



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS**  
**HÍDRICOS)**

**LETÍCIA LACERDA FREIRE**

**ABORDAGENS QUALI-QUANTITATIVAS NA GESTÃO DOS RECURSOS**  
**HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO CEARENSE**

**FORTALEZA**

**2026**

LETÍCIA LACERDA FREIRE

**ABORDAGENS QUALI-QUANTITATIVAS NA GESTÃO DOS RECURSOS  
HÍDRICOS NO SEMIÁRIDO CEARENSE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.  
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa

FORTALEZA

2026

LETÍCIA LACERDA FREIRE

ABORDAGENS QUALI-QUANTITATIVAS NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS  
NO SEMIÁRIDO CEARENSE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.  
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa

Aprovada em: 23/02/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC) (Coorientador)

---

Dr. Berthyer Peixoto Lima  
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh)

---

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Mariana Madruga de Brito  
Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ) - Alemanha

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me acompanhar e me fortalecer.

Aos meus familiares e amigos.

Ao professor Dr. Iran Eduardo Lima Neto e ao professor Dr. Alexandre Cunha Costa pela paciência e ensinamentos ao orientarem este trabalho.

Em nome da professora Ticiano Marinho de Carvalho Studart e do professor Francisco de Assis Souza Filho, agradeço aos professores e demais profissionais do Programa de Doutorado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará.

Aos professores participantes da banca examinadora de qualificação e de defesa da tese – Ticiano Marinho de Carvalho Studart, Berthyer Peixoto Lima, Pedro Henrique Augusto Medeiros, Mariana Madruga de Brito e Guilherme Fernandes Marques, além do orientador e coorientador, já mencionados pelo tempo dedicado à correção e importantes colaborações.

À Clara de Assis Jeronimo Sales, coordenadora de gestão participativa, em nome da qual agradeço à Cogeh e aos comitês de bacia hidrográfica do Estado do Ceará.

À SEMACE por conceder os dados de monitoramento da qualidade dos rios cearenses.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

“A recomendação da bacia hidrográfica como unidade de planejamento assenta-se na justificativa que assegura que tal recorte territorial é o mais adequado para a gestão dos recursos hídricos, além de se tratar de uma unidade territorial que agrega dimensões físicas, sociais, econômicas e ambientais.” (Souza Filho; Aquino, 2024, p. 109).

## RESUMO

As questões relacionadas à qualidade da água e à participação social tornaram-se centrais nas discussões sobre segurança hídrica, em virtude dos impactos das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas. Nesse campo de pesquisa, os processos hidrológicos e a governança hídrica em regiões semiáridas têm sido pesquisados, quanto à adaptação sobre a alternância entre extremos de seca e aporte hídrico, somadas às complexidades das mudanças climáticas. Diante das incertezas geradas nesses cenários e dos fatores limitantes para a governança da água, pesquisadores intensificaram a aplicação de modelos e abordagens quali-quantitativas. Nesse contexto, a presente avaliou questões quali-quantitativas para a gestão dos recursos hídricos em uma região do semiárido brasileiro com mais de 30 anos de gestão participativa e com problemas severos de qualidade da água. Primeiramente, buscou-se avaliar as relações entre nutrientes, o uso e ocupação do solo e as precipitações, na escala de bacia hidrográfica, comparando 11 regiões hidrográficas do estado do Ceará. Na segunda etapa, os processos de alocação de água foram avaliados em uma amostra da rede de reservatórios da bacia hidrográfica do maior reservatório de usos múltiplos da América Latina, o Castanhão. Dados históricos (2004–2022) sobre armazenamento e liberação de água de 26 reservatórios foram analisados utilizando medidas de concordância em escalas diárias, mensais e sazonais, juntamente com registros de reuniões dos comitês de bacia hidrográfica. Adicionalmente, foi realizado o agrupamento não supervisionado de dados hidrológicos, de demanda e das correlações entre armazenamento e liberação de água. Ainda nessa etapa, o modelo DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) foi utilizado para sistematizar aspectos qualitativos e quantitativos da alocação de água. Na terceira etapa, pioneiramente, o presente trabalho aplicou a abordagem conceitual de pegada hídrica cinza para determinar a condição de armazenamento de reservatórios. Aplicou-se a proposição para 148 reservatórios distribuídos em 12 regiões hidrográficas do estado do Ceará a partir de dados de concentração de fósforo e volume armazenado entre 2008 e 2024. Os dados de limites de concentração e os poluentes adotados são variáveis arbitrarias durante o equacionamento, o que garante a replicabilidade para outras regiões e com outros poluentes. Foram identificados efeitos positivos, negativos e marginais da precipitação sobre a concentração de nutrientes nos rios. A precipitação apresentou efeito secundário quando a urbanização predomina, mas esteve associada ao aumento linear de nutrientes em regiões mais chuvosas e com menos reservatórios, e à redução linear em áreas com menor precipitação e maior desconexão hidrológica. A regressão múltipla indicou maior influência da cobertura de esgotamento e da precipitação no fósforo total, e da área urbana no

nitrogênio inorgânico. Nos processos de alocação da água, houve fracas correlações diárias entre armazenamento e liberação, influenciadas por liberações rápidas e interrupções, o que pode gerar limitações de aplicações de modelos preditivos baseados no volume de água armazenado. A análise DPSIR revelou a predominância de respostas quantitativas sobre qualitativas, favorecendo poluição e conflitos relacionados às questões qualitativas. Os reservatórios apresentaram severa deterioração da qualidade da água, e a adaptação da pegada hídrica cinza se apresentou com um instrumento importante para que as concentrações de poluentes sejam retratadas com maior atenção pelas partes envolvidas nas decisões de gestão hídrica. De modo geral, o presente trabalho reúne achados importantes para a gestão da água, propondo novas abordagens para que a hidrologia avance na consideração dos aspectos qualitativos e sociais e, conseqüentemente, na implantação de políticas de adaptação e mitigação que integrem múltiplos fatores relacionados à promoção da segurança hídrica e da conservação ambiental.

**Palavras-chave:** qualidade da água; poluição; alocação negociada; governança hídrica.

## ABSTRACT

Issues related to water quality and social participation have become central in discussions on water security, due to the impacts of anthropogenic activities on river basins. In this field of research, hydrological processes and water governance in semiarid regions have been studied about adaptation to the alternation between extremes of drought and water input, combined with the complexities of climate change. In view of the uncertainties generated in these scenarios and the limiting factors for water governance, researchers have intensified the application of qualitative and quantitative models and approaches. In this context, the present study evaluated qualitative and quantitative issues for water resources management in a region of the Brazilian semi-arid zone with more than 30 years of participatory management and with severe water quality problems. Firstly, the aim was to evaluate the relationships between nutrients, land use and land occupation, and precipitation, at the river basin scale, comparing 11 hydrographic regions in the state of Ceará. In the second stage, water allocation processes were evaluated in a sample of the reservoir network of the river basin of the largest multipurpose reservoir in Latin America, Castanhão. Historical data (2004–2022) on water storage and release from 26 reservoirs were analysed using measures of agreement at daily, monthly and seasonal scales, together with records of meetings of the river basin committees. Additionally, unsupervised clustering of hydrological data, demand data and correlations between storage and water release was carried out. Still in this stage, the DPSIR (Driver-Pressure-State-Impact-Response) model was used to systematise qualitative and quantitative aspects of water allocation. In the third stage, this study, in a pioneering manner, applied the conceptual approach of the grey water footprint to determine the storage condition of reservoirs. The proposition was applied to 148 reservoirs distributed in 12 hydrographic regions in the state of Ceará based on data on phosphorus concentration and stored volume between 2008 and 2024. The data on concentration limits and the pollutants adopted are arbitrary variables during the formulation, which ensures replicability for other regions and with other pollutants. Positive, negative and marginal effects of precipitation on nutrient concentration in rivers were identified. Precipitation showed a secondary effect when urbanisation predominates but was associated with a linear increase of nutrients in wetter regions with fewer reservoirs, and with a linear reduction in areas with lower precipitation and greater hydrological disconnection. Multiple regression indicated a greater influence of sewerage coverage and precipitation on total phosphorus, and of urban area on inorganic nitrogen. In water allocation processes, there were weak daily correlations between storage and release, influenced by rapid releases and interruptions, which may generate limitations for the application of predictive models based on

stored water volume. The DPSIR analysis revealed the predominance of quantitative responses over qualitative ones, favouring pollution and conflicts related to qualitative issues. The reservoirs showed severe deterioration of water quality, and the adaptation of the grey water footprint proved to be an important instrument for ensuring that pollutant concentrations are addressed with greater attention by the parties involved in water management decisions. Overall, this study brings together important findings for water management, proposing new approaches for hydrology to advance in considering qualitative and social aspects and, consequently, in implementing adaptation and mitigation policies that integrate multiple factors related to promoting water security and environmental conservation.

**Keywords:** water quality; pollution; negotiated allocation; water governance

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variáveis de qualidade da água monitoradas globalmente.....	17
Figura 2 – Marcos políticos institucionais da gestão dos recursos hídricos no Ceará.....	19
Figura 3 – Síntese da estrutura da tese .....	24
Figura 4 – Rede de sobreposição de visualização de palavras-chave de publicações da Web of Science.....	27
Figura 5 – Regiões hidrográficas, rio principal, área urbana e grandes reservatórios na área de estudo.....	29
Figura 6 – Indicadores de uso da terra, concentração média de nutrientes e precipitação média mensal por região hidrográfica .....	33
Figura 7 – Quantidade de reservatórios por região hidrográfica e por área superficial de bacia hidráulica .....	34
Figura 8 – Correlação de Pearson ( $R_n \times TIN$ , $R_n \times TP$ , $TP \times TIN$ ) para cada região hidrográfica.....	35
Figura 9 – Gráficos de regressão linear para regiões hidrográficas com correlação significativa entre precipitação e nutrientes .....	36
Figura 10 – Correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas considerando todas as regiões hidrográficas .....	38
Figura 11 – Reservatórios e principais usuários de água na área de estudo .....	48
Figura 12 – Classes de alerta de escassez hídrica em reservatórios do estado do Ceará.....	51
Figura 13 – Esquematização do processo de alocação negociada de água no estado do Ceará .....	53
Figura 14 – Porcentagem do volume de água armazenado versus liberação de água.....	57
Figura 15 – Correlações entre o armazenamento do reservatório e a liberação de água dos reservatórios.....	58
Figura 16 – Dendrogramas de agrupamento hierárquico .....	60
Figura 17 – Eventos recorrentes na liberação de água para manutenção do fluxo a jusante dos reservatórios estudados.....	62
Figura 18 – Estrutura DPSIR no sistema de alocação de água.....	65
Figura 19 – Reservatórios e sub-bacias incluídos na área do estudo de caso.....	82
Figura 20 – Concentrações de fósforo total do conjunto de dados.....	86
Figura 21 – Armazenamento de água e condições de armazenamento induzidas pela qualidade da água e concentrações totais de fósforo .....	87
Figura 22 – Medições da diferença entre as condições de armazenamento de água e as	

condições de armazenamento induzidas pela qualidade de água .....	88
Figura 23 – Frequência de dados com base nas classes de condição de armazenamento .....	89
Figura 24 – Resultados da cenarização.....	90
Figura 25 – Localização da sub-bacia hidrográfica selecionada para aplicação das equações .....	101
Figura 26 – Vazão total e vazão ecológica na seção de monitoramento fluvial .....	103
Figura 27 – Qualidade da água e demanda adicional induzida pela qualidade da água.....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Bacia hidrográfica do rio Acaraú
AJ	Bacia hidrográfica do rio Jaguaribe
AMR	Adutora de Montagem Rápida
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BJ	Bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe
BN	Bacia hidrográfica do Banabuiú
BWF	Pegada hídrica azul
Cagece.	Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará
CBH	Comitê de bacia hidrográfica
CO	Bacia hidrográfica do Coreau
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cogerh	Companhia de gestão de recursos hídricos do Estado do Ceará
CR	Bacia hidrográfica do Curu
EFR	Vazão ecológica
ENSO	El Niño-Oscilação Sul
Funceme	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GWF	Pegada hídrica cinza
IB	Bacia hidrográfica da Serra da Ibiapaba
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
IEHq	Índice de Escassez Hídrica considerando a qualidade
IET	Índice de Estado Trófico
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IQA	Índice de Qualidade da Água
LT	Bacia hidrográfica do Litoral
MJ	Bacia hidrográfica do Médio Jaguaribe
MT	Bacias hidrográficas metropolitanas
PIB	Produto Interno Bruto
PNQA	Política Nacional de Qualidade da Água
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
Rn	Precipitação mensal
RNQA	Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade da Água
SC	Bacia hidrográfica dos Sertões de Crateús

Semace	Superintendência de Meio Ambiente do Estado do Ceará
SL	Bacia hidrográfica do Salgado
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SUS	Sistema Único de Saúde
TIN	Nitrogênio Inorgânico Total
TP	Fósforo total
UNEP	Programa das Nações Unidas para o meio ambiente
UWR	Recursos hídricos não convencionais
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>22</b>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>22</i>
<i>1.2.3</i>	<i>Estrutura de capítulos da tese .....</i>	<i>23</i>
<b>2</b>	<b>EFEITOS DA PRECIPITAÇÃO E DO USO DO SOLO NAS RESPOSTAS SOBRE A CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES EM RIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Material e métodos .....</b>	<b>28</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Área de estudo.....</i>	<i>28</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Fontes de dados e avaliação estatística.....</i>	<i>30</i>
<b>2.3</b>	<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>33</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Usos do solo, precipitação pluvial e concentração de nutrientes na escala da região hidrográfica.....</i>	<i>33</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Análise de preditores de nutrientes pelo método backward stepwise.....</i>	<i>40</i>
<b>2.4</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>ASPECTOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS DA GESTÃO DA LIBERAÇÃO DE ÁGUA DE RESERVATÓRIOS SOB REGIME DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais e métodos.....</b>	<b>48</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Área de estudo.....</i>	<i>48</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Alocação negociada de água no estado do Ceará .....</i>	<i>51</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Fontes de dados .....</i>	<i>53</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Metodologia .....</i>	<i>54</i>
<i>3.2.4.1</i>	<i>Análise quantitativa de dados.....</i>	<i>54</i>
<i>3.2.4.2</i>	<i>Análise de atas de reuniões e aplicação do modelo DPSIR.....</i>	<i>55</i>
<b>3.3</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>55</b>
<i>3.3.1</i>	<i>Correlações entre liberação e armazenamento de água em reservatórios .....</i>	<i>56</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Agrupamento de aspectos quantitativos.....</i>	<i>60</i>
<b>3.4</b>	<b>Conclusões das reuniões do comitê e aplicação do quadro DPSIR.....</b>	<b>61</b>

3.5	Discussão .....	67
3.5.1	<i>Questões hidrológicas e de demanda nas relações entre liberação de água e armazenamento em reservatórios .....</i>	<i>67</i>
3.5.2	<i>Questões quantitativas e qualitativas da tomada de decisão.....</i>	<i>67</i>
3.6	Conclusões .....	70
4	<b>INTEGRAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NAS AVALIAÇÕES QUANTITATIVAS: UMA ABORDAGEM BASEADA NA PEGADA HÍDRICA CINZA PARA RESERVATÓRIOS SOB GESTÃO PARTICIPATIVA.....</b>	<b>76</b>
4.1	Introdução .....	76
4.2	Materiais e métodos.....	76
4.2.1	<i>Pegada hídrica cinza aplicada ao armazenamento em reservatórios.....</i>	<i>78</i>
4.2.2	<i>Área de estudo de caso.....</i>	<i>80</i>
4.2.3	<i>Conjuntos de dados e aplicação das equações propostas.....</i>	<i>83</i>
4.3	Resultados .....	85
4.4	Discussão .....	90
4.5	Conclusão .....	94
5	<b>O CONCEITO DE PEGADA HÍDRICA CINZA APLICADO À ESCASSEZ HÍDRICA .....</b>	<b>95</b>
5.1	Introdução .....	95
5.2	Material e Métodos.....	96
5.2.1	<i>Formulação das equações.....</i>	<i>96</i>
5.2.2	<i>Demandas relativas à qualidade da água para usos consuntivos, não consuntivos não poluentes e vazão ecológica .....</i>	<i>97</i>
5.2.3	<i>Demandas relativas à qualidade da água alterada por usos não consuntivos poluentes .....</i>	<i>99</i>
5.2.4	<i>Aplicação das equações .....</i>	<i>100</i>
5.3	Resultados .....	102
5.4	Discussão .....	104
5.5	Conclusão .....	106
6	<b>CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>110</b>

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 Contextualização

A poluição e a governança hídrica são os desafios globais para a gestão da água com maior predominância geográfica (Ward, 2025). De acordo com Rockström et al. (2014), na gestão hídrica global, até 1990, predominou uma abordagem econômica e de engenharia para as águas doces e o abastecimento público. Entre 1990 e 2000, essa abordagem se somou aos estudos de fluxos ambientais, e, a partir dos anos 2000, passou a considerar diferentes interações com os serviços ecossistêmicos.

Essa perspectiva se ampliou ainda mais ao considerar também as questões sociohidrológicas e a resiliência às mudanças climáticas no contexto do Antropoceno (Prakash; George; Barua, 2025). Espaço-temporalmente, a partir de projeções entre 2015 e 2050, Liu et al. (2024) identificaram que os riscos de escassez hídrica estão se ampliando em diferentes cidades do mundo, motivados pelos aumentos de demanda, pelo crescimento populacional e pelo uso de fertilizantes de culturas agrícolas.

O consenso internacional sobre a gestão dos recursos hídricos resultou em um denominador comum, a segurança hídrica, reunindo mensurações sobre disponibilidade, questões climáticas e ambientais e o acesso a água (Kumar et al., 2022). Os métodos para determinar os níveis de segurança hídrica podem considerar, sob diferentes ponderações, fatores como o índice de escassez da água, índices de seca, a depleção de águas subterrâneas, o acesso aos serviços de saneamento, índices de qualidade da água, frequência de inundações, índices de governança e questões jurídicas (Gain; Giupponi; Wada, 2016). Quantificações de pegada hídrica também tem se destacado no contexto das pesquisas internacionais para determinação de efeitos qualitativos e quantitativos sobre os usos da água pelas atividades produtivas (Hoekstra; Chapagain, 2008; Liu et al., 2016; Vliet et al., 2021).

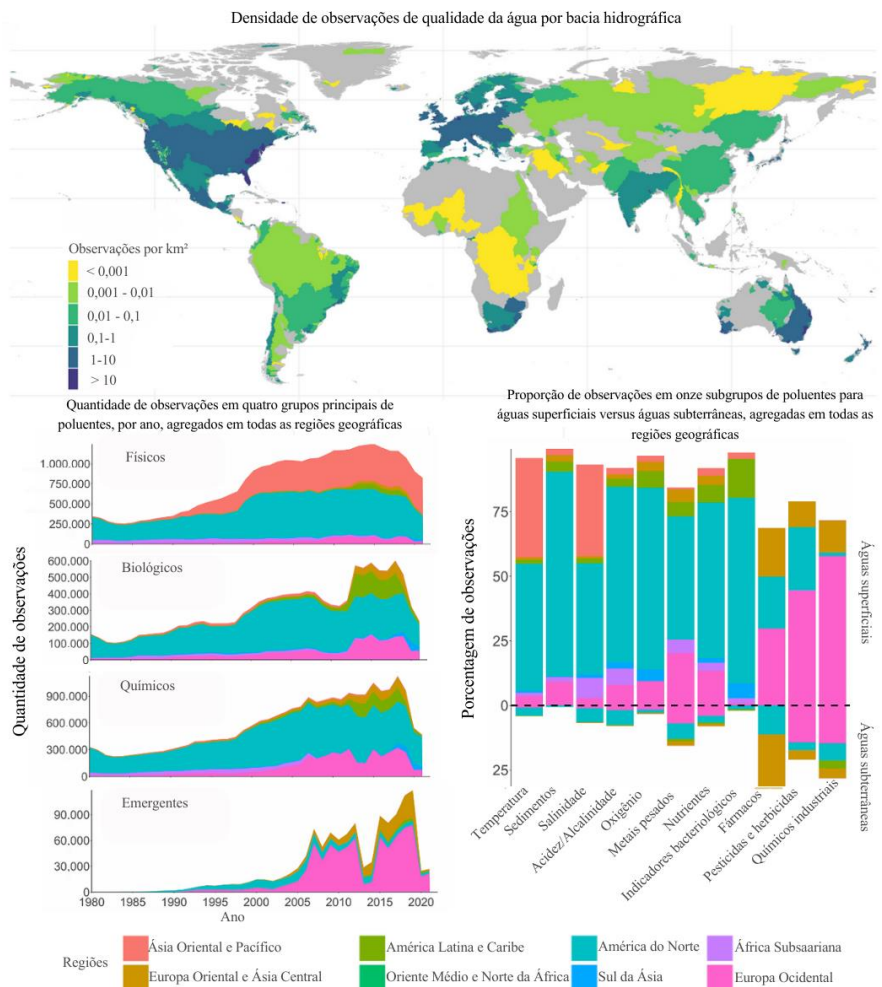
No Brasil, são consideradas para determinação do índice de segurança hídrica: (i) a dimensão humana, quanto à oferta de água para a população, (ii) a dimensão econômica, a partir da garantia de água para a agropecuária e a indústria em cenários de crise hídrica, (iii) a dimensão ecossistêmica, a qual considera as fontes poluidoras sobre os mananciais e (iv) a dimensão resiliência, que se refere à variabilidade da capacidade de armazenamento hídrico natural e construído (ANA, 2017).

De modo geral, abordagens quali-quantitativas fundamentam as definições de segurança hídrica. No entanto, lacunas ainda existem, especialmente ao se analisar grandes

modelos de gestão participativa consolidada e como o monitoramento da qualidade da água pode ser considerado nos fatores decisórios para alocação da qualidade das águas (García-Ávila et al., 2026). A consideração dos aspectos quali-quantitativos na gestão dos recursos hídricos resulta em estratégias mais adequadas quanto à distribuição da água e dos impactos gerados pela poluição (Farokhi et al., 2025).

Globalmente, ao longo do tempo, houve registros de avanços no número de variáveis de qualidade da água monitoradas; entretanto, na escala espacial, a realidade dessas medições permanece bastante heterogênea (Jones et al., 2024). Na Figura 1 se observa que na América Latina são monitoradas, geralmente, variáveis físico-químicas (temperatura, sedimentos, salinidade, nutrientes e metais pesados) e indicadores bacteriológicos, em um recorte temporal relativamente recente, quando comparado aos países da América do Norte e da Europa. Nessa mesma figura também se constata que a extensão territorial brasileira apresenta heterogeneidade sobre a densidade de estações de medição de qualidade da água.

Figura 1 – Variáveis de qualidade da água monitoradas globalmente



Fonte: Adaptado de Jones et al. (2024)

No Brasil, a rede hidrometeorológica nacional possui mais de 23 mil estações, das quais 4.762 estão sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), sendo a maioria para monitoramento das chuvas (2.834 estações pluviométricas) e dos rios (1.928 estações fluviométricas). Das estações fluviométricas, 1.305 monitoram qualidade da água, 451 monitoram sedimentos em suspensão e 1.454 realizam medições de vazão (Brasil, 2024).

A Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas Superficiais (RNQA) foi criada no ano de 2013, a partir da Resolução nº 903, de 22 de julho de 2013, da ANA (Brasil, 2013). A implantação dessa rede foi desenvolvida a partir do Programa Qualiágua, que estabelece metas a serem cumpridas e classifica as unidades da federação em três níveis de operação e possibilidade de expansão. Os estados do Ceará, Distrito Federal, Minas Gerais e São Paulo estão no grupo I, considerada a classificação mais consolidada de monitoramento e com capacidade imediata de expansão (Brasil, 2016). Diante desse contexto e dos aspectos que seguem mencionados, a presente tese foi desenvolvida com base em dados quali-quantitativos da gestão hídrica no Estado do Ceará.

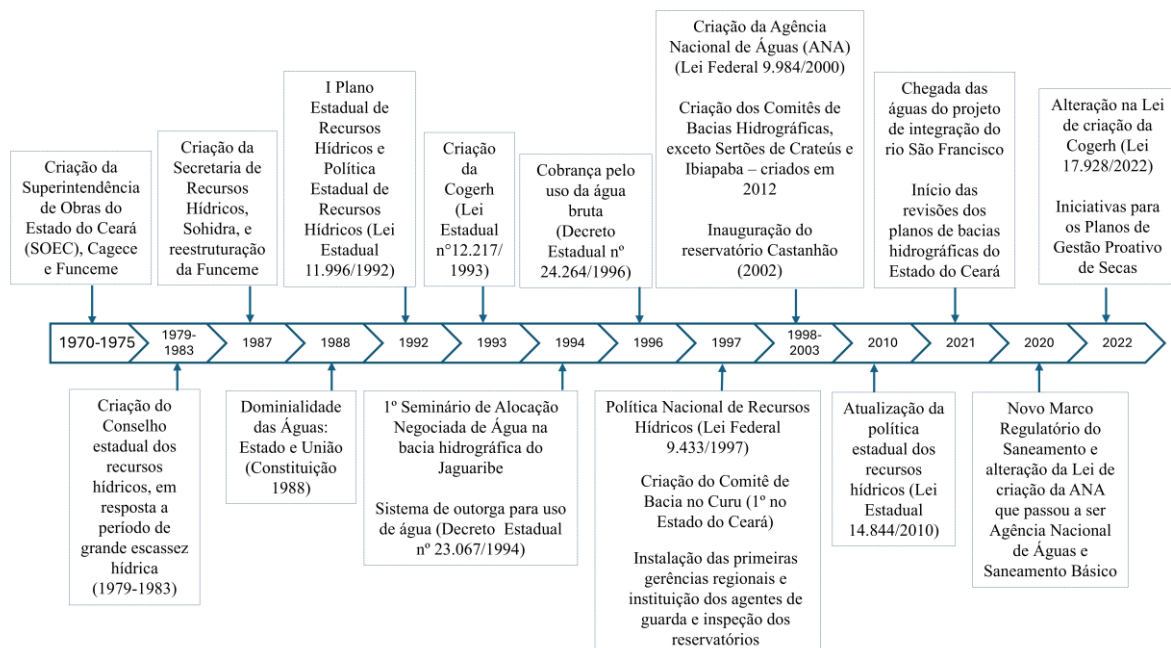
O Estado do Ceará sistematizou o programa de monitoramento de qualidade da água a partir da integração de atribuições entre os entes federais, estaduais e municipais. As águas armazenadas nos reservatórios estão sob responsabilidade de monitoramento qualitativo da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh), a fiscalização sobre o lançamento de efluentes e a análise de água em locais estratégicos de rios estão sob responsabilidade da Superintendência Estadual de Meio Ambiente (Semace), as águas para consumo humano são de responsabilidade de fiscalização da Vigilância em Saúde ambiental e da Vigilância Sanitária (ambas vinculadas ao Sistema Único de Saúde – SUS) (Ceará, 2009).

Nesse sentido, a Cogerh se integrou ao Qualiágua no ano de 2015, a partir do Acordo de Cooperação nº09/2015/ANA, entre a ANA, Cogerh e Semace (ANA, 2022). Destaca-se que as iniciativas coordenadas de monitoramento da qualidade da água por parte da companhia antecederam o programa e operam desde o final da década de 90 (Freire; Paulino; Almeida, 2001). O programa de monitoramento qualitativo dos principais rios e riachos do Estado do Ceará, sob responsabilidade da Semace, abrange 93 locais de amostragem, dos quais 49 fazem parte da RNQA (Freire, 2020).

O Estado do Ceará vivenciou diferentes períodos no histórico da governança hídrica. Uma síntese da evolução político-administrativa da gestão estadual das águas está apresentada na Figura 2. Nesse contexto histórico, a alocação negociada no Ceará pode ser dividida em três

períodos: a alocação baseada nos usuários (1993-2001), alocação baseada na oferta (1994-2009) e alocação baseada na gestão de escassez (2010 – 2020) (Aquino; Souza Filho; Sales, 2024). De acordo com Pereira et al. (2025), a qualidade da água passou a representar um fator limitante para a segurança hídrica a partir dos anos 2000, mas diversos desafios de acesso ainda precisam ser superados nessa região.

Figura 2 – Marcos políticos institucionais da gestão dos recursos hídricos no Ceará



Fonte: Adaptado de Aquino (2020), Barreira et al. (2024)

O território cearense está inserido no semiárido brasileiro e apresenta coeficiente de variação (em séries de 30 anos) de vazão afluente, precipitação e de vazão regularizada que podem ser superiores a 1, 0,4 e 0,3, respectivamente, conferindo grande incerteza sobre o atendimento de demandas (Campos; Souza Filho; Lima, 2014). Comparativamente às bacias tropicais úmidas, nas bacias tropicais semiáridas, embora os indicadores de precipitação possuam a mesma ordem de grandeza, as variáveis hidrológicas possuem diferenças superiores a uma ordem de grandeza, especialmente em razão dos processos de evaporação (Araújo; Piedra, 2009).

Historicamente, o Ceará enfrentou anos consecutivos de secas meteorológicas, desde as moderadas às extremas, que repercutiram em outros tipos de secas (hidrológica, agrícola, socioeconômica e ecológica), em que a capacidade de resposta sofreu modificações influentes diretamente na magnitude dos impactos (Nunes; Medeiros, 2020). Nesse sentido, a Cogerh classificou os anos entre 2012 e 2017 como um período de grande estiagem, onde os

trechos de perenização foram severamente reduzidos e após o ano de 2020 se iniciou um período de recuperação hidrológica (Ceará, 2025). A seca extrema e a redução do volume de água armazenada impactam diretamente sobre a qualidade das águas dos reservatórios e a concentração de fitoplâncton (Rego; Rangel-Junior; Costa, 2020). Freire e Souza Filho (2022) identificaram relações entre características hidrológicas e densidade de drenagem com as concentrações de nitrogênio e a relação entre a redução do volume armazenado com o aumento da concentração de nutrientes. Fatores como solo exposto e vegetação esparsa aumentam os processos erosivos e o transporte de nutrientes para as bacias hidrográficas nessa região (Cavalcante et al., 2018).

As alterações na qualidade da água durante a redução gradativa do volume dos reservatórios também estão relacionadas às mudanças na estratificação térmica da coluna d'água. Durante cinco anos de secas prolongadas no maior reservatório de usos múltiplos do nordeste brasileiro, o Castanhão, houve uma redução em mais de 50% de volume armazenado, simultânea a transição de uma condição oligotrófica para eutrófica, com a ruptura da termoclina, através da ação do vento e da mistura da coluna d'água, que favoreceram o aumento da disponibilidade de nutrientes (Lacerda et al., 2018). O reabastecimento de volume, após consecutivos períodos de seca podem conferir à água ainda mais problemas de qualidade, em razão da ressuspensão de sedimentos e de matéria orgânica (Monicelli et al., 2023).

Nessa região, as vazões de retirada da água para o atendimento das demandas podem ocorrer a partir de captação na bacia hidráulica dos reservatórios ou por infraestruturas de transferência hídrica, a partir da perenização de trechos de rios intermitentes (Ceará, 2025). De acordo com levantamentos realizados por Freire, Costa e Lima Neto (2021), diversos trabalhos focaram sua análise no entendimento dos reservatórios, enquanto estudos em larga escala sobre os rios do semiárido cearense são menos evidenciados na literatura.

A ANA realizou o diagnóstico quali-quantitativo dos recursos hídricos para o território brasileiro (ANA, 2016). O balanço quantitativo foi determinado considerando a relação entre demandas e disponibilidade hídrica, enquanto o qualitativo considerou o enquadramento dos rios para classe 2, pela legislação nacional, sobre a demanda bioquímica de oxigênio (ANA, 2016; Brasil, 2005). Os resultados desse levantamento, revelaram que o Ceará possui desafios severos de quantidade de água e os recursos hídricos enfrentam condições críticas quanto à qualidade.

Nos mananciais que perpassam áreas urbanas pode não haver um gradiente longitudinal bem definido da concentração de poluentes como nutrientes, oxigênio dissolvido e coliformes, em razão da forte interferência das atividades antrópicas (Moura; Henry-Silva,

2015). No entanto, na escala de bacia hidrográfica, sob influência de reservatórios, áreas urbanas e atividades agrícolas, França et al. (2022) identificaram tendências para gradiente crescente de poluição de montante para jusante.

Nesse contexto, a partir de simulações realizadas em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro, cenários de recuperação de estações de tratamento de esgoto deficitárias podem gerar efeitos tão positivos quanto a implantação de programas robustos que alterem metas de gerenciamento (Lima; Mamede; Lima Neto, 2018). Essa não é uma realidade exclusiva no Brasil. Em rios do semiárido da China, onde há redução severa da vazão dos rios, o tratamento de águas residuárias representariam melhorias significativas de qualidade da água, apesar de nutrientes e metais presentes nos sedimentos retardarem os resultados da recuperação (Cheng et al., 2018).

Deve-se enfatizar, que instrumentos de classificação da qualidade da água necessitam ser calibrados em função do local de aplicação, como os pesos de determinação do Índice de Qualidade da Água (IQA) (Ferreira et al., 2015). Sob essa perspectiva, Rolim et al. (2019) propuseram uma metodologia para a determinação do Índice de Estado Trófico (IET) no semiárido, assim como Silva, Saraiva e Becker (2024), que também adaptaram o IET e os limites de concentração de nutrientes, para os níveis de eutrofização no semiárido.

Ao adaptar a metodologia de Lawrence, Meigh e Sullivan (2002), para calcular a pobreza hídrica em região semiárida com precipitação média anual de 350 mm e evaporação correspondentes a 2038,7 mm, Álvarez et al. (2013) sugeriram a inclusão do critério de qualidade no índice, pelos níveis agravados de poluição nas principais fontes de abastecimento da região. Uma equação para a pobreza hídrica no semiárido brasileiro também foi determinada por Luna et al. (2007), onde se considera variáveis de disponibilidade hídrica, acesso à água, capacidade de gerenciamento e questões ambientais.

A gestão proativa de secas recebeu destaque nas mobilizações mais recentes para a gestão dos recursos hídricos no Ceará, diferenciando-se dos planos de bacias por apresentar um conjunto de ações preventivas e mitigadoras direcionadas para curto prazo e sob abordagem operacional, enquanto os planos de bacias atuam com as relações entre oferta, demanda e conflitos em longo prazo (Souza Filho et al., 2024). Em ambos os planos, a vulnerabilidade às secas é geralmente abordada através de questões quantitativas, apesar de mencionados com frequência o monitoramento e os conflitos relacionados a qualidade da água. Além disso, historicamente, na gestão dos recursos hídricos, o balanço quantitativo foi considerado, mas aspectos qualitativos, apesar de monitorados, não são expressos como fatores diretos de decisão (Freire et al., 2025).

Diante dessas lacunas, a presente tese investigou aspectos qualitativos relacionados à qualidade da água de rios do semiárido; ao analisar processos de alocação participativa consolidados, relações com indicadores de uso e ocupação do solo e proposição de equacionamento baseado na pegada hídrica cinza. Além disso, buscou propor ferramentas de mensurar impactos quali-quantitativos sobre a gestão das águas, seguindo na linha de avanços sobre os estudos na área de recursos hídricos no contexto da urgência climática, considerando a necessidade de instrumentos para ampliação de ações mitigadoras e adaptativas. Ao mesmo tempo, no contexto local, esta pesquisa reúne informações importantes para a gestão hídrica e apresenta resultados e metodologias de pronto uso, com abordagens de fácil entendimento para que a governança avance em um modelo de autogestão que realmente considere a redução à poluição e conservação da água na tomada de decisão.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Ampliar a compreensão sobre a interação entre precipitação, uso e ocupação do solo, governança participativa e qualidade da água, bem como propor uma equação baseada na pegada hídrica em rios e reservatórios do semiárido brasileiro para apoiar a gestão de bacias hidrográficas a partir de abordagens quali-quantitativas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a influência da precipitação e do uso e ocupação do solo nas concentrações de fósforo total e nitrogênio inorgânico total em bacias hidrográficas da região semiárida brasileira, em escala espacial.
- Analisar como um sistema de gestão participativa influencia a relação entre as decisões de armazenamento e liberação de água em reservatórios de usos múltiplos.
- Identificar como variáveis qualitativas e quantitativas influenciam a tomada de decisão na governança participativa em região com sistema consolidado de alocação negociada da água.

- Desenvolver equacionamento baseado na pegada hídrica cinza para consideração de questões qualitativas na condição de armazenamento do reservatório.
- Sistematizar o conceito de pegada hídrica cinza para aplicação em rios, considerando usos consuntivos e não consuntivos da água.

### **1.3 Estrutura de capítulos da tese**

A tese está dividida em seis capítulos (Figura 3), além da introdução (capítulo 1) e conclusões gerais e recomendações (capítulo 6), quatro capítulos possuem os conteúdos principais abordados durante a pesquisa. Dessa forma, a estrutura da tese possui enfoque nos processos físico-químicos de qualidade da água, com base nas concentrações de nutrientes e analisa aspectos quali-quantitativos e socio-hidrológicos nas decisões de governança hídrica.

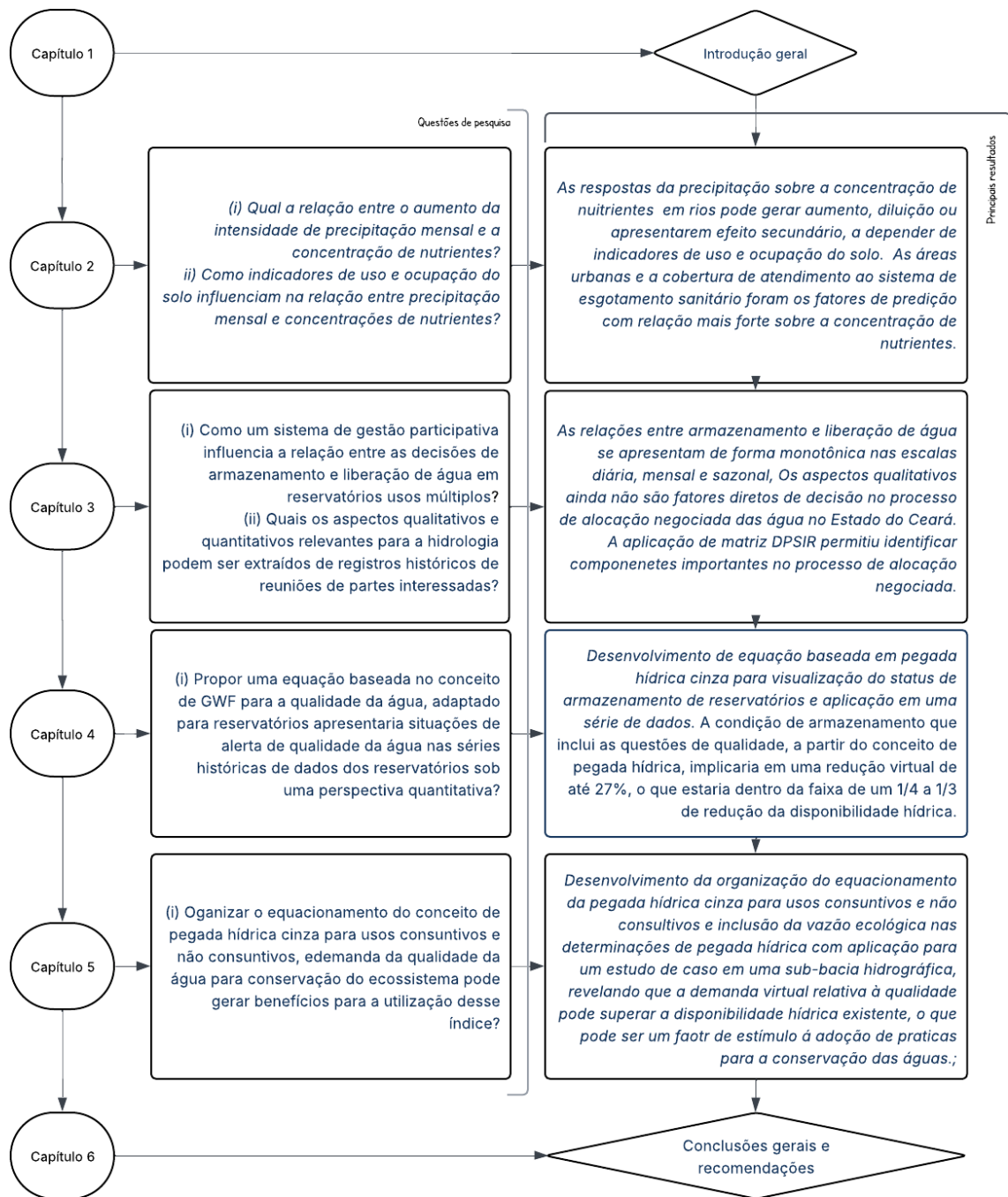
Nesse sentido, o capítulo 2 se dedicou a explorar o primeiro objetivo específico, ao abordar a relação entre o efeito da precipitação sobre a concentração de nutrientes e a relação desta com indicadores de uso e ocupação do solo. Esse capítulo investigou se a precipitação atua predominantemente como um mecanismo de diluição ou de aumento da concentração de nutrientes em rios do semiárido. Além disso, analisou se há homogeneidade das concentrações de nutrientes em bacias hidrográficas sob diferentes condições de ocupação, cobertura de rede de esgotamento sanitário, reservatórios e áreas de cultivos agrícolas.

Na sequência, no Capítulo 3, avaliou-se em um conjunto amostral de reservatórios sobre aspectos qualitativos e quantitativos no processo de decisão da alocação negociada e das relações entre volume armazenado e liberação de água. Esse capítulo buscou atender ao segundo e terceiro objetivos específicos da tese. Nesse capítulo, um conjunto de dados de armazenamento e liberação de água foram avaliados, além de registros de reunião de comitês de bacias hidrográficas, que são fundamentais para análise da gestão participativa dos recursos hídricos.

O capítulo 4 propõe uma metodologia baseada no conceito de pegada hídrica, para avaliar o volume armazenado considerando o valor de pegada hídrica induzida pela alteração da qualidade da água em relação aos padrões normativos. Nesse capítulo, foi realizado um estudo de caso com as concentrações de fósforo de uma série com mais de 5000 dados de concentrações de fósforo e armazenamento de água no estado do Ceará. Essa aplicação pode ser realizada com consideração de outros poluentes, inclusive, permite a priorização de cálculo a partir dos valores mais destoantes dos padrões normativos utilizados como referência de avaliação.

No Capítulo 5 foi elaborada a organização de conceito de pegada hídrica cinza aplicada aos estudos de escassez hídrica e uma sistematização proposta para considerar o impacto da poluição sob uma abordagem quantitativa para usos consuntivos e não consuntivos da água. Por fim, no capítulo 6, uma síntese dos principais resultados da tese foi organizada, considerando ainda as recomendações para trabalhos futuros e como os resultados do presente trabalho podem ser adotados para a gestão dos recursos hídricos.

Figura 3 – Síntese da estrutura da tese



## 2 EFEITOS DA PRECIPITAÇÃO E DO USO DO SOLO NAS RESPOSTAS SOBRE A CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES EM RIOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA

Publicado em: FREIRE, Letícia L.; COSTA, Alexandre C.; LIMA NETO, Iran E.. Effects of rainfall and land use on nutrient responses in rivers in the Brazilian semiarid region. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 195, n. 6, p. 1, 9 maio 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-023-11281-y>.

### 2.1 Introdução

O escoamento superficial e o uso e ocupação do solo são as principais fontes de exportação de nitrogênio e fósforo para os recursos hídricos (Rocha; Lima Neto, 2021; Wadnerkar et al., 2021). A influência desses processos na qualidade da água depende das condições regionais, sejam elas antrópicas (tipos de culturas agrícolas, sistema de irrigação, organização urbana) ou ambientais (tipos de solo, clima) (Lee et al., 2009; Liu; Shen; Chen, 2018). Por esse motivo, uma avaliação da variação das concentrações de nutrientes pode diferir significativamente em escala espacial (Cruz et al., 2019; Li et al., 2022).

A não estacionariedade espacial na relação entre nutrientes e qualidade da água atraiu o interesse de muitos pesquisadores e gestores de recursos hídricos para identificar a “fonte” e o “sumidouro” de poluentes (Chen et al., 2003; Jiang et al., 2013; Xu et al., 2019). Sabe-se que a substituição de florestas por áreas agrícolas e urbanas aumenta as concentrações de nutrientes nas bacias hidrográficas (Namugize et al., 2018). Esse aumento está relacionado ao solo descoberto e pode ser influenciado pela densidade de atividades agropecuárias em áreas adjacentes (Julian et al., 2017).

Nesse sentido, as atividades de agricultura, urbanização e mineração são as principais fontes de deterioração da qualidade da água no Brasil (Mello et al., 2020). Por outro lado, os processos hidrológicos e a qualidade da água também são diretamente influenciados por fenômenos climáticos atmosféricos no Hemisfério Sul (Li; McGregor, 2017). Entre 2015 e 2016, houve um forte El-Niño comparável aos de 1982/1983 e 1997/1998 (Lim et al., 2017). Essa ocorrência foi relacionada à sequência de anos secos entre 2012 e 2017 no nordeste do Brasil (Marengo et al., 2018).

