes conectadas a 102 mil ligações, em 2020 (SNIS, 2023). De acordo com DAAE (2012b), aproximadamente 83% das redes são de manilhas cerâmicas, 11% de PVC ou PEAD e 6% de outros materiais. Cerca de 85% são redes coletoras de Ø 150mm, 6% redes de Ø 200mm e 9% de diâmetros superiores (coletores tronco, interceptores e emissários). Todo o esgoto coletado na área urbana é conduzido para uma única estação de tratamento de esgoto (ETE Araraquara), com capacidade para 800 l/s, localizada a aproximadamente 5 km da área urbana (DAAE, 2012b).

A ETE Araraquara, implantada em 1998, possui tratamento preliminar (gradeamento e caixa de areia) e 2 módulos de tratamento, compostos, cada um, por lagoa de aeração e lagoa de sedimentação. A estação foi projetada para operar com uma eficiência mínima de 80% de redução de DBO₅, conforme legislação vigente na época. Os efluentes tratados são lançados no Ribeirão das Cruzes, a jusante da área urbana (DAAE, 2012b).

O município dispõe de outras duas estações de tratamento de esgotos, sendo uma com tratamento do tipo lodo ativado, com capacidade para 1,45l/s, que atende o distrito de Bueno de Andrada e outra do tipo Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), com capacidade para 1,16 l/s, que atende 53 lotes no Assentamento Rural Bela Vista (DAAE, 2012b).

O Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) está implantado em duas bacias principais de esgotamento, a bacia do Ribeirão das Cruzes e a bacia do Córrego do

Ouro, compostas respectivamente por 28 e 20 sub-bacias de esgotamento (DAAE, 2012b). Dada a topografia favorável, o transporte dos esgotos coletados ocorre, em sua maior parte, por gravidade. Conforme o PMSB (DAAE, 2012b), as redes de esgotos do município devem comportar as vazões geradas até o final do período do plano, em 2030. No entanto, o PMSB não apresenta uma análise do estado de conservação das redes e de seus dispositivos (travessias, poços de visitas, caixas e tampões, etc.), ou uma análise crítica do SES no município.

Conforme a Tabela 32, o volume de esgoto tratado, em 2020, foi de 28.678.000 m³, uma vazão média de 736,87 l/s, aproximadamente 92% da vazão de projeto. De acordo com DAAE (2012b), a estimativa é que a ETE Araraquara atenda uma população de até 268.000 pessoas, maior, portanto, que a população urbana verificada no período.

Tabela 32: Evolução do sistema de esgoto em Araraquara.

Ano	População do município	População urbana atendida	Ligações		Redes de esgotos (km)	Esgoto coletado (1.000 m ³ /ano)	Esgoto tratado (1.000 m ³ /ano)
			Total	Ativas			
2010	208.662	200.603	88.383	76.881	1.053	17.763	17.763
2011	210.673	204.444	93.100	81.540	1.062	18.984	18.984
2012	212.617	206.239	97.733	85.985	1.085	16.043	16.043
2013	222.036	215.390	102.599	89.655	1.093	19.252	19.252
2014	224.304	217.593	106.157	92.567	1.123	15.336	15.336
2015	226.508	219.735	110.745	96.681	1.152	20.919	20.919
2016	228.664	221.830	113.516	99.113	1.179	14.898	14.898
2017	230.770	223.521	118.216	101.214	1.184	18.222	18.222
2018	233.744	226.410	123.243	107.683	1.193	19.920	19.920
2019	236.072	228.672	126.454	99.449	1.202	18.963	18.963
2020	238.339	230.874	130.350	101.457	1.203	23.238	23.238

Fonte: Elaborado pelo autor com base em SNIS (2023).

Para a estimativa da geração per capita de esgoto, Tabela 33, aplicou-se sobre o consumo per capita de água um coeficiente de retorno de $C = 0,80$ (ABNT, 1986; DAAE, 2012b; SOUZA et al., 2018). Em média, entre os anos de 2010 e 2020, a quantidade per capita de esgoto tratado é 30,45% maior que a geração per capita de esgoto, somente em 2020 esse valor foi de 52,23%. Isso ocorre por que, além dos efluentes domésticos e industriais o esgoto sanitário também é composto por água de infiltração e pela contribuição pluvial parasitária (NUVOLARI et al., 2011), ou seja, o volume recebido na estação de tratamento é maior que o coletado nas unidades

consumidoras. Somam-se também as vazões de unidades geradoras que não estão conectadas ao SAA do município, como as que usam fontes alternativas de abastecimento.

Tabela 33: Geração per capita de esgotos em Araraquara.

Ano	Consumo urbano per capita de água ²¹	Coefficiente de retorno	Geração per capita de esgoto	Tratamento per capita de esgoto ²²	Variação entre geração e tratamento per capita de esgoto
	(l/hab.dia)	(C)	(l/hab.dia)	(l/hab.dia)	(%)
2010	233,90	0,80	187,12	242,60	29,65
2011	239,42	0,80	191,54	254,40	32,82
2012	256,89	0,80	205,51	213,12	3,70
2013	248,14	0,80	198,51	244,88	23,36
2014	230,78	0,80	184,62	193,10	4,59
2015	199,04	0,80	159,23	260,82	63,80
2016	203,42	0,80	162,73	184,00	13,07
2017	210,23	0,80	168,19	223,35	32,80
2018	204,87	0,80	163,90	241,05	47,07
2019	215,39	0,80	172,31	227,20	31,85
2020	226,44	0,80	181,15	275,76	52,23

Fonte: Elaborado pelo autor com base em SNIS (2023).

4.8.4. Sistema de Drenagem Urbana

O sistema de microdrenagem do município é do tipo separador absoluto e os pontos de lançamento são, em sua maioria, em curso d'água permanente.

Conforme o Plano Diretor de Saneamento e Gestão Ambiental de Araraquara (PDSCA) (DAAE, 2007), aproximadamente 33,2% da área urbanizada não dispõe de sistema de drenagem de águas pluviais, 33,5% dispõe de sistema de escoamento superficial e 33,3% de algum sistema de galeria. No ano de 2022, o município possuía 1.176,60 km de vias públicas urbanas, destes, 98,7% são pavimentados e possuem meio-fio e 36% possuem redes ou canais pluviais (SNIS, 2023). A gestão do Sistema

²¹ O consumo per capita de água apresentado nesta tabela, difere do consumo per capita apresentado no SNIS (2023). O valor apresentado é o resultado da relação entre a "produção total de água", descontado o "índice de perdas", e a "população urbana atendida". O indicador correspondente no SNIS (IN022 - Consumo médio per capita de água) considera a população total atendida com abastecimento de água no município.

²² Para a obtenção do valor per capita de esgoto tratado, foi considerada a relação entre o volume total de esgoto tratado e a "população urbana atendida". Considerando a que a vazão total das Estações de Tratamento de Esgoto de Bueno de Andrada e do Assentamento Bela Vista, representam menos 0,5% de todo o esgoto tratado no município, adotou-se como volume total de esgoto tratado (SNIS, 2023) o volume correspondente à ETE Araraquara, que recebe contribuição de toda a área urbana do município.

de Drenagem Urbana (SDU) é realizada pela Prefeitura Municipal, por meio da Secretaria de Obras e Serviços.

[...] O sistema de drenagem pluvial de Araraquara está baseado no princípio da evacuação rápida dos excessos pluviais e o seu lançamento direto em cursos de água ou áreas livres. A água pluvial ainda é considerada um problema urbano e não é contemplada nenhuma alternativa de seu uso e conservação, bem como seu inter-relacionamento com os demais sistemas de infraestrutura urbana (DAAE, 2007, p. 53).

O PMSB (DAAE, 2012c), em vigência no ano de 2020, apresenta um volume sobre a drenagem urbana, no entanto, não apresenta uma análise da microdrenagem, mantendo o foco na macrodrenagem.

Conforme o PMSB (DAAE, 2012c), o município está situado no divisor de águas das bacias hidrográficas do Rio Tietê-Jacaré e do Rio Mogi-Guaçu. Os principais cursos d'água urbanos, são o Córrego do Ouro, que deságua no Rio Chibarro, e o Ribeirão das Cruzes, ambos afluentes do Rio Jacaré-Guaçu, na bacia do Rio Tietê-Jacaré. Tanto o Córrego do Ouro quanto o Ribeirão das Cruzes têm seus principais afluentes na área urbana do município, que conta com 12 microbacias e 148 sub-bacias (DAAE, 2012c).

A rede hídrica municipal tem cerca de 696,53 km de extensão. Considerando apenas as bacias do Córrego do Ouro e do Ribeirão das Cruzes, são 157,29 km de rede hídrica, incluindo o corpo hídrico principal e os seus tributários, distribuídos em uma área de 266,68 km² (ARAÚJO NETO *et al.*, 2022). Na área urbana, são 83,81 km de rede hídrica distribuída em 155,68 km².

4.8.5. Gestão das águas urbanas

Considerando a abordagem proposta por Van Den Brandeler (2020), apresentada no item "*2.4.1. Gestão da Água Urbana*" desta pesquisa, analisou-se a gestão das águas urbanas em Araraquara, observando o cenário atual, o Plano Diretor (ARARAQUARA, 2014a), o Plano Municipal de Saneamento (DAAE, 2012a) e demais documentos correlatos à gestão da água urbana no município (DAAE, 1972, 1984, 1991, 2007, 2012a, 2012b, 2012c, 2018, 2022). O resultado pode ser observado no Quadro 8.

A gestão da água em Araraquara está associada a uma gestão convencional e tem como viés principal o atendimento da demanda e o afastamento das águas pluviais e residuárias das áreas urbanas. Não se verifica um arranjo institucional ou normativo que defina ou oriente as ações para uma Gestão Integrada das Águas Urbanas. Tanto a legislação quanto a gestão municipal estão alinhadas à legislação vigente sobre saneamento e recursos hídricos.

Uma questão atual e sempre presente no planejamento hídrico municipal é a superação da capacidade das principais fontes de abastecimento do município. Em 2022, por exemplo, cerca de 34% do abastecimento urbano ocorreu por fontes superficiais, condição que, até a década de 1970, representava 100% do abastecimento (DAAE, 1972, 1984, 1991, 2022). Apesar do aumento da importância da captação subterrânea para o município, em 2022, a demanda por águas subterrâneas no município chegou a 227% da vazão explorável (CBH-TJ, 2023).

Este processo não gerou, ao longo dos anos, ações efetivas para o controle da demanda no município, pelo contrário, levou ao aumento constante da oferta. Algumas ações importantes adotadas pelo município para a melhoria da gestão dos sistemas hídricos foram a melhoria do controle na operação das redes, a universalização da micromedição e a implantação de um sistema efetivo de cobrança pela prestação de serviços, o que garante a sustentabilidade econômica e financeira dos serviços (DAAE, 1972, 1984, 1991, 2012, 2022; PREFEITURA DE ARARAQUARA, 1967).

Apesar do município não estar inserido em um cenário crítico de escassez hídrica, conforme anteriormente apresentado no Quadro 5, apresenta um cenário preocupante quanto ao estresse e a escassez hídrica e o aumento crescente da demanda pode agravar esta condição, o que reforça a importância de abordagens mais amplas e adaptativas (FERNANDES; STUDART, 2022).

Quadro 8: Caracterização da gestão das águas urbanas no município de Araraquara.

Parâmetro	Tipos de gestão das águas urbanas			
	Gestão das águas urbanas		Gestão Integrada das águas urbanas	Observações
Objetivos	x	Acessibilidade, universalização dos serviços e saúde pública. Controle de enchentes e inundações.	-	Além das metas abordadas pela gestão da água urbana, também se preocupa com a sustentabilidade, adaptação e bem-estar humano.
Escala espacial principal	x	Urbano.	x	Sub-bacia Urbana (dentro dos limites municipais)
Abordagem	x	Tecnocrática e centralizada; Gestão separada de diferentes etapas do ciclo urbano da água; abordagem linear de captação, utilização e descarte rápido de água.	-	Integração da infraestrutura cinza e verde. Busca combinar as abordagens centralizada e participativa e combinar medidas convencionais e alternativas; Combinação de medidas estruturais e não estruturais.
Atores	x	Órgãos municipais, concessionárias de água.	x	Órgãos municipais (incluindo departamento ambiental, transporte, etc.), concessionárias de água, organizações da sociedade civil, setor privado
				A gestão busca assegurar a universalização dos serviços de saneamento e a manutenção da salubridade ambiental (ARARAQUARA, 2014a; 2014b). O fornecimento de água potável e a coleta de esgotos na área urbana, alcançaram patamares de universalização ao final da década de 1980, enquanto o tratamento de esgoto foi implantado ao final da década de 1990 (DAAE, 1972, 1984, 1991, 2007).
				O Sistema de abastecimento de Água (SAA) é organizado em setores, definidos por questões demográficas e físicas do território (DAAE, 2012c, 2022). O Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) e o Sistema de Drenagem Urbana (SDU) são organizados em bacias de esgotamento e drenagem, coincidentes, muitas vezes com as sub-bacias hidrográficas (DAAE, 2007, 2012a, 2012b).
				A abordagem é linear, ou seja, captação, utilização e afastamento. Os componentes das águas urbanas são geridos por órgãos diferentes, de forma fragmentada. O foco principal está na infraestrutura construída (vias, redes, poços, estações de tratamento, etc.). Algumas ações não estruturais foram implantadas ao longo dos anos (DAAE, 2007), no entanto, não foram aprofundadas no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) ²³ atual (DAAE, 2012a, 2012b, 2012c).
				A gestão do SAA e SES é realizada pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto, Autarquia Municipal (ARARAQUARA, 1969). A gestão do SDU é realizada pela Prefeitura Municipal (ARARAQUARA, 2021a). Ainda no âmbito institucional, há o Grupo de Análise e Aprovação de Projetos e Diretrizes Urbanísticas de Araraquara (GRAPROARA), órgão multissetorial responsável pela aplicação da legislação urbana e ambiental do município (ARARAQUARA, 2014a, 2021b). A participação da sociedade civil pode ocorrer por meio dos conselhos municipais (ARARAQUARA, 2017a, b).

(Continuação)

²³ O PMSB (DAAE, 2012a, 2012b, 2012c) está passando por atualização com previsão de conclusão para o ano de 2024.

Parâmetro	Tipos de gestão das águas urbanas				
	Gestão das águas urbanas		Gestão Integrada das águas urbanas	Observações	
Objeto	x	Fornecimento de água potável, coleta, tratamento e disposição de esgoto, gestão de águas pluviais, proteção contra inundações e controle de poluição.	-	Além dos objetos abordadas pela gestão da água urbana, busca sinergias com a gestão/conservação ambiental e com outros atores urbanos (planejamento, habitação, etc.)	A gestão é local, de competência municipal. Suas principais funções são o atendimento da demanda por água potável, a coleta e tratamento dos esgotos sanitários e os serviços de drenagem urbana. Regionalmente, o município participa ativamente do Comitê de Bacias Hidrográficas, integrando desta forma o Sistema Estadual de Recursos Hídricos (SIGRH) (PORTO, 2012).
Usuários	x	Todos os usuários dentro da área urbana.	-	Todos os usuários dentro da área urbana, usuários a montante e jusante e usuários não-urbanos; usuários de uma mesma bacia; demandas ambientais de água (<i>Environment Water Requirements (EWR)</i>).	Usuários urbanos, observado o uso múltiplo da água e a legislação vigente. Não se visualizam ações para integrar a relação entre os usuários de montante e jusante. Também não se visualizam instrumentos que atribuam aos ecossistemas locais a condição de usuários de água.
‘Inputs’ de água	x	Água azul (águas subterrâneas e águas superficiais; importação de água); atendimento irrestrito da demanda.	-	Água azul, incluindo fontes de água locais após reabilitação e águas pluviais; água cinza (águas residuais tratadas); manutenção de um atendimento sustentável da demanda.	O foco é na captação de água azul, as entradas ocorrem pela combinação de captações superficiais e subterrâneas. As saídas são orientadas para o afastamento rápido das águas pluviais e residuárias. O incentivo à utilização de alternativas não convencionais no município é limitado e de pouco efeito prático (ARARAQUARA, 2020).
‘Outputs’ de águas residuais / águas pluviais	x	Afastamento da área urbana; foco na higiene e no controle dos riscos de enchentes/deslizament os urbanos.	-	Reciclagem, reutilização ou infiltração; a adaptação às alterações climáticas é cada vez mais considerada.	Não há ações efetivas na busca por soluções alternativas ou descentralizadas, tais como a captação e o tratamento de águas pluviais, recarga dos aquíferos ou para a reabilitação das águas cinzas e negras.

(X) Aborda (-) Não aborda

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Van Den Brandeler (2020).

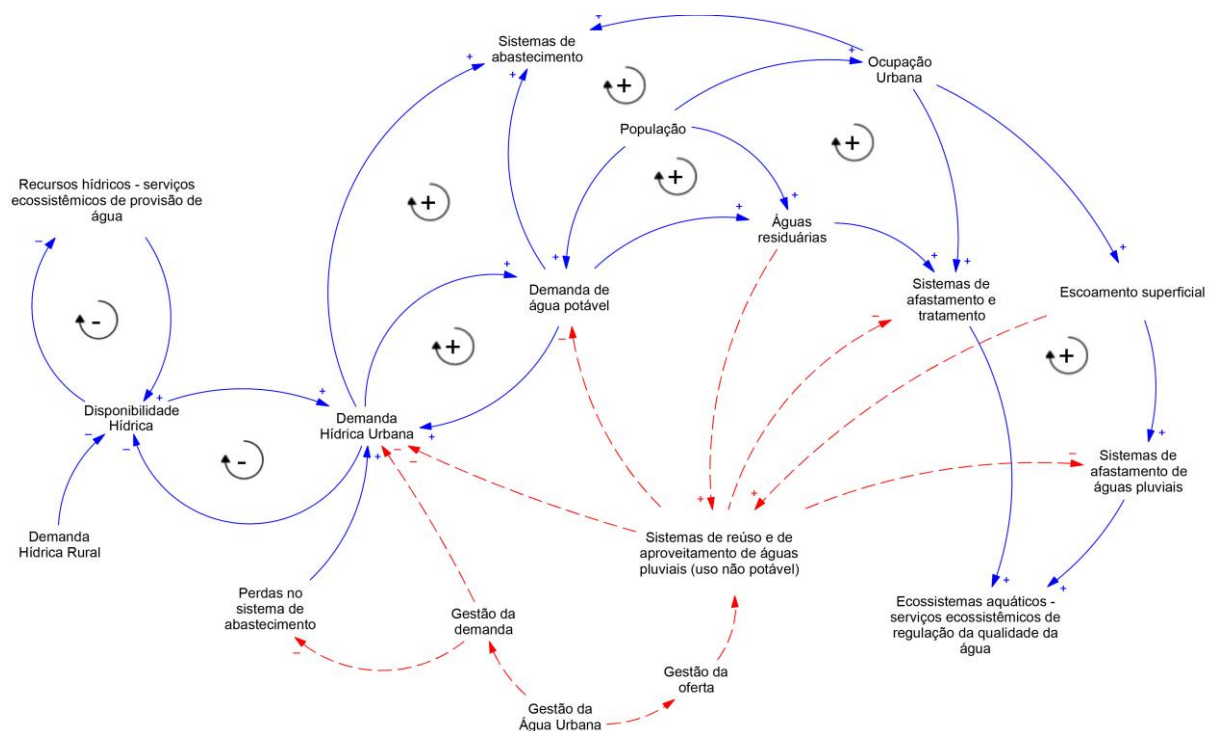
5 RESULTADOS

5.1. MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA A DISPONIBILIDADE HÍDRICA

5.1.1. Etapa de conceitualização

O modelo conceitual apresentado na Figura 24 apresenta o sistema hídrico urbano em Araraquara e permite visualizar as inter-relações entre os recursos hídricos e os sistemas urbanos. No diagrama, são demonstrados os principais componentes do sistema hídrico urbano (setas de traço contínuo em azul) e os elementos de gestão das águas urbanas (setas tracejadas em vermelho).

Figura 24: Diagrama Causal para o modelo de disponibilidade hídrica de Araraquara.



Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

A definição dos componentes do modelo passou pela identificação dos principais arranjos do tipo “oferta x demanda” existentes no município e pela definição de suas interações. Os diagramas que representam os arranjos e as interações entre

os componentes de oferta e demanda podem ser verificados no “Anexo A – Arranjos entre os componentes do modelo dinâmico”.

Os principais componentes do modelo são as entradas e as saídas de água nos sistemas hídricos urbano e rural. As saídas são as demandas requeridas e as entradas são os estoques superficiais e subterrâneos de água. No caso da demanda urbana, também há o componente “capacidade instalada”, que apresenta a capacidade operacional da infraestrutura. Os estoques superficiais são decorrentes da capacidade do território em converter a chuva em escoamento superficial e em reservas subterrâneas. Para as demandas urbanas, o principal componente é o fator demográfico, enquanto que nas áreas rurais, é o uso do solo.

5.1.1.1. Dados de interesse e de calibração do modelo

a) Disponibilidade hídrica superficial

Para a disponibilidade hídrica superficial, Tabela 34, foram considerados os valores obtidos no estudo de regionalização hidrográfica para o Estado de São Paulo (DAEE, 2000). Estes valores são utilizados pela Agência de Águas do Estado de São Paulo (SP-ÁGUAS) como valores de referência para aprovação de outorgas de direitos de uso dos recursos hídricos. Considerando que as captações de água superficiais são pontuais, considerou-se para a finalidade de abastecimento urbano, os valores de referência para a vazão mínima “Q_{95%}” estipulado para cada manancial explorado. Para a vazão de referência para o município, apresentado na Tabela 35, considerou-se a vazão mínima “Q_{95%}” estipulada para o território municipal (CBH-TJ, 2016; SÃO PAULO, 2020a).