Durante esse período, Wiegand et al. (2021) identificaram que o IET para 53 reservatórios no Ceará, inseridos na região semiárida brasileira, atingiu condições hipereutróficas. Os reservatórios tropicais semiáridos são vulneráveis à eutrofização devido ao aumento das concentrações de fósforo, sob cenários de mudanças climáticas (Raulino; Silveira;

Lima Neto, 2021).

A capacidade de retenção de nutrientes pelos reservatórios também está associada às altas taxas de sedimentação, que aumentam as cargas internas ao longo do tempo (Rocha; Lima Neto, 2022). Conseqüentemente, reservatórios mais antigos se tornam uma fonte em vez de um sumidouro de fósforo (Lima Neto et al., 2022).

Na estação chuvosa dos anos mais secos, as concentrações de nutrientes aumentam nos rios do semiárido cearense (Freire; Costa; Lima Neto, 2021). A sazonalidade das chuvas também possui influência sobre a dinâmica dos nutrientes nos reservatórios (Rocha; Lima Neto, 2021; Xue et al., 2016). Na estação seca, espera-se uma forte influência de descargas pontuais, devido à redução da vazão de rios intermitentes e à demanda por melhorias nos sistemas de tratamento de esgoto nessa região (Freire, 2020).

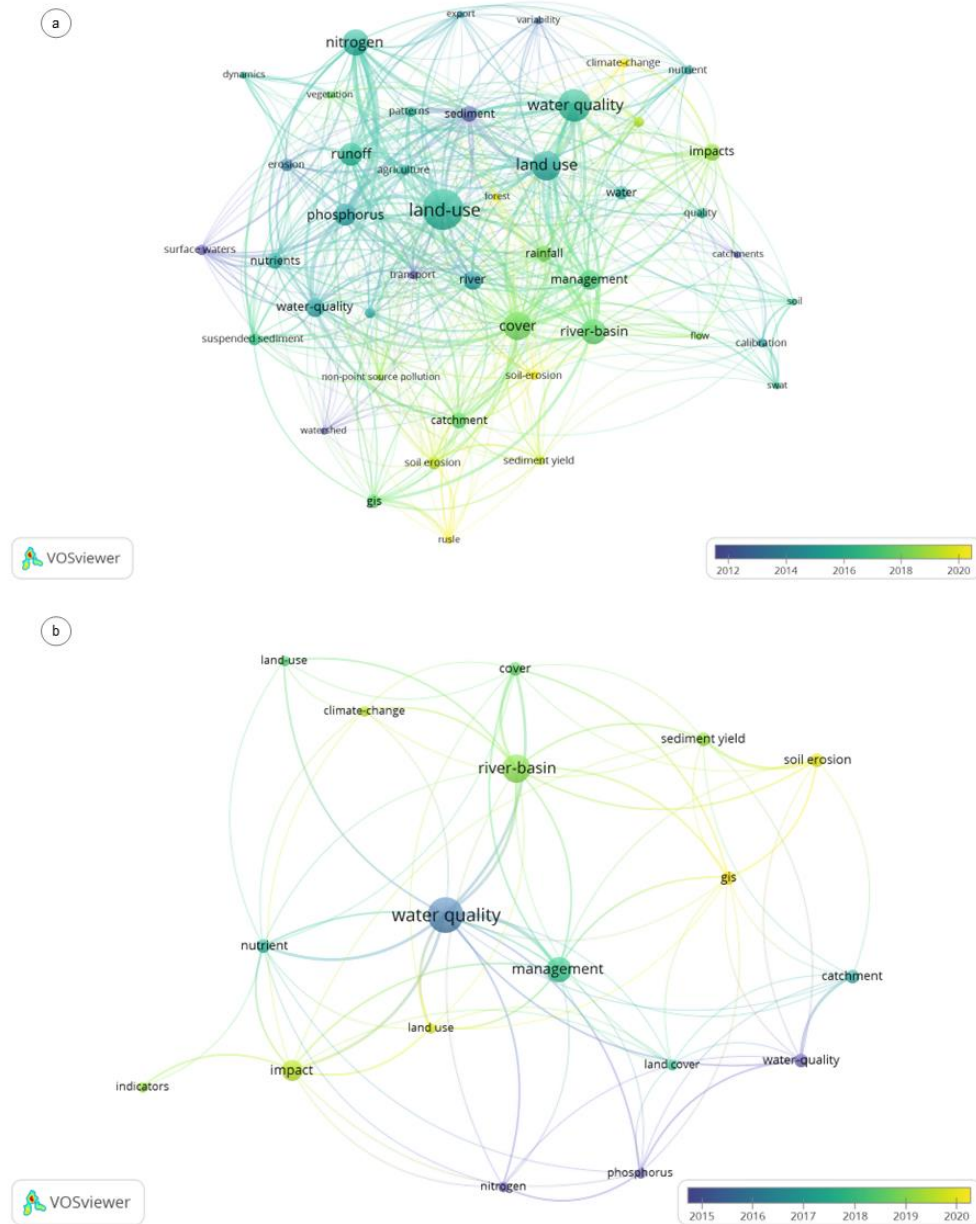
O conhecimento de como as concentrações de nitrogênio e fósforo mudam durante a estação chuvosa é necessário para entender os processos de transporte desses nutrientes para os reservatórios, que são a principal fonte de abastecimento de água para múltiplas atividades na região (Araújo et al., 2018).

Além disso, a alocação de água é realizada após a estação chuvosa, ou seja, após o período de maior afluência de água aos reservatórios (Souza Filho et al., 2008). Vários estudos investigaram as relações entre nutrientes, precipitação e uso e ocupação do solo. Uma busca pelos assuntos “*nutrients, rainfall, land use, land cover, river*” (*nutrientes, precipitação, uso da terra, cobertura da terra, rio*) usando o operador booleano “and” no banco de dados Web of Science revelou 105 publicações até março de 2023 (período em que a busca de dados desse capítulo foi concluída), com os assuntos mais recorrentes apresentados na Figura 4a. Quando a busca foi refinada inserindo, “*water resource management*” (gestão de recursos hídricos), 28 artigos foram encontrados (Figura 4b).

Cabe ressaltar que as conexões entre usos da terra, impactos, precipitação, nutrientes e gestão resultaram em várias publicações recentes, o que indica o interesse científico atual sobre o assunto. Observa-se que sistemas de informação geográfica (GIS) e indicadores também foram integrados à busca. No entanto, quando o assunto “*semiarid*” (semiárido) foi adicionado à lista de busca, nenhum resultado foi encontrado, o que sugere uma falta de estudos nessa abordagem integrada para regiões semiáridas.

Na região semiárida brasileira, a baixa pluviosidade e milhares de reservatórios favorecem menores cargas afluentes de fósforo em comparação à média nacional, exceto para bacias urbanas com baixa cobertura de saneamento (Rocha; Lima Neto, 2021).

Figura 4 – Rede de sobreposição de visualização de palavras-chave de publicações da Web of Science



Legenda: a - pesquisa por assuntos: nutrientes, precipitação, uso da terra, cobertura do solo, rio; b pesquisa por assuntos: nutrientes, precipitação, uso da terra, cobertura do solo, rio, gestão de recursos hídricos.

Fonte: elaborado pela autora (software: VOSviewer/ Dados: Web of Science)

Algumas questões também merecem atenção nesta região: a disponibilidade de nutrientes e as mudanças no fluxo dos rios resultaram no crescimento de comunidades de fitoplâncton, restringindo os usos da água (Santana et al., 2016); a diminuição da precipitação nos últimos anos tem frequentemente sido associada à eutrofização devido à agricultura, urbanização e mudanças no uso da terra (Soares et al., 2021); a maioria dos rios é intermitente

e fortemente impactada por altas concentrações de fósforo e nitrogênio (Freire; Costa; Lima Neto, 2021); a região semiárida brasileira é uma das mais populosas do mundo (Malveira et al., 2012).

Acrescenta-se que, historicamente, íons de nitrogênio inorgânico solúveis em água (amônia, nitrito e nitrato) representam uma preocupação ambiental e fazem parte das principais regulamentações de qualidade da água (Sawyer et al., 2003).

Os riachos intermitentes e efêmeros associados a vários reservatórios também modificam a dinâmica da qualidade da água (Lima Neto et al., 2011; Marques et al., 2019; Nascimento Filho et al., 2019). Analisar essa dinâmica em regiões com diversos aspectos ambientais e antropogênicos pode ser ainda mais desafiador (Ji et al., 2021; Shiferaw et al., 2022).

Diante do contexto apresentado, este estudo fornece novos insights para identificar padrões entre uso e ocupação do solo e a qualidade da água em regiões semiáridas em uma ampla escala espacial. Nesse sentido, globalmente, as descargas antrópicas afetam consideravelmente as concentrações de nitrogênio inorgânico nos rios, e as zonas temperadas povoadas e os trópicos e subtropicais secos apresentam as maiores concentrações de fósforo na rede hidrológica (Savenko; Savenko, 2021).

Portanto, o objetivo principal deste capítulo foi avaliar a influência da precipitação e do uso e ocupação do solo nas concentrações de fósforo total (TP) e nitrogênio inorgânico total (TIN) em bacias hidrográficas da região semiárida brasileira, em escala espacial. Os objetivos específicos foram avaliar se a precipitação apresenta influência sobre a diluição ou concentração de nutrientes e investigar a relação entre indicadores de uso e ocupação do solo e concentrações de nutrientes em rios intermitentes.

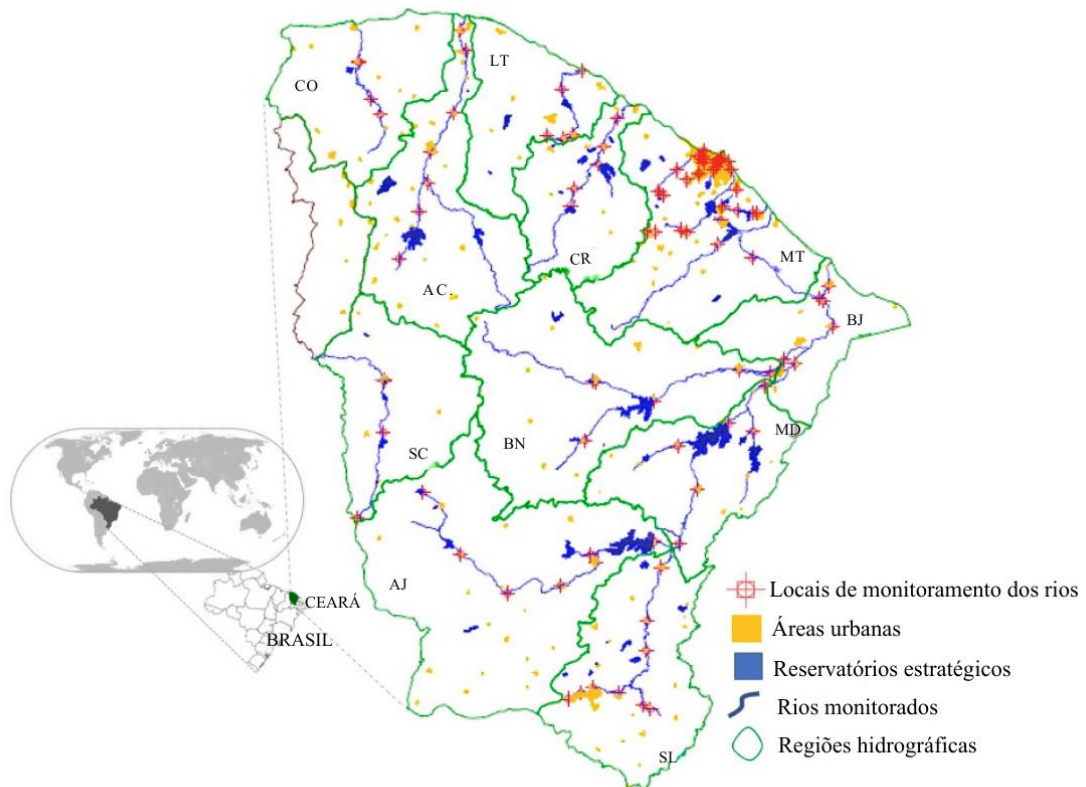
## **2.2 Material e métodos**

### ***2.2.1 Área de estudo***

A área de estudo compreende onze regiões hidrográficas do Estado do Ceará (Figura 5), localizadas majoritariamente no semiárido brasileiro, abrangendo 142.384 km<sup>2</sup>. As regiões hidrográficas do Estado do Ceará são unidades de planejamento de recursos hídricos, que consideram condições hidrológicas semelhantes, além de questões político-administrativas. Nesse sentido, onze das doze regiões hidrográficas possuem dados para rios no Programa Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas (PNQA) durante o período avaliado, e, portanto, foram selecionadas para a presente pesquisa. Elas são denominadas da seguinte forma:

Acaraú (AC), Banabuiú (BN), Coreaú (CO), Curu (CR), Alto Jaguaribe (AJ), Médio Jaguaribe (MJ), Baixo Jaguaribe (BJ), Litoral (LT), Metropolitanas (MT), Salgado (SL) e Sertões de Crateús (SC).

Figura 5 – Regiões hidrográficas, rio principal, área urbana e grandes reservatórios na área de estudo



Legenda: Acaraú (AC), Banabuiú (BN), Coreaú (CO), Curu (CR), Alto Jaguaribe (AJ), Médio Jaguaribe (MJ), Baixo Jaguaribe (BJ), Litoral (LT), Metropolitanas (MT), Salgado (SL) e Sertões de Crateús (SC)

Fonte: elaborado pela autora

Nessas regiões hidrográficas, a precipitação média corresponde a cerca de 550 a 1600 mm para as zonas mais secas (zonas central e noroeste) e úmidas (zonas costeiras e planaltos) do território, respectivamente (Uvo; Berndtsson, 1996). As bacias hidrográficas nas proximidades da zona costeira são influenciadas por linhas de instabilidade devido à formação de nuvens de chuva a partir da incidência solar nos trópicos (Gaiser et al., 2002).

No sul do Estado do Ceará, as chuvas orográficas são recorrentes, influenciadas pela área de barlavento da bacia hidrográfica do Salgado, onde massas de ar vindas do litoral atingem a região e ascendem pelo relevo (Costa et al., 2021). Após os efeitos da Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT), a massa equatorial atlântica passa a influenciar a formação de nuvens de chuva a partir da formação de duas correntes de ar: uma fria e úmida e outra quente e seca (Uvo; Berndtsson, 1996). A ascensão dessas correntes, associada à descontinuidade térmica e redução da temperatura com a altitude, gera chuvas intensas no litoral e seca no interior e nas regiões mais centrais do Estado do Ceará, onde estão Sertões de Crateús, Banabuiú e Alto Jaguaribe.

O período chuvoso, em geral, ocorre entre dezembro e junho, com chuvas mais intensas concentradas entre fevereiro e maio, o que é favorecido pela ZCIT. Os outros fatores sinóticos são ondas de leste, vórtices ciclônicos e mudanças climáticas por El Niño-Oscilação Sul (ENSO). O El-Niño gera o deslocamento da zona de ascendência da massa de ar da célula de Walker e favorece a ocorrência de anos mais secos no Nordeste do Brasil, enquanto a La-Niña está associada à condição de sítio oposto nesta região (Lim et al., 2017).

### ***2.2.2 Fontes de dados e avaliação estatística***

Para avaliar se a precipitação apresenta relações sobre a diluição ou concentração de nutrientes nos rios, duas variáveis monitoradas foram selecionadas: precipitação mensal e concentrações de nutrientes (TP e TIN). As concentrações de amônia, nitrito e nitrato foram consideradas como TIN. A precipitação mensal (Rn) para cada região hidrográfica foi fornecida pela Fundação de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará (Funceme). O Rn foi determinado pelo método do polígono de Thiessen (Thiessen, 1911) em 575 pluviômetros na área de estudo. A Funceme é o órgão responsável pelo monitoramento das condições meteorológicas e dos recursos hídricos no Estado do Ceará, fornecendo juntamente à Cogerh, entre outras informações, os dados de precipitação no Portal Hidrológico do Estado do Ceará (<http://www.hidro.ce.gov.br/>).

As concentrações de nutrientes, avaliadas entre 2013 e 2018, fazem parte de um banco de dados de monitoramento do PNQA (<http://portalpnqa.ana.gov.br/>), e estão relacionadas à Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005 (Brasil, 2005). Na rede nacional de monitoramento da qualidade das águas, as variáveis são selecionadas e mensuradas por órgãos estaduais dos setores de meio ambiente, recursos hídricos, saneamento e energia elétrica.

No Ceará, a Superintendência Estadual de Meio Ambiente (Semace) monitora rios e fornece dados de qualidade da água, como mencionado anteriormente (Capítulo 1). As

amostragens são realizadas de acordo com o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras, estabelecido pela Resolução da Agência Nacional de Águas nº 724/2011 e atualizado pela Resolução nº 207/2024 (Brasil, 2011; Brasil, 2024), e as variáveis mensuradas de acordo com a APHA (1998). No total, os dados utilizados foram provenientes de 92 locais de monitoramento da qualidade da água dos rios (Figura 5).

Quanto à análise de dados, primeiramente, foram realizadas regressão linear simples e correlação de Pearson com os valores transformados em escala logarítmica das concentrações médias mensais de nutrientes e precipitação mensal, durante a estação chuvosa. Na sequência, a relação linear entre as concentrações de TP e TIN foi verificada para entender a similaridade da dinâmica desses nutrientes. A não linearidade dos processos de aporte de fósforo para reservatórios e de processos biogeoquímicos são reconhecidas, conforme explanado por Rocha et al. (2021). No entanto, conforme afirmado anteriormente, o objetivo do presente trabalho não consiste em modelar mecanismos físico-químicos de transporte, mas identificar padrões dominantes em larga escala espacial. Dessa forma, relações lineares passam a representar tendências médias dominantes e as não linearidades particulares aos processos tendem a ser suavizadas.

Em relação à investigação da influência dos indicadores de uso e ocupação do solo sobre as concentrações de nutrientes, as atividades relacionadas predominantes na área de estudo foram inicialmente verificadas acessando o banco de dados do MapBiomas (<https://mapbiomas.org/>). O MapBiomas consiste em uma plataforma de acesso aberto com dados geoespaciais de uso e ocupação do solo no Brasil, com base em processos de classificação automática aplicados a imagens de satélite (Souza et al., 2020). Na região de estudo, 70,73% da cobertura da terra corresponde a florestas. As demais coberturas do solo correspondem à agricultura e pecuária (24,03%), áreas não vegetadas (2,25%), formação natural não florestal (2,25%) e água (0,94%). Ainda, de acordo com os dados obtidos no MapBiomas, 24,95% do território cearense possui atividades antrópicas e as principais classes de uso do solo são agricultura e urbanização.

Portanto, os indicadores de interferência antrópica investigados foram aqueles relacionados aos usos predominantes do solo: percentual área urbana (%), densidade demográfica (hab./km<sup>2</sup>) e cobertura do sistema de esgotamento sanitário (%) (indicadores relacionados à urbanização) e o percentual de área agrícola (%) (indicador relacionado aos usos agrícolas). Além disso, considerando que a densa rede de reservatórios altera significativamente

a hidrologia nesta região (Rabelo et al., 2021; Rabelo et al., 2022), a densidade de reservatórios (reservatório/km<sup>2</sup>) também foi utilizada como um indicador de mudanças antropogênicas.

Na área de estudo, a maioria das culturas corresponde à agricultura de sequeiro com preparo convencional do solo (Medeiros et al., 2020). A agricultura de subsistência e a agricultura itinerante estão distribuídas ao longo da maioria das bacias hidrográficas, com alguns campos irrigados públicos e privados (Stuart et al., 2021; Martins et al., 2018). Essas formas de cultivo prevaleceram na região entre 1985 e 2018 (Sousa et al., 2021). As mudanças na matéria orgânica e fertilidade do solo na agricultura itinerante tradicional ocorrem lentamente e com grande influência da vegetação, cuja avaliação deve considerar o tempo de cultivo e o pousio arbustivo (Tiessen et al., 1992). No entanto, está claro que algumas bacias hidrográficas têm mais influência agrícola ou urbana do que outras (Rocha; Lima Neto, 2021). Além disso, as mudanças espaciais na qualidade da água dos rios dessa região são as mais relevantes (Freire; Costa; Lima Neto, 2021). Portanto, as correlações entre indicadores de uso e ocupação do solo e nutrientes foram realizadas na escala de bacia hidrográfica.

A área urbana foi determinada a partir de arquivos vetoriais disponibilizados pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Estado do Ceará (IPECE), utilizando *Quantum GIS* 3.16. Os dados populacionais municipais utilizados para determinação da densidade demográfica e da cobertura do sistema de esgotamento sanitário foram disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), cujos valores médios foram determinados entre 2013 e 2018. O percentual de áreas agrícolas foi disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) para o ano de 2016. A partir desses dados municipais, foi realizada a soma por região hidrográfica. Em seguida, foram determinados os percentuais para a área urbana, cobertura do sistema de esgotamento sanitário e o percentual de área agrícola. Por fim, a quantidade de reservatórios utilizada para calcular a densidade de reservatórios por área foi obtida a partir de mapeamento fornecido pela Funceme, que define o número de reservatórios superficiais por região hidrográfica (Funceme, 2016).

A correlação de Pearson e a regressão múltipla pelo método *backward stepwise* foram realizadas entre todas as variáveis analisadas, incluindo a média de Rn na estação chuvosa, as concentrações médias de TIN e TP nos locais de monitoramento dos rios e os indicadores de interferência antropogênica listados anteriormente. O método de regressão *backward stepwise* foi utilizado para inferir a magnitude da relação entre possíveis preditores da qualidade da água (Lei et al., 2021; Wang et al., 2013; Wunderlin et al., 2001).

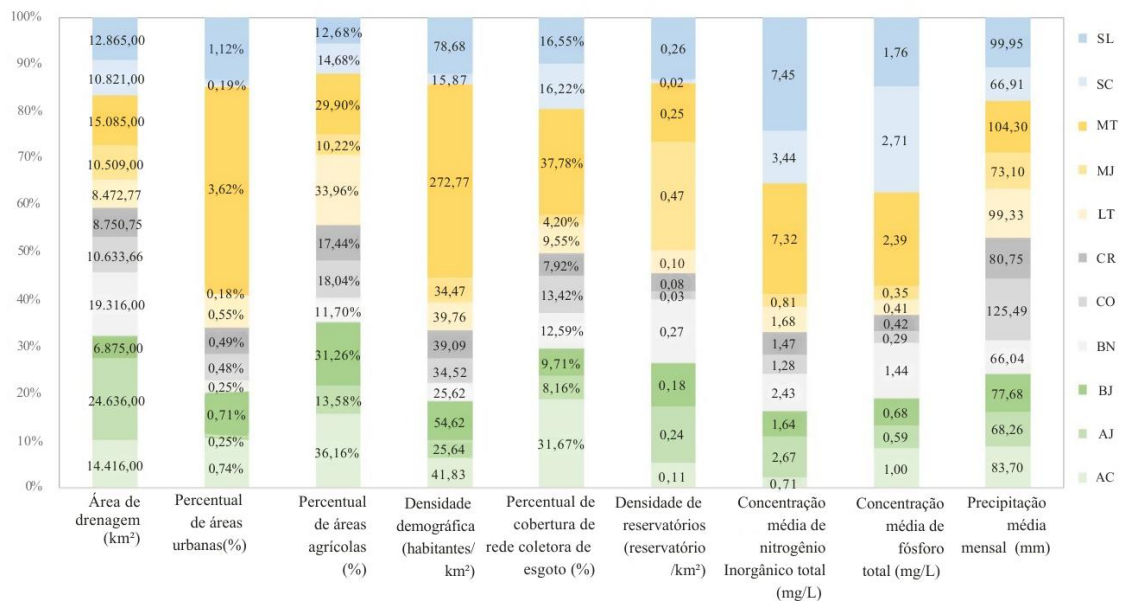
### 2.3 Resultados e Discussão

#### 2.3.1 Usos do solo, precipitação pluvial e concentração de nutrientes na escala da região hidrográfica

Os indicadores de interferência antrópica, a concentração média de nutrientes e a precipitação média mensal foram apresentados na Figura 6. Há uma similaridade entre a área de drenagem das regiões hidrográficas, visto que a maioria delas está entre 10.000 e 20.000 km<sup>2</sup> (SL, SC, MT, MJ, CO, BN e AC). Por outro lado, três regiões hidrográficas (LT, CR e BJ) cobrem entre 5.000 e 10.000 km<sup>2</sup>, e AJ cobre mais de 20.000 km<sup>2</sup>.

No entanto, as bacias hidrográficas metropolitanas (MT) foram as mais urbanizadas, seguidas por SL. As regiões hidrográficas menos urbanizadas foram MJ e SC. Além do percentual de área urbana, a densidade demográfica também foi consideravelmente maior em MT e SL, mas menor em SC e BN. O percentual de área agrícolas foi maior na bacia hidrográfica do AC, seguido por LT e BJ, e menor em MJ, BN e SL. Assim, MT e SL são regiões hidrográficas fortemente influenciadas pela urbanização, enquanto AC, LT e BJ são mais influenciadas por atividades agrícolas.

Figura 6 – Indicadores de uso da terra, concentração média de nutrientes e precipitação média mensal por região hidrográfica



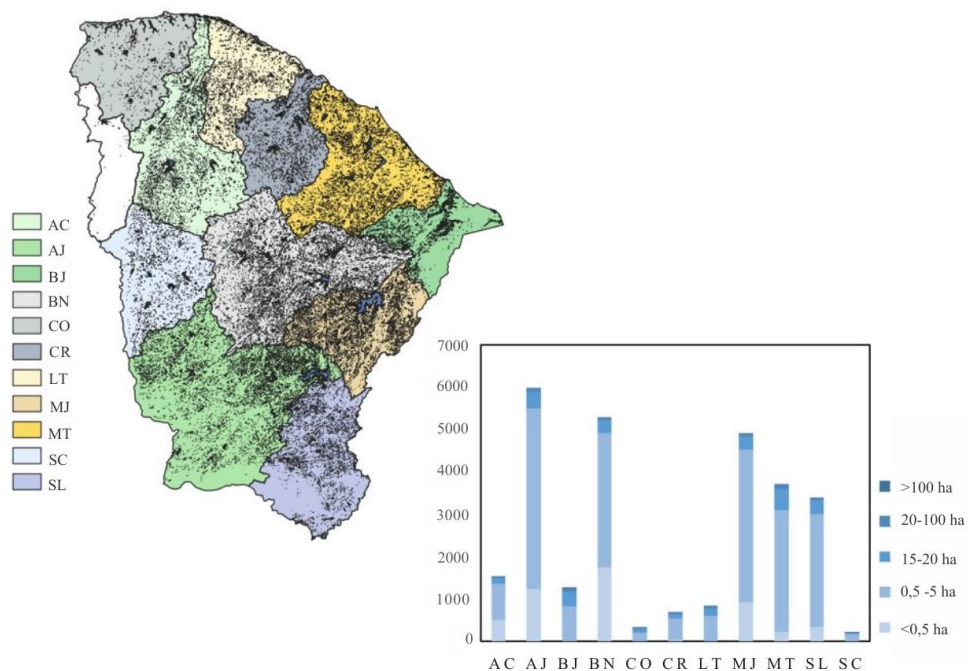
Legenda: Acaraú (AC), Banabuiú (BN), Coreaú (CO), Curu (CR), Alto Jaguaribe (AJ), Médio Jaguaribe (MJ), Baixo Jaguaribe (BJ), Litoral (LT), Metropolitanas (MT), Salgado (SL) e Sertões de Crateús (SC)

Fonte: elaborado pela autora

Apesar da tendência de predominância sobre as áreas agrícolas identificadas, destaca-se que em todas as regiões hidrográficas, a agricultura é uma atividade econômica importante. Em BJ e BN, por exemplo, 70% da água disponível é consumida pela agricultura irrigada e, nessas regiões, a rápida expansão agrícola tem causado conflitos no uso da água e intensificado o risco de desertificação e poluição (Lemos; Oliveira, 2004). Além disso, de acordo com Reis et al. (2020), a região hidrográfica de BJ é aquela com maior vulnerabilidade à seca, especialmente devido às altas demandas de água para irrigação e carcinicultura.

Em relação à densidade de reservatórios por área (reservatório/km<sup>2</sup>) (Figura 7), faz-se necessário observar também que os reservatórios da região possuem diferentes capacidades de armazenamento. A maioria dos reservatórios possui no máximo 20 ha de área superficial de bacia hidráulica. O Nordeste do Brasil apresenta uma relação linear entre a área de drenagem e a área superficial dos reservatórios (Freitas; Righetto; Attayde, 2011). Os maiores volumes armazenados estiveram registrados em AJ, BN e MJ.

Figura 7 – Quantidade de reservatórios por região hidrográfica e por área superficial de bacia hidráulica



Legenda: Acará (AC), Banabuiú (BN), Coreaú (CO), Curu (CR), Alto Jaguaribe (AJ), Médio Jaguaribe (MJ), Baixo Jaguaribe (BJ), Litoral (LT), Metropolitanas (MT), Salgado (SL) e Sertões de Crateús (SC)

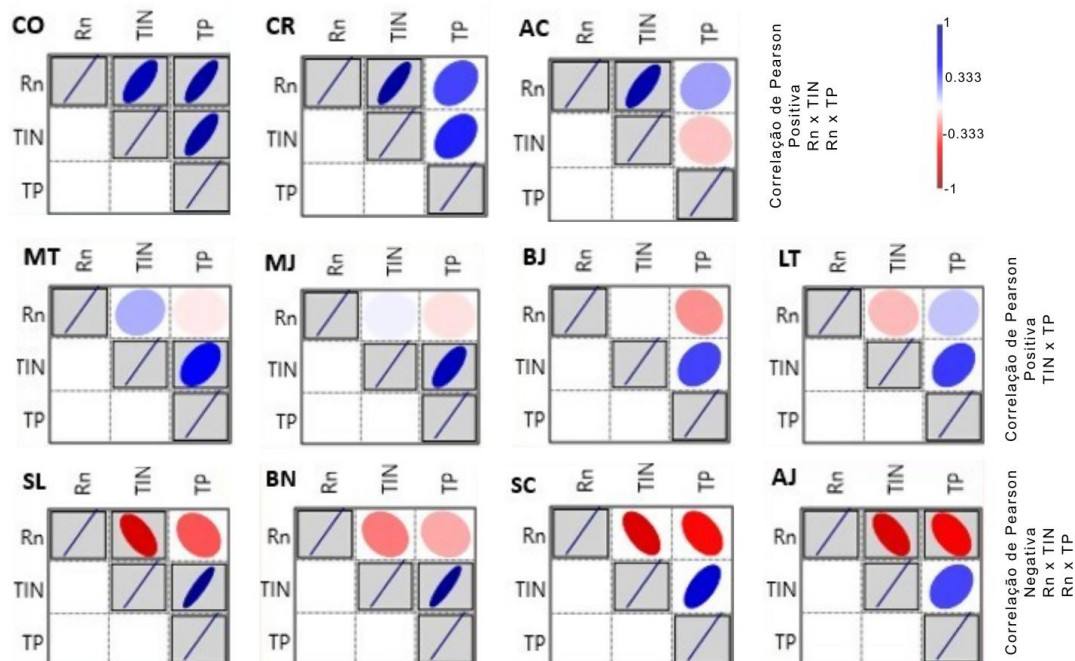
Fonte: elaborado pela autora

Na AJ, por exemplo, a cada 5 km<sup>2</sup> haveria uma represa de água se essas fossem distribuídas uniformemente. Esse número de reservatórios por área foi o mesmo identificado

por Mamede et al. (2018) em uma bacia hidrográfica do Estado do Ceará. As concentrações médias de TP e TIN foram maiores nas áreas mais populosas (MT e SL). No caso de SC que não apresenta altas taxas de urbanização, os valores são diretamente influenciados pela localização dos rios monitorados, pois estão a jusante dos sistemas de lagoas de estabilização (Freire, 2020), semelhante às influências das estações de tratamento de esgoto identificadas por He et al. (2023). Esses resultados corroboram aos encontrados por Lei et al. (2021), ao identificarem que as respostas do uso do solo na qualidade da água são mais percebidas na escala de bacia hidrográfica, após a comparação das escalas de bacia hidrográfica, ripícola e entre trechos.

Com base nos resultados da correlação entre a precipitação pluvial mensal e as concentrações de nutrientes, foi possível agrupar as regiões hidrográficas, como apresentado na Figura 8. A excentricidade das elipses é diretamente proporcional à magnitude da correlação. Isso significa que quanto maior a excentricidade, mais próximo o coeficiente de correlação está do valor de 1. Faz-se necessário observar que as elipses azuis apresentam correlações positivas e as elipses vermelhas, correlações negativas.

Figura 8 – Correlação de Pearson ( $R_n \times TIN$ ,  $R_n \times TP$ ,  $TP \times TIN$ ) para cada região hidrográfica



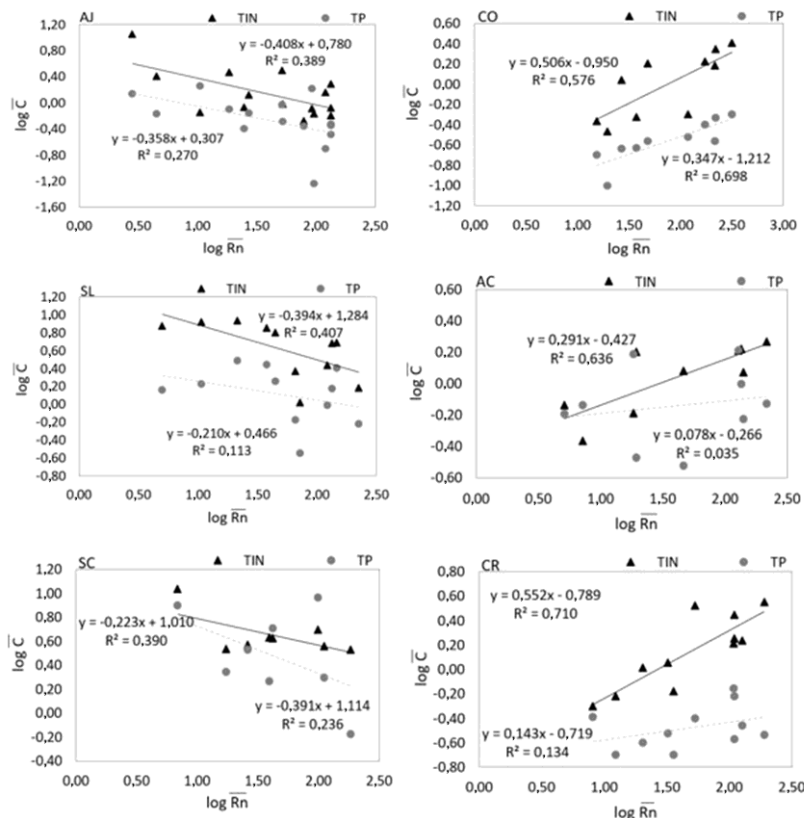
Legenda: R<sub>n</sub> - precipitação (mm); TIN - nitrogênio inorgânico total (mg/L); TP - fósforo total (mg/L)

Fonte: elaborado pela autora

Nas regiões hidrográficas avaliadas, TIN e TP estão fortemente correlacionados, exceto em AC, onde a razão entre TP e TIN médios foi maior do que em todas as outras regiões hidrográficas. Isso pode estar relacionado a maiores aportes de fósforo, principalmente de fontes difusas oriundas de áreas agrícolas ao longo das margens dos rios. Nessa bacia hidrográfica, a agricultura tem sido desenvolvida por meio de perímetros irrigados nas proximidades dos principais rios (Cogerh, 2022), o que pode ter contribuído para as maiores concentrações de TP em relação ao TIN, pois o fósforo pode estar mais relacionado a fontes agrícolas, enquanto o nitrogênio amoniacal com fontes pontuais de poluição (Liberoff et al., 2018; Wang et al., 2015).

Uma relação positiva entre precipitação e nutrientes foi identificada para CO, CR e AC, com CO sendo significativo tanto para Rn *versus* TIN quanto para Rn *versus* TP. Por outro lado, um forte coeficiente de correlação negativo para SL, SC e AJ, com AJ sendo significativo para a relação entre precipitação e ambas as concentrações de nutrientes. Os gráficos de regressão linear para essas regiões hidrográficas foram apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Gráficos de regressão linear para regiões hidrográficas com correlação significativa entre precipitação e nutrientes



Legenda: (C, concentração (mg/L); Rn, precipitação mensal; TP, fósforo total; TIN, nitrogênio inorgânico total) (Acaráú (AC), Coreaú (CO), Curu (CR), Alto Jaguaribe (AJ), Salgado (SL) e Sertões de Crateús (SC))

Fonte: elaborado pela autora

Os resultados revelaram que diferentes processos estão relacionados à resposta de nutrientes em rios, onde os mecanismos mencionados por Uwimana et al. (2017) puderam ser identificados, como o transporte de nutrientes em bacias predominantemente rurais (CO, CR e AC), resultando em uma relação positiva entre nutrientes e precipitação. A maioria das correlações positivas foi mais representativa entre Rn e TIN do que entre Rn e TP, o que corrobora Yao et al. (2021), ao afirmarem que as perdas de nitrogênio do solo ocorrem mais rapidamente do que as perdas de fósforo.

Portanto, o aumento da precipitação causa lixiviação de nitrogênio com mais facilidade (Zhang et al., 2020). Na bacia hidrográfica CO, por exemplo, onde há chuvas mais intensas e menos reservatórios, a transferência de nutrientes para as fontes hídricas é promovida na mesma escala de correlação para TIN e TP, enquanto nos demais, onde há proporcionalidade direta, as correlações são mais fortes para TIN.

O efeito de diluição sobre a concentração de nutrientes foi mais forte onde há mais reservatórios, como na bacia hidrográfica AJ. A existência de diversas barragens de água favorece a retenção de nutrientes pela rede de reservatórios, por meio da sedimentação e da absorção biológica, principalmente em anos com precipitação abaixo da média (Lima Neto et al., 2011; Molisani et al., 2013). Dessa forma, a afluência gerada pela precipitação pluvial reduziu a concentração de nutrientes (relação inversa entre Rn e nutrientes, ver Figura 9) em rios urbanos, que são fortemente impactados pela poluição pontual de águas residuais. Essa ocorrência é consistente com a identificada por Rocha e Lima Neto (2021) para 21 reservatórios localizados na mesma região do presente estudo, onde, em bacias rurais com milhares de pequenos reservatórios, houve uma carga de entrada de fósforo mais de dez vezes menor que a média nacional.

Conseqüentemente, o acúmulo desses nutrientes nos reservatórios aumenta o risco de eutrofização (Wiegand et al., 2021). Além disso, concentrações elevadas de cianobactérias já são identificadas nos reservatórios dos locais avaliados, especialmente em zonas mais secas (Lorenzi et al., 2018). Nesse sentido, a desconexão hidrológica pode potencializar esse efeito (Costa et al., 2012; Van Langen et al., 2021).

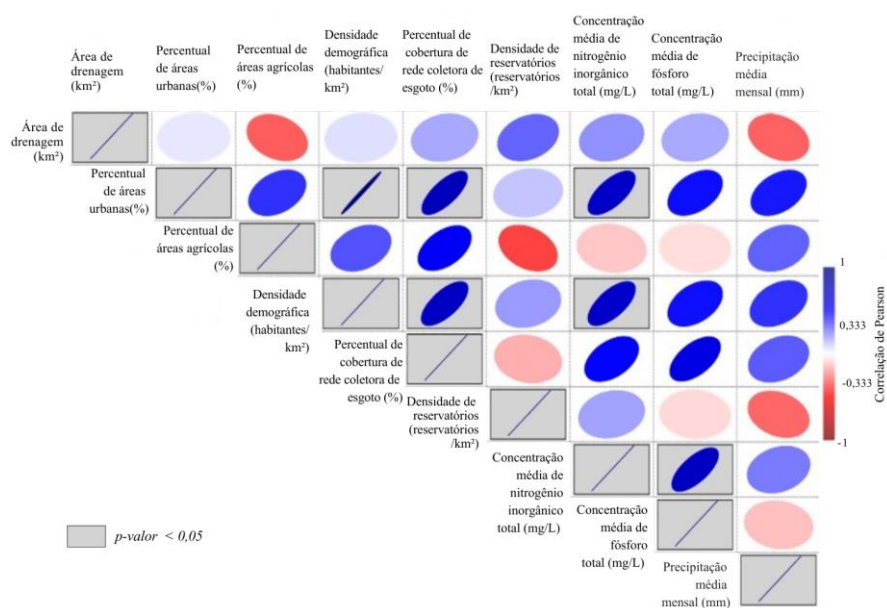
Por outro lado, para SC, o fator mais influente não é a presença de reservatórios juntamente com a rede hidrológica que promove a relação positiva. Em SC, os locais de monitoramento da qualidade da água do rio estão a jusante dos lançamentos de lagoas de estabilização de águas residuárias. Nesse caso, na estação chuvosa, o escoamento superficial

contribui para a diluição dessa fonte de carga de nutrientes. A diluição de cargas poluentes durante a estação chuvosa é prevalente em locais com lançamentos pontuais de águas residuais (Bowes et al., 2012).

Nas bacias hidrográficas de MT, área relativamente mais urbanizada, a associação entre nutrientes e Rn não foi relevante, assim como em MJ e BJ. Nessas bacias hidrográficas, o efeito da precipitação não é a principal influência nas mudanças na concentração de nutrientes. Esses resultados corroboram os encontrados por Xiao et al. (2023), ao definir as relações dos efeitos das variáveis predominantes de acordo com a magnitude espacial e temporal da poluição da qualidade da água.

Para compreender o padrão de distribuição demográfica e as atividades antrópicas avaliadas, foi realizada a correlação de Pearson (Figura 10). A porcentagem de áreas urbanas apresentou relação positiva significativa com a densidade demográfica e com a cobertura do sistema de esgotamento sanitário. Portanto, a maior parte da população e dos serviços de coleta de esgoto estão em locais urbanos. As relações mais fortes entre os indicadores de uso do solo e a concentração de nutrientes foram identificadas para a área urbana, densidade demográfica e cobertura do sistema de esgotamento sanitário. Efluentes domésticos e industriais aumentam consideravelmente as concentrações de nitrato de rios a montante para rios a jusante (Shi et al., 2019).

Figura 10 – Correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas considerando todas as regiões hidrográficas



Na bacia hidrográfica do SL, por exemplo, estima-se que as cargas de fósforo de fontes antrópicas para os rios possam ser mais de dez vezes maiores do que as contribuições naturais (Paula Filho et al., 2019). Esse fato pode justificar uma baixa correlação entre precipitação e concentrações médias de TP, apesar da tendência à diluição. Essas condições são semelhantes às de algumas regiões da China com altos níveis de ocupação antrópica, onde a urbanização acaba sendo o fator mais influente na qualidade da água (Li et al., 2015; Yang et al., 2016).

O aumento de TIN e TP em relação à porcentagem de áreas urbanas também pode atribuído à impermeabilização do solo. Segundo Ahiablame et al. (2012), a implementação de pavimentos permeáveis e sistemas de contenção de águas pluviais em áreas urbanas pode reduzir as cargas de fósforo e nitrogênio no escoamento superficial. Bacias hidrográficas urbanas com superfície impermeável não possuem capacidades consideráveis para reter fósforo, portanto, este é exportado como biomassa ou por meio de resíduos no escoamento de águas pluviais (Hobbie et al., 2017; Wang et al., 2014).

Além disso, deve-se observar que o tamanho da área com vegetação ripária é decisivo para os diferentes níveis de impactos ecológicos ambientais causados pela urbanização e pela agricultura (Lacher et al., 2019; Xu et al., 2020). Assim, em áreas urbanas, além de haver maiores fontes de nutrientes para os recursos hídricos, há uma menor atenuação dos impactos, pois a área de amortecimento ribeirinha é reduzida ao longo das áreas construídas na região de estudo.

Quanto à cobertura do sistema de esgotamento sanitário e a relação com a concentração de nutrientes, isso se explica pelo fato de as tecnologias de tratamento de esgoto na região serem majoritariamente de nível secundário, não sendo capazes de remover nitrogênio e fósforo em eficiências satisfatórias (Brasil, 2013; Marangon et al., 2020). Além disso, apenas 32,75% do esgoto referido à água consumida é tratado, representando uma média inferior ao mesmo indicador na região Nordeste e no Brasil (SINISA, 2024). Assim, concentrações elevadas de nutrientes provenientes de águas residuárias são lançadas nos recursos hídricos (Schliemann et al., 2020; Wang et al., 2015; Lima, 2016).

Houve correlação negativa entre a densidade do reservatório e a precipitação média mensal. Isso pode ser explicado pela maior precipitação ocorrer principalmente na zona costeira e pelas maiores demandas por armazenamento e transferência de água serem supridas por reservatórios estratégicos nas áreas interior e central do território (Albiero et al., 2018; Cirilo et

al., 2016). Foi encontrada forte correlação positiva entre o número de reservatórios e a área de drenagem, observando-se grande número de reservatórios ao longo do Rio Jaguaribe, o maior e mais importante rio da área de estudo.

Nessa região, os rios podem ficar secos por vários meses, enquanto em períodos mais curtos, na estação chuvosa e em anos chuvosos, verificam-se vazões elevadas. Assim, a população está vulnerável a dois problemas: as limitações no abastecimento de água e na manutenção das atividades econômicas, essencialmente a agricultura, e a imprevisibilidade das altas vazões (Campos, 2015).

Portanto, barragens estratégicas foram construídas em locais com menor precipitação acumulada, alta variabilidade temporal das vazões e locais estratégicos para armazenamento de água (Campos; Studart, 2008). Essa constatação corrobora a tendência global, onde o maior número de reservatórios de água está em regiões com maior escassez hídrica, atendendo ao abastecimento de 15% da população mundial (Mady et al., 2020). No entanto, embora os reservatórios estratégicos sejam bem distribuídos, a maioria dos pequenos reservatórios foi construída sem planejamentos de engenharia por agricultores e comunidades rurais desde o século XIX, gerando uma rede de reservatórios de alta densidade (Araújo et al., 2022; Malveira et al., 2012). A alta densidade de pequenos reservatórios aumenta a vulnerabilidade a anos de seca, pois reservatórios estratégicos proporcionam maior segurança hídrica durante esses períodos críticos, mas se recuperam da seca hidrológica mais tarde, quando há muitas barragens a montante (Van Langen et al., 2021).

### ***2.3.2 Análise de preditores de nutrientes pelo método backward stepwise***

Em relação à regressão pelo método *backward stepwise*, em grande escala espacial, os melhores preditores de TP foram a porcentagem de cobertura do sistema de esgoto e a precipitação média mensal. Esses preditores explicaram 71,1% da variância na concentração de TP. O coeficiente de regressão múltipla (0,843) indicou que existe uma relação direta muito forte entre os dados simulados com os preditores e os dados observados. Esses resultados corroboram aos de Darwiche-Criado et al. (2015), ao associarem as concentrações de fósforo com fontes de poluição urbana. Descargas de águas residuárias não tratadas e águas residuárias tratadas com tecnologias que não são eficazes na remoção de nitrogênio e fósforo aumentam consideravelmente a carga de nutrientes nos rios, especialmente para avaliação na escala de bacia hidrográfica (Liu; Shen; Chen, 2018).

Xia et al. (2016) também encontraram águas residuárias como um dos principais preditores da qualidade da água em um modelo estatístico utilizando dados de precipitação e uso do solo. Além disso, a relação múltipla confirma o que foi discutido anteriormente para a influência desses efluentes nas concentrações de fósforo em rios e no efeito da precipitação em larga escala. O método *backward stepwise* para TIN identificou a área urbana (%) como um preditor moderado, corroborando os achados de Cerqueira et al. (2019) para uma bacia hidrográfica no sul do Nordeste brasileiro. No entanto, esse preditor foi capaz de explicar apenas 21,3% da variância da variável independente. O coeficiente de regressão múltipla correspondeu a 0,461, duas vezes menor do que o identificado para o fósforo total. Isso mostra o quão complexa é a dinâmica do nitrogênio nesses rios quando avaliada em larga escala. Além disso, o fósforo é menos abundante em condições naturais (Piveli; Kato, 2006).

A identificação de áreas urbanas como preditoras da concentração de nutrientes é favorecida na escala de bacia hidrográfica, pois são pontos críticos de poluição, devido às indústrias e outras atividades antrópicas (Shi et al., 2017; Xu et al., 2020). Além disso, a influência dos reservatórios também pode limitar a aplicação de modelos estatísticos para prever os efeitos mais sutis do uso do solo na qualidade da água (Szatten; Habel, 2020). Nesse sentido, modelos semidistribuídos têm sido aplicados para estudar as influências de outros usos do solo nas concentrações de nitrogênio, principalmente na detecção de fontes difusas de poluição (Yang et al., 2016).

Os efeitos da agricultura na qualidade da água são mais fortes do que os da urbanização, dependendo dos tipos de cultivos implantados (Wan et al., 2014). Contudo, a baixa correlação de Pearson quanto à área de cultivo agrícola pode ter ocorrido devido ao fato de que a maioria dos locais de monitoramento estão a jusante de centros urbanos, onde as descargas pontuais de águas residuais urbanas começam a exercer maior influência na qualidade da água (Lopes et al., 2021). Uma avaliação em escala fina poderia ser mais eficaz na detecção da influência da agricultura na concentração de nutrientes, como realizada por Cheng et al. (2018), Rodríguez-Romero et al. (2018) e Uwimana et al. (2018).

Por meio de estudos com escalas finas, a visualização dos efeitos dos fertilizantes e das práticas agrícolas é mais forte (Huang et al., 2015). As concentrações de amônia, por exemplo, podem ser avaliadas em escalas mais amplas. No entanto, apenas escalas mais refinadas detectam variações de fósforo em relação ao uso do solo (Liu et al., 2017). Por esse motivo, a detecção dos efeitos das áreas agrícolas pode não ter sido tão evidente nesta pesquisa.

Nesse sentido, novos locais de monitoramento da qualidade da água nas proximidades de áreas agrícolas poderiam melhorar a compreensão da influência desse tipo de uso do solo.

Na bacia hidrográfica mais urbanizada (MT), as relações entre nutrientes e Rn não foram representativas, assim como em MJ e BJ. Para essas bacias hidrográficas, consideramos o efeito da precipitação em uma avaliação de correlação linear como marginal ou secundário. Portanto, na escala avaliada, a precipitação não tem um efeito significativo nas mudanças na concentração de nutrientes. No entanto, em escalas que permitam com maior detalhamento das atividades influentes e a avaliação da qualidade da água, a precipitação pode apresentar efeitos mais notórios sobre a concentração ou diluição de nutrientes nos mananciais dessa região (Lima, 2016).

## **2.4 Conclusões**

Este artigo investigou a relação entre precipitação e transporte de nutrientes em regiões hidrográficas semiáridas do Brasil, considerando indicadores de interferência antrópica. Os resultados revelaram que o efeito da precipitação pode ser marginal, inverso ou positivo para o aumento das concentrações de nutrientes.

Portanto, há um transporte mais eficiente de nutrientes da bacia hidrográfica para os rios quando há maior intensidade de chuva e menos reservatórios a montante. Esse transporte ocorre mais rapidamente para TIN do que para TP. A relação inversa entre precipitação e nutrientes ocorre quando a densidade demográfica é maior e há um maior número de reservatórios na bacia hidrográfica, ou quando há forte interferência da poluição pontual.

Em larga escala, os preditores mais representativos das concentrações de TP foram a cobertura do sistema de esgoto e a precipitação mensal. Por outro lado, para TIN, o preditor mais representativo foi a porcentagem de áreas urbanas. Isso revela o quanto a urbanização e a falta de tratamento de águas residuárias estão relacionadas às concentrações de nutrientes em larga escala. A precipitação total acumulada demonstrou que, mesmo sob as mesmas condições climáticas, a distribuição da precipitação influencia as respostas hidrológicas na qualidade da água.

Os resultados deste estudo são essenciais para a compreensão das concentrações de nutrientes na estação chuvosa, o que pode orientar a governança da água. Em locais onde as concentrações de TP e TIN aumentam durante a estação chuvosa, ações para controlar a erosão, proteger as margens dos rios e as bacias de retenção podem ser priorizadas. Nos casos em que

a precipitação não apresentou forte influência, o controle de fontes pontuais de poluição é ainda mais urgente.

Dessa forma, a gestão adaptativa e descentralizada dos recursos hídricos deve ser mais eficaz para controlar a poluição e melhorar a qualidade da água nesta região. Vale ressaltar que a localização dos locais de monitoramento da qualidade da água nos rios pode ter influenciado a avaliação.

A ampliação da quantidade de locais de monitoramento próximos às áreas agrícolas seria necessária para investigar o real impacto das culturas na concentração de nutrientes nas águas dos rios, o que pode ser realizado em pesquisas futuras. Além disso, o monitoramento do nitrogênio total nos rios deve possibilitar pesquisas futuras, especialmente aquelas relacionadas ao balanço de massa de nitrogênio.

### 3 ASPECTOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS DA GESTÃO DA LIBERAÇÃO DE ÁGUA DE RESERVATÓRIOS SOB REGIME DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Publicado em: FREIRE, Leticia Lacerda; COSTA, Alexandre Cunha; LIMA, Berthyer Peixoto; LEÃO, Krishna Martins; LIMA NETO, Iran Eduardo. Quantitative and qualitative aspects of managed water releases from dryland reservoirs under negotiated allocation in the Brazilian semiarid. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S.L.], v. 61, p. 102679, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102679>.

#### 3.1 Introdução

A governança hídrica eficaz requer a integração de dimensões qualitativas e quantitativas, unindo gestão, ciência e sociedade, particularmente no contexto donexo água-energia-segurança alimentar (Cansino-Loeza et al., 2022). A alocação da água exerce um papel central para essa governança, que deve considerar as ameaças duplas de secas e inundações que impactam não apenas a saúde do ecossistema, mas também a estabilidade macroeconômica (Ortuzar et al., 2023). As legislações nacionais de diversos países refletem cada vez mais a necessidade de integrar qualidade e quantidade de água, conforme documentado no banco de dados FAOLEX, um repositório de estruturas legais para questões hídricas, alimentares e ambientais, conforme apresentado na Tabela 1.

As variações nos níveis de água em rios e reservatórios estão diretamente vinculadas aos processos que influenciam a qualidade da água e limitam sua utilização. Eventos extremos de precipitação intensificam a poluição de fontes difusas e a liberação de sedimentos, frequentemente levando à eutrofização. Por outro lado, secas severas agravam a poluição de fontes pontuais, aumentando a condutividade e reduzindo os níveis de oxigênio e transparência (Lin et al., 2023).

As relações entre as condições climáticas e a qualidade da água são pesquisadas globalmente na literatura científica, cujos estudos demonstram como os constituintes (ex.: matéria orgânica, nutrientes, metais pesados, plásticos e sedimentos) interagem com a seca ou inundação (van Vliet et al., 2023). Compreender as interações entre os processos biológicos, físicos e químicos relacionados a esses constituintes se torna um elo fundamental para a gestão da água (Kroeze et al., 2016). As concentrações de fósforo total, por exemplo, podem triplicar durante a estação chuvosa em reservatórios na região semiárida brasileira (Rocha et al., 2024). Nessa região, as mudanças climáticas podem resultar em concentrações de nutrientes acima daquelas previstas para águas superficiais naturais, limitando ou aumentando os custos do uso

da água (Raulino; Silveira; Lima Neto, 2021; Lima Neto, 2025).

Tabela 1 – Leis relativas à água que consideram aspectos qualitativos e quantitativos na gestão dos recursos hídricos

País	Lei	Ano
Argélia	Lei nº 05-12 relativa à água	2005
Bielorrússia	Código da Água (Lei nº 149-Z)	2014
Brasil	Lei nº 9.433/1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos	1997
Bulgária	Lei da Água	1999 (alterada em 2023)
Burundi	Lei nº 1/02/2012 relativa ao Código da Água do Burundi	2012
Congo	Lei nº 13/2003 sobre o Código da Água	2003
Chipre	Lei de Proteção e Gestão da Água	2004 (alterada em 2018)
França	Lei nº 2006-1772 sobre a água e os ambientes aquáticos	2006
Geórgia	Lei da Geórgia sobre Gestão dos Recursos Hídricos (nº 3423-XIMS-XMP)	2023
Hungria	Lei nº LVII de 1995 sobre Gestão da Água	1995 (alterada em 2023)
Jamaica	Lei dos Recursos Hídricos	1996 (alterada em 1998)
Quirguistão	Leis da República do Quirguistão sobre a Água	1994
Lesoto	Lei da Água	2008
Lituânia	Lei nº VIII-474 sobre a Água	1997 (alterada em 2018)
Mauritânia	Lei nº 2005-030 relativa ao Código da Água	2005
México	Lei Nacional da Água	1992 (alterada em 2023)
Mongólia	Lei da Mongólia sobre a Água	1995 (alterada em 2012)
Namíbia	Lei de Gestão dos Recursos Hídricos	2013
Nepal	Lei dos Recursos Hídricos	1992
Países Baixos	Lei sobre Gestão e Uso dos Recursos Hídricos (Lei da Água)	2009 (alterada em 2023)
Nova Zelândia	Lei dos Serviços de Água de 2021 (Lei nº 36/2021)	2021 (alterada em 2024)
Nicarágua	Lei nº 1046 – Reforma substancial da Lei nº 620, Lei Geral das Águas Nacionais	2020
Níger	Decreto nº 2010-09 relativo ao Código da Água no Níger	2010
Macedônia do Norte	Lei da Água	2008
Peru	Lei dos Recursos Hídricos (nº 29.338/2009)	2009
Portugal	Decreto-Lei nº 130/2012, que altera a Lei da Água nº 58/2005	2012
Romênia	Lei da Água	1996
Serra Leoa	Lei da Agência Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos	2017
Eslovênia	Lei da Água	2002 (alterada em 2020)
Espanha	Lei nº 10/2001, de 5 de julho, do Plano Hidrológico Nacional	2001
Tajiquistão	Código da Água da República do Tajiquistão	2020
Tanzânia	Lei de Abastecimento e Saneamento de Água	2019
Uganda	Lei da Água (Cap. 152)	1995
República Unida da Tanzânia	Lei de Gestão dos Recursos Hídricos	2009
Zimbábue	Lei da Água	1998 (alterada em 2005)
Estados Unidos da América	Lei da Água Limpa ( <i>Clean Water Act</i> )	1972 (alterada em 2012)
União Europeia	Diretiva Quadro (2000/60/EC) no Domínio da Política de águas do Parlamento Europeu	2000

Fonte: elaborado pela autora (Dados: FAOLEX)

Paralelamente, a literatura científica sobre alocação de água tem se concentrado na otimização multiobjetivo, teoria de jogos e teoria da falência (Wu et al., 2022). Várias funções algorítmicas multiobjetivo determinam regras operacionais otimizadas para vazão de reservatório, considerando os usos múltiplos da água e o balanço hídrico do reservatório (Anand et al., 2018, Thomas et al., 2021, Jordan et al., 2022, Dash et al., 2022, Liu et al., 2023). A teoria dos jogos é aplicada com base na barganha de Nash para maximizar os benefícios aos agentes interessados, sob a perspectiva da cooperação, dadas as restrições relacionadas ao balanço hídrico (Nafarzadegan et al., 2018, Han et al., 2018). A teoria da falência considera as reivindicações e a proporcionalidade da partição da água para evitar uma demanda que exceda a disponibilidade (Shahraki et al., 2024).

A operação de reservatórios pode se beneficiar da ampliação dos tipos de informação utilizados para condicionar as decisões e da adoção de modelos computacionalmente eficientes que capturem a complexidade do sistema, melhorando a capacidade de lidar com demandas conflitantes em um contexto de crescente incerteza (Giuliani et al., 2021; Dalcin et al., 2023). A quantificação de ganhos de energia e de benefícios econômicos também pode se apresentar como a estratégia para melhorar a eficiência de operação (Marques; Tilmant, 2013).

As liberações de água geralmente consideram o equilíbrio entre a afluência, as perdas e a demanda hídrica. Metas semanais de abastecimento de água e a modelagem preditiva baseada em dados históricos também são ferramentas importantes no desenvolvimento de algoritmos para regras de operação de reservatórios (Turner et al., 2021). Apesar de inúmeros modelos com índices de desempenho satisfatórios, a questão da operação de reservatórios ainda não foi totalmente resolvida pela modelagem computacional, principalmente devido às regras de liberação individuais em grandes barragens (Shin et al., 2019).

Em reservatórios de usos múltiplos, onde a participação dos usuários de água na tomada de decisões é incentivada, a gestão da alocação de água pode favorecer cenários de liberação de água mais variáveis do que aqueles determinados apenas pela programação computacional. Globalmente, a participação das partes interessadas nas decisões de alocação de água ocorre sob diferentes modalidades, conforme relatado por estudos em países como Austrália (Gómez-Limón et al., 2020), Índia (Chattopadhyay et al., 2022), Itália (Rossi; Peres, 2023), Espanha (Ruiz-Villaverde; García-Rubio, 2017), Suíça (Miranda; Reynard, 2020), França (Rouillard; Rinaudo, 2020) e Brasil (Kasahara et al., 2020). Além disso, a participação dos próprios usuários da água favorece o aumento da capacidade de mitigação de conflitos

(Markowska et al., 2020, Carvalho et al., 2024).

Nesse sentido, comitês de bacias hidrográficas autogeridos promovem a coordenação intersetorial, as tecnologias sustentáveis e aumentam a resiliência no uso da água. Em países como Itália e Índia, um maior engajamento comunitário surgiu em resposta à escassez hídrica e às pressões ambientais, estimulando o desenvolvimento de práticas de gestão mais inclusivas e eficientes (Chattopadhyay et al., 2022; Rey et al., 2019). Da mesma forma, nas regiões áridas e semiáridas da China, Wang et al. (2023) enfatizaram a importância dos direitos de água negociados para alocação adaptativa em condições de alta eficiência no uso da água.

Dessa forma, o engajamento social robusto pode servir como um mecanismo importante para fortalecer a resiliência à seca, alinhando os interesses de tomadores de decisão, partes interessadas e cientistas (Varady et al., 2016). No entanto, conforme destacado por estudos de Madani e Shafiee-Jood (2020) e Pande e Sivapalan (2017), ainda existe uma lacuna significativa na compreensão de como as decisões humanas, especialmente as negociadas, interagem com a lógica hidrológica e remodelam o comportamento dos sistemas hídricos. Capturar esses feedbacks requer não apenas modelagem, mas também uma análise de dados históricos de registros de processos participativos.

Embora haja muita pesquisa sobre quantidade, qualidade e alocação de água, poucos estudos examinam essas dimensões em conjunto, particularmente no âmbito da tomada de decisão participativa (Zhou, 2020). Diante disso, este estudo visa ajudar a preencher essa lacuna investigando as seguintes questões de pesquisa: *(i) Como um sistema de gestão participativa influencia a relação entre as decisões de armazenamento e liberação de água em reservatórios multiuso? (ii) Quais elementos qualitativos e quantitativos relevantes para a hidrologia e os sistemas acoplados de água e humanos podem ser extraídos de registros históricos de reuniões de partes interessadas?*

Este capítulo aborda essa lacuna examinando como a governança participativa influencia a alocação de água em reservatórios multiuso, integrando elementos qualitativos e quantitativos. Para isso, analisa mais de duas décadas de engajamento de partes interessadas em uma região semiárida do Brasil, identificando como a negociação social afeta as decisões de liberação e como padrões históricos emergem dessas interações. Diante disso, os objetivos específicos deste estudo são: *(i) avaliar a relação entre liberação de água e armazenamento em reservatórios; (ii) comparar como as relações liberação-armazenamento são influenciadas por*

fatores hidrológicos e de demanda; e (iii) identificar os principais elementos qualitativos e quantitativos que influenciam a tomada de decisões na governança participativa da água.

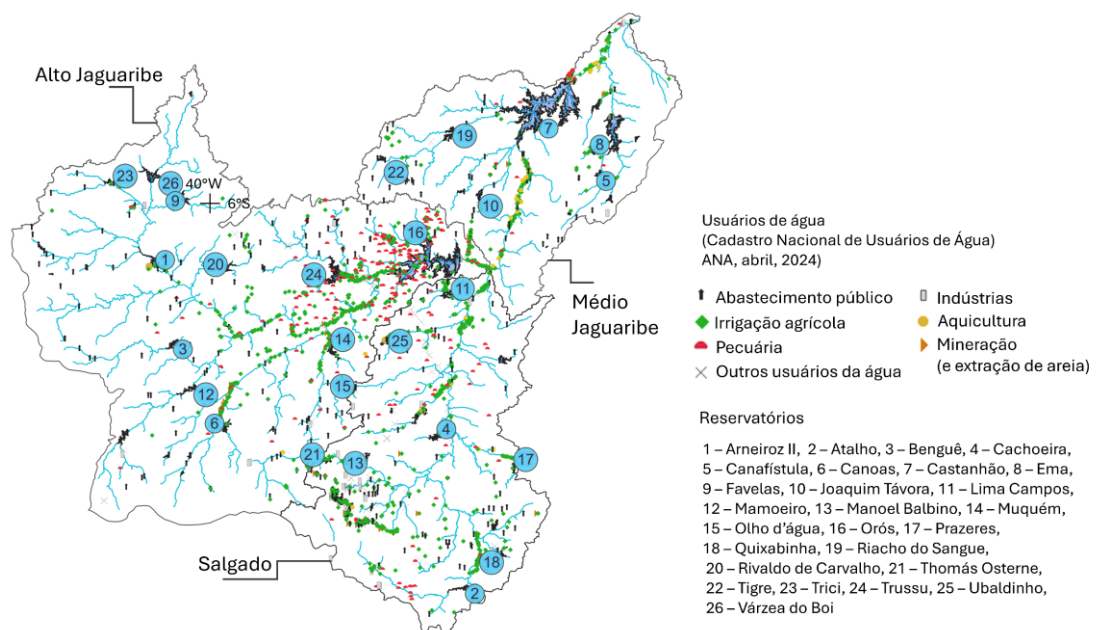
### 3.2 Materiais e métodos

#### 3.2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange três bacias hidrográficas ao longo do Rio Jaguaribe, o maior rio do Estado do Ceará, com cerca de 680 km de extensão desde a nascente até a foz (Castro et al., 2020). As três bacias hidrográficas selecionadas (Salgado (SL), Alto Jaguaribe (AJ) e Médio Jaguaribe (MJ)) abrangem uma área de 48.010 km<sup>2</sup>, apresentada na Figura 11, correspondendo a 60% da bacia do Rio Jaguaribe. As bacias hidrográficas SL, AJ e MJ possuem históricos de transferência de água, grandes áreas de agricultura irrigada e um dos maiores reservatórios de usos múltiplos da América Latina, o reservatório Castanhão. No Nordeste do Brasil, há também um importante programa de transferência de água interestadual (Projeto de Integração do Rio São Francisco) que transfere água do Rio São Francisco para o Castanhão, passando pela bacia hidrográfica do Salgado (Medeiros et al., 2022).

Na Figura 11 estão apresentados os 26 reservatórios localizados nas bacias hidrográficas avaliadas nesta pesquisa e na Tabela 2 foram fornecidos dados adicionais sobre esses reservatórios.

Figura 11 – Reservatórios e principais usuários de água na área de estudo



Fonte: elaborado pela autora

Tabela 2 – Dados sobre a bacia hidrográfica e o armazenamento de água nos reservatórios selecionados

	Área de drenagem incremental (km <sup>2</sup> )	Área total de drenagem (km <sup>2</sup> )	Volume mínimo (hm <sup>3</sup> )	Volume máximo (hm <sup>3</sup> )	Volume útil (hm <sup>3</sup> )
Arneiroz II	2934.30	5401.60	0.06	187.69	187.63
Atalho	1976.40	1976.40	2.12	108.25	106.13
Benguê	937.90	937.30	1.30	19.56	18.26
Cachoeira	136.80	136.80	0.32	34.33	34.01
Canafistula	52.00	52.00	1.14	13.11	11.95
Canoas	549.30	549.30	0.01	69.25	69.24
Castanhão	15339.00	44951.40	57.50	6700.00	6642.50
Ema	82.90	82.90	0.54	10.39	9.85
Favelas	663.10	663.10	1.87	30.10	28.23
Joaquim Távora	120.40	120.40	1.98	26.77	24.79
Lima Campos	354.80	354.80	0.85	66.38	65.53
Mamoeiro	736.00	1675.00	2.55	20.49	17.95
Manoel Albino	41.70	41.70	0.10	37.18	37.08
Muquém	297.50	297.50	5.10	47.64	42.54
Olho d'água	73.60	73.60	2.36	21.00	18.64
Orós	14076.50	24818.30	16.87	1940.00	1923.13
Prazeres	145.70	145.70	2.30	32.50	30.20
Quixabinha	83.40	83.40	0.71	31.78	31.04
Riacho do Sangue	1222.30	1378.40	3.06	58.43	55.37
Rivaldo de Carvalho	307.40	307.40	0.00	20.13	20.13
Thomás Osterne	121.30	121.30	0.60	28.79	28.19
Tigre	22.30	22.30	0.00	3.51	3.51
Trici	551.10	551.10	1.36	16.50	15.14
Trussu	1572.50	1572.50	1.32	299.68	254.00
Ubalzinho	171.30	171.30	5.96	31.80	25.84
Várzea do Boi	1253.10	1253.10	5.55	51.91	46.36

Fonte: Adaptado de Brasil (2017)

A área selecionada é predominantemente semiárida, com precipitação média anual variando de 600 a 800 mm e evaporação potencial superior a 2 m (Uvo; Berndtsson, 1996; Gaiser et al., 2002). A estação chuvosa ocorre de dezembro/janeiro a junho/julho, mas a precipitação se concentra entre fevereiro e maio, favorecida pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Utida et al., 2019). As vazões dos rios geralmente apresentam alta variabilidade interanual, com coeficientes de variação maiores que 1,0 (Güntner; Bronstert, 2004). A precipitação local é influenciada principalmente por fenômenos oceano-atmosféricos, como El Niño, que inibe a formação de nuvens ao mudar a posição da célula de Walker e deslocar a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Em contraste, vazões mais elevadas são normalmente observadas durante anos de La Niña (Zanella, 2014).

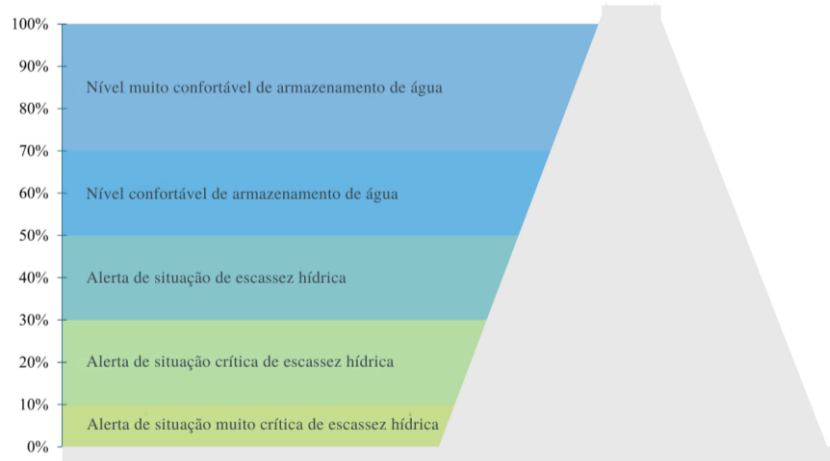
A seca é um fenômeno recorrente nesta região, geralmente caracterizada por anos secos sucessivos intercalados por anos mais chuvosos, mas anomalias negativas de precipitação desde 2010 revelaram secas ainda mais intensas e prolongadas (Alvalá et al., 2017; Marengo et

al., 2018). A propagação da seca meteorológica para a seca hidrológica é desacelerada por uma rede de reservatórios que retardam a escassez de água nesta região (van Langen et al., 2021). Se uma seca meteorológica for prolongada, as secas socioeconômicas e ecológicas também se intensificam, com efeitos severos na agricultura e degradação do bioma predominante, a Caatinga (Paredes-Trejo et al., 2023; Refati et al., 2023).

A densa rede de reservatórios de usos múltiplos influencia fortemente as demandas para o abastecimento público de água, dessedentação animal e a agricultura irrigada, juntamente com problemas relacionados à poluição dos rios devido a déficits de saneamento (Freire; Costa; Lima Neto, 2023). Os planos de gestão de recursos hídricos definem quais reservatórios são estratégicos para garantir o abastecimento de usos múltiplos no estado do Ceará, especialmente durante secas mais prolongadas, com prioridades para abastecimento público de água e dessedentação animal. Além disso, uma densa rede de pequenas barragens pode intensificar a frequência e a severidade das secas hidrológicas em grandes reservatórios estratégicos, dificultando a alocação de água (Rabelo et al., 2022; Colombo et al., 2024). No entanto, pequenos reservatórios possuem relevância social, aumentando a produção agrícola local e reduzindo a insegurança hídrica local em pequenas comunidades (Ribeiro Neto et al., 2024). As previsões climáticas para esta região sinalizaram a intensificação de eventos de seca prolongada e eutrofização de reservatórios (Raulino; Silveira; Lima Neto, 2021).

Apesar de suas naturezas distintas, a seca (natural) e a escassez hídrica (antropogênica) podem ocorrer simultaneamente e estão diretamente relacionadas em muitas regiões do mundo (van Loon; van Lanen, 2013). A escassez hídrica é influenciada pela relação entre demandas e disponibilidade hídrica (Rijsberman, 2006). Na região de estudo, há uma classificação de alerta de escassez hídrica baseada no volume de água nos reservatórios que deve ser considerada de acordo com a Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (Conerh) n° 03/2020 (Figura 12) (Ceará, 2020). Segundo essa classificação, quando o reservatório atinge um armazenamento igual ou inferior a 50% de sua capacidade máxima, um alerta de escassez hídrica é iniciado.

Figura 12 – Classes de alerta de escassez hídrica em reservatórios do estado do Ceará



Fonte: elaborado pela autora (Dados: Ceará, 2020)

### 3.2.2 Alocação negociada de água no estado do Ceará

Em 1994, após uma crise hídrica, a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh) iniciou um processo de mobilização com os atores das bacias hidrográficas do Médio e Baixo Jaguaribe e Banabuiú, em relação à operação dos reservatórios, marcando o início da gestão participativa das águas no Estado do Ceará (Souza Filho, 2001). A determinação da liberação de água dos reservatórios com a participação das partes interessadas é denominada de alocação negociada de água, e acontece por meio de comitês de bacia hidrográfica (CBH) ou comissões de gestão de sistemas hídricos. Os CBH contribuem para essa negociação, avaliando cada reservatório individualmente ou um sistema de múltiplos reservatórios (Ceará, 2007).

Ao longo do tempo, o processo de alocação de água no Estado do Ceará ampliou a capacidade de participação e a diversidade de atores envolvidos (Carvalho et al., 2024). Os instrumentos de adaptação à seca e as políticas públicas sociais foram essenciais para minimizar os efeitos das grandes secas nas perdas agrícolas e no abastecimento de água (Sabourin, 2022). Nesse processo evolutivo de gestão, os planos proativos de seca já se encontravam em fase inicial de desenvolvimento nessa região (Cid et al., 2024).

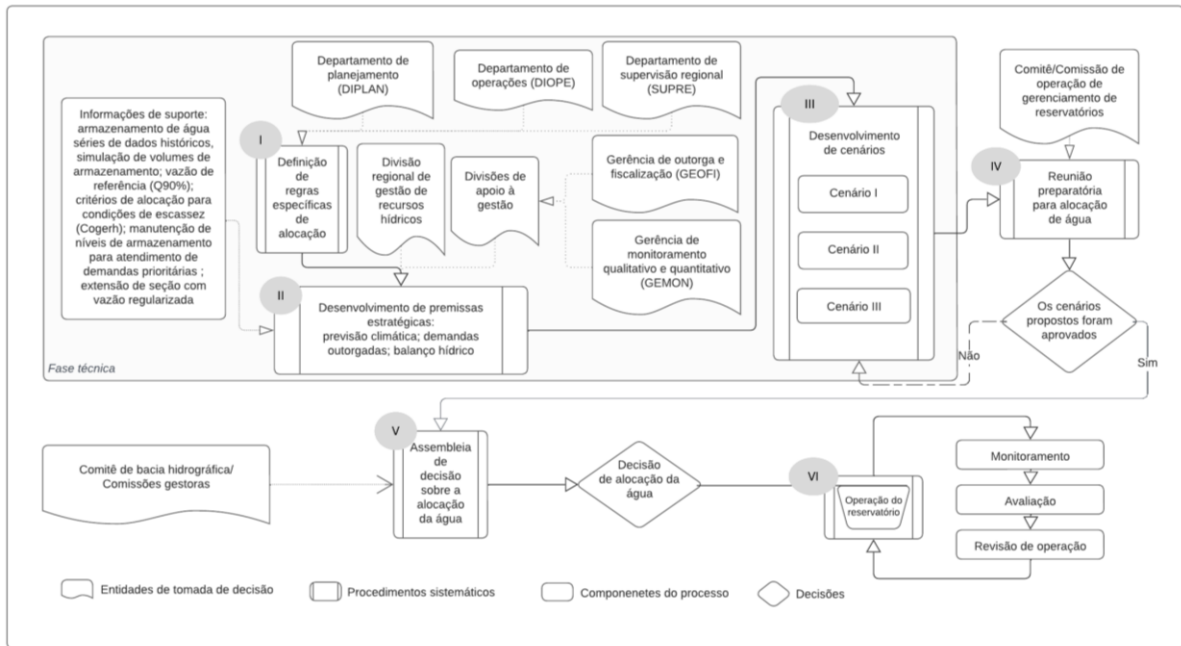
A discussão e aprovação dos parâmetros de alocação de água pelo CBH são responsabilidades declaradas na política nacional de águas (Brasil, 1997; Rothberg; Garde-Hansen, 2021). A formalização do primeiro CBH no Ceará ocorreu em 1997, na bacia hidrográfica do Curu (Marques et al., 2019). O CBH é composto por partes interessadas na gestão da água, onde até 30% dos membros são representações dos setores usuários de água,

até 30% são de organizações civis, até 20% são entidades estaduais e federais e até 20% são membros que representam municípios da bacia hidrográfica (Ceará, 2010). Os comitês também possuem representantes permanentes de entidades públicas das esferas estadual e federal, os quais atuam diretamente na gestão dos recursos hídricos e são responsáveis pela operação de reservatórios públicos.

Um fluxograma sistematizando as principais etapas para alocação de água está apresentado na Figura 13. Os procedimentos para alocação de água no Ceará incluem uma fase técnica (etapas I, II e III na Figura 13), realizada por instituições responsáveis pela gestão de recursos hídricos, e compreendem a definição de possíveis cenários e premissas estratégicas. Desde meados da década de 1990, as previsões sazonais de precipitação, fornecidas pela Funceme, orientam a alocação de água, especialmente em grandes reservatórios estratégicos, contribuindo para evitar tanto vazões liberadas excessivas quanto restrições desnecessárias que gerariam escassez para as demandas no Estado do Ceará (Pereira et al., 2023).

Após a fase técnica mencionada, os cenários propostos são apresentados ao comitê de gestão do reservatório ou para um grupo de reservatórios se estiverem no mesmo sistema hídrico (Figura 13, etapa IV). Os cenários aprovados são escolhidos pelos membros do CBH (Figura 13, etapa V), e os limites máximos e mínimos a serem liberados pelo reservatório são definidos. Essas assembleias de alocação estratégica de água ocorrem anualmente, geralmente após o período chuvoso, com ampla participação das partes interessadas (Campos; Studart et al., 2006). Na operação do reservatório (Figura 13, etapa VI), critérios quantitativos e qualitativos são avaliados, sendo possível revisar as operações para estabelecer regras operacionais atualizadas. Existe a possibilidade de realocação de água em situações emergenciais de abastecimento, desde que aprovada e justificada tanto pelo comitê de gestão do reservatório quanto pela Cogerh.

Figura 13 – Esquemática do processo de alocação negociada de água no estado do Ceará



Fonte: elaborado pela autora

### 3.2.3 Fontes de dados

As séries de dados referentes à liberação de água ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) dos reservatórios foram fornecidas pela Cogerh, abrangendo os anos de 2004 a 2022. As séries históricas referentes ao armazenamento ( $\text{hm}^3$ ) e à liberação de água ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) dos reservatórios foram obtidas do Portal Hidrológico do Ceará (<http://www.hidro.ce.gov.br/>), administrado pela Cogerh e pela Funceme. Os dados analisados para a avaliação quantitativa desta pesquisa incluíram informações diárias sobre todos os reservatórios inclusos na pesquisa, entre o período de 2004 a 2022, exceto Tigre e Arneiroz II, cujos registros disponíveis foram de 2005 a 2022, e Mamoeiro, entre 2013 e 2022.

Quantitativamente, dados hidrológicos (área de drenagem ( $\text{km}^2$ ), bacia incremental ( $\text{km}^2$ ), volume mínimo ( $\text{hm}^3$ ), volume útil ( $\text{hm}^3$ ), capacidade ( $\text{hm}^3$ ), vazão anual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), vazão regulada ( $\text{m}^3/\text{s}$ )) e demandas (abastecimento urbano, abastecimento rural, irrigação, indústria e transposição de água) foram obtidos a partir da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil, 2017).

Qualitativamente, foram avaliadas as atas das reuniões do CBH, bem como os planos de gestão de recursos hídricos. Esta análise qualitativa dos registros das reuniões buscou investigar os principais aspectos que orientaram a tomada de decisão sobre a liberação de água. Os CBH forneceram no total 157 atas de reuniões, consistindo em 5 atas da bacia do Alto Jaguaribe, 79 para a bacia do Médio Jaguaribe e 73 para a bacia do Salgado, abrangendo os

anos de registros entre 2004 e 2022.

As atas das reuniões fornecidas pelo CBH foram compiladas e incluídas no material suplementar, disponibilizado na base de dados de publicação do artigo científico do presente capítulo (<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf>). Embora os planos de gestão de recursos hídricos estejam disponíveis publicamente no site da Cogerh (<https://portal.cogerh.com.br/>), uma cópia de backup do resumo oficial também foi fornecida no material suplementar (<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc3.pdf>).

### **3.2.4 Metodologia**

#### *3.2.4.1 Análise quantitativa de dados*

Primeiramente, foi realizada uma análise de regressão linear para avaliar a associação entre a água liberada e o percentual de volume de água armazenado (determinado pela relação entre o armazenamento do reservatório e a capacidade do reservatório). Nessa etapa, foram identificadas curvas de regressão com coeficientes positivos ou negativos, bem como se grandes quantidades de volume de água foram liberadas em períodos com percentuais de armazenamento abaixo de 50%, visto que este é o limite considerado localmente para alertas de escassez hídrica (Ceará, 2020).

Em segundo lugar, foram realizadas análises de correlação, considerando o armazenamento e a liberação de água nos reservatórios, em escalas de dados diárias, mensais e sazonais. A escala sazonal considerou a frequência cumulativa dos dados no primeiro e segundo semestres de cada ano analisado. O primeiro semestre foi influenciado pela estação chuvosa e o segundo, pela estação seca, durante a qual a vazão dos reservatórios é igual ou muito próxima de zero. Para isso, aplicamos as medidas de Pearson, Spearman e Kendall como as principais técnicas estatísticas para avaliar como as mudanças em uma variável influenciaram a outra. O coeficiente de Pearson ( $r$ ) tende a avaliar melhor uma associação linear, enquanto os coeficientes Spearman ( $\rho$ ) e Tau de Kendall são baseados em classificações de correlação ou medidas de concordância (Heuvel; Zhan, 2022, Liu et al., 2016).

Essas três medidas possuem propósitos semelhantes, mas podem produzir resultados diferentes dependendo da série de dados. O Tau de Kendall, por exemplo, é menos sensível a *outliers* do que a correlação de Pearson (Loperfido, 2021). A existência de valores semelhantes na série de dados pode diferenciar os resultados do Tau de Kendall em relação ao

coeficiente de Spearman (Puth et al., 2015). O objetivo desta etapa não foi comparar correlações, mas verificar se alguma delas apresenta forte correlação entre armazenamento e liberação de água em um conjunto de dados variável e complexo. As análises de correlação foram realizadas utilizando a função *cor.test* do pacote *stats* no software R, considerando um nível de confiança de 95% (R Core Team, 2024).

Para comparar os padrões de liberação de água entre reservatórios de múltiplos usos, foi realizada uma análise de agrupamento. As relações entre liberação de água e armazenamento do reservatório, dados hidrológicos e de demanda, foram classificados hierarquicamente por clusterização não supervisionada pelo método UPGMA (Método de agrupamento de pares não ponderado usando médias aritméticas), considerando a distância euclidiana entre os dados. Portanto, três testes de agrupamento foram realizados. O primeiro agrupamento foi realizado com os reservatórios de acordo com dados hidrológicos (área de drenagem (km<sup>2</sup>), bacia incremental (km<sup>2</sup>), volume mínimo (hm<sup>3</sup>), volume útil (hm<sup>3</sup>), capacidade (hm<sup>3</sup>), vazão anual (m<sup>3</sup>/s), vazão regulada (m<sup>3</sup>/s)). O segundo agrupamento foi realizado a partir de dados absolutos de demanda de água, enquanto que para o terceiro foram considerados os resultados das correlações mais fortes entre liberação de água e armazenamento do reservatório para cada um dos 26 reservatórios.

#### 3.2.4.2 Análise de atas de reuniões e aplicação do modelo DPSIR

Na análise qualitativa, foi realizada inicialmente uma leitura detalhada das atas das reuniões para compreender a dinâmica das reuniões, os eventos mais recorrentes, o contexto da alocação negociada e os principais tópicos discutidos no CBH. Durante essa etapa, as principais discussões foram categorizadas como *Motriz*, *Pressões*, *Estado*, *Impacto* e *Respostas*, estabelecendo assim os elos analíticos iniciais, seguindo uma versão traduzida do modelo internacional DPSIR (*Driver – Pressure – State – Impact – Response*).

No DPSIR, os fatores motrizes (*Driver*) estão relacionados às necessidades humanas que geram pressões (*Pressure*) sobre o ambiente, seja como consequência direta ou indireta. Essas pressões alteram o estado (*State*) do ecossistema, causando mudanças nas condições físicas, químicas ou biológicas. Consequentemente, essas mudanças resultam em impactos (*Impact*). Nesse sentido, os grupos de gestão respondem a aspectos dos fatores motrizes, pressões, estados e do próprio impacto, visando reduzir os efeitos negativos das necessidades humanas (Afedor et al., 2024). A organização do framework *DPSIR* foi realizada no *Cmap Tools Software* (<http://cmap.ihmc.us/conceptmap.htm>).

A segunda etapa envolveu o refinamento e a expansão dos resultados iniciais por meio de uma busca textual direcionada aos elementos direcionadores identificados na primeira etapa, com o objetivo de revisitar e detalhar os tópicos já selecionados para a estrutura do DPSIR. Essa busca foi realizada a partir de palavras-chave como "*conflitos*", "*operação*", "*alocação*", "*seca*", "*escassez*", "*válvulas*", "*poluição*", "*esgoto*", "*resíduos*", "*reservatórios*", "*fluxo*" e "*abastecimento*". Na terceira etapa, os resultados foram consolidados e posteriormente corroborados por informações diagnósticas dos planos de gestão de recursos hídricos, com atenção especial às referências a registros de reuniões, diagnóstico, prognóstico e respostas planejadas.

Por fim, o modelo DPSIR (Burkhard; Müller, 2007) foi aplicado para sistematizar as características quantitativas e qualitativas identificadas em sistemas de alocação negociada de água. Destaca-se que outras pesquisas também utilizaram a estrutura *DPSIR* para avaliar a gestão de recursos hídricos (Sun et al., 2016, Zhang; Wei; Mao, 2023). As ocorrências recorrentes na série histórica de dados foram classificadas como eventos. Em seguida, foi elaborada uma representação gráfica dos principais eventos, considerando a avaliação qualitativa e a série histórica quantitativa de liberações de água.

### **3.3 Resultados**

#### ***3.3.1 Correlações entre liberação e armazenamento de água em reservatórios***

Na Figura 14 está ilustrada a liberação de água como variável dependente em relação ao volume de água armazenada (em valores percentuais, %). Duas condições de armazenamento são distinguidas: (a) armazenamento abaixo de 50% (em laranja), indicando pelo menos um nível de alerta de escassez hídrica; (b) armazenamento igual ou superior a 50% (em azul), indicando condições confortáveis de disponibilidade hídrica.