Tabela 34: Disponibilidade hídrica superficial em Araraquara.

Área de drenagem	Vazão média específica	Precipitação Anual Média (P _m)		Evapotranspiração anual média		Escoamento Total (Q _{LP}) ²⁴
		(mm/ano)	(m ³ /s)	(mm/ano)	(m ³ /s)	
1.003,63	9,00	1332	42,39	1048	33,36	9,03

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (SÃO PAULO, 2020a), CBH-TJ (2016).

²⁴ Escoamento total: escoamento estimado para os cursos d’água em termos de vazão média de longo período (Q_{LP}).

Tabela 35: Produção hídrica em Araraquara.

Vazão mínima		Rendimento	
$Q_{7,10}$	$Q_{95\%}$	Q_{LP}/P_m^{25}	$Q_{7,10}/Q_{LP}^{26}$
(m ³ /s)	(m ³ /s)	(%)	(%)
3,40	4,50	21	38

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (SÃO PAULO, 2020a), CBH-TJ (2016).

Para a disponibilidade hídrica dos mananciais urbanos de captação superficial, Tabela 36, foi utilizado o método de regionalização hidrográfica do Estado de São Paulo, com uso do software “BcDaee2000” (DAEE, 2000).

Tabela 36: Vazão dos mananciais de abastecimento urbano em Araraquara.

Mananciais	Coordenada	Bacia	$Q_{média}$	$Q_{7,10}$	$Q_{95\%}$
	UTM (m)	km ²	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Ribeirão Anhumas	E 805.334; N 7.590.138	92,31	1,502	0,366	0,545
Ribeirão das Cruzes	E 791.845; N 7.591.371	34,49	0,308	0,127	0,159
Córrego Águas do Paiol	E 788.596; N 7.590.900	18,00	0,160	0,066	0,083

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (DAAE, 2022c; DAEE, 2000).

b) Disponibilidade hídrica subterrânea

A disponibilidade hídrica subterrânea é baseada no parâmetro $Q_{95\%}$ das bacias hidrográficas. Esse parâmetro relaciona-se diretamente com a pluviosidade e as taxas de recarga dos aquíferos superficiais e tem sido adotado para definição das disponibilidades globais (superficial e subterrânea) nos relatórios de situação dos recursos hídricos estaduais. Para as sub-bacias do município de Araraquara, o parâmetro $Q_{95\%}$ varia de 4,24 L/s/km² a 4,88 L/s/km² (DAAE, 2022b).

A disponibilidade hídrica subterrânea estimada para o município de Araraquara é de 1,10 m³/s (CBH-TJ, 2016).

c) Demanda de água

A demanda urbana de água é suprida tanto pelo sistema de abastecimento público quanto por fontes alternativas de abastecimento que não passam pelo sistema

²⁵ Relação entre a vazão Q_{LP} e a precipitação P_m . Estima-se a parte da chuva transformada em escoamento.

²⁶ Relação entre a vazão mínima $Q_{7,10}$ e o escoamento total Q_{LP} .

público, tais como captações superficiais e poços utilizados por grandes consumidores públicos e privados, tais como indústrias, comércios, condomínios residenciais, escola, presídios, hospitais, etc.

Para as demandas supridas pelo sistema de abastecimento público, considerou-se a variação anual do produto da demanda per capita pelo número de habitantes, acrescido do índice de perdas de água do município. Conforme PMSB (DAAE, 2012a) e PDA (DAAE, 2022b), a demanda per capita utilizada para o planejamento dos sistemas público de abastecimento do município representa a média diária por indivíduo dos volumes requeridos para satisfazer os consumos domésticos, comercial, público e industrial em toda a área urbana. Assim, a demanda per capita adotada, nesta pesquisa, para a área urbana foi de 250 l/hab.dia, acrescido do valor correspondente ao índice de perdas de água do município (DAAE, 2022b). Para o índice de perdas, adotou-se o valor referente ao ano de 2020, de 45,8% (SNIS, 2023).

Para as demandas urbanas não atendidas pelo sistema de abastecimento público, considerou-se os valores médios das outorgas vigentes, superficiais e subterrâneas, na área urbana do município, durante o período de 2.015 a 2.020. As outorgas localizadas na área urbana de Araraquara, apresentadas nas Tabelas 37, 38, 39, 40 e 41 e na área rural, demonstradas nas Tabelas 42, 43 e 44, foram obtidas através da análise do cadastro das outorgas disponibilizadas pela ANA (ANA, 2024), por meio do software QGIS.

Tabela 37: Demanda outorgada por tipo de captação na área urbana de Araraquara.

Ano	Demanda outorgada		
	Total	Superficial	Subterrânea
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	1,581	0,347	1,234
2016	1,654	0,347	1,307
2017	1,880	0,347	1,533
2018	1,866	0,308	1,557
2019	1,895	0,308	1,587
2020	1,733	0,308	1,424

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 38: Demanda subterrânea outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.

Ano	Abastecimento Público	Consumo Humano	Industria	Irrigação	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	0,825	0,073	0,085	0,124	0,127
2016	0,825	0,117	0,085	0,139	0,141
2017	0,825	0,198	0,224	0,139	0,146
2018	0,825	0,193	0,233	0,140	0,166
2019	0,826	0,183	0,234	0,173	0,171
2020	0,826	0,144	0,234	0,052	0,168

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 39: Demanda superficial outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.

Ano	Abastecimento Público	Consumo Humano	Industria	Irrigação	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	0,249	0,000	0,039	0,045	0,015
2016	0,249	0,000	0,039	0,045	0,015
2017	0,249	0,000	0,039	0,045	0,015
2018	0,249	0,000	0,000	0,045	0,015
2019	0,249	0,000	0,000	0,045	0,015
2020	0,249	0,000	0,000	0,045	0,015

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 40: Demanda total outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.

Ano	Abastecimento Público	Consumo Humano	Industria	Irrigação	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	1,074	0,073	0,124	0,169	0,141
2016	1,074	0,117	0,124	0,184	0,155
2017	1,074	0,198	0,263	0,184	0,161
2018	1,074	0,193	0,233	0,185	0,180
2019	1,075	0,183	0,234	0,217	0,186
2020	1,075	0,144	0,234	0,097	0,183

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 41: Demanda total outorgada na área urbana de Araraquara, por tipo de uso.

Ano	Abastecimento Público	Consumo Humano	Industria	Irrigação	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	0,221	0,017	0,228	0,937	0,001
2016	0,221	0,025	0,229	0,942	0,001
2017	0,221	0,031	0,229	0,945	0,044
2018	0,221	0,031	0,246	0,206	0,050
2019	0,220	0,027	0,245	0,216	0,061
2020	0,221	0,019	0,245	0,195	0,061

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 42: Demanda outorgada por tipo de captação na área rural de Araraquara.

Ano	Demanda outorgada		
	Total	Superficial	Subterrânea
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	1,403	1,187	0,216
2016	1,418	1,187	0,231
2017	1,470	1,187	0,283
2018	0,754	0,448	0,306
2019	0,769	0,456	0,313
2020	0,742	0,446	0,295

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 43: Demanda subterrânea outorgada na área rural de Araraquara, por tipo de uso.

Ano	Abastecimento Público	Consumo Humano	Industria	Irrigação	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	0,020	0,014	0,092	0,089	0,001
2016	0,020	0,022	0,093	0,094	0,001
2017	0,020	0,028	0,093	0,098	0,044
2018	0,020	0,028	0,110	0,098	0,050
2019	0,019	0,027	0,109	0,098	0,060
2020	0,020	0,019	0,109	0,086	0,060

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Tabela 44: Demanda superficial outorgada na área rural de Araraquara, por tipo de uso.

Ano	Abastecimento Público	Consumo Humano	Industria	Irrigação	Outros usos
	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
2015	0,201	0,003	0,136	0,848	0,000
2016	0,201	0,003	0,136	0,848	0,000
2017	0,201	0,003	0,136	0,848	0,000
2018	0,201	0,003	0,136	0,109	0,000
2019	0,201	0,000	0,136	0,118	0,001
2020	0,201	0,000	0,136	0,109	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024).

Para as demandas rurais de irrigação e dessedentação animal, utilizou-se como base os valores estimados para uso consuntivo em Araraquara (ANA, 2022). No entanto, a variação das demandas de irrigação e de dessedentação animal, conforme a abordagem proposta nesta pesquisa, está relacionada ao uso do solo. Assim, não se utilizou, como valor de referência, o resultado da análise das tendências ou da projeção das demandas, uma vez que as demandas se tornariam variáveis independentes quanto ao uso do solo. Para se obter uma relação de dependência

entre as variáveis “demanda” e “uso do solo”, optou-se por adotar coeficientes de demanda por área, expressos em “m³/s.km²”.

Para determinar os coeficientes para a irrigação e a dessedentação animal, utilizou-se o quociente da relação entre as demandas anuais de água, estimada para o período de 2.015 a 2.020 (ANA, 2022) e as áreas totais com usos relacionadas à demanda, obtidas por meio das informações de uso e ocupação de solo, no município, disponibilizados pela iniciativa (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).

Os coeficientes, Tabela 45, foram obtidos a partir da verificação dos valores médios da relação “demandas anuais de água” por “áreas de uso”, estimadas para o período de 2.015 a 2.020 (ANA, 2022b; MAPBIOMAS PROJECT, 2023). O coeficiente se refere ao valor da mediana dos resultados, uma vez que apresentou o melhor ajuste pela soma da diferença dos mínimos quadrados (BURDEN; FAIRES; BURDEN, 2015).

Tabela 45: Coeficiente de irrigação e de dessedentação animal para uso rural.

Ano	Agricultura irrigada			Dessedentação animal		
	Áreas	Retiradas	Coeficiente	Áreas	Retiradas	Coeficiente
	(a)	(b)	(b / a)	(c)	(d)	(c / d)
	km ²	m ³ /s	m ³ /s.km ²	km ²	m ³ /s	m ³ /s.km ²
2015	714,81	0,11751920	0,00016441	38,46	0,00877751	0,00022822
2016	714,34	0,11943180	0,00016719	37,62	0,00947461	0,00025185
2017	713,75	0,10336735	0,00014482	34,76	0,00920798	0,00026490
2018	714,94	0,09353695	0,00013083	31,64	0,00891413	0,00028174
2019	714,72	0,06593772	0,00009226	28,47	0,00878297	0,00030850
2020	717,74	0,09290591	0,00012944	26,57	0,00872014	0,00032819
Média			0,00013816			0,00027723
Mediana			0,00013783			0,00027332

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA (2024) e MapBiomias Project (2023).

Os valores adotados foram: 0,00013783 m³/s.km², para o coeficiente de irrigação e 0,00027332 m³/s.km², para o coeficiente de dessedentação animal.

Para o consumo humano rural, aplicou-se ao contingente populacional o consumo per capita estimado em 125 l/hab.dia (ANA, 2019).

d) Sistemas urbanos

Para os valores de entrada, ou parâmetros, dos sistemas urbanos de abastecimento de água (SAA) e de esgotamento sanitários (SES), foram adotados os

dados de funcionamento dos sistemas para o ano de 2020, obtidos no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) (DAAE, 2012a), Plano Diretor da Água (PDA) (DAAE, 2022b) e no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (SNIS, 2023). Os principais parâmetros utilizados correspondem à capacidade operacional dos sistemas de captação superficial, tratamento de água, captação subterrânea e coleta e tratamento de esgoto, apresentados nas Tabelas 46, 47, 48 e 49.

Tabela 46: Captações superficiais de água em Araraquara, capacidade instalada em 2020.

Captações superfinais	Vazão outorgada	Capacidade nominal	Vazão média em 2020
	m³/h	m³/h	m³/h
Ribeirão Anhumas	720,00	575,00	399,10
Ribeirão das Cruzes	608,40	1542,8*	823,00
Córrego Águas do Paiol	288,00	288,00	193,19

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2022a, 2022c).

*considerando o funcionamento de 2 bombas simultâneas. O local dispõe de 4 conjuntos motobombas.

Tabela 47: Estações de tratamento de água e esgoto, capacidade instalada em 2020.

Localização	Estações de tratamento	Capacidade nominal
		m³/s
Área urbana (sede municipal)	ETA Fonte	0,5000
	ETA Paiol	0,1600
	ETE Araraquara	0,8000
Área urbana (distrito de Bueno de Andrada)	ETE Bueno de Andrada	0,0015
Área rural (Assentamento Bela Vista)	ETE Bela Vista	0,0012

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2012b, 2022c).

Tabela 48: Captações subterrâneas de água em Araraquara, capacidade instalada em 2020.

Localização	Em operação no ano de 2020	
	Quantidade	Vazão média (m³/s)
Área urbana (sede municipal)	23	1,143
Área urbana (distrito de Bueno de Andrada)	1	0,004
Área rural	4	0,019
Total	28	1,165

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2012b, 2022c).

Tabela 49: Produção de água em Araraquara.

Ano	Volume de água produzido			Vazão média		
	Total	Superficial	Subterrânea	Total	Superficial	Subterrânea
	m³	m³	m³	m³/s	m³/s	m³/s
2015	32.799.530	10.285.940	22.513.590	1,040	0,326	0,714
2016	34.991.010	12.459.510	22.531.500	1,110	0,395	0,714
2017	35.823.100	13.039.030	22.784.070	1,136	0,413	0,722
2018	33.814.360	12.354.710	21.459.650	1,072	0,392	0,680
2019	33.965.470	12.937.930	21.027.540	1,077	0,410	0,667
2020	35.200.130	12.011.940	23.188.190	1,116	0,381	0,735

Fonte: Elaborado pelo autor com base em SNIS (2023).

e) Uso e da ocupação do solo

Para a evolução do uso e da ocupação do solo, foram utilizados os dados disponibilizados pela iniciativa MapBiomas Brasil (MAPBIOMAS PROJECT, 2023). A iniciativa dispõe de uma plataforma web, dados e imagens de satélites tratadas para identificar e classificar o uso do solo por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Os dados disponibilizados apresentam uma série histórica da ocupação do solo no Brasil, de 1985 a 2023, e permitem o recorte das informações por município.

Para a aplicação no modelo, foram analisadas as variações no uso e na cobertura do solo do município de Araraquara para o intervalo entre os anos 2000 a 2020, conforme apresentado na Tabela 50. (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).

Tabela 50: Variação na ocupação do solo em Araraquara.

Tipo	Variação global 2000-2020 (%)	Variação média anual (%a.a.)
Formações naturais	1,625%	0,081%
Agropecuária	-2,725%	-0,136%
Área urbanizada	52,310%	2,615%
Outras áreas não vegetadas	4,306%	0,215%
Corpo D'água	-41,739%	-2,087%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em MapBiomas Project (2023).

A finalidade foi verificar a dinâmica da ocupação e identificar os seus componentes. Os principais tipos de uso de solo foram classificados como formações naturais, áreas não vegetadas e áreas para uso agropecuário, apresentado na Tabela 51.

Verificou-se uma tendência de variação linear entre os tipos de uso do solo e, dado que o limite da área ocupada é definido pelos limites territoriais do município, há um cenário de alteração e sucessão do tipo de uso do solo em diversos locais no município. Para o período analisado, verifica-se o aumento da expansão urbana e do uso da terra para a agricultura, ao passo que houve a diminuição das áreas destinadas ao uso agropecuário. Esta relação ocorreu pela substituição de áreas de pastagens e das áreas classificadas como “mosaicos de cultura” por áreas de agricultura intensiva.

Tabela 51: Variação na ocupação do solo em Araraquara por tipo de uso.

Tipo	Subtipo	Variação global 2000-2020 (%)	Variação média anual (%a.a.)
Formações naturais	Florestais	-1,69%	-0,08%
	Não florestal	27,00%	1,35%
Agropecuária	Pastagem	-64,65%	-3,23%
	Agricultura	27,97%	1,40%
	Silvicultura	-0,52%	-0,03%
	Mosaico de Usos	-26,28%	-1,31%
Áreas não vegetada	Área urbanizada	52,31%	2,62%
	Outras áreas não vegetadas	4,31%	0,22%
	Corpo d`água	-2,09%	-2,09%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em MapBiomass Project (2023).

A classificação apresentada na Tabela 51 permitiu relacionar o uso do solo com a classificação utilizada para a quantificação do uso consuntivo de água no município (ANA, 2019).

f) Evolução da ocupação urbana

A área urbana de Araraquara possui 155,68 km² (ARARAQUARA, 2014a). As zonas isodensas (DAAE, 2022b) projetam uma área total de 111,33 km², o que corresponde a uma ocupação de 71,51% da área urbana e a um aumento de 38,87% da área urbanizada, que possui cerca de 80,17 km² (IBGE, 2022). Em 2020, conforme o PDA (DAAE, 2022b), a estimativa da ocupação média das zonas isodensas foi de 52,24%, ou seja, uma ocupação efetiva de 58,16km². Dado o valor estimado para a área urbanizada, de 80,17 km² (IBGE, 2022), se obtém que cerca de 22 km², ou 27,45% da área urbanizada, é composta de vazios urbanos ou áreas indisponíveis para a ocupação.

Para as estimativas da ocupação urbana no modelo, Tabela 52, foi adotada uma taxa de crescimento linear, estabelecida a partir da evolução da mancha urbana do município. Para a definição da taxa de crescimento a ser aplicada, verificou-se a taxa média de variação anual da ocupação urbana entre os anos 2000 e 2040. Para os anos de 2000 a 2020, foram considerados dados empíricos apresentados por Pierini (2020) e DAAE (2022b). Para os anos de 2025 a 2040, foram utilizados os valores estimados pelo Plano Diretor da Água (DAAE, 2022b), estimados a partir da projeção do crescimento populacional sobre as zonas isodensas (DAAE, 2022b).

Tabela 52: Evolução da ocupação urbana em Araraquara.

Ano	Área da ocupação urbana (km²)			
	Pierini (2020)	MapBiomias (2023)	PDA (DAAE, 2022b)	Valor adotado
2000	51,59	42,21	-	45,08
2010	55,67	52,42	-	48,65
2015	58,16	58,42	-	50,82
2020	-	64,29	52,48	52,48
2025	-	-	58,21	58,21
2030	-	-	64,76	64,76
2040	-	-	78,42	78,42

Fonte: Elaborado pelo autor com base em MapBiomias Project (2023) e Araraquara (2014a).

O valor definido para a taxa de crescimento urbano foi de 0,01275%a.a. O ajuste da taxa foi realizado com a ferramenta Solver, do software Excel, aplicado ao método dos mínimos quadrados.

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (BURDEN; FAIRES; BURDEN, 2015).

g) Estudo populacional

Para o estudo populacional, Tabela 53 e Figura 25, aplicou-se o método da Taxa de Decrescimento Populacional (TDC). A TDC é um método matemático, baseado na premissa de que, enquanto a cidade cresce, a taxa de crescimento torna-se menor e a população tende a um valor de saturação (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 1999; VON

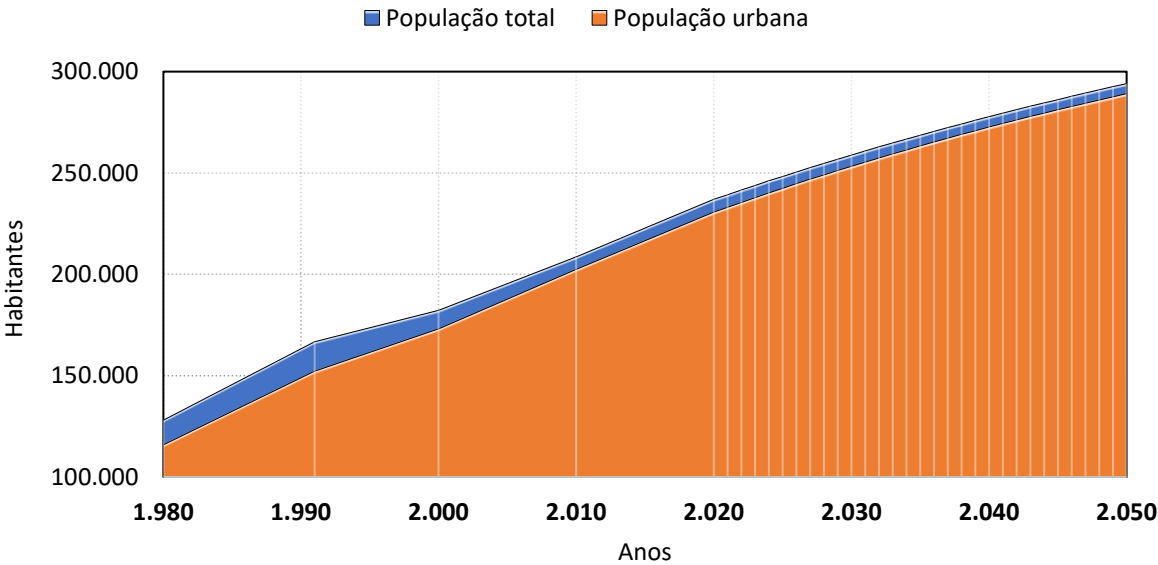
SPERLING, 2005). A metodologia de cálculo da estimativa populacional pode ser verificada no “Anexo B – Estimativa populacional”.

Tabela 53: Projeção da população para Araraquara – 2020 a 2050.