Figura 14 – Porcentagem do volume de água armazenado versus liberação de água



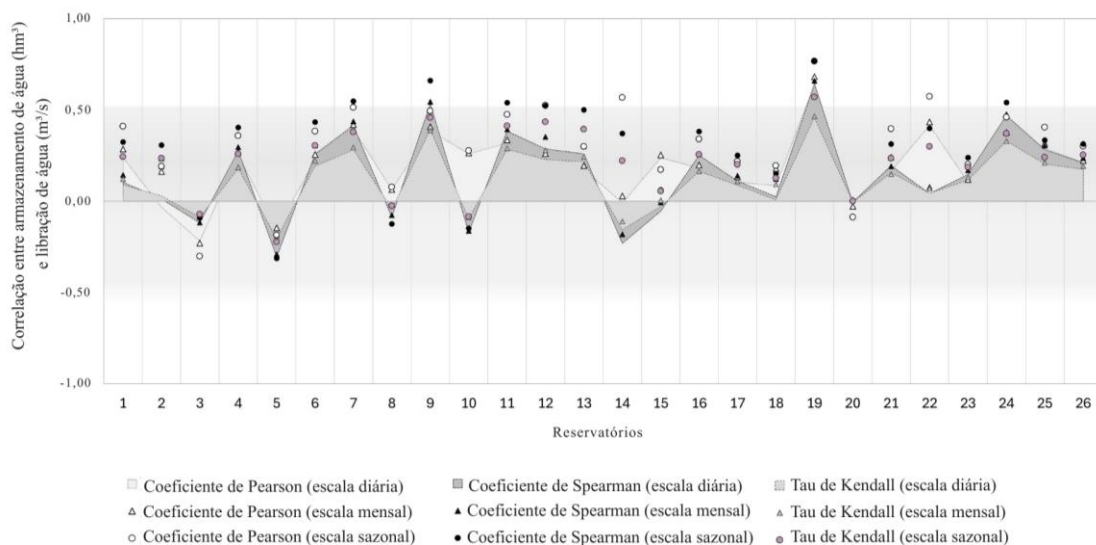
Legenda: 1 Arneiroz II, 2 – Atalho, 3 – Benguê, 4 – Cachoeira, 5 – Canafistula, 6 – Canoas, 7 – Castanhão, 8 – Ema, 9 – Favelas, 10 – Joaquim Távora, 11 – Lima Campos, 12 – Mamoeiro, 13 – Manoel Balbino, 14 – Muquém, 15 – Olho d’água, 16 – Orós, 17 – Prazeres, 18 – Quixabinha, 19 – Riacho do Sangue, 20 – Rivaldo de Carvalho, 21- Thomás Osterne, 22 – Tigre, 23 – Trici, 24 – Trussu, 25 – Ubaldinho, 26 – Várzea do Boi.  
 Fonte: elaborado pela autora (Dados: Cogerh; Funceme)

As menores liberações de água foram provenientes dos reservatórios com as menores capacidades de armazenamento (Reservatórios 22 e 8). Da mesma forma, as maiores vazões foram provenientes dos reservatórios com maiores capacidades de armazenamento (Reservatórios 7 e 16). No entanto, esse padrão não foi consistente para todos os reservatórios.

O reservatório 11, por exemplo, não é o terceiro em capacidade de armazenamento, mas apresentou a terceira maior vazão. Isso significa que a capacidade de armazenamento por si só não justifica o volume de água liberado, embora o regime hidrológico e a variabilidade sejam considerados no projeto dos reservatórios.

Os resultados também indicaram que elevadas quantidades de liberações de vazão ocorreram para a maioria dos reservatórios, tanto durante alertas de escassez hídrica quanto em condições confortáveis de disponibilidade hídrica. As liberações de água em estágios mais secos foram mais espaçadas, pois geralmente ocorrem com menos frequência. Os diferentes padrões de liberação de água indicaram quão específicas são as regras operacionais dos reservatórios nesta região. As grandes quantidades de volume liberadas durante o armazenamento abaixo de 50% foram suficientes para enfraquecer uma possível relação monotônica entre o volume armazenado e a água liberada nos reservatórios em uma escala diária. Essa descoberta se torna mais perceptível nos resultados das medições dos coeficientes de Pearson, Spearman e Tau Kendall apresentados na Figura 15.

Figura 15 – Correlações entre o armazenamento do reservatório e a liberação de água dos reservatórios



Legenda: 1 Arneiroz II, 2 – Atalho, 3 – Benguê, 4 – Cachoeira, 5 – Canafistula, 6 – Canoas, 7 – Castanhão, 8 – Ema, 9 – Favelas, 10 – Joaquim Távora, 11 – Lima Campos, 12 – Mamoeiro, 13 – Manoel Balbino, 14 – Muquém, 15 – Olho d’água, 16 – Orós, 17 – Prazeres, 18 – Quixabinha, 19 – Riacho do Sangue, 20 – Rivaldo de Carvalho, 21- Thomás Osterne, 22 – Tigre, 23 – Trici, 24 – Trussu, 25 – Ubaldinho, 26 – Várzea do Boi.  
Fonte: elaborado pela autora

As correlações mais fracas foram encontradas para os reservatórios 20, 18 e 2, em escala diária. O principal uso da água do reservatório 20 é o abastecimento público. Apenas liberações de água rápidas foram identificadas em 4 dos 19 anos avaliados (entre 2005 e 2008), e ocorreram com a condição de armazenamento tanto abaixo como acima de 50%. De acordo

com o plano de bacia hidrográfica, este reservatório possui outorgas para abastecimento humano, que é quase exclusivamente sua função.

Em relação ao Reservatório 18, a maior parte das liberações ocorreu na estação seca, quando a demanda por água se intensifica devido à redução do escoamento superficial natural, enquanto na estação chuvosa, a precipitação diminui a demanda por irrigação, mantendo também pequenas reservas hídricas. As descargas do Reservatório 2 foram semelhantes às do Reservatório 18, com descargas anuais geralmente ocorrendo na estação seca, intercaladas com interrupções. Neste reservatório, uma das maiores descargas do conjunto de dados ( $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) foi registrada entre 2015 e 2016, quando o armazenamento do reservatório se encontrou abaixo de 10%.

As maiores correlações ocorreram para os reservatórios 19, 9 e 24. Embora as correlações de Pearson para o reservatório 22 tenham sido próximas de moderadas, as de Spearman e Kendall foram muito fracas, provavelmente devido a liberações rápidas. O reservatório 19 foi o único com correlações moderadas em todas as escalas de tempo. Neste reservatório, liberações rápidas ocorreram apenas em anos de seca hidrológica intensificada (2012–2016), e houve uma redução de mais de 50% da água liberada quando o reservatório estava com menos de 20% do armazenamento, revelando um limite definido durante a seca hidrológica para manter o abastecimento público de água como prioridade.

No reservatório 19, também houve algumas limitações na liberação, associadas à qualidade da água, conforme relatado nos registros de reuniões do CBH (ver p.146, <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf>). Há, nas atas de reunião, registros recorrentes de relatos sobre questões hídricas qualitativas desse reservatório (ex.: ver pp. 118, 120, 217, 225, 226, <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf>). Nos reservatórios 9 e 24, foi encontrada uma influência muito pequena de liberações rápidas, e as interrupções mais longas ocorreram quando o armazenamento era inferior a 20%.

A influência das liberações rápidas pôde ser observada especialmente no reservatório 14, onde as medidas de concordância passaram de uma correlação negativa fraca em escala diária para uma correlação positiva moderada em escala sazonal. Este reservatório apresentou liberações rápidas na maioria dos anos avaliados, exceto em 2004, 2009 e 2013. Na escala diária, o efeito das liberações rápidas na estação seca reduz a força da correlação. Em escala mensal e sazonal, esse efeito é reduzido. O aumento na força da correlação em escalas

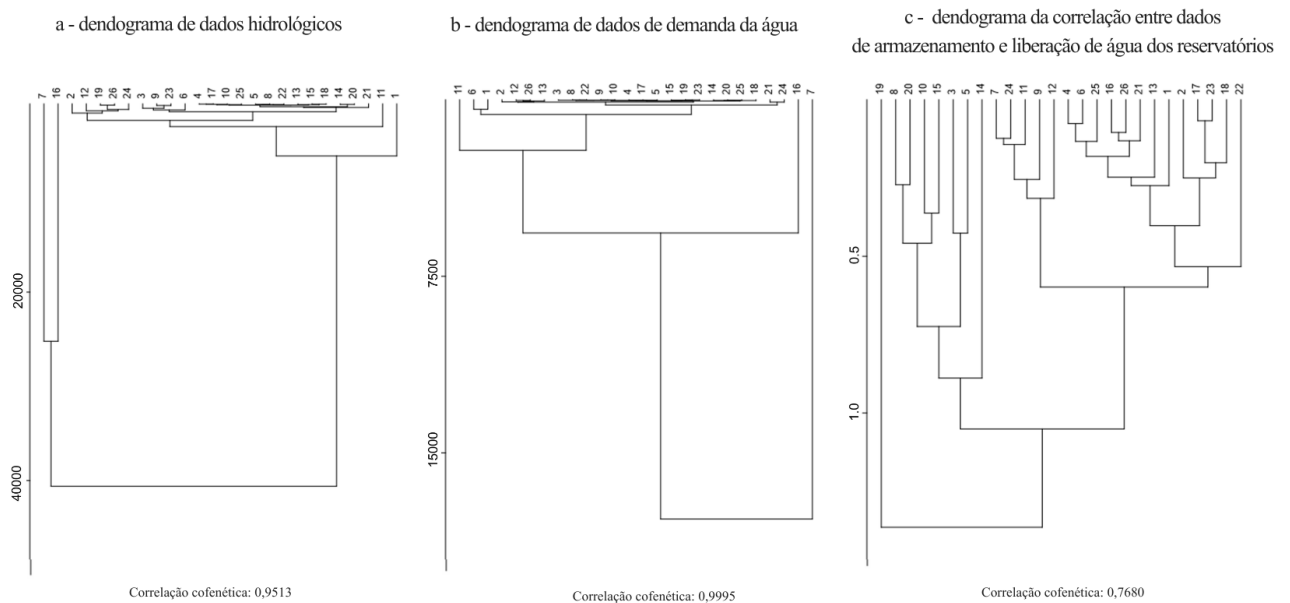
mensal e sazonal também ocorreu nos reservatórios 7, 11, 13 e 22. No reservatório 10, o aumento na correlação ocorreu apenas para a correlação de Pearson.

Os reservatórios 3, 5, 8 e 20 não apresentaram alterações significativas na avaliação em diferentes escalas, permanecendo com correlações muito fracas. Nesses reservatórios, foram observadas interrupções mais longas e espaçadas na liberação de água e vazões constantes para abastecimento público, independentemente de o armazenamento ser inferior ou superior a 50%.

### 3.3.2 Agrupamento de aspectos quantitativos

Os insights obtidos a partir da análise das atas das reuniões e dos dados de liberação de água e armazenamento do reservatório podem ser consolidados pelos dendrogramas de agrupamento apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Dendrogramas de agrupamento hierárquico



Legenda: 1 Arneiroz II, 2 – Atalho, 3 – Benguê, 4 – Cachoeira, 5 – Canafistula, 6 – Canoas, 7 – Castanhão, 8 – Ema, 9 – Favelas, 10 – Joaquim Távora, 11 – Lima Campos, 12 – Mamoeiro, 13 – Manoel Balbino, 14 – Muquém, 15 – Olho d’água, 16 – Orós, 17 – Prazeres, 18 – Quixabinha, 19 – Riacho do Sangue, 20 – Rivaldo de Carvalho, 21- Thomás Osterne, 22 – Tigre, 23 – Trici, 24 – Trussu, 25 – Ubaldinho, 26 – Várzea do Boi.

Fonte: elaborado pela autora

Em relação aos dados hidrológicos (Figura 16a), os reservatórios 7 e 16 estão em um clado com maior distância euclidiana em comparação aos outros reservatórios, o que uma clara diferenciação apenas para os maiores reservatórios. Os outros reservatórios são agrupados com diferenças relativamente pequenas.

No segundo agrupamento (Figura 16b), uma condição semelhante ocorre no conjunto de dados. O reservatório 7 é classificado como uma classe distinta na análise de

agrupamento hierárquico. Nesse sentido, os reservatórios 16 e 11 também apresentam maiores distâncias entre os dados dos demais reservatórios. O terceiro agrupamento (Figura 16c) revelou o reservatório 19 como o mais divergente, no que se refere às correlações entre liberação de água e armazenamento do reservatório, sendo este reservatório o que apresentou as correlações mais fortes.

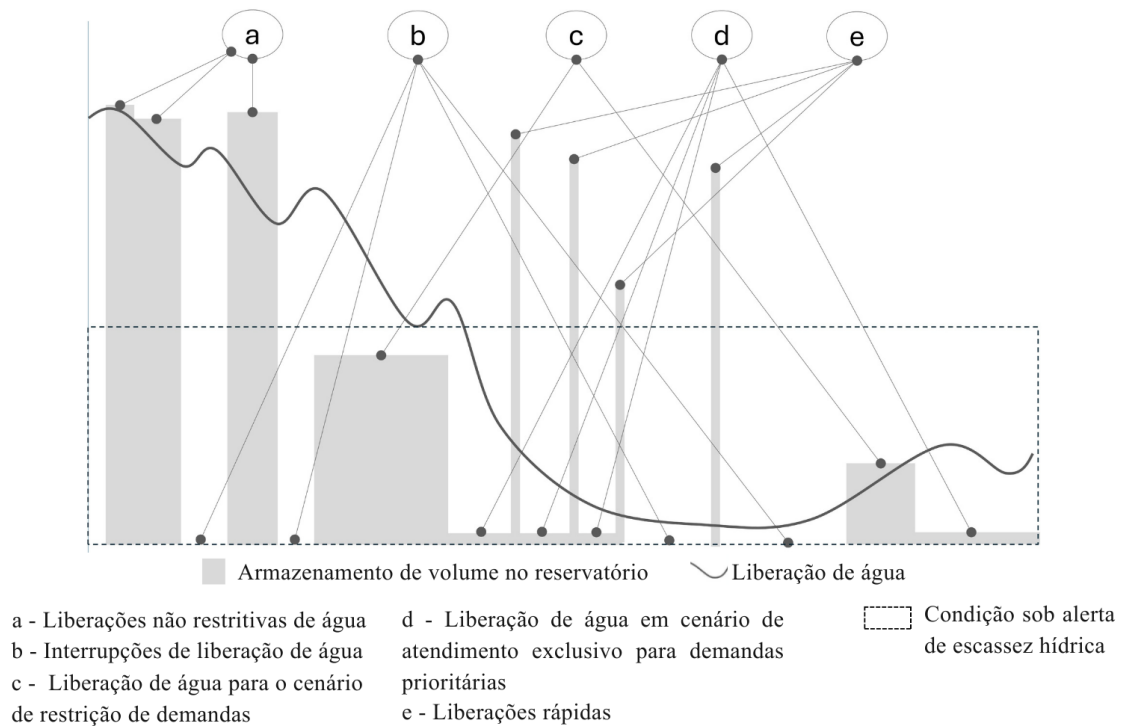
O terceiro cluster revela subclasses mais diferenciadas quanto às relações entre armazenamento e liberação de água, mas estas não são prontamente associadas às condições hidrológicas ou de demanda gerais. Ressalta-se que o coeficiente cofenético também diferiu entre os três clusters, com maior similaridade entre a qualidade de representação do cluster para questões hidrológicas e de demanda do que para os grupos que combinam coeficientes de correlação entre água armazenada e liberação. De fato, não foi possível estabelecer relações diretas entre os dendrogramas, o que revela a variabilidade e a complexidade das relações entre armazenamento e liberação de água, em contraste com as demais características de reservatórios sob gestão participativa.

### **3.4 Análise das reuniões dos comitês e aplicação do quadro DPSIR**

A análise das atas das reuniões dos CBH revelou um sistema hidrológico fortemente influenciado por questões sociais, onde a principal função dos reservatórios relatada foi o abastecimento público de água. No entanto, também houve altas demandas e conflitos em relação à disponibilidade de água para irrigação agrícola (ver, por exemplo, pp. 603, 707, <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf>). Cinco eventos principais foram verificados que ocorreram em diferentes condições de armazenamento do reservatório e estão apresentados na Figura 17.

Destaca-se que a Figura 17 é ilustrativa e combina informações obtidas das avaliações quantitativa e qualitativa. Não há escala definida na representação dos eixos, pois a intenção é apresentar eventos que ocorrem na série histórica, a partir dos dados disponíveis na mesma (disponibilizados em conjunto de dados suplementares: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc1.docx>). No entanto, a fidelidade dos eventos de liberação recorrentes em relação ao armazenamento foi representada, há liberações mais rápidas e interrupções mais longas quando há menos água armazenada no reservatório, por exemplo.

Figura 17 – Eventos recorrentes na liberação de água para manutenção do fluxo a jusante dos reservatórios estudados



Fonte: elaborado pela autora

As liberações não restritivas de água (Figura 17a) foram conduzidas com base em critérios de alocação que não consideravam cenários de escassez. Elas foram interrompidas após o abastecimento de água e as necessidades de usos múltiplos serem atendidas. Durante esses períodos não restritivos, as vazões aprovadas foram as mais altas, visando acomodar o número máximo de usos de água a jusante. Quando o armazenamento do reservatório excedeu 50%, as partes interessadas buscaram suprir o maior número de demandas de água. Os participantes do CBH justificaram ainda que não liberar água durante esse período resultaria em perdas devido às altas taxas de evaporação na região.

Interrupções na liberação de água (Figura 17b) foram frequentes na maioria dos reservatórios, especialmente aqueles localizados nas bacias dos rios Salgado e Alto Jaguaribe. Os reservatórios com menor frequência de interrupções foram os 16 e 7, e os mais altos foram os 20 e 26 (<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmcl.docx>). As interrupções mais longas ocorreram quando os reservatórios estavam muito próximos ou abaixo da condição de 5% de volume sobre a capacidade.

Interrupções rápidas foram associadas à manutenção dos sistemas de bombeamento, que apresentaram falhas devido à qualidade da água. Problemas notáveis de qualidade da água

evidenciados nos registros de reuniões incluíram o crescimento excessivo de macrófitas, o que prejudicou a operação da bomba, e a necessidade de limpar os rios para garantir descargas eficientes de água a jusante.

Na bacia do Alto Jaguaribe, reservatórios como os 24, 3, 12 e 1 sofreram interrupções para manter um volume seguro para o abastecimento público de água. O reservatório 6 não contribuiu para a manutenção do fluxo a jusante por mais de cinco anos, devido a restrições para garantir o abastecimento público, durante reduções graduais no volume de armazenamento.

Por outro lado, quando a água é bombeada para atividades econômicas estratégicas e abastecimento público em áreas a jusante, vazões mínimas são mantidas (Figura 17c). Essas liberações podem fornecer água para demandas restritivas para fins socioeconômicos e usos prioritários. A liberação de água para demandas prioritárias correspondeu a vazões direcionadas a casos específicos de abastecimento público em alguns municípios (Figura 17d).

Liberações rápidas (Figura 17e) foram relatadas como uma estratégia para fornecer água para áreas localizadas a uma distância maior dos reservatórios em um tempo menor. O controle inadequado da liberação de água (devido à abertura indesejada das válvulas) também foi documentado nas atas das reuniões do CBH como causa das liberações rápidas de água. Neste caso, ocorreram múltiplos conflitos e violações de acordos de alocação (ver p.734, <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf>).

Outro fator influente na dinâmica de operação dos reservatórios está relacionado às transferências de água entre bacias hidrográficas. No Reservatório 16, por exemplo, a maior captação de água ocorreu entre janeiro e março de 2017, quando o nível do reservatório permaneceu abaixo de 15%. No entanto, também ocorreram captações superiores a 17 m<sup>3</sup>/s, quando houve necessidade de transferência de água entre reservatórios, a fim de atender à demanda da bacia metropolitana, área com alta densidade demográfica e onde se localiza o maior polo industrial do Estado do Ceará.

Cabe destacar que, nas reuniões realizadas em abril, junho e setembro de 2015, as narrativas sobre os possíveis efeitos de uma seca se tornaram bastante evidentes, visto que a previsão do tempo alertava para a situação de volume morto na maioria dos reservatórios após a alocação de água. No entanto, a liberação contínua de água de alguns reservatórios foi necessária para suprir demandas prioritárias. Embora algumas partes interessadas questionassem as vazões a serem alocados para irrigação, a maioria dos participantes do comitê

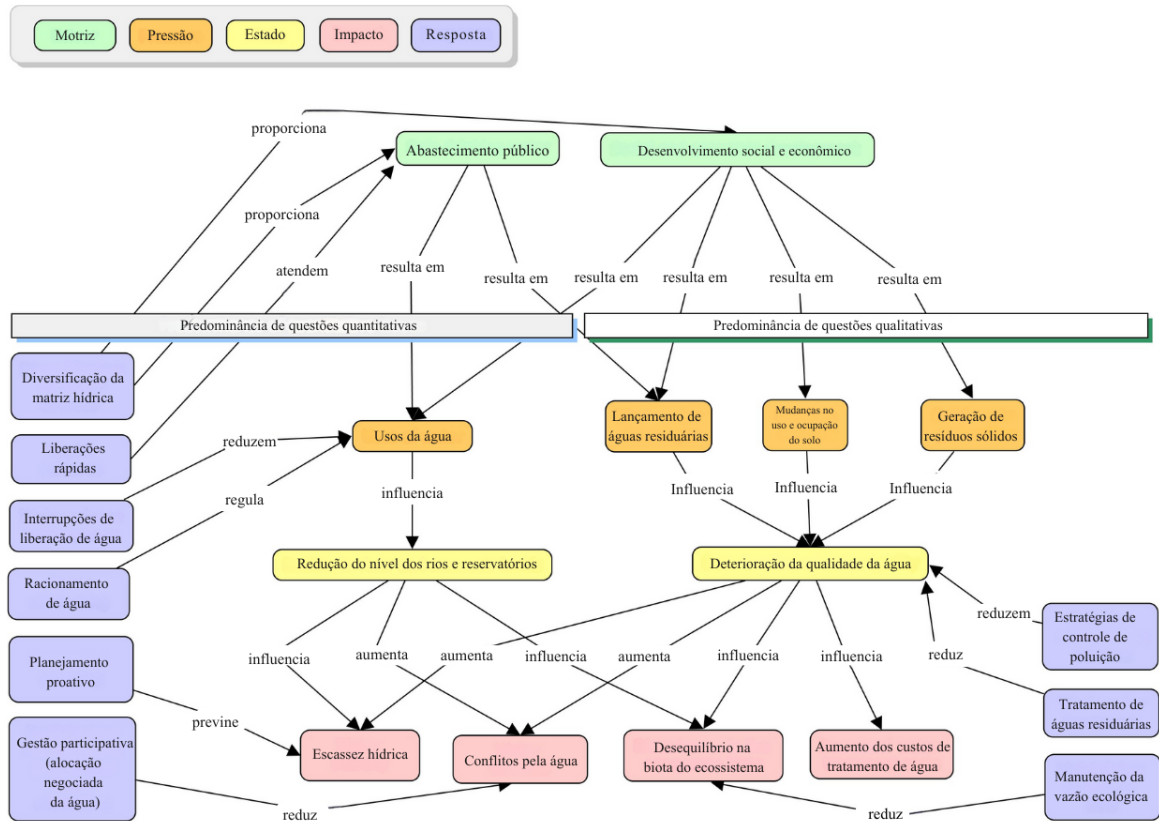
se concentrou em discutir medidas para mediar conflitos e desenvolver estratégias para economizar água nas bacias hidrográficas (ver, por exemplo, pp. 615, 631, <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf>).

As atas de reunião também revelaram que o aumento dos riscos de seca forçou os usuários a buscar outras fontes de água, inicialmente outros reservatórios no mesmo sistema hídrico. Nesse sentido, a tomada de decisões adaptativas poderia mitigar efeitos futuros mais críticos durante a seca hidrológica, mas a expectativa de transferências de água implicou em uma percepção distorcida da real disponibilidade hídrica. Essa percepção iniciada ainda dentro dos CBH e Comissões Gestoras, provocou junto aos técnicos do Sistema de Recursos Hídricos levantar sérias discussões para produzirem soluções como as Aduadoras de Montagem Rápida (AMR), entre os anos de 2013 e 2014, e em 2016 as primeiras discussões do mais novo projeto da Secretaria de Recursos Hídricos, o Projeto Malha D'água.

Nesta pesquisa, foi possível elucidar que somente durante as condições mais críticas de seca, que afetaram diversas fontes de abastecimento de água, a pressão social sobre a escassez hídrica suscitou discussões sobre ações adaptativas voltadas à economia e ao uso eficiente da água. Isso incluiu ideias sobre a mudança de métodos agrícolas tradicionais, preocupações com os impactos das águas residuárias, o comprometimento da qualidade ambiental e outras questões como a vazão ecológica.

O DPSIR, apresentado na Figura 18, foi desenvolvido com as questões qualitativas e quantitativas de motriz, pressão, estado, impacto e resposta verificadas no sistema de alocação. Adicionalmente, foi elaborado um quadro resumo (Tabela 3) com notas explicativas mais detalhadas para cada um dos elementos, o que também esclarece o entendimento das ligações feitas na sistematização DPSIR. As principais motrizes foram a necessidade de água potável segura e do desenvolvimento social e econômico que geram uso de água, lançamentos de águas residuárias, mudanças no uso do solo e resíduos sólidos. Essas pressões associadas à seca meteorológica e hidrológica favorecem o declínio do nível em rios e reservatórios e intensificam a deterioração da qualidade da água. Esses dois fatores influenciam a escassez hídrica, dependendo da demanda e disponibilidade de água, aumentando os conflitos hídricos e as perturbações na biota dos ecossistemas, além de aumentar os custos de tratamento da água.

Figura 18 – Estrutura DPSIR no sistema de alocação de água



Fonte: elaborado pela autora

Tabela 3 – Notas explicativas sobre os elementos identificados na estrutura DPSIR

Notas explicativas (páginas de referência em <a href="https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf">https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2214581825005087-mmc2.pdf</a> )	
<b>Fator motriz</b>	<p><b>Água potável segura</b> Abastecimento público de água (pp. 2, 7, 11, 39, 70, 71, 85, 96, 101, 102, 112, 115, 118, 121 – 756, 766, 767, 769).</p> <p><b>Desenvolvimento social e socioeconômico</b> Dessedentação animal (pp. 213, 224 – 226, 238, 240, 250–253, 271, 285, 292, 299, 332, 363, 370, 392, 411, 525, 536, 540, 546, 558, 562–564, 572, 609, 640, 681, 697, 738, 739, 747, 766, 767); Aquicultura (pp. 45, 51, 155, 217, 233, 248, 285–286, 327, 397, 727); Demandas agrícolas/de irrigação (pp. 2, 103, 112, 285, 411, 753); Usos industriais da água (pp. 92, 98, 148, 168, 186, 189, 198, 277, 284, 285, 491, 521, 528, 609).</p>
<b>Pressão</b>	<p><b>Usos da água</b> Intrínseco aos drivers.</p> <p><b>Descargas de águas residuárias</b> Descarga irregular em reservatórios (pp. 70, 113, 576); Descarga de águas residuais industriais (p. 597); Descarga de esgoto doméstico em rios (pp. 455, 495, 591, 597).</p> <p><b>Mudanças no uso do solo</b> Desmatamento de matas ciliares (pp. 17, 495); Ocupação irregular de Áreas de Preservação Permanente e em toda a bacia hidrográfica (pp. 193, 240, 558, 572); Desmatamento (pp. 50, 397, 423, 459, 586, 599, 619, 640); Desenvolvimento urbano e industrial (pp. 226, 288, 385, 481).</p> <p><b>Geração de resíduos sólidos</b> Descarte irregular de resíduos sólidos em rios (p. 3, 57); Descarte inadequado de resíduos em postos de combustíveis (p. 85); Descarte inadequado de resíduos da criação de camarão (p. 248, 290); Resíduos de estações de tratamento de água (p. 615).</p>
<b>E</b>	<p><b>Declínio nos</b> Reservatórios secos ou reservatórios com baixos níveis de água – também resultantes de</p>

	<b>níveis dos rios e reservatórios</b>	anos consecutivos de seca meteorológica e seca hidrológica (pp. 119, 144, 150, 153, 155, 159, 178, 183, 190, 195, 200–203, 207, 209, 213, 223, 225, 238, 249, 256, 278, 295, 303, 341, 350, 352, 364–370, 372, 393, 412, 415, 417, 629, 654, 753).
	<b>Deterioração da qualidade da água</b>	Deterioração da qualidade da água devido a agroquímicos (p. 240, 241); Eutrofização (p. 89, 190, 457); Relatórios comunitários sobre mudanças na qualidade da água durante a estação seca (p. 394); Qualidade da água criticamente ruim em reservatórios (p. 225); Poluição da água por fontes difusas e pontuais (p. 457).
<b>Impacto</b>	<b>Escassez de água</b>	Registros de situações de escassez de água (pp. 175, 295, 298, 309, 314, 547, 597, 615, 622, 654–655, 684, 687, 738, 766); Desperdício de água, mesmo em períodos de escassez (p. 602).
	<b>Conflitos pela água</b>	Conflitos pela água devido à abertura indevida de válvulas de liberação de reservatórios (pp. 188, 196); Quebra de contrato de alocação causada por adulteração da chave da válvula de operação do reservatório (p. 734); Conflitos entre associações de usuários de água (ex.: irrigantes, comunidades, proprietários de terras) (p. 69); Registros de desvio não autorizado de água para irrigação (pp. 442, 707); Conflitos relacionados a transferências de água para a região metropolitana do estado do Ceará (pp. 229, 233, 234, 238, 241, 248, 261); Conflitos entre abastecimento de água a montante e a jusante (p. 70); Menções gerais de conflitos pela água na bacia (pp. 2, 11, 28, 42, 50, 53, 54, 69, 70, 71, 85, 110, 124, 158, 435, 437, 492, 526, 530, 700, 745)
	<b>Perturbação na biota do ecossistema</b>	Mortalidade de peixes (p. 36, 397, 284).
	<b>Aumento dos custos do tratamento de água</b>	Custo de R\$ 100.000,00 para operações de limpeza do rio (p. 146); Necessidade de instalação de seis aeradores para melhorar a qualidade da água (p. 393); Poluição afetando uma bomba no sistema de transferência de água entre reservatórios (p. 697); Incapacidade de tratar a água do reservatório devido a problemas de qualidade (p. 188).
<b>Resposta</b>	<b>Diversificação das fontes de água</b>	Transferências de outros reservatórios (pp. 746, 367, 413); Abastecimento de água por caminhões-pipa (pp. 626, 677); Poços profundos de água subterrânea (p. 640); Reúso de água (pp. 141, 149, 177, 182, 196, 231, 725);
	<b>Liberações rápidas</b>	Liberações de água por fluxo pulsante (pp. 251, 253, 296, 302–305, 304, 309, 314, 322, 334, 341, 369–370, 371, 404, 415, 422, 424, 432, 434, 459, 708, 733, 740–741, 768–769).
	<b>Interrupções na liberação de água</b>	Registros de reservatórios sem operações de liberação devido a baixos volumes de armazenamento (pp. 299, 412, 442).
	<b>Racionamento de água</b>	Recomendações para medidas de racionamento de água (pp. 102, 118, 126, 131, 203, 226, 239, 630, 655).
	<b>Planejamento preventivo</b>	Relatórios que indicam a necessidade de monitoramento preventivo da segurança das barragens do reservatório (p. 187); Relatórios de demandas de preparação para períodos prolongados de seca (pp. 624–626).
	<b>Gestão participativa (alocação negociada de água)</b>	Classificação de conflitos segundo escopo e urgência para mediação no processo participativo (p. 625); Relatórios de mediação de conflitos (p. 42, 43, 57, 110, 124, 158, 176, 177, 227, 262, 374, 403, 440, 472, 502, 524, 534, 625, 730, 738, 740).
	<b>Barreiras de contenção de poluição</b>	Relatório sobre o processo de restauração de reservatórios e controle de lançamento de resíduos (p. 483); Condicionamento de lançamentos em reservatórios à limpeza do rio e questões relacionadas a lançamentos sem limpeza prévia (p. 102, 118, 120, 352); Limpeza do rio (p. 118); Saneamento básico (p. 233, 240, 248, 260).
	<b>Tratamento de águas</b>	Relatórios que indicam a necessidade de melhorias no tratamento de águas residuais (pp. 209, 233, 240, 248).

---

**residuais**

<b>Manter o fluxo ecológico</b>	Relatórios destacando a necessidade de definir requisitos de fluxo ecológico, particularmente perto de áreas de nascentes (pp. 747–748, 753, 756–757).
---------------------------------	--

Fonte: elaborada pela autora

Em resumo, as atas das reuniões apresentam predominantemente respostas quantitativas, como liberações rápidas, interrupções na liberação de água, alocação negociada, racionamento de água, diversificação de fontes de água e planos preventivos de emergência. Respostas relacionadas à qualidade da água são relatadas com menor frequência. Não há quantificação do volume de água poluída por volume de água demandado. Apesar disso, o aumento da poluição nos reservatórios é monitorado pelos gestores de recursos hídricos e percebido pelos usuários. A qualidade da água ainda não é um critério limitante (ou prioritário) quando se trata de alocação nesta região, embora seja frequentemente mencionada nas atas das reuniões do CBH e, de fato, afete a liberação de água. Além disso, a manutenção da vazão ecológica também não é uma questão evidenciada no processo de alocação negociada de água.

### 3.5 Discussão

Este estudo revelou que não existe uma regra única para a liberação de água em reservatórios no semiárido brasileiro. Os principais eventos que desviaram as relações monotônicas entre armazenamento e liberação de água foram revelados, com base nas séries temporais analisadas em uma região com mais de 30 anos de gestão participativa da água.

#### *3.5.1 Questões hidrológicas e de demanda nas relações entre liberação de água e armazenamento em reservatórios*

Interrupções e liberações rápidas foram eventos recorrentes nas séries de dados que enfraqueceram as correlações na escala diária. Essas correlações fracas indicam as complexidades socio-hidrológicas na gestão da água nesta região. A socio-hidrologia explica a fuga dos padrões hidrológicos naturais e diretamente lógicos nas vazões, por meio de políticas e prioridades socioeconômicas para alocação de recursos hídricos (Sivapalan et al., 2014). Destaca-se que uma menor frequência de interrupções em reservatórios estratégicos com maior capacidade aumenta o papel de grandes reservatórios regulados na mitigação dos graves riscos de seca hidrológica, corroborando Wu et al. (2021).

Nas escalas mensais e sazonais, correlações moderadas podem ser atribuídas à suavização de liberações rápidas, que aparecem como picos no conjunto de dados. Nessa região semiárida, as liberações de água podem coincidir com condições severas de escassez,

destacando a importância do planejamento antecipado e da gestão adaptativa. Isso explica a variabilidade nas liberações de água e as estratégias para liberações rápidas para garantir o abastecimento em locais mais distantes do reservatório. As liberações de maior risco de crescente escassez de água em reservatórios estratégicos geralmente ocorrem quando os níveis de armazenamento variam entre 5% e 25% da capacidade (Araújo et al., 2018).

O início desse processo de alocação de água em cenários de escassez hídrica muito críticos (ou seja, armazenamento abaixo de 10%) também foi relatado por Pereira et al. (2023), em um estudo sobre a redução de incertezas quanto ao suprimento e a importância do armazenamento ano a ano, com base em modelos preditivos climáticos. Recomendações por meio de uma abordagem estocástica para essa região já foram discutidas por Araújo et al. (2018), que recomendam a racionalização da água para usos de baixa prioridade quando o armazenamento do reservatório reduz para 20%, enquanto os usos de alta prioridade devem ser racionalizados em 11% da capacidade de armazenamento.

Neste contexto, a partir da fraca correlação identificada (particularmente o Tau de Kendall), sugere-se que os menores volumes liberados não seguem consistentemente a mesma sequência do armazenamento em reservatório (Hao et al., 2022). Isso pode ser atribuído ao reconhecimento tardio das condições de seca pelos usuários de água, especialmente porque a seca se propaga de um evento meteorológico para uma seca hidrológica e, posteriormente, para uma seca socioeconômica, conforme observado por Estácio et al. (2022). A percepção da propagação da seca também pode ser diminuída pela ocorrência de eventos de chuva intensa e de curto prazo durante períodos de precipitação anual abaixo da média, o que pode mascarar os efeitos cumulativos de déficits hídricos prolongados, uma condição frequentemente ampliada por eventos climáticos extremos (Tabari, 2020; Sparacino et al., 2021).

Por outro lado, pressões por grandes suprimentos de água durante baixos volumes de reservatórios representam maiores riscos para os abastecimentos futuros, destacando desafios na capacidade adaptativa durante cenários de propagação de seca, gerando questões contenciosas, incluindo a violação de acordos de alocação, conforme também listado por Studart et al. (2021).

O aumento de liberações rápidas em reservatórios que atendem às demandas de irrigação a jusante revelou a forte influência da infraestrutura na dinâmica da demanda e oferta de água para a agricultura. Transformações semelhantes em altas expectativas hidroagrícolas foram observadas em regiões semiáridas da Tunísia por Riaux et al. (2020), enfatizando as

dimensões sociopolíticas dos reservatórios e o papel essencial dos estudos socio-hidrológicos na dinâmica operacional (Kellner, 2021).

Fatores que enfraqueceram as associações monotônicas entre armazenamento e liberação de água podem indicar tanto estratégias de uso da água quanto relações conflitantes nessas regiões. Esses aspectos podem limitar a aplicação de modelos baseados em tabelas de decisão convencionais que consideram o nível de armazenamento como o principal limite definidor da liberação de água (por exemplo, Arnold et al., 2018; Sánchez-Gómez et al., 2025).

Walker, Loucks e Carr (2015) destacam que embora não seja possível prever as decisões sociais nos modelos hidrológicos, a participação pode ser inserida no processo de modelagem a partir de sistemas interativos e abordagens colaborativas nas metodologias de predição. A modelagem baseada em processos adaptativos, pela inserção de decisões estratégicas (trade-offs) permite simular a coevolução entre sistemas físicos e as decisões humanas, apresentando respostas satisfatórias (Mason et al., 2018). Entretanto, essas respostas dependem também de processos sociais, não apenas de melhoramento tecnológico, tornando-se ainda mais complexo (Pahl-Wostl, 2002).

A avaliação dos registros de reuniões revelou a influência da multiplicidade de usos do reservatório na manutenção dos fluxos para áreas a jusante. Três questões devem ser fortemente consideradas na construção de cenários de possíveis vazões liberadas de água: *(i) O uso prioritário da água é na bacia hidráulica, em áreas a jusante ou em ambos?; (ii) A água para abastecimento público é obtida a montante ou a jusante da tomada d'água?; e (iii) O reservatório é um receptor ou um fornecedor no sistema de transferência de água?*

Reservatórios com usos prioritários de água em áreas a montante exigirão interrupções na liberação de água durante cenários de escassez. Se esses usos prioritários estiverem em áreas a jusante, será necessária uma vazão mínima praticamente constante. Reservatórios com demandas para abastecimento público de água apresentaram maiores restrições à liberação, portanto, durante a redução gradual do volume armazenado, também são esperadas interrupções prolongadas na liberação de água. Nesse contexto, o termo "restrições" não se refere a uma limitação na disponibilidade de água para abastecimento público, mas sim à restrição operacional e Legal pela qual as liberações de água do reservatório são estritamente limitadas ao atendimento das necessidades de consumo humano a montante. Como resultado, as liberações a jusante são restringidas ou completamente interrompidas, especialmente durante períodos de redução do armazenamento, uma vez que a água é priorizada exclusivamente para

abastecimento público nesses casos.

Dessa forma, quanto maior a restrição operacional para atender apenas a esse uso prioritário, maior a probabilidade de ocorrerem interrupções prolongadas na vazão a jusante. Em um sistema de transposição de água, mesmo que haja uma demanda prioritária no reservatório abastecedor, uma vazão mínima também será liberada para suprir uma demanda prioritária de água em outro reservatório. Além disso, os reservatórios que recebem transferência geralmente sofrem menos interrupções.

Transferências de água também podem ocorrer entre reservatórios estratégicos e pequenos reservatórios ao longo da bacia hidrográfica, o que motiva a construção de pequenas barragens privadas como uma alternativa buscada pelos usuários de água. Isso aumenta a densidade de reservatórios na região, trazendo consequências negativas durante as secas, porque essa rede de pequenas barragens atrasa a recuperação hidrológica de volume armazenado nos grandes reservatórios (Rabelo et al., 2022). Esses pequenos reservatórios privados também representam um risco em grandes enchentes e eventos climáticos extremos por alguns motivos: eles são frequentemente construídos sem planejamento ou monitoramento por parte das autoridades e podem não estar preparados para grandes enchentes.

Portanto, em casos de grandes chuvas e efeito cascata nos reservatórios, a estrutura dessas barragens pode não suportar o impacto, gerando uma sequência de inundações e pressionando o sistema hídrico a jusante. Considera-se também que o aumento da quantidade de pequenos reservatórios pode impedir a operação eficaz dos reservatórios públicos estratégicos. Desse modo, apesar da importância social dos pequenos reservatórios, um aumento excessivo de barragens agravaria os riscos de segurança hídrica em grandes secas e inundações em escala de bacia hidrográfica, o que deve ser levado em consideração na elaboração de planos para a bacia hidrográfica.

### ***3.5.2 Questões quantitativas e qualitativas da tomada de decisão***

Com base na avaliação das atas de reuniões, sob uma perspectiva organizacional, o modelo de alocação de água avaliado apresenta alguns dos métodos classificados por Nel et al. (2022), incluindo: (i) o princípio do método administrativo público, envolvendo a definição de cenários e operação direta de reservatórios estratégicos pelo poder público, com alocação hierarquizada; (ii) tomada de decisão baseada nas partes interessadas, envolvendo a tomada de decisão local, subsidiada por considerações coletivas de justiça e equidade pelos CBH; e (iii) alocação multicritério, integrando fatores sociais, econômicos e ambientais.

Esses métodos associados ao controle público predominaram nos sistemas de alocação de reservatórios avaliados. Nesse sentido, outro mecanismo de controle para alocação de água e seu uso Legal no Brasil são as outorgas de uso da água. As vazões liberadas estão sujeitas à cobrança pelo uso da água, uma ferramenta econômico-financeira para controlar os usos autorizados. No entanto, essas tarifas ainda não foram implementadas uniformemente em todo o Brasil (Brito; Azevedo, 2020). Apesar da natureza multiobjetivo das decisões e das considerações coletivas, nenhuma equação multicritério foi identificada para a alocação da água ao longo da série histórica.

Por outro lado, as escolhas dos usuários de água podem ser expressas matematicamente por meio de sistemas de votação e avaliadas pela teoria da escolha social, que orienta assembleias e ações deliberativas de comitês de gestão de águas (Zheng et al., 2022). De acordo com a teoria da escolha social, o modelo de alocação negociada praticado no Ceará poderia ser classificado como votação plural, onde a solução vencedora possui o maior número de escolhas.

A definição de cenários estabelece limites e projeções dependendo de abordagem multicritério, mas esses valores normalmente variam amplamente (por exemplo, 0–0,6 m<sup>3</sup>/s), proporcionando margem operacional para decisões regulamentadas por autoridades públicas, que priorizam a segurança hídrica. Embora os CBH possam propor cenários, os escolhidos geralmente são sugeridos por autoridades públicas.

Registros de reuniões também indicaram que os períodos mais críticos de escassez hídrica incentivaram uma ampliação na tomada de decisões adaptativas. No entanto, foi somente durante períodos de seca hidrológica severa que os usuários de água demonstraram maior colaboração na resolução de conflitos. Destaca-se que nos períodos mais extremos de escassez hídrica havia influência direta do CONERH sobre as decisões finais da vazão liberada. Nesse sentido, caso a gestão adaptativa não seja consolidada, suas estratégias iniciais podem ser rapidamente substituídas por métodos tradicionais de uso da água antes da seca, como também verificado por Kapetas et al. (2019), ao investigar sistemas de alocação de água no Delta do Axios, Grécia, utilizando DPSIR.

Secas extremas reduzem a disponibilidade hídrica, intensificando tanto a escassez quanto a deterioração da qualidade da água. De acordo com a atual estratégia de desempenho de reservatórios, as liberações rápidas provavelmente se tornarão mais frequentes, seguidas por interrupções prolongadas. Em contrapartida, espera-se que medidas preventivas de

planejamento, como a diversificação da matriz de abastecimento de água e a implementação de estratégias para redução de perdas e conservação da qualidade da água, se tornem cada vez mais proeminentes. Essa tendência também se reflete nos planos de gestão de bacias hidrográficas publicados recentemente. A estrutura do DPSIR indica claramente que, se as ações de resposta não forem intensificadas, os impactos resultantes provavelmente se agravarão. Esses impactos incluem escassez quantitativa e qualitativa de água, aumento de conflitos por recursos hídricos, degradação ecológica e aumento dos custos de tratamento de água, todos os quais podem comprometer a segurança hídrica na região.

Nesse sentido, segundo Costa et al. (2021), a previsão de vazões utilizando métodos matemáticos computacionais simples pode otimizar substancialmente a antecipação de decisões eficientes para secas hidrológicas, especialmente em terras semiáridas e áridas. Além disso, os procedimentos para prever secas devem ser claros para os usuários da água, e o planejamento prévio deve ser discutido em reuniões não diretamente relacionadas aos processos de alocação, que podem ser consideradas respostas no modelo DPSIR.

De acordo com Sun et al. (2016), a aplicação desse tipo de modelo pode auxiliar na avaliação da sustentabilidade dos sistemas de gestão hídrica. Corroborando aos achados, Barreira et al. (2024) indicaram que, antes da alocação, deve haver um processo preparatório e de mediação sobre a organização das demandas.

Nas regiões semiáridas brasileiras, os CBH são um exemplo de grande participação de partes interessadas, mas esse aspecto não seria suficiente para garantir a robustez necessária para políticas efetivas de gestão adaptativa (Lemos et al., 2020). Nesta pesquisa, foram observadas lacunas na transferência de informações entre as partes interessadas. Várias reuniões abordaram a partição, liberação e armazenamento de água, mas um programa estruturado voltado para o aumento da capacidade adaptativa não foi identificado na pauta de discussão, apesar das inúmeras iniciativas e características potenciais que poderiam ser alavancadas para esse fim. Portanto, uma transferência mais consolidada de conhecimento técnico-científico é necessária para aumentar a capacidade adaptativa e a confiança entre stakeholders.

Nesse sentido, uma iniciativa recentemente implementada no Estado do Ceará, conhecida como Programa Cientista-Chefe, merece destaque, pois pode servir de modelo para outros sistemas de gestão de recursos hídricos. Criado em 2018, esse programa reúne pesquisadores de diversas áreas que lideram temas de relevância para a gestão pública local. No que se refere aos recursos hídricos, questões como alocação de água, resiliência à seca e

qualidade da água têm sido o foco do programa. Esse modelo de transferência de conhecimento técnico-científico envolve a gestão pública apresentando demandas reais, com grupos de pesquisa aplicando sua expertise para abordar esses aspectos, por meio de ações que também envolvem as partes interessadas.

Outro aspecto de grande importância é a disponibilidade qualitativa da água. A qualidade da água possui influência sobre toda a economia dos sistemas de armazenamento, tratamento e abastecimento de água (Davidsen et al., 2015). Nesta região, o desenvolvimento socioeconômico está associado a atividades diretamente relacionadas à poluição da água. Os principais conflitos de qualidade da água encontrados nas atas de reuniões nas bacias hidrográficas desta região estão relacionados à aquicultura, lançamento de efluentes, pecuária, agricultura, mineração, resíduos sólidos, desmatamento e ocupação irregular (Studart et al., 2024). Problemas de qualidade da água estão frequentemente entre os motivos de conflitos por água entre usuários de diferentes setores (Souza Filho et al., 2024).

Nesse sentido, o déficit no tratamento de águas residuárias, a pecuária, agricultura e aquicultura são as atividades mais relacionadas aos aportes de fósforo nas bacias hidrográficas avaliadas, com predominância dos aportes de esgoto como cargas externas (Rocha; Lima Neto, 2021). Os sedimentos e a piscicultura representam as maiores cargas internas de fósforo no período de seca (Rocha et al., 2024b). Em reservatórios com sistema de aquicultura por tanques-rede, há forte preocupação quanto às cargas poluentes (Molisani et al., 2015).

No entanto, no sistema avaliado, essa questão não foi incluída como um fator decisório na alocação de água, embora a inclusão da qualidade da água como critério suplementar para alocação pudesse aumentar significativamente a capacidade adaptativa dos usos da água. Nesse sentido, as respostas quantitativas se destacam frente às respostas qualitativas no modelo DPSIR, proposto para o sistema de alocação avaliado.

Na França, medidas preventivas contra impactos na qualidade da água são consideradas nos critérios de alocação pelo *Organisme Unique de Gestion Collective* (OUGC), que apoia esforços para reduzir impactos negativos na qualidade da água, priorizando usos que diversifiquem os valores das culturas, aumentem o emprego, protejam pequenas propriedades e favoreçam aquelas com maior capacidade de investimento (Rouillard; Rinaudo, 2020).

Os requisitos de vazão ecológica também são mencionados em menor frequência, havendo necessidade de regulamentações mais precisas em relação a esse tipo de variável. Essa vazão é crucial para determinar os limites de capacidade de suporte do manancial sob os índices

de armazenamento-rendimento-confiabilidade e sustentabilidade, tanto para a demanda quanto para a dinâmica ecológica (Eriyagama et al., 2021).

Os resultados obtidos contribuíram para a compreensão da relação entre liberação e armazenamento de água, bem como de processos importantes sob a perspectiva da alocação negociada com a participação das partes interessadas em áreas áridas. Essas descobertas podem orientar o uso de modelos matemáticos e a previsão de cenários potenciais para a segurança hídrica, principalmente em sistemas participativos.

### **3.6 Conclusões**

Este capítulo investigou questões quantitativas e qualitativas relacionadas à liberação e ao armazenamento de água em reservatórios estratégicos na região semiárida brasileira, sob alocação negociada. Eventos recorrentes na operação de reservatórios de terras secas com forte participação das partes interessadas foram sistematizados. Um modelo DPSIR foi proposto com base nas características avaliadas.

Os resultados revelaram uma correlação monotônica fraca entre o armazenamento e a liberação de água em uma escala diária. Isso ocorreu principalmente devido à influência de liberações rápidas e interrupções na liberação de água, tanto para a segurança do abastecimento público de água quanto para o cumprimento de objetivos predefinidos. Em escalas mensais e sazonais, a correlação se tornou moderada, devido à suavização das liberações rápidas em contraste com os efeitos das interrupções. Assim, modelos multiobjetivo ou modelos com tabelas de decisão que considerem fortes correlações entre classes de volume armazenado e liberação de água podem não apresentar desempenho satisfatório em regiões semiáridas, especialmente em escalas diárias.

A transferência de água também é um fator que deve ser considerado na construção de cenários de modelagem. Questões como qualidade da água e vazão ecológica ainda não estão bem definidas quando se trata de critérios de alocação negociada de água. As partes interessadas expressaram maior interesse em decisões de gestão adaptativa apenas em condições de seca hidrológica severa.

Os resultados deste estudo reforçaram a necessidade de formular modelos preditivos que considerem a participação das partes interessadas na gestão de reservatórios. Além disso, permitiram uma melhor compreensão das deliberações e desafios para a gestão adaptativa da água. Pesquisas futuras podem investigar com mais detalhes que tipos de modelos seriam adequados para esses reservatórios, com base em questões mais específicas sobre vazões

de captação, equilíbrio das prioridades de uso da água entre regiões fornecedoras e receptoras, distribuição da vazão ao longo de períodos de seca prolongada, incluindo os efeitos das perdas e medidas de proteção da qualidade da água.

## 4 INTEGRAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NAS AVALIAÇÕES QUANTITATIVAS: UMA ABORDAGEM BASEADA NA PEGADA HÍDRICA CINZA PARA RESERVATÓRIOS SOB GESTÃO PARTICIPATIVA

### 4.1 Introdução

O conceito de pegada hídrica foi introduzido em 2002 para determinar a quantidade de água consumida direta e indiretamente em atividades produtivas e para estimar a pressão dessas atividades sobre os recursos hídricos (Hoekstra, 2003). Por outro lado, a poluição gerou consequências tão limitantes para o uso da água quanto o aumento da quantidade de demandas. As pressões hidroclimáticas e o crescimento populacional, que aumentam a demanda e agravam os processos de contaminação da água, estão entre os 21 pontos críticos globais de escassez hídrica (Leijinse et al., 2024). De acordo com relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2024) sobre o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (Indicador 6.5.1), até 2030, 4,8 bilhões de pessoas podem ter a saúde e a economia em risco se não houver melhorias na qualidade da água.

Nesse contexto, considerando o conceito de pegada hídrica, a pegada hídrica cinza (GWF) foi desenvolvida para medir quantitativamente o impacto da poluição da água sobre os recursos hídricos (Hoekstra; Chapagain, 2008). A determinação da pegada hídrica cinza é uma abordagem metodológica empregada em diferentes setores. Song et al. (2023) aplicaram esse conceito para analisar a poluição agrícola difusa, realizando medições com um modelo multiobjetivo para otimizar o PIB agrícola, reduzir a poluição e minimizar a perda de recursos hídricos. Chini et al. (2020) foram os primeiros a aplicar a GWF para estimar o efeito volumétrico da poluição térmica de usinas termelétricas nos Estados Unidos. Wöhler et al. (2020) avaliaram a GWF de produtos farmacêuticos tanto em escala global como nos países da Alemanha e Holanda. Kan e Huang (2020) avaliaram o impacto da urbanização na pegada hídrica cinza industrial da China, identificando variáveis estratégicas (otimização do tratamento de águas residuais e tecnologias de fabricação e serviços) para a sustentabilidade urbana.

Nessa perspectiva, a GWF também tem sido usada para determinar índices de escassez induzida pela qualidade da água. Esta variável relaciona a quantidade de carga poluente com a diferença entre a concentração máxima de poluentes e as concentrações naturalmente esperadas (Hoekstra; Mekonnen, 2012). Assim, a escassez induzida pela qualidade da água pode ser determinada pela relação entre a GWF e os recursos hídricos disponíveis (Liu et al., 2016).

Faz-se necessário diferenciar o princípio de determinação de um índice de qualidade da água (IQA) e da pegada hídrica. O IQA classifica as condições da água de acordo com os pesos de importância entre variáveis que indicam a qualidade para usos múltiplos e conservação ambiental (Uddin et al., 2020). Os princípios básicos para índices de qualidade foram desenvolvidos em 1948 na Alemanha, enquanto os primeiros critérios que se aproximam do IQA moderno foram estabelecidos em 1965 (Abbassi; Abassi, 2012). Por outro lado, o GWF foi proposto para medir qual aumento em relação à demanda estimada representaria uma qualidade da água que difere dos padrões estabelecidos para as demandas em cada setor (Vliet et al., 2017). Este índice foi expandido para considerar o fluxo ecológico, as transferências de água e outras fontes de abastecimento (por exemplo, dessalinização, águas residuais tratadas) (Vliet et al., 2021; Li et al., 2024).

As abordagens quantitativas e qualitativas para a escassez induzida pela qualidade da água, com base no conceito de pegada hídrica cinza, ainda estão limitadas a aplicações em rios ou ao impacto dos usuários da água. Uma pesquisa realizada na Web of Science (até outubro de 2025) por "*grey water footprint*" (pegada hídrica cinza) revelou 935 resultados. Quando o termo "*river*" (rio) foi adicionado, foram encontradas 212 publicações, e apenas 7 com a adição do termo "*reservoir*" (reservatório) (Song et al., 2023; Nugent et al., 2025; Schyns; Hoekstra, 2014; Feng; Zhao et al., 2020; Chang, 2020; Mandal et al., 2019; Zhou et al., 2019). Essas publicações exploram o conceito de pegada hídrica de várias atividades, mas ainda não consideram a deterioração da qualidade da água armazenada como um fator de ponderação na medição da disponibilidade de água em reservatórios.

Apesar do aumento na quantidade de novos reservatórios nas últimas décadas, o retorno adicional em termos de capacidade de armazenamento não tem sido tão significativo quanto em períodos anteriores (Li et al., 2023). A deterioração da qualidade da água em reservatórios durante secas prolongadas, que resulta em condições de escassez, constitui uma relação intrínseca conhecida entre qualidade e quantidade de água (Lin et al., 2023).

No maior reservatório não hidrelétrico da América Latina, a entrada simulada de fósforo proveniente de fontes pontuais e difusas excedeu o padrão nacional em todos os cenários de vazão, o que é agravado pelas previsões nos cenários de mudanças climáticas (Lima Neto, 2025a). Nesse mesmo reservatório, secas severas entre 2012 e 2018 foram acompanhadas por concentrações de fósforo suficientes para causar mortalidade de peixes e aumentar os custos de tratamento da água (Rocha et al., 2025). Esse reservatório está localizado na região semiárida do nordeste do Brasil, no estado do Ceará, onde as decisões de alocação de água são

predominantemente guiadas por questões quantitativas (Freire et al., 2025).

Nesta região, reservatórios com qualidade de água deteriorada exigem um racionamento mais rigoroso para atender satisfatoriamente às demandas de abastecimento (Gomes et al., 2022). Historicamente, antes de 1930, o fator limitante para a segurança hídrica era a disponibilidade; entre 1930 e 1970, a acessibilidade; entre 1970 e 2000, a aceitabilidade; e de 2000 até os dias atuais, a qualidade da água (Pereira et al., 2025).

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo propor um índice baseado no conceito de GWF para a qualidade da água, adaptado para reservatórios. Os objetivos específicos incluem: a formulação de um índice baseado no conceito de GWF com dados facilmente acessíveis e mensuráveis e analisar a aplicação do mesmo a uma série de dados sintéticos e a um conjunto de dados reais em uma região com reservatórios estratégicos para múltiplos usos.

## 4.2 Materiais e métodos

### 4.2.1 Pegada hídrica cinza aplicada ao armazenamento em reservatórios

Originalmente, a GWF é calculada dividindo-se a carga de poluentes (L) pela diferença entre o padrão de qualidade da água ambiente para um poluente ( $C_{\max}$ ) e sua concentração natural ( $C_{\text{nat}}$ ) no corpo hídrico receptor (quando as concentrações naturais são desconhecidas ou desconsideradas,  $C_{\text{nat}}$  pode ser definido como zero (equação 1)). Se as concentrações de poluentes excederem os limites permitidos, considera-se uma demanda adicional correspondente ao fator de qualidade da água (Hoekstra et al., 2011; van Vliet et al., 2017). Esse valor não representa um volume físico de água, mas uma quantidade virtual, associada à necessidade de incentivar a tomada de decisões para a realização de ações de despoluição a fim de aumentar a disponibilidade qualitativa. Apesar disso, dependendo do nível de deterioração da qualidade da água, alguns dos usos demandantes podem se tornar inviáveis ou muito onerosos.

Para a formulação da GWF para reservatórios, a relação (WS) entre o volume armazenado em um determinado momento de medição ( $S_i$ ) e a capacidade total de armazenamento do reservatório ( $S_{\max}$ ) foi considerada sob perspectiva quantitativa (equação 2). Assim, quando WS é igual ou inferior a 0,5, uma condição de alerta de escassez hídrica passa a ser sinalizada (Ceará, 2020). A presente proposta adiciona uma variável qualitativa a essa proporção. Nessa perspectiva, foi proposto um volume teórico adicional ( $S_{\text{theor}}$ ) baseado na

relação entre a concentração e o volume atual e a concentração máxima (equação 3), representando os aspectos da qualidade da água.

Nesta proposta, quando o volume teórico excede a situação de armazenamento correspondente à medição em determinado instante, ou seja, quando a concentração do(s) poluente (s) avaliado (s) supera/superam a concentração máxima permitida ( $C_{max}$ ), determina-se uma demanda adicional ( $dq_{resi}$ ) (equação 4). Essa demanda é introduzida como um volume teórico adicional proporcional à diferença na qualidade da água em relação ao limite recomendado. Esse volume teórico é adicionado ao volume máximo para determinação de WSq (equação 5), ou seja, de uma condição de armazenamento que considere a pegada hídrica induzida pela qualidade. Ressalta-se que se  $dq_{resi}$  fosse subtraído do volume de armazenamento atual, a equação poderia apresentar inconsistências, considerando que as demandas teóricas equivalentes à qualidade podem exceder o volume de armazenamento no dado momento de medição.

$$GWF = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad (1)$$

$$WS = \frac{S_i}{S_{max}} \quad (2)$$

$$S_{theor} = \frac{S_i C_i}{C_{max}} \quad (3)$$

$$dq_{resi} = \left\{ \begin{array}{l} 0, S_{theor} \leq S_i \\ S_{theor} - S_i, S_{theor} > S_i \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$WSq = \frac{S_i}{S_{max} + \max(dq_{resi})} \quad (5)$$

Onde:

GWF - Pegada hídrica cinza (unidade de medição de volume);

L - Carga do poluente (unidade de massa por unidade de tempo);

$C_{\max}$  - Concentração máxima de determinado poluente (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$C_{\text{nat}}$  - Concentração natural de determinado poluente (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

WS - Relação entre armazenamento e capacidade do reservatório (adimensional, pode ser representado como uma relação percentual);

$S_{\text{theor}}$  - Volume teórico virtual induzido por questões de qualidade (unidade de medição de volume);

$S_i$  - Volume armazenado no reservatório em determinado instante de medição (unidade de medição de volume);

$C_i$  - Concentração de determinado poluente em um determinado momento de medição (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$dq_{\text{resi}}$  - Demanda teórica virtual induzida por questões de qualidade (unidade de medição de volume);

WSq - Relação entre armazenamento e capacidade do reservatório considerando a pegada hídrica induzida pela qualidade (adimensional, pode ser representado como uma relação percentual);

$\max(dq_{\text{resi}})$  - Demanda teórica virtual máxima induzida pela qualidade (determina-se as demandas teóricas virtuais a partir das variáveis de qualidade da água disponíveis) e se utiliza daquela onde a condição for mais deteriorada, ou seja, aquela que gere uma maior demanda virtual.

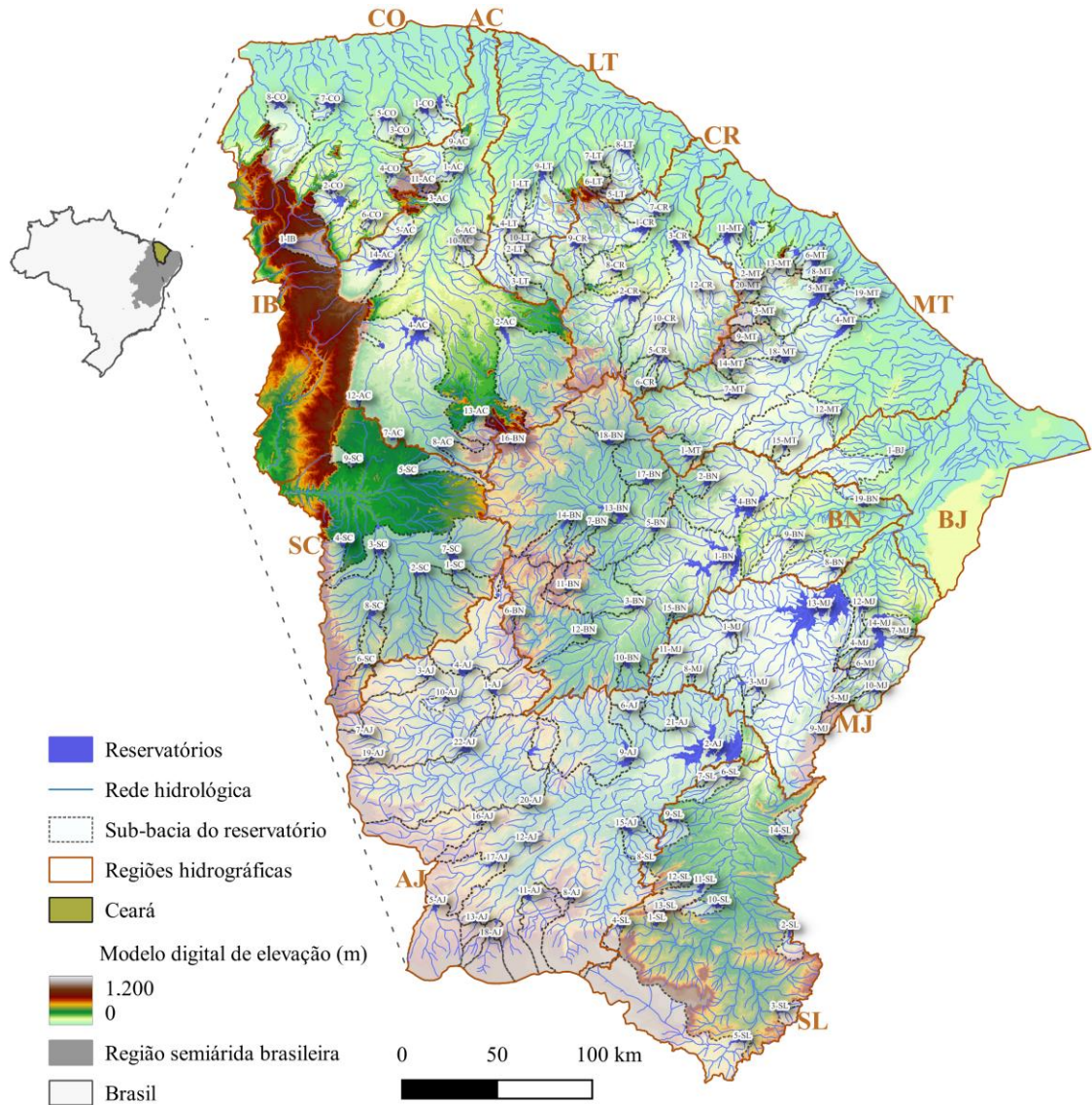
#### 4.2.2 Área de estudo de caso

O WSq foi analisado no estado do Ceará, localizado na região semiárida do Brasil, que abrange uma área de 148.894,44 km<sup>2</sup> (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2024). Nesta área de estudo, existem zonas classificadas nas categorias climáticas de Köppen como “As” (clima tropical quente e úmido, com estação seca no inverno) e “BSh” (clima semiárido quente) (Alvares et al., 2013). Diferentes sistemas atmosféricos que atuam na região conferem variabilidade temporal e espacial à precipitação. Os sistemas frontais são mais ativos em janeiro (pré-estação chuvosa), o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) predomina entre fevereiro e maio (estação chuvosa), que depende da temperatura da superfície do mar (TSM), e as ondas de leste favorecem a precipitação entre junho e julho (pré-estação seca) (Guerreiro et al., 2013).

O território deste estudo de caso está dividido em 12 regiões hidrográficas (localmente denominadas Acaraú (AC), Alto Jaguaribe (AJ), Baixo Jaguaribe (BJ), Banabuiú (BN), Coreaú (CO), Curu (CR), Ibiapaba (IB), Médio Jaguaribe (MJ), Metropolitanas (MT), Salgado (SL) e Sertões de Crateús (SC)) para a implementação da gestão participativa da água, onde usuários da água, autoridades públicas e sociedade civil definem os parâmetros de operação dos reservatórios e discutem aspectos da governança da água (Freire et al., 2025). De forma mais ampla, dentro da gestão participativa, um sistema nacional e estadual de gestão de recursos hídricos orienta as prioridades de tomada de decisão, bem como o monitoramento e a supervisão das variáveis qualitativas e quantitativas da água (Estácio et al., 2022).

Na Figura 19 estão ilustradas as regiões hidrográficas, os reservatórios selecionados codificados numericamente de acordo com suas respectivas regiões hidrográficas e rede hidrológica. Uma descrição completa dos nomes dos reservatórios e suas capacidades de armazenamento de água foi apresentada na Tabela 4.

Figura 19 – Reservatórios e sub-bacias incluídos na área do estudo de caso



Fonte: elaborado pela autora

Tabela 4 - Reservatórios por região hidrográfica e capacidade de armazenamento de água

Acarauá			Coreaú			Metropolitanas		
Reservatório	Capacidade	Reservatório	Capacidade	Reservatório	Capacidade	Reservatório	Capacidade	Capacidade
1 - AC	Acarauá Mirim	36.72	1 - CO	Tucunduba	39.37	1 - MT	Pompeu Sobrinho	142.37
2 - AC	Edson Queiroz	253.25	2 - CO	Diamante I	13.05	2 - MT	Amanary	9.34
3 - AC	Sobral	4.27	3 - CO	Premuoca	5.20	3 - MT	Acarape do Meio	29.28
4 - AC	Araras	859.53	4 - CO	Várzea da Volta	12.50	4 - MT	Pacajus	254.95
5 - AC	Ayres de Sousa	96.8	5 - CO	Martinópolis	49.05	5 - MT	Pacoti	371.93
6 - AC	Forquilha	50.13	6 - CO	Trapiá III	3.41	6 - MT	Gavião	33.45
7 - AC	Farias de Souza	12.23	7 - CO	Gangorra	54.40	7 - MT	Castro	62.31
8 - AC	Carão	18.86	8 - CO	Itauna	72.40	8 - MT	Riachão	49.81
9 - AC	São Vicente	9.84	9 - CO	Diamante II	18.04	9 - MT	Tijuquinha	0.48
10 - AC	Arrebita	18.53	<b>Curu</b>			10 - MT	Cahuipe	10.95
11 - AC	Jenipapo	4.94	<b>Reservatório</b>			11 - MT	Sítos Novos	127.95
12 - AC	Jatobá 2	6.24	1 - CR	Caxitoré	202.00	12 - MT	Batente	45.43
13 - AC	Carmina	13.19	2 - CR	General Sampaio	322.20	13 - MT	Penedo	2.23
14 - AC	Taquara	330.96	3 - CR	Pentecoste	360.00	14 - MT	Pesqueiro	10.54
<b>Alto Jaguaribe</b>			4 - CR	Salão	6.04	15 - MT	Macacos	13.2
<b>Reservatórios</b>			5 - CR	São Mateus	10.33	16 - MT	Germinal	2.11
1 - AJ	Favelas	30.1	6 - CR	Escuridão	2.72	17 - MT	Catucinzento	22.78
2 - AJ	Orós	1940	7 - CR	Frios	33.02	18 - MT	Aracoiaba	163.42
3 - AJ	Trici	13	8 - CR	Tejuçuoca	27.64	19 - MT	Malcozinhado	38.09
4 - AJ	Várzea do Boi	51.91	9 - CR	Jerimum	18.75	20 - MT	Itapebussu	7.08
5 - AJ	Poço de Pedra	40.29	10 - CR	São Dmingos	3.98	21 - MT	Maranguapinho	9.35
6 - AJ	Quincoé	4.73	11 - CR	Sousa	30.84	<b>Salgado</b>		
7 - AJ	Parambu	9.04	12 - CR	Desterro	4.57	<b>Reservatórios</b>		
8 - AJ	Valério	1.84	13 - CR	Itapajé	3.91	<b>Capacidade</b>		
9 - AJ	Trussu	255.27	<b>Ibiapaba</b>			1 - SL	Manoel Balbino	37.18
10 - AJ	Broco	11.88	<b>Reservatórios</b>			2 - SL	Prazeres	32.5
11 - AJ	Canoas	60.64	1 - IB	Jaburu 1	140.33			

12 - AJ	Do Coronel	1.66	<b>Litoral</b>					
13 - AJ	João Luís	6.58	<b>Reservatórios</b>		<b>Capacidade</b>	3 - SL	Quizabinha	31.78
14 - AJ	Pau Preto	3.31	1 - LT	São Pedro Timbatina	15.79	4 - SL	Thomas Osterne	28.78
15 - AJ	Muquém	46.55	2 - LT	Santo Antônio de Aracatiaçu	24.34	5 - SL	Atalho	72.55
16 - AJ	Benguê	22.29	3 - LT	Santa Maria de Aracatiaçu	8.2	6 - SL	Lima Campos	51.17
17 - AJ	Mamoeiro	18.74	4 - LT	Patos	7.55	7 - SL	Tatajuba	2.72
18 - AJ	Monte Belo	3.96	5 - LT	Mundaú	21.3	8 - SL	Olho D'água	19.21
19 - AJ	Facundo	1.75	6 - LT	Quandú	2.45	9 - SL	Ubalzinho	42.14
20 - AJ	Calderões	1.24	7 - LT	Poço Verde	13.34	10 - SL	Cachoeira	34.33
21 - AJ	Faé	12.79	8 - LT	Gameleira	27.92	11 - SL	Rosário	47.22
22 - AJ	Arneiroz II	178.13	9 - LT	Missi	54.37	12 - SL	Junco	2.03
<b>Baixo Jaguaribe</b>			10 - LT	Gerardo Atimbone	6.1	13 - SL	São Domingos II	2.25
<b>Reservatórios</b>		<b>Capacidade</b>	<b>Médio Jaguaribe</b>			14 - SL	Jenipapeiro 2	41.4
1 - BJ	Santo Antônio de Russas	25.05	<b>Reservatórios</b>		<b>Capacidade</b>	<b>Sertões de Crateús</b>		
<b>Banabuiú</b>			1 - MJ	Racho do Sangue	67.47	<b>Reservatórios</b>		
<b>Reservatórios</b>		<b>Capacidade</b>	2 - MJ	Nova Floresta	5.19	1 - SC	Cupim	4.6
1 - BN	Banabuiú	1534	3 - MJ	Joaquim Távora	26.77	2 - SC	Jaburu 2	75.31
2 - BN	Cedro	126	4 - MJ	EMA	10.39	3 - SC	Carnaubal	46.62
3 - BN	Patú	65.1	5 - MJ	Adauro Bezerra	4.79	4 - SC	Realejo	31.47
4 - BN	Pedras Brancas	456	6 - MJ	Canafistula	11.86	5 - SC	Sucesso	7.13
5 - BN	Quixeramobim	7.89	7 - MJ	Potiretama	6.38	6 - SC	Colina	4.3
6 - BN	Capitão Mor	6	8 - MJ	Tigre	3.51	7 - SC	Barra Velha	99.56
7 - BN	São José I	2.24	9 - MJ	Madeiro	2.81	8 - SC	Flor do Campo	107.6
8 - BN	Poço do Barro	52	10 - MJ	Santa Maria	6.72	9 - SC	São José III	9.12
9 - BN	Cipoada	86.09	11 - MJ	Jenipapeiro	14.59			
10 - BN	São José II	13.18	12 - MJ	Riacho da Serra	23.25			
11 - BN	Traíá II	18	13 - MJ	Castanhão	6700			
12 - BN	Serafim Dias	40.94	14 - MJ	Figueiredo	497.00			
13 - BN	Fogareiro	118	15 - MJ	Santo Antônio	1.19			
14 - BN	Veirão	22.43						
15 - BN	Jatobá	0.59						
16 - BN	Monsenhor Tabosa	11.23						
17 - BN	Pirabibu	74						
18 - BN	Umari	30						
19 - BN	Curral Velho	12.17						

Fonte: elaborado pela autora

Essa região é caracterizada por uma densa rede de reservatórios construídos em resposta às secas interanuais, que variam de pequenos reservatórios (área superficial < 0,5 ha) a grandes reservatórios estratégicos (área superficial > 100 ha) (Mamede et al., 2018; Freire et al., 2023). A segurança hídrica é assegurada principalmente por grandes reservatórios, enquanto os reservatórios menores desempenham um papel crucial no fornecimento de acesso à água para as comunidades mais vulneráveis às secas hidrológicas; no entanto, ambos os sistemas possuem dinâmicas inter-relacionadas (Meira Neto et al., 2024; Araújo et al., 2018).

Embora uma densa rede de reservatórios possa prolongar os efeitos da seca hidrológica em grandes reservatórios, os menores armazenamentos cumprem uma importante função socioeconômica local e, portanto, devem ser cuidadosamente considerados nas estratégias de gestão hídrica para essa região (Ribeiro Neto et al., 2024). Um total de 148 reservatórios foi selecionado para a aplicação do WSq, com base na disponibilidade de dados de monitoramento da qualidade da água.

#### 4.2.3 Conjuntos de dados e aplicação das equações propostas

Foram selecionados dados monitorados simultaneamente (dados do mesmo dia) de qualidade da água e armazenamento em reservatórios entre 2008 e 2024. Em relação à qualidade da água, o fósforo total (TP) é considerado um dos elementos mais importantes e de

difícil controle para a gestão hídrica, devido ao equilíbrio entre as cargas de poluição interna e externa (Lima Neto, 2025b). As concentrações de fósforo nessa região estão relacionadas ao aumento de cianobactérias tóxicas em reservatórios de abastecimento público de água (Barros et al., 2019). Portanto, o TP foi considerado uma variável chave para representar a qualidade da água no estudo de caso das equações propostas.

As duas séries de dados mencionadas foram obtidas do Portal Hidrológico oficial do Ceará (<http://www.hidro.ce.gov.br/>). Neste site, na aba "*Reservatórios*", encontram-se as informações referentes ao armazenamento em reservatórios e às concentrações dos indicadores de eutrofização monitorados, nas categorias de qualidade e quantidade, respectivamente. O conjunto total de dados disponível na estrutura analítica totalizou 5.373 registros. Informações detalhadas sobre o conjunto de dados por reservatório e por região hidrográfica estão disponíveis na Tabela 5.

A concentração máxima de TP ( $C_{max}$ ) considerada corresponde à Classe 2 para ambientes lânticos (0,03 mg/L). De acordo com a legislação nacional brasileira, esta classe inclui águas onde o abastecimento de água para consumo humano é permitido após tratamento convencional de água potável (coagulação-floculação, decantação, filtração e desinfecção), para a proteção de comunidades aquáticas, irrigação de hortaliças, frutíferas, parques, jardins, aquicultura e pesca, e atividades recreativas (Brasil, 2005).

Tabela 5 – Quantidade de dados por região hidrográfica avaliados

	AC	AJ	BJ	BN	CO	CR	IB	LT	MJ	MT	SL	SC
1	41	16	37	47	41	44	47	43	42	40	44	28
2	42	43		33	43	49		42	30	33	42	37
3	41	36		40	29	50		33	41	50	42	30
4	46	19		42	35	17		38	42	47	42	43
5	44	36		32	41	33		45	23	49	43	27
6	44	32		41	42	24		44	37	48	38	34
7	29	29		31	43	45		43	21	37	41	27
8	26	46		44	43	35		34	41	43	46	39
9	36	45		44	28	32		38	16	38	45	36
10	39	27		31		29		37	45	37	34	
11	34	45		34		25			41	47	42	
12	25	39		27		26			36	32	36	
13	33	31		34		34			43	31	44	
14	40	29		26					33	38	32	
15		33		22					34	37		

	16	43	27							18		
	17	34	20							36		
	18	19	27							44		
	19	27	45							43		
	20	30								34		
	21	25								29		
	22	45										
<b>Quantidade de observações por regiões hidrográficas</b>	520	729	37	647	345	443	47	397	525	811	571	301
<b>Quantidade total de observações</b>												<b>5.373</b>

Fonte: elaborado pela autora

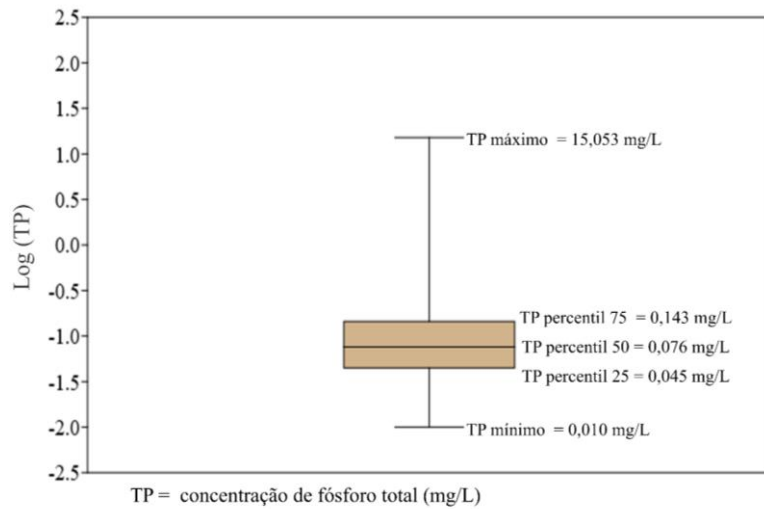
Após a aplicação dos dados às equações mencionadas anteriormente, a diferença média acumulada entre WS e WSq foi calculada para cada reservatório. Os resultados desta etapa foram ponderados pelo inverso da capacidade de armazenamento de cada reservatório, agregados por região hidrográfica (HR), e comparados após a técnica de normalização min-max, para remover o viés das diferenças de escala entre os dados (Asesh, 2022).

Adicionalmente, uma cenarização com os percentuais gradativos de armazenamento de água em um reservatório com volume equivalente à capacidade média dos reservatórios da área em estudo e variações nas concentrações de fósforo foi realizada. A simulação considerou desde o limite máximo para classe 2 até que os valores resultantes de WSq atingissem nulidade numérica, considerada como valores arredondados a zero até duas casas decimais, observando as mudanças no volume armazenado que cada mudança de qualidade repercute sobre o volume disponível.

### 4.3 Resultados

Os resultados indicaram que a maioria dos valores (83%) esteve acima da concentração máxima recomendada pela legislação nacional para a Classe 2 e em níveis elevados de eutrofização. Na Figura 20 estão apresentados os valores de TP, apresentados em escala logarítmica em razão das diferentes ordens de grandeza dos resultados encontrados. Destaca-se que desse conjunto de dados foram excluídos aqueles menores que o limite de detecção (0,01 mg/L), que corresponderam a 293 dados. Em relação ao conjunto total de dados, apenas 17% das medições estiveram dentro do limite de 0,03 mg/L recomendado para a classe II, ampliando para o limite até as classes III de classe IV (0,05 mg/L), cerca de 29% das medições atenderiam as referidas classes.

Figura 20 – Concentrações de fósforo total do conjunto de dados



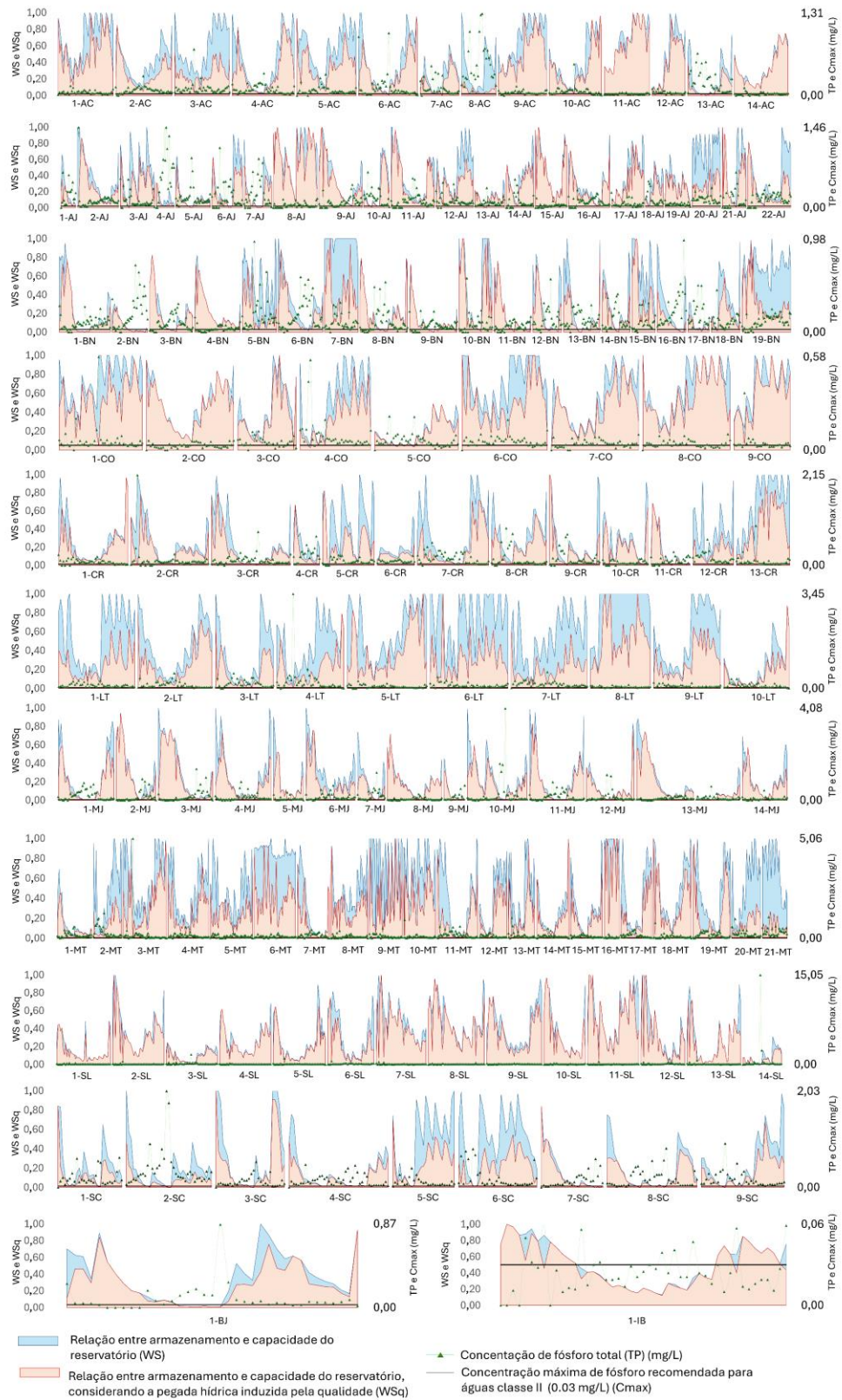
Fonte: elaborado pela autora

Na Figura 20, a área azul representa a razão entre a capacidade de armazenamento e a capacidade do reservatório (WS), enquanto a área vermelha representa o cálculo considerando a pegada hídrica induzida pela qualidade (WSq). As marcações verdes indicam as concentrações de fósforo. A concentração máxima recomendada para a classe 2 é apresentada como uma linha constante no gráfico. Os resultados revelaram que a bacia hidrográfica com maior conformidade ao valor máximo esperado para a classe 2 foi a IB, com dados de monitoramento de apenas um reservatório. Nessa bacia hidrográfica, os valores de WS e WSq permaneceram bastante semelhantes.

As maiores concentrações foram encontradas nas bacias hidrográficas SL, MT e LT, enquanto os menores valores foram encontrados nas bacias hidrográficas IB, CO e BJ. O aumento em SL é gerado por um *outlier* que ocorre quando o reservatório está muito próximo do volume morto (<5%). Observa-se que a WSq apresenta maior sensibilidade a volumes mais próximos de uma situação de armazenamento confortável (>50%). Quando as condições de armazenamento estão próximas do nível crítico de alerta de escassez, as mudanças na qualidade não geram diferenças que alterem a classificação entre WS e WSq.

Nos gráficos da Figura 21 também se observam a variabilidade de armazenamento de água nos reservatórios e a ocorrência do esvaziamento total, seguida da recuperação do volume em períodos alternados. Concentrações elevadas e *outliers* ocorrem quando o reservatório está em condições críticas de armazenamento. No entanto, valores em condição hipereutrófica também ocorreram com níveis confortáveis de armazenamento de água.

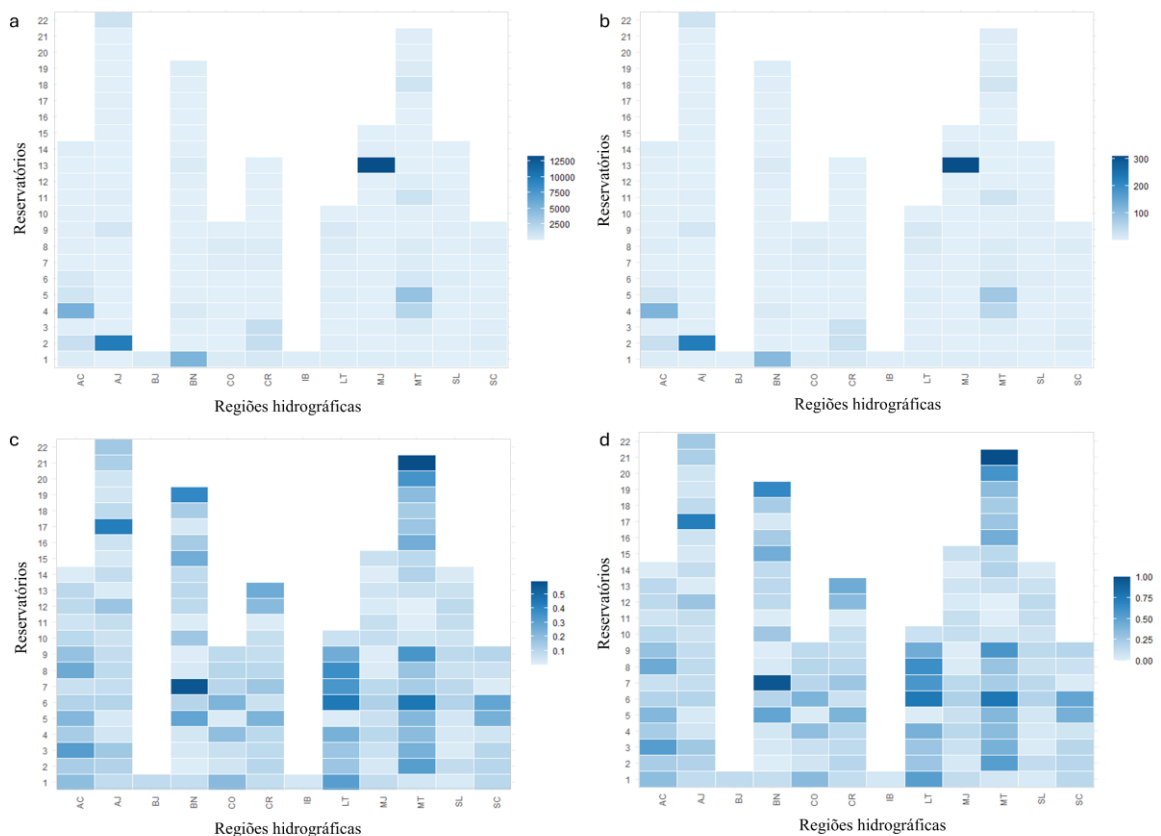
Figura 21 - Armazenamento de água e condições de armazenamento induzidas pela qualidade da água e concentrações totais de fósforo



Fonte: elaborado pela autora

Quando considerados todos os valores acumulados de WS e WSq, a condição de armazenamento que inclui as questões de qualidade, a partir do conceito de pegada hídrica, implicaria em uma redução virtual de até 27%, o que estaria dentro da faixa de um 1/4 a 1/3 de redução da disponibilidade hídrica. As diferenças cumulativas totais e médias entre WS e WSq, os valores médios divididos pelo volume do reservatório e a normalização mínima e máxima desses valores são apresentados na Figura 22. Verificou-se uma forte influência da capacidade de armazenamento na determinação da pegada hídrica, tanto nos valores totais quanto nos médios. Na comparação entre reservatórios com diferentes capacidades de armazenamento e regiões hidrográficas, os valores relativos e normalizados tornaram mais perceptível a influência da qualidade da água nos reservatórios que apresentaram condições mais deterioradas.