Ano	População		Ano	População	
	Municipal	Urbana		Municipal	Urbana
2020	236.959	230.670	2036	270.524	265.275
2021	239.295	233.099	2037	272.371	267.160
2022	241.598	235.490	2038	274.192	269.016
2023	243.867	237.843	2039	275.986	270.843
2024	246.103	240.159	2040	277.754	272.642
2025	248.307	242.439	2041	279.496	274.412
2026	250.478	244.683	2042	281.213	276.154
2027	252.617	246.892	2043	282.904	277.869
2028	254.726	249.066	2044	284.571	279.557
2029	256.804	251.206	2045	286.214	281.218
2030	258.851	253.312	2046	287.833	282.853
2031	260.869	255.386	2047	289.428	284.463
2032	262.857	257.427	2048	291.000	286.048
2033	264.816	259.436	2049	292.549	287.607
2034	266.747	261.413	2050	294.075	289.142
2035	268.649	263.359	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Von Sperling (2005), IBGE (2001, 2010) e SNIS (2023).

Figura 25: Estimativa de crescimento populacional.



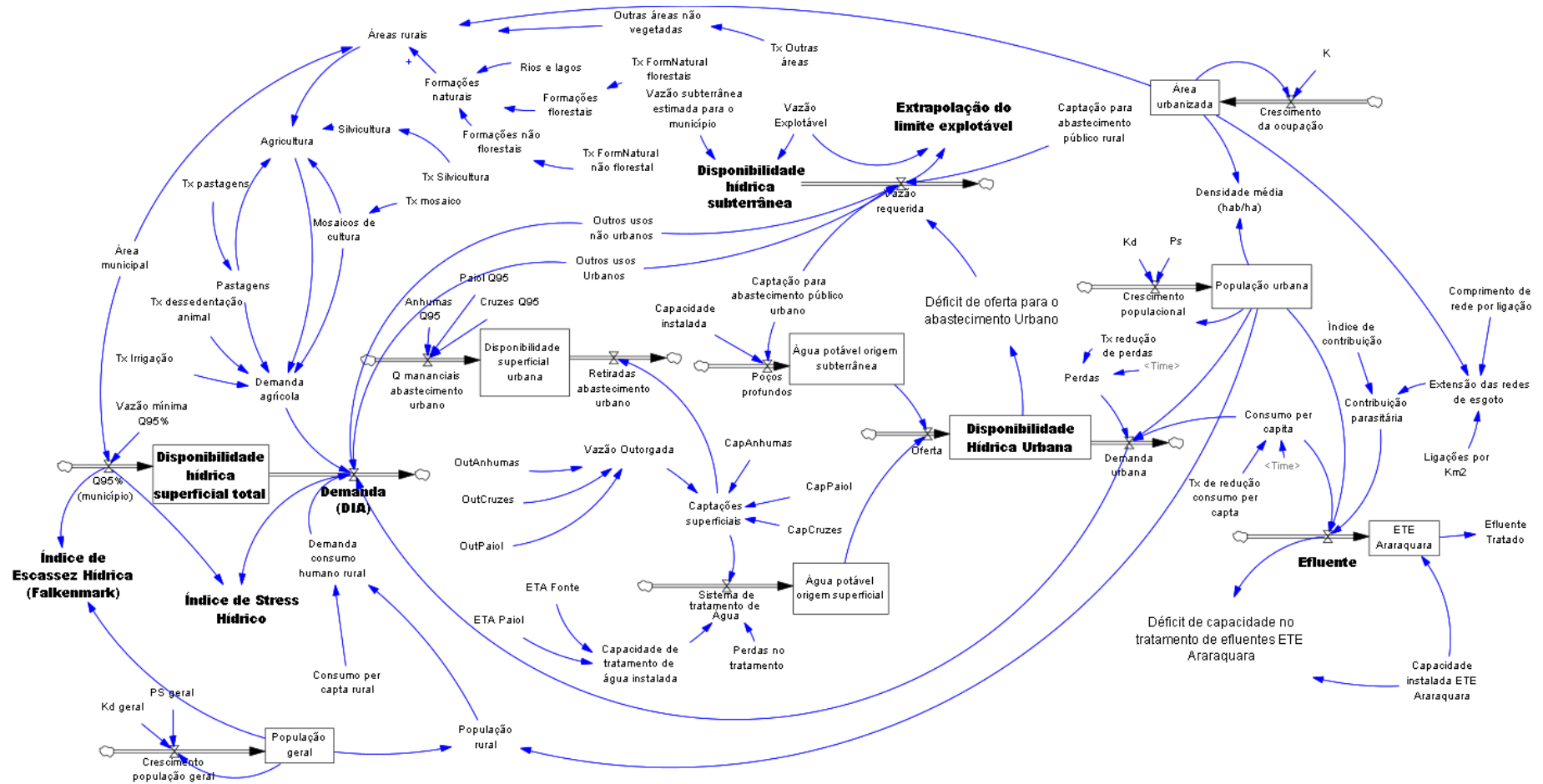
Fonte: Elaborado pelo autor com base em (IBGE, 1983, 1992, 2001, 2010, 2023) e SNIS (2023).

5.1.2. Etapa de formalização

A Figura 26 , apresenta o diagrama de estoques e fluxos para o modelo da disponibilidade hídrica em Araraquara, demonstra o sistema de abastecimento urbano, composto pelos mananciais urbanos, captações e usuários urbanos. Também apresenta o sistema hídrico municipal, composto pelos estoques de recursos hídricos superficiais e subterrâneos e pelos usuários. O sistema de abastecimento urbano atua como um subsistema dentro do sistema hídrico, que compete pelos recursos hídricos com outros usuários. Por questões metodológicas, os usuários são agrupados em categorias e classificados conforme o uso da água. Os usos para irrigação e dessedentação animal, foram agrupados na categoria “demanda agrícola”, os usuários domésticos rurais foram classificados como “consumo humano rural”. Os usuários urbanos residenciais, industriais, públicos e comerciais foram agrupados na categoria “demanda urbana”. O modelo dinâmico possibilita verificar a variação temporal da demanda de água em função da variação da população e do uso do solo.

A descrição dos parâmetros e das variáveis aplicadas ao modelo podem ser verificadas no “ANEXO C: Parâmetros e variáveis do modelo dinâmico”.

Figura 26: Diagrama de Estoques e Fluxos do modelo de disponibilidade hídrica em Araraquara.



Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

5.1.3. Etapa de avaliação e exploração

Para a construção dos cenários, buscou-se situações factíveis para o planejamento do uso dos recursos hídricos no município. Verifica-se que há maior governabilidade municipal sobre o uso urbano dos recursos hídricos que o rural e que a gestão urbana da água tende a refletir em todo o sistema hídrico municipal. No entanto, apesar da maior governabilidade, a capacidade em atuar sobre o aumento da demanda é limitada, uma vez que o principal fator gerador é o aumento populacional. Outros fatores que implicam no aumento da demanda são de maior controle para o município, como, por exemplo, a instalação de novas indústrias e a expansão urbana.

Para os cenários propostos nesta pesquisa consideraram-se intervenções no sistema de abastecimento urbano que não implicam em limitações demográficas ou na restrição de novas demandas, mas que são capazes de responder de forma positiva para redução da demanda requerida, tais como, intervenções no controle do índice de perdas e a redução da demanda per capita. Desta forma, foram simulados três cenários, sendo um que considera a continuidade do atendimento atual da demanda e dois cenários que adotam ações para a redução da demanda requerida, conforme apresentado no Quadro 9.

Quadro 9: Cenários de simulação dinâmica.

Cenário	Descrição dos cenários
Cenário 01	Sem mudanças no padrão de atendimento da demanda urbana, mantêm-se inalterados todos os índices praticados em 2020.
Cenário 02	Redução do índice de perdas em 1,5% ao ano, de 2025 a 2050, mantêm-se inalterados todos os outros índices praticados em 2020.
Cenário 03	Redução do índice de perdas em 1,5% ao ano, de 2025 a 2050, redução de 0,50% ao ano, de 2025 a 2050, no consumo per capita de água. Mantêm-se inalterados todos os outros índices praticados em 2020.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os cenários simulados, foram mantidos iguais a variação da população e do uso do solo, bem como os parâmetros de configuração do modelo. O intervalo de tempo da simulação é de 30 anos, entre os anos de 2020 a 2050, o passo de tempo é anual, ou seja, “1” e o método de integração dos dados no software Vensim PLE é o método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

6 DISCUSSÕES

Os resultados da modelagem foram agrupados em três grupos principais, conforme o comportamento dos componentes no modelo: (a) componentes contantes no tempo e nos cenários; (b) componentes variáveis no tempo e constantes nos cenários, e; (c) componentes variáveis no tempo e nos cenários.

Os componentes constantes no tempo e nos cenários são aqueles que não apresentam variação no tempo e cujos resultados permanecem inalterados com a mudança dos cenários. Estão inclusos neste grupo os dados de oferta de água, uma vez que estão vinculados às condições naturais do território. Também são constantes os dados que indicam a capacidade instalada dos sistemas urbanos, pois indicam a condição de funcionamento no início da simulação dinâmica, ou seja, o ano de 2020. Outros valores constantes no modelo são as taxas de variação aplicadas para determinar o comportamento de outras variáveis, tais como as taxas de variação no uso do solo, de demanda para irrigação e dessedentação animal, os coeficientes aplicados sobre a variação populacional e as demandas de água baseadas nas médias das outorgas, tratadas no modelo como demandas pontuais e, em média, estáveis ao longo do tempo.

Os dados de entradas e valores fixados para os componentes constantes no tempo e nos cenários foram determinados a partir da análise dos dados apresentados no item "5.1.1.1 *Dados de interesse e de calibração do modelo*" e também podem ser verificados no "ANEXO C: *Parâmetros e variáveis do modelo dinâmico*", que apresentam as relações matemáticas entre os componentes do modelo.

Os componentes variáveis no tempo, mas constantes nos cenários, são aqueles que, apesar de apresentarem comportamento dinâmico, não são afetados pelas mudanças aplicadas aos cenários. São os componentes de uso e ocupação do solo, tais como as áreas urbanizadas, as áreas rurais e as formações naturais. Estes componentes são alterados pela aplicação de taxas de variação que representam as tendências verificadas para o item, a partir de sua variação histórica, ou em função da interação com outros componentes variáveis. Também há demandas de uso da água que variam no tempo, mas são constantes nos cenários, tais como as demandas agrícolas.

Os componentes variáveis no tempo e nos cenários são aqueles cujos resultados, além da variação temporal, são afetados pelas mudanças aplicadas aos cenários. Entre estes componentes estão as demandas urbanas, a disponibilidade hídrica urbana e total, a disponibilidade hídrica subterrânea e o índice de estresse hídrico.

6.1. VARIAÇÃO NA POPULAÇÃO E NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O uso e a ocupação do solo são fatores de grande importância para a demanda hídrica no modelo. A Tabela 54 e as Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 apresentam as variações estimadas para a mudança no uso do solo do município durante o período simulado. Esta composição é importante para a definição das demandas rurais, em especial às demandas para irrigação e dessedentação animal.

As formações naturais, Figura 29, compreendem as áreas de cobertura vegetal e corpos d'águas. As áreas não vegetadas, Figura 30, são compostas pelas áreas urbanizadas e fragmentos de áreas não urbanas. As áreas destinadas ao uso agropecuário, Figura 31, são compostas pelas áreas classificadas como pastagens, mosaico de usos, agricultura e silvicultura. Adotou-se como condição inicial para cada tipo de uso de solo os valores observados para o ano de 2020 e para a simulação aplicou-se a taxa de variação média anual apresentada na Tabela 50. Observa-se que há uma relação direta entre o aumento da área urbana, a manutenção e ampliação das áreas naturais e a diminuição das áreas destinadas para fins agropecuários.

Tabela 54: Estimativas de variação no uso e ocupação do solo em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Área municipal	Áreas urbanizadas	Formações naturais	Áreas não vegetadas	Áreas rurais
	Km ²	Km ²	Km ²	Km ²	Km ²
2.020	1.003,63	52,48	126,43	2,18	822,54
2.025	1.003,63	55,94	127,23	2,19	818,27
2.030	1.003,63	59,62	128,13	2,20	813,68
2.035	1.003,63	63,54	129,12	2,21	808,76
2.040	1.003,63	67,73	130,21	2,22	803,47
2.045	1.003,63	72,19	131,41	2,23	797,80
2.050	1.003,63	76,94	132,72	2,24	791,72

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Para a variação da ocupação urbana, Figura 27, foi adotada uma taxa de crescimento linear de 0,01275 %a.a., estabelecida a partir da evolução da mancha urbana do município, conforme apresentado na Tabela 52.

Figura 27: Estimativa da variação na ocupação das áreas classificadas como "áreas urbanizadas" em Araraquara, de 2020 a 2050.

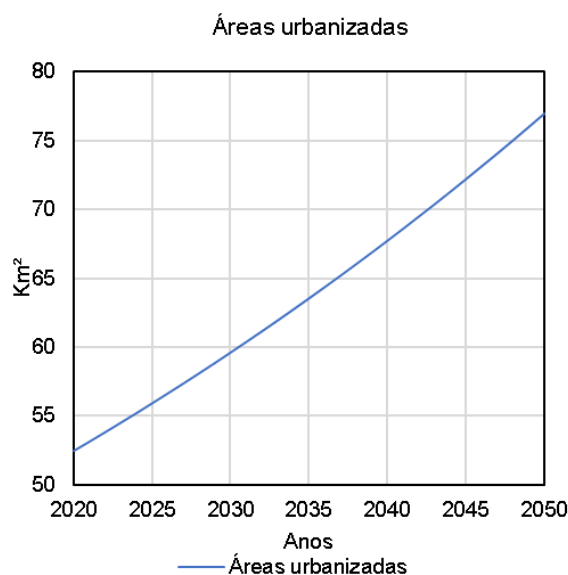


Figura 28: Estimativa da variação na ocupação das áreas classificadas como "áreas rurais" em Araraquara, de 2020 a 2050.

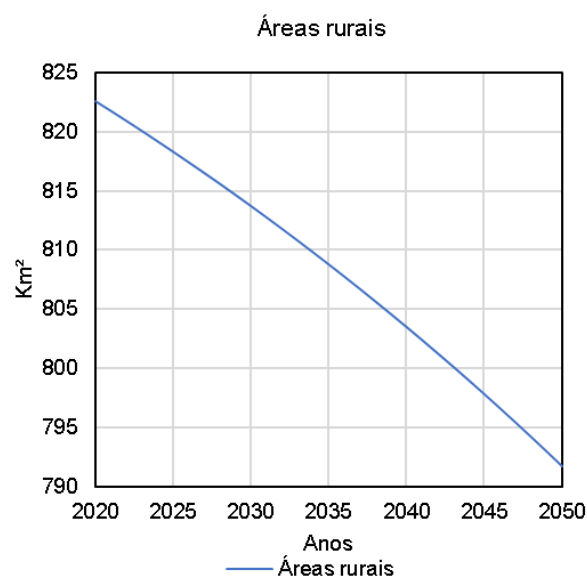


Figura 29: Estimativa da variação na quantidade de áreas classificadas como "áreas de formações naturais" em Araraquara, de 2020 a 2050.

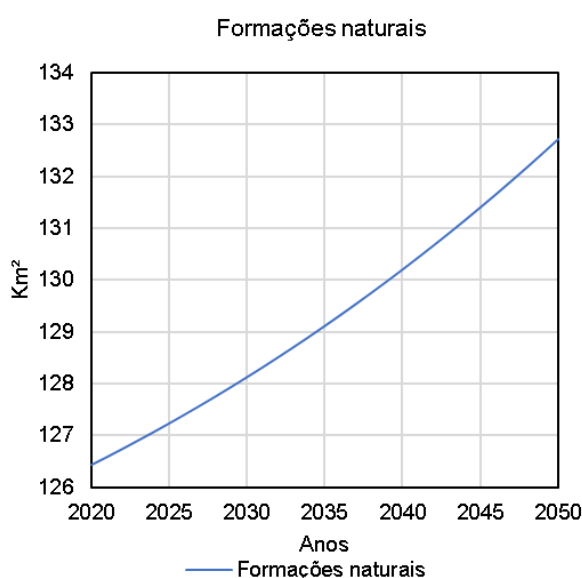
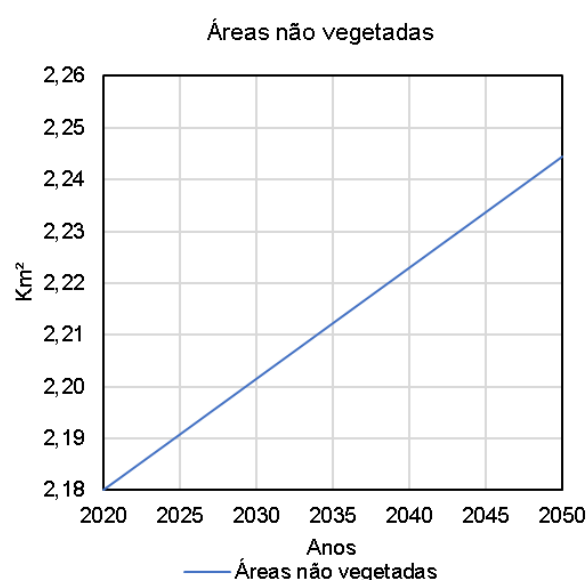


Figura 30: Estimativa da variação na quantidade de áreas classificadas como "áreas não vegetadas" em Araraquara, de 2020 a 2050.

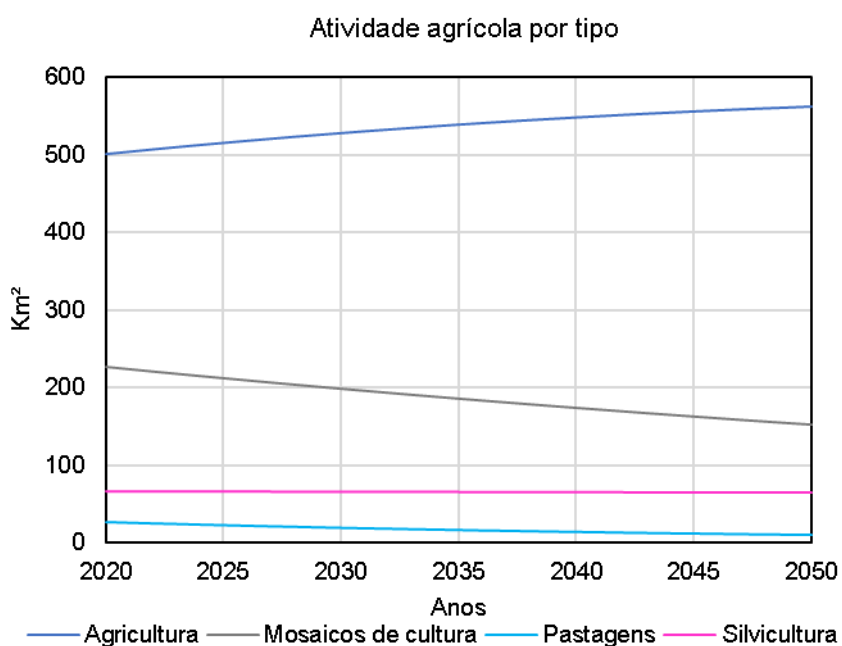


Fonte: Elaborado pelo autor.

A variação na área urbanizada apresentou o comportamento esperado para o modelo. Dado que não atingiu a totalidade das áreas previstas pelos estudos das áreas isodensas (DAAE, 2012a, 2022c) e que a simulação não atingiu a população de saturação. Manteve-se, portanto, um patamar de ocupação compatível com a variação da ocupação urbana do município. Este comportamento é reforçado pela variável “densidade média”, que verifica a quantidade de habitantes por hectare. A densidade média passou de 44,04 hab./ha em 2020 para 37,63 hab./ha em 2050, indicando que a ocupação atingida não criou uma área de ocupação densa.

As variações observadas nas áreas rurais, Figura 28, áreas de formação natural, Figura 29 e áreas não vegetadas, Figura 30, apresentam o comportamento esperado em função das tendências de variação observadas nestas áreas.

Figura 31: Estimativa da variação na composição de uso, por tipo de atividade agrícola, das áreas destinadas uso agropecuário em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As variações observadas na Figura 31, apresentam a relação entre as áreas de uso agrícola, demonstrando uma estabilidade nas áreas destinadas à silvicultura, o aumento das áreas destinadas à agricultura irrigada e a diminuição das áreas destinadas às pastagens e ao “mosaico de culturas”, conforme tendências observadas no levantamento da iniciativa MapBiomias (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).