Figura 22 - Medições da diferença entre as condições de armazenamento de água e as condições de armazenamento induzidas pela qualidade de água

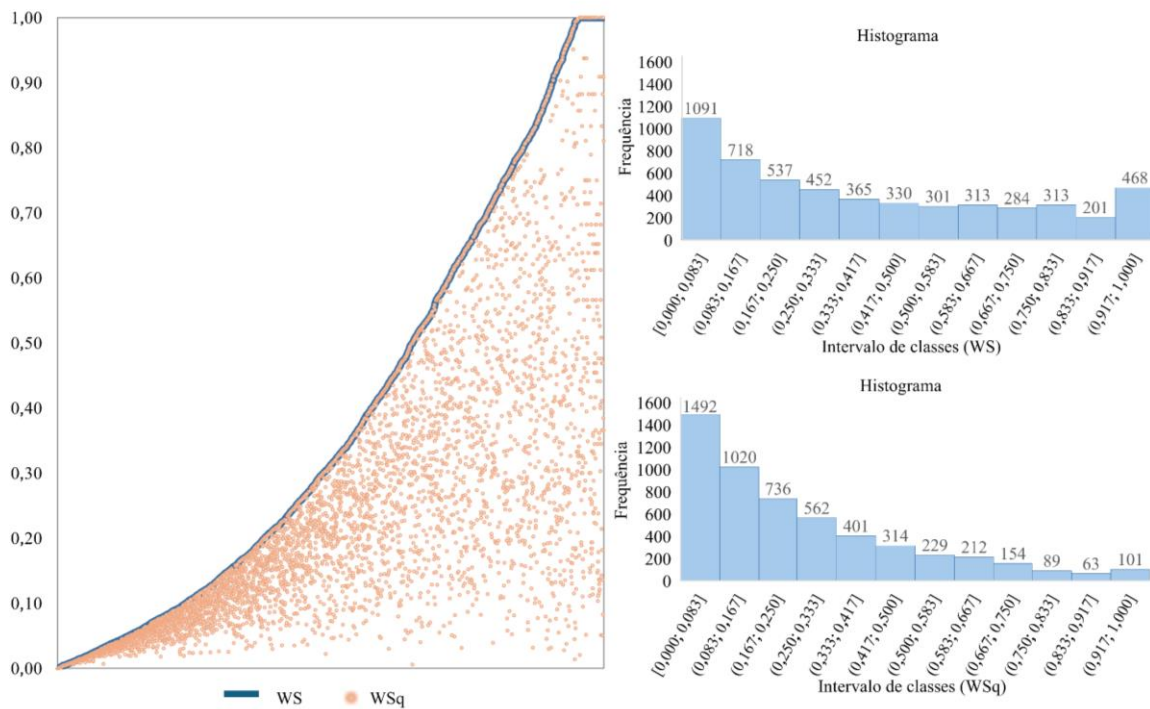


Legenda: a – Diferença acumulada total entre WS e WSq, b – Média da diferença acumulada entre WS e WSq, c – Média da diferença cumulada entre WS e WSq ponderada pelo inverso da capacidade de armazenamento, d – Normalização min-max dos valores da média da diferença cumulada entre WS e WSq ponderada pelo inverso da capacidade de armazenamento.

Fonte: elaborado pela autora

Na Figura 23 estão apresentadas a distribuição dos dados de armazenamento real da série histórica, ordenados de forma crescente, e a distribuição dos resultados de WSq correspondentes. Um histograma também foi organizado para apresentar a frequência em cada percentil de armazenamento dos reservatórios. Da frequência total em que o reservatório esteve com armazenamento acima de 90%, a maioria (80%) esteve com qualidade superior ao recomendado pela legislação, afetando a pegada hídrica e resultando em uma redução virtual de disponibilidade hídrica.

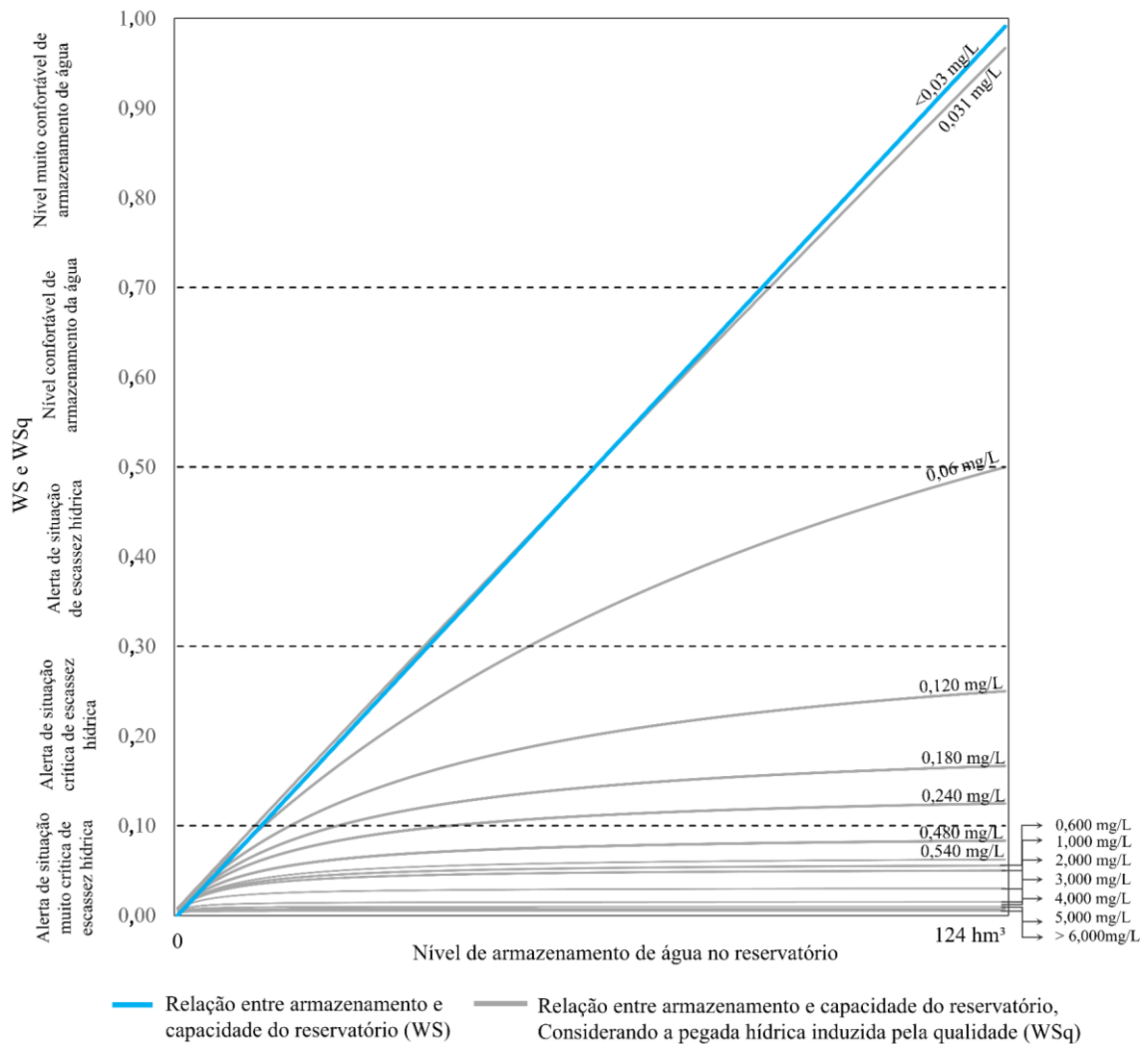
Figura 23 – Frequência de dados com base nas classes de condição de armazenamento



Fonte: elaborado pela autora

A cenarização considerando o armazenamento médio e o aumento progressivo do volume em comparação com diferentes concentrações pode ser observada na Figura 24. Um aumento na concentração de fósforo para o dobro do valor máximo permitido pela legislação gera uma redução proporcional no volume armazenado, considerando os valores da pegada hídrica.

Figura 24 - Resultados da cenarização



Fonte: elaborado pela autora

#### 4.4 Discussão

No geral, os resultados demonstraram que as concentrações de fósforo no conjunto de dados apresentaram a maioria dos valores dentro dos limites entre o máximo permitido pela legislação (0,03 mg/L) para a classe 2 e a condição hipereutrófica (>0,116 mg/L) para reservatórios na região semiárida, de acordo com Silva, Saraiva e Becker (2024). Cabe destacar que na região em que foram aplicadas as equações baseadas na pegada hídrica induzida por qualidade, as concentrações de poluentes frequentemente não atendem aos padrões de qualidade internacionais, onde a redução de nível da água está relacionada com a floração de cianobactérias em razão do excesso de nutrientes (Laurent et al., 2023). Os resultados também corroboram ao encontrado por Silva et al. (2025), ao identificarem que na maior parte do tempo, os reservatórios do semiárido, mesmo após tratamento convencional, podem apresentar

limitações quanto ao uso para o abastecimento.

As condições hipereutóficas revelaram que esses reservatórios podem estar sob condições semelhantes a pequenos reservatórios receptores de contribuições laterais de águas residuárias, especialmente aqueles com concentrações entre 1 e 3 mg/L. Os valores mais elevados que alcançaram 15 mg/L são similares ao encontrado em lagos rasos na Argentina, sob forte influência agropecuária e com concentrações que estão entre as condições de eutrofização em reservatórios mais agravadas registradas na literatura (Ecchaniz; Vignatti, 2019).

A predominância da ocorrência de valores extremos durante períodos em situação de alerta crítico de escassez hídrica pode ser explicada especialmente pela contribuição das cargas internas. Segundo estudos de Rocha et al. (2025), as cargas internas adquirem maior relevância no período seco e ocasionam prejuízos econômicos sobre os usos da água e a biota. Essas cargas concentradas no sedimento dos reservatórios retroalimentam a eutrofização das águas, especialmente em condições anóxicas (Rocha; Lima Neto., 2022; Rocha et al., 2024).

O aumento da concentração de fósforo no sedimento também está associado a parcela ligada ao ferro e ao alumínio e, conseqüentemente, à idade do reservatório (Moura et al., 2020). Somando-se a isso, de acordo com Wiegand et al. (2021), durante longos períodos de seca no semiárido brasileiro, os reservatórios possuem elevada probabilidade de aumento das concentrações de fósforo, exceto para aqueles inseridos em bacias hidrográficas com maiores aquíferos subterrâneos e menores demandas de água.

Apesar dessa predominância quanto aos valores extremos, sob condições de menores armazenamentos, houve registros de concentrações elevadas ( $> 0,03\text{mg/L}$ ) de TP em situações hídricas quantitativamente confortáveis, o que pode ser explicado principalmente pela ocorrência do aumento de cargas externas, não sendo descartadas as contribuições de cargas internas, principalmente nos períodos recuperação do volume após esvaziamento do reservatório por consecutivos anos de seca. O aumento das cargas de fósforo se relaciona diretamente com o uso e ocupação do solo e o efeito cumulativo da poluição na bacia hidrográfica (Rocha et al., 2022; Rocha Júnior; Araújo; Becker, 2024). Solos expostos, por exemplo, aumentam potencialmente o transporte de fósforo para zonas ripárias dos mananciais (Cunha; Cunha, 2023). A contribuição de cargas oriundas das atividades agropecuárias e da descarga de águas residuárias também são frequentemente correlatas às ocorrências de poluição nos reservatórios dessa região (Santos et al., 2014).

A redução da frequência de dados das maiores condições de armazenamento e o aumento nas classes de menor nível de armazenamento, bem como a existência de diferença entre WS e WSq quando WS está com valor acima de 50%, reforçam a ocorrência de

concentrações elevadas em períodos em que os reservatórios estão em condições confortáveis de abastecimento.

Silva, Cavalcante e Mamede (2024) avaliaram o impacto da qualidade da água na disponibilidade hídrica de reservatórios das bacias hidrográficas metropolitanas (MT) também inclusos na presente pesquisa (Acarape do meio (3-MT) e Aracoiaba – (18-MT), ver Tabela 4 e Figura 21). Os autores destacaram que, em razão de cargas de TP, pode haver restrições significativas de disponibilidade hídrica para usos da água que demandem classe 2 ou classe 3, corroborando ao identificado pela avaliação da condição de armazenamento considerando a qualidade da água.

Evidências científicas demonstram que o impacto das mudanças climáticas sobre o uso e ocupação do solo demandará o planejamento de novas estratégias de gestão dos recursos hídricos para o semiárido brasileiro (Montenegro; Ragab, 2012). Essas novas estratégias devem considerar a necessidade de minimizar o processo de aumento agravado dos níveis de eutrofização, já previsto sob diferentes cenários climáticos (Raulino; Silveira; Lima Neto et al., 2021).

Essas questões são comuns a diversas regiões do mundo. Nesse sentido, abordagens quali-quantitativas de gestão de recursos hídricos têm sido desenvolvidas. Farokhi et al. (2025), acoplaram o modelo quantitativo e um modelo qualitativo (WEAP-QUAL2K com otimização multiobjetivo NSGA-II) para maximizar a porcentagem de atendimento das demandas e minimizar a violação de padrões de qualidade. Os autores identificaram que a manutenção da vazão ecológica condicionada aos modelos e a comunicação aos usuários da água sobre as consequências da violação de qualidade foram fundamentais para o êxito da aplicação do modelo.

A aplicação de abordagem quali-quantitativa para operação de reservatórios do semiárido, considerando a regra de zonas de Hedging e controle de eutrofização, quando a concentração de fósforo é muito alta, pode se tornar inviável por gerar racionamentos severos sobre demandas dependentes da vazão regularizada e da vazão média afluyente (Gomes, Maia e Medeiros, 2022).

Diante disso, estratégias alternativas como o conceito de pegada hídrica podem direcionar a tomada de decisão e estimular ações para o controle da poluição. Os resultados revelaram que a utilização do WSq permite sinalizar o aumento da escassez ao considerar questões qualitativas. A mudança de classificação quando se inclui o aspecto de qualidade da água revelou sensibilidade às variações de quantidade em proporções consistentes.

Na proposição realizada, a pegada hídrica induzida pela qualidade, que se aproxima

do conceito de GWF, pode favorecer que os impactos gerados pela ausência de qualidade sejam visualizados de maneira mais clara no momento de decisão da governança hídrica. Quando o reservatório apresenta níveis baixos de armazenamento, inferiores a 10%, o índice não apresenta sensibilidade considerável. Tal fato não impossibilita a utilização de WSq, pois o principal objetivo é estimular medidas preventivas de poluição na bacia hidrográfica, principalmente quando as condições de armazenamento estão confortáveis e são liberados volumes de água com menor restrição (Freire et al., 2025), ao considerar aspectos quantitativos. Trata-se de uma ferramenta para que as questões qualitativas sejam evidenciadas nos momentos de alocação de água, para a tomada de decisão.

A principal diferença entre essa e outras abordagens do conceito de pegada hídrica cinza aplicada em pesquisas sobre rios e reservatórios consiste no fato que a maioria das abordagens considera a carga poluidora afluente de fontes agrícolas, industriais e domésticas (Meng et al., 2022) ou um requerimento de qualidade da água sobre vazões de retirada para atendimento de demandas específicas. Nesse sentido, a utilização da pegada hídrica como fator para otimizar o processo de alocação em uma bacia hidrográfica semiárida também foi proposto por Galvão et al. (2018). Ao utilizar a abordagem de Hoekstra e Chapagain (2008), os autores equacionaram a menor carga poluidora de diferentes usuários com os maiores atendimentos de demanda.

A utilização do conceito de pegada hídrica no processo de alocação da água também pode se relacionar com a aplicação do princípio do poluidor pagador para a gestão hídrica. Esse conceito é bastante utilizado na gestão ambiental e foi introduzido pela OECD para que os poluidores se responsabilizassem financeiramente pelas medidas de prevenção e controle ambiental (Trancon; Leflaive, 2024). Nesse caso, associando ao conceito de poluidor pagador, a poluição gerada na bacia hidrográfica, repercutiria em uma redução na disponibilidade hídrica geral, sendo utilizada para estabelecer metas de redução a partir da pegada hídrica cinza de cada usuário, após a visualização do quanto que o reservatório se encontra poluído. De acordo com Jones et al. (2024), o monitoramento da qualidade da água se tornou uma ferramenta internacional para aplicação do princípio do poluidor-pagador nos recursos hídricos para que a responsabilização da poluição recaia sobre o agente poluidor.

Quanto mais destoante for o WS do WSq, mais ações devem ser cobradas e estabelecidas metas de curto, médio e longo prazo para controle da poluição. A comparação entre as bacias hidrográficas deve considerar valores ponderados e normalizados pelos respectivos volumes dos reservatórios. O impacto da perda da qualidade, quando a comparação é realizada entre bacias hidrográficas pode não ser perceptível em razão da heterogeneidade de

capacidades de armazenamentos entre as bacias hidrográficas.

#### **4.5 Conclusão**

A presente pesquisa propôs a aplicação do conceito de pegada hídrica cinza para determinar a condição de armazenamento de água considerando uma condição induzida pela qualidade da água. Essa proposição foi testada para uma série de dados reais e uma série sintética, com dados de 148 reservatórios estratégicos e com a variável fósforo total. A pesquisa considerou limites de concentração para classe 2, mas a determinação proposta permite que sejam utilizados outros tipos de poluentes, priorizando o mais destoante do valor de referência, o qual também pode ser adotado, a depender do objetivo da aplicação.

Os resultados revelaram que os reservatórios da área de estudo estão em condições agravadas de eutrofização, que predominam durante períodos de armazenamento inferiores a 50%. No entanto, houve situações acima do limite máximo qualitativo recomendado também em condições confortáveis de água armazenada. Nesse sentido, a mensuração proposta de WSq permite que a qualidade da água seja observada de forma quantitativa nas decisões de alocação de água.

O impacto sobre a condição de volume armazenado, considerando a qualidade da água, demonstrou proporcionalidade de redução do volume armazenado com o aumento da concentração, ou seja, o aumento da concentração em duas vezes o valor de referência representa uma redução de 50% sobre o volume de água disponível.

A proposição pioneira pode ser utilizada como um fator de estímulo à realização de atividades de prevenção de poluição e aplicação do princípio do poluidor pagador, para o estabelecimento de metas e visualização da disponibilidade da água. Estudos futuros podem explorar a aplicação de outros poluentes e a interação dessa variável junto à pegada hídrica cinza das atividades presentes na bacia hidrográfica, conceito já amplamente difundido. Esse estudo propõe uma ferramenta acessível para visualização de questões de qualidade da água sobre a quantidade, especialmente em regiões onde há predominância de condições de deterioração da qualidade da água.

## 5 O CONCEITO DE PEGADA HÍDRICA CINZA APLICADO À ESCASSEZ HÍDRICA

### 5.1 Introdução

As considerações sobre indicadores de escassez da água datam da década de 80, se considerarmos as definições quanto aos aspectos quantitativos (Hussain et al., 2022). Indicadores clássicos de avaliação da escassez hídrica como índice Falkenmark e Criticality ratio (CR) possuem como desvantagem a não consideração sobre questões de qualidade da água (Zeng et al., 2013). Tanto os indicadores clássicos de escassez como os indicadores holísticos enfrentam desafios de integração com dados de qualidade da água e de vazão ecológica (Hussain et al., 2022). Além disso, a atenuação da escassez hídrica é uma das metas dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável global (ODS 6, meta 6.4.2) (UNEP, 2024). No entanto, essa meta ainda não considera nessa definição os aspectos qualitativos, determinando a escassez como a razão entre as retiradas e a água doce disponível subtraída da vazão ecológica.

Por outro lado, diversos índices e modelos de qualidade da água e de poluição já foram desenvolvidos e apresentam como principal fragilidade as incertezas, especialmente em razão da seleção e ponderação dos parâmetros componentes (Syeed et al., 2023).

Apesar de a busca pela compreensão dos processos relacionados com a qualidade da água não ser recente, as avaliações qualitativas começaram a ser incluídas sobre os índices de escassez somente nas primeiras décadas do século XXI (Liu et al., 2017). A escassez hídrica induzida pela qualidade é um tema de crescente interesse entre os pesquisadores e gestores de águas. Em busca na base de dados *Web of Science*, entre 1980 e 2025 foram publicados 6.381 artigos relacionados a “*water quality*” e “*water scarcity*”, sendo mais de 80% somente na última década. Quando a pesquisa é realizada pelos termos “*water quality*” e “*water scarcity index*”, a quantidade de artigos encontrados reduz para 824, dos quais mais de 68% foram somente nos últimos 5 anos.

Um dos avanços nessa perspectiva de avaliação foi a criação do conceito de pegada hídrica cinza (GWF) para mensurar o impacto da poluição da água em uma abordagem quantitativa (Hoekstra; Chapagain, 2008). A GWF é um conceito utilizado para determinação de índices de escassez induzida pela qualidade da água. Essa variável relaciona a quantidade de carga poluidora com a diferença entre a concentração máxima de determinado poluente e a concentração natural esperada (Hoekstra; Mekonnen, 2012). Dessa forma, a escassez induzida pela qualidade ou o índice de escassez hídrica considerando a qualidade da água (IEHq) pode ser determinada pela relação entre a *GWF* e os recursos hídricos disponíveis ou blue water

resources (*BWF*) (Liu et al., 2016) (ver Capítulo 4).

Em um contexto global, a quantidade de bacias em condição de escassez severa pode triplicar se considerada a poluição por nitrogênio nos rios, nas estimativas para 2050 (Wang et al., 2024). Um cenário de aumento considerável também é previsto para a quantidade de pessoas impactadas pela escassez severa se considerados aspectos de salinidade, poluição orgânica e patógenos (Jones et al., 2024).

Uma variável fundamental sobre a determinação do IEHq equivale a estimativa de uma demanda de água adicional teórica ( $dq$ ) que representa uma ponderação da divergência entre os padrões de qualidade e a concentração real observada no manancial, em determinado instante. Nesse sentido, o presente capítulo buscou agrupar e propor uma sistematização das equações para cálculo de IEHq, com ênfase sobre a determinação de  $dq$ , a partir da consideração de uma abordagem de avaliação que integra aspectos qualitativos quanto à vazão ecológica e aos usos consuntivos e não consuntivos da água.

## 5.2 Material e Métodos

### 5.2.1 Formulação das equações

As determinações correspondentes aos usos consuntivos, no equacionamento, foram relacionadas com questões de qualidade e da quantidade de água retirada do manancial, como por exemplo, para o atendimento de demandas de abastecimento público e irrigação. Para os usos não consuntivos, o presente capítulo propõe a subdivisão em duas classes: aquelas relacionadas à descarga de águas residuárias nos rios (usos não consuntivos diretamente poluentes) e àquelas que não retiram a água e não geram despejo de efluentes (e.x.: navegação, paisagismo, balneabilidade) (usos consuntivos não diretamente poluentes).

Certamente, um mesmo setor pode ser o gerador de demandas consuntivas e não consuntivas simultaneamente. Essas duas classificações permitiriam a inclusão de aspectos de qualidade nas decisões de alocação e de controle de poluição sobre as considerações dos aspectos hidrológicos.

Para formulação da sistematização proposta para o IEHq foram adaptadas as equações estabelecidas por Hoekstra et al. (2011), Vliet et al. (2017) e Li et al. (2024). Quanto aos trabalhos de Hoekstra et al. (2011) e Vliet et al. (2017) foi considerada a existência de uma demanda adicional ( $dq$ ). Da equação descrita por Li et al (2024) foi utilizado o conceito base de escassez hídrica que considera a relação entre a demanda total requerida de água (TWR) e o total de água disponível (AWR) (equação 6). Na proposição mencionada, AWR consiste na

vazão do rio ( $Q_i$ ) acrescida de recursos hídricos não convencionais (UWR), como por exemplo, as oriundas de águas residuárias tratadas, águas de dessalinização, subtraída da vazão ecológica (EFR) (equação 7).

$$IEH = \frac{TWR}{AWR} \quad (6)$$

$$AWR = Q_i + UWR - EFR \quad (7)$$

Onde:

IEH - Índice de Escassez Hídrica (adimensional);

TWR - Demanda total requerida de água (unidade de medição de volume por tempo);

AWR - Total de água disponível (unidade de medição de volume por tempo);

$Q_i$  - Vazão no rio em determinado instante (unidade de medição de volume por tempo);

UWR - Recursos hídricos não convencionais (unidade de medição de volume);

EFR - Vazão ecológica (unidade de medição de volume por tempo).

A demanda total requerida (TWR) (equação 8) consiste no somatório das retiradas totais de água para cada setor ( $j$ ) ( $WW_j$ ) acrescido das demandas induzidas pela qualidade: a demanda induzida pelos usos consuntivos ( $j$ ) ( $dq_{wwi,j}$ ), a demanda induzida pela alteração da qualidade da água por um uso não consuntivo diretamente poluente ( $dq_{ai,j}$ ) e a demanda de qualidade da água induzida pela vazão ecológica e seus respectivos padrões qualitativos ( $dq_{efr}$ ).

$$TWR = \sum_{j=1}^n WW_j + \sum_{j=1}^n \max(dq_{wwi,j}) + \sum_{j=1}^n \max(dq_{ai,j}) + \sum_{j=1}^n \max(dq_{efr,i,j}) \quad (8)$$

Onde:

TWR - Demanda total requerida de água (unidade de medição de volume por tempo);

$WW_j$  - Retiradas totais de água para cada setor (unidade de medição de volume por tempo);

$\max(dq_{wwi,j})$  - Demanda máxima induzida pela qualidade para usos consuntivos (unidade de medição de volume por tempo);

$\max(dq_{ai,j})$  - Demanda induzida pela alteração da qualidade da água por um uso não consuntivo

diretamente poluente, considerando a concentração de poluente mais divergentes, ou seja, a máxima demanda induzida (unidade de medição de volume por tempo);

$\max(dq_{efr_{i,j}})$  - Demanda induzida pela qualidade relativa à vazão ecológica, considerando a concentração de poluente mais divergentes, ou seja, a máxima demanda induzida (unidade de medição de volume por tempo).

### 5.2.2 Demandas relativas à qualidade da água para usos consuntivos, não consuntivos não poluentes e vazão ecológica

Para formulação de  $dq_{ww_{i,j}}$ , foi utilizado o princípio da diluição, comparando a carga em um determinado momento com uma carga máxima teórica de um determinado poluente no manancial (equações 9, 10 e 11).

$$Q_i C_i = C_{\max} Q_{\text{theor}} \quad (9)$$

$$Q_{\text{theor}} = \frac{\text{AWR } C_i}{C_{\max}} \quad (10)$$

$$dq_{ww_{i,j}} = \{ 0, \text{ se } Q_{\text{theor}} < \text{AWR}; \quad Q_{\text{theor}} - \text{AWR}, \text{ se } Q_{\text{theor}} \geq \text{AWR} \} \quad (11)$$

Onde:

$Q_i$  - Vazão no rio em determinado instante (unidade de medição de volume por tempo);

$C_i$  - Concentração de determinado poluente em um determinado momento de medição (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$C_{\max}$  - Concentração máxima de determinado poluente (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$Q_{\text{theor}}$  - Vazão teórica de água virtual para que a concentração de determinado poluente no rio se equipare a concentração máxima (unidade de medição de volume por tempo);

AWR - Total de água disponível (unidade de medição de volume por tempo);

$dq_{ww_{i,j}}$  - Demanda induzida pela qualidade para usos consuntivos

Uma  $dq_{ww_{i,j}}$  com relação a vazão ecológica também deve ser considerada, de modo análogo à equação 11, substituindo a disponibilidade hídrica em determinado momento pela vazão ecológica e a concentração máxima sendo considerada como àquela necessária para conservação do ecossistema local (equação 12), gerando um  $dq_{efr}$  (equação 13).

$$Q_{\text{theor efr}} = \frac{Q_{\text{efr}} C_i}{C_{\text{efr}}} \quad (12)$$

$$dq_{\text{efr}} = \{ 0, \text{ se } Q_{\text{theor efr}} < Q_{\text{efr}}; \quad Q_{\text{theor efr}} - Q_{\text{efr}}, \text{ se } Q_{\text{theor efr}} \geq Q_{\text{efr}} \} \quad (13)$$

Onde:

$Q_{\text{theor efr}}$  - Vazão ecológica teórica de água virtual para que a concentração de determinado poluente no rio se equipare a concentração máxima (unidade de medição de volume por tempo);

$Q_{\text{efr}}$  - Vazão ecológica (unidade de medição de volume por tempo);

$C_{\text{efr}}$  - Concentração máxima de determinado poluente para conservação das condições ecológicas desejadas (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$dq_{\text{efr}}$  - Demanda induzida pela qualidade manutenção das condições ecológicas (unidade de medição de volume por tempo).

Quando houver usos da água não consuntivos não poluentes no mesmo manancial, deve-se calcular o  $dq_{\text{ww}i,j}$  com base também nos parâmetros limite do referido uso e considerar para o somatório final de determinação de TWR o valor máximo, ou seja, aquele que seja mais restritivo em termos de qualidade da água.

### 5.2.3 Demandas relativas à qualidade da água alterada por usos não consuntivos poluentes

Propõe-se a determinação da  $dq_{d,i,j}$  a partir de uma equação baseada na concentração de mistura após o lançamento de uma carga poluidora no rio (equação 14). Dessa forma, quando a concentração no rio ( $C_i$ ) for inferior a concentração máxima, uma vazão teórica ( $Q_{\text{theor}}$ ) é determinada (equação 15), caso  $Q_{\text{theor}}$  seja superior a vazão atual do rio ( $Q_i$ ), a  $dq_d$  será a diferença entre  $Q_{\text{theor}}$  e  $Q_i$  (equação 16).

(14)

$$C_{\text{max}} \geq \frac{C_{\text{ef}} Q_{\text{ef}} + C_i Q_{\text{theor}}}{Q_{\text{ef}} + Q_{\text{theor}}}$$

$$Q_{\text{theor}} \geq \frac{Q_{\text{ef}} (C_{\text{ef}} - C_{\text{max}})}{C_{\text{max}} - C_i} \quad (15)$$

$$dq_{d,i,j} = \{ 0, se Q_{theor} < Q_i; Q_{theor} - Q_i, se Q_i \geq Q_{theor} \} \quad (16)$$

Onde:

$C_{max}$  - Concentração máxima de determinado poluente (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$C_{ef}$  - Concentração de determinado poluente em efluente lançado no rio (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$Q_{ef}$  - Vazão do efluente lançado no rio (unidade de medição de volume por tempo);

$C_i$  - Concentração de determinado poluente em um determinado momento de medição (unidade de massa por volume ou quantificação similar específica de determinação do poluente);

$Q_i$  - Vazão no rio em determinado instante (unidade de medição de volume por tempo);

$Q_{theor}$  - Vazão teórica de água virtual para que a concentração de determinado poluente no rio se equipare a concentração máxima (unidade de medição de volume por tempo).

Quando a concentração medida em um determinado momento for igual ou superior à concentração máxima, determina-se inicialmente, através da equação 14, uma demanda adicional para o alcance da concentração máxima considerando a concentração atual acrescida de uma unidade, e, na sequência, soma-se com a demanda calculada, considerando para a concentração medida, o valor da concentração máxima subtraído de uma unidade. Essa etapa é importante pois se  $C_i$  for igual ao valor de  $C_{max}$  haverá uma indeterminação matemática sobre o valor de  $dq_{d,i,j}$  e quando  $C_i$  for superior ao valor de  $C_{max}$  haverá uma inconsistência sobre o sinal da equação na determinação de  $Q_{theor}$ .

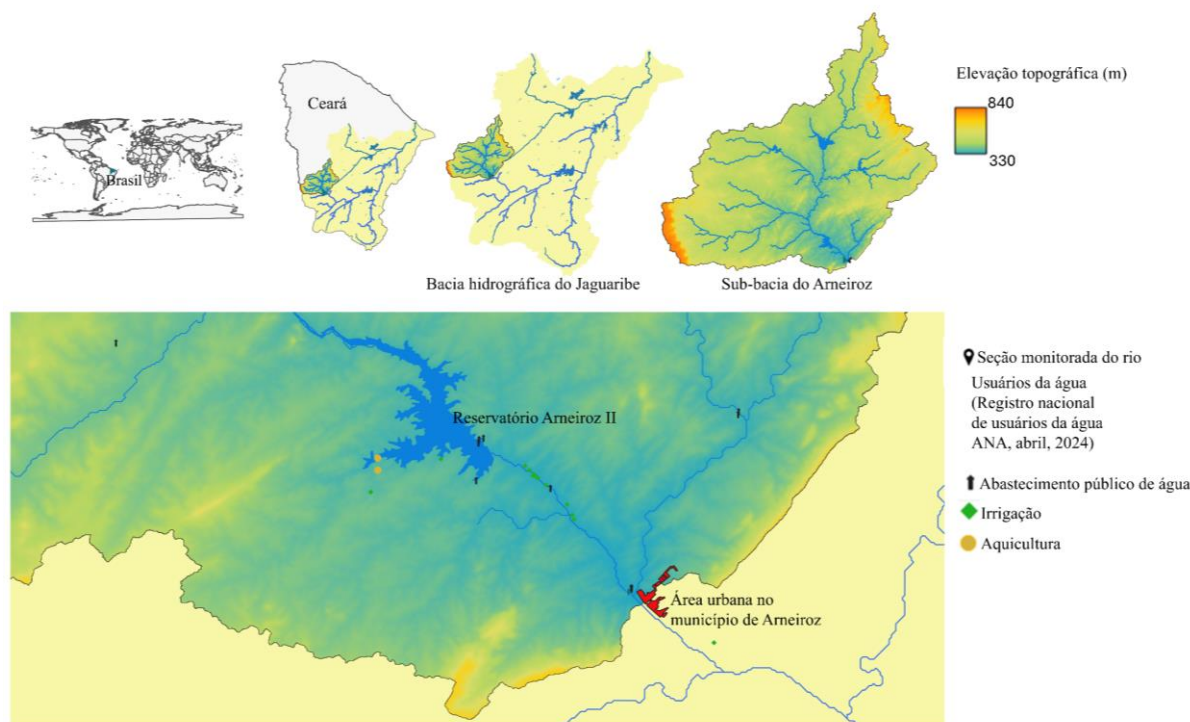
#### 5.2.4 Aplicação das equações

Para aplicação das equações formuladas, foi selecionada uma sub-bacia hidrográfica do rio Jaguaribe localizada no semiárido brasileiro com abrangência de 5.874,22 km<sup>2</sup> (Figura 25). O rio Jaguaribe é o maior curso de água fluvial do estado do Ceará (Castro et al., 2020). Essa região é caracterizada por clima semiárido, rios intermitentes e reservatórios de água para atendimento de usos múltiplos (Freire et al., 2023).

A condição climática do semiárido brasileiro está associada à variabilidade das vazões e do volume de água armazenado nos reservatórios, dependentes do regime de precipitação que apresenta sequências de anos secos e chuvosos, com elevada evaporação anual

(Güntner; Bronstert, 2004; Alvalá et al., 2017). Em resumo, os dados utilizados estão apresentados na Tabela 6.

Figura 25 – Localização da sub-bacia hidrográfica selecionada para aplicação das equações



Fonte: elaborado pela autora

Tabela 6. Dados utilizados para aplicação das equações

Variáveis	Dados
$dq_{wwi,j}$	Concentração de poluentes no rio Concentração máxima de poluentes no rio Disponibilidade hídrica no manancial
$dq_{efr}$	Concentração de poluentes no rio Concentração máxima de poluentes no rio para manutenção do ecossistema fluvial Vazão ecológica do rio
$dq_{di,j}$	Concentração de poluentes na água residuária Concentração de poluentes no rio Vazão da água residuária Vazão no rio Concentração máxima de poluentes no rio

Os dados de vazão na seção de monitoramento do rio foram obtidos através de ferramenta virtual do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>). Esse sistema integra uma rede de mais de 23

mil estações pluviométricas e fluviométricas distribuídas no Brasil (ANA, 2024). As estações são classificadas por códigos, para a presente pesquisa a estação fluviométrica 36020000 foi utilizada.

Nesse conjunto de dados, foi selecionada uma série histórica de vazão de trinta anos (1994 – 2023) para determinação da disponibilidade de água, da vazão média anual, das vazões médias mensais e aplicação da equação do método VMF (equação 17) (Pastor et al., 2014), para determinação da vazão ecológica. Tal método, comparado aos métodos de Smakhtin, Revenga e Doll (2004), Tennant (1976) e  $Q_{90\_Q_{50}}$  (Pastor et al., 2014) apresentou vantagens para determinação de vazão ecológica em regiões com grande variabilidade na série histórica de vazões. O Método VMF determina frações sobre a vazão média mensal (MMF) a partir dos valores comparados à vazão média anual (MAF).

$$EFR = \left\{ \begin{array}{ll} 0.60 MMF, & \text{se } MMF \leq 0.4MAF \\ 0.45 MMF, & \text{se } 0.4MAF > MMF \leq 0.8 MA F \\ 0.30 MMF, & \text{se } 0.8 MA F \geq MMF \end{array} \right\} \quad (17)$$

Quanto aos dados de qualidade da água na seção monitorada, foram utilizadas as medições realizadas pela Semace. A Semace, além de outras atividades para execução da política estadual de meio ambiente, realiza o monitoramento dos principais rios do Estado do Ceará de variáveis relacionadas à pressão antropogênica sobre os recursos hídricos (Freire et al., 2023). Dessa forma, uma série com medições realizadas trimestralmente ao longo de onze anos (2013 – 2023) foi utilizada nas simulações de qualidade da água do rio, para determinação de  $dq_{ww_{i,j}}$ . As variáveis utilizadas são relativas às medições de matéria orgânica (demanda bioquímica de oxigênio – DBO) e nutrientes (nitrogênio amoniacal e fósforo total).

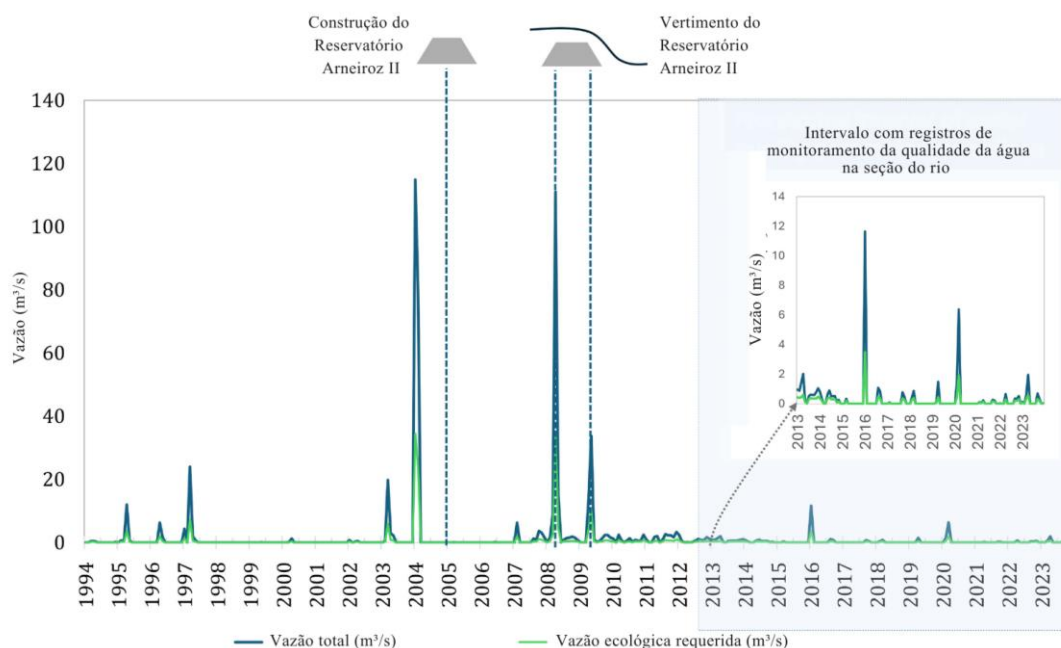
As concentrações máximas foram consideradas de acordo com o padrão nacional para abastecimento público após tratamento convencional, proteção de comunidades aquáticas, balneabilidade, irrigação de hortaliças, fruticultura, paisagismo urbano e aquicultura (Brasil, 2005), sendo esses os usos da água predominantes nesta região. Para o nitrogênio amoniacal, como o padrão é dinâmico e dependente do valor de pH, essa variável também foi extraída das séries de dados de monitoramento.

### 5.3 Resultados

A série histórica e a vazão ecológica determinada pelo VMF foram apresentadas na Figura 26. Nessa mesma figura, estão indicadas a construção do reservatório a montante

(Arneiroz II) e eventos de vertimento do referido reservatório. Observa-se que durante o período em que há registros de monitoramento da qualidade da água na seção do rio, não houve vertimento do reservatório.

Figura 26 – Vazão mensal total e vazão ecológica na seção de monitoramento fluvial



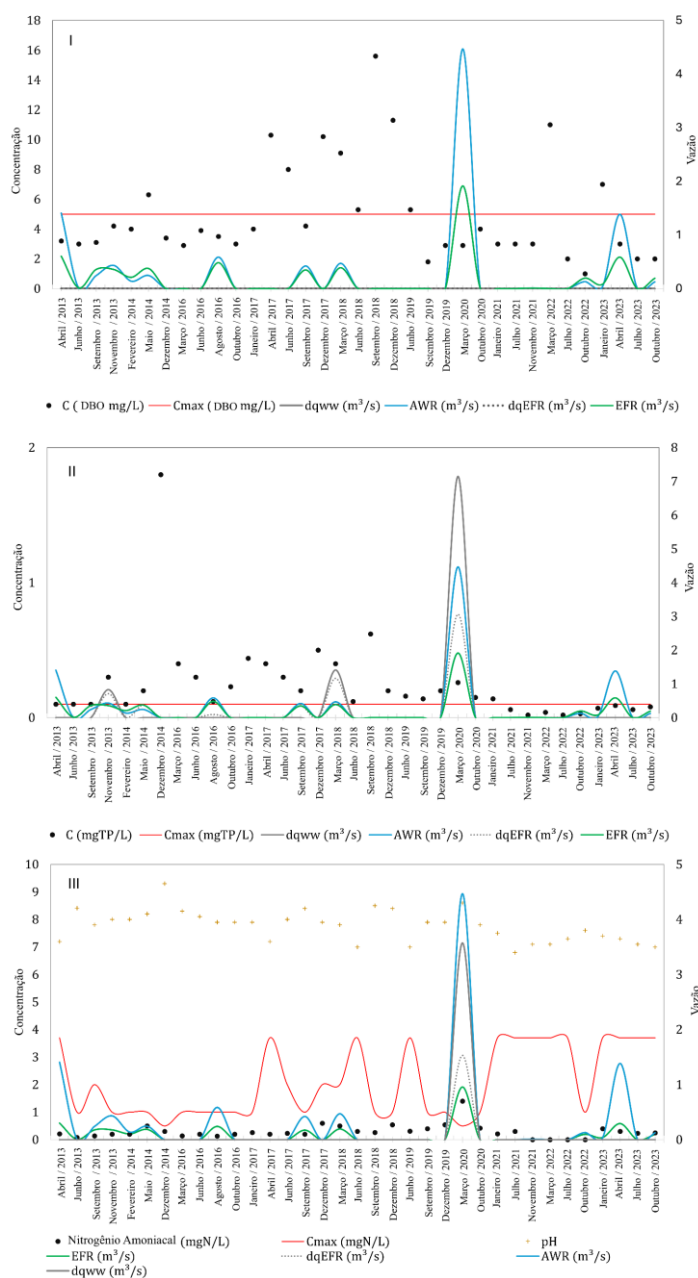
Fonte: elaborada pela autora

A estatística descritiva da série de dados qualitativos está apresentada na Tabela 7. A determinação das demandas induzidas pela qualidade da água na série histórica de monitoramento está apresentada na Figura 26. A linha vermelha indica a concentração máxima recomendada pela legislação nacional, enquanto as demais correspondem à vazão do rio, à vazão ecológica e às demandas correspondentes às questões de qualidade da água. Os pontos na Figura 27 correspondem aos valores de concentração de poluentes.

Tabela 7 – Estatística descritiva das variáveis de qualidade da água

	DBO (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Nitrogênio amoniacoal (mg N/L)
Média	4,93	0,24	0,29
Mediana	3,50	0,15	0,23
Desvio padrão	3,35	0,31	0,25
Mínimo	1,0	0,02	0
Máximo	15,60	1,80	1,40
Quantidade de dados			35

Figura 27 – Qualidade da água e demanda adicional induzida pela qualidade da água



Fonte: elaborada pela autora

## 5.4. Discussão

Primeiramente, cabe destacar as semelhanças e diferenças entre as equações propostas e as existentes. Quanto à organização das equações propostas, o presente trabalho se alinha à estrutura descrita por Li et al. (2024). No entanto, apresenta como diferença a introdução de uma demanda qualitativa correspondente aos usos não consuntivos diretamente poluentes. Além disso, os valores da demanda adicional correspondente aos usos consuntivos são determinados sobre a vazão do rio e não sobre as retiradas. Nesse caso, a determinação de

$dq_{wwi,j}$  se assemelha à proposição de Vliet et al. (2017).