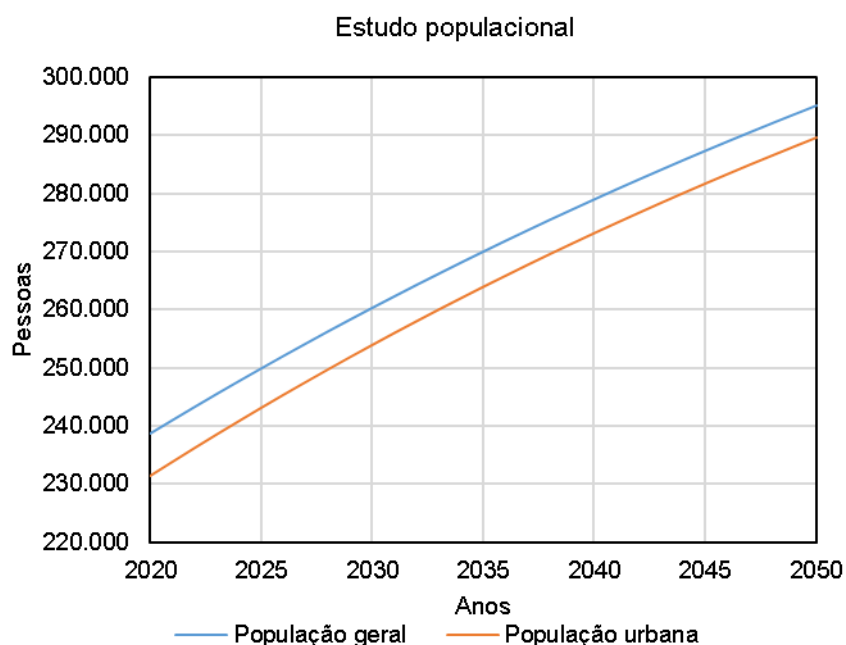
Para as estimativas de crescimento populacional, Tabela 55 e Figura 32, aplicou-se no Vensim PLE a forma numérica do método da Taxa de Decrescimento Populacional (TDC) (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 1999; VON SPERLING, 2005). A variação populacional é fator condicionante das demandas urbanas, influencia as demandas rurais e impacta diretamente nos índices de escassez e estresse hídrico. O comportamento da população seguiu o mesmo padrão observado no estudo populacional, Figura 25.

Tabela 55: Estimativa da variação da população residente em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	População geral	População urbana
2020	238.662	231.321
2025	249.889	243.040
2030	260.322	253.868
2035	270.016	263.872
2040	279.024	273.116
2045	287.394	281.656
2050	295.171	289.547

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 32: Estimativa da variação da população residente em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

6.2. VARIAÇÃO NA DEMANDA E NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

As variações nas demandas e na disponibilidade hídrica ocorrem em função da variação do uso do solo ou da população. As variações nos cenários ocorrem pelas alterações nos parâmetros “índice de perdas” e “consumo per capita”.

A demanda agrícola, Tabela 56 e Figura 33, apresenta variação apenas no tempo, uma vez que não é influenciada pelas variações urbanas. Estima-se uma queda de 6,48% na demanda agrícola entre o período de 2020 a 2050. Fato que acompanha a tendência de queda na quantidade de áreas rurais, embora possa haver um aumento nas áreas destinadas à agricultura irrigada. Este comportamento está coerente com as estimativas para uso consuntivo, projetadas até o ano de 2040 pela ANA (ANA, 2019, 2022b).

A demanda urbana, Tabela 57 e Figura 34, respondeu de forma satisfatória às variações dos cenários. O cenário 01 apresentou um aumento de 25,20% na estimativa da demanda entre os anos de 2020 e 2050. No cenário 02, entre os anos de 2020 e 2050, o aumento da demanda caiu para 12,40%. No cenário 03, apresenta-se, em 2050, uma redução de 1,33% com relação à demanda registrada em 2020, ou seja, há uma reversão na tendência de aumento da demanda hídrica quando consideradas as alterações do cenário 03.

A variação na demanda urbana reflete em outros componentes do modelo que se relacionam com ela, tais como as disponibilidades hídricas, a geração de efluente e o índice de estresse hídrico.

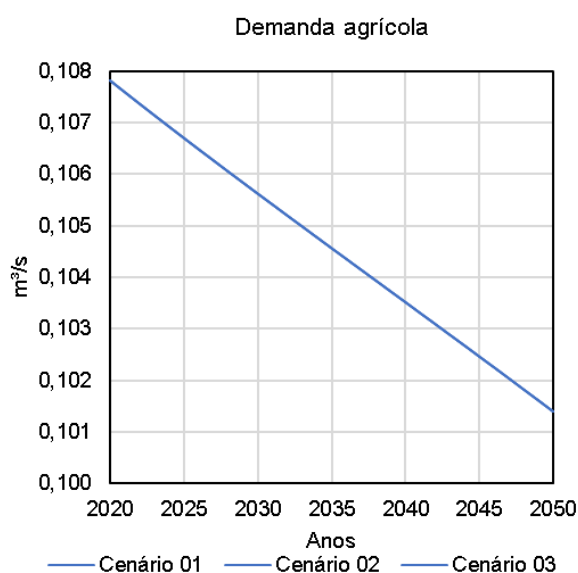
As demandas totais do município são verificadas por meio da Demanda DIA (Doméstica, industrial e agrícola), Tabela 58 e Figura 35, e é composta pela somatória da demanda doméstica, urbana e rural, agrícola e industrial. Para a demanda DIA, entre os anos de 2020 e 2050, verifica-se, para o cenário 01, um aumento de 12,07% na demanda. Para o cenário 02, o aumento da demanda cai para 5,70% e, para o cenário 03, o aumento da demanda cai para 0,86%. As ações tomadas no âmbito urbano apresentam forte influência sobre as demandas totais do município. No caso das intervenções propostas nos cenários 02 e 03, percebe-se a melhoria da disponibilidade hídrica no município, com relação aos resultados do cenário 01 a longo e médio prazo.

Tabela 56: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica agrícola em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/s	m³/s	m³/s
2020	0,108	0,108	0,108
2025	0,107	0,107	0,107
2030	0,106	0,106	0,106
2035	0,105	0,105	0,105
2040	0,104	0,104	0,104
2045	0,102	0,102	0,102
2050	0,101	0,101	0,101

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 33: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica agrícola em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 57: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/s	m³/s	m³/s
2020	0,976	0,976	0,976
2025	1,025	1,021	1,017
2030	1,071	1,046	1,016
2035	1,113	1,065	1,010
2040	1,152	1,080	0,999
2045	1,188	1,090	0,983
2050	1,222	1,097	0,963

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Tabela 58: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda "DIA" em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/s	m³/s	m³/s
2020	1,963	1,963	1,963
2025	2,011	2,007	2,002
2030	2,055	2,029	2,000
2035	2,095	2,047	1,992
2040	2,133	2,061	1,979
2045	2,168	2,070	1,962
2050	2,200	2,075	1,941

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 34: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.

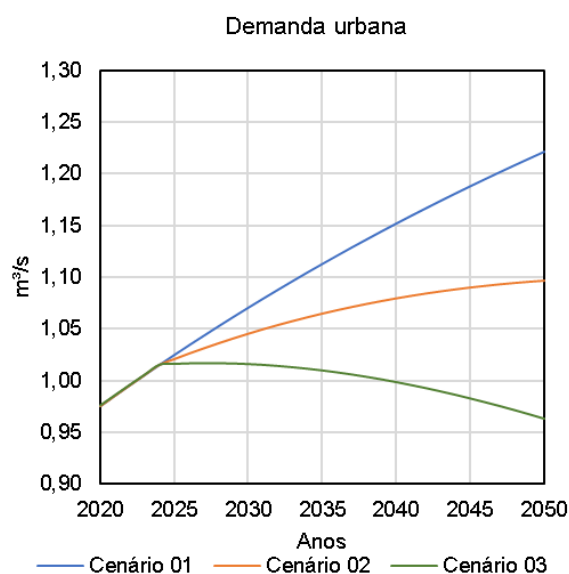
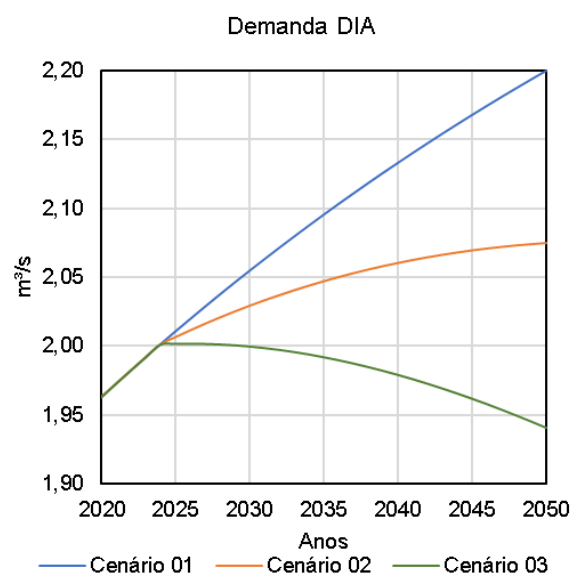


Figura 35: Comparação entre os cenários para a estimativa de variação na demanda "DIA" em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a variação observada na disponibilidade hídrica total do município, Tabela 59 e Figura 36, entre os cenários 01 e 03, estima-se uma melhoria de 11,35% no valor observado, ou seja, uma redução aproximada de 0,258 m³/s na vazão total de retirada. Os efeitos da variação da demanda urbana sobre os estoques hídricos do município são verificados nos índices da disponibilidade hídrica total do município, Tabela 59, na disponibilidade hídrica urbana, Tabela 60, e na disponibilidade hídrica subterrânea, Tabela 61.

Tabela 59: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica total em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/s	m³/s	m³/s
2020	2,553	2,553	2,553
2025	2,506	2,510	2,515
2030	2,462	2,487	2,516
2035	2,421	2,469	2,524
2040	2,383	2,456	2,537
2045	2,349	2,447	2,554
2050	2,317	2,441	2,575

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Tabela 60: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/s	m³/s	m³/s
2020	0,141	0,141	0,141
2025	0,091	0,095	0,100
2030	0,046	0,071	0,100
2035	0,003	0,051	0,107
2040	-0,036	0,037	0,118
2045	-0,072	0,026	0,134
2050	-0,105	0,020	0,154

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 36: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica superficial total em Araraquara, de 2020 a 2050.

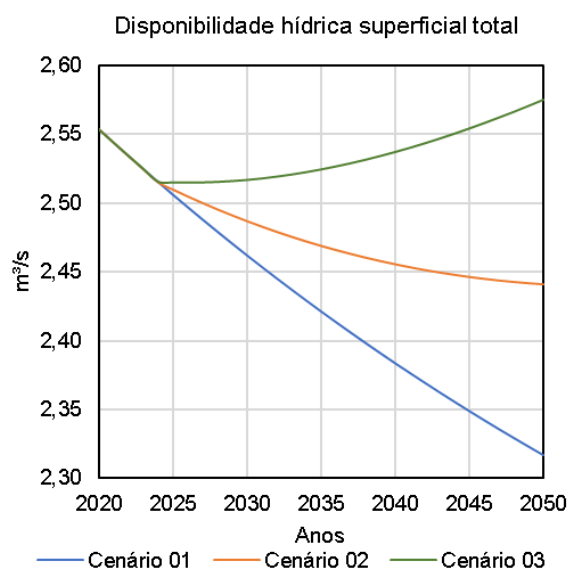
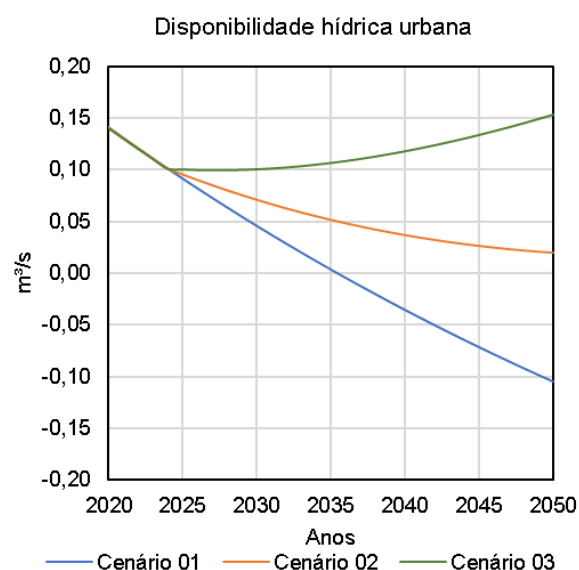


Figura 37: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica urbana em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a disponibilidade hídrica urbana, Tabela 60 e Figura 37, o município sai de uma condição de déficit hídrico, observado no cenário 01, para uma condição de recuperação da disponibilidade hídrica, nos cenários 02 e 03, considerando os patamares existentes em 2020. Enquanto no cenário 01 é necessário o aumento na oferta de água e, conseqüentemente, da ampliação da capacidade instalada dos sistemas de captação e produção, nos cenários 02 e 03, verifica-se a redução na velocidade de crescimento da demanda, com provável "sobra" de água ao final do período da simulação, com o retorno da demanda a um patamar próximo ao observado em 2020.

De forma semelhante, conforme a Tabela 61 e Figura 38, para o cenário 01, observa-se o crescimento da demanda requerida para as águas subterrâneas e o conseqüente aumento do déficit hídrico subterrâneo no município. No modelo, para o aumento da oferta de água em função do aumento da demanda requerida na área urbana, se alocou na demanda subterrânea o incremento da oferta, ou seja, no modelo apresentado, considera-se que o aumento da oferta de água para abastecimento urbano, durante o período da simulação, ocorrerá pelo aumento da captação subterrânea.

Desta forma, aplicou-se ao modelo o comportamento observado no município quanto ao suprimento de novas demandas urbanas. Desde o início da década de 1990, quando foi implantada a captação superficial no córrego Águas do Paiol e a Estação de Tratamento de Água "ETA Paiol", todo o aumento na demanda de água foi suprido pela instalação de poços profundos. Somando-se a este fato, o aumento na quantidade de outorgas fornecidas para captações subterrâneas na área urbana, temos que, em 2020, captou-se, no município, uma vazão média de 147% do limite explorável, conforme Tabela 62.

O efeito observado sobre o limite explorável do manancial subterrâneo no município (CORHI, 2000), Figura 39, para os cenários 02 e 03, é decorrente da diminuição da demanda requerida, que pode manter ao longo do tempo as condições de exploração observadas para o ano de 2020, reduzindo-se a pressão sobre o manancial.

Tabela 61: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica subterrânea em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/s	m³/s	m³/s
2020	-0,524	-0,524	-0,524
2025	-0,524	-0,524	-0,524
2030	-0,524	-0,524	-0,524
2035	-0,524	-0,524	-0,524
2040	-0,560	-0,524	-0,524
2045	-0,596	-0,524	-0,524
2050	-0,629	-0,524	-0,524

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Tabela 62: Comparação entre os cenários para a estimativa de extrapolação do limite explotável para as águas subterrâneas em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	%	%	%
2020	147,63	147,63	147,63
2025	147,63	147,63	147,63
2030	147,63	147,63	147,63
2035	147,63	147,63	147,63
2040	151,54	147,63	147,63
2045	154,14	147,63	147,63
2050	157,17	147,63	147,63

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 38: Comparação entre os cenários para a estimativa da disponibilidade hídrica subterrânea em Araraquara, de 2020 a 2050.

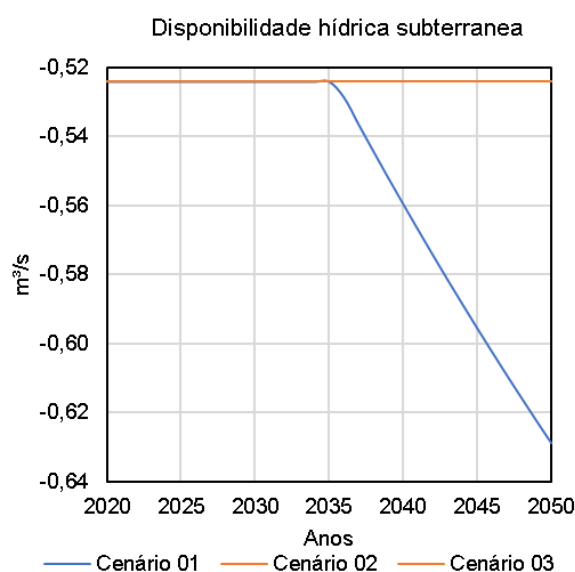
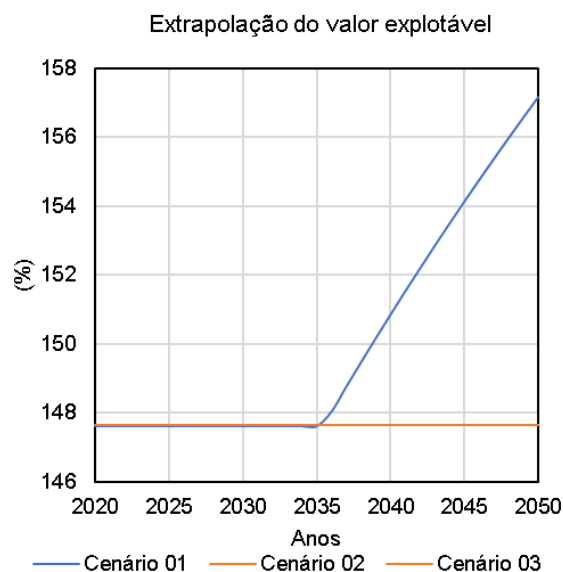


Figura 39: Comparação entre os cenários para a estimativa de extrapolação do limite explotável para as águas subterrâneas em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

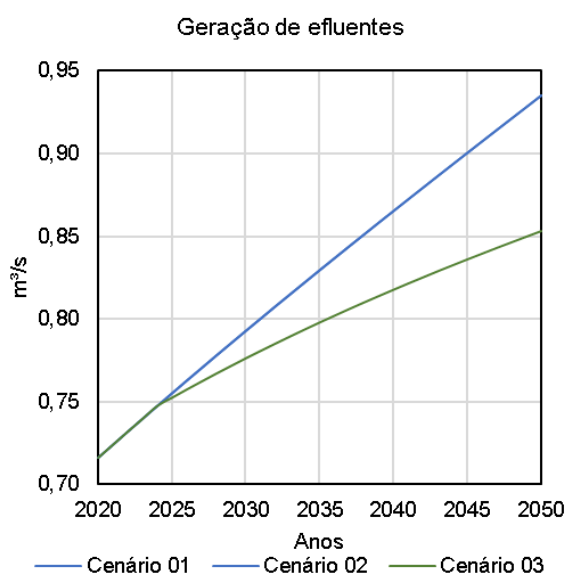
Em decorrência da diminuição da demanda per capita de água, nota-se, para o cenário 03, a diminuição na quantidade de efluentes urbanos gerados, Tabela 63 e Figura 40, o que poderia aumentar o tempo para a superação da capacidade operacional da Estação de Tratamento de Esgoto do município, que é de 0,800 m³/s. No entanto, essa possibilidade deve ser vista com cautela, uma vez que a redução da demanda per capita de água fornecida pelo sistema de abastecimento urbano pode ser suprida pela introdução de fontes alternativas, o que, na prática, não geraria redução na geração de efluentes.

Tabela 63: Comparação entre os cenários para a estimativa de geração de efluentes urbanos em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
2020	0,716	0,716	0,716
2025	0,755	0,755	0,753
2030	0,793	0,793	0,776
2035	0,830	0,830	0,798
2040	0,865	0,865	0,818
2045	0,901	0,901	0,836
2050	0,935	0,935	0,853

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 40: Comparação entre os cenários para a estimativa de geração de efluentes urbanos em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3. VARIAÇÃO NOS ÍNDICES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

O Índice de Escassez Hídrica, Tabela 64 e Figura 41, está relacionado à vazão superficial do território e à variação populacional. É calculado a partir da vazão média superficial. No modelo, adotamos a vazão mínima $Q_{95\%}$, uma vez que essa é a vazão utilizada para definir a quantidade de água disponível para uso no município e pode apresentar uma condição mais próxima à realidade hídrica. O comportamento observado para o índice está coerente com os valores verificados para o município a partir dos dados históricos de vazão e população, Tabela 21.

Tabela 64: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação no Índice de Escassez Hídrica em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	m³/pessoa.ano	m³/pessoa.ano	m³/pessoa.ano
2020	596,77	596,77	596,77
2025	569,96	569,96	569,96
2030	547,12	547,12	547,12
2035	527,48	527,48	527,48
2040	510,45	510,45	510,45
2045	495,58	495,58	495,58
2050	482,52	482,52	482,52

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

O Índice de Estresse Hídrico, Tabela 65 e Figura 42, está relacionado à quantidade total de água retirada em relação à disponibilidade total de água do município. O comportamento observado para o índice está coerente com os valores verificados para o município a partir dos dados históricos de vazão e demanda, Tabela 21.

Tabela 65: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação no Índice de Estresse Hídrico em Araraquara, de 2020 a 2050.

Ano	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
	%	%	%
2020	0,43	0,43	0,43
2025	0,45	0,44	0,44
2030	0,45	0,45	0,44
2035	0,46	0,45	0,44
2040	0,47	0,46	0,44
2045	0,48	0,46	0,43
2050	0,49	0,46	0,43

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.

Figura 41: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação do Índice de Escassez Hídrica em Araraquara, de 2020 a 2050.

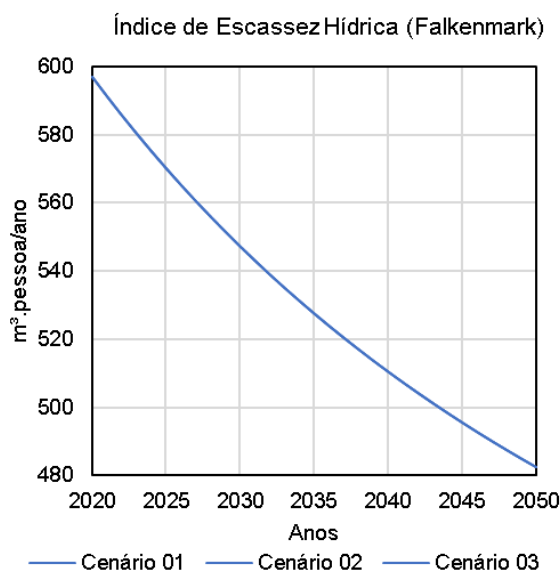
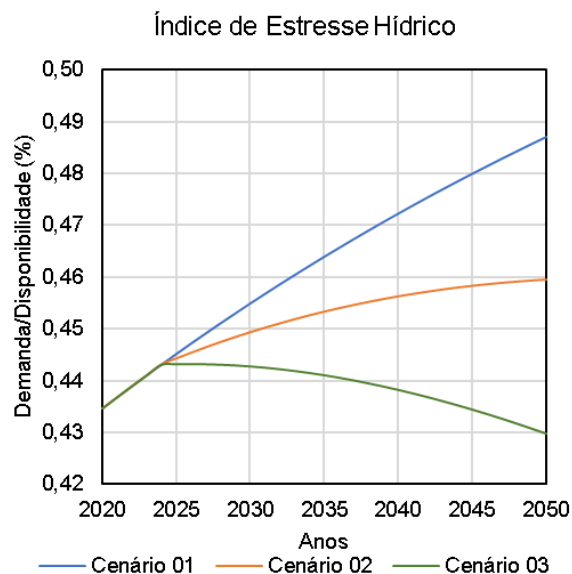


Figura 42: Comparação entre os cenários para a estimativa da variação do Índice de Estresse Hídrico em Araraquara, de 2020 a 2050.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de dinâmica de sistemas para a disponibilidade hídrica em Araraquara apresentou resultados coerentes quanto aos dados gerados e ao comportamento observado no sistema hídrico simulado. Os principais componentes do modelo foram capazes de apresentar variações estimadas a partir da análise dos sistemas reais, tais como os componentes de uso e ocupação do solo, de variação populacional, das ofertas e das demandas hídricas. Também se verificou que o modelo apresentou a capacidade de simular as relações dinâmicas entre os componentes.

Os cenários simulados apresentaram distinções claras com a mudança no comportamento dos componentes do modelo a partir da alteração dos parâmetros das variáveis "índice de perdas" e "consumo per capita". É possível observar que, embora tenha-se considerado mudanças pontuais para a diminuição da demanda urbana de água, as intervenções propostas foram capazes de influenciar de forma positiva a diminuição da demanda a médio e longo prazo.

No caso do cenário 03, com a adoção da redução do índice de perdas em conjunto com a redução da demanda per capita, se cria o potencial para alcançar, ao final do período da simulação, no ano de 2050, patamares de disponibilidade hídrica semelhantes aos encontrados no início da simulação, no ano de 2020.

A comparação entre os resultados dos cenários possibilita estimar que tanto ações estruturais, como a redução das perdas de água, quanto ações não estruturais,

como a diminuição da demanda per capita, são capazes de oferecer resultados importantes para a melhoria da condição hídrica do município e, por consequência, para os sistemas de gestão e de infraestrutura urbana, dado o prolongamento do tempo para a superação da capacidade instalada dos sistemas e equipamentos.

As ações estruturais para a redução das perdas de águas tendem a apresentar mais dificuldade para a sua implantação, uma vez que envolvem patamares elevados de investimento e ações complexas de engenharia urbana e social. As ações para a redução do consumo per capita de água, sem necessariamente reduzir a oferta de água disponível, envolve tanto ações estruturais, como, por exemplo, ações de controle da demanda pela elevação dos custos para o usuário, quanto ações não estruturais que passam pela educação ambiental e pelo convencimento da viabilidade em se adotar o uso de fontes alternativas para suprir as demandas hídricas, seja em âmbito individual ou coletivo.

De acordo com Arora *et al.* (2020), “[...] A gestão da demanda e a imposição de restrições ao uso da água são algumas das estratégias não estruturais a serem implementadas juntamente com medidas estruturais” (ARORA *et al.*, 2020), tais como a adoção de fontes alternativas de água, tais como tanques domésticos de coleta de água da chuva, reciclagem de água cinza e coleta de águas pluviais em nível comunitário.

De acordo com Gohari *et al.* (2022), tem aumentado a busca por estratégias para reduzir a vulnerabilidade dos recursos hídricos, aumentar a resiliência dos sistemas e buscar um uso sustentável destes recursos, para o autor, o sucesso de qualquer aglomeração urbana depende da capacidade em se manter o equilíbrio entre a oferta e a demanda de hídrica.

Regiões com problemas de escassez hídrica têm percebido que, para atingir a sustentabilidade com relação aos recursos hídricos, deve-se aproveitar métodos não convencionais de abastecimento, aproveitando ao máximo o uso das chuvas locais e de processos de reuso de águas residuárias, tanto com a captação e tratamento para uso direto quanto com a melhoria de técnicas para preservar e aumentar a retenção da umidade no solo. A implantação ou ampliação de sistemas convencionais de abastecimento, por meio de infraestruturas complexas de captação, redes e sistemas de bombeamento, em determinados contextos econômicos e sociais também tende a

ampliar os problemas de acesso à água, dado o aumento nos custos da disponibilização dos serviços (FALKENMARK; LUNDQVIST; WIDSTRAND, 1990).

Esta questão coloca em evidência tanto a necessidade de gerir a oferta quanto a necessidade de gerir a demanda de água. Apesar de, em algumas situações a abordagem necessária seja a gestão da oferta, uma abordagem sensata é a adoção de medidas de gestão da demanda antes da ampliação da oferta, como, por exemplo, a adoção de medidas de controle de perdas de água nos sistemas e melhoria na eficiência na irrigação (FALKENMARK *et al.*, 2007; WATKINS *et al.*, 2006).

7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa apresentou uma metodologia para abordar a disponibilidade hídrica no município de Araraquara, considerando de forma integrada as áreas urbanas e as áreas rurais. A metodologia utilizada consistiu na identificação, na caracterização e na quantificação dos componentes e variáveis relacionados às demandas e à oferta hídrica no município. Na elaboração de um modelo dinâmico capaz de simular a disponibilidade hídrica local e na simulação de cenários que correlacionam a disponibilidade hídrica e a dinâmica de uso e ocupação do solo no município.

O modelo dinâmico considerou-se os principais arranjos do tipo “oferta x demanda” existentes no município e suas interações, tanto na área urbana quanto nas áreas rurais. Definiu-se como componentes do modelo os elementos que representam as entradas e as saídas de água nos sistemas hídricos locais. Considerou-se que os principais componentes da demanda são os fatores demográficos para as demandas urbanas e o fator “uso do solo” para as demandas rurais.

A modelagem por meio do software Vensim PLE, permitiu uma abordagem sistêmica da relação entre os recursos hídricos e a dinâmica de uso e ocupação do solo no município de Araraquara. Também permitiu a obtenção de resultados satisfatórios quanto à reprodução da estrutura e das interrelações entre os componentes que compõem o sistema hídrico local, bem como, possibilitou a simulação de cenários futuros coerentes com os dados históricos de uso do solo e das demandas de uso da água no município.

O modelo apresentado, demonstra que a relação “oferta-demanda”, ou o balanço hídrico municipal, passa por diversas gradações de escala que podem estar relacionadas somente ao território municipal, a um território ampliado e compartilhado com outros municípios ou a áreas menores, tais como as bacias ou sub-bacias hidrográficas ou determinadas regiões do município. No que tange ao planejamento urbano, verifica-se que o aumento da ocupação urbana é acompanhado pelo aumento da demanda hídrica. Demonstra que a dificuldade em controlar os fatores que geram o aumento da demanda, tais como o aumento populacional, processos migratórios ou avanços econômicos, por exemplo, pode ser equilibrada por ações capazes de

diminuir a velocidade e a intensidade do aumento da demanda, como apresentado nos cenários simulados com a redução no índice de perdas e a adoção de ações que desestimulam o consumo ou incentivem a adoções de fontes alternativas de água.

A pesquisa atendeu, portanto, os objetivos propostos ao analisar a disponibilidade hídrica no município de Araraquara com a aplicação de modelagem de dinâmica de sistemas. O modelo dinâmico permitiu identificar os componentes presentes nos sistemas hídricos do município e estabelecer os laços de retroalimentação existentes entre eles. A simulação dos cenários possibilitou a verificação da funcionalidade do modelo, bem como, permitiu concluir que é possível intervir na demanda e na disponibilidade hídrica e obter retornos positivos a longo e médio prazo, preservando os recursos hídricos e diminuindo a necessidade de ampliação da infraestrutura de abastecimento.

Desta forma, as hipóteses apresentadas foram completamente atendidas, sendo demonstrado que a dinâmica de sistemas é um método válido para a análise da disponibilidade hídrica num contexto local e a modelagem em dinâmica de sistemas pode ser utilizada como uma ferramenta de gestão para a análise da disponibilidade hídrica em escala municipal.

Considerando os resultados, esta pesquisa conseguiu contribuir de forma positiva com a compreensão dos sistemas hídricos municipais e demonstrar a possibilidade do uso da simulação dinâmica como ferramenta para análise hídrica local. Para o município de Araraquara, apresenta a possibilidade de uma abordagem diferenciada para o planejamento urbano e para o planejamento dos sistemas hídricos. Trata-se de uma ferramenta com potencial para auxiliar no gerenciamento e na tomada de decisões em escala local ou regional, como, por exemplo, no planejamento dos sistemas urbanos, das Regiões de Planejamento Ambiental (RPA) (ARARAQUARA, 2014a) ou em nível de UGRHI ou subUGRHI (SÃO PAULO, 2020b).

É evidente, no entanto, que há limitações no processo de modelagem dinâmica que, no caso desta pesquisa, podem ser observadas na sintetização das informações e nas simplificações aplicadas ao modelo. O grau de confiabilidade dos dados secundários, também é um fator limitante para os resultados, não quanto à acurácia das informações ou seriedade das instituições geradoras destas informações, mas pela impossibilidade de uma apuração mais consistente dos dados utilizados. Também é importante considerar as dificuldades impostas pela própria modelagem de

sistemas dinâmicos e não lineares que, apesar de serem ferramentas de ampla aplicação, exigem um trabalho prévio de compreensão do pensamento sistêmico e das relações matemáticas que envolvem os processos modelados.

Por fim, sugere-se que pesquisas futuras com a aplicação da dinâmica de sistemas possam ser executadas para ampliar as resoluções espaciais da simulação, considerando, por exemplo, as bacias hidrográficas urbanas ocupadas e as bacias prioritárias para futuras ocupações. E, desta forma, compreender melhor as variações de oferta e demanda menos perceptíveis em escala municipal e gerar resultados mais próximos da realidade local.

8 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649 - Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

AGARWAL, A.; DE LOS ANGELES, M. S.; BHATIA, R.; CHÉRET, I.; DAVILA-POBLETE, S.; FALKENMARK, M.; GONZÁLEZ-VILLARREAL, F.; JØNCH-CLAUSEN, T.; KADI, M. A.; KINDLER, J. **TAC Background Papers N° 4: Integrated Water Resources Management**. Stockholm: Global Water Partnership. Technical Advisory Committee (TAC), mar. 2000. Disponível em: <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/items/287d523c-f286-4769-9490-b4003f4bf228>. Acessado em: 17 maio 2024.

AL RASHED, M.; SEFELNASR, A.; SHERIF, M.; MURAD, A.; ALSHAMSI, D.; ALIEWI, A.; EBRAHEEM, A. A. Novel concept for water scarcity quantification considering nonconventional and virtual water resources in arid countries: Application in Gulf Cooperation Council countries. **Science of the Total Environment**, vol. 882, p. 163473, 2023. DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163473. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723020922>. Acessado em: 17 maio 2024.

ALBERTI, M.; MARZLUFF, J. M.; SHULENBERGER, E.; BRADLEY, G.; RYAN, C.; ZUMBRUNNEN, C. Integrating humans into ecology: Opportunities and challenges for studying urban ecosystems. **BioScience**, Berlin, vol. 53, n° 12, p. 1169–1179, 1 dez. 2003. DOI 10.1007/978-0-387-73412-5_9. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioscience/article/53/12/1169/301939>. Acessado em: 16 maio 2024.

ALLOUCHE, J. The sustainability and resilience of global water and food systems: Political analysis of the interplay between security, resource scarcity, political systems and global trade. **Food Policy**, vol. 36, n° SUPPL. 1, p. S3, 2011. DOI 10.1016/j.foodpol.2010.11.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306919210001272>. Acessado em: 17 maio 2024.

AMENT, G. F. **Método Runge-Kutta Contínuo para equações diferenciais com retardo e aplicações em dinâmica populacional**. 2022. 90 f. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2022. DOI 10.11606/D.59.2022.tde-31102022-100226. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59143/tde-31102022-100226/pt-br.php>. Acessado em: 28 set. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Bacias Hidrográficas Ottocodificada (Níveis Otto 1-7). 22 jun. 2022a. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas**. Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/dc696eb4e24b485a8fd9aea6c0f99eb4_0/about. Acessado em: 27 set. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos. 3 abr. 2024. **Outorgas de Direito de Uso de Recursos Hídricos**. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/a13c9093-34bd-403f-88db-6ffbad2069e6>. Acessado em: 22 set. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/5146c9ec-5589-4af1-bd64-d34848f484fd>. Acessado em: 22 jul. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos / Agência Nacional de Águas**. 1º ed. Brasília: SAG, 2011. vol. 6. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sas/cadernos-de-capacitacao>. Acessado em: 14 set. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. 31 jul. 2022b. **Usos Consuntivos da Água no Brasil (1931-2040)**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/acesso-tematico/snirh/snirh-1/acesso-tematico/usos-da-agua>. Acessado em: 7 set. 2024.

ANDERSSON, E.; BORGSTRÖM, S.; HAASE, D.; LANGEMEYER, J.; WOLFF, M.; MCPHEARSON, T. Urban resilience thinking in practice: ensuring flows of benefit from green and blue infrastructure. **Ecology & Society**, vol. 26, nº 4, 2021. DOI 10.5751/ES-12691-260439. Disponível em: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-306496>. Acessado em: 17 maio 2024.

ARARAQUARA. **Estudo preliminar de engenharia e viabilidade econômica do projeto para ampliação do sistema de abastecimento de água municipal**. Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 1967.

ARARAQUARA. **Lei Complementar nº 850, de 11 de fevereiro de 2014**. Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2014a. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisComplementares/850>. Acessado em: 7 abr. 2023.

ARARAQUARA. **Lei complementar nº 922, de 30 de janeiro de 2020. Cria o sistema de reuso de água pluvial não tratada em imóveis residenciais e comerciais localizados no Município de Araraquara e dá outras providências**. Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2020. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisComplementares/922>. Acessado em: 20 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 1.697, de 02 de junho de 1969. Cria o Departamento Autônomo de Água e Esgotos de Araraquara (DAAE) e dá outras providências**. Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 1969a. Disponível em:

<https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/1697>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 1.794 de 26 de julho de 1971. Dispõe sobre a aprovação do Plano Diretor e da Codificação de Normas para as construções, de Loteamentos e o Zoneamento.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 1971. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/1794/Arquivos/1>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 8.335 de 08 de novembro de 2014. Institui a Política Municipal de Saneamento Básico (PMSB) e dá outras providências.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2014b. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/8335>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 8.969 de 11 de maio de 2017. Cria o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente (COMDEMA), e dá outras providências.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2017a. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/8969>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 9.042 de 10 de agosto de 2017. Reformula o Conselho Municipal de Planejamento e Política Urbana Ambiental de Araraquara (COMPUA), e dá outras providências.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2017b. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/9042#art17>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 10.110, de 07 de janeiro de 2021. Dispõe, no âmbito do Município de Araraquara, sobre a organização das estruturas administrativa e hierárquica do Poder Executivo Municipal e dá outras providências.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2021a. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/10110-2021#art15III>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Lei nº 10.252 de 01 de julho de 2021. Institui o Programa de Modernização de Aprovação de Projetos e Diretrizes Urbanísticas de Araraquara, e dá outras providências.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2021b. Disponível em: <https://legislacaodigital.com.br/Araraquara-SP/LeisOrdinarias/10252#art17>. Acessado em: 15 mar. 2024.

ARARAQUARA. **Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 1969b.

ARAÚJO NETO, L. de; HANAI, F. Y.; NASCIMENTO, R. C. M. do; ROSSO PINTO, M. J. **Atlas das Bacias Hidrográficas do Município de Araraquara-SP.** Araraquara: Prefeitura Municipal de Araraquara, 2022. Disponível em: <https://araraquara.sp.gov.br/meio-ambiente-publica-o-atlas-das-bacias-hidrograficas-do-municipio-de-araraquara-sp>. Acessado em: 24 jun. 2023.

ARORA, M.; NAIR, S.; MALANO, H.; GEORGE, B. A combined simulation-optimisation modelling framework for assessing the energy use of urban water systems. **Journal of Environmental Management**, vol. 274, p. 111166, 2020. DOI 10.1016/j.jenvman.2020.111166. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720310914>. Acessado em: 27 jun. 2023.

BOBERG, J. Freshwater Availability. **Liquid Assets: How Demographic Changes and Water Management Policies Affect Freshwater Resources**. How Demographic Changes and Water Management Policies Affect Freshwater Resources. 1º ed. Santa Monica: RAND Corporation, 2005. p. 15–28. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/10.7249/mg358cf.9>. Acessado em: 16 maio 2024.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República, 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acessado em: 23 mar. 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=9433&ano=1997&ato=a12ATVU90MJpWTbaf>. Acessado em: 14 mar. 2024.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República, 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acessado em: 23 mar. 2024.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**. Brasília, DF: Presidência da República, 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acessado em: 30 abr. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acessado em: 23 mar. 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências**.

Brasília, DF: Presidência da República, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acessado em: 16 maio 2024.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D.; BURDEN, A. M. **Análise numérica**. trad. All Tasks. 3º ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

CARREIRA, B. L.; BRANDI, A. C. Métodos de Euler aperfeiçoado e modificado para solução de equações diferenciais ordinárias. **C.Q.D. - Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, vol. 7, 18 nov. 2022. Disponível em: <https://sistemas.fc.unesp.br/ojs/index.php/revistacqd/article/view/74>.

CBH-MOGI - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2011 - ano base 2010**. Ribeirão Preto: CBH-MOGI, 2011. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhmogi/documentos>. Acessado em: 19 set. 2024.

CBH-MOGI - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2018 - ano base 2017**. Ribeirão Preto: CBH-MOGI, 2018. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-MOGI/13745/rs_2018-ano-base-2017-da-ugri-09-vs_2-15-06-2018.pdf. Acessado em: 28 maio 2023.

CBH-MOGI - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2022 - ano base 2021**. Ribeirão Preto: CBH-MOGI, 2022. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhmogi/documentos>. Acessado em: 19 set. 2024.

CBH-MOGI - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2023 - ano base 2022**. Ribeirão Preto: CBH-MOGI, 2023. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhmogi/documentos>. Acessado em: 17 set. 2024.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2010 - ano base 2009**. Araraquara: CBH-TJ, 2010. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 29 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2011 - ano base 2010**. Araraquara: CBH-TJ, 2011. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 14 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2012 - ano base 2011**. Araraquara: CBH-TJ, 2012. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 29 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2013 - ano base 2012**. Araraquara: CBH-TJ, 2013. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 13 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2014 - ano base 2013**. Araraquara: CBH-TJ, 2014. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 29 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2015 - ano base 2014**. Araraquara: CBH-TJ, 2015. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 29 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2016 - ano base 2015**. Araraquara: CBH-TJ, 2016. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 13 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2019 - ano base 2018**. Araraquara: CBH-TJ, 2019. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 29 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2020 - ano base 2019**. Araraquara: CBH-TJ, 2020. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 29 nov. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2021 - ano base 2020**. Araraquara: CBH-TJ, 2021. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 27 ago. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2022 - ano base 2021**. Araraquara: CBH-TJ, 2022. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 27 jun. 2023.

CBH-TJ - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2023 - ano base 2022**. Araraquara: CBH-TJ, 2023. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/documentos>. Acessado em: 13 nov. 2023.

CERH - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (SÃO PAULO). **Plano Estadual de Recursos Hídricos: 2004-2007**. São Paulo: DAEE, 2006. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>. Acessado em: 10 nov. 2023.

CERH - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (SÃO PAULO). **Plano Estadual de Recursos Hídricos: primeiro plano do Estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE, 1990. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>. Acessado em: 10 nov. 2023.

CERH - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (SÃO PAULO). **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos, jun. 1999. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/r0estadual/sumario.htm>. Acessado em: 10 nov. 2023.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers**. 6º ed. New York: McGrawHill Higher Education, 2010.

CORHI - COMITÊ COORDENADOR DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (SÃO PAULO). **Plano Estadual de Recursos Hídricos: PERH 2000-2003**. São Paulo: CORHI, 2000. Disponível em: <https://www.sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/r0estadual/sintese/sumario.htm>. Acessado em: 25 mar. 2024.

CORREIA DE ARAUJO, W.; OLIVEIRA ESQUERRE, K. P.; SAHIN, O. Building a system dynamics model to support water management: A case study of the semiarid region in the Brazilian Northeast. **Water**, vol. 11, nº 12, p. 2513, 2019. DOI 10.3390/w1122513. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/12/2513>. Acessado em: 16 maio 2024.

CRUZ, J.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 13, nº 1, p. 111–124, 2008. DOI 10.21168/rbrh.v13n1.p111-124. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=15&SUMARIO=174>. Acessado em: 14 abr. 2024.

CUMMING, G. S. Conceptual Background on Social-Ecological Systems and Resilience. **Spatial Resilience in Social-Ecological Systems**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p. 7–33. DOI 10.1007/978-94-007-0307-0_2. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-0307-0_2. Acessado em: 28 jun. 2022.