Adicionalmente, a dessalinização e a contribuição de águas residuárias propostas como fontes de disponibilidade hídrica, na adaptação realizada por Vliet et al. (2021), foram generalizadas como recursos hídricos não convencionais (UWR) somados à disponibilidade hídrica, enquanto o impacto qualitativo dessas descargas nos rios foi representado sobre os valores de  $dq_{di,j}$ .

Quanto às aplicações realizadas, observa-se que durante o período em que há registros de monitoramento da qualidade da água na seção do rio, o não vertimento dos reservatórios está associado a uma fase sequencial de anos secos, seguidos do início de recuperação da seca hidrológica na região (Seigerman et al., 2024). A elevada variabilidade de vazões, inclusive a existência de vazões muito próximas a zero é esperada nesta região (Güntner; Bronstert, 2004). Isso favorece a cenários frequentes de escassez evidenciados por aspectos quantitativos.

Na série histórica qualitativa avaliada, os resultados revelaram que cerca de 31% dos valores de DBO estiveram acima do limite recomendado pela legislação. Destaca-se ainda que o padrão nacional é semelhante aos limites globais considerados para rios não poluídos (Wen et al., 2017). No entanto, os resultados não reportaram demandas adicionais de qualidade da água para essa variável. Isso ocorreu porque quando as concentrações ultrapassaram os valores máximos, a vazão do manancial era igual ou muito próxima a zero.

Nesses casos, a indisponibilidade hídrica gera limitações ao uso da água e seria sinalizada pelo aspecto quantitativo. Em termos de processos físico-químicos no manancial, nesse período, as elevadas concentrações são esperadas em virtude do acúmulo de matéria orgânica oriundo da decomposição de serrapilheira no leito do rio e de contribuições orgânicas da bacia hidrográfica, além da influência ocasionada pela redução da velocidade da água e pela morfologia do canal do rio (Datry et al., 2018).

Para fósforo total, 60% dos valores estiveram acima do limite recomendado, o que gerou três demandas significativas correspondentes às questões de qualidade da água, em períodos com vazão acima de  $1\text{m}^3/\text{s}$ . Observou-se ainda um outlier nas concentrações de fósforo, que não foi detectado como demanda adicional, pela mesma causa do que ocorre nas menores vazões e explicado anteriormente para a DBO.

A baixa sensibilidade de detecção da redução da qualidade da água por processos biogeoquímicos nas condições de leito seco, por razão da sazonalidade, torna-se um diferencial do método em comparação a outros índices de qualidade da água, que não consideram as

questões quantitativas. Segundo Uddin et al. (2024), os outliers nas séries de dados podem gerar impactos moderados a significativos nas classificações dos índices de qualidade da água. Para nitrogênio amoniacal, apenas uma das concentrações monitoradas não atendeu ao critério da legislação, gerando uma demanda sob o aspecto qualitativo da água associada ao valor de maior vazão do período monitorado.

Destaca-se que o lançamento de águas residuárias e a existência de outros usos da água não consuntivos, poderiam gerar ainda maiores quantificações de demandas adicionais, o que pode ser investigado em estudo futuro, a partir da aplicação das equações. Além disso, não se deve desconsiderar os processos reacionais de autodepuração desses poluentes nos rios. Dados de monitoramento a jusante do lançamento de  $dq_{ww_{i,j}}$ , no local mais próximo de captação ou lançamento de carga poluidora podem sinalizar a magnitude do impacto do lançamento e o decaimento da concentração de poluentes entre no trecho avaliado. Alguns contaminantes possuem efeito mais imediato no local de lançamento da água residuária, enquanto outros como àqueles relacionados às atividades de degradação e reações com nitrogênio podem ser mais intensas após mais de 2km do local de lançamento (Peterse et al., 2024).

## 5.5 Conclusão

A adoção de aspectos qualitativos sobre o entendimento da escassez hídrica amplia as discussões entre disponibilidade hídrica e os impactos da poluição. A determinação da demanda adicional induzida pela qualidade, baseada em usos consuntivos, não consuntivos direta e indiretamente poluentes e a vazão ecológica possibilita organizar os estudos sobre escassez e qualidade da água sob uma análise mais genérica a ser detalhada caso a caso, o que possibilita ampla utilização do índice de escassez induzida pela qualidade.

Estudos futuros podem realizar aplicações em maior escala para sinalizar a magnitude dos aspectos qualitativos sobre rios e reservatórios, ainda que com uma perspectiva baseada em volumes teóricos, tendo em vista que não se pretende propor a determinação de um volume real a ser adicionado ao manancial, mas estimular medidas preventivas à poluição das águas.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS E ESTUDOS FUTUROS

A presente tese avançou em três questões principais: *(i)* a relação entre precipitação, uso e ocupação do solo e densidade de reservatórios por área sobre a concentração de nutrientes em rios do semiárido brasileiro, na escala de bacia hidrográfica; *(ii)* a relação entre armazenamento e água liberada e as questões qualitativas e quantitativas na gestão participativa da água; e a *(iii)* proposição de uma variável que considere as condições de qualidade da água sob a condição de disponibilidade hídrica. As contribuições acadêmicas elaboradas representam achados importantes para a gestão hídrica quali-quantitativa.

Com relação ao primeiro objetivo específico, em bacias com predominância de áreas agrícolas, menor densidade de reservatórios por área e maior precipitação mensal acumulada, o aumento das chuvas se associa ao aumento das concentrações de nutrientes em rios intermitentes do semiárido brasileiro. Enquanto em bacias hidrográficas com menor quantidade de reservatórios e maior quantidade de despejos pontuais de águas residuárias oriundas de áreas urbanas, o aumento das precipitações mensais se relaciona à redução das concentrações de poluentes.

No entanto, quando há grande concentração urbana, a influência da precipitação se torna secundária. Nesses casos, o impacto contínuo dos lançamentos de efluentes, evidenciado no período seco, que poderia passar por diluição no período chuvoso, é contrabalanceado pelo transporte de poluentes durante o escoamento superficial, além da ressuspensão de sedimentos e matéria orgânica acumulados.

Em resumo, as concentrações de nitrogênio inorgânico em rios do semiárido responderam mais rapidamente ao escoamento superficial do que as de fósforo. Essa relação é ampliada em bacias com maior conectividade hidrológica, considerando uma menor quantidade de reservatórios. A variabilidade das concentrações de fósforo total foi explicada majoritariamente pela cobertura do sistema de esgotamento sanitário e pela precipitação média mensal. Enquanto para o nitrogênio total, o principal fator de influência foi a área urbana, mas ainda em um percentual pouco representativo, nesse último caso.

Em sugestões mais direcionadas, com base nos achados da pesquisa, estão o aumento das zonas naturais de controle de erosão e proteção das margens nos mananciais, especialmente nas bacias mais sensíveis ao aumento de nutrientes pela precipitação. Além disso, a ampliação da quantidade de locais de monitoramento fluvial mais próximos às áreas agrícolas pode aumentar o poder de comparação das escalas urbanas e agrícolas do ponto de vista das contribuições para a poluição dos mananciais.

Ao revelar que, na região de estudo, as áreas urbanas estão relacionadas ao maior transporte de nutrientes para os rios, a presente tese também discute com outros trabalhos da literatura, especialmente no segundo capítulo, as potencialidades para estudos investigarem a influência de áreas permeáveis nas cidades sobre a redução da concentração de poluentes nos mananciais. Essa abordagem pode ser realizada em trabalhos futuros, assim como a investigação do quanto os lançamentos pontuais de água residuária com baixos índices de eficiência de tratamento contribuem para a problemática da eutrofização em rios e reservatórios nessa região. Do ponto de vista científico, as pesquisas futuras sugeridas podem também ser direcionadas à compreensão de soluções baseadas na natureza e estratégias para mitigação da poluição e remediação da qualidade da água dos mananciais, assuntos que têm ganhado espaço para resiliência hídrica das cidades, tanto do ponto de vista da gestão como da pesquisa.

No terceiro capítulo, dedicado ao segundo e terceiro objetivos específicos, a relação entre volume armazenado no reservatório e liberações de água foi analisada para um sistema de alocação negociada em um conjunto amostral de bacias hidrográficas. Os resultados revelaram que a modelagem hidrológica deve considerar padrões de liberação de água dependentes de questões sociais e instrumentos de gestão. Isso implica em possíveis limitações para aplicação de modelos onde o volume armazenado é um fator fortemente decisivo sobre a quantidade de água a ser liberada, como por exemplo, em processos baseados em tabelas de decisão de liberação de água.

Nesse sentido, as liberações rápidas são usadas como estratégia para atender demandas de zonas mais afastadas, em determinados períodos e para o atendimento de demandas prioritárias em sistemas de transferência de água entre reservatórios. No entanto, esses eventos operacionais também foram identificados em resposta às pressões de atividades socioeconômicas e conflitos. Interrupções de liberação de água passaram a ser frequentes quando o nível do reservatório esteve entre 10 e 20%, mas também ocorreram em situações confortáveis de armazenamento. Esses resultados esclareceram a relação não monotônica entre armazenamento e liberação de água em reservatórios do semiárido brasileiro, sob gestão participativa da água. Os resultados também revelaram que, apesar de estarem sob o mesmo contexto de sistema de gestão, na mesma condição climática geral e apresentarem eventos de liberação de água semelhantes, os reservatórios possuem particularidades quanto à dinâmica operacional de atendimento de demandas, que estão relacionadas aos usos da água, às demandas de montante e jusante da bacia hidráulica e aos sistemas de transferência de água.

Outra questão relevante desenvolvida durante essa pesquisa foi a utilização adaptada do modelo DPSIR para compreender fatores de causa, consequência e resposta da

gestão hídrica, sob abordagem quali-quantitativa. A sistematização DPSIR permitiu identificar no histórico de registros de atas de reunião dos órgãos colegiados de gestão hídrica participativa a predominância de respostas reativas, emergenciais e quantitativas. Essa avaliação também permitiu caracterizar a metodologia de gestão hídrica da área de estudo como socialmente resiliente, mas ecologicamente vulnerável, pela baixa implementação de critérios de controle de qualidade da água inseridos nos critérios de decisão sobre a alocação das águas.

Os resultados revelaram ainda que a percepção sobre a escassez da água pode ser tardia em regiões com elevada quantidade de reservatórios, em virtude da expectativa sobre as transferências de água, o que pode adiar a realização de respostas estruturais ou de mudanças sobre modelos de gestão consolidados temporalmente.

Quanto ao quarto e ao quinto objetivos específicos, um equacionamento baseado na pegada hídrica cinza foi elaborado e pode ser aplicado em estudos futuros para investigar a influência de variáveis de qualidade da água sobre os processos decisórios de alocação negociada da água. Esse conceito também foi sistematizado para aplicação em usos consuntivos e não consuntivos, o que pode auxiliar tanto na gestão da água como em pesquisas futuras.

Por fim, abordagens quali-quantitativas são importantes para que a gestão dos recursos hídricos avance e a segurança hídrica seja mantida, considerando os seus múltiplos elementos, conservando a qualidade da água e o equilíbrio ecossistêmico. Os dados de monitoramento são ferramentas fundamentais para que as interações antrópicas na bacia hidrográfica sejam compreendidas. Esse fato merece atenção e expansão de abrangência espacial e do conjunto de variáveis amostrais para a continuidade de um aprofundamento mais detalhado acerca dos elementos que geram poluição, principalmente nos países da América Latina. Os resultados dessa pesquisa, além de estabelecer pontos de partida para futuros estudos, também produziram premissas importantes para a gestão dos recursos hídricos, especialmente em terras áridas e semiáridas, sob sistemas participativos de governança.

## REFERÊNCIAS

ABBASI, Tasneem; ABBASI, S.A.. Why Water-Quality Indices. **Water Quality Indices**, [S.L.], p. 3-7, 2012. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-444-54304-2.00001-4>.

AFEDOR, Daniel; AMANKWAH, Emmanuel; TAKASE, Mohammed. Application of DPSIR model to ascertain driving forces and their impacts on the Volta basin. **Heliyon**, [S.L.], v. 10, n. 19, out. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38734>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Balço hídrico quali-quantitativo**. In: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: < <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/33722737-dc4a-466f-a2f4-d4e16642acc>> Acesso em: 10 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Manual metodológico versão 1.0. Índice de Segurança Hídrica**. [Online]. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: [https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia\\_ISH.pdf](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia_ISH.pdf). Acesso em: 29 nov. 2025

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de Avaliação do Resultado Regulatório – Qualiágua**. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/governanca-regulatoria/monitoramento-e-avaliacao-de-resultado-regulatorio/ARR\\_QualiAgua\\_Final.pdf](https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/governanca-regulatoria/monitoramento-e-avaliacao-de-resultado-regulatorio/ARR_QualiAgua_Final.pdf) Acesso em: 25 nov. 2025

AHIABLAME, Laurent M.; ENGEL, Bernard A.; CHAUBEY, Indrajeet. Effectiveness of Low Impact Development Practices: literature review and suggestions for future research. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 223, n. 7, p. 4253-4273, 8 jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>.

ALBERTO, Wunderlin Daniel; PILAR, Díaz María del; VALERIA, Amé María; FABIANA, Pesce Silvia; CECILIA, Hued Andrea; ÁNGELES, Bistoni María de Los. Pattern Recognition Techniques for the Evaluation of Spatial and Temporal Variations in Water Quality. A Case Study. **Water Research**, [S.L.], v. 35, n. 12, p. 2881-2894, ago. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00592-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00592-3).

ALBIERO, Daniel; SILVA, Marco Domingues da; MELO, Rafaela; GARCIA, Angel Pontin; PRACIANO, Aline Castro; FERNANDES, Francisco Belem; MONTEIRO, Leonardo de Almeida; CHIODEROLI, Carlos; SILVA, Alexsandro Oliveira da; BARBOSA FILHO, José Delfino. Economic Feasibility of Underwater Adduction of Rivers for Metropolises in Semiarid Coastal Environments: case studies. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 215, 16 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10020215>.

ALVALÁ, Regina C. S.; CUNHA, Ana Paula M.A.; BRITO, Sheila S.B.; SELUCHI, Marcelo E.; MARENGO, José A.; MORAES, Osvaldo L.L.; CARVALHO, Magog A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 91, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>.

ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 711-728, 1 dez. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ÁLVAREZ, B. L.; RAMOS LEAL, J. A.; SANTACRUZ, G.; MORÁN RAMÍREZ, J.; CARRANCO LOZADA, S. E.; NOYOLA MEDRANO, M. C.; PINEDA MARTÍNEZ, L. F. Water proverty index assessment in semi-arid regions: the case of San Luis Potosí Valley (Mexico). **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, Cidade do México, v. 29, n. 4. FapUNIFESP (SciELO).

ANAND, Jatin; GOSAIN, Ashvani Kumar; KHOSA, Rakesh. Optimisation of Multipurpose Reservoir Operation by Coupling Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Genetic Algorithm for Optimal Operating Policy (Case Study: ganga river basin). **Sustainability**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 1660, 21 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su10051660>.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, 20th ed. Washington, D.C. 1998.

AQUINO, Sandra Helena Silva de. **Entre escassez, prioridades e negociações: a Cogeh e os trajetos e destinos das águas que vêm do Sertão para a Metrópole**. 2019. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Sociologia, Universidade Federal do Ceará. 2019. 269p.

AQUINO, Sandra Helena Silva de; SOUZA FILHO, Francisco de Assis Souza; SALES, Clara de Assis Jerônimo. **A Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará – Cogeh e a Alocação Negociada de Água**. In: BARREIRA, C., SOUZA FILHO, F.A., BARREIRA, I.A.F., AQUINO, S.H. (Eds.). *Economia Política das Águas no Ceará (alocação, conflitos, participação)*. Pontes, 2024. pp. 203–234.

ARAÚJO, J.C.; PIEDRA, J.I.G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 23, p. 1169-1178, 14 jan. 2009. Universidade Federal de Pernambuco. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7232>.

ARAÚJO, José Carlos de; MAMEDE, George Leite; LIMA, Berthyer Peixoto de. Hydrological Guidelines for Reservoir Operation to Enhance Water Governance: application to the brazilian semiarid region. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1628, 12 nov. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10111628>.

ARNOLD, Jeffrey G.; BIEGER, Katrin; WHITE, Michael J.; SRINIVASAN, Raghavan; DUNBAR, John A.; ALLEN, Peter M.. Use of Decision Tables to Simulate Management in SWAT+. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 713, 31 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10060713>.

ASESH, Aishwarya. Normalization and Bias in Time Series Data. **Lecture Notes in Networks and Systems**, [S.L.], p. 88-97, 2022. Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-11432-8\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-11432-8_8).

BARREIRA, C., SOUZA FILHO, F.A., BARREIRA, I.A.F., AQUINO, S.H. (EDS.), **Economia Política das Águas no Ceará (alocação, conflitos, participação)**. Pontes, pp. 181–202. 2024.

BARROS, Mário U.G.; WILSON, Alan E.; LEITÃO, João I.R.; PEREIRA, Silvano P.; BULEY, Riley P.; FERNANDEZ-FIGUEROA, Edna G.; CAPELO-NETO, José. Environmental factors associated with toxic cyanobacterial blooms across 20 drinking water reservoirs in a semi-arid region of Brazil. **Harmful Algae**, [S.L.], v. 86, p. 128-137, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2019.05.006>.

BOWES, M.J.; GOZZARD, E.; JOHNSON, A.C.; SCARLETT, P.M.; ROBERTS, C.; READ, D.S.; ARMSTRONG, L.K.; HARMAN, S.A.; WICKHAM, H.D. Spatial and temporal changes in chlorophyll-a concentrations in the River Thames basin, UK: are phosphorus concentrations beginning to limit phytoplankton biomass? **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 426, p. 45-55, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.056>.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Resolução nº 643, de 27 de junho de 2016. **Altera o Programa de Estímulo à Divulgação de Dados de Qualidade de Água – QUALIÁGUA e dá outras providências**. Diário Oficial da União: *seção 1*, Brasília, DF, n. 124, p. 81, 30 jun. 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Resolução nº 207, de 2 de setembro de 2024. **Estabelece que os procedimentos de coleta e preservação de amostras ambientais a serem empregados na operação da RNQA deverão atender ao disposto na última edição do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras de Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos, altera dispositivos da Resolução nº 903, de 22 de julho de 2013, e revoga a Resolução nº 724, de 3 de outubro de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 set. 2024. Seção 1, p. 70.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Resolução nº 643, de 27 de junho de 2016. **Altera o Programa de Estímulo à Divulgação de Dados de Qualidade de Água – QUALIÁGUA e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, n. 124, p. 81, 30 jun. 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Resolução nº 903, de 22 de julho de 2013. **Cria a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais – RNQA e estabelece diretrizes**. Diário Oficial da União: seção 1, n. 150, p. 69, 06 ago.2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, 18 mar. 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos, regulamenta o item 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**. Diário Oficial da União. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm).

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Informe anual Conjuntura Brasil 2024**. Brasília: ANA, 2024.

BRASIL. **Reservatórios da Região Semiárida Brasileira: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). 2017 Disponível em: <https://interior.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/cc25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53>. Acesso em 12 Dez. 2024

BRASIL. Resolução nº 724, de 3 de outubro de 2011. **Estabelece procedimentos padronizados para a coleta e preservação de amostras de água superficial para fins de monitoramento da qualidade dos recursos hídricos, no âmbito do Programa Nacional de**

**Avaliação da Qualidade da Água (PNQA).** <https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2011/724-2011.pdf>

BRITO, Pedro Lucas Cosmo de; AZEVEDO, José Paulo Soares de. Charging for Water Use in Brazil: state of the art and challenges. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 1213-1229, 29 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-020-02501-y>.

BURKHARD, B.; MÜLLER, F.. Driver–Pressure–State–Impact–Response. **Encyclopedia of Ecology**, [S.L.], p. 967-970, 2008. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00129-4>.

CAMPOS, J.N.B.; SOUZA FILHO, F.A.; LIMA, H.V.C.. Risks and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão reservoir in semi-arid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 59, n. 6, p. 1184-1195, 3 jun. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.836277>.

CAMPOS, José Nilson B. Paradigms and Public Policies on Drought in Northeast Brazil: a historical perspective. **Environmental Management**, [S.L.], v. 55, n. 5, p. 1052-1063, 21 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-015-0444-x>.

CAMPOS, José Nilson B.; STUDART, Ticiana M. C.. Water Management and Allocation in Semiarid Areas of Brazil. **Water International**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 31-36, mar. 2006. <http://dx.doi.org/10.1080/02508060608691912>.

CAMPOS, José Nilson B.; STUDART, Ticiana Marinho de Carvalho. Drought and water policies in Northeast Brazil: backgrounds and rationale. **Water Policy**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 425-438, 1 out. 2008. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wp.2008.058>.

CANSINO-LOEZA, Brenda; MUNGUÍA-LÓPEZ, Aurora del Carmen; PONCE-ORTEGA, José María. A water-energy-food security nexus framework based on optimal resource allocation. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 133, p. 1-16, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.006>.

CARVALHO, Taís Maria Nunes; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; BRITO, Mariana Madruga de. Unveiling water allocation dynamics: a text analysis of 25 years of stakeholder meetings. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 044066, 1 abr. 2024. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ad37cd>.

CAVALCANTE, Herika; CRUZ, Patrícia Silva; VIANA, Leandro Gomes; SILVA, Daniely de Lucena; BARBOSA, José Etham de Lucena. Influence of the use and the land cover of the catchment in the water quality of the semiarid tropical reservoirs. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, [S.L.], v. 7, n. 7, p. 389-398, 14 fev. 2018. Universidade Federal de Pernambuco. <http://dx.doi.org/10.29150/jhrs.v7.7.p389-398>.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Plano estratégico dos recursos hídricos do Ceará**. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESP, 2009. 408 p.

CEARÁ. Lei Estadual nº 14.844 de 28 de dezembro de 2010. **Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH, e dá outras providências.** Diário Oficial do Estado, série 3, nº 245.

CEARÁ. **Relatório de perenização dos rios: 2º semestre de 2025.** Diretoria de operações. Governo do Estado do Ceará, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, 2025. 54p.

CEARÁ. Resolução CONERH nº 3, 25 de junho de 2020. **Dispõe sobre a classificação quanto ao nível de armazenamento de água nas bacias hidrográficas, sistemas hídricos integrados e reservatórios públicos no Estado do Ceará.** Diário Oficial do Estado, série 3, nº 138.

CEARÁ. Resolução CONERH nº 07/2007, de 20 de novembro de 2007. **Dispõe sobre os comitês de gestão dos sistemas hídricos. Conselho Estadual de Recursos Hídricos (Conerh).** Diário Oficial do Estado, série 2, n. 233. 2007.

CERQUEIRA, Thais Carvalho; MENDONÇA, Roberto Lemos; GOMES, Ronaldo Lima; JESUS, Raildo Mota de; SILVA, Daniela Mariano Lopes da. Effects of urbanization on water quality in a watershed in northeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 192, n. 1, p. 1-2, 23 dez. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-8020-0>.

CHANG, I-Cheng. A case study for identifying the potential challenges of water resources in the Yilan area of Taiwan: using an adaptive water footprint approach. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 27, n. 11, p. 12725-12745, 1 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-07656-0>.

CHATTOPADHYAY, Soumyadip; DE, Indranil; MISHRA, Prabhat; PAREY, Akhilesh; DUTTA, Subhasish. Participatory water institutions and sustainable irrigation management: evidence and lessons from west bengal, india. **Water Policy**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 667-684, 1 abr. 2022. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wp.2022.306>.

CHEN, L. D.; FU, B.; XU, J. Y.; GONG, J. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on Source-Sink ecological processes. **Acta Ecologica Sinica**, [S.L.], v. 23. 2013. 2406-2413.

CHENG, Peixuan; MENG, Fansheng; WANG, Yeyao; ZHANG, Lingsong; YANG, Qi; JIANG, Mingcen. The Impacts of Land Use Patterns on Water Quality in a Trans-Boundary River Basin in Northeast China Based on Eco-Functional Regionalization. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 1872, 29 ago. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15091872>.

CHINI, Christopher M.; LOGAN, Lauren H.; STILLWELL, Ashlynn S.. Grey water footprints of U.S. thermoelectric power plants from 2010–2016. **Advances In Water Resources**, [S.L.], v. 145, p. 103733, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103733>.

CID, Daniel Antonio Camelo; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; ALVES, Rafaela da Silva; PONTES FILHO, João Dehon de Araújo; SILVA, Daniele Costa da; MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues. Drought in play: a grounded socio-hydrological tool to increase social participation in drought plans. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 638, p. 131445, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131445>.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAMPOS, J. N. B. The Issue of Water in the Brazilian Semi-Arid Region. In: de Mattos Bicudo, C.; Galizia Tundisi, J., Cortesão Barnsley Scheuenstuhl, M. (eds) *Waters of Brazil*. 2016. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3_5)

COLOMBO, P.; RIBEIRO NETO, G.G.; COSTA, A.C.; MAMEDE, G.L.; VAN OEL, P.R.. Modeling the influence of small reservoirs on hydrological drought propagation in space and time. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 629, p. 130640, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130640>.

COSTA, Alexandre C.; ESTACIO, Alyson B. S.; SOUZA FILHO, Francisco de A. de; LIMA NETO, Iran E. Monthly and seasonal streamflow forecasting of large dryland catchments in Brazil. **Journal of Arid Land**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 205-223, mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40333-021-0097-y>.

COSTA, Alexandre Cunha; FOERSTER, Saskia; ARAÚJO, José Carlos de; BRONSTERT, Axel. Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in north-eastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 27, n. 7, p. 1046-1060, 27 mar. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9243>.

COSTA, Alexandre; COSTA, Anatarino Torres da; CARNEIRO NETO, Jose Alves; CLAUDINO-SALES, Vanda; MORAIS, Joao Silvio Dantas de. Expedição científica ao alto curso do Rio Jaguaribe, Estado do Ceará: identificação da exata nascente do possivelmente maior rio efêmero do mundo. **Caderno de Geografia**, [S.L.], v. 30, n. 63, p. 956, 14 out. 2020. Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2020v30n63p956>.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares; GONÇALVES, Amanda de Azevedo; ARAGÃO, Ricardo de; AMORIM, Julio Roberto Araujo de; MOTA, Paulo Vinicius Melo da; SRINIVASAN, Vajapeyan S.; GARCIA, Carlos Alexandre Borges; FIGUEIREDO, Eduardo Eneas de. Spatial and seasonal variability of the water quality characteristics of a river in Northeast Brazil. **Environmental Earth Sciences**, [S.L.], v. 78, n. 3, 23 jan. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-019-8087-5>.

CUNHA, Giulliana Karine Gabriel; CUNHA, Karina Patrícia Vieira da. Effects of land use changes on the potential for soil to contribute phosphorus loads in watersheds. **Environmental Development**, [S.L.], v. 45, p. 100825, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100825>.

DALCIN, Ana Paula; BRÊDA, João Paulo Lyra Fialho; MARQUES, Guilherme Fernandes; TILMANT, Amaury; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de; KUBOTA, Paulo Yoshio. The Role of Reservoir Reoperation to Mitigate Climate Change Impacts on Hydropower and Environmental Water Demands. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 149, n. 4, p. 1, abr. 2023. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-5810>.

DARWICHE-CRIADO, Nadia; JIMÉNEZ, Juan José; COMÍN, Francisco A.; SORANDO, Ricardo; SÁNCHEZ-PÉREZ, José Miguel. Identifying spatial and seasonal patterns of river water quality in a semiarid irrigated agricultural Mediterranean basin. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 22, n. 23, p. 18626-18636, 1 out. 2015. Springer

Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5484-5>.

DASH, Sonam Sandeep; SAHOO, Bhabagrahi; RAGHUWANSHI, Narendra Singh. An adaptive multi-objective reservoir operation scheme for improved supply-demand management. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 615, p. 128718, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128718>.

DATRY, T.; FOULQUIER, A.; CORTI, R.; VON SCHILLER, D.; TOCKNER, K.; MENDOZA-LERA, C.; CLÉMENT, J. C.; GESSNER, M. O.; MOLEÓN, M.; STUBBINGTON, R.. A global analysis of terrestrial plant litter dynamics in non-perennial waterways. **Nature Geoscience**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 497-503, 21 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-018-0134-4>.

DAVIDSEN, Claus; LIU, Suxia; MO, Xingguo; HOLM, Peter E.; TRAPP, Stefan; ROSBJERG, Dan; BAUER-GOTTWEIN, Peter. Hydroeconomic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 529, p. 1679-1689, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.018>.

ECHANIZ, Santiago Andrés; VIGNATTI, Alicia María. Limnology of shallow lakes of the semi-arid Central Pampa of Argentina. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [S.L.], v. 31, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s2179-975x4817>.

ERIYAGAMA, Nishadi; SMAKHTIN, Vladimir; UDAMULLA, Lakshika. Sustainable Surface Water Storage Development Pathways and Acceptable Limits for River Basins. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 645, 28 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13050645>.

ESTÁCIO, Ályson Brayner Sousa; ROCHA, Maria Aparecida Melo; OLIVEIRA, Marcílio Caetano de; SILVA, Samiria Maria Oliveira da; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. Priority of Water Allocation during Drought Periods: the case of jaguaribe metropolitan inter-basin water transfer in semiarid brazil. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 6876, 4 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su14116876>.

FAROKHI, Saeid; NAJARCHI, Mohsen; MAZAHERI, Hosein; SHABANLOU, Saeid. Dynamic coupling of qualitative–quantitative models for operation of water resources based on environmental criteria. **Applied Water Science**, [S.L.], v. 15, n. 2, 9 jan. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-024-02356-3>.

FENG, Danyang; ZHAO, Guishen. Footprint assessments on organic farming to improve ecological safety in the water source areas of the South-to-North Water Diversion project. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 254, p. 120130, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120130>.

FERREIRA, Kássia Crislayne Duarte; LOPES, Fernando Bezerra; ANDRADE, Eunice Maia de; MEIRELES, Ana Célia Maia; SILVA, Gerlange Soares da. Adapting the National Sanitation Foundation water quality index to the Brazilian semiarid. **Revista Ciência Agrônômica**, [S.L.], v. 46, n. 2, nov. 2015. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20150007>.

FRANÇA, Josefa Marciana Barbosa de; SILVA, Samíria Maria Oliveira da; MONTEIRO, Cláudio Maurício Gesteira; PAULINO, Walt Disney; CAPELO NETO, José. Qualidade da

água em um sistema de reservatórios em cascata – um estudo de caso no semiárido brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 113-123, fev. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220200328>.

FREIRE, Letícia L.; COSTA, Alexandre C.; LIMA NETO, Iran E.. Effects of rainfall and land use on nutrient responses in rivers in the Brazilian semiarid region. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 195, n. 6, p. 1, 9 maio 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-023-11281-y>.

FREIRE, Letícia Lacerda. **Variação sazonal e interanual da qualidade das águas de rios do semiárido brasileiro**. 2020. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

FREIRE, Letícia Lacerda; COSTA, Alexandre Cunha; LIMA NETO, Iran Eduardo. Spatio-temporal Patterns of River Water Quality in the Semiarid Northeastern Brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 232, n. 11, 28 out. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-021-05406-7>.

FREIRE, Letícia Lacerda; COSTA, Alexandre Cunha; LIMA, Berthyer Peixoto; LEÃO, Krishna Martins; LIMA NETO, Iran Eduardo. Quantitative and qualitative aspects of managed water releases from dryland reservoirs under negotiated allocation in the Brazilian semiarid. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S.L.], v. 61, p. 102679, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102679>.

FREIRE, Letícia Lacerda; SOUZA FILHO, Francisco de Assis. Inter-relações entre preditores de eutrofização em reservatórios do semiárido brasileiro: como mensurar? uma aplicação de aprendizado de máquina por árvores de decisão. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 1155-1165, nov. 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220220099>.

FREIRE, Rogério Herlon Furtado; PAULINO, Walt Disney; ALMEIDA, Magda Maria Marinho. Monitoramento qualitativo como ferramenta de gestão dos corpos d'água superficiais do estado do Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju, SE. **Anais [...]**. Aracaju: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

FREITAS, Francisco Rafael Sousa; RIGHETTO, Antônio Marozzi; ATTAYDE, José Luiz. Cargas de Fósforo Total e Material em Suspensão em um Reservatório do Semi-Árido Brasileiro. **Oecologia Australis**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 655-665, set. 2011. Oecologia Australis. <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2011.1503.16>.

Funceme. (2016). **Funceme mapeia espelhos d'água no CE com mais detalhamento e precisão**. Assessoria de Comunicação da Funceme. Disponível em: <http://www.funceme.br/?p=1412> . Acesso em: 01 Jan. 2023.

GAIN, Animesh K; GIUPPONI, Carlo; WADA, Yoshihide. Measuring global water security towards sustainable development goals. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 124015, 1 dez. 2016. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>.

GAISER, T., KROL, M., FRISCHKORN, H., ARAÚJO, J. C. (2002). **Global change and**

**regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semiarid northeast of Brazil**, Springer, 448p.

GALVÃO, Carlos; MACHADO, Érica; KOLOKYTHA, Elpida; SKOULIKARIS, Haris. Considering Water Footprint in Reservoir Adaptation to Climate Change: an evolutionary approach. **Epic Series in Engineering**, [S.L.], v. 3, p. 739-731, 2018. EasyChair. <http://dx.doi.org/10.29007/9zkk>.

GARCÍA-ÁVILA, Fernando; ROJAS-YANZAGUANO, Marco; ROLDÁN-LATA, Angel; VALDIVIEZO-GONZALES, Lorgio; ALFARO-PAREDES, Emigdio; AVILÉS-AÑAZCO, Alex. Adaptive management strategies for the improvement of water quality and sustainability in water recharge areas. **Sustainable Futures**, [S.L.], v. 11, p. 101610, jun. 2026. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101610>.

GIULIANI, M.; LAMONTAGNE, J. R.; REED, P. M.; CASTELLETTI, A.. A State-of-the-Art Review of Optimal Reservoir Control for Managing Conflicting Demands in a Changing World. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 5, dez. 2021. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2021wr029927>.

GOMES, Maurício de Gois; MAIA, Adelená Gonçalves; MEDEIROS, Joana D'Arc Freire de. Reservoir operation rule in semiarid areas: the quantity-quality approach. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 610, p. 127944, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127944>.

GÓMEZ-LIMÓN, José A.; GUTIÉRREZ-MARTÍN, Carlos; MONTILLA-LÓPEZ, Nazaret M.. Agricultural Water Allocation under Cyclical Scarcity: the role of priority water rights. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 1835, 26 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12061835>.

GUERREIRO, Maria João Simas; ANDRADE, Eunice Maia de; ABREU, Isabel; LAJINHA, Teresa. Long-term variation of precipitation indices in Ceará State, Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, [S.L.], v. 33, n. 14, p. 2929-2939, 9 fev. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3645>.

GÜNTNER, Andreas; BRONSTERT, Axel. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 297, n. 1-4, p. 136-161, set. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.04.008>.

HAN, Qi; TAN, Guangming; FU, Xiang; MEI, Yadong; YANG, Zhenyu. Water Resource Optimal Allocation Based on Multi-Agent Game Theory of HanJiang River Basin. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 9, p. 1184, 4 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10091184>.

HE, Wenjie; XU, Yin; ZHANG, Jian; ZHU, Jiadong; DONG, Hao; ZHONG, Feng; LI, Haibo. Characteristics analysis of water pollutants in Cihu Lake, China, based on a multivariate statistical analysis method. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 195, n. 1, 25 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-022-10762-w>.

HEUVEL, Edwin van Den; ZHAN, Zhuozhao. Myths About Linear and Monotonic Associations: pearson's  $r$ , spearman's  $\rho$ , and kendall's  $\tau$ . **The American Statistician**, [S.L.], v. 76, n. 1, p. 44-52, 2 jan. 2022. Informa UK Limited.

<http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2021.2004922>.

HOBBIE, Sarah E.; FINLAY, Jacques C.; JANKE, Benjamin D.; NIDZGORSKI, Daniel A.; MILLET, Dylan B.; BAKER, Lawrence A. Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S.L.], v. 114, n. 16, p. 4177-4182, 3 abr. 2017. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1618536114>.

HOEKSTRA, A. Y. (Ed.). Virtual water trade: proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft: UNESCO-IHE, 2003. (Value of Water Research Report Series, n. 12). Disponível em: <https://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2026.

HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEN, M.M. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard (Earthscan, London). 2011.

HOEKSTRA, Arjen Y.; MEKONNEN, Mesfin M.. The water footprint of humanity. **Proceedings of The National Academy of Sciences**, [S.L.], v. 109, n. 9, p. 3232-3237, 13 fev. 2012. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1109936109>.

HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K. **The Water Footprints of Nations. In: Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources**. Blackwell, Oxford, UK, 2008. p. 51-65. <https://doi.org/10.1002/9780470696224.ch5>

HUANG, Zhilin; HAN, Liyang; ZENG, Lixiong; XIAO, Wenfa; TIAN, Yaowu. Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the three gorges reservoir area, China. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 3943-3955, 17 dez. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5874-8>.

Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. (IBGE). Cidades e Estados: Ceará. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html> . Acesso em: 23. Jan. 2023.

Ji, Li; LI, Yuan; ZHANG, Guixiang; BI, Yonghong. Anthropogenic Disturbances Have Contributed to Degradation of River Water Quality in Arid Areas. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 22, p. 3305, 22 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w13223305>.

JIANG, Mengzhen; CHEN, Haiying; CHEN, Qinghui. A method to analyze “source–sink” structure of non-point source pollution based on remote sensing technology. **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 182, p. 135-140, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2013.07.006>.

JONES, Edward R; GRAHAM, Duncan J; VAN GRIENSVEN, Ann; FLÖRKE, Martina; VAN VLIET, Michelle T H. Blind spots in global water quality monitoring. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 19, n. 9, p. 091001, 12 ago. 2024. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ad6919>.

JORDAN, Sarah; QUINN, Julianne; ZANIOLO, Marta; GIULIANI, Matteo; CASTELLETTI, Andrea. Advancing reservoir operations modelling in SWAT to reduce socio-ecological tradeoffs. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 157, p. 105527, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105527>.

JULIAN, Jason P.; BEURS, Kirsten M. de; OWSLEY, Braden; DAVIES-COLLEY, Robert J.; AUSSEIL, Anne-Gaelle E. River water quality changes in New Zealand over 26 years: response to land use intensity. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 1149-1171, 23 fev. 2017. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-21-1149-2017>.

KAN, Daxue; HUANG, Weichiao. An Empirical Study of the Impact of Urbanization on Industry Water Footprint in China. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 2263, 13 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12062263>.

KAPETAS, Leon; KAZAKIS, Nerantzis; VOUDOURIS, Konstantinos; MCNICHOLL, Duncan. Water allocation and governance in multi-stakeholder environments: insight from Axios Delta, Greece. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 695, p. 133831, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133831>.

KASAHARA, Yuri; SOBRAL, Maria do Carmo; MELO, Maiara Gabrielle de Souza. The Local Dimension in Water Resources Governance: the experience of inter-municipal consortia and committees on river basins. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 55, n. 3, p. 282-297, 8 set. 2020. <http://dx.doi.org/10.5327/z2176-947820200711>.

KELLNER, Elke. The controversial debate on the role of water reservoirs in reducing water scarcity. **Wires Water**, [S.L.], v. 8, n. 3, 16 fev. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1514>.

KROEZE, Carolien; GABBERT, Silke; HOFSTRA, Nynke; A KOELMANS, Albert; LI, Ang; LÖHR, Ansje; LUDWIG, Fulco; STROKAL, Maryna; VERBURG, Charlotte; VERMEULEN, Lucie. Global modelling of surface water quality: a multi-pollutant approach. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [S.L.], v. 23, p. 35-45, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.014>.

KUMAR, Manish; GIKAS, Petros; KURODA, Keisuke; VITHANAGE, Meththika. Tackling water security: a global need of cross-cutting approaches. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 306, p. 114447, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114447>.

LACERDA, Luiz D.; SANTOS, Janaína A.; MARINS, Rozane V.; SILVA, Francisco A.T.F. da. Limnology of the largest multi-use artificial reservoir in NE Brazil: the Castanhão reservoir, Ceará State. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 90, n. 21, p. 2073-2096, ago. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820180085>.

LACHER, Iara L.; AHMADISHARAF, Ebrahim; FERGUS, Craig; AKRE, Thomas; MCSHEA, William J.; BENHAM, Brian L.; KLINE, Karen S.. Scale-dependent impacts of urban and agricultural land use on nutrients, sediment, and runoff. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 652, p. 611-622, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.370>.

LAURENT, Auriane; GODOY, Rodrigo Felipe Bedim; ELIAS, Mariane Cardoso; FRANCO, Gabriel; CARRIL, Andrea F.; TREVISAN, Elias; FLOMBAUM, Pedro. Extremes in water quality parameters modulated by weather and climate conditions in Ceara State, Brazil. **Ecohydrology & Hydrobiology**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 650-661, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.06.004>.

LAWRENCE, P.; MEIGH, J.; SULLIVAN, C. The Water Poverty Index: an International Comparison. **Keele Economics Research Papers**. 2002. 24p. ISSN 1352-8955

LEE, Sang-Woo; HWANG, Soon-Jin; LEE, Sae-Bom; HWANG, Ha-Sun; SUNG, Hyun-Chan. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. **Landscape and Urban Planning**, [S.L.], v. 92, n. 2, p. 80-89, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.02.008>.

LEI, Chaogui; WAGNER, Paul D.; FOHRER, Nicola. Effects of land cover, topography, and soil on stream water quality at multiple spatial and seasonal scales in a German lowland catchment. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 120, p. 106940, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106940>.

LEIJNSE, Myrthe; BIERKENS, Marc F P; GOMMANS, Kim H M; LIN, Daisy; TAIT, Alex; WANDERS, Niko. Key drivers and pressures of global water scarcity hotspots. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 054035, 23 abr. 2024. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ad3c54>.

LEMOS, Maria Carmen; OLIVEIRA, João Lúcio Farias de. Can Water Reform Survive Politics? Institutional Change and River Basin Management in Ceará, Northeast Brazil. **World Development**, [S.L.], v. 32, n. 12, p. 2121-2137, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.08.002>.

LI, Hongran; ZHAO, Binjie; WANG, Dezhi; ZHANG, Kerong; TAN, Xiang; ZHANG, Quanfa. Effect of multiple spatial scale characterization of land use on water quality. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 7106-7120, 27 ago. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-22720-7>.

LI, Meishui; YANG, Xiaohua; WANG, Kaiwen; DI, Chongli; XIANG, Weiqi; ZHANG, Jin. Exploring China's water scarcity incorporating surface water quality and multiple existing solutions. **Environmental Research**, [S.L.], v. 246, p. 118191, abr. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2024.118191>.

LI, Ning; MCGREGOR, Glenn Russell. Linking interannual river flow river variability across New Zealand to the Southern Annular Mode, 1979–2011. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 31, n. 12, p. 2261-2276, 24 abr. 2017. Wiley. <https://doi.org/10.1002/hyp.11184>

LI, Yao; ZHAO, Gang; ALLEN, George H.; GAO, Huilin. Diminishing storage returns of reservoir construction. **Nature Communications**, [S.L.], v. 14, n. 1, 13 jun. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-38843-5>.

LI, Yuyuan; JIAO, Junxia; WANG, Yi; YANG, Wen; MENG, Cen; LI, Baozhen; LI, Yong; WU, Jinshui. Characteristics of nitrogen loading and its influencing factors in several typical agricultural watersheds of subtropical China. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 1831-1840, 31 ago. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-3446-y>.

LIBEROFF, Ana L.; FLAHERTY, Silvia; HUALDE, Pablo; ASOREY, Martín I. García; FOGEL, Marilyn L.; PASCUAL, Miguel A.. Assessing land use and land cover influence on surface water quality using a parametric weighted distance function. **Limnologia**, [S.L.], v. 74, p. 28-37, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2018.10.003>.

LIM, Young-Kwon; KOVACH, Robin M.; PAWSON, Steven; VERNIERES, Guillaume. The 2015/16 El Niño Event in Context of the MERRA-2 Reanalysis: a comparison of the tropical pacific with 1982/83 and 1997/98. **Journal of Climate**, [S.L.], v. 30, n. 13, p. 4819-4842, jul. 2017. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-16-0800.1>.

LIMA, B. L. **Enquadramento de corpos d'água no Nordeste brasileiro como instrumento de gestão e sustentabilidade ambiental: o caso da bacia hidrográfica do Acarape do Meio – Ce.** Tese de doutorado submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará. 2016. 272p.

LIMA NETO, Iran E.; MEDEIROS, Pedro H.A.; COSTA, Alexandre C.; WIEGAND, Mario C.; BARROS, Antônio Ricardo M.; BARROS, Mário U.G.. Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 815, p. 152875, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152875>.

LIMA NETO, Iran Eduardo. Modelling phosphorus inputs and dynamics in a large tropical semiarid basin. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 32, n. 11, p. 7070-7084, 4 mar. 2025a. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-025-36181-1>.

LIMA NETO, Iran Eduardo. Phosphorus dynamics in water and sediments in a large multi-use reservoir under extreme volume variation. **Ecological Modelling**, [S.L.], v. 510, p. 111316, dez. 2025b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111316>.

LIMA NETO, Iran Eduardo; WIEGAND, Mário Cesar; ARAÚJO, José Carlos de. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 56, n. 2, p. 319-333, 30 mar. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2011.553616>.

LIMA, Berthyer Peixoto; MAMEDE, George Leite; LIMA NETO, Iran Eduardo. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 125-135, fev. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018167115>.

LIMA, Berthyer Peixoto; MAMEDE, George Leite; LIMA NETO, Iran Eduardo. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 125-135, fev. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018167115>.

LIN, Yu-I; PAN, Shu-Yuan; CHANG, Hui-Hsien; YU, Mei-Siang; LIN, Wei-Lung. Will extreme drought impact the reservoir water quality? A 30-year observational study. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 289, p. 108574, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108574>.

LIU, Jianfeng; ZHANG, Xiang; WU, Bi; PAN, Guoyan; XU, Jing; WU, Shaofei. Spatial scale and seasonal dependence of land use impacts on riverine water quality in the Huai River basin, China. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 24, n. 26, p. 20995-21010, 19 jul. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-9733-7>.

LIU, Jin; SHEN, Zhenyao; CHEN, Lei. Assessing how spatial variations of land use pattern

affect water quality across a typical urbanized watershed in Beijing, China. **Landscape and Urban Planning**, [S.L.], v. 176, p. 51-63, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.04.006>.

LIU, Jin; WANG, Sen; JIA, Wenhao; CHEN, Mufeng; WANG, Xiayu; YAO, Hongyi; NI, Xiaokuan. Impact of Climate Change on Reservoir Operation during the Dry Season in the Pearl River Basin. **Water**, [S.L.], v. 15, n. 21, p. 3749, 27 out. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w15213749>.

LIU, Junguo; LIU, Qingying; YANG, Hong. Assessing water scarcity by simultaneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 60, p. 434-441, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.019>.

LIU, Zhifeng; YING, Jiahe; HE, Chunyang; GUAN, Dongjie; PAN, Xinhao; DAI, Yihua; GONG, Binghua; HE, Keren; LV, Caifeng; WANG, Xin. Scarcity and quality risks for future global urban water supply. **Landscape Ecology**, [S.L.], v. 39, n. 2, 29 jan. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-024-01832-0>.

LOPERFIDO, Nicola Maria Rinaldo. Canonical Correlations and Nonlinear Dependencies. **Symmetry**, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1308, 20 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/sym13071308>.

LOPES, Olandia Ferreira; JESUS, Raildo Mota de; SOUSA, Lucas Farias de; ROCHA, Felizardo Adenilson; SILVA, Daniela Mariano Lopes da; AMORIM, Andrique Figueiredo; SILVA, Vinnicius Henrique Cerqueira da; NAVONI, Julio Alejandro. Comparison between water quality indices in watersheds of the Southern Bahia (Brazil) with different land use. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 28, n. 10, p. 12944-12959, 23 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-10941-7>.

LORENZI, Adriana Sturion; CORDEIRO-ARAÚJO, Micheline Kézia; CHIA, Mathias Ahii; BITTENCOURT-OLIVEIRA, Maria do Carmo. Cyanotoxin contamination of semiarid drinking water supply reservoirs. **Environmental Earth Sciences**, [S.L.], v. 77, n. 16, ago. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7774-y>.

LUNA, R. M. **Desenvolvimento do índice de Pobreza Hídrica (IPH) para o semi-árido brasileiro**. Universidade Federal do Ceará. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Fortaleza, Ce. 2007. 138p.

MADANI, Kaveh; SHAFIEE-JOOD, Majid. Socio-Hydrology: a new understanding to unite or a new science to divide?. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1941, 8 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12071941>.

MADY, Bassem; LEHMANN, Peter; GORELICK, Steven M; OR, Dani. Distribution of small seasonal reservoirs in semiarid regions and associated evaporative losses. **Environmental Research Communications**, [S.L.], v. 2, n. 6, p. 061002, 1 jun. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/2515-7620/ab92af>.

MALVEIRA, Vanda Tereza Costa; ARAÚJO, José Carlos de; GÜNTNER, Andreas. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern

Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 109-117, jan. 2012. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000404](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000404).

MAMEDE, George L.; GUENTNER, Andreas; MEDEIROS, Pedro H. A.; ARAÚJO, José Carlos de; BRONSTERT, Axel. Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 12, dez. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001701](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001701).

MAMEDE, George L.; GUENTNER, Andreas; MEDEIROS, Pedro H. A.; ARÚJO, José Carlos de; BRONSTERT, Axel. Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S.L.], v. 23, n. 12, dez. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001701](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001701).

MANDAL, Uttam Kumar; BURMAN, D.; BHARDWAJ, A.K.; NAYAK, Dibyendu Bikas; SAMUI, Arpan; MULLICK, Sourav; MAHANTA, K.K.; LAMA, T.D.; MAJI, B.; MANDAL, Subhasis. Waterlogging and coastal salinity management through land shaping and cropping intensification in climatically vulnerable Indian Sundarbans. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 216, p. 12-26, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.012>.

MARANGON, Bianca Barros; SILVA, Thiago Abrantes; CALIJURI, Maria Lúcia; ALVES, Sabrina do Carmo; SANTOS, Vitor Juste dos; OLIVEIRA, Adriana Paulo de Sousa. Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil's semiarid regions. **Journal of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 37, p. 101483, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101483>.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln M.; ALVALA, Regina C.S; CUNHA, Ana Paula; BRITO, Sheila; MORAES, Osvaldo L.L.. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 90, n. 21, p. 1973-1985, ago. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MARKOWSKA, Joanna; SZALINSKA, Wiwiana; DABROWSKA, Jolanta; BRZAKALA, Monika. The concept of a participatory approach to water management on a reservoir in response to wicked problems. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 259, p. 109626, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109626>.

MARQUES, Érika Tavares; GUNKEL, Günter; SOBRAL, Maria Carmo. Management of Tropical River Basins and Reservoirs under Water Stress: experiences from northeast Brazil. **Environments**, [S.L.], v. 6, n. 6, 4 jun. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/environments6060062>.

MARQUES, Guilherme Fernandes; TILMANT, A.. The economic value of coordination in large-scale multireservoir systems: the parana river case. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 49, n. 11, p. 7546-7557, nov. 2013. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2013wr013679>.

MARTINS, Minella A.; TOMASELLA, Javier; RODRIGUEZ, Daniel A.; ALVALÁ, Regina

C.S.; GIAROLLA, Angélica; GAROFOLO, Lucas L.; SIQUEIRA JÚNIOR, José Lázaro; PAOLICCHI, Luis T.L.C.; PINTO, Gustavo L.N.. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, [S.L.], v. 160, p. 21-30, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2017.11.002>.

MASON, E.; GIULIANI, M.; CASTELLETI, A.; AMIGONI, F.. Identifying and Modeling Dynamic Preference Evolution in Multipurpose Water Resources Systems. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 54, n. 4, p. 3162-3175, abr. 2018. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2017wr021431>.

MEDEIROS, Aldair de Souza; MAIA, Stoécio Malta Ferreira; SANTOS, Thiago Cândido dos; GOMES, Tâmara Cláudia de Araújo. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 287, p. 106690, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>.

MEIRA NETO, Antônio Alves; MEDEIROS, Pedro; ARAÚJO, José Carlos de; PEREIRA, Bruno; SIVAPALAN, Murugesu. Evolution of Drought Mitigation and Water Security Through 100 Years of Reservoir Expansion in Semi-Arid Brazil. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 60, n. 9, p. 1, 30 ago. 2024. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2023wr036411>.

MELLO, Kaline de; TANIWAKI, Ricardo Hideo; PAULA, Felipe Rossetti de; VALENTE, Roberta Avena; RANDHIR, Timothy O.; MACEDO, Diego Rodrigues; LEAL, Cecília Gontijo; RODRIGUES, Carolina Bozetti; HUGHES, Robert M.. Multiscale land use impacts on water quality: assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 270, p. 110879, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879>.

MENG, Xue; LU, Jian; WU, Jun; ZHANG, Zhenhua; CHEN, Liwei. Quantification and Evaluation of Grey Water Footprint in Yantai. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 12, p. 1893, 12 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14121893>.

MIRANDA, Grazielle Muniz; REYNARD, Emmanuel. Integrated Water Resources Management in Federations: the examples of Brazil and Switzerland. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1914, 4 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12071914>.

MOLISANI, M.M.; BECKER, H.; BARROSO, H. S.; HIJO, G.A.G; MONTE, T.M.; VASCONCELLOS, G.H.; LACERDA, LD.. The influence of Castanhão reservoir on nutrient and suspended matter transport during rainy season in the ephemeral Jaguaribe river (CE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, [S.L.], v. 73, n. 1, p. 115-123, fev. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1519-69842013000100013>.

MOLISANI, Mauricio Mussi; MONTE, Thiago Maia do; VASCONCELLOS, George Harrison; BARROSO, Hortência de Souza; MOREIRA, Maria Odete Parente; BECKER, Helena; REZENDE, Carlos Eduardo de; FRANCO, Marcos Alberto Lima; FARIAS, Eduardo Guilherme Gentil de; CAMARGO, Plínio Barbosa de. Relative effects of nutrient emission from intensive cage aquaculture on the semiarid reservoir water quality. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 187, n. 11, p. 1-27, 27 out. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-4925-4>.

MONICELLI, Fernanda; ROCHA JUNIOR, Carlos Alberto Nascimento da; LIMA, Stela; DINIZ, Ingridh Savanna Medeiros; BECKER, Vanessa. Trophic state in Brazilian semiarid reservoirs after reflooding. **RBRH**, [S.L.], v. 28, jan. 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.282320230070>.

MONTENEGRO, Suzana; RAGAB, Ragab. Impact of possible climate and land use changes in the semiarid regions: a case study from northeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 434-435, p. 55-68, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.036>

MOURA, Diana S.; LIMA NETO, Iran E.; CLEMENTE, Allan; OLIVEIRA, Samylla; PESTANA, Carlos J.; MELO, Maria Aparecida de; CAPELO-NETO, José. Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. **Chemosphere**, [S.L.], v. 246, p. 125686, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125686>.

MOURA, Rodrigo Sávio Teixeira de; HENRY-SILVA, Gustavo Gonzaga. Limnological characteristics of a hydrographic basin of the Brazilian semiarid region. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 51-59, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s2179-975x3114>.

NAFARZADEGAN, Ali Reza; VAGHARFARD, Hassan; NIKOO, Mohammad Reza; NOHEGAR, Ahmad. Socially-Optimal and Nash Pareto-Based Alternatives for Water Allocation under Uncertainty: an approach and application. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 32, n. 9, p. 2985-3000, 30 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-018-1969-6>.

NAMUGIZE, Jean Nepomuscene; JEWITT, Graham; GRAHAM, Mark. Effects of land use and land cover changes on water quality in the uMngeni river catchment, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, [S.L.], v. 105, p. 247-264, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.013>.

NASCIMENTO FILHO, Silvano Lima do; FRANÇA, Elton Jose de; MELO JÚNIOR, Mauro de; MOURA, Ariadne do Nascimento. Interactions between benthic microalgae, nutrients and benthic macroinvertebrates in reservoirs from the semi-arid Neotropical region. **Fundamental and Applied Limnology**, [S.L.], v. 192, n. 3, p. 237-254, 25 abr. 2019. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/fal/2019/1180>.

NEL, Johannes B.; MATIVENGA, Paul T.; MARNEWICK, Annlizé L.. A Framework to Support the Selection of an Appropriate Water Allocation Planning and Decision Support Scheme. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 12, p. 1854, 9 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14121854>.

NUGENT, Jenni; CHINI, Christopher M; PEER, Rebecca A M; STILLWELL, Ashlynn s. Corrigendum: Monthly virtual water transfers on the U.S. electric grid. **Environmental Research: Infrastructure and Sustainability**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 019501, 14 fev. 2025. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/2634-4505/adaee4>.

NUNES, Luiz; MEDEIROS, Pedro. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 18, 9 set. 2020. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v17e18>.

ORTUZAR, Iban; SERRANO, Ana; XABADIA, Àngels. Macroeconomic impacts of water allocation under droughts. Accounting for global supply chains in a multiregional context. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 211, p. 107904, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107904>.

PAHL-WOSTL, C. Towards sustainability in the water sector – The importance of human actors and processes of social learning. *Water Policy Article*, 64. dx.doi.org.1015-1621/02/040394-18

PANDE, Saket; SIVAPALAN, Murugesu. Progress in socio-hydrology: a metaanalysis of challenges and opportunities. **Wires Water**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 1, 8 dez. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1193>.

PAREDES-TREJO, Franklin; BARBOSA, Humberto Alves; DALDEGAN, Gabriel Antunes; TEICH, Ingrid; GARCÍA, César Luis; KUMAR, T. V. Lakshmi; BURITI, Catarina de Oliveira. Impact of Drought on Land Productivity and Degradation in the Brazilian Semiarid Region. **Land**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 954, 25 abr. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/land12050954>.

PASTOR, A. V.; LUDWIG, F.; BIEMANS, H.; HOFF, H.; KABAT, P.. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 18, n. 12, p. 5041-5059, 11 dez. 2014. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>.

PAULA FILHO, Francisco José de; SAMPAIO, Andressa Dyalla de Sá; MENEZES, Jorge Marcell Coelho; COSTA, Celme Torres Ferreira da; SANTIAGO, Marcelo Oliveira. Land uses, Nitrogen and Phosphorus estimated fluxes in a Brazilian semi-arid watershed. **Journal of Arid Environments**, [S.L.], v. 163, p. 41-49, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.01.001>.

PEREIRA, Bruno; MEDEIROS, Pedro; MEIRA NETO, Antônio Alves; ARAÚJO, José Carlos de; SIVAPALAN, Murugesu. Advancing water security in semi-arid Brazil: expansion of water storage infrastructure and human-water system co-evolution. **Frontiers in Water**, [S.L.], v. 7, p. 1, 13 ago. 2025. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/frwa.2025.1602146>.

PEREIRA, José Marcelo Rodrigues; RAIMUNDO, Clebson do Carmo; REIS, Dirceu Silveira; VASCONCELOS, Francisco das Chagas; MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues. Use of Climate Information in Water Allocation: a case of study in a semiarid region. **Water**, [S.L.], v. 15, n. 13, p. 2460, 5 jul. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w15132460>.

PETERSE, Ida F.; HENDRIKS, Lisanne; WEIDEVELD, Stefan T.J.; SMOLDERS, Alfons J.P.; LAMERS, Leon P.M.; LÜCKER, Sebastian; VERAART, Annelies J.. Wastewater-effluent discharge and incomplete denitrification drive riverine CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 951, p. 175797, nov. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175797>.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos**. Editora ABES, 2006. 285p.

PRAKASH, Anjal; GEORGE, Ritwick; BARUA, Anamika. *Socio-Hydrological Frameworks*

for Adaptive Governance: Addressing Climate Uncertainty in South Asia. **Frontiers in Water**, [S.L.], v. 7, p. 1, 22 abr. 2025. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/frwa.2025.1556820>.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Progress on implementation of integrated water resources management: mid-term status of SDG indicator 6.5.1 and acceleration needs, with a special focus on climate change 2024**. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2024. ISBN 978-92-807-4171-1.

PUTH, Marie-Therese; NEUHÄUSER, Markus; RUXTON, Graeme D.. Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits. **Animal Behaviour**, [S.L.], v. 102, p. 77-84, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.01.010>.

R CORE TEAM. **R. A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

RABELO, Udinart P.; DIETRICH, Jörg; COSTA, Alexandre C.; SIMSHÄUSER, Max N.; SCHOLZ, Fernanda E.; NGUYEN, Van T.; LIMA NETO, Iran E.. Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 603, p. 127103, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103.v>

RABELO, Udinart Prata; COSTA, Alexandre C.; DIETRICH, Jörg; FALLAH-MEHDIPOUR, Elahe; VAN OEL, Pieter; LIMA NETO, Iran Eduardo. Impact of Dense Networks of Reservoirs on Streamflows at Dryland Catchments. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 21, p. 14117, 29 out. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su142114117>.

RAULINO, João B. S.; SILVEIRA, Cleiton S.; LIMA NETO, Iran Eduardo. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality of large semi-arid reservoirs in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 66, n. 8, p. 1321-1336, 11 jun. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2021.1933491>

REFATI, Daiana Caroline; SILVA, Jhon Lennon Bezerra da; MACEDO, Rodrigo Santana; LIMA, Ricardo da Cunha Correia; SILVA, Marcos Vinícius da; PANDORFI, Héilton; SILVA, Patrícia Costa; OLIVEIRA-JÔNIO, José Francisco de. Influence of drought and anthropogenic pressures on land use and land cover change in the brazilian semiarid region. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.L.], v. 126, p. 104362, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104362>.

REGO, A. H. G.; RANGEL-JUNIOR, A.; COSTA, I. A. S.. Phytoplankton scenario and microcystin in water during extreme drought in semiarid tropical water supplies, Northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, [S.L.], v. 80, n. 1, p. 1-11, fev. 2020. c <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.182599>.

REIS, Gabriela de Azevedo; SOUZA FILHO, Francisco Assis de; NELSON, Donald Robert; ROCHA, Renan Vieira; SILVA, Samiria Maria Oliveira da. Development of a drought vulnerability index using MCDM and GIS: study case in São Paulo and Ceará, Brazil. **Natural Hazards**, [S.L.], v. 104, n. 2, p. 1781-1799, 31 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-020-04247-7>.

REY, Dolores; PÉREZ-BLANCO, Carlos Dionisio; ESCRIVA-BOU, Alvar; GIRARD,

Corentin; VELDKAMP, Ted I. E.. Role of economic instruments in water allocation reform: lessons from europe. **International Journal of Water Resources Development**, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 206-239, 19 jan. 2018. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2017.1422702>.

RIAUX, Jeanne; OGILVIE, Andrew; JENHAOUI, Zakia. More than just water! Hydraulic materiality and the process of resource making: a sociohydrological reading of Tunisian hillside reservoirs. **Journal of Rural Studies**, [S.L.], v. 79, p. 125-135, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.08.041>.

RIBEIRO NETO, Germano G.; MELSEN, Lieke A.; COSTA, Alexandre C.; WALKER, David W.; CAVALCANTE, Louise; KCHOUK, Sarra; BRÊDA, João Paulo; MARTINS, Eduardo S. P. R.; VAN OEL, Pieter R.. Clash of Drought Narratives: a study on the role of small reservoirs in the emergence of drought impacts. **Earth'S Future**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 1, jul. 2024. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2023ef004311>.

RIJSBERMAN, Frank R.. Water scarcity: fact or fiction?. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 80, n. 1-3, p. 5-22, fev. 2006. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>.

ROCHA JUNIOR, Carlos; ARAÚJO, Fabiana; BECKER, Vanessa. Influence of land use on spatial distribution of mobile phosphorus forms in the sediment of a tropical semi-arid reservoir. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 914, p. 169836, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169836>.

ROCHA, Maria Aparecida Melo; BARROS, Mario U. G.; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; LIMA NETO, Iran Eduardo. Total Phosphorus Modeling and Carrying Capacity of the Largest Semiarid Reservoir in Latin America. **SSRN**, [S.L.], p. 1, 2024b. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4991418>.

ROCHA, Maria Aparecida Melo; BARROS, Mário Ubirajara Gonçalves; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; LIMA NETO, Iran Eduardo. Diel and seasonal mixing patterns and water quality dynamics in a multipurpose tropical semiarid reservoir. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 31, n. 30, p. 43309-43322, 20 jun. 2024a. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-024-34044-9>.

ROCHA, Maria Aparecida Melo; BARROS, Mário Ubirajara Gonçalves; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; LIMA NETO, Iran Eduardo. Total Phosphorus Modeling and Carrying Capacity of the Largest Reservoir in the Brazilian Semiarid Region. **Water, Air, & Soil Pollution**, [S.L.], v. 236, n. 8, p. 1, 2 jun. 2025. Springer Science and Business Media LLC.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11270-025-08197-3>.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; LIMA NETO, Iran Eduardo. Internal phosphorus loading and its driving factors in the dry period of Brazilian semiarid reservoirs. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 312, p. 114983, jun. 2022. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114983>.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; LIMA NETO, Iran Eduardo. Modeling flow-related phosphorus inputs to tropical semiarid reservoirs. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 295, p. 113123, out. 2021. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113123>.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; LIMA NETO, Iran Eduardo. Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 29, n. 7, p. 10027-10046, 12 set. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-16251-w>.

ROCHA, Sofia M.; ROCHA, Maria de J; ARAÚJO, Germário M; BECKER, Helena; LIMA NETO, Iran e. Seasonal and interannual variability of residence time and total phosphorus in a small hypereutrophic lake in the Brazilian northeast. **Water Sa**, [S.L.], v. 48, n. 3, p. 1, 27 jul. 2022. Academy of Science of South Africa. <http://dx.doi.org/10.17159/wsa/2022.v48.i3.3893>.

ROCKSTRÖM, J.; FALKENMARK, M.; ALLAN, T.; FOLKE, C.; GORDON, L.; JÄGERSKOG, A.; KUMMU, M.; LANNERSTAD, M.; MEYBECK, M.; MOLDEN, D.. The unfolding water drama in the Anthropocene: towards a resilience-based perspective on water for global sustainability. **Ecohydrology**, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 1249-1261, out. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1562>.

RODRÍGUEZ-ROMERO, Alexis Joseph; RICO-SÁNCHEZ, Axel Eduardo; MENDOZA-MARTÍNEZ, Erick; GÓMEZ-RUIZ, Andrea; SEDEÑO-DÍAZ, Jacinto Elías; LÓPEZ-LÓPEZ, Eugenia. Impact of Changes of Land Use on Water Quality, from Tropical Forest to Anthropogenic Occupation: a multivariate approach. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1518, 26 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10111518>.

ROLIM, Hosineide de Oliveira; NUNES, Ana Bárbara de Araújo; NASCIMENTO, Francisco Jonathan de Sousa Cunha; CHAVES, Jarbas Rodrigues. Proposal of a trophic state index in semiarid reservoirs using data of the Banabuiú Basin, state of Ceará, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [S.L.], v. 31, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s2179-975x12517>

ROSSI, Giuseppe; PERES, David J.. Climatic and Other Global Changes as Current Challenges in Improving Water Systems Management: lessons from the case of Italy. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 37, n. 6-7, p. 2387-2402, 31 jan. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-023-03424-0>.

ROTHBERG, Danilo; GARDE-HANSEN, Joanne. Improving water governance in Brazil: an organisational memory approach. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 24, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200211r3vu202114ao>

ROUILLARD, Josselin; RINAUDO, Jean-Daniel. From State to user-based water allocations: an empirical analysis of institutions developed by agricultural user associations in France. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 239, p. 106269, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106269>.

RUIZ-VILLAVARDE, Alberto; GARCÍA-RUBIO, Miguel A.. Public Participation in European Water Management: from theory to practice. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 31, n. 8, p. 2479-2495, 17 maio 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-016-1355-1>.

SABOURIN, E.. **Implementing public policies and public action for adapting to droughts in the semi-arid Northeast**. In: SABOURIN, E., OLIVEIRA, L.M.R., GOULET, F.,

MARTINS, E.S. (Eds.), Public Policies for Adapting Agriculture to Climate Change in Semi-arid Northeast Brazil. E-papers, 2022 pp. 7–19 (Org.).

SÁNCHEZ-GÓMEZ, Alejandro; ARNOLD, Jeffrey G.; BIEGER, Katrin; ČERKASOVA, Natalja; SAMMONS, Nancy B.; MARTÍNEZ-PÉREZ, Silvia; MOLINA-NAVARRO, Eugenio. Modelling Water Management using SWAT+ : application of reservoirs release tables and the new water allocation module in a highly managed river basin. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 39, n. 5, p. 2357-2399, 27 jan. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-024-04071-9>.

SANTANA, L. M.; MORAES, M. E. B.; SILVA, D. M. L.; FERRAGUT, C.. Spatial and temporal variation of phytoplankton in a tropical eutrophic river. **Brazilian Journal of Biology**, [S.L.], v. 76, n. 3, p. 600-610, 19 abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.18914>.

SANTOS, Júlio César Neves dos; ANDRADE, Eunice Maia de; ARAÚJO NETO, José Ribeiro de; MEIRELES, Ana Célia Maia; PALÁCIO, Helba Araújo de Queiroz. Land use and trophic state dynamics in a tropical semi-arid reservoir. **Revista Ciência Agronômica**, [S.L.], v. 45, n. 1, p. 35-44, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-66902014000100005>.

SAVENKO, Vitaly S.; SAVENKO, Alla V.. The Main Features of Phosphorus Transport in World Rivers. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 16, 22 dez. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14010016>.

SAWYER, C. N.; MCCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. Chemis try for environmental engineering and science. **McGraw Hill Higher Education**, fifth edition. 2003.

SCHLIEMANN, Sarah A.; GREVSTAD, Nels; BRAZEAU, Randi H.. Water quality and spatio-temporal hot spots in an effluent-dominated urban river. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 35, n. 1, 18 dez. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.14001>.

SCHYNS, Joep F.; HOEKSTRA, Arjen Y.. The Added Value of Water Footprint Assessment for National Water Policy: a case study for morocco. **Plos One**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. e99705, 11 jun. 2014. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0099705>.

SHAHRAKI, Ali Sardar; SINGH, Vijay P.; BAZRAFSHAN, Ommolbanin. Developing a Bankruptcy Theory to Resolve Stakeholders' Conflict over Optimal Water Allocation: the case of hirmand catchment. **Water**, [S.L.], v. 16, n. 9, p. 1303, 2 maio 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w16091303>.

SHI, Peng; ZHANG, Yan; LI, Zhanbin; LI, Peng; XU, Guoce. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. **Catena**, [S.L.], v. 151, p. 182-190, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.017>.

SHI, Peng; ZHANG, Yan; SONG, Jinxi; LI, Peng; WANG, Yongsheng; ZHANG, Xiaoming; LI, Zhanbin; BI, Zhilei; ZHANG, Xin; QIN, Yanli. Response of nitrogen pollution in surface water to land use and social-economic factors in the Weihe River watershed, northwest China. **Sustainable Cities and Society**, [S.L.], v. 50, p. 101658, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2019.101658>.

SHIFERAW, Natnael; KIM, Jaeyoung; SEO, Dongil. Identification of pollutant sources and

evaluation of water quality improvement alternatives of a large river. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 31546-31560, 30 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-24431-5>.

SHIN, Sanghoon; POKHREL, Yadu; MIGUEZ - MACHO, Gonzalo. High-Resolution Modeling of Reservoir Release and Storage Dynamics at the Continental Scale. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 55, n. 1, p. 787-810, jan. 2019. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2018wr023025>.

SILVA, Antonio Jose Pereira da; CAVALCANTE, Larissa Diniz; MAMEDE, George. Impacts of water quality on water availability of reservoirs in the state of Ceará. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 29, p. 1, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220230146>.

SILVA, Fernanda Helena Oliveira da; LOPES, Fernando Bezerra; BEZERRA, Bruno Gabriel Monteiro da Costa; VIANA, Noely Silva; ARAÚJO, Isabel Cristina da Silva; LUNA, Nayara Rochelli de Sousa; PONTES, Michele Cunha; CAVALCANTE, Raí Rebouças; ARAGÃO, Francisco Thiago de Albuquerque; ANDRADE, Eunice Maia de. Impact of Permanent Preservation Areas on Water Quality in a Semi-Arid Watershed. **Environments**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 220, 27 jun. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/environments12070220>.

SILVA, Thiago T. da; SARAIVA, Marianna de A.; BECKER, Helena. Proposal for a trophic status index for brazilian semi-arid reservoirs. **Revista Caatinga**, [S.L.], v. 37, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252024v3712405rc>.

SIVAPALAN, M.; KONAR, M.; SRINIVASAN, V.; CHHATRE, A.; WUTICH, A.; SCOTT, C. A.; WESCOAT, J. L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. Socio-hydrology: use of inspired water sustainability science for the anthropocene. **Earth'S Future**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 225-230, abr. 2014. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2013ef000164>.

SMAKHTIN, V.; REVENGA, C.; DOLL, P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity, *Water Int.*, 29, 307–317, 2004.

SINISA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Painel de Indicadores – 2024 SINISA. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=esgoto>. Acesso em: 3. Mar. 2026

SOARES, M.O.; CAMPOS, C.C.; CARNEIRO, P.B.M.; BARROSO, H.s.; MARINS, R.V.; TEIXEIRA, C.e.P.; MENEZES, M.O.B.; PINHEIRO, L.s.; VIANA, M.B.; FEITOSA, C.V.. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 267-278, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.001>.

SONG, Mengfei; HE, Weijun; AN, Min; FANG, Xue; WANG, Bei; RAMSEY, Thomas Stephen. Toward better agricultural grey water footprint allocation under economy-resource factors constraint. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 154, p. 110806, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110806>.

SOUSA, Maria da Conceição de; VELOSO, Gustavo Vieira; GOMES, Lucas Carvalho; FERNANDES-FILHO, Elpidio Inácio; OLIVEIRA, Teógenes Senna de. Spatio-temporal dynamics of land use changes of an intense anthropized basin in the Brazilian semi-arid

region. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 24, p. 100646, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100646>.

SOUZA FILHO, F. A.; REIS, G. A.; SILVA, D. C.; JOCA, E. L. L. **Proposta de política de gestão proativa de secas para os recursos hídricos do Ceará**. Governo do Estado do Ceará. 2024. 74p.

SOUZA FILHO, F.A. **Notas sobre o planejamento de recursos hídricos no Ceará**. In: ALVES, R.F.F., CARVALHO, G.B.B. (Eds.), *Experiências em Gestão de Recursos Hídricos*, 1ed. MMA/ANA, Brasília, 2001. pp. 13–37.

SOUZA FILHO, F.A., AQUINO, S.H.S., BARREIRA, C., RUSSO, M.B., MARQUES, D.. **Uma dupla perspectiva dos conflitos alocativos de água na experiência cearense**. In: BARREIRA, C., SOUZA FILHO, F.A., BARREIRA, I.A.F., AQUINO, S.H. (Eds.). *Economia Política das Águas no Ceará (alocação, conflitos, participação)*. Pontes, 2024. pp. 203–234.

SOUZA FILHO, Francisco Assis; LALL, Upmanu; PORTO, Rubem La Laina. Role of Price and Enforcement in Water Allocation: Insights from Game Theory. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 44, n. 12, p. 1-2, dez. 2008. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2007wr006163>.

SOUZA, Carlos, M.; SHIMBO, Julia, Z.; ROSA, Marcos. R.; PARENTE, Leandro L.; ALENCAR, Ane A.; RUDORFF, Bernardo F. T.; HASENACK, Heinrich; MATSUMOTO, Marcelo; FERREIRA, Laerte G.; SOUZA-FILHO, Pedro W. M.. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 17, p. 2735, 25 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12172735>.

SPARACINO, J.; ARGIBAY, D.S.; ESPINDOLA, G.. Long-term (35 Years) Rainy and Dry Season Characterization in Semiarid Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 377-391, set. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630138>.

STUDART, T. M. C.; SOUZA FILHO, F. A.; STUDART FILHO, R. S.; BARROS, L. S. **Água, sociedade e tipologia de conflitos: compreendendo os conflitos pelo uso da água no semiárido brasileiro**. In: BARREIRA, C., SOUZA FILHO, F.A., BARREIRA, I.A.F., AQUINO, S.H. (Eds.), *Economia política das águas no Ceará: alocação, conflitos, participação*, pp. 203–234. 2024.

STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho; CAMPOS, José Nilson B.; SOUZA FILHO, Francisco Assis de; PINHEIRO, Maria Inês Teixeira; BARROS, Luis Silva. Turbulent waters in Northeast Brazil: a typology of water governance-related conflicts. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 126, p. 99-110, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.014>.

SUN, Shikun; WANG, Yubao; LIU, Jing; CAI, Huanjie; WU, Pute; GENG, Qingling; XU, Lijun. Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 532, p. 140-148, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.028>.

SYEED, MM Mahbubul; HOSSAIN, Md Shakhawat; KARIM, Md Rajaul; UDDIN,

Mohammad Faisal; HASAN, Mahady; KHAN, Razib Hayat. Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: a critical review. **Environmental and Sustainability Indicators**, [S.L.], v. 18, p. 100247, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247>.

SZATTEN, Dawid; HABEL, Michał. Effects of Land Cover Changes on Sediment and Nutrient Balance in the Catchment with Cascade-Dammed Waters. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 20, p. 3414, 18 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12203414>.

TABARI, Hossein. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 10, n. 1, 13 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>.

TENNANT, D. L.: Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources, *Fisheries*, 1, 6–10, 1976.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, 1082-1084.

THOMAS, T.; GHOSH, N.C.; SUDHEER, K.P.. Optimal reservoir operation – A climate change adaptation strategy for Narmada basin in central India. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 598, p. 126238, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126238>.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 38, n. 3, p. 139-151, fev. 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90139-3](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809(92)90139-3).

TRANCON, D. S.; LEFLAIVE, X. The implementation of the polluter pays principle in the context of the Water Framework Directive (OECD). **Environment Working Papers**, n. 238. 2024. OECD. <https://doi.org/10.1787/699601fc-en>

TURNER, Sean W.D.; STEYAERT, Jennie Clarice; CONDON, Laura; VOISIN, Nathalie. Water storage and release policies for all large reservoirs of conterminous United States. *Journal of Hydrology*, [S.L.], v. 603, p. 126843, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126843>.

UDDIN, Md. Galal; NASH, Stephen; OLBERT, Agnieszka I.. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 122, p. 107218, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. UNEP. (2024). **Progress on implementation of integrated water resources management: Mid-term status of SDG indicator 6.5.1 and acceleration needs, with a special focus on climate change 2024**. ISBN 978-92-807-4171-1.

UTIDA, Giselle; CRUZ, Francisco W.; ETOURNEAU, Johan; BOULOUBASSI, Ioanna; SCHEFUß, Enno; VUILLE, Mathias; NOVELLO, Valdir F.; PRADO, Luciana F.; SIFEDDINE, Abdelfettah; KLEIN, Vincent. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 9, n. 1, 8 fev. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-38003-6>.

UVO, Cíntia; BERNDTSSON, Ronny. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in northeast Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, [S.L.], v. 101, n. 2, p. 4221-4233, fev. 1996. American Geophysical Union (AGU).  
<http://dx.doi.org/10.1029/95jd03235>.

UWIMANA, Abias; VAN DAM, Anne A.; GETTEL, Gretchen M.; IRVINE, Kenneth. Effects of agricultural land use on sediment and nutrient retention in valley-bottom wetlands of Migina catchment, southern Rwanda. *Journal of Environmental Management*, [S.L.], v. 219, p. 103-114, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.094>.

UWIMANA, Abias; VAN DAM, Anne; GETTEL, Gretchen; BIGIRIMANA, Bonfils; IRVINE, Kenneth. Effects of River Discharge and Land Use and Land Cover (LULC) on Water Quality Dynamics in Migina Catchment, Rwanda. *Environmental Management*, [S.L.], v. 60, n. 3, p. 496-512, 28 jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00267-017-0891-7>.

VAN LANGEN, Simone C. H.; COSTA, Alexandre C.; RIBEIRO NETO, Germano G.; VAN OEL, Pieter R.. Effect of a reservoir network on drought propagation in a semi-arid catchment in Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, [S.L.], v. 66, n. 10, p. 1567-1583, 27 jul. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2021.1955891>.

VAN LOON, A. F.; VAN LANEN, H. A. J.. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research*, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 1483-1502, mar. 2013. American Geophysical Union (AGU).  
<http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20147>

VAN VLIET, Michelle T H; JONES, Edward R; FLÖRKE, Martina; FRANSSSEN, Wietse H P; HANASAKI, Naota; WADA, Yoshihide; YEARSLEY, John R. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 024020, 26 jan. 2021. IOP Publishing.  
<http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>.

VAN VLIET, Michelle T. H.; THORSLUND, Josefin; STROKAL, Maryna; HOFSTRA, Nynke; FLÖRKE, Martina; MACEDO, Heloisa Ehalt; NKWASA, Albert; TANG, Ting; KAUSHAL, Sujay S.; KUMAR, Rohini. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, [S.L.], v. 4, n. 10, p. 687-702, 12 set. 2023. Springer Science and Business Media LLC.  
<http://dx.doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>.

VAN VLIET, Michelle T.H.; FLÖRKE, Martina; WADA, Yoshihide. Quality matters for water scarcity. *Nature Geoscience*, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 800-802, 9 out. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo3047>.

VARADY, Robert G; A ZUNIGA-TERAN, Adriana; GARFIN, Gregg M; MARTÍN, Facundo; VICUÑA, Sebastián. Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, [S.L.], v. 21, p. 70-77, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.001>.

WADNERKAR, Praktan D.; ANDREWS, Luke; WONG, Wei Wen; CHEN, Xiaogang; CORREA, Rogger E.; WHITE, Shane; COOK, Perran L.M.; SANDERS, Christian J.; SANTOS, Isaac R.. Land use and episodic rainfall as drivers of nitrogen exports in

subtropical rivers: insights from  $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ ,  $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$  and  $^{222}\text{Rn}$ . **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 758, p. 143669, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143669>.

WALKER, Warren E.; LOUCKS, Daniel P.; CARR, Gemma. Social Responses to Water Management Decisions. **Environmental Processes**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 485-509, 22 jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40710-015-0083-5>.

WAN, Rongrong; CAI, Shanshan; LI, Hengpeng; YANG, Guishan; LI, Zhaofu; NIE, Xiaofei. Inferring land use and land cover impact on stream water quality using a Bayesian hierarchical modeling approach in the Xitiao River Watershed, China. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 133, p. 1-11, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.035>.

WANG, Guoqiang; A, Yinglan; XU, Zongxue; ZHANG, Shurong. The influence of land use patterns on water quality at multiple spatial scales in a river system. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 28, n. 20, p. 5259-5272, 8 set. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10017>.

WANG, Mengru; BODIRSKY, Benjamin Leon; RIJNEVELD, Rhodé; BEIER, Felicitas; BAK, Mirjam P.; BATOOL, Masooma; DROPPERS, Bram; POPP, Alexander; VAN VLIET, Michelle T. H.; STOKAL, Maryna. A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. **Nature Communications**, [S.L.], v. 15, n. 1, 6 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>.

WANG, Yeuh-Bin; LIU, Chen-Wuing; LEE, Jin-Jing. Differentiating the Spatiotemporal Distribution of Natural and Anthropogenic Processes on River Water–Quality Variation Using a Self-Organizing Map With Factor Analysis. **Archives of Environmental Contamination And Toxicology**, [S.L.], v. 69, n. 2, p. 254-263, 5 jun. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00244-015-0167-2>.

WANG, Yi; LI, Yong; LIU, Xinliang; LIU, Feng; LI, Yuyuan; SONG, Lifang; LI, Hang; MA, Qiumei; WU, Jinshui. Relating land use patterns to stream nutrient levels in red soil agricultural catchments in subtropical central China. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 21, n. 17, p. 10481-10492, 14 maio 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-2921-9>.

WANG, Yuemeng; ZHANG, Shuyu; HUANG, Hongwei; WANG, Lizhen; HAN, Xinxueqi; ZHAO, Nana; ZHAO, Xining; ZHAO, Yong; GAO, Xuerui. A new water allocation scheme considering the optimization of industrial structures in arid areas of the Chinese Loess Plateau. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S.L.], v. 49, p. 101503, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101503>.

WARD, Frank A. Addressing Global Water Challenges in 2025: an integrated framework for research, policy, and resource management. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 39, n. 15, p. 7885-7918, 16 set. 2025. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-025-04341-0>.

WEN, Yingrong; SCHOUPS, Gerrit; GIESEN, Nick van de. Organic pollution of rivers: combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1, 23 fev. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/srep43289>.

WIEGAND, Mário César; NASCIMENTO, Antônia Tatiana Pinheiro do; COSTA, Alexandre Cunha; LIMA NETO, Iran Eduardo. Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. **Journal of Arid Environments**, [S.L.], v. 184, p. 104321, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104321>.

WÖHLER, Lara; NIEBAUM, Gunnar; KROL, Maarten; HOEKSTRA, Arjen Y.. The grey water footprint of human and veterinary pharmaceuticals. **Water Research X**, [S.L.], v. 7, p. 100044, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wroa.2020.100044>.

WU, Jiefeng; YUAN, Xing; YAO, Huaxia; CHEN, Xiaohong; WANG, Gaoxu. Reservoirs regulate the relationship between hydrological drought recovery water and drought characteristics. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 603, p. 127127, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127127>.

WU, Xia; HE, Weijun; YUAN, Liang; KONG, Yang; LI, Renyue; QI, Yuzhi; YANG, Dongquan; DEGEFU, Dagmawi Mulugeta; RAMSEY, Thomas Stephen. Two-stage water resources allocation negotiation model for transboundary rivers under scarcity. **Frontiers in Environmental Science**, [S.L.], v. 10, p. 1, 30 ago. 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2022.900854>.

WUNDERLIN, D. A.; DÍAZ, M. P.; AMÉ, M. V.; PESCE, S. F. HUED, A. C.; BISTONI, M. L. A. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality, a case study: Suquía river basin (Córdoba-Argentina). **Water Research**, v. 35, n° 12. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00592-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00592-3)

XIA, Yongqiu; TI, Chaopu; SHE, Dongli; YAN, Xiaoyuan. Linking river nutrient concentrations to land use and rainfall in a paddy agriculture–urban area gradient watershed in southeast China. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 566-567, p. 1094-1105, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.134>.

XIAO, Jie; GAO, Dongdong; ZHANG, Han; SHI, Hongle; CHEN, Qiang; LI, Hongfei; REN, Xingnian; CHEN, Qingsong. Water quality assessment and pollution source apportionment using multivariate statistical techniques: a case study of the laixi river basin, china. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.L.], v. 195, n. 2, p. 1-2, 10 jan. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-022-10855-6>.

XU, Haishun; CAI, Chaolin; DU, Hongyu; GUO, Yanping. Responses of water quality to land use in riparian buffers: a case study of huangpu river, china. **Geojournal**, [S.L.], v. 86, n. 4, p. 1657-1669, 6 fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10708-020-10150-2>.

XU, Jing; JIN, Guangqiu; TANG, Hongwu; MO, Yuming; WANG, You-Gan; LI, Ling. Response of water quality to land use and sewage outfalls in different seasons. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 696, p. 134014, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134014>.

XUE, Ying; SONG, Jinxi; ZHANG, Yan; KONG, Feihe; WEN, Ming; ZHANG, Guotao. Nitrate Pollution and Preliminary Source Identification of Surface Water in a Semi-Arid River Basin, Using Isotopic and Hydrochemical Approaches. **Water**, [S.L.], v. 8, n. 8, p. 328, 3 ago. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w8080328>.

YANG, X.; LIU, Q.; FU, G.; HE, Y.; LUI, X.; ZHENG, Z. Spatiotemporal patterns and source

attribution of nitrogen load in a river basin with complex pollution sources. **Water Research**, v. 94. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.040>

YAO, Yiwen; DAI, Quanhou; GAO, Ruxue; GAN, Yixian; YI, Xingsong. Effects of rainfall intensity on runoff and nutrient loss of gently sloping farmland in a karst area of SW China. **Plos One**, [S.L.], v. 16, n. 3, 18 mar. 2021. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0246505>.

ZANELLA, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, volume especial, nº 36. P. 126-142. 2014.

ZENG, Zhao; LIU, Junguo; SAVENIJE, Hubert H.G.. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 34, p. 441-449, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.012>.

ZHANG, Xiaoxin; YI, Yujun; YANG, Zhifeng. Nitrogen and phosphorus retention budgets of a semiarid plain basin under different human activity intensity. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 703, p. 134813, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134813>.

ZHANG, Yansong; WEI, Yujie; MAO, Yu. Sustainability Assessment of Regional Water Resources in China Based on DPSIR Model. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 10, p. 8015, 15 maio 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su15108015>.

ZHENG, Yang; SANG, Xuefeng; LIU, Zhiwu; ZHANG, Siqu; LIU, Pan. Water Allocation Management Under Scarcity: a bankruptcy approach. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 36, n. 9, p. 2891-2912, 8 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-022-03098-0>.

ZHOU, Feng; SU, Weici; ZHANG, Fengtai. Influencing Indicators and Quantitative Assessment of Water Resources Security in Karst Region Based on PSER Model—The Case of Guizhou. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 20, p. 5671, 14 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11205671>.

ZHOU, Ke. Integrated allocation model of water quantity and quality and its application in the Yellow River. **Water Supply**, [S.L.], v. 20, n. 8, p. 3768-3778, 15 jun. 2020. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2020.126>.