CUNHA, F. G. M.; CASTRO, J. K. S. de. **Cálculo numérico**. Fortaleza: UAB/IFCE, 2010.

DA SILVA, A. M. **Metodologia da Pesquisa**. Fortaleza: EDUECE, 2015. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/432206/2/Livro_Metodologia%20da%20Pesquisa%20-%20Comum%20a%20todos%20os%20cursos.pdf. Acessado em: 05 janeiro 2025.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Estudos e diagnóstico de disponibilidade hídrica quantitativa e qualitativa da Bacia do Ribeirão das Cruzes, em Araraquara/SP; Relatório 01: Caracterização das bacias hidrográficas e dos problemas encontrados**. Araraquara: DAAE, nov. 2018.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. Informações operacionais (não publicado). Araraquara, 2022a.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Planejamento de distribuição de água**. Araraquara: DAAE, abr. 1984.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Diretor de Água do Município de Araraquara. Relatório Final. Volume 1 - Tomo 1.** Araraquara: DAAE, jul. 2022b.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Diretor de Água do Município de Araraquara. Relatório Final. Volume 1 - Tomo 2.** Araraquara: DAAE, jul. 2022c.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Diretor de Saneamento e Gestão Ambiental do Município de Araraquara.** Araraquara: DAAE, 2007.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água de Araraquara.** Araraquara: DAAE, jun. 1991.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Araraquara – PMSB: Volume I - Abastecimento de Água Potável.** Araraquara: DAAE, 2012a.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Araraquara – PMSB: Volume II - Esgotamento Sanitário.** Araraquara: DAAE, 2012b.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Araraquara – PMSB: Volume III - Drenagem e Manejo das Águas Pluviais.** Araraquara: DAAE, 2012c.

DAAE - DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARARAQUARA. **Projeto de ampliação do sistema de abastecimento de água de Araraquara - Relatório Técnico Preliminar.** Araraquara: DAAE, jun. 1972.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Banco Pluviométrico, Fluviométrico e Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo. **Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo**, São Paulo, 2000. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/site/hidrologia/>. Acessado em: 26 set. 2024.

DAIGGER, G. T. Sustainable Urban Water and Resource Management. **The Bridge**, Washington, DC, vol. 41, nº 1, p. 13–18, 2011. Disponível em: <https://www.nae.edu/File.aspx?id=43182&v=e31338e1>. Acessado em: 9 jan. 2024.

DAMKJAER, S.; TAYLOR, R. The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. **Ambio**, vol. 46, nº 5, p. 513–531, 2017. DOI 10.1007/s13280-017-0912-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-017-0912-z>. Acessado em: 17 maio 2024.

FALKENMARK, M. Competing freshwater and ecological services in the river basin perspective: an expanded conceptual framework. **Water international**, vol. 25, nº 2,

p. 172–177, 2000. DOI 10.1080/02508060008686815. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02508060008686815>. Acessado em: 17 maio 2023.

FALKENMARK, M. Freshwater as shared between society and ecosystems: From divided approaches to integrated challenges. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, vol. 358, n° 1440, p. 2037–2049, 2003. DOI 10.1098/rstb.2003.1386. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstb.2003.1386>. Acessado em: 17 ago. 2023.

FALKENMARK, M. Growing water scarcity in agriculture: Future challenge to global water security. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, vol. 371, n° 2002, p. 20120410, 13 nov. 2013. DOI 10.1098/rsta.2012.0410. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2012.0410>. Acessado em: 17 maio 2022.

FALKENMARK, M. Meeting water requirements of an expanding world population. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, vol. 352, n° 1356, p. 929–936, 1997. DOI 10.1098/rstb.1997.0072. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstb.1997.0072>. Acessado em: 17 ago. 2022.

FALKENMARK, M. Water Scarcity and Food Production in Africa. In: DAVID PIMENTEL; CARL W. HALL (orgs.). **Food and Natural Resources**. San Diego: Academic Press, San Diego, CA, 1989. p. 163–190. DOI 10.1016/b978-0-12-556555-4.50011-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780125565554500119?via%3Dihub>. Acessado em: 17 dez. 2022.

FALKENMARK, M. Water scarcity generates environmental stress and potential conflicts. In: JAMES, W.; NIEMCZYNOWICZ, J. (orgs.). **Water, development, and the environment**. Chelsea: Lewis Boca Raton, FL, 1992. vol. 381, p. 279–293.

FALKENMARK, M.; BERNTTELL, A.; JÄGERSKOG, A.; LUNDQVIST, J.; MATZ, M.; TROPP, H. **On the Verge of a New Water Scarcity: A Call for Good Governance and Human Ingenuity**. Stockholm: Stockholm International Water Institute (SIWI) Stockholm, Sweden, 2007. Disponível em: <http://dlc.dlib.indiana.edu/dlc/handle/10535/5086>.

FALKENMARK, M.; LUNDQVIST, J.; WIDSTRAND, C. Implications of biomass strategy for communities and policies: Coping with water scarcity. **International Journal of Water Resources Development**, London, vol. 6, n° 1, p. 29–43, 1990. DOI 10.1080/07900629008722448. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07900629008722448>.

FARHAD, S.; GUAL, M. A.; RUIZ-BALLESTEROS, E. Linking governance and ecosystem services: The case of Isla Mayor (Andalusia, Spain). **Land Use Policy**,

vol. 46, p. 91–102, 2015. DOI 10.1016/j.landusepol.2015.01.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837715000228>. Acessado em: 17 maio 2022.

FERNANDES, R. de O.; STUDART, T. M. de C. Gestão adaptativa de recursos hídricos para um mundo em mudança. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, vol. 11, nº 4, p. 292–318, 2022. DOI 10.59306/rgsa.v11e42022292-318. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/7437. Acessado em: 20 mar. 2024.

FONTANA, É. Métodos Numéricos em Engenharia Química (Notas de Aula). , p. 66, 2018. Disponível em: https://fontana.paginas.ufsc.br/files/2018/03/partel_metNum.pdf. Acessado em: 27 set. 2024.

FORD, A. Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, Washington, vol. 1, nº 1, p. 401, 1 abr. 1999. DOI 10.1108/ijshe.2000.24901aae.002. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijshe.2000.24901aae.002/full/html>. Acessado em: 17 jan. 2024.

FREITAS, R. O. M. de; SANTOS, G. T.; BAHIA, E. T. Análise do abastecimento hídrico de Belo Horizonte e região metropolitana: uma abordagem por meio de dinâmica de sistemas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, nº 48, p. 52–68, 2018. DOI 10.5327/z2176-947820180281. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBciAMB/article/view/55. Acessado em: 27 jun. 2023.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GOHARI, A.; SAVARI, P.; ESLAMIAN, S.; ETEMADI, N.; KEILMANN-GONDHALEKAR, D. Developing a system dynamic plus framework for water-land-society nexus modeling within urban socio-hydrologic systems. **Technological Forecasting and Social Change**, vol. 185, p. 122092, 2022. DOI 10.1016/j.techfore.2022.122092. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162522006138>. Acessado em: 27 jun. 2023.

GONZALEZ, A. M. G. O. **Modelo de simulação dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. 2010. 286 f. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. DOI 10.11606/T.91.2010.tde-14022011-163736. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.91.2010.tde-14022011-163736>. Acessado em: 19 abr. 2024.

GONZALEZ, A. M. G. O.; SILVA JR, A. G. da; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SILVA, E.; BRAGA, J. L. Water resources sustainability at São Miguel do Anta county, Minas Gerais, Brazil: a system dynamics approach. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, vol. 2, nº 3, p. 231–241, 2008. DOI 10.18011/bioeng2008v2n3p231-241. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/17>. Acessado em: 4 maio 2024.

HASSING, J.; IPSEN, N.; CLAUSEN, T. J.; LARSEN, H.; LINDGAARD-JØRGENSEN, P. **Integrated Water Resources Management in Action: Dialogue paper of the World Water Assessment Programme**. Paris: Unesco, 2009. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000181891>. Acessado em: 8 jan. 2024.

HOFF, H.; FALKENMARK, M.; GERTEN, D.; GORDON, L.; KARLBERG, L.; ROCKSTRÖM, J. Greening the global water system. **Journal of Hydrology**, vol. 384, nº 3, p. 177–186, 2010. DOI 10.1016/j.jhydrol.2009.06.026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409003576>. Acessado em: 17 maio 2024.

HOWARD, G.; BARTRAM, J.; WILLIAMS, A.; OVERBO, A.; FUENTE, D.; GEERE, J.-A. **Domestic water quantity, service level and health**. Geneva: World Health Organization - WHO, 2020. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240015241>. Acessado em: 24 fev. 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Áreas urbanizadas do Brasil: 2019. Notas Técnicas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101973>. Acessado em: 17 jan. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 1991: resultados preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/25089-censo-1991-6.html>. Acessado em: 17 maio 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. **Tabelas - Características da População e dos Domicílios**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=10503&t=resultados>. Acessado em: 17 ago. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022. 27 out. 2023. **Tabelas - População e domicílios: Primeiros resultados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=37225&t=resultados>. Acessado em: 17 ago. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico: famílias e domicílios. **IX Recenseamento Geral do Brasil -1980**. Rio de Janeiro: IBGE, 1983. vol. 1, Tomo 6, p. 773. Disponível em:

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/72/cd_1980_v1_t4_n19_sp.pdf. Acessado em: 29 out. 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse preliminar do Censo Demográfico 2000**. 1º ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. vol. 7, . Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=7308>. Acessado em: 17 maio 2022.

INGRAO, C.; STRIPPOLI, R.; LAGIOIA, G.; HUISINGH, D. Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, vol. 9, nº 8, p. e18507, 2023. DOI 10.1016/j.heliyon.2023.e18507. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023057158>. Acessado em: 17 maio 2024.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Land–climate interactions. **Land–climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. 1º ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 131–248. DOI 10.1017/9781009157988. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-and-land/AAB03E2F17650B1FDEA514E3F605A685>. Acessado em: 25 jan. 2023.

KARIMI, M.; TABIEE, M.; KARAMI, S.; KARIMI, V.; KARAMIDEHKORDI, E. Climate change and water scarcity impacts on sustainability in semi-arid areas: Lessons from the South of Iran. **Groundwater for Sustainable Development**, vol. 24, p. 101075, 2024. DOI 10.1016/j.gsd.2023.101075. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X23001765>. Acessado em: 17 maio 2024.

KUMMU, M.; GUILLAUME, J. H. A.; DE MOEL, H.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; PORKKA, M.; SIEBERT, S.; VELDKAMP, T. I. E.; WARD, P. J. The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. **Scientific Reports**, vol. 6, nº 1, p. 38495, 2016. DOI 10.1038/srep38495. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep38495>. Acessado em: 17 maio 2024.

KUMMU, M.; WARD, P. J.; DE MOEL, H.; VARIS, O. Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia. **Environmental Research Letters**, vol. 5, nº 3, p. 34006, 2010. DOI 10.1088/1748-9326/5/3/034006. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/5/3/034006>. Acessado em: 17 maio 2024.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311 p.

MAPBIOMAS PROJECT. Projeto MapBiomas – Coleção [versão] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2023. **MapBiomas Data**. DOI

10.58053/MapBiomias/VJIJCL. Disponível em:
<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acessado em: 24 jul. 2024.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria-Estudo de caso da Kodak Brasileira**. 2002. 367 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. DOI 10.11606/T.3.2002.tde-14112002-203535. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-14112002-203535/pt-br.php>. Acessado em: 22 jun. 2022.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment**. Washington D.C.: Island Press, 2005. Disponível em: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/340442>. Acessado em: 17 maio 2024.

MITCHELL, V. G. Applying integrated urban water management concepts: a review of Australian experience. **Environmental management**, vol. 37, p. 589–605, 2006. DOI 10.1007/s00267-004-0252-1. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-004-0252-1>. Acessado em: 8 mar. 2024.

MITCHELL, V. G.; MCMAHON, T. A.; MEIN, R. G. Components of the Total Water Balance of an Urban Catchment. **Environmental Management**, vol. 32, nº 6, p. 735–746, 2003. DOI 10.1007/s00267-003-2062-2. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-003-2062-2>. Acessado em: 17 maio 2024.

MURADIAN, R.; CORBERA, E.; PASCUAL, U.; KOSOY, N.; MAY, P. H. Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. **Ecological Economics**, vol. 69, nº 6, p. 1202–1208, 1 abr. 2010. DOI 10.1016/J.ECOLECON.2009.11.006. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800909004558>. Acessado em: 24 jan. 2023.

NASIRI, F.; SAVAGE, T.; WANG, R.; BARAWID, N.; ZIMMERMAN, J. B. A system dynamics approach for urban water reuse planning: a case study from the Great Lakes region. **Stochastic environmental research and risk assessment**, vol. 27, p. 675–691, 2013. DOI 10.1007/s00477-012-0631-8. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-012-0631-8>. Acessado em: 17 maio 2024.

NETO, S. Water governance in an urban age. **Utilities Policy**, vol. 43, p. 32–41, 2016. DOI 10.1016/j.jup.2016.05.004. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178715300771>. Acessado em: 17 maio 2024.

NUVOLARI, A.; MARTINELLI, A.; TELLES, D. D.; RIBEIRO, J. T.; MIYASHITA, N. J.; RODRIGUES, R. B.; ARAUJO, R. de. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. 2ª. São Paulo: Editora Blucher, 2011.

OHCHR - OFFICE OF THE UNITED NATIONS HIGH COMMISSIONER FOR HUMAN RIGHTS. **The Right to Water - Fact Sheet nº 35**. Geneva: OHCHR, 1 ago. 2010. Disponível em: <https://www.ohchr.org/en/publications/fact-sheets/fact-sheet-no-35-right-water>. Acessado em: 24 fev. 2024.

OLIVEIRA, O. G. **Dinâmica de sistemas como método de gestão de riscos: aplicação na gestão de riscos em recursos hídricos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências do Comportamento) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/34150>. Acessado em: 3 jul. 2023.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R. Serviços ambientais: conceitos, classificação, indicadores e aspectos correlatos. *In*: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (orgs.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015. p. 29–35. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024316>. Acessado em: 24 jan. 2023.

PICKETT, S. T. A.; CADENASSO, M. L.; GROVE, M. J.; NILON, C. H.; POUYAT, R. V.; ZIPPERER, W. C. Urban ecological systems: linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. **Annual Review of Ecological Systems**, vol. 32, p. 127–157, 2001. DOI 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114012. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/49182>. Acessado em: 29 ago. 2022.

PIERINI, C. R. **Análise da compacidade e da dispersão urbana de Araraquara-SP: um instrumento de diagnóstico e cartografia social do vazio urbano**. 2020. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12291>. Acessado em: 17 maio 2024.

PLUCHINOTTA, I.; PAGANO, A.; VILCAN, T.; AHILAN, S.; KAPETAS, L.; MASKREY, S.; KRIVTSOV, V.; THORNE, C.; O'DONNELL, E. A participatory system dynamics model to investigate sustainable urban water management in Ebbsfleet Garden City. **Sustainable Cities and Society**, vol. 67, p. 102709, 2021. DOI 10.1016/j.scs.2021.102709. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670721000044>. Acessado em: 17 maio 2024.

PORTO, R. L. L. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Fundamentos para gestão da água / coord. por Rubem La Laina Porto**. São Paulo: FEHIDRO, 2012. p. 11–23. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pactodasaguas/2011/05/livro-Fundamentos-da-Gestao-da-agua-sma.pdf>. Acessado em: 17 maio 2024.

QUINTEIRO, P.; DIAS, A. C.; SILVA, M.; RIDOUTT, B. G.; ARROJA, L. A contribution to the environmental impact assessment of green water flows. **Journal of Cleaner Production**, vol. 93, p. 318–329, 2015. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.01.022.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615000268>. Acessado em: 17 maio 2024.

RIBEIRO, C. L. C.; DIOTTO, A. V.; THEBALDI, M. S.; RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R. Simulations of the climate change and its effect on water resources in the Palma River basin, Brazil. **Water Supply**, vol. 22, nº 5, p. 5494–5508, 2022. DOI 10.2166/ws.2022.184. Disponível em:

<https://iwaponline.com/ws/article/22/5/5494/88525/Simulations-of-the-climate-change-and-its-effect>. Acessado em: 17 maio 2024.

RODRIGUES, D. B. B.; MENDIONDO, E. M. Bacias Hidrográficas: Caracterização e Manejo Sustentável. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 47–68.

RYU, J. H.; CONTOR, B.; JOHNSON, G.; ALLEN, R.; TRACY, J. System Dynamics to Sustainable Water Resources Management in the Eastern Snake Plain Aquifer Under Water Supply Uncertainty. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, vol. 48, nº 6, p. 1204–1220, 2012. DOI 10.1111/j.1752-1688.2012.00681.x. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2012.00681.x>. Acessado em: 17 maio 2024.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; GONZALEZ, A. M. G. O. Modelo dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí: uma perspectiva de dinâmica de sistemas. in: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, de 25 a 29/11/2007, São Paulo, SP. 2007. **Anais [...]**. São Paulo: ABRHIDRO, 2007. p. 134–148. Disponível em:

<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=9865>. Acessado em: 5 maio 2024.

SÃO PAULO (ESTADO). **Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. São Paulo:

Assessoria Técnico-Legislativa, 1991. Disponível em:

<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1991/lei-7663-30.12.1991.html>. Acessado em: 23 mar. 2024.

SÃO PAULO (ESTADO). **Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH e dá providências correlatas**.

São Paulo: Assessoria Técnico-Legislativa, 2016. Disponível em:

<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2016/lei-16337-14.12.2016.html>. Acessado em: 18 set. 2024.

SÃO PAULO (ESTADO). **Lei Complementar nº 1.413, de 23/09/2024. Dispõe sobre o regime jurídico das agências reguladoras estaduais, transforma o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE em Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-ÁGUAS, e dá providências correlatas**. São Paulo: Assessoria Técnico-Legislativa, 2024. Disponível em:

<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei.complementar/2024/lei.complementar-1413-23.09.2024.html>. Acessado em: 05 jan. 2025.

SÃO PAULO (ESTADO) - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE (SIMA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) 2020-2023: Relatório Final, Volume 1 - Diagnóstico Síntese, Tomo I – Caracterização e Situação dos Recursos Hídricos**. São Paulo: SIMA, nov. 2020a. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>. Acessado em: 11 nov. 2023.

SÃO PAULO (ESTADO) - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE (SIMA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) 2020-2023: Relatório Final, Volume 3 - Insumos do PERH, Tomo IV – Aprimoramentos dos Limites das UGRHs**. São Paulo: SIMA, nov. 2020b. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>.

SÃO PAULO (ESTADO) - SECRETARIA ESTADUAL DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS (SSRH). **Indicadores para Gestão dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo**. São Paulo: SSRH, 2013a. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7421/indicadores_gestao_rs_2013.pdf. Acessado em: 17 nov. 2023.

SÃO PAULO (ESTADO) - SECRETARIA ESTADUAL DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS (SSRH). **Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH): 2012/2015**. São Paulo: SRH/CRHi, 2013b. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>. Acessado em: 10 nov. 2023.

SÃO PAULO (ESTADO) - SECRETARIA ESTADUAL DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS (SSRH). **Plano Estadual de Recursos Hídricos: PERH 2016-2019**. São Paulo: SSRH, 2017. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursoshidricos>. Acessado em: 10 nov. 2023.

SÃO PAULO (ESTADO) - SECRETARIA ESTADUAL DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS (SSRH). **Situação dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo - Ano base 2007**. São Paulo: SSRH, 2009. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/relatoriosituacaodosrecursoshidricos>. Acessado em: 25 mar. 2024.

SÃO PAULO (ESTADO). COORDENADORIA DE RECURSOS HÍDRICOS (CRHI). **Situação dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo - 2019**. São Paulo: CRHI, 2019. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/relatoriosituacaodosrecursoshidricos>. Acessado em: 27 nov. 2023.

SEADE - FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **Índice Paulista de Responsabilidade Social 2016: Região Administrativa de Araraquara**. São Paulo: SEADE, 2016. Disponível em:

<https://www.al.sp.gov.br/arquivos/iprs/2016/Araraquara.pdf>. Acessado em: 25 mar. 2024.

SEADE - FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. Plataforma de dados sociais, econômicos e demográficos para municípios e regiões do Estado de São Paulo. 2022. **SEAD Painei**. Disponível em: <https://painel.seade.gov.br/saneamento-esp-e-municipios/>. Acessado em: 25 mar. 2024.

SEHLKE, G.; JACOBSON, J. System dynamics modeling of transboundary systems: the Bear River basin model. **Groundwater**, vol. 43, nº 5, p. 722–730, 2005. DOI 10.1111/j.1745-6584.2005.00065.x. Disponível em: <https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.2005.00065.x>. Acessado em: 18 dez. 2023.

SILVA, R. T.; PORTO, M. F. do A. Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração. **Estudos Avançados**, vol. 17, nº 47, p. 129–145, 2003. DOI 10.1590/s0103-40142003000100007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/hkQLGRnjV85nqf7F8gKpNJd/?lang=pt>. Acessado em: 27 jun. 2023.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. SNIS - Série Histórica (2000-2022). Brasília: SNIS, 2023. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>. Acessado em: 9 jan. 2024.

SOUZA, R. S. de; POLIZER, M.; RONDON, M. A. C.; VAL, L. A. A. do; GONDA, J. Avaliação do coeficiente de retorno esgoto/água numa rede de esgoto sanitário. **ARGAMASSA-Revista das Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, Geografia, Gestão, Decisão e Memória**, vol. 1, nº 1, p. 6–14, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/argamassa/article/view/5979/4417>. Acessado em: 1 fev. 2024.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; GONZALEZ, A. M. G. O.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SILVA, M. A. A. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa STELLA dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, vol. 1, nº 1, p. 16–42, 2010. DOI 10.6008/ESS2179-6858.2010.001.0002. Disponível em: <https://www.sustenere.inf.br/index.php/rca/article/view/108>. Acessado em: 4 maio 2024.

STADDON, C.; WARD, S.; DE VITO, L.; ZUNIGA-TERAN, A.; GERLAK, A. K.; SCHOEMAN, Y.; HART, A.; BOOTH, G. Contributions of green infrastructure to enhancing urban resilience. **Environment Systems and Decisions**, vol. 38, nº 3, p. 330–338, 1 set. 2018. DOI 10.1007/s10669-018-9702-9. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-018-9702-9>. Acessado em: 20 fev. 2023.

STERMAN, J. System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. in: ESD Internal Symposium, de 29 a 30/05/2002, Cambridge, MA. 2002.

Engineering Systems Division (ESD) Working Paper Series [...]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division, 2002. p. 31. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102741>. Acessado em: 19 abr. 2024.

TAYLOR, R. Rethinking water scarcity: The role of storage. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, vol. 90, nº 28, p. 237–248, 2009. DOI 10.1029/2009EO280001. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009EO280001>. Acessado em: 18 maio 2024.

TSUTIYA, M. T.; ALEM SOBRINHO, P. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Epusp/PHD, 1999.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, vol. 22, nº 63, p. 97–112, 2008a. DOI 10.1590/s0103-40142008000200007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/SfqYWrhrvtkxybFsJYQtx7v/?lang=pt>. Acessado em: 18 maio 2024.

TUCCI, C. E. M. Gestão integrada das águas urbanas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, vol. 5, nº 2, p. 71–81, 2008b. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/72/888a0e0cd38219dabd9bb3676b7a82ea_7cadf32bf8ac9642d38b2d42832bde55.pdf.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. de M. Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para a "visão mundial da água". **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 5, nº 3, p. 31–43, 2000. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/232499/000277300.pdf?sequence=1>. Acessado em: 28 jun. 2022.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 3-14 June 1992 (Agenda 2021)**. New York: UN, 1993. Disponível em: <https://www.un.org/esa/dsd/agenda21/Agenda%2021.pdf>. Acessado em: 7 mar. 2024.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Water Conference, Mar del Plata, 14-25 March 1977**. New York: UN, 1977. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/724642>. Acessado em: 7 mar. 2024.

UNITED NATIONS. The Dublin Statement on Water and Sustainable Development. 1992. **UN Documents: Gathering a body of global agreements**. Disponível em: <http://www.un-documents.net/h2o-dub.htm>. Acessado em: 7 mar. 2024.

UNITED NATIONS. **United Nations Millennium Declaration : resolution adopted by the General Assembly**. New York: [s. n.], 9 ago. 2000. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/422015>. Acessado em: 7 mar. 2024.

VAN DEN BRANDELER, F. A. **Scalar Mismatches in Metropolitan Water Governance: A Comparative Study of São Paulo and Mexico City**. 2020. 272 f. PhD thesis – Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, 2020. Disponível em: <https://dare.uva.nl/search?identifier=9a84eff5-dcf5-4d20-a99d-5727451e10f3>. Acessado em: 9 jan. 2024.

VENTANA SYSTEMS INC. User Guide - Vensim Introduction & Tutorials. 2023. **Vensim**. Disponível em: https://vensim.com/documentation/users_guide.html. Acessado em: 17 abr. 2024.

VILLELA, P. R. C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. Juiz de Fora: [s. n.], 2005. Disponível em: www.agrosoft.org.br/ds. Acessado em: 18 out. 2023.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. In: **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3ª. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. vol. 01.

VÖRÖSMARTY, C. J.; DOUGLAS, E. M.; GREEN, P. A.; REVENGA, C. Geospatial Indicators of Emerging Water Stress: An Application to Africa. **AMBIO**, vol. 34, nº 3, p. 230–236, 1 maio 2005. DOI 10.1579/0044-7447-34.3.230. Disponível em: <https://bioone.org/journals/ambio-a-journal-of-the-human-environment/volume-34/issue-3/0044-7447-34.3.230/Geospatial-Indicators-of-Emerging-Water-Stress--An-Application-to/10.1579/0044-7447-34.3.230.short>. Acessado em: 18 maio 2024.

WATKINS, K.; CARVAJAL, L.; COPPARD, D.; FUENTES, R.; GHOSH, A.; GIAMBERARDINI, C. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2006 (Resumo)**. Nova York: PNUD Nova York, 2006. Disponível em: <https://hdr.undp.org/system/files/documents/2006-hdr-portuguese-summary.2006-hdr-portuguese-summary>. Acessado em: 18 maio 2024.

WEI, T.; LOU, I.; YANG, Z.; LI, Y. A system dynamics urban water management model for Macau, China. **Journal of Environmental Sciences**, vol. 50, p. 117–126, 2016. DOI 10.1016/j.jes.2016.06.034. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074216306301>. Acessado em: 18 maio 2024.

WILLUWEIT, L.; O'SULLIVAN, J. J. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the Dynamic Urban Water Simulation Model. **Water research**, vol. 47, nº 20, p. 7206–7220, 2013. DOI 10.1016/j.watres.2013.09.060. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135413008257>. Acessado em: 18 maio 2024.

WWAP - WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations world water development report 4: managing water under uncertainty and risk**. Paris: UNESCO Paris, 2012. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/3892696?v=pdf>. Acessado em: 28 jan. 2023.

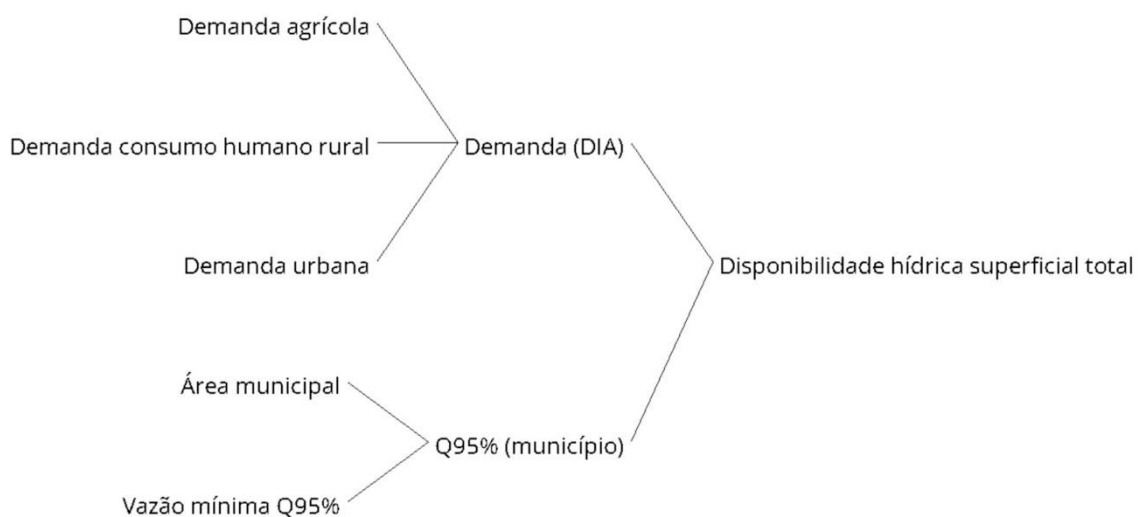
YANG, W.; HYNDMAN, D. W.; WINKLER, J. A.; VIÑA, A.; DEINES, J. M.; LUPI, F.; LUO, L.; LI, Y.; BASSO, B.; ZHENG, C.; MA, D.; LI, S.; LIU, X.; ZHENG, H.; CAO, G.; MENG, Q.; OUYANG, Z.; LIU, J. Urban water sustainability: Framework and application. **Ecology and Society**, vol. 21, nº 4, 1 dez. 2016. DOI 10.5751/ES-08685-210404. Disponível em: <https://www.ecologyandsociety.org/vol21/iss4/art4/>. Acessado em: 18 maio 2024.

ZARGHAMI, M.; AKBARIYEH, S. System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 60, p. 99–106, 1 mar. 2012. DOI 10.1016/J.RESCONREC.2011.11.008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911002412?via%3Dihub>. Acessado em: 13 abr. 2023.

ANEXO A: Arranjos entres os componentes do modelo dinâmico

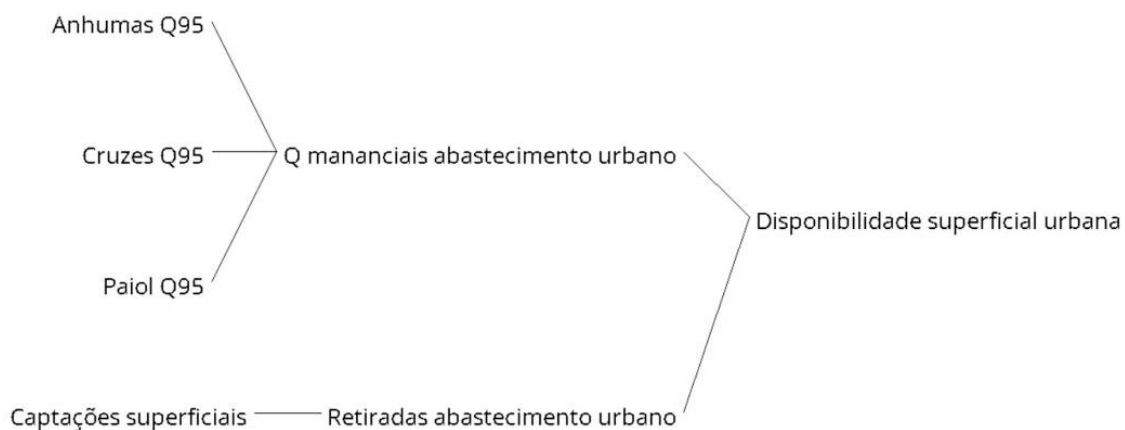
Para a definição das disponibilidades hídricas foram definidos os seguintes arranjos entre os componentes:

Figura 43: Disponibilidade hídrica superficial total.



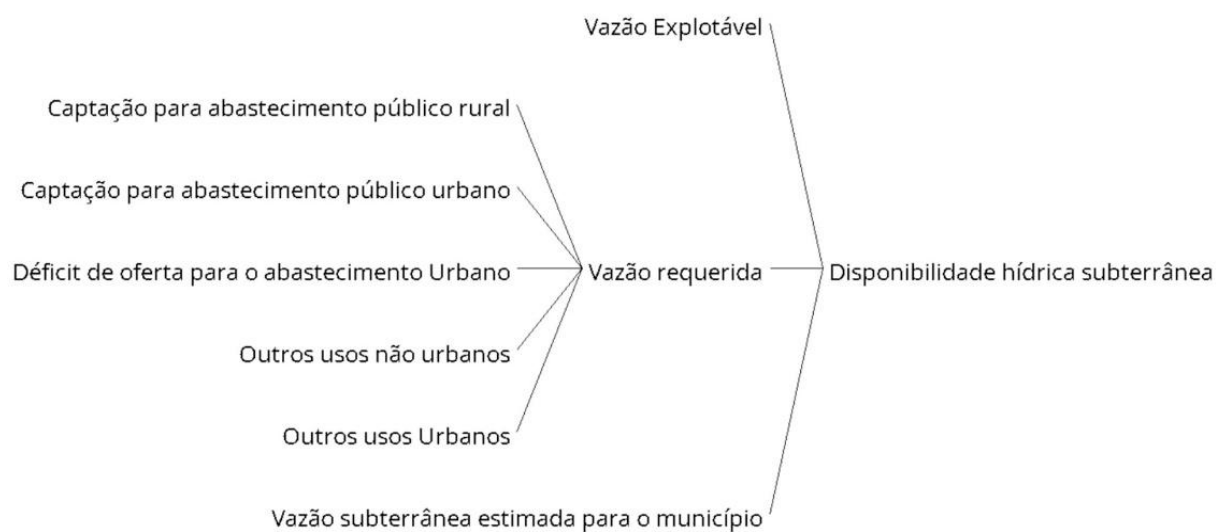
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44: Disponibilidade hídrica superficial urbana.



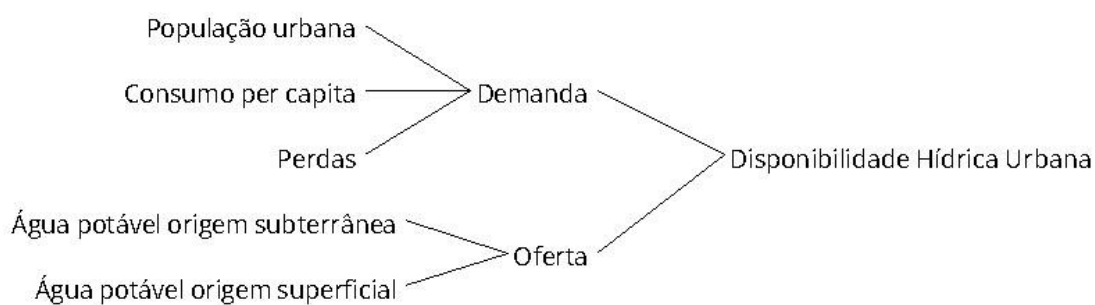
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45: Disponibilidade hídrica subterrânea.



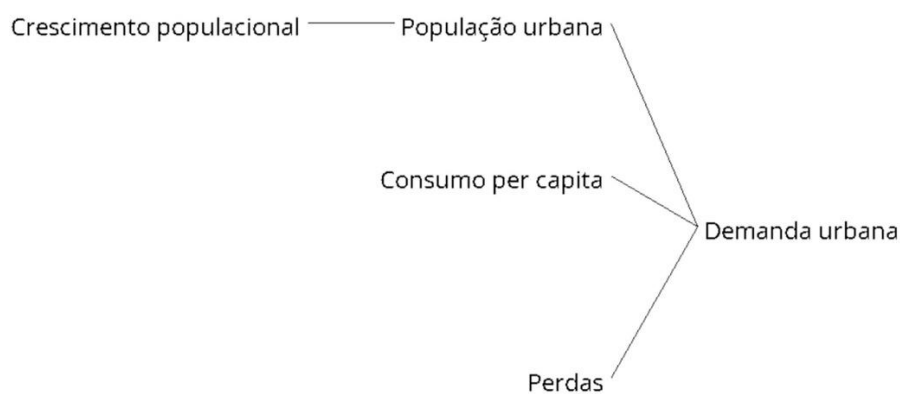
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46: Disponibilidade hídrica urbana.



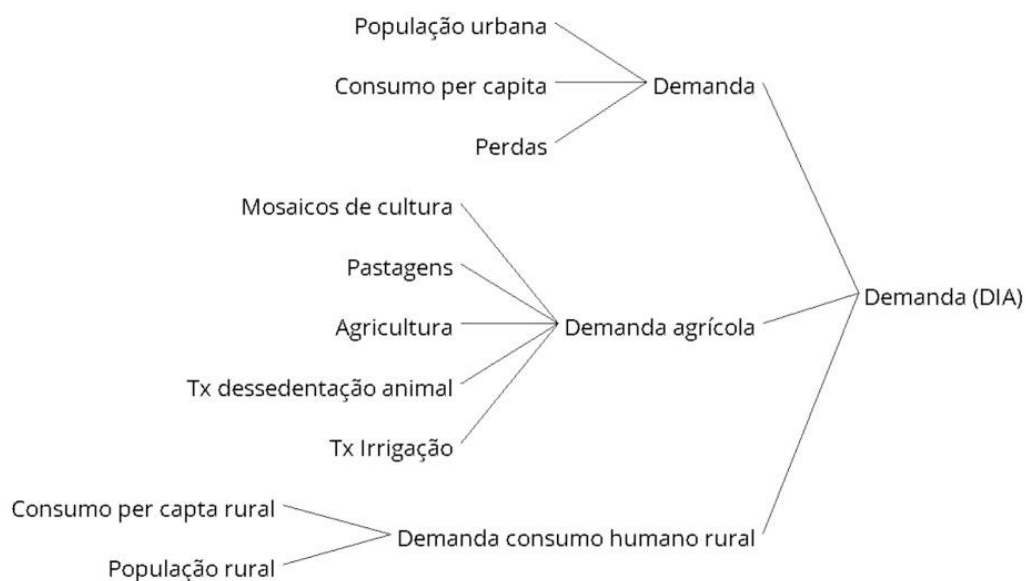
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47: Demanda urbana



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48: Demanda total (Doméstica, industrial e agrícola – DIA).



Fonte: Elaborado pelo autor.

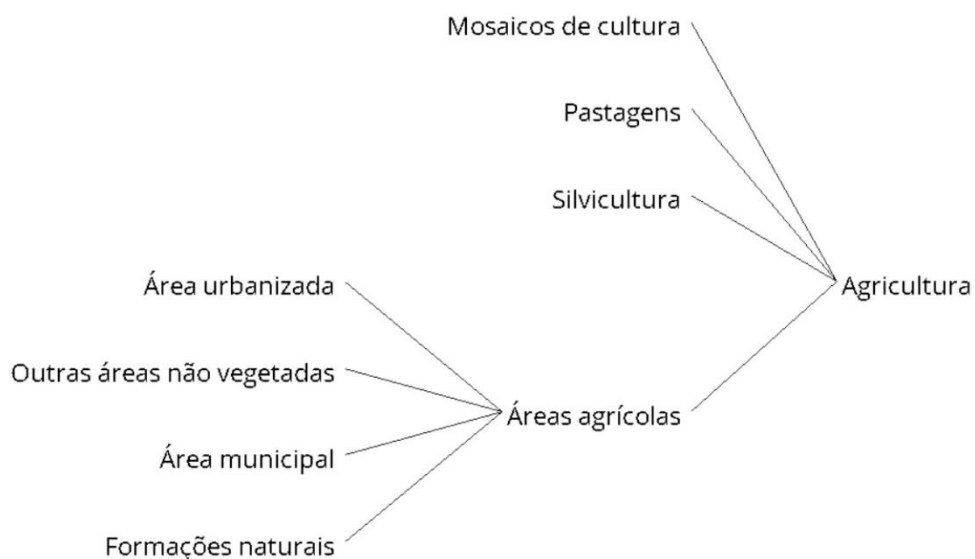
Para a definição das demandas rurais foram definidos os seguintes arranjos entre os componentes:

Figura 49: Áreas rurais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

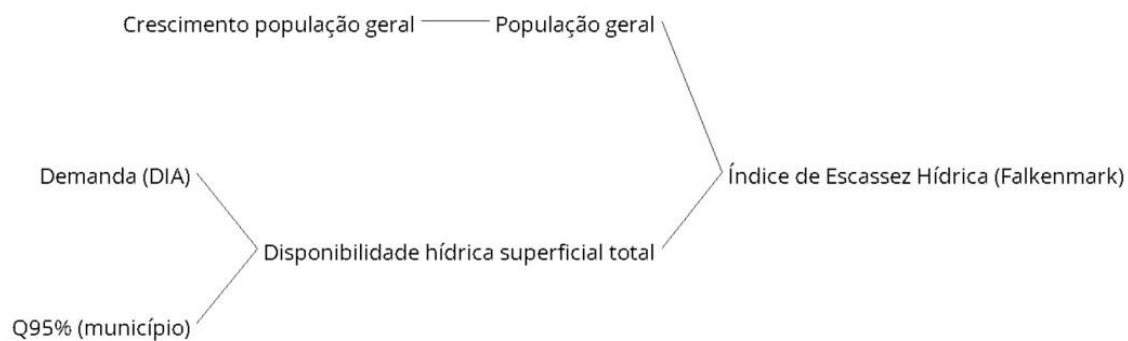
Figura 50: Áreas destinadas à agricultura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

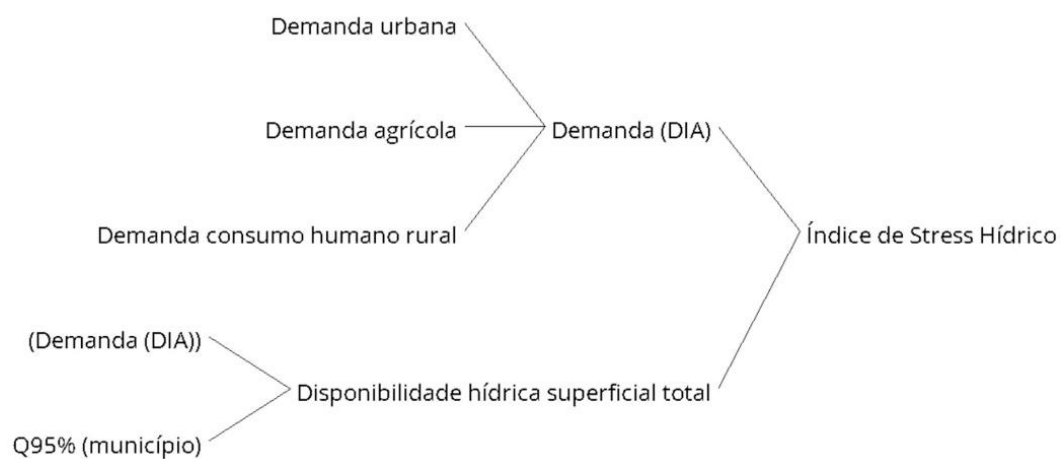
Para a verificação da condição hídrica do município foram definidos os seguintes arranjos, estabelecidos a partir dos indicadores de escassez e estresse hídrico:

Figura 51: Índice de escassez hídrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52: Índice de estresse hídrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO B: Metodologia de estimativa populacional

Taxa de Decrescimento Populacional (TDC)

A TDC é um método matemático, baseado na premissa de que na medida em que a cidade cresce a taxa de crescimento torna-se menor e a população tende a um valor de saturação (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 1999; VON SPERLING, 2005).

$$\frac{dP}{dt} = K_d \cdot (P_s - P) \quad (2)$$

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_1)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (3)$$

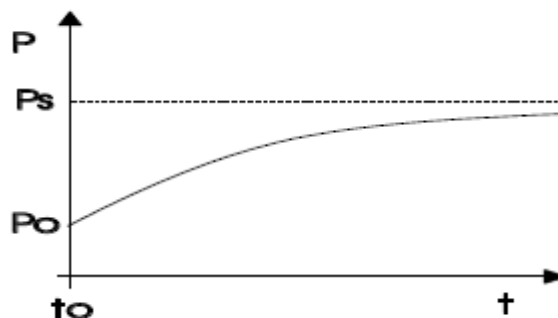
$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot [1 - e^{-K_d \cdot (t - t_0)}] \quad (4)$$

$$K_d = \frac{-\ln\left[\frac{(P_s - P_2)}{(P_s - P_0)}\right]}{t_2 - t_0} \quad (5)$$

$$CD = 1 - \frac{\sum (Y_{i_{obs}} - Y_{i_{est}})^2}{\sum (Y_{i_{obs}} - Y_{i_{méd}})^2} \quad (6)$$

Onde: dP/dt = taxa de crescimento da população em função do tempo; P_0 , P_1 , P_2 = populações nos anos t_0 , t_1 , t_2 ; P_t = população estimada no ano t (habitantes); P_s = população de saturação t (habitantes); K_d = coeficiente; CD = Coeficiente de determinação; Y_{obs} = população observada; Y_{est} = valor da população estimada; $Y_{méd}$ = média da população observada.

Figura 53: Curva característica método da Taxa de Decrescimento Populacional.



Fonte: Von Sperling, M. (2005).

População de saturação

Para a estimativa populacional pela TDC é necessário a definição da população de saturação e do coeficiente “Kd” que podem ser obtidos de forma analítica, conforme equação 02 e 04. Para esta pesquisa, a população de saturação foi estimada a partir dos estudos de zoneamento demográfico e a ocupação das zonas isodensas apresentadas pelo PMSB (DAAE, 2012a) e pelo PDA (DAAE, 2022b). Para isso, considerou-se que a ocupação das zonas isodensas levarão ao adensamento destas regiões que têm como limite de ocupação as densidades demográficas estimadas para cada zona isodensa. Desta forma, considerando que o maior contingente populacional possível para estas áreas é o que se iguala a densidade demográfica máxima para cada zona ou subzona isodensa, obtém-se que a população de saturação para a ocupação das zonas isodensas é de 385.410 habitantes, conforme Tabela 66.

Tabela 66: População de saturação, Plano Diretor da Água (PDA).

Zona	Condição atual (2020)			Condição de saturação		
	Ocupação média	População	Área ocupada	Ocupação de saturação	População estimada	Área ocupada
	(%)	(habitantes)	(ha)	(%)	(habitantes)	(ha)
ZI-1	81,55	94.815	1.404	100,00	116.758	1.710
ZI-2	86,92	75.310	1.175	100,00	92.669	1.427
ZI-3	72,92	35.754	792	100,00	49.623	1.156
ZI-4	68,61	19.349	225	100,00	28.852	341
ZI-5	59,74	6.818	794	100,00	12.005	1.409
ZEU1	0,00	0	0	100,00	4.050	205
ZEU2	1,11	889	41	100,00	60.583	2.025
ZEU3	7,73	133	24	100,00	13.576	1.033
ZI	72,15	2.861	789	100,00	4.954	1.242
ZI Exp	11,00	18	5	100,00	2.340	585
Total	-	235.947	5.248	100,00	385.410	11.133

Fonte: Elaborado pelo autor com base em DAAE (2022b).

Coeficiente “Kd”

Para a obtenção do coeficiente “Kd”, coeficiente de regressão não linear, foi utilizado a rotina “solver” do software Microsoft Excel, aplicado ao Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 1999; VON SPERLING, 2005).

Para a determinação da curva de crescimento e do coeficiente “Kd” foram utilizados dados censitários do IBGE (IBGE, 2001, 2010) para os anos de 2000 e 2010 e as estimativas do SNIS (SNIS, 2023) para o ano de 2020.

Tabela 67: Determinação do coeficiente Kd.

Item	Ano	População observada	População Estimada	Q _{erro}
		(a)	(b)	(a-b) ²
P0	2000	173.078	173.078	0
P1	2010	202.488	204.147	2.752.281
P2	2020	231.321	230.671	422.500

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Von Sperling (2005), IBGE (2001, 2010) e SNIS (2023).

Onde:

S_{qerro} : (Soma do quadrado dos erros)	3.174.781
CD (Coeficiente de determinação):	0,9981
População de Saturação (PS):	385.410
Kd:	0,01582

Com a determinação da “população de saturação” e do coeficiente “Kd”, foi realizada a projeção da evolução populacional no software Microsoft Excel® com a aplicação da resolução analítica do método da Taxa de Decrescimento Populacional (TDC) e posteriormente aplicado ao modelo no software Vensim PLE, com a aplicação da resolução numérica do método da Taxa de Decrescimento Populacional (TDC), obtendo-se a seguinte estimativa populacional.

Tabela 68: Projeção da população para Araraquara.

Ano	População		Ano	População	
	Municipal	Urbana		Municipal	Urbana
2020	236.959	230.670	2036	270.524	265.275
2021	239.295	233.099	2037	272.371	267.160
2022	241.598	235.490	2038	274.192	269.016
2023	243.867	237.843	2039	275.986	270.843
2024	246.103	240.159	2040	277.754	272.642
2025	248.307	242.439	2041	279.496	274.412
2026	250.478	244.683	2042	281.213	276.154
2027	252.617	246.892	2043	282.904	277.869
2028	254.726	249.066	2044	284.571	279.557
2029	256.804	251.206	2045	286.214	281.218
2030	258.851	253.312	2046	287.833	282.853
2031	260.869	255.386	2047	289.428	284.463
2032	262.857	257.427	2048	291.000	286.048
2033	264.816	259.436	2049	292.549	287.607
2034	266.747	261.413	2050	294.075	289.142
2035	268.649	263.359	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Von Sperling (2005), IBGE (2001, 2010) e SNIS (2023).

ANEXO C: Parâmetros e variáveis do modelo dinâmico

Tabela 69: Descrição dos parâmetros e variáveis do modelo de dinâmica de sistemas.

Item	Parâmetro	Tipo	Valor inicial	Unidade	Descrição
1	Agricultura	Variável	-	km ²	Áreas agrícolas-(Mosaicos de cultura+Pastagens+Silvicultura)
2	Anhumas Q95	Constante	0,551	m ³ /s	Fonte: (DAAE, 2022)
3	Area urbanizada	Variável	-	km ²	INTEG(Crescimento da ocupação, valor inicial 52.48)
4	Água potável origem subterrânea	Variável	-	m ³ /s	Poços profundos; Valor médio captado para o ano de 2020 (SNIS, 2023).
5	Água potável origem superficial	Variável	-	m ³ /s	Sistema de tratamento de Água; Valor médio captado para o ano de 2020 (SNIS, 2023).
6	Área municipal	Constante	1003,63	km ²	Equivalente à área municipal (ARARAQUARA, 2014)
7	Áreas rurais	Variável	-	km ²	Área municipal-(Area urbanizada+Formações naturais+Outras áreas não vegetadas)
8	Capacidade de tratamento de água instalada	Variável	-	m ³ /s	ETA Fonte+ETA Paiol
9	Capacidade instalada	Constante	1,143	m ³ /s	Para a fixação da capacidade instalada, foi considerada a somatória das vazões médias dos poços instalados em 2020 (DAAE, 2022).
10	Capacidade instalada ETE Araraquara	Constante	0,800	m ³ /s	Fonte: (DAAE, 2012b)
11	Captação Anhumas	Constante	0,110862	m ³ /s	Valor médio captado para o ano de 2020 (SNIS, 2023).
12	Captação Cruzes	Constante	0,22861	m ³ /s	Valor médio captado para o ano de 2020 (SNIS, 2023).
13	Captação Paiol	Constante	0,0536628	m ³ /s	Valor médio captado para o ano de 2020 (SNIS, 2023).
14	Captação para abastecimento público rural	Constante	0,020	m ³ /s	Valor referente à vazão média dos poços instalados em áreas rurais e pertencentes ao sistema de abastecimento público para o ano de 2020 (DAAE, 2022).
15	Captação para abastecimento público urbano	Constante	0,703583206	m ³ /s	Valor referente ao volume produzido por poços instalados em áreas urbana e pertencentes ao sistema de abastecimento público para o ano de 2020 (DAAE, 2022; SNIS, 2023).

16	Captações superficiais	Variável	-	m³/s	IF THEN ELSE((CapAnhumas+CapCruzes+CapPaiol)<Vazão Outorgada,(CapAnhumas+CapCruzes+CapPaiol),Vazão Outorgada)
17	Comprimento de rede por ligação	Constante	0,00937	km	Índice obtido pela média de 2010 a 2020 do indicador SNIS IN021 (SNIS, 2023).
18	Consumo per capita	Variável	-	m³/s	IF THEN ELSE(Time<2024,0.25/86400,Tx de redução consumo per capta(Time)); (DAAE, 2022).
19	Consumo per capta rural	Constante	1,44676E-06	m³/s	Fonte: (ANA, 2019).
20	Contribuição parasitária	Variável	-	m³/s	(Índice de contribuição/1000)*Extensão das redes de esgoto
21	Crescimento da ocupação	Variável	-	-	Area urbanizada*K
22	Crescimento populacional	Variável	-	-	Kd*(Ps-População urbana)
23	Crescimento população geral	Variável	-	-	Kd geral*(PS geral-População geral)
24	Cruzes Q95	Constante	0,160	m³/s	Fonte: (DAAE, 2022).
25	Demanda urbana	Variável	-	m³/s	População urbana*(Consumo per capita+Consumo per capita*Perdas)
26	Demanda (DIA)	Variável	-	m³/s	Demanda agrícola+Demanda Urbana+Demanda consumo humano rural
27	Demanda agrícola	Variável	-	m³/s	(Mosaicos de cultura*Tx Irrigação)+(Pastagens*Tx dessedentação animal)+(Agricultura*Tx Irrigação)
28	Demanda consumo humano rural	Variável	-	m³/s	População rural*Consumo per capta rural
29	Densidade média (hab/ha)	Variável	-	hab/ha	População urbana/(Area urbanizada*100)
30	Déficit de capacidade no tratamento de efluentes ETE Araraquara	Variável	-	m³/s	IF THEN ELSE(Efluente>Capacidade instalada ETE Araraquara,Efluente-Capacidade instalada ETE Araraquara,0)
31	Déficit de oferta para o abastecimento Urbano	Variável	-	m³/s	IF THEN ELSE(Disponibilidade Hídrica Urbana<0,ABS(Disponibilidade Hídrica Urbana),0)
32	Disponibilidade hídrica subterrânea	Variável	-	m³/s	(Vazão subterrânea estimada para o município-(Vazão subterrânea estimada para o município-Vazão Explotável))-Vazão requerida
33	Disponibilidade hídrica superficial total	Variável	-	m³/s	"Q95% (município)"-"Demanda (DIA)"
34	Disponibilidade Hídrica Urbana	Variável	-	m³/s	ACTIVE INITIAL (Oferta-Demanda, 0,822)

35	Disponibilidade superficial urbana	Variável	-	m³/s	Q mananciais abastecimento urbano-Retiradas abastecimento urbano
36	Efluente	Variável	-	m³/s	$((\text{População urbana} \times \text{Consumo per capita}) \times 0.8) + \text{Contribuição parasitária}$
37	Efluente Tratado	Variável	-	m³/s	ETE Araraquara
38	ETA Fonte	Constante	0,500	m³/s	Capacidade instalada (DAAE, 2022).
39	ETA Paiol	Constante	0,160	m³/s	Capacidade instalada (DAAE, 2022).
40	ETE Araraquara	Variável	-	m³/s	$\text{IF THEN ELSE}(\text{Efluente} < \text{Capacidade instalada ETE Araraquara}, \text{Efluente}, \text{Capacidade instalada ETE Araraquara}, 0)$
41	Extensão das redes de esgoto	Variável	-	km	$(\text{Ligações por Km}^2 \times \text{Area urbanizada}) \times \text{Comprimento de rede por ligação}$
42	Extrapolação do limite explotável	Variável	-	%	$(\text{Vazão requerida} / \text{Vazão Explotável}) \times 100$
43	FINAL TIME	Constante	2050	Year	The final time for the simulation.
44	Formações florestais	Variável	-	km²	$\text{INTEG}(\text{Formações florestais} \times \text{Tx FormNatural florestais}, 106.45)$; Utilizado como valor inicial o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
45	Formações naturais	Variável	-	km²	Formações florestais+Formações não florestais+Rios e lagos
46	Formações não florestais	Variável	-	km²	$\text{INTEG}(\text{Formações não florestais} \times \text{Tx FormNatural não florestal}, 17.97)$; Utilizado como valor inicial o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
47	INITIAL TIME	Constante	2020	Year	The initial time for the simulation.
48	Índice de contribuição	Constante	0,150	m³/s.km²	Fonte: (NUVOLARI, 2011)
49	Índice de Escassez Hídrica (Falkenmark)	Variável	-	m³pessoa/ano	$(\text{Vazão mínima Q95\%} \times 365 \times 86400) / \text{População geral}$; (KUMMU et al., 2016)
50	Índice de Stress Hídrico	Variável	-	%	$\text{"Demanda (DIA)" / Vazão mínima Q95\%}$; (KUMMU et al., 2016)
51	K	Constante	0,0127535	-	Coeficiente calculado pelo autor.
52	Kd	Constante	0,0158204	-	Coeficiente calculado pelo autor.
53	Kd geral	Constante	0,0146838	-	Coeficiente calculado pelo autor.
54	Ligações por Km²	Constante	2450	Lig/km²	Índice obtido pela relação entre a variável "área urbanizada" e o indicar ES009 do SNIS (SNIS, 2023).
55	Mosaicos de cultura	Variável	227,200	km²	$\text{INTEG}(\text{Mosaicos de cultura} \times \text{Tx mosaico}, 227.2)$; Utilizado como valor inicial o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).

56	Oferta	Variável	-	m³/s	Água potável origem subterrânea+Água potável origem superficial
57	Outorga Anhumas	Constante	0,200	m³/s	Fonte: (DAAE, 2022)
58	Outorga Cruzes	Constante	0,169	m³/s	Fonte: (DAAE, 2022)
59	Outorga Paiol	Constante	0,080	m³/s	Fonte: (DAAE, 2022)
60	Outras áreas não vegetadas	Variável	2,180	km²	INTEG (Tx Outras áreas, 2.18); Utilizado como valor inicial o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
61	Outros usos não urbanos	Constante	0,253833	m³/s	Valor equivalente soma da média dos valores outorgados na área rural do município, entre os anos de 2.015 a 2.020, para as finalidades de uso "irrigação", "Industria", "Consumo humano" e "Outros usos" (ANA, 2.024).
62	Outros usos Urbanos	Constante	0,614833	m³/s	Valor equivalente soma da média dos valores outorgados na área urbana do município, entre os anos de 2.015 a 2.020, para as finalidades de uso "Consumo Humano", "Industria", "Irrigação" e "Outros usos" (ANA, 2.024).
63	Paiol Q95	Constante	0,124	m³/s	Fonte: (DAAE, 2022)
64	Pastagens	Variável	26,570	km²	INTEG (Pastagens*Tx pastagens, 26.57); Utilizado como valor inicial o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
65	Perdas	Variável	0,046	%	IF THEN ELSE(Time<2023,0.458,(Tx redução de perdas(Time))); Fonte: (DAAE, 2022).
66	Perdas no tratamento	Constante	0,030	%	Fonte: (DAAE, 2022).
67	Poços profundos	Variável	-	m³/s	IF THEN ELSE(Captação para abastecimento público urbano<Capacidade instalada,Captação para abastecimento público urbano,Capacidade instalada)
68	População geral	Variável	238662	Pessoas	INTEG (Crescimento população geral,238662); População estimada para 2.020 (SNIS, 2023).
69	População rural	Variável	7341	Pessoas	População geral-População urbana
70	População urbana	Variável	231321	Pessoas	INTEG (Crescimento populacional,231321); População estimada para 2.020 (SNIS, 2023).
71	Ps	Constante	385410	Pessoas	População de saturação, população urbana.
72	PS geral	Constante	397265	Pessoas	População saturação, população total.
73	Q mananciais abastecimento urbano	Constante	-	m³/s	Anhumas Q95+Cruzes Q95+Paiol Q95
74	Q95% (município)	Variável	-	m³/s	Área municipal*"Vazão mínima Q95%"

75	Retiradas abastecimento urbano	Variável	-	m³/s	Captações superficiais
76	Rios e lagos	Constante	2,01000000	km²	Utilizado o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
77	SAVEPER	Constante	TIME STEP	Year	The frequency with which output is stored.
78	Silvicultura	Variável	66,40000000	km²	INTEG (Tx Silvicultura*Silvicultura,66.42); Utilizado como valor inicial o valor para o ano de 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
79	Sistema de tratamento de Água	Variável	-	m³/s	IF THEN ELSE(Captações superficiais<Capacidade de tratamento de água instalada,Captações superficiais-(Captações superficiais*Perdas no tratamento),Capacidade de tratamento de água instalada-(Capacidade de tratamento de água instalada*Perdas no tratamento))
80	TIME STEP	Constante	1	Year	The time step for the simulation.
81	Tx de redução consumo per capta	Tabela	0,00500000	%a.a.	Cenário 01 e 02 [(0,0)-(10,10)],(2024,2.89352e-06),(2050,2.89352e-06)); cenário 03 [(0,0)-(10,10)],(2024,2.89352e-06),(2050,2.53996e-06); Redução de 0,5% ao ano, de 2025 a 2050, no consumo per capta com a adoção de fontes alternativas;
82	Tx dessedentação animal	Constante	0,00027332	m³/s.km²	Valor obtido pela mediana da relação entre a vazão de retirada para dessedentação animal (ANA, 2022) e as áreas definidas como "pastagens" para o período de 2000 a 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
83	Tx FormNatural florestais	Constante	-0,00085000	%a.a.	Valor obtido a partir da variação total para o item entre os anos de 2000 e 2020 (valor2020-valor2000/valor2000)/(2020-2000)(MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
84	Tx FormNatural não florestal	Constante	0,01350000	%a.a.	Valor obtido a partir da variação total para o item entre os anos de 2000 e 2020 (valor2020-valor2000/valor2000)/(2020-2000)(MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
85	Tx Irrigação	Constante	0,00013783	m³/s.km²	Valor obtido pela mediana da relação entre a vazão de retirada para irrigação (ANA, 2022) e a somatória das áreas "agricultura" e "mosaico de usos" para o período de 2000 a 2020 (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
86	Tx mosaico	Constante	-0,01314000	%a.a.	Valor obtido a partir da variação total para o item entre os anos de 2000 e 2020 (valor2020-valor2000/valor2000)/(2020-2000)(MAPBIOMAS PROJECT, 2023).

87	Tx Outras áreas	Constante	0,00215000	%a.a.	Valor obtido a partir da variação total para o item entre os anos de 2000 e 2020 $(\text{valor}_{2020} - \text{valor}_{2000} / \text{valor}_{2000}) / (2020 - 2000)$ (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
88	Tx pastagens	Constante	-0,03232000	%a.a.	Valor obtido a partir da variação total para o item entre os anos de 2000 e 2020 $(\text{valor}_{2020} - \text{valor}_{2000} / \text{valor}_{2000}) / (2020 - 2000)$ (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
89	Tx redução de perdas	Variável	0,01500000	%a.a.	Cenário 01 $[(0,0)-(10,10)], (2024,0.458), (2050,0.458)$; cenário 02e 03 $[(0,0)-(10,10)], (2024,0.458), (2050,0.3092)$; Redução de 1,5% ao ano, de 2025 a 2050, no índice de perdas.
90	Tx Silvicultura	Constante	-0,00026000	%a.a.	Valor obtido a partir da variação total para o item entre os anos de 2000 e 2020 $(\text{valor}_{2020} - \text{valor}_{2000} / \text{valor}_{2000}) / (2020 - 2000)$ (MAPBIOMAS PROJECT, 2023).
91	Vazão Explotável	Constante	1,100	m³/s	Fonte: (CBH-TJ, 2016)
92	Vazão mínima Q95%	Constante	0,0045	m³/s.km²	Fonte: (SÃO PAULO, 2020b) e (CBH-TJ, 2016).
93	Vazão Outorgada	Variável	-	m³/s	OutAnhumas+OutCruzes+OutPaioI
94	Vazão requerida	Variável	-	m³/s	Captação para abastecimento público urbano+Captação para abastecimento público rural +Outros usos Urbanos+Outros usos não urbanos+Déficit de oferta para o abastecimento Urbano
95	Vazão subterrânea estimada para o município	Constante	4,250	m³/s	Vazão equivalente de 4,24l/s.km² para as bacais do município (DAAE, 2022).

Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE.