



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE CARLOS ARAÚJO DE SANTANA

**PLANEJAMENTO HÍDRICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: desenvolvimento de
uma metodologia baseada em setores censitários para redução da vulnerabilidade
hídrica em comunidades rurais**

Recife
2025

ALEXANDRE CARLOS ARAÚJO DE SANTANA

**PLANEJAMENTO HÍDRICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: desenvolvimento de
uma metodologia baseada em setores censitários para redução da vulnerabilidade
hídrica em comunidades rurais**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santana, Alexandre Carlos Araújo de.

Planejamento hídrico no semiárido brasileiro : desenvolvimento de uma metodologia baseada em setores censitários para redução da vulnerabilidade hídrica em comunidades rurais / Alexandre Carlos Araújo de Santana. - Recife, 2025.

125f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: José Almir Cirilo.

Coorientação: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.

Inclui referências e apêndice.

1. Gestão descentralizada de recursos hídricos; 2. Tecnologias sociais para abastecimento de água; 3. Sensoriamento remoto aplicado à água; 4. Adaptação climática no Nordeste brasileiro; 5. Políticas públicas de acesso à água. I. Cirilo, José Almir. II. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ALEXANDRE CARLOS ARAÚJO DE SANTANA

**PLANEJAMENTO HÍDRICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: desenvolvimento de
uma metodologia baseada em setores censitários para redução da vulnerabilidade
hídrica em comunidades rurais**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/02/2025.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Coorientador: Prof Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Leijdane Maria Maciel de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco
(Examinadora Interna)

Prof^ª. Dr^ª Sylvana Melo dos Santos
Universidade Federal de Pernambuco
(Examinadora Interna)

Dr^ª. Maria Sonia Lopes da Silva
Pesquisadora da Embrapa Solos UEP Recife
(Examinadora Externa)

Dr. Timóteo Herculino da Silva Barros
Pesquisador CENA/USP
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas
Universidade Federal do Rio de Janeiro
(Examinador Externo)

Dedicatória

Dedico este trabalho aos homens e mulheres do semiárido nordestino, que enfrentam diariamente o desafio de viver em uma região marcada pela escassez hídrica, mas que, mesmo diante das adversidades, mantêm sua força, coragem e capacidade de sonhar.

É a você que caminha, ou que seus antepassados caminharam por longas distâncias em busca de água, que transforma a dificuldade em superação e que, com criatividade e resiliência, encontra formas de viver e prosperar. Este trabalho é também uma homenagem à sua habilidade em criar comunidades unidas e solidárias, que conseguem encontrar alegria e esperança mesmo em meio aos desafios do semiárido.

A dedicação, a resistência e a capacidade de reinventar o presente para construir um futuro melhor são fontes de inspiração que nortearam cada etapa desta pesquisa. Que este estudo possa contribuir para transformar suas realidades, oferecendo caminhos para uma vida mais digna, com acesso adequado à água em quantidade e qualidade suficientes, e para fortalecer a sustentabilidade das suas comunidades.

Vocês são o exemplo vivo de que, mesmo nas terras mais secas, pode florescer a esperança.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores, Professor Dr. José Almir Cirilo e Professor Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva, pela orientação, paciência e inestimável apoio durante todas as etapas deste trabalho. Suas contribuições acadêmicas e incentivos foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese.

Manifesto minha gratidão aos pesquisadores Jocimar Coutinho Rodrigues Junior, Níveo Rocha, Dra Fabiani Denise Bender e Bruna Marques Soares, cujas colaborações e discussões enriqueceram substancialmente este trabalho. Cada contribuição foi essencial para alcançar os resultados aqui apresentados. E em especial ao Dr Timóteo Herculino Barros, cuja amizade, parceira, orientação, senso crítico e provocações, ajudaram a concretizar minha pesquisa e evoluir como ser humano e pesquisador.

Aos meus pais, Paulo Santana e Verônica Carlos, minha eterna gratidão pelo amor, apoio incondicional e pelos valores que me transmitiram, que foram alicerces ao longo de toda minha formação. Agradeço ao meu sogro e sogra Manoel Fernandes e Jacira Duarte (in memoriam), além também dos meus irmãos Pedro e Carolina, aos meus cunhados Paula, Neto, Fernanda, Carol e Ruy, assim como a todos os meus tios, tias, primos, primas, sobrinhos e sobrinhas, que sempre me incentivaram e apoiaram nos momentos mais desafiadores.

Agradeço aos meus amigos de longas datas, que mesmo sem poderem estar sempre por perto, configuram-se num oásis de alegria, amor e companheirismo, nos momentos mais difíceis.

À minha esposa Jussara e à minha filha Valentina, meu agradecimento especial. Vocês são minha fonte de força e inspiração diária. Jussara, obrigado por sua paciência, compreensão e apoio irrestrito durante essa jornada. Valentina, sua presença ilumina meus dias e me motiva a ser sempre melhor.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado. Esta conquista é fruto do suporte e da confiança de cada um de vocês.

“O sertanejo é, antes de tudo, um forte.”

(Euclides da Cunha - “Os Sertões”, 1902)

“Há criaturas como a cana: mesmo postas na moenda, esmagadas de todo, reduzidas a bagaço, só sabem dar doçura.”

Dom Hélder Câmara.

Aos intelectuais cabe-lhes aprofundar a percepção da realidade social para evitar que se alastrem as manchas de irracionalidade que alimentam o aventureirismo político; cabe-lhes projetar luz sobre os desvãos da história onde se ocultam os crimes cometidos pelos que abusam do poder; cabe-lhes auscultar e traduzir as ansiedades e aspirações das forças sociais ainda sem meios próprios de expressão.”

(Celso Furtado, 1984).

"Não defendemos nem um Estado mínimo nem máximo. Defendemos e lutamos, isso sim, por um Estado que, a partir de suas peculiaridades, cumpra suas finalidades públicas".

(Miguel Arraes de Alencar, 1991).

“Desenvolvimento regional é um processo estrutural. Essa ideia deve iluminar as nossas reflexões. O que eu defendo é que as transformações precisam ser capazes de tirar as travas do potencial latente que nosso país tem, ou seja, um processo que rejeita a concentração e a exclusão”.

(Tânia Bacelar ,2021).

RESUMO

O planejamento hídrico convencional no semiárido brasileiro, centrado em bacias hidrográficas, apresenta limitações ao não considerar detalhadamente comunidades rurais difusas. Este estudo apresenta uma abordagem complementar ao planejamento de recursos hídricos em regiões semiáridas, visando reduzir a vulnerabilidade hídrica em comunidades rurais. Considerando essa problemática, propõe-se uma metodologia inovadora baseada na análise detalhada por setores censitários, garantindo maior precisão nos diagnósticos locais. A metodologia combina dados demográficos, climáticos e tecnológicos em etapas sistemáticas de coleta, análise e integração, apresentadas por meio de um fluxograma detalhado. A região rural do Semiárido do estado de Pernambuco, foi escolhida como área experimental para aplicação da metodologia desenvolvida. Foram mapeados 22.978 reservatórios utilizando imagens do satélite Landsat 8 e o índice NDWI, técnica que se destacou pela eficiência operacional e baixo custo frente a métodos convencionais de sensoriamento remoto. Contudo, destacaram-se aspectos críticos como a ausência total de tecnologias hídricas em 11% dos setores censitários do Sertão do São Francisco e a baixa capacidade de captação anual (inferior a 400 m³) em 15,5% dos setores analisados. Adicionalmente, 22% das áreas estudadas oferecem menos de 10 litros diários por habitante, situação que afeta diretamente cerca de 290 mil pessoas, sendo o Agreste a região com a menor disponibilidade anual per capita, atingindo apenas 73 m³/hab./ano. O estudo climático revelou agravamento expressivo das condições climáticas, ampliando a discrepância entre regiões distintas do Semiárido, particularmente na comparação entre municípios situados nos extremos (leste-oeste) da região de estudo, Dormentes e Canhotinho, com aumentos médios de temperatura de 0,5°C/década e 0,3°C/década respectivamente, redução significativa de dias consecutivos úmidos e aumento acentuado das temperaturas extremas em Dormentes, indicando riscos crescentes de secas severas e intensificação da insegurança hídrica. Como resultado central, a pesquisa gerou uma ferramenta metodológica prática, apresentada em fluxograma, de fácil aplicação, replicável e possível de ser integrada a plataformas oficiais como o SNIRH, oferecendo suporte efetivo ao planejamento hídrico adaptado às especificidades locais e potencializando políticas públicas mais inclusivas, eficazes e sustentáveis.

Palavras-chave: Gestão descentralizada de recursos hídricos; Tecnologias sociais para abastecimento de água; Sensoriamento remoto aplicado à água; Adaptação climática no Nordeste brasileiro; políticas públicas de acesso à água.

ABSTRACT

Conventional water resource planning in Brazil's semi-arid regions, primarily based on watershed-scale analysis, often overlooks the hydrosocial dynamics of dispersed rural communities. This study presents a complementary approach to water management by developing and applying a spatially explicit methodology that utilizes census tracts as the unit of analysis to enhance resolution in diagnosing water vulnerability. The proposed framework integrates hydrological, climatic, demographic, and technological datasets through a structured sequence of data acquisition, processing, and synthesis, operationalized via a decision-support flowchart. The methodology was implemented in the rural semi-arid region of Pernambuco State, where 22,978 reservoirs were identified using Landsat 8 imagery and the Normalized Difference Water Index (NDWI). The approach demonstrated high operational efficiency and significantly reduced costs compared to conventional remote sensing techniques. Critical findings include the complete absence of water access infrastructure in 11% of census tracts in the São Francisco Sertão and water harvesting capacities below 400 m³/year in 15.5% of the units analyzed. Additionally, 22% of the study area provides less than 10 liters per capita per day, impacting approximately 290,000 residents, with the Agreste subregion reporting the lowest annual per capita availability at only 73 m³/person/year. Regional climate trend analysis revealed increasing hydroclimatic stress, with rising temperatures in Dormentes (0.5°C/decade) and Canhotinho (0.3°C/decade), a statistically significant reduction in consecutive wet days, and increased frequency of extreme temperature events, indicating heightened drought risk. As a key output, the study delivers a low-cost, replicable, and user-friendly methodological tool in the form of a decision-support flowchart, which can be integrated into platforms such as the Brazilian National Water Resources Information System (SNIRH), supporting more adaptive, equitable, and spatially targeted water management strategies under climate variability and change.

Keywords: Decentralized water resources governance; social technologies for domestic water provision; remote sensing applied to water resource assessment; climate adaptation in the Brazilian semi-arid region; public policies for equitable water access.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Cisterna de 16 m ³ utilizada como cisterna de primeira água (A), cisterna-telhado (B); cisterna-calçadão (C) e cisterna de enxurrada (D), cisternas de segunda água ou de produção	29
Figura 2 –	Barragem subterrânea (A), tanque de pedra ou caldeirão (B); barreiro-trincheira, TS de segunda água ou de produção	30
Figura 3 –	Concepção geral dos projetos de eixos, adutoras e reservatórios.	37
Figura 4 –	Delimitação do semiárido brasileiro, com detalhamento dos estados e municípios	39
Figura 5 –	(A) Áreas censitárias de Pernambuco; (B) Áreas censitárias do semiárido Pernambucano ; (C) Áreas censitárias da zona rural do semiárido Pernambucano	39
Figura 6 –	Distribuição regionalizada dos setores censitários rurais no semiárido de Pernambuco	40
Tabela 1 –	Especificações técnicas do sensor	42
Figura 7 –	Imageamento orbital da plataforma da área de estudo em um padrão de grade, compreendido nas órbitas de 214 a 219 nos pontos 65 e 66	44
Figura 8 –	Processo de supervisão das imagens	46
Figura 9 –	Modelo digital do terreno e localização das bacias de contribuição	50
Tabela 2 –	Número total de tecnologias sociais implantadas em Pernambuco	48
Quadro 1 –	Resumo dos dados e variáveis utilizados para estimativas das áreas de contribuição e capacidade de armazenamento das tecnologias hídricas estudadas	50
Tabela 3 –	Volumes de armazenamento predefinidos para cada tecnologia implantada	52
Figura 10 –	Localização da área de estudo, municípios de Dormentes e Canhotinho, no estado de Pernambuco, com as divisões censitárias	57
Figura 11 –	Temperatura média anual (°C) e chuva anual acumulada (mm) em Pernambuco no período de 1980-2016	59
Figura 12 –	Médias mensais das temperaturas máximas (°C; linha vermelha) e mínimas (°C; linha azul) e chuva mensal acumulada (mm; barras) em: a) Dormentes; e b) Canhotinho, no estado de Pernambuco, no período de 1980 a 2016	59
Tabela 4 –	Média anual de temperatura máxima (TM _{máxima}), mínima (TM _{mínima}) e média (TM _{média}) e chuva para Dormentes e Canhotinho no estado de Pernambuco, no período de 1980 a 2016	59
Tabela 5 –	Índices analisados no estudo de mudanças climáticas	60
Tabela 6 –	Classificação dos valores do SPI	62
Tabela 7 –	Classificação dos valores de IA	63
Figura 13 –	Classificação da normal pluviométrica por setor censitário	65
Tabela 8 –	Distribuição dos reservatórios por mesorregião	67
Figura 14 –	Classificação dos setores censitários pela quantidade de barragens construídas	68

Tabela 9 –	Classificação dos reservatórios identificadas na zona rural do semiárido Pernambucano	68
Figura 15 –	Relação entre a área de lâmina d’água e a área da bacia de contribuição hídrica de reservatórios no semiárido	70
Figura 16 –	Classificação das áreas censitárias por quantidades de cisternas de 16 mil litros	71
Figura 17 –	Classificação das áreas censitárias por quantidade de cisterna de 52 mil litros	72
Figura 18 –	Classificação das áreas censitárias por quantidade de poços perfurados	73
Figura 19 –	Classificação dos setores censitários pela quantidade de estruturas hídricas instaladas	74
Figura 20 –	Volume total armazenável (apenas capacidade instalada, desprezando chuvas) x setor censitário	76
Figura 21 –	Classificação dos setores censitários pelo volume total armazenável – exceto volumes das barragens	77
Figura 22 –	Volume total potencial de captação (volume de armazenamento, considerando chuvas) x setor censitário	78
Figura 23 –	Volume total potencial de captação x setor censitário – sem considerar as barragens	79
Figura 24 –	Classificação dos setores censitários por densidade demográfica	80
Figura 25 –	Classificação dos setores censitários, com base na relação entre habitantes e tecnologias hídricas	82
Figura 26 –	Classificação dos setores censitários a partir da relação entre tecnologia e residências	83
Figura 27 –	Classificação dos setores censitários por volume (litros) total armazenável por habitante/dia	84
Figura 28 –	Volume (litros) total armazenável por habitante/dia, exceto o volume de barragens	85
Figura 29 –	Classificação dos setores censitários por volume (litros) total potencial, por habitante/dia	86
Figura 30 –	Classificação dos setores censitários pelo volume (litros) total potencial, por hab./dia, exceto o volume das barragens	87
Figura 31 –	Ranqueamento, por mesorregião dos dez municípios com piores disponibilidades hídricas	88
Figura 32 –	Posicionamento das mesorregiões a partir dos dez municípios com piores disponibilidades hídricas	88
Figura 33 –	Disponibilidade hídrica média por mesorregião, considerando os municípios estudados	89
Tabela 10 –	<i>Ranking</i> dos municípios com pior disponibilidade hídrica na zona rural	90
Tabela 11 –	Tendências dos índices de extremos de temperatura, precipitação e umidade para as duas localidades analisadas no estado de Pernambuco	91
Figura 34 –	Tendência nas frequências (em %) de: (a) noites frias (TN10p), (b) noites quentes (TN90p), (c) dias frios (TX10p) e (d) dias quentes (TX90p) em Dormentes, Pernambuco	92
Figura 35 –	Tendência nas frequências (em %) de: (a) noites frias, (TN10p), (b) noites quentes (TN90p), (c) dias frios (TX10p) e (d) dias quentes (TX90p) em Canhotinho, Pernambuco	92

Figura 36 –	Tendências da duração (em dias) de dias consecutivos secos (DCS) e dias consecutivos úmidos (DCU) (a); intensidade (em mm) de chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p) e chuva máxima em 5 dias (RX5day) (b); e frequência (em dias) de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30) (c), em Dormentes, Pernambuco	95
Figura 37 –	Tendências da duração (em dias) de dias consecutivos secos (DCS) e dias consecutivos úmidos (DCU) (a); intensidade (em mm) de chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p) e chuva máxima em 5 dias (RX5day) (b); e frequência (em dias) de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30) (c), em Canhotinho, Pernambuco	97
Figura 38 –	Série temporal mensal do SPI em escala de 12 meses no período de 1981 a 2016 para Dormentes, Pernambuco	97
Figura 39 –	Série temporal mensal do SPI em escala de 12 meses no período de 1981 a 2016 para Canhotinho, Pernambuco	98
Figura 40 –	Frequência dos eventos secos e chuvosos (%) de acordo com o SPI (1981-2016), para Dormentes e Canhotinho, Pernambuco ...	98
Figura 41 –	Variabilidade interanual do índice de aridez e tendência climática à desertificação para Dormentes e Canhotinho, Pernambuco	99
Figura 42 –	Fluxograma de apoio ao planejamento hídrico em comunidades rurais	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DA TESE	16
1.2	HIPÓTESE	16
1.3	JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÕES	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	GERAL	19
2.2	ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	DISPONIBILIDADE HÍDRICA, ACESSO, GESTÃO E USO DA ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	20
3.1.1	Aspectos sociais e demográficos no semiárido brasileiro	21
3.1.2	Marco histórico e legal da gestão hídrica no Brasil	23
3.1.2.1	Marco histórico e legal	24
3.1.2.2	Situação atual das políticas de gestão e regulamentação de águas no Brasil	25
3.2	DISPONIBILIDADE HÍDRICA E ACESSO À ÁGUA NAS REGIÕES SEMIÁRIDAS.....	25
3.3	CLIMA NO SEMIÁRIDO.....	27
3.4	DISPOSITIVOS PARA ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	28
3.4.1	Tecnologias sociais.....	28
3.4.1.1	Cisternas.....	31
3.4.1.2	Tecnologias sociais para produção e dessedentação animal.....	31
3.4.1.2.1	<i>Barragens de pequeno porte ou de salvamento</i>	<i>32</i>
3.5	FONTES HÍDRICAS DO SEMIÁRIDO E FORMAS DE APROVEITAMENTO.....	33
3.5.1	Águas superficiais	33
3.5.2	Águas subterrâneas	34
3.5.2.1	Poços	34
3.5.2.1.1	<i>Dessalinização de água</i>	<i>35</i>
3.5.3	Transporte de água a grande distância.....	36
4	METODOLOGIA	38

4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO	38
4.2	ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS IMPLANTADAS X SETORES CENSITÁRIOS	40
4.2.1	Base de dados para elaboração das normais das variáveis climáticas e índice pluviométrico	41
4.2.2	Identificação de reservatórios e determinação de área de lâmina d'água através de imagens de satélite: Imageamento Orbital.....	41
4.2.2.1	Cálculo da estimativa de volume dos reservatórios a partir da área da lâmina d'água	45
4.2.2.2	Cálculo da bacia de contribuição para a captação de água em reservatórios.....	45
4.2.2.3	Estimativa do volume de captação das barragens x índice pluviométrico.....	46
4.2.3	Metodologia utilizada para a análise das Tecnologias Sociais (TS)	47
4.2.3.1	Cálculos para determinar os volumes potenciais acumuláveis por tecnologias hídricas	48
4.2.4	Base de dados para a coleta de informações dos poços e cálculo da estimativa dos volumes	51
4.2.5	Cálculo da disponibilidade hídrica por setor censitário.....	51
4.2.5.1	Capacidade de armazenamento e produção de água (áreas de armazenamento, desconsiderando chuvas) x setor censitário.....	51
4.2.5.2	Classificação dos setores censitários por volume disponível	52
4.3	ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS INSTALADAS, POTENCIAL HÍDRICO TOTAL E DEMANDA POPULACIONAL	53
4.3.1	Dados demográficos (quantitativos)	54
4.3.1.1	Densidade populacional x setor censitário – (hab. x km ²)	54
4.3.1.2	Habitantes x tecnologias construídas	54
4.3.1.3	Tecnologia x residências	55
4.3.2	Disponibilidade hídrica: Volume <i>per capita</i>.....	55
4.3.2.1	Disponibilidade hídrica/taxa de atendimento hídrico: volume <i>per capita</i>	55
4.4	METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	56
4.4.1	Municípios utilizados no estudo	56

4.4.2	Dados utilizados	59
4.4.3	Índices de extremos e tendências analisadas	60
4.4.4	Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)	61
4.4.5	Índice de Aridez (IA)	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	POTENCIAL DE CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO HÍDRICO POR SETOR CENSITÁRIO A PARTIR DA INFRAESTRUTURA HÍDRICA DISPONÍVEL.....	64
5.1.1	Índice pluviométrico por setor censitário	64
5.1.2	Identificação dos reservatórios e determinação de área de lâmina d'água através de imagens de satélite: imageamento orbital	65
5.1.2.1	Classificação dos reservatórios.....	66
5.1.2.2	Equação de determinação da bacia de contribuição para a captação de água em reservatórios	69
5.1.3	Tecnologias sociais (TS)	70
5.1.3.1	Distribuição de cisternas de 16 mil litros por setor censitário	70
5.1.3.2	Distribuição das cisternas calçadão de 52 mil litros por setor censitário	71
5.1.3.3	Distribuição dos poços por setor censitário	72
5.1.3.4	Taxa de cobertura: distribuição de todas as tecnologias de recursos hídricos por setor censitário	74
5.1.3.5	Disponibilidade hídrica por setor censitário	75
5.1.3.5.1	<i>Volume total armazenável x setor censitário</i>	76
5.1.3.5.2	<i>Volume total potencial x setor censitário</i>	77
5.2	CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS CENSITÁRIAS A PARTIR DA TAXA DE ATENDIMENTO HÍDRICO DA POPULAÇÃO, COM BASE NAS TECNOLOGIAS INSTALADAS E VOLUMES CAPTADOS.....	79
5.2.1	Dados demográficos (quantitativos)	80
5.2.1.1	Densidade populacional por setor censitário	80
5.2.1.2	Relação habitantes x tecnologias	81
5.2.1.3	Tecnologia x residências	82
5.2.1.4	Disponibilidade hídrica: volume <i>per capita</i>	83

5.2.1.4.1	<i>Volume total armazenável x habitantes</i>	83
5.2.1.4.2	<i>Volume total potencial x habitantes</i>	85
5.2.1.4.3	<i>Ranking das regiões e municípios em relação à disponibilidade hídrica</i>	87
5.3	TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, BASEADO NA COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES EXTREMAS (LESTE-OESTE) DO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO	90
5.3.1	Índices de extremos de temperatura	91
5.3.2	Índices de extremos de chuva	93
5.3.3	Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)	96
5.3.4	Índice de aridez	98
5.4	FERRAMENTA DE SUPORTE PARA AUXILIO NA TOMADA DE DECISÃO E CRIAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS.....	100
5.4.1	Potencialidades de desagregação de dados	103
5.4.2	Integração do fluxograma com planejamentos existentes	103
5.4.3	Contribuições para o fortalecimento da política	104
6	CONCLUSÕES	105
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6.2	RECOMENDAÇÕES	106
6.2.1	Validação do fluxograma em diferentes regiões semiáridas	106
6.2.2	Integração com Tecnologias Avançadas	107
6.2.3	Estudos de longo prazo e séries temporais	107
6.2.4	Incorporação de indicadores socioeconômicos e ambientais	107
6.2.5	Engajamento comunitário e participação social	107
6.2.6	Modelagem integrada de recursos hídricos	108
6.2.7	Exploração de fontes alternativas de recursos hídricos	108
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO: ESTUDO DE TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CIMÁTICAS	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DA TESE

As políticas de planejamento de recursos hídricos no semiárido, realizadas apenas em âmbito geográfico das bacias hidrográficas, têm sua eficiência limitada quando analisadas sob a ótica das comunidades difusas, pois a escolha do tipo e a alocação das tecnologias de captação e armazenagem de água, em geral, não dialogam entre si, existindo critérios variados para se determinar qual tecnologia será implantada e onde deve ser instalada. Essa situação tem elevado a disparidade na taxa de atendimento da população rural, principalmente as localizadas em comunidades difusas.

Atualmente, o padrão brasileiro de planejamento hídrico e mesmo os planos hidroambientais de bacias são realizados sob a ótica das áreas das bacias hidrográficas, que, em geral, são regiões muito amplas. Dessa forma, devido à magnitude de área, podem ocorrer perdas de detalhes ambientais e principalmente demográficos, deixando as comunidades rurais “invisíveis” e sem proposições de soluções hídricas. Essa situação tem elevado a disparidade na taxa de atendimento da população rural, principalmente as localizadas em comunidades difusas.

1.2 HIPÓTESE

Quando associado às técnicas de planejamento de recursos hídricos comumente utilizadas que se referendam unicamente na área total da bacia hidrográfica, o planejamento de recursos hídricos, baseado no menor recorte demográfico (setor censitário), pode contribuir para diagnósticos mais precisos e soluções mais efetivas, principalmente em comunidades difusas no semiárido.

1.3 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÕES

O semiárido nordestino é uma região de reconhecida escassez hídrica. Diante dessa realidade, tecnologias para atender o suprimento de água para a população sempre foram alvos de investimentos públicos com a finalidade de aumentar a qualidade de vida das famílias. No entanto, as políticas em geral não dialogam entre si, resultando em áreas descobertas e, por vezes, sobreposições de obras hídricas. Isto amplia a insegurança hídrica, principalmente das populações residentes em área difusas, aprofundando ainda mais situações socioeconômicas reconhecidamente precárias.

Segundo Cirilo *et al.* (2010), os agricultores familiares residentes no semiárido são levados a lançar mão de técnicas de utilização da água que estão em consonância com a possibilidade permanente de restrição hídrica. Essas pessoas vivem em uma região que tem como características climáticas e hidrogeológicas chuvas concentradas em poucos meses do ano, elevada evapotranspiração e ainda solos com baixa capacidade de retenção de água – fatores que induzem a necessidade de armazenamento da água nos períodos de chuva na tentativa de abrandar os efeitos adversos dos longos períodos de estiagem (Pádua, 2013).

Os períodos de meses secos, em que os índices pluviométricos chegam perto de zero, contribuem para a situação frequente de escassez de água e são apontados na maioria dos estudos como os grandes responsáveis pela miséria que atinge a região. Esse tipo de argumento é contraditado por reflexões que afirmam que “A luta contra o subdesenvolvimento em todo seu complexo regional (semiárido) é expressão da monocultura e do latifúndio, do feudalismo agrário e da subcapitalização na exploração dos recursos naturais da região” (Ipea, 2015).

Nos últimos anos, tanto o Governo Federal quanto os estaduais têm investido consideráveis somas de recursos em programas e projetos que objetivam contribuir para a melhoria da qualidade do planejamento hídrico (ANA, 2020).

Atualmente, o padrão de planejamento hídrico é realizado sob a ótica das áreas das bacias hidrográficas (Abessa; Ambrozevicius, 2020), uma região muito ampla. Devido a tal magnitude, podem ocorrer perdas de detalhes ambientais e demográficos, importantes para qualificar melhor os planos. Contudo, as pessoas vivem nos municípios, e é em seu local de residência que elas constroem estratégias de convivência com o clima do semiárido. Portanto, justifica-se a referência analítica do estudo por setor censitário.

Nesse sentido, este estudo propõe-se a avaliar, com base no referencial geográfico da região censitária, a cobertura, a distribuição e a articulação geoespacial das tecnologias hídricas, articuladas com questões demográficas e climáticas. A partir de então, busca-se propor

ferramentas de suporte à tomada de decisão para implantação de tecnologias de recursos hídricos de convivência com o semiárido, no intuito de amenizar os efeitos da insegurança hídrica em comunidades difusas no semiárido brasileiro. Dessa maneira, este estudo justifica-se devido a sua contribuição e suporte à tomada de decisão voltada ao suprimento de água no semiárido nordestino.

O planejamento hídrico no Brasil é geralmente conduzido em escalas amplas, como as bacias hidrográficas, adotadas tanto nos planos de recursos hídricos estaduais quanto nos planos hidroambientais (Abessa; Ambrozevicius, 2020). Embora essa abordagem proporcione uma visão estratégica e integrada, ela frequentemente carece de detalhamento suficiente para atender às especificidades de áreas difusas, especialmente em contextos de alta vulnerabilidade socioambiental, como se verifica no semiárido brasileiro. As metodologias atualmente empregadas tendem a priorizar aspectos macros, o que pode resultar em lacunas importantes no mapeamento e na contabilização de ações em áreas específicas, prejudicando o alcance e a eficácia das intervenções planejadas.

Em contrapartida, as populações convivem diretamente com as condições climáticas locais em seus municípios, desenvolvendo estratégias de adaptação que refletem demandas e características particulares. Nesse sentido, este estudo justifica-se pela necessidade de um novo referencial analítico, adotando o setor censitário como unidade geográfica de análise. Tal abordagem permite maior precisão na avaliação da cobertura, distribuição e articulação geoespacial das tecnologias hídricas, correlacionando-as com variáveis demográficas e climáticas na menor escala possível de se obter dados demográficos padronizados nacionalmente (setor censitário).

O objetivo central é propor uma ferramenta de suporte à tomada de decisão para a implementação de soluções hídricas voltadas à convivência com o semiárido, com ênfase nas comunidades rurais. Essa ferramenta visa não apenas mitigar os impactos da insegurança hídrica, mas também contribuir para a melhoria da gestão dos recursos hídricos, promovendo soluções mais direcionadas e eficazes.

Assim, este estudo oferece uma abordagem inovadora e relevante, ao propor alternativas metodológicas capazes de superar as limitações das práticas vigentes e contribuir significativamente para o desenvolvimento de políticas públicas mais inclusivas e contextualizadas no semiárido nordestino.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolver ferramenta de suporte para auxiliar na tomada de decisão e criação de políticas públicas, tendo em vista a implantação de soluções hídras em comunidades difusas no semiárido brasileiro, com intuito de reduzir os efeitos da vulnerabilidade hídrica.

2.2 ESPECÍFICOS

- Determinar o potencial de captação e armazenamento hídrico por setor censitário a partir da infraestrutura hídrica disponível;
- Classificar as áreas censitárias a partir da taxa de atendimento hídrico da população, com base nas tecnologias instaladas e volumes captados;
- Realizar estudo de tendência de mudanças climáticas, baseado na comparação entre regiões extremas (leste-oeste) do semiárido Pernambucano.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA, ACESSO, GESTÃO E USO DA ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

A crise hídrica global associada à disponibilidade e ao acesso à água para consumo humano e animal tornou-se uma preocupação crescente (Terêncio et al., 2018). Mundialmente, cerca de 2,3 bilhões de pessoas ainda carecem de acesso à água potável segura (WHO; Unicef, 2017), muitas das quais precisam percorrer grandes distâncias diariamente até fontes hídricas (Mellor; Watkins; Mihelcic, 2012). Além disso, a contaminação microbiológica agrava ainda mais esse cenário (Bain et al., 2014).

Apesar de aproximadamente 70% da superfície terrestre ser coberta por água, somente cerca de 3% é água doce, e menos de 1% está disponível para consumo humano. Embora esta quantidade seja teoricamente suficiente para atender múltiplas vezes as necessidades básicas anuais globais, garantir uma gestão democrática e eficaz da distribuição hídrica ainda é um grande desafio (Ricardo; Campanilli, 2007; Setti, 2001).

O uso racional da água e o respeito ao seu ciclo natural seriam essenciais para prevenir riscos que ameaçam a vida no planeta (Souza; Machado, 2018). A demanda mundial por água, que em 2000 foi de 4.000 bilhões de metros cúbicos, poderá aumentar em mais de 58% até 2030, reforçando preocupações quanto à sua disponibilidade futura, especialmente diante do crescimento populacional e concentração em áreas urbanas densamente povoadas (Sharma et al., 2019).

O acesso, gestão e uso da água são considerados um direito humano fundamental, influenciando diretamente o desenvolvimento econômico, social e cultural dos países, conforme indicado nas Metas do Milênio (Gramkow, 2020). No Brasil, embora as questões relacionadas à água ultrapassem o semiárido, é nesta região que políticas hídricas exigem maior articulação entre sociedade civil, governo e setor privado, visando garantir o acesso à água e o desenvolvimento regional sustentável (Petrella, 2021).

Aspectos como irregularidade pluviométrica, secas prolongadas, uso inadequado do solo e desmatamento da Caatinga têm contribuído para processos de desertificação no semiárido. Neste contexto, tecnologias sociais desempenham papel crucial para adaptação e minimização dos efeitos das mudanças climáticas na região (Gramkow, 2020).

Estudos sobre disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro apontaram regiões críticas, como o leste da Paraíba (1.030 m³/hab./ano), leste do Rio Grande do Norte (997

m³/hab./ano), Fortaleza (846 m³/hab./ano) e leste de Pernambuco (819 m³/hab./ano), onde os valores estão abaixo do parâmetro mínimo recomendado pela ONU (1.500 m³/hab./ano). Mesmo sendo um dos semiáridos mais chuvosos do mundo, a alta densidade populacional agrava a escassez hídrica. Comparativamente, Israel apresenta disponibilidade muito menor (370 m³/hab./ano), porém com melhores condições de vida devido a investimentos em tecnologias eficientes, especialmente em reuso de água e recarga artificial de aquíferos (Cirilo, 2015; Rebouças, 1997).

Dentre as tecnologias sociais no semiárido brasileiro, destacam-se as cisternas rurais, reconhecidas como fundamentais no armazenamento doméstico de água devido à facilidade de construção e gestão pelos próprios moradores. Estudos apontaram que uma cisterna com capacidade para 12 mil litros atendeu às necessidades básicas de uma família de cinco pessoas por cerca de oito meses, com consumo diário médio de 10 litros por pessoa. Apesar de abaixo dos padrões da ONU, tal quantidade mostrou-se suficiente para manutenção mínima das atividades domésticas essenciais (Pereira; Cordery; Iacovides, 2012; Santos et al., 2019; Suassuna, 2007).

3.1.1 Aspectos sociais e demográficos no semiárido brasileiro

Um terço da população mundial reside em regiões áridas ou semiáridas. Essa característica ambiental representa 40% das terras habitáveis no globo terrestre. Nessas regiões do mundo, é comum a associação dos baixos níveis de desenvolvimento humano e da pobreza à seca e à irregularidade da distribuição pluviométrica, principalmente em comunidades rurais difusas e em pequenos municípios (Naschold, 2012; Tarrass; Benjelloun, 2012; Yadav; Lal, 2018).

A necessidade de avaliação e de monitoramento constante do IDH em regiões semiáridas é patente, principalmente nos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, pois são operações imprescindíveis para o estabelecimento de ações que contribuam para a mitigação da insegurança hídrica e conseqüentemente para a melhoria das condições de vida dessa população. Estudos demonstram que as famílias expostas à situações de restrição hídrica e baixo IDH são mais vulneráveis às intempéries climáticas e irregularidade na distribuição pluviométrica (Cortez *et al.*, 2022; Rocha; Soares, 2015; Yadav; Lal, 2018).

Representando pouco mais de 12% da população nacional e habitando um território que compreende mais de 13% do país, a população do semiárido brasileiro é bastante significativa. É nesse contexto de restrição hídrica, onde mais de 35% da população vive abaixo da linha de pobreza, com renda domiciliar *per capita* mensal inferior a R\$ 79,55, em que se encontra a

região mais pobre do Brasil. Diversos estudos contemplando prismas multifatoriais (econômicos, sociais e ambientais) apontam para a dificuldade da região semiárida em alcançar minimamente uma situação aceitável do ponto de vista do desenvolvimento (Andrade *et al.*, 2014; IBGE, 2017; Rocha; Soares, 2015).

A população do semiárido está exposta a uma situação peculiar de estagnação de desenvolvimento, que pesquisadores relacionam não somente a questões de renda, mas, também, a um conjunto de fatores relacionados à escassez hídrica, aliados a variáveis socioeconômicas e demográficas. Esse conjunto de características é frequentemente denominado por pesquisadores como armadilha estrutural da pobreza (Buainain; Garcia, 2013; Cortez *et al.*, 2022; Silva; Lima, 2015).

O semiárido é comumente afetado por movimentos migratórios da população. Um fato emblemático foi a seca ocorrida em 1958, quando cerca de 10 milhões de pessoas sem acesso a água abandonaram seus lares. Pode-se citar também o período de 1979 a 1983, que custou para os governos cerca de 1,8 bilhão de dólares em ações emergenciais para conter as consequências da seca (Marengo *et al.*, 2020b).

Pesquisas também apontam que longos períodos de estiagem têm relação direta com prejuízos financeiros e ampliação da insegurança alimentar, principalmente decorrentes da perda de lavouras e mortandade de rebanhos. A seca também está relacionada ao aumento da mortalidade populacional, principalmente a infantil. Essa situação é um pouco menos acentuada onde existe uma infraestrutura de saúde pública minimamente implantada. Os estudos concluem que as recorrentes políticas assistencialistas executadas nessa região são responsáveis pela ineficácia das ações de convivência com a seca no semiárido, bem como pela ampliação dos refugiados climáticos (Alvalá *et al.*, 2019; Pacífico; Neto, 2017; Pires; Ferreira, 2012; Rocha; Soares, 2015).

Apesar de apontar para a insuficiência de políticas públicas que promovessem a transformação produtiva e sociocultural da população de todo o semiárido, diversos estudos reconhecem que, na década de 2000, ações governamentais conseguiram efetivar em algum grau a diminuição da pobreza e da fome na região. Em destaque, evidenciam iniciativas como os programas de construção de cisternas (PIMC e Água para Todos), as ações de transferência de renda (Bolsa Família), os projetos estruturantes como a integração de bacias do Rio São Francisco e os investimentos em pesquisa e educação através da interiorização de universidades, escolas técnicas e centro de pesquisas. No contexto produtivo, os governos assimilaram diversas bandeiras e propostas encampadas historicamente por entidades não governamentais que já atuavam há anos no semiárido (pode-se citar, por exemplo, a Articulação

do Semiárido/ASA), investindo em orientações técnicas baseadas em conceitos de práticas inovadoras de convivência com o semiárido, sendo propulsores de ações sustentáveis. Contudo a abrangência das ações foi restrita, alcançando um número limitado de agricultores familiares, diante do contexto de abismo socioeconômico secularmente enrustado na região (Cortez *et al.*, 2022; Hall, 2006; Melo *et al.*, 2019; Silva; Paes, 2019).

Outro desafio para as políticas de redução da pobreza e desigualdade de escassez hídrica na região semiárida é a grande concentração de terras e fontes de água no meio rural. O contexto fiscal brasileiro, com repetitivos ciclos de crises econômicas, influi negativamente na manutenção dos grandes investimentos sociais e de infraestrutura na região, principalmente quando fica nítido, a partir da análise histórica, que a população do semiárido nunca foi prioridade na política desenvolvimentista nacional (Andrade; Nunes, 2014; Santana; Paiva; Santos, 2015).

Não obstante a população rural estar adaptada à situação permanente de restrição hídrica, estudos indicam que a intensificação das condições climáticas extremas vão demandar políticas mais assertivas e permanentes para promover de forma eficiente o desenvolvimento regional e a adaptação populacional a condições mais severas (Cortez *et al.*, 2022; Santana; Paiva; Santos, 2015).

Confirmando a vulnerabilidade socioprodutiva do semiárido, é extremamente relevante a informação de que, no ano de 2012, período de seca extrema, a produção de milho no estado de Pernambuco foi drasticamente reduzida em 99%, ratificando as consequências do déficit hídrico também para os aspectos produtivos da região (IPCC, 2021).

3.1.2 Marco histórico e legal da gestão hídrica no Brasil

Embora as análises deste estudo se concentrem nos setores censitários e considerando que, no semiárido, muitos recursos hídricos naturais são de difícil acesso – pela ausência de rios perenes e subsolo de alta qualidade –, torna-se imprescindível examinar a legislação que rege o uso das águas, à luz das políticas nacionais de planejamento das bacias hidrográficas.

Para compreender a evolução das bases legais e a relação entre governo e sociedade na gestão dos recursos hídricos, revisou-se a trajetória histórica do tema. Entre as doze bacias hidrográficas brasileiras, as do Rio São Francisco e do Atlântico Leste Nordeste destacam-se para este estudo, abrangendo o estado de Pernambuco.

A Bacia do São Francisco, com área de 631.133 km², tem sua nascente na Serra da Canastra (MG) e percorre trajetórias sul-norte, passando para oeste-leste em seu curso inferior,

conectando as regiões Nordeste e Sudeste e desaguando no Oceano Atlântico entre Alagoas e Sergipe. Apesar de transitar por áreas do semiárido com precipitações inferiores a 500 mm, as regiões de maior altitude apresentam índices anuais entre 1.000 e 2.000 mm, o que garante a vazão do rio (Abessa; Ambrozevicius, 2020).

A Bacia do Atlântico Leste Nordeste, situada quase que integralmente no semiárido, ocupa 3,4% do território nacional e abrange os estados de Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Essa região, com densidade demográfica aproximadamente quatro vezes a média nacional, enfrenta severas pressões ambientais e apresenta a menor disponibilidade hídrica do país (Abessa; Ambrozevicius, 2020).

3.1.2.1 Marco histórico e legal

Antes de 1800, as tentativas de captação de água e construção de aquedutos no Brasil foram, em sua maioria, infrutíferas. Foi somente após a chegada da família real em 1808 que surgiram as primeiras normas e decretos para regular o uso dos recursos hídricos, estabelecendo limites de consumo, cobrança e instalação de hidrômetros, especialmente no Rio de Janeiro (ANA, 2005). A inauguração da primeira estação de tratamento de esgoto, em 1896, em Ouro Preto (MG), inseriu-se num plano mais amplo de abastecimento e saneamento (Fonseca; Prado Filho, 2010).

No período republicano, o Código de Águas – promulgado pelo Decreto nº 24.643, de 10 de junho de 1934 – consolidou o marco legal sobre o tema até a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) em 1997 (Abessa; Ambrozevicius, 2020). Influenciado pelo contexto internacional, o Brasil passou a reconhecer os corpos hídricos como domínio público, com regulamentação centralizada, e a considerar a água potável e o saneamento como direitos essenciais.

A PNRH, norteadada pelos princípios de Dublin – revisados na Eco Rio 92 (Porto; Porto, 2008) – e fundamentada nas bacias hidrográficas (WMO, 1992), instituiu em 1997 o Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos. Essa política estabelece que a água é um bem público e recurso natural limitado, com valor econômico, e que seu uso deve ser múltiplo, priorizando o consumo humano e a dessedentação animal. Além disso, define a bacia hidrográfica como a unidade de gestão e enfatiza a importância da participação conjunta de governo, usuários e comunidades para decisões eficazes.

Para viabilizar a implementação da PNRH, foi criado o Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos (SNIRH), atualmente administrado pela ANA, que consolida dados essenciais para a gestão das águas. Os três componentes do SNIRH – gestão e análise de dados

hidrológicos, regulação do uso e planejamento dos recursos – orientam os planos de recursos hídricos desenvolvidos pelos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs), que funcionam como “parlamentos da água” (Abessa; Ambrozevicius, 2020).

3.1.2.2 Situação atual das políticas de gestão e regulamentação de águas no Brasil

Até 2017, operavam 233 comitês de bacias e foram elaborados 202 planos de bacia, ações que possibilitaram a cobrança pelo uso da água e arrecadaram R\$ 2,37 bilhões. Foram concedidas mais de 8.500 outorgas pela ANA (correspondentes a vazões superiores a 1.500 m³/s) e 75.000 outorgas pelos estados (acima de 2.500 m³/s).

Apesar da volumosa disponibilidade hídrica em muitas bacias, o Brasil enfrenta crises hídricas recorrentes – especialmente no Nordeste e, em menor escala, no Sudeste (ANA, 2019). Para aprimorar o gerenciamento dos recursos, foi instituído o Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNDARH), que centraliza informações sobre os usuários e suas outorgas, facilitando o monitoramento e a identificação de irregularidades, bem como a aplicação de penalidades.

Os Termos de Alocação Negociada de Água foram elaborados para assegurar a disponibilidade dos usos prioritários estabelecidos em lei e monitorar a transferência de água entre bacias, como exemplificado pela Transposição do Rio São Francisco, que integra essa bacia às do Atlântico Nordeste Ocidental e Leste, ampliando a oferta no semiárido (ANA, 2019).

Além dessas medidas, outras iniciativas emergentes têm sido implementadas para antecipar problemas de escassez e poluição: a Sala de Crise, que agiliza a articulação entre os responsáveis pela adaptação e resposta; o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), focado nas áreas urbanas e no reúso de água diante do crescimento populacional e das mudanças climáticas; o Programa de Abatimento da Poluição das Bacias Hidrográficas (Prodes), que remunera o tratamento de esgoto; e o Programa Produtor de Água, que incentiva a recuperação das matas ciliares e a redução da erosão por meio do pagamento por serviços ambientais (Abessa; Ambrozevicius, 2020).

3.2 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E ACESSO À ÁGUA NAS REGIÕES SEMIÁRIDAS

As regiões semiáridas do mundo registram anos hidrológicos com precipitações abaixo da média e secas severas, aumentando a vulnerabilidade das populações à variabilidade climática e à escassez de água (Bhering et al., 2021). Nessas áreas, as perdas

por evapotranspiração superam o consumo humano – que varia de 10 a 40 litros/pessoa/dia, proporcional às condições climáticas (Santos et al., 2019) – e cerca de 1 bilhão de pessoas, majoritariamente de baixa renda, vivem nesses territórios que abrangem um terço da superfície global (Malagnoux; Sène; Atzmon, 2007).

Com o agravamento das mudanças climáticas, eventos de secas extremas tornam-se mais frequentes, caracterizados pelo aumento da temperatura média, redução dos períodos chuvosos, ocorrência de chuvas intensas em curto intervalo e maior número de dias secos (IPCC, 2013; Marengo; Torres; Alves, 2017). As secas prolongadas deterioram a qualidade da água em reservatórios – como barragens e açudes –, prolongando o tempo de retenção e elevando a concentração de nutrientes, biomassa algal, turbidez e eutrofização (Brasil, 2017; Bosco, 2018; Rocha Júnior et al., 2018; Vanderley et al., 2021). Assim, a captação da água da chuva e seu armazenamento adequado revelam-se essenciais do ponto de vista social, ambiental e econômico.

Estudos apontam que, em períodos de estiagem, o esgotamento total dos reservatórios pode ocorrer em territórios semiáridos (Leite; Becker, 2019). Nesses casos, a completa secagem pode ser seguida pela oferta de água de melhor qualidade, com menor intensidade de florações de cianobactérias, maior transparência, redução na turbidez e menor concentração de nutrientes – evidência observada em açudes do semiárido etíope (Teferi et al., 2014; Naselli-Flores, 2003; van Geest et al., 2005) e corroborada em regiões temperadas (Moss et al., 2013; van Geest et al., 2005). Assim, apesar de preocupante por representar, em muitos casos, o único manancial disponível, a secagem completa pode ser considerada benéfica para a qualidade da água (Cortez et al., 2022).

No contexto brasileiro, a alternância entre períodos de excedente hídrico e longos déficits é característica das regiões semiáridas, onde a pluviosidade, influenciada por fatores globais e locais, varia significativamente ano a ano (Nobre; Reid; Veiga, 2012). Apesar do Brasil figurar entre os dez países com maior disponibilidade de recursos hídricos, a distribuição irregular desse recurso intensifica a escassez nas áreas semiáridas (Bhering et al., 2021). Segundo Bouvy et al. (2003), o semiárido brasileiro abriga cerca de 70.000 reservatórios de médio e grande porte, dos quais muitos são suscetíveis à eutrofização em virtude da baixa profundidade, altas temperaturas e reduzida pluviosidade, fatores que elevam as taxas de evaporação (Barbosa et al., 2012; Medeiros et al., 2015).

Entre 2012 e 2019, o Nordeste experimentou a pior estiagem dos últimos 60 anos, afetando aproximadamente seis milhões de agricultores familiares e ocasionando prejuízos econômicos e sociais, além de comprometer a quantidade e qualidade da água (Cunha et al.,

2019). Destaca-se o biênio 2011/2012, considerado o de seca mais rigorosa pelo índice de seca integrado, quando grande parte da região foi classificada como submetida a “seca severa” e áreas centrais, a “seca excepcional” (Cortez et al., 2022).

Para mitigar os efeitos dessas secas, estratégias governamentais – como o uso de caminhões-pipa, seguros agrícolas, programas de transferência de renda (Bolsa Estiagem) e o Programa Garantia-Safra (Bacelar; Favareto, 2020) – vêm sendo empregadas. Contudo, diante da intensidade dos eventos, tais medidas revelam-se insuficientes, exigindo ações emergenciais mais robustas (Marengo et al., 2020b; Cortez et al., 2022). Nesse cenário, torna-se urgente a realização de estudos que integrem variáveis ambientais, sociais, demográficas e econômicas para a formulação de políticas públicas que amenizem a escassez hídrica no semiárido (Garfi et al., 2011).

Com quase 90% da região semiárida, os estados do Nordeste concentram os piores índices de disponibilidade hídrica do país. Em especial, Pernambuco – foco deste estudo – registra a menor disponibilidade nacional, com cerca de 1.270 m³/habitante/ano, agravada pela predominância de formações cristalinas rochosas que dificultam a captação por poços (Santos et al., 2019).

3.3 CLIMA NO SEMIÁRIDO

Apesar de previsíveis, as secas figuram entre os desastres naturais mais devastadores, dada a elevada quantidade de pessoas afetadas e os prejuízos econômicos (Rajsekhar; Singh; Mishra, 2015). O Nordeste brasileiro, tradicionalmente impactado por secas intensas, evidencia graves consequências econômicas e sociais (Hastenrath, 1990; Hastenrath; Wu; Chu, 1984). A alta variabilidade interanual e espacial da precipitação – em algumas áreas, inferiores a 400 mm/ano – associada à vulnerabilidade socioambiental, intensifica os desafios regionais (Kousky, 1979; Carmo; Lima, 2020). Desde a década de 1970, estudos têm explorado mecanismos de teleconexão e a dinâmica espaço-temporal das chuvas.

Pesquisas demonstram que a temperatura da superfície do mar exerce forte influência sobre o regime pluviométrico, ao alterar sistemas de ventos e a distribuição de massas de ar, o que pode reduzir as chuvas sazonais, como observado no Nordeste brasileiro (Kousky, 1980; Rao; Lima; Franchito, 1993; Moura; Shukla, 1981; Marengo et al., 2016).

As tendências globais indicam que a redistribuição das chuvas afetará, de forma mais acentuada, as populações de baixa renda (Musayev; Burgess; Mellor, 2018). Projeções apontam para a redução de precipitação nas latitudes subtropicais – como no Mediterrâneo, México e partes da América Central – e para o aumento em outras regiões, sobretudo nas

altas latitudes e em áreas específicas da Ásia (Zhang et al., 2013; Terêncio et al., 2018). O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC evidencia que eventos extremos têm se intensificado globalmente, elevando os riscos de desastres, tais como inundações e secas (IPCC, 2021; Torres; Marengo, 2013). Dados da OMM apontam que, nas últimas cinco décadas, desastres naturais aumentaram significativamente, impactando sobretudo as nações mais pobres (WMO, 2021).

No semiárido brasileiro, a seca compromete a segurança hídrica, energética e alimentar, sendo um dos eventos naturais mais recorrentes e impactantes, sobretudo na região Nordeste, onde 94% dos afetados residiam em 2019 (MMA, 2017; Chou et al., 2014; Regoto et al., 2021; Torres et al., 2012; Vieira et al., 2015; ANA, 2020). Embora os padrões pluviométricos variem naturalmente no Brasil (Alvares et al., 2013; Cavalcanti et al., 2009), a predominância de eventos extremos – como estiagens, secas e inundações – permanece, conforme demonstrado pelos registros (ANA, 2019).

Estudos recentes apontam para o agravamento das secas no semiárido, que se tornam mais severas, frequentes e prolongadas. Com a continuidade das emissões de gases de efeito estufa, projeções indicam um aquecimento global de até 1,5° C entre 2030 e 2052, sendo que já observamos um aumento de 1,0° C em relação aos níveis pré-industriais (IPCC, 2021; Torres; Marengo, 2013). Ademais, o aumento da demanda hídrica na agricultura, aliado a intensas evapotranspirações – conforme modelos de circulação global – pode transformar a Caatinga em vegetação de terras áridas entre 2070 e 2100 (Marengo et al., 2020b). Essas mudanças agravam a vulnerabilidade regional, afetando a produção rural, a segurança alimentar, a renda e os padrões migratórios (Gondim et al., 2018; Cortez et al., 2022). Diversas pesquisas evidenciam as tendências dos indicadores climáticos em diferentes regiões do Brasil, ressaltando que Pernambuco integra uma das áreas de maior vulnerabilidade socioclimática, sofrendo com secas prolongadas (Frich et al., 2002; Marengo et al., 2020; 2021; Nóbrega; Farias, Santos, 2015; Xavier et al., 2016; Torres et al., 2012; Cunha et al., 2018; Marengo et al., 2018; 2022).

3.4 DISPOSITIVOS PARA ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

3.4.1 Tecnologias sociais

As tecnologias sociais são definidas como produtos, técnicas e/ou metodologias reaplicáveis que contribuem de forma decisiva para o desenvolvimento social, sendo desenvolvidas com e para as comunidades, devendo ser de baixo custo e fácil aprendizagem

(Fundação Banco do Brasil, 2004).

Tecnologias sociais: uma política pública

Apesar de as tecnologias sociais no Brasil datarem do início da década de 1970, quando vários pesquisadores começaram a relatar de forma expressiva as tecnologias de baixo custo como ferramentas para minimizar os problemas hídricos no semiárido, e de terem sido idealizadas de fato pela sociedade civil nos anos 1990 (ASA, 2022), apenas em 2002 a construção de cisternas passa a ser apoiada de forma mais significativa pelo Governo Federal. Contudo, a partir de 2004, essa ação passa a ser parte da política de superação da pobreza, garantia da segurança alimentar e convivência/adaptação climática (Gramkow, 2020).

No início do programa P1MC, o foco era a construção de cisternas de 16 mil litros chamadas de cisternas de primeira água, cujo uso principal é o consumo humano (beber e cozinhar). Posteriormente, ampliou-se o programa para englobar também as tecnologias de segunda água, assumindo como principal tecnologia dessa ação as cisternas-calçadão. Incluem-se também neste contexto as cisternas de enxurrada (Figura 1D), as cisternas-telhado (Figura 1B), as barragens subterrâneas (Figura 2A), os barreiros-trincheira (Figura 2C) e os tanques de pedra (Figura 2B), entre outros (Moura *et al.*, 2019). A partir de 2013, a implantação de cisternas passa a ser uma política permanente no Brasil, com legislação específica denominada Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais (TS) — Programa Cisternas (Gramkow, 2020).

Figura 1 – Cisterna de 16 m³ utilizada como cisterna de primeira água (A), cisterna-telhado (B); cisterna-calçadão (C) e cisterna de enxurrada (D), cisternas de segunda água ou de produção



Fontes: ASA (2022); Gramkow (2020).

Figura 2 – Barragem subterranea (A), tanque de pedra ou caldeirão (B); barreiro-trincheira, TS de segunda água ou de produção



Fontes: ASA (2022); Gramkow (2020).

Como base é utilizado o Cadastro Único (CadÚnico) para Programas Sociais do Governo Federal, como critério de seleção dos beneficiados pelo programa de primeira água. Para o atendimento no programa de segunda água, foi instituído que a família deveria dispor, preferencialmente, de outra cisterna para captar e armazenar água para o consumo próprio, geralmente de capacidade tradicional (16 mil litros), ou que no mínimo a família tivesse uma fonte de água potável, buscando-se, dessa forma, priorizar o atendimento para consumo humano. Também contempla-se o objetivo de não desviar o conceito produtivo das tecnologias de segunda água. Ou seja, a cisterna de primeira água deve sempre que possível preceder à implantação de uma cisterna de segunda água (Gramkow, 2020).

O semiárido nordestino engloba 1.172 municípios distribuídos nos 9 estados da região e contava com cerca de 858.859 cisternas construídas até 2017. Após esse ano, houve uma diminuição expressiva de investimentos dentro do programa de cisternas. As tecnologias sociais de primeira e segunda águas estão distribuídas em todo o Brasil, encontrando-se, em sua imensa maioria, no Nordeste, com destaque para os estados da Bahia, que conta com mais de 281 mil cisternas, o que representa 28.4% do total de cisternas construídas no semiárido; Ceará e Pernambuco, que possuem 241.4 e 165.3 mil cisternas respectivamente, correspondendo a 24.4% e 16.7% do total de cisternas de primeira e segunda águas.

Vale ressaltar que o estado do Maranhão apresenta o menor número de cisternas construídas, com apenas 1.107 unidades. Isso é justificado pelo fato de a grande parte do seu território não pertencer à região do semiárido – atualmente o estado conta com apenas dois municípios no semiárido (Sudene, 2021).

Em 2023 o programa cisternas foi retomado pelo governo federal, com a contratação de 58.300 tecnologias para o semiárido e em 2024 com a contratação de mais 25 mil unidades. Em todo o Brasil, até o ano de 2024, foram implantadas mais 1,1 milhão de tecnologias (Brasil, 2024).

3.4.1.1 Cisternas

A intensificação da implantação de tecnologias de captação e utilização de água de chuva no Brasil ocorreu a partir do projeto conjunto chamado Programa de Um Milhão de Cisternas (P1MC), que foi formado pela rede de ONGs Articulação Semiárido Brasileiro (ASA) para ser executado pela sociedade civil de maneira descentralizada nos mais diversos níveis, como: comunidades, municípios, microrregiões e estados (ASA, 2022)..

O programa tinha por finalidade fornecer água potável para um milhão de famílias rurais no semiárido brasileiro por meio da construção de um milhão de cisternas de 16 m³ (Figura 1A) para coletar água da chuva em telhados (ASA, 2022). O Brasil possui 12% da água doce do mundo, no entanto, os recursos hídricos são distribuídos de maneira desigual no país e existem grandes discrepâncias regionais no que refere ao acesso à água (Moraes; Perkins, 2007). Dos 23 milhões de pessoas residentes no semiárido brasileiro, nove milhões vivem no meio rural (ASA, 2022).

O P1MC foi desenvolvido pela ASA para a região do semiárido brasileiro em meados de 1990 e teve seus primeiros passos dados na região do Vale do Jequitinhonha com a construção de cisternas por ONGs locais e italianas no ano de 2003 (Garfi *et al.*, 2011). As cisternas do P1MC mostraram rapidamente que melhoravam a qualidade de vida dos pequenos agricultores (Galizoni; Ribeiro, 2002).

O projeto mostrou-se altamente eficaz, uma vez que, em 90% dos casos, as residências do semiárido nordestino têm área de telhado capaz de captar água para uma família composta por 4 pessoas. Além disso, pode-se suprir suas necessidades básicas (beber e cozinhar) por um período de sete meses. Sem falar que o uso de água de chuva pode gerar uma economia de até 61% na região Nordeste (Santos *et al.*, 2019).

3.4.1.2 Tecnologias sociais para produção e dessedentação animal

O programa “Uma terra e duas águas” (P1+2) surgiu em 2007, criado pela ASA, com a finalidade de ampliar o armazenamento de água para as famílias proveniente das comunidades rurais. A principal finalidade dessa tecnologia é a produção de alimentos e a dessedentação animal, contribuindo, de certa forma, como suporte para as famílias carentes (Santos, 2013). Teve como base o desenvolvimento de cisterna com volume de 52 m³ e uma área denominada de calçadão com 200 m², atualmente conhecida como cisterna calçadão (Figura 1C). Tem como objetivo minimizar o problema de acesso à água para a produção de alimentos, possibilitando

uma melhoria na segurança alimentar e nutricional de milhares de famílias brasileiras (Bosco *et al.*, 2018; Galizoni; Ribeiro, 2002).

O P1+2 associa o programa de formação e mobilização social para a convivência com o semiárido, da ASA, ao Programa Um Milhão de Cisternas, o P1MC. Vale ressaltar que essa iniciativa estimula a construção de processos participativos para o desenvolvimento rural. Ou seja, o programa conta com a participação direta dos agricultores em todas as etapas de construção. Além disso, os agricultores são capacitados para o uso racional e seguro dos recursos hídricos disponíveis em suas residências. Outras tecnologias com a mesma finalidade foram desenvolvidas, como é o caso da construção das cisternas enxurdas, cisternas-telhado, barragens subterrâneas, barreiro trincheira e tanques de pedra ou caldeirões. Todas apresentam o mesmo princípio de funcionamento, ou seja, aproveitar os recursos hídricos provenientes das chuvas (ASA, 2022; Bosco *et al.*, 2018; Galizoni; Ribeiro, 2002).

3.4.1.2.1 Barragens de pequeno porte ou de salvamento

As ações de açudagem no Nordeste evidenciam-se de forma mais contundente após a seca que aconteceu entre os anos de 1825 e 1830. Há o registro de construção dessas tecnologias na Zona da Mata, através das quais se desviavam águas dos riachos, tendo a dupla função de acúmulo de água e de fornecimento de energia hidráulica a moinhos. Registros revelam que, a partir dessas iniciativas, os pequenos açudes foram ganhando espaço entre as estratégias de abastecimento de água no semiárido (Molle, 1992).

Historicamente as ações públicas de açudagem no semiárido são realizadas de duas formas. A primeira é a prática de construção de grandes reservatórios com potencial de regularização plurianual, em bacias hidrográficas de maior porte. Esses reservatórios têm capacidades de acúmulo na ordem de bilhões de metros cúbicos e estão distribuídos em toda a região, contudo em número limitado. Uma das construções mais emblemáticas sobre a açudagem no semiárido é o Açude do Cedro, na cidade de Quixadá, Ceará, cuja construção foi iniciada em 1873, sob determinação do Imperador D. Pedro II, e concluída em 1906.

A segunda política nesse mesmo contexto de acumulação de água baseia-se na construção de barragens de pequena capacidade de retenção, com não mais que poucos milhares de metros cúbicos, comumente chamados de barreiros, espalhados em grande número por toda a região Nordeste. Contudo, a água retida neste sistema é submetida a altos índices de evaporação potencial que podem chegar a 2.500 mm ao ano. Essa ação é mais acentuada entre os meses de novembro a fevereiro, sendo esse o fator determinante para que a água não

permaneça acumulada durante as secas prolongadas, fato que gera o aproveitamento deficiente desses mananciais (Cirilo, 2008).

O principal objetivo do pequeno açude (barreiro) na região semiárida é de armazenar água entre as estações secas. Ele tem o objetivo de criar uma “ponte” entre os períodos chuvosos. Contudo, são ineficientes em secas prolongadas, principalmente diante de suas características físicas, apresentando-se demasiadamente rasos em comparação com a extensão da lâmina d’água. Portanto, apesar de serem uma cultura secular que auxilia no desenvolvimento de culturas produtivas, contribuindo com o suprimento alimentar das famílias, jamais deve ser considerados como a única alternativa para garantir a disponibilidade de água durante a seca (Medeiros *et al.*, 2011; Molle, 1992).

Estudos realizados na década de 1990 apontavam que a região semiárida brasileira só ficava atrás em número de açudes para a Índia. Notadamente os açudes concentravam-se próximo às regiões de maior densidade populacional, principalmente nos estados do Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, em áreas de geologia cristalina e relevo favorável. Estimava-se que já naquele período existiam cerca de 70 mil açudes com mais de 1.000 m² de área de lâmina d’água; pouco mais de 1.500 açudes com capacidade de acúmulo de água maior que 100.000 m³; e cerca de 450 barragens com potencial de armazenamento maior que um milhão de metros cúbicos (Molle, 1992).

3.5 FONTES HÍDRICAS DO SEMIÁRIDO E FORMAS DE APROVEITAMENTO

3.5.1 Águas superficiais

Cirilo (2008) afirma que, no tocante a rios, a região semiárida do Nordeste é caracterizada por ser pobre em volume de águas superficiais. Justifica-se essa situação pelo fato de as precipitações pluviométricas concentrarem-se em curto espaço de tempo. Somando-se a isso, há características geológicas, como solos predominantemente rasos sobre rochas cristalinas, situação que dificulta a existência de rios perenes que tenham nascentes no semiárido. Em geral, os rios permanentes que estão no Nordeste têm nascentes em outras regiões, com destaque para o Rio São Francisco, que nasce na Serra da Canastra (MG), ou outros rios que cortam parte dos estados do Maranhão e Piauí (Parnaíba). Entretanto, a maioria dos rios temporários se localizam no semiárido, desde o Ceará até o norte da Bahia.

3.5.2 Águas subterrâneas

No que diz respeito às potencialidades hídricas subterrâneas, Cirilo (2008), citando Demétrio (2007), relata que 80% do território nordestino é constituído por rochas cristalinas com elevado teor de sais, caracterizadas por baixa vazão (1 m³/h). O autor alerta que a exceção ocorre nas formações sedimentares, em geral possuidoras de águas de melhor qualidade, com vazões generosas e, por vezes, superiores a dezenas ou centenas de m³/h. Esses aquíferos têm a capacidade de armazenar e ceder água em quantidade e qualidade para o consumo humano.

Rebouças (1997) ressaltou que “as reservas de água doce subterrânea nas bacias sedimentares do Nordeste permitem a captação anual de vinte bilhões de metros cúbicos por ano, sem colocar em risco as reservas existentes”, afirmando que se trata de um volume apreciável de água. Entretanto, faz-se necessário observar as particularidades dessas reservas: no que tange à concentração espacial, por não serem contínuas, a profundidade em muitos locais torna a operação e os custos indesejáveis. Também há incerteza quanto aos mecanismos de recarga.

Por fim, Cirilo (2008) ainda alerta que as reservas de água subterrâneas na região do semiárido devem ser utilizadas preferencialmente para uso humano, não recomendando essas fontes para atender a outras demandas regionais.

3.5.2.1 Poços

A perfuração de poços tem sido outra opção que historicamente encontrou no semiárido espaço para a convivência com a seca. No entanto, Cirilo (2008) tem chamado a atenção para suas limitações, principalmente pelo fato de os poços na maioria terem baixa vazão, alto teor de sais, necessidade de perfurações em grandes profundidades e estarem aptos à utilização por períodos limitados, devido ao alto índice de poços secos, por longos períodos. Dialogando com Cirilo (2008), estudos preliminares da Companhia de Serviços Geológico do Brasil (SGB), nome atual da antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) no Semiárido apontaram que 77% dos poços da região estudada apresentavam água salobra e salgada com sólidos dissolvidos totais SDT mg/l maiores que 501 (mg/l), portanto, com água não recomendada para o consumo humano (CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2000).

Ainda no que diz respeito ao potencial hídrico de poços no semiárido, ressalta-se a importante estratégia utilizada por populações ribeirinhas que consiste na utilização de poços às margens ou mesmo no leito dos rios secos (poços amazonas). Apesar de se tratar de situações

isoladas, configuram-se como um interessante potencial hídrico subterrâneo (Paiva; Cabral; Freitas, 2013).

Estudos realizados pela CPRM indicam que em Pernambuco foram perfurados 44.960 poços até o ano de 2025, para o semiárido Pernambucano, dados de 2018 indicam que 19.060 destes, estão nesta região e apresentam uma vazão média de 3 m³/hora (CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2000; Peixinho; Diniz, 2019).

3.5.2.1.1 Dessalinização de água

Na tentativa de superar problemas com a má qualidade da água dos poços, no que tange à salinidade, a tecnologia mais apropriada recomenda o uso de dessalinizadores de osmose reversa. Deve-se considerar o concentrado proveniente do uso dessa tecnologia e o moderado custo de implantação, operacionalização e manutenção. Contudo, os dessalinizadores atuais se mostram altamente eficazes para realizar a potabilidade da água, principalmente em comunidades difusas, uma vez que seu sistema apresenta um baixo custo de energia, além da possibilidade de utilização de fontes de energia alternativas como a eólica e a solar.

O processo de osmose reversa tem se mostrado eficiente, uma vez que o rendimento de recuperação da água varia entre 20% e 70%, dependendo do nível de salinidade, dimensionamento do equipamento e volume de água tratada (Guerreiro, 2009).

No semiárido Pernambucano, existem atualmente duas diretrizes para a implantação dos sistemas dessalinizadores. Uma delas é o Programa Água Doce (PAD), coordenado pela Secretaria de Desenvolvimento Agrário, que objetiva a implantação e /ou recuperação de 170 sistemas. O PAD realizou estudo prévio de diagnóstico, através do qual foi construída uma hierarquização municipal. Partiu-se de um trabalho que consistiu na realização do levantamento de dados sociais, ambientais e técnicos em 510 comunidades rurais, além da limpeza e teste de vazão de 340 poços, para a caracterização e a ratificação das comunidades indicadas. Esses dados, agrupados em sistema metodológico próprio do programa, geram o Índice de Condição de Acesso à Água (ICAA), no qual devem ser enquadrados os municípios por ordem de necessidade (Brasil, 2017).

Em outra linha de ação com o mesmo objetivo de implantação e manutenção de dessalinizadores, o Governo Estadual, por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento (SRHS), acompanha a operação e implantação de 178 dessalinizadores. A implantação de dessalinizadores pela SRHS utiliza como critérios norteadores um agrupamento de índices conhecidos e utilizados em vários projetos sociais, como: Índice de Desenvolvimento

Humano, níveis de escassez de água potável, capacidade de gestão e operação dos sistemas implantados, e importâncias ambiental, social e/ou econômica. Para esse programa, também é muito importante que o sistema de dessalinização seja implantado em local que tenha possibilidade de essa estrutura dialogar com outras políticas públicas implantadas ou em implantação, garantindo melhor eficácia do programa e permanência a longo prazo (Silva, 2022).

3.5.3 Transporte de água a grande distância

Tradicionalmente a construção de adutoras a partir de mananciais ou ainda as chamadas transposições de bacias têm sido as soluções mais utilizadas para o transporte de água a longas distâncias. Essas obras são extremamente importantes para garantir o abastecimento dos centros urbanos localizados no semiárido. Elas têm sido executadas com sucesso em vários estados do Nordeste, como o canal da integração, no Ceará, adutoras do Rio Grande do Norte, adutora do Agreste e do Pajeú em Pernambuco e a principal obra nacional, que é a integração de bacias do Rio São Francisco, que beneficiará quatro estados do Nordeste, entre os quais, além dos já mencionados, a Paraíba. Contudo, apesar da imensa importância dessas obras, são necessárias outras ações que garantam água para as comunidades difusas, tendo em vista que as adutoras e o sistema de transposição não objetivam prioritariamente o suprimento de água para esse público (Cirilo, 2008).

Mesmo não sendo formalmente o foco das ações da transposição do Rio São Francisco, a disponibilização da água dos canais ou mesmo a perfuração de poços para servir água às comunidades difusas que estão situadas às margens dos canais têm sido alvo de ações públicas no estado de Pernambuco, principalmente através das ações do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). O PISF, nos ramais dos eixos norte e leste, está implantando 52 sistemas simplificados de distribuição de água que abrangem um total de 175 comunidades que tiveram que ser reassentadas pela passagem do canal, ou mesmo que estejam a até 5 km deles, distribuídas em 10 municípios do semiárido Pernambucano, visando beneficiar diretamente uma população de 54.519 pessoas.

Em Pernambuco, os canais da integração nos eixos leste e norte (Figura 3) servirão principalmente para reforçar os abastecimentos de diversas adutoras de âmbito estadual que beneficiam as populações do Sertão e do Agreste e que em geral precisam de complementação para poderem se adequar ao aumento da demanda hídrica da população (Cirilo, 2015).

4 METODOLOGIA

A ferramenta de suporte para a auxiliar na tomada de decisão e criação de políticas públicas, tendo em vista a implantação de tecnologias hídras em comunidades difusas no semiárido brasileiro, apresentada neste estudo é desenvolvida a partir dos resultados obtidos através do cruzamento e da recombinação de dados demográficos, climáticos e de tecnologias hídras de acesso a água, bem como da análise georreferenciada da distribuição desses elementos.

A proposta metodológica para responder às questões da pesquisa formulada está dividida em três partes, elaboradas de forma independente, mas que, contudo, conduzem para a construção de toda a base de dados e conceitos que culminam com o alcance dos objetivos propostos. Tal proposição pode ser descrita da seguinte forma:

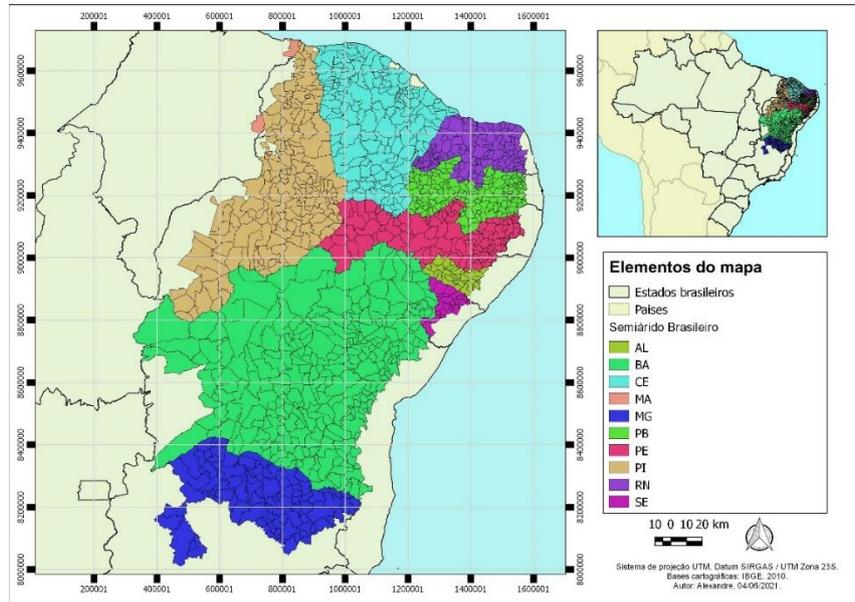
- Determinar o potencial de captação e armazenamento hídrico por setor censitário, a partir de suas tecnologias instaladas;
- Classificar as áreas censitárias a partir da taxa de atendimento hídrico da população, baseando-se nas tecnologias instaladas e nos volumes captados;
- Realizar estudo de tendência de mudanças climáticas, tomando como base a comparação entre regiões extremas (leste-oeste) do semiárido Pernambucano;
- Desenvolver ferramenta de suporte para auxiliar na tomada de decisão e criação de políticas públicas, tendo em vista a implantação de soluções hídras em comunidades difusas no semiárido brasileiro, com intuito de reduzir os efeitos da vulnerabilidade hídrica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

A presente pesquisa teve como área de estudo a zona rural do semiárido Pernambucano, inserido no semiárido brasileiro (Figura 4), analisada a partir do referencial geográfico dos setores censitários localizados nessa região. O estado de Pernambuco tem 185 municípios, sendo 127 abrangidos pela região semiárida. O retângulo envolvente dessa área está localizado entre 7°16'5,9" e 9°28'33,6" de latitude sul e 35°18'3,6" e 41°21'25,2" de longitude oeste.

Conforme ilustrado na Figura 5, observa-se uma redução progressiva: inicialmente, a área total do estado (A); em seguida, os setores censitários do semiárido determinados pelo IBGE 2010 (B); e, por fim, a região de estudo, que abrange exclusivamente os setores rurais do semiárido pernambucano (C). Embora a diferença de área entre os setores totais do semiárido (B) e os rurais (C) seja quase imperceptível, a análise demográfica revela que mais da metade da população do semiárido reside em áreas urbanas, evidenciando uma discrepância acentuada na densidade populacional entre os contextos urbano e rural (IBGE, 2010).

Figura 4 – Delimitação do semiárido brasileiro, com detalhamento dos estados e municípios

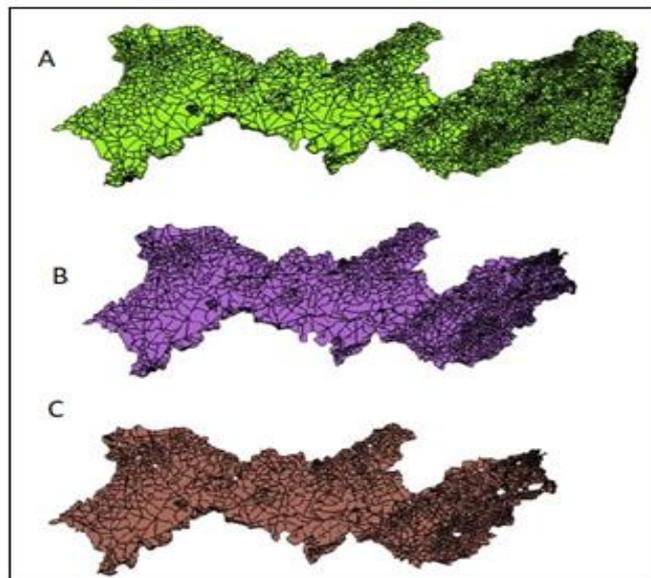


Fonte: Sudene (2021), elaboração própria (2025).

Este estudo foi realizado a partir de dados do censo IBGE ano 2010. Neste documento a população residente nos 3.168 setores censitários rurais do semiárido Pernambucano representa um total de 1.391.912 pessoas, morando em 369.575 residências, o que resulta num total de 3,77 habitantes por residência (IBGE, 2010).

Embora a pesquisa utilize dados do Censo 2010, é relevante apresentar informações atualizadas para contextualizar a realidade demográfica da área de estudo. Nesse sentido, os dados do Censo de 2022 indicam que Pernambuco possui 9.058.155 habitantes, dos quais 51% residem na região semiárida (IBGE, 2022).

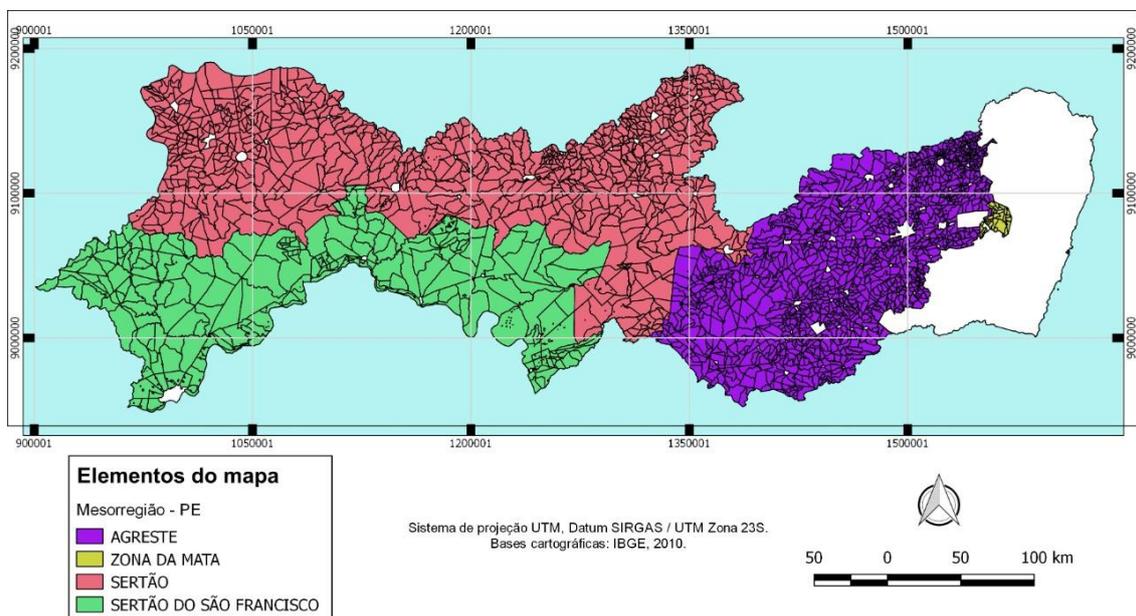
Figura 5 – (A) Áreas censitárias de Pernambuco; (B) Áreas censitárias do semiárido Pernambucano; (C) Áreas censitárias da zona rural do semiárido Pernambucano



Fonte: Elaboração própria (2025).

As áreas censitárias situadas na zona rural do semiárido em Pernambuco distribuem-se quase em sua totalidade em três mesorregiões distintas (Figura 6): Agreste (1.663), Sertão (970) e Sertão do São Francisco (470). Contudo uma fração mínima encontra-se na região da Mata (65). A título de análise, os setores censitários inseridos no semiárido, mas figurando na mesorregião na Zona da Mata, serão considerados como Agreste, uma vez que fazem parte de municípios fronteiriços com essa mesorregião, inclusive, em planejamentos em nível estadual, figuram ora entre os municípios da Zona da Mata, ora nos municípios do Agreste (IBGE, 2010).

Figura 6 – Distribuição regionalizada dos setores censitários rurais no semiárido de Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2 ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS IMPLANTADAS X SETORES CENSITÁRIOS

Para se determinar o potencial de captação e armazenamento hídrico por setor censitário, foram realizados cruzamentos de dados a partir do cálculo dos volumes totais de armazenamento/produção hídrica de suas tecnologias instaladas e índice pluviométrico. Inicialmente foi apresentando o método utilizado para calcular a normal pluviométrica por setor censitário. Na sequência, descrevem-se as tecnologias instaladas em comunidades difusas do semiárido Pernambucano e justificam-se as metodologias utilizadas neste trabalho para calcular os volumes potenciais e efetivos de produção ou armazenamento de água dessas tecnologias, referenciados pelo comportamento pluviométrico da região onde estão construídas.

4.2.1 Base de dados para elaboração das normais das variáveis climáticas e índice pluviométrico

Os quantitativos diários de chuva, temperatura máxima e temperatura mínima, para o período de 1980 a 2016, foram obtidos a partir da base de dados em grade de Xavier; King; Scanlon (2015; 2016). Esses números provêm de uma série histórica climatológica, com mais de 30 anos de dados, período mínimo recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para análises sobre clima Xavier *et al.* (2016). Os resultados encontrados por estudos posteriores ressaltam a confiabilidade dos dados em grade desenvolvidos por Xavier *et al.* (2016), comparados com diferentes bases de dados climatológicas. Esse sistema apresentou melhor desempenho em praticamente todos os índices analisados, apresentando-se como base de dados que melhor se aproxima das informações observadas em estações de superfície (Battisti; Bender; Sentelhas, 2019; Bender; Sentelhas, 2020).

Os dados do estudo de Xavier, King e Scanlon (2016) são provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). Os dados do INMET são provenientes de estações meteorológicas que coletam todas as variáveis meteorológicas acima mencionadas. Já os dados da ANA e do DAEE limitam-se à precipitação. A ANA fornece a principal fonte de dados de Registros Pluviométricos por meio de 2.436 estações pluviométricas (67% de todos os pluviômetros). De acordo com Xavier, King e Scanlon (2016), foi verificado se havia dados duplicados de pluviômetros ou estações meteorológicas fornecidos por mais de uma agência. E não foi observado nenhum dado de estação meteorológica com coordenadas duplicadas.

O processamento dos dados em questão gerou uma base de informações pluviométricas que permitiu ao estudo em tela evidenciar os volumes médios mensais e anual, e finalmente a normal pluviométrica por setor censitário para o período de 1980 a 2016. A descrição completa da metodologia de controle de qualidade dados estabelecidos encontra-se no trabalho realizado por Xavier, King e Scanlon (2016).

4.2.2 Identificação de reservatórios e determinação de área de lâmina d'água através de imagens de satélite: Imageamento Orbital

Tendo como objetivo a estimativa da temperatura superficial na área de estudo, a partir de uma captação orbital, na primeira etapa do estudo, foi utilizada uma base de informação em modo *raster* proveniente dos sensores Operational Land Image (OLI) e Thermal Infrared Sensor

(TIRS) a bordo do oitavo satélite da série Landsat. Este, por sua vez, caracteriza-se por ser uma plataforma heliossincrônica orbitando a 705 quilômetros de altitude, com um ciclo temporal de 16 dias, estando equipado com um sensor multiespectral de captação passiva, imageando nas faixas do visível e do infravermelho, com uma resolução espacial variando de 15 a 100 metros.

A Tabela 1 apresenta um resumo das características do instrumento:

Tabela 1 – Especificações técnicas do sensor

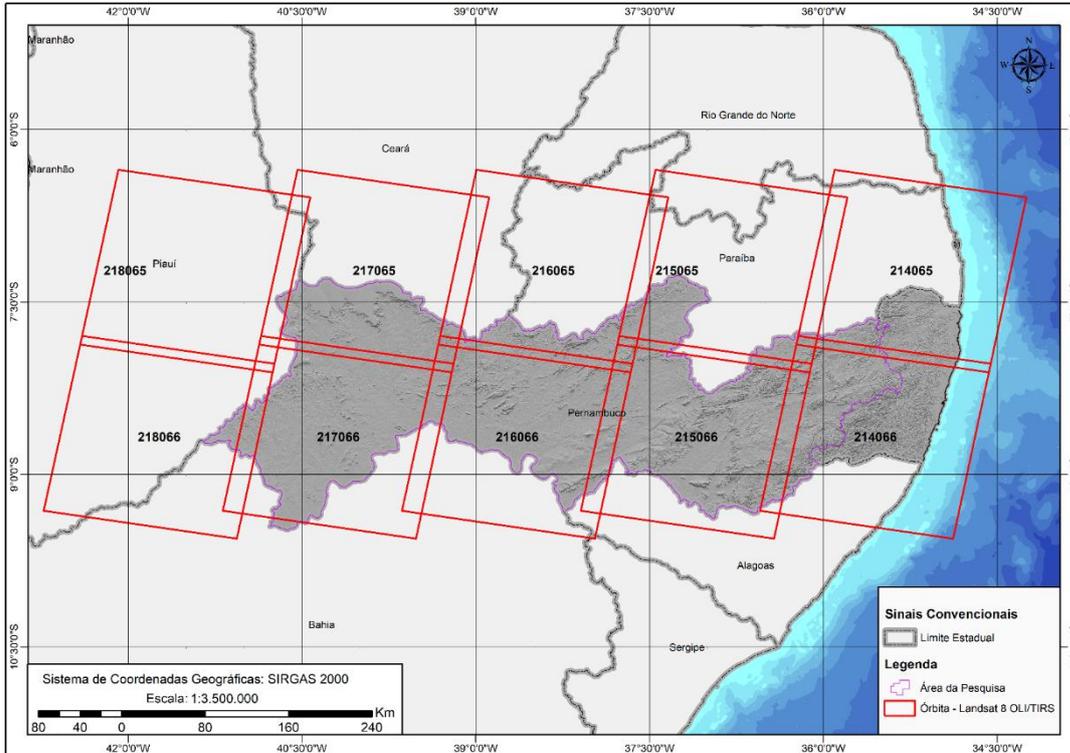
LANDSAT 8 OLI/TIRS				
Banda	Faixa espectral	Resolução espectral (μm)	Comprimento de onda médio (μm)	Resolução espacial
1	Coastal/Aerosol	(0,435 - 0,451)	0,443	30m
2	Blue	(0,452 - 0,512)	0,482	30m
3	Green	(0,533 - 0,590)	0,561	30m
4	Red	(0,636 - 0,673)	0,655	30m
5	NEAR	(0,851 - 0,879)	0,865	30m
6	SWIR-1	(1,566 - 1,651)	1,609	30m
7	SWIR-2	(2,107 - 2,294)	2,201	30m
8	PAN	(0,503 - 0,676)	0,59	15m
9	Cirrus	(1,363 - 1,384)	1,373	30m
10	TIR-1	(10,60 - 11,19)	10,895	100m (30m)
11	TIR-2	(11,50 - 12,51)	12	100m (30m)

Fonte: Adaptado de USGS (2016).

Por sua vez, o imageamento orbital dessa plataforma é executado em um padrão de grade, sendo este, por sua vez, organizado a partir de órbitas e pontos. Dessa forma, a área de estudo está, em sua totalidade, compreendida entre as órbitas 214 e 219 nos pontos 65 e 66 (Figura 7). Sendo assim, as imagens utilizadas para a pesquisa foram adquiridas na plataforma do Google Earth Engine, como base no produto L2SP Collection 2 – Level 2, já possuindo correção atmosférica, no intervalo temporal de 01/01/2013 até 31/12/2021, abrangendo as quadras seca e chuvosa. Por sua vez, foram utilizadas todas as imagens com uma taxa de cobertura de nuvens menor ou igual a 50% de recobrimento da cena, objetivando a filtragem de todos os *pixels* limpos, sem a influência de nuvens, nuvens cirrus ou efeitos de sombra, de acordo com a série temporal. A filtragem dos dados resultou em um total de 1.497 imagens, para as dez órbitas/pontos de acordo com os parâmetros estabelecidos. Após a aquisição dos

dados, a etapa seguinte foi a elaboração dos índices de umidade.

Figura 7 – Imageamento orbital da plataforma da área de estudo em um padrão de grade, compreendido nas órbitas de 214 a 219 nos pontos 65 e 66



Fonte: Elaboração própria (2025).

Índices radiométricos são uma combinação matemática a partir de diferentes bandas espectrais. Essa transformação numérica semianálítica surgiu como um meio de análise que busca atenuar os efeitos atmosféricos e, conseqüentemente, o realce e a extração das propriedades biofísicas de diferentes alvos na superfície terrestre.

Nesse sentido, o uso de índices de umidade ou água tem como objetivo avaliar a presença e as alterações na qualidade da água, tanto de forma intrafoliar, a partir da cobertura dos dosséis, quanto em corpos hídricos superficiais. De forma geral, índices de umidade possuem valores adimensionais no intervalo de -1 a 1, portanto o indicativo de água em um determinado alvo compreende o intervalo de valores positivos do índice, em contraste com os demais alvos que não apresentam conteúdo úmido, sendo, portanto, de valores abaixo de zero.

Dessa forma, o índice utilizado para a identificação de alvos hídricos foi o Normalized Difference Water Index (NDWI) formulado por Gao (1996). Sua formulação consiste em uma diferença normalizada com base na resposta espectral inversa nas regiões do verde e do infravermelho próximo. Para o Landsat 8 OLI/TIRS, esses comprimentos de onda centram-se, respectivamente, a 561nm e 865nm. A seguir seguem as fórmulas dos índices utilizados.

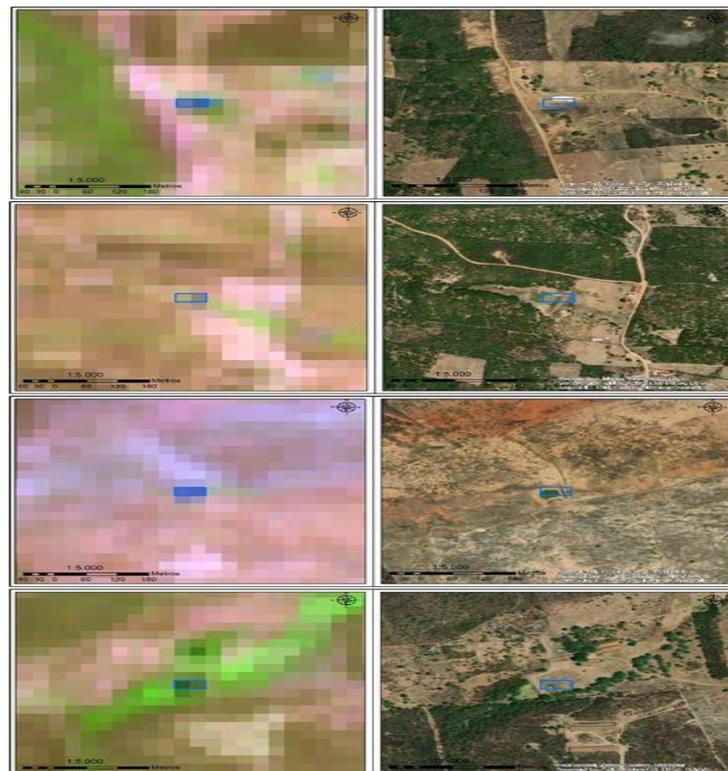
$$NDWI = \frac{R_{B3} - R_{B5}}{R_{B3} + R_{B5}} \quad (\text{Equação 1})$$

A extração do total de corpos hídricos foi desenvolvida considerando os *pixels* de maior valor para o NDWI em cada cena (NDWI máximo), tomando como parâmetro a série temporal estabelecida. Com base na imagem resultante, foram aceitos todos os valores do NDWI máximo iguais ou superiores a 0 (zero).

A partir dessa relação, foi gerado um arquivo vetorial, no qual se admitiram todos os polígonos possuidores de uma área maior ou igual a 0,18 hectares, que representa exatamente no mínimo 2 *pixels*, posto que cada *pixel* do sensor escolhido representa uma área de 30 m x 30 m.

Para efeito de comparação e validação do resultado obtido pelo índice, foram utilizadas as bases de dados da ANA sobre massa d'água, em formato vetorial, na escala de 1:100.000; as imagens do satélite CBERS 04A, a partir da Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM) com resolução espacial de 2 metros; e o banco de imagens da ESRI e do Google Earth Pro (Figura 8).

Figura 8 – Processo de supervisão das imagens, comparativo entre imagens do satélite CBERS 04^a (esquerda) e Google Earth Pro (direita)



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2.2.1 Cálculo da estimativa de volume dos reservatórios a partir da área da lâmina d'água

Para fins de cálculo dos volumes dos reservatórios, foi utilizada equação já sugerida na literatura, cujos achados revelam que o volume de um açude pode ser avaliado a partir da sua superfície (obtida na base de fotos aéreas ou de satélite), através da seguinte fórmula empírica estabelecida por Molle (1994):

$$\text{Equação geral} \quad V_x = 1.98 \times S_x^{1.001} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde S_x é a área de lâmina d'água captada por imagem de satélite.

Utilizando a equação geral, foi possível estimar o volume acumulável dos reservatórios encontrados (Molle, 1994).

4.2.2.2 Cálculo da bacia de contribuição para a captação de água em reservatórios

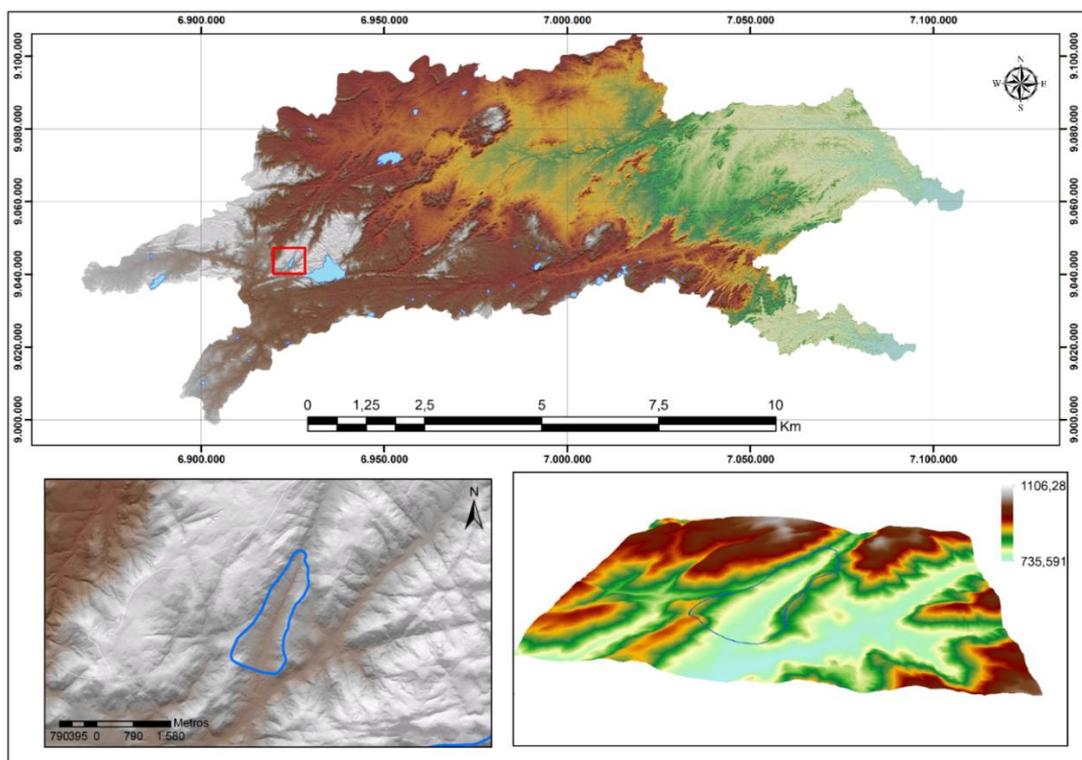
O dimensionamento das bacias de contribuição dos reservatórios mostrou-se ser uma meta extremamente desafiadora, posto que a literatura é limitada para métodos ou técnicas que sejam eficientes para esse fim, a partir de dados limitados, como apenas área de superfície e volume do reservatório.

Para o alcance dessa meta, inicialmente foram inseridos no QGIS arquivos de Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 5 metros, para as bacias hidrográficas do Capibaribe e do Ipojuca, elaborados a partir dos dados do Programa de Mapeamento do Território Pernambucano – Pernambuco Tridimensional (PE3D). Com base na modelagem do terreno, foram extraídas variáveis geomorfológicas, como declividade e relevo sombreado, em paralelo à elaboração de perfis de elevação e modelos em 3D. Em conjunto, os dados obtidos com base no modelo do terreno, consoantes à sobreposição das imagens e à projeção da base vetorial dos espelhos d'água, mapeados na etapa anterior, permitiram identificar as localizações coincidentes entre os reservatórios e os pontos terminais ou nas confluências de rios e riachos. Após estabelecer a localização dos reservatórios nos trechos de riachos visíveis na projeção, determinou-se que elas poderiam ser consideradas como exutório do que, a partir daquele momento, convencionou-se ser uma microbacia (Figura 9).

Selecionaram-se 37 reservatórios para realizar uma amostragem, que permitiu, a partir dos dados altimétricos e de características fisiográficas e morfométricas do terreno, detectados por meio das imagens detalhadas no MDT, realizar o processo de vetorização, de forma manual, das bacias de contribuição hídrica de cada uma delas, definindo o próprio reservatório como ponto exutório.

Após o mapeamento e a mensuração das áreas de contribuição hídrica dos 37 reservatórios, e de posse das áreas de lâmina d'água de cada uma delas, foi realizado um teste de correlação concomitantemente a um modelo de regressão linear, com base no qual se verificou a existência de correlação confiável (maior que 0,9) entre a área de lâmina d'água e a área da bacia de contribuição dos reservatórios. Por meio da equação de regressão linear, foi possível estimar os dados para todas os reservatórios encontradas neste estudo.

Figura 9 – Modelo digital do terreno e localização das bacias de contribuição, na última imagem (sentido horário), observa-se a demarcação do ponto exutório da microbacia de contribuição, situada na extremidade mais estreita da delimitação apresentada.



Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2.2.3 Estimativa do volume de captação das barragens x índice pluviométrico

O cálculo da estimativa do volume anual de captação dos reservatórios (V_{max}) baseia-se no tamanho da área da bacia de contribuição hídrica (A), bem como no volume médio da precipitação local (P). Para aferir a precipitação, foi utilizada a normal pluviométrica anual, calculada para cada setor censitário onde situam-se os reservatórios. Outro parâmetro levado em consideração foi o coeficiente de escoamento superficial (C), que em pesquisas no semiárido Molle (1994), orienta o uso de valores de 5% a 15% da precipitação anual média. Dessa forma, a critério do pesquisador neste estudo utilizou-se $C = 10\%$.

Para o cálculo do volume captado pelos açudes, foi utilizada a seguinte equação:

$$V_{max} \text{ m}^3 = P \text{ (mm)} \times C \times A \text{ (km}^2\text{)} \quad \text{(Equação 3)}$$

4.2.3 Metodologia utilizada para a análise das Tecnologias Sociais (TS)

Os dados das tecnologias sociais foram coletados a partir de informações contidas no Programa Cisternas, através dos banco de Dados(BD) gerenciados pelo Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome (MDS), de tal modo que se consideraram dados de quantidade, tipo de TS implantada e posição geográfica.

Em relação aos BDs citados, é importante salientar que são dois arquivos. O primeiro deles contém dados de 189.132 TS do programa de 2ª água, que objetiva implantar tecnologias de recursos hídricos de produção e dessedentação animal – no total, foram 10 tipos de tecnologias diferentes, implantadas de 2008 a dezembro de 2017; em Pernambuco, foram construídas neste período 34.337 mil TS de 2ª água. O segundo arquivo traz dados das TS de 1ª água, sendo exclusivamente composta de cisternas de 16 mil litros, construídas entre os anos de 2003 e 2017 – no total são dados referentes a 910.357 mil cisternas, 133.647 das quais construídas em Pernambuco.

Ambos os bancos de dados trazem informações sobre: número do município cadastrado no IBGE; estado; nome do município; comunidade; número da tecnologia (presente apenas no BD das TS de 1ª água); tipo de executor; número do convênio; registro das datas de início e fim da construção; número de GPS; e, finalmente, tipo de tecnologia construída.

Para tratamento dos dados, inicialmente foi realizada uma normatização das coordenadas geográficas. Nessa primeira etapa, foram detectadas inconsistências e excluídos os dados resultantes de tecnologias que não poderiam ser plotadas em mapas de sistemas GIS.

Em seguida, as tecnologias foram plotadas utilizando o *software* R Core Team e distribuídas de acordo com seu posicionamento georreferenciado em todo o semiárido Pernambucano, sendo apresentadas por meio de mapas.

Para desenvolvimento da parte gráfica foi utilizado o *software* R Core Team (2024), bem como os pacotes de códigos, tidyverse (2023), sf (2023), dplyr (2023), geobr (2023), ggplot2 (2016), readxl (2023), ggspatial (2023).

O terceiro passo foi relacionar o ponto georreferenciado de cada tecnologia ao código do setor censitário no qual ela foi construída. Esse processo possibilitou gerar tabelas eletrônicas, atribuindo as tecnologias a partir do código de referência do setor censitário (ID) criado pelo IBGE. Após esse processo, foram excluídas todas as tecnologias implantadas fora da região semiárida, bem como as implantadas no semiárido, porém nos setores censitários situados em área urbana, uma vez que o objetivo da pesquisa é o estudo das áreas exclusivamente rurais.

Realizado o procedimento de classificação descrito, constatou-se que o universo amostral de TS resultou em descarte da ordem de 6% da quantidade inicial (167.984) informada pelo banco de dados do Ministério, referente às tecnologias sociais implantadas em Pernambuco. As inconsistências encontradas estavam todas relacionadas a erros na inserção de dados das coordenadas de GPS.

Após excluir as TS instaladas em áreas urbanas, restaram 134.383, das quais 104.221 cisternas de 16 mil litros e 30.094 TS de 2ª água, distribuídas em 8 tipos diferentes, sendo: Barreiro Trincheira, Bombas d'água populares (BAP), Barragem Subterrânea, Barraginha, Cisterna Calçada, Cisterna de Enxurrada, Tanque de Pedra e Cisterna de 16 m³ (Tabela 2).

Tabela 2 – Número total de tecnologias sociais implantadas em Pernambuco

Tipo de Tecnologia Social (TS)	Quantidade	% em relação ao total de tecnologias implantadas	Destinação
Total TS BD - MDS	167.984	100%	133.647 - 1ª Água
Total de TS PE - Dados normatizados	157.154	94%	34.337 - 2ª Água
Total de TS - Área Rural	134.315	85%	
Barreiro Trincheira	1.293	0,96%	
BAP	57	0,04%	
Barragem Subterrânea	206	0,15%	
Barraginha	247	0,18%	
Cisterna Calçada	23.683	17,63%	
Cisterna de Enxurrada	3.977	2,96%	
Tanque de Pedra	631	0,47%	
Cisterna de 16 m ³	104.221	77,59%	
Total TS de 2ª água: setor cen. rural	30.094	22%	
Total TS de 1ª água: setor cen. rural	104.221	78%	

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2.3.1 Cálculos para determinar os volumes potenciais acumuláveis por tecnologias hídricas

Após ordenar todas as TS por código do setor censitário, a tabela em Excel permitiu separar os tipos de TS e atribuir a cada um deles os dados necessários para calcular o volume efetivo acumulável, como capacidade de armazenamento (bombeamento para as BAP), área de captação/contribuição e coeficiente de escoamento para cisternas de 16 mil litros, cisternas calçada, cisternas de enxurrada, barreiros de trincheira, tanques de pedra e barraginhas, além de coeficientes de porosidade/infiltração para barragens subterrâneas (Costa; Costa Filho, 2015).

Para relacionar as “tecnologias sociais x microdrenagem”, inicialmente é necessário calcular o potencial delas para a captação de água e consequentemente diminuir o escoamento superficial resultante das precipitações. Apesar de a fórmula ser universal, deve-se atentar para a variável C (coeficiente de escoamento superficial), que difere de acordo com a superfície de captação. Para as tecnologias barragem subterrânea e BAP, a equação teve que ser adaptada substituindo a variável C pelo coeficiente de infiltração C_i .

O cálculo do potencial de água de chuva a ser captada pelas áreas de cobertura deve ser representado pela Equação 4, segundo Palhares (2016):

$$V_{\text{chuva}} = A \times P \times C \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

V_{chuva} = volume de água da chuva a ser captado (m^3);

A = área de cobertura (m^2);

P = precipitação (ano);

C = coeficiente de escoamento superficial;

C_i = coeficiente de infiltração (utilizado nas barragens subterrâneas).

Para as tecnologias BAP, foi estipulada uma vazão média de 3 m^3 /hora e um bombeamento de 4 horas/dia (ASA, 2013; Cirilo, 2008).

Para as barragens subterrâneas, foi necessário adotar valores fixos médios, visto que o banco de dados acessado não continha informações em relação ao tamanho do barramento, profundidade e extensão das aluviões. Para tanto, foi atribuída uma área de largura de vale (barramento) de 60 metros, comprimento do aluvião a montante de 1 km e espessura (profundidade) de 3 metros (Costa; Costa Filho, 2015).

No que se refere à determinação das bacias de contribuição hídrica das barragens subterrâneas, adotou-se, neste estudo, o mesmo critério utilizado para os reservatórios convencionais, o qual estabeleceu o dimensionamento da microbacia de contribuição por meio de uma equação correlacionada com a área do espelho d'água. Considerando que a área de armazenamento das barragens subterrâneas neste estudo foi padronizada em 60.000 m^2 , procedeu-se à aplicação desse valor na referida equação de correlação (Equação 5), desenvolvida para os reservatórios convencionais, conforme descrito a seguir.

Área de contribuição/microbacia (ha)

$$\text{Equação: } y = 36,4431 + 33,7182 \times x \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

a = coef. linear = 36,443,

$b = \text{coef. angular} = 33,7182,$

$x = \text{área do reservatório},$

$y = \text{área da bacia (ha)},$

Com as variáveis das tecnologias definidas, foi necessário utilizar os valores da normal pluviométrica de cada setor censitário, previamente calculados com dados do período de 1980 a 2016, obtidos a partir da base de dados em grade de Xavier, King e Scanlon (2015; 2016).

Para o cálculo dos índices de escoamento superficial das tecnologias que contam com o solo como área de captação (cisternas de enxurrada, barreiros de trincheira e barraginhas), foram utilizadas lâminas escoadas da ordem de 10% da precipitação anual média, segundo sugere a literatura (Molle, 1994; Brasil, 2017a; 2017b; 2018).

Para as cisternas de dezesseis mil litros e os calçadões, os coeficientes médios (C) adotados foram os sugeridos nas literaturas (Ghisi, 2006; Santana, 2015).

Em relação às áreas de captação das tecnologias construídas sobre rochas ou rochedos, tal qual os tanques de pedra, foi utilizado estudo de rochas de fraca permeabilidade, representadas por rochas cristalinas decompostas ou fraturadas, arenitos e calcários (Cepfs, 2011; Jatobá; Lins, 2008; Peixinho; Diniz, 2019). As variáveis utilizadas foram agrupadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo dos dados e variáveis utilizados para estimativas das áreas de contribuição e capacidade de armazenamento das tecnologias hídricas estudadas

Tecnologia	Capacidade de armazenamento em m ³	Referência bibliográfica	C ou porosidade	Referência bibliográfica	Área de captação/ contribuição em m ²	Referência bibliográfica
Barragem de trincheira	500	(Brasil, 2017c)	0.1	(Molle, 1994)	10.000	(Brasil, 2017c)
Barraginha/microaçud e*	1.000	(Brasil, 2018)	0.1	(Molle, 1994)	382.976,00	
Tanque de pedra	115	(Cepfs)	0.7	(Jatobá; Lins, 2008)	2.000	(Cepfs, 2011)
BAP (vazão 3.000 x 4h/dia)	3	(ASA, 2013)	N/A	N/A	4	(ASA, 2013)
Poço (vazão 3.000 x 4h/dia)	3	(CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2000)	N/A	N/A	4	(Cirilo, 2008)
Cisterna de 16 m ³	16	(Brasil, 2017b)	0.8	(Ghisi, 2006)	85	(Ghisi, 2006)
Cisterna-calçadão	52	(Brasil, 2017d)	0.5	(Santana, 2015)	200	(Brasil, 2017d)
Cisterna de enxurradas	52	(Brasil, 2017a)	0.1	(Molle, 1994)	10.000	(Brasil, 2017a)
Barragem subterrânea*	27.000	(Costa; Costa Filho, 2015)	0.15	(Costa; Costa Filho, 2015)	2.387.523	

*O cálculo da área de contribuição foi realizado a partir da equação de correlação encontrada durante o estudo.

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.2.4 Base de dados para a coleta de informações dos poços e cálculo da estimativa dos volumes

A base de dados para a identificação dos poços foi acessada a partir do *site* do Serviço Geológico do Brasil (SGB). Identificou-se que em Pernambuco foram perfurados até o ano de 2018 cerca de 30.342 poços, sendo 19.060 destes perfurados na zona rural do semiárido. Para a determinação da vazão média, foi utilizado um volume de 3 m³/hora, e o tempo médio de utilização do poço/dia foi de 4 horas, tendo em vista que sua utilização, na maioria das vezes, restringe-se apenas ao dessedentação dos caprinos e ovinos, animais predominantes nos sistemas de produção dos agricultores de base familiar dessa região, por razão de suas águas apresentarem salinidade acima do concebido para o consumo humano. Os mesmos parâmetros para os poços foram utilizados na tecnologia social bomba de água popular (BAP) (CPRM, 2000; Peixinho; Diniz, 2019, Silva, 2022).

Diferentemente das tecnologias de captação e armazenamento de água, fator no qual o estudo concentrou-se em encontrar dados sobre o volume potencial de armazenagem, área de captação e volume precipitado sobre essa área, para os poços os dados relevantes foram a vazão e o tempo médio de uso dia. Destarte, considera-se que os poços são tecnologias “produtoras” de água e não de armazenagem. Contudo, no cálculo final, os volumes produzidos foram tratados como volumes potenciais armazenados.

Com a carência de informações precisas sobre vazão (Q) e horas de bombeamento/dia (H) para poços no semiárido, foram estipulados uma vazão média de 3 m³/hora e um bombeamento de 4 horas/dia, representado pela Equação 6 (CPRM, 2000; Cirilo, 2008):

$$VB_{\text{água}} = Q \times H \text{ (Equação 6)}$$

Onde:

$VB_{\text{água}} \text{ m}^3$ = volume de água bombeado por dia

$Q \text{ m}^3$ = vazão média por hora

H = quantidade de horas de bombeamento por dia

4.2.5 Cálculo da disponibilidade hídrica por setor censitário

4.2.5.1 Capacidade de armazenamento e produção de água (áreas de armazenamento, desconsiderando chuvas) x setor censitário

A capacidade de armazenamento (volume total armazenável) é representada através da somatória do volume do reservatório de todas as tecnologias implantadas no setor censitário.

Para esse cálculo, é desconsiderado o índice pluviométrico, tendo em vista que o objetivo é mensurar o volume de armazenamento da capacidade instalada.

Para fins de cálculos, os volumes dos reservatórios de todas as tecnologias são considerados fixos (Tabela 3), exceto os volumes de armazenamento dos reservatórios, que foram calculados por meio da área de lâmina de água a partir de metodologia específica, já apresentada anteriormente.

Tabela 3 – Volumes de armazenamento predefinidos para cada tecnologia implantada

Tecnologia	Capacidade de armazenamento em m³
Barreiro de trincheira	500
Barraginha	1000
Tanque de pedra	115
BAP (vazão 3.000 x 4h/dia) *	12
Poço (vazão 3.000 x 4h/dia) *	12
Cisterna de 16 m ³	16
Cisterna-calçadão	52
Cisterna de enxurradas	52
Barragem subterrânea	27000

*Para os poços e BAP, levou-se em consideração volume de água bombeado por dia (VB_{água} m³) de 12 m³
 Fonte: Elaboração própria (2025).

Para alcance do objetivo de determinar o potencial de captação e armazenamento hídrico por setor censitário, a partir do cálculo dos volumes potenciais de armazenamento e produção hídrica de suas tecnologias instaladas, foram realizados dois processos.

Inicialmente, calculou-se apenas o total da capacidade de armazenamento (tecnologias de captação pluviométrica e armazenamento) e produção (poços) de água, a partir do volume das estruturas de acúmulo de água, independentemente de haver ou não precipitação. Esse resultado foi determinado como volume total armazenável.

4.2.5.2 Classificação dos setores censitários por volume disponível

A metodologia utilizada para determinar o volume disponível por setor censitário utilizou os dados do volume total armazenável de cada estrutura hídrica, combinados com os dados da normal pluviométrica do setor censitário onde se encontram.

Esse processo resultou na estimativa da capacidade de armazenamento (volume total

armazenável), sendo possível também realizar o cálculo de disponibilidade hídrica por setor censitário e estimar o volume total potencial disponível para armazenamento, através da equação de captação de água, onde a resultante é o volume em metros cúbicos:

Equação: $V (m^3) = A \times P \times C \div 1.000$ (Equação 7) onde,

Onde:

V – Volume (m^3)

A - Área de captação (m^2);

P - Índice pluviométrico (mm);

C - Coeficiente de escoamento superficial.

Os dados de *disponibilidade hídrica por setor censitário* possibilitam analisar se a tecnologia implantada tem condições de captar e armazenar água no seu limite volumétrico de armazenamento, ao menos uma vez durante o ano.

Ressalta-se, que a *disponibilidade hídrica por setor censitário* se limita à capacidade volumétrica da área de armazenamento de cada tecnologia, ao passo que o *volume total potencial* disponível para armazenamento representa o total de água que a tecnologia poderia acumular, levando em conta a área de captação e o índice pluviométrico, desprezando o tamanho do reservatório.

4.3 ANÁLISE DAS CORRELAÇÕES ENTRE TECNOLOGIAS INSTALADAS, POTENCIAL HÍDRICO TOTAL E DEMANDA POPULACIONAL

Para classificar as áreas censitárias a partir da taxa de atendimento hídrico da população, utilizando relações entre tecnologias instaladas, potencial hídrico total e demanda populacional, utilizaram-se dados censitários de 2010, levantamento das populações residentes na região rural semiárida do estado de Pernambuco, com recorte geográfico das áreas censitárias.

Posteriormente, utilizando o Microsoft Excel, os dados demográficos do público-alvo foram recombinaados com dados da distribuição georreferenciada das tecnologias hídricas e dados secundários como volume potencial e efetivo acumulado, analisados a partir do setor censitário e representados em mapas de: densidade populacional; relação habitantes x tecnologias; tecnologia x residências.

Também foi realizada a classificação das áreas censitárias por taxa de atendimento hídrico, encontrada a partir das relações entre disponibilidade hídrica x setor censitário e

disponibilidade hídrica x população residente (volume *per capita*).

4.3.1 Dados demográficos (quantitativos)

Os dados demográficos analisados levam em consideração as recombinações numéricas classificando as áreas censitárias sob esses aspectos.

4.3.1.1 Densidade populacional x setor censitário – (hab. x km²)

Para classificar os setores censitários levando em consideração a densidade populacional, foram utilizados os dados do censo contidos na coluna V002 (moradores em domicílios particulares permanentes) e divididos pelo tamanho do setor censitário informado no mesmo documento: “Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário”. Dessa forma, foi encontrada a densidade demográfica dos setores localizados exclusivamente na zona rural do semiárido Pernambucano, (IBGE, 2010).

Os dados observados da densidade demográfica por setor censitário foram exportados para o *software* R Core Team, onde foi realizada classificação das regiões por densidade.

4.3.1.2 Habitantes x tecnologias construídas

Para possibilitar a análise do atendimento da população rural em relação às tecnologias de recursos hídricos, foi elaborado um mapa que permitiu a distribuição das áreas censitárias em 7 classes distintas.

Inicialmente foram exportados para planilhas os dados georreferenciados de cada tecnologia hídrica, permitindo quantificar o total por setor censitário. Em seguida, foi atribuída a cada área o número total de habitantes. O passo seguinte foi realizar a divisão do número de pessoas residentes na mesma região pelo total de tecnologias instaladas na mesma área. O resultado dessa relação foi exportado para o R Core Team para finalmente gerar o mapa de classes dos setores censitários, com a relação de quantas pessoas existem para cada tecnologia implantada.

Quanto menor a relação entre habitantes por tecnologia, mais a população da região está melhor atendida, ao passo que, quanto maior a quantidade de pessoas para acessar uma tecnologia de armazenamento hídrico, possivelmente a região tem uma situação de maior vulnerabilidade hídrica.

Por essa razão, os valores que estejam entre 1 e 4 representam setores censitários com uma boa distribuição de tecnologias, visto que o número médio de habitantes por residência na região de estudo é de 3,77. Ou seja, se existir uma proporção de até 4 habitantes por tecnologia, significa dizer que, ao menos, existe uma tecnologia por residência. Em situações ideais, quanto menor essa razão, habitantes x tecnologias, melhor será a possibilidade de segurança hídrica.

4.3.1.3 Tecnologia x residências

A relação entre o número de tecnologias por residência é um importante parâmetro a ser analisado, visto que diversas tecnologias sociais são de caráter e uso familiares, portanto, servem para atender a uma única residência.

Para realizar a correlação entre tecnologias e residências em cada setor censitário, foi necessário primeiramente relacionar a tecnologia hídrica ao número de identificação (ID) referente ao setor censitário no qual o recurso esteja geograficamente localizado. Posteriormente foram somadas todas as tecnologias localizadas na mesma região. No segundo momento, foram tabulados os dados do censo contidos na coluna V001 (domicílios particulares permanentes...) constantes no documento: “Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário” (IBGE, 2010).

Após inseridos em planilha eletrônica na mesma linha de cálculo, guiados pelo número do ID do setor censitário, realizou-se a divisão do total de tecnologias implantadas pelo número de residências. O resultado dessa operação gerou um valor que foi analisado de forma crescente, ou seja, quanto maior o valor, melhor será a possibilidade de a família ter acesso a fontes de captação e armazenamento de água.

O último passo foi exportar os dados para o *software* R Core Team, dividir os setores censitários em 7 classes, e projetar o resultado em mapa ilustrado.

4.3.2 Disponibilidade hídrica: Volume *per capita*

Os cálculos e análises, relacionados à disponibilidade hídrica por setor censitário foram realizados por meio de cruzamento dos dados de capacidade de armazenamento, volume passível de captação e população residente.

4.3.2.1 Disponibilidade hídrica/taxa de atendimento hídrico: volume *per capita*

Para estimar o volume *per capita* disponível por setor censitário, utilizaram-se dois

cenários, cada qual com duas possibilidades. O primeiro cenário foi projetado a partir do volume acumulável dividido pelo número total de habitantes por região. Dessa forma, encontrou-se um dado que leva em consideração apenas o volume da área de armazenamento da tecnologia de captação. Para esse cenário, foram realizados cálculos considerando os volumes acumulados por todas as infraestruturas hídricas estudadas e cálculos desconsiderando os volumes dos reservatórios.

O segundo cenário projetado levou em consideração a capacidade contínua de armazenamento das tecnologias, limitando-se apenas pelo volume de chuvas no ano. Assim, o dado utilizado foi o volume total potencial disponível para armazenamento, dividido pela quantidade de habitantes de cada setor censitário

Tal qual o primeiro cenário, o resultado do segundo cenário também levou em consideração projeções considerando os volumes acumulados por todas as infraestruturas hídricas estudadas e cálculos desconsiderando os volumes dos reservatórios.

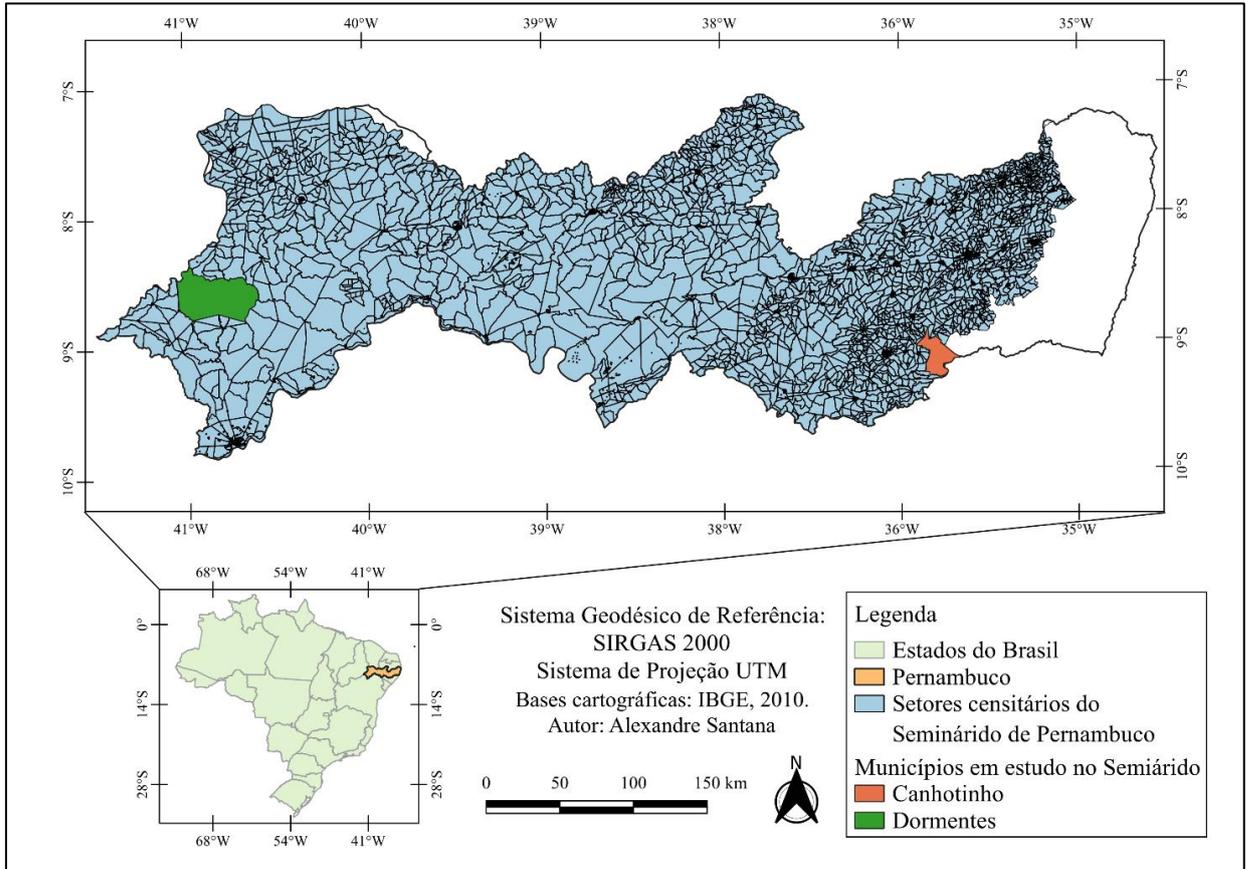
Por fim, os resultados de todas as projeções foram exportados para o *software* R Core Team e representados por mapas temáticos, classificando os setores censitários em decorrência do volume disponibilizado.

4.4 METODOLOGIA PARA REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

4.4.1 Municípios utilizados no estudo

Para o cálculo dos índices, foram consideradas duas estações pluviométricas: Dormentes e Canhotinho, localizadas na região do Sertão e Agreste do semiárido Pernambucano, respectivamente (Figura 10). A nomenclatura dessas estações corresponde aos nomes dos respectivos municípios. Como o estado de Pernambuco se localiza na região Nordeste do Brasil, este apresenta acentuada variabilidade interanual e intra-sazonal, principalmente na distribuição das chuvas, visto como exemplo nas Figuras 3 e 4 e Tabela 4, fator que está relacionado diretamente aos sistemas meteorológicos atuantes na região (Kayano; Andreoli, 2009). Pela classificação de Köppen, Pernambuco é caracterizado pelos climas tropical úmido (predominante no litoral) e semiárido (predominante no interior) (Alvares *et al.*, 2013). Tanto as mesorregiões do Sertão e do Agreste aqui estudadas são caracterizadas pelo clima semiárido.

Figura 10 – Localização da área de estudo, municípios de Dormentes e Canhotinho, no estado de Pernambuco, com as divisões censitárias



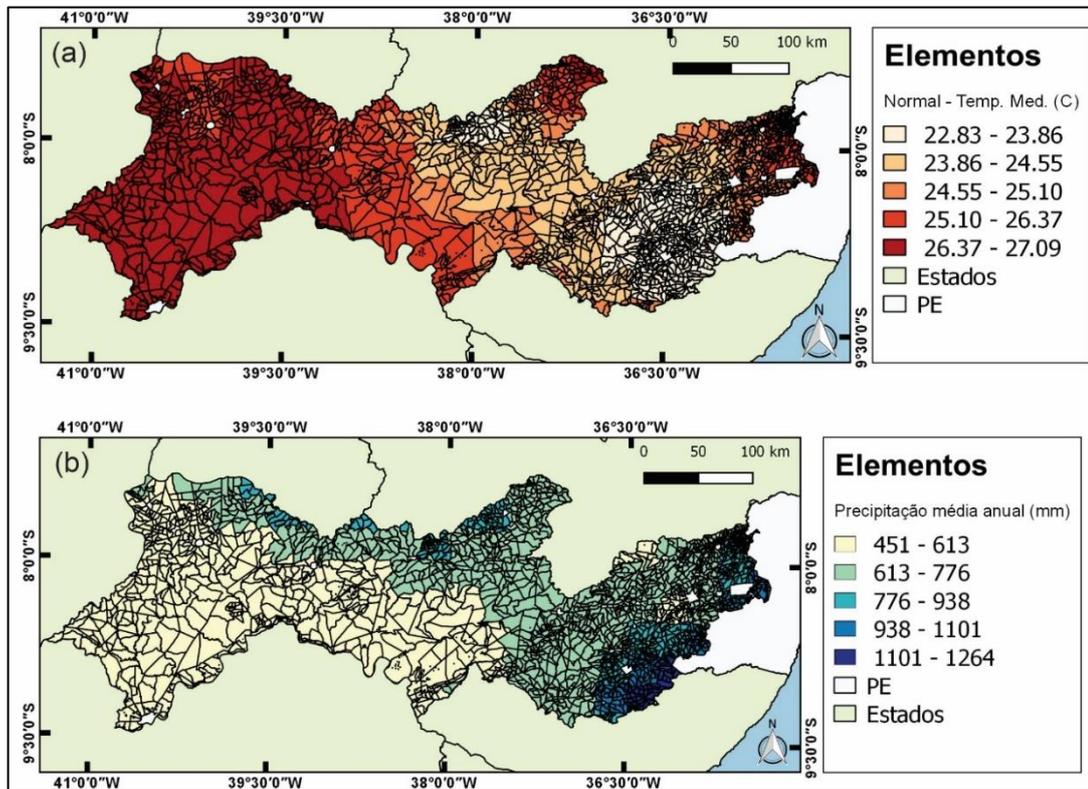
Fonte: Elaboração própria (2024).

O município de Dormentes, situado na região do Sertão Pernambucano, apresenta precipitação pluviométrica anual média de 493 mm, de acordo com sua normal climatológica, e temperatura anual média de 26,7 °C (Tabela 4). Características semelhantes no perfil térmico anual são observadas em grande parte de sua área circunvizinha, representada pela coloração em vermelho mais intenso (Figura 11a), que compreende toda a porção oeste do estado, com temperaturas anuais médias que variam de 25,1 °C a 27,1 °C. Já o perfil de distribuição pluviométrico apresenta os menores acumulados anuais encontrados na região semiárida do estado, que variam de 451 mm a 613 mm (Figura 11b).

Em relação ao município de Canhotinho, que está situado no extremo leste, na face sul da região semiárida do estado, ele apresenta uma precipitação anual média de 964 mm, e temperatura anual média de 23,9 °C (Tabela 4). Portanto, na mesma região do semiárido do Pernambuco, Canhotinho em comparação a Dormentes, apresenta maiores acumulados anuais de chuva, com diferença de 471 mm, ou, incremento de 95,5%, e menor temperatura média anual, correspondente a uma diferença de 2,8 °C. Nas áreas vizinhas a Canhotinho, a temperatura varia entre 22,8 °C e 23, 8 °C, de acordo com a coloração em vermelho mais claro

na Figura 11a, enquanto, o perfil climatológico para chuva anual média é semelhante, variando de 938 mm a 1264 mm, de acordo com a coloração de azul mais escuro na Figura 11b.

Figura 11 – Temperatura média anual (°C) e chuva anual acumulada (mm) em Pernambuco no período de 1980-2016

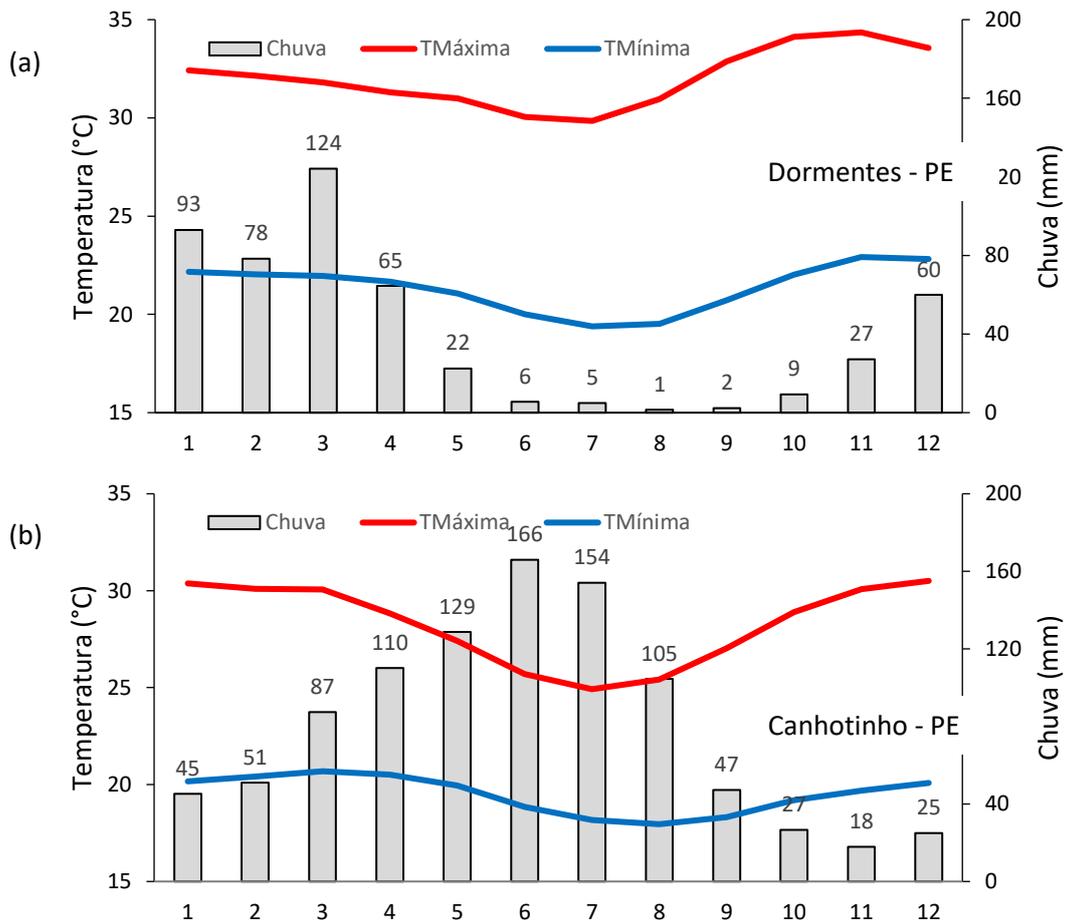


Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 12, são apresentados os perfis da normal climatológica mensal dos dados de temperatura máxima e mínima do ar e chuva para as cidades de Dormentes e Canhotinho no semiárido de Pernambuco. A região de Dormentes registra, entre os meses de janeiro a abril, os maiores índices de chuva na região (93 mm, 78 mm, 124 mm e 65 mm, de janeiro a abril, respectivamente). Por outro lado, o inverno e a primavera são os períodos mais secos do ano (6 mm, 5 mm, 1 mm, 2 mm, 9 mm e 27 mm, de junho a novembro, respectivamente). Já em Canhotinho, as chuvas ocorrem ao longo do ano, com um curto período de menores acumulados na primavera (47 mm, 27 mm, 18 mm, 25 mm e 45 mm, de setembro a janeiro, respectivamente). A partir de fevereiro, há maiores acumulados, atingindo picos no mês de junho (166 mm), quando a porção leste do estado se encontra na estação chuvosa. As temperaturas máximas na região de Dormentes são registradas nos meses de outubro e novembro, com 34,1 °C e 34,4 °C, e as mínimas nos meses de julho e agosto, com valores de 19,4 °C e 19,5 °C, respectivamente. Para Canhotinho, as máximas mensais são registradas nos

meses de dezembro e janeiro, com 30,4 °C e 30,5 °C, e as mínimas nos meses de julho e agosto, de 18,0 °C e 18,1 °C, respectivamente.

Figura 12 – Médias mensais das temperaturas máximas (°C; linha vermelha) e mínimas (°C; linha azul) e chuva mensal acumulada (mm; barras) em: a) Dormentes; e b) Canhotinho, no estado de Pernambuco, no período de 1980 a 2016



Fonte: Elaboração própria (2024).

Tabela 4 – Média anual de temperatura máxima (TMáxima), mínima (TMínima) e média (TMédia) e chuva para Dormentes e Canhotinho no estado de Pernambuco, no período de 1980 a 2016

Local	TMáxima (°C)	TMínima (°C)	Tmédia (°C)	Chuva (mm)
Dormentes	32,0	21,4	26,7	493
Canhotinho	28,3	19,5	23,9	964

Fonte: Elaboração própria (2024).

4.4.2 Dados utilizados

Os dados diários de chuva, temperatura máxima e temperatura mínima, para o período de 1980 a 2016, foram obtidos a partir da base de dados de Xavier, King e Scanlon (2015; 2016). O conjunto de dados usado no presente trabalho inclui informações diárias coletadas de

medidores de chuva, bem como em estações meteorológicas convencionais e automáticas no período de 1º de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2016. Os tipos de dados meteorológicos são temperatura máxima (T máx, °C), temperatura mínima (T mín, °C) e precipitação (pr, mm) de estações automáticas.

Também foram incluídos dois indicadores da qualidade de cada célula da grade: o número de estações incluídas com dados e a distância geodésica da estação de relatório mais próxima com dados. As fontes dos dados são provenientes do INMET, ANA e Dae. Além de ser uma série histórica climatológica, com mais de 30 anos de dados,

4.4.3 Índices de extremos e tendências analisadas

Foram analisados indicadores anuais de extremos climáticos de temperatura e chuva que vêm sendo amplamente utilizados, inclusive nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), definidos por um grupo de especialistas em detecção e índices de mudanças climáticas – Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Esses índices são baseados nos valores diários de temperatura e chuva, e apontam as características dos extremos climáticos, tais como frequência e intensidade, para constatar mudanças nos padrões de tempo e clima local, regional e mesmo global (Frich *et al.*, 2002; Peterson; Manton, 2008; Zhang *et al.*, 2011). Os índices considerados no presente estudo foram escolhidos com base nos extremos de temperatura e chuva que ocorrem na região de estudo, como se observa na Tabela 5.

Tabela 5 – Índices analisados no estudo de mudanças climáticas

Índice climático (unidade)	Descrição
TN10p (%) - Noites frias	% de dias no ano com temperatura mínima abaixo do percentil 10
TN90p (%) - Noites quentes	% de dias no ano com temperatura mínima acima do percentil 90
TX10p (%) - Dias frios	% de dias no ano com temperatura máxima abaixo do percentil 10
TX90p (%) - Dias quentes	% de dias no ano com temperatura máxima acima do percentil 90
DCS (dias) - Dias consecutivos secos	Nº máximo de dias consecutivos no ano com chuva < 1 mm
DCU (dias) - Dias consecutivos úmidos	Nº máximo de dias consecutivos no ano com chuva ≥ 1 mm
PRCPTOT (mm) - Chuva total	Chuva acumulada no ano
R95p (mm) - Chuva em dias muito úmidos	Quantidade total anual de chuva acima do percentil 95
RX5day (mm) - Chuva máxima em 5 dias	Quantidade máxima anual de chuva acumulada em 5 dias consecutivos
R10 (dias) - Nº de dias com chuva ≥ 10 mm	Nº de dias por ano com chuva ≥ 10 mm
R20 (dias) - Nº de dias com chuva ≥ 20 mm	Nº de dias por ano com chuva ≥ 20 mm
R30 (dias) - Nº de dias com chuva ≥ 30 mm	Nº de dias por ano com chuva ≥ 30 mm

*Nº - Número; % - Porcentagem.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Para o cálculo dos índices foi utilizado o *software* ClimPACT2 (Alexander; Herold, 2016), que é baseado no *software* RClimDex (Zhang; Yang, 2004), um código em linguagem R disponibilizado pelo ETCCDI. O *software* fornece, para todos os índices, tendência linear anual calculada pelo método dos mínimos quadrados, erro padrão de estimativa e nível de significância estatística da tendência (valor p). No estudo foram consideradas significativas as tendências que apresentaram nível de significância de 95% ($p \leq 0,05$).

4.4.4 Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)

O Índice de Precipitação Padrão ou Standardized Precipitation Index (SPI) foi desenvolvido com o propósito de analisar eventos de seca em relação às características temporais das precipitações (McKee; Doesken; Kleist, 1993). O cálculo do SPI envolve a normalização dos dados de precipitação, utilizando uma distribuição gama como modelo inicial e transformando-os subsequentemente em uma distribuição normal com média zero e variância unitária. Isso é realizado mediante o processamento de um conjunto de dados que representa a soma das precipitações ao longo de vários meses, sendo a distribuição gama a função de densidade de probabilidades mais comumente empregada, conforme definido nas Equações 8 a 15.

(Equação 8)

$$f_x(x) = \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\theta\Gamma(\eta)} \text{ para } x, \theta \text{ e } \eta > 0$$

(Equação9)

$$F_x(x) = \int_0^x \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{\eta-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\theta\Gamma(\eta)} dx \text{ para } x, \theta \text{ e } \eta > 0$$

$$\Gamma(\eta) = \int_0^{\infty} y^{\eta-1} \exp(-y) dy$$

(Equação10)

(Equação11)

$$\eta = \frac{1}{4} \left(1 + \sqrt{1 + 4A/3} \right)$$

(Equação12)

$$A = \ln(x) - \Sigma(\ln(P))/n$$

(Equação 13)

$$H(x) = q + (1-q) f(x)$$

$$q = m/n$$

(Equação 14)

$$SPI = \varphi^{-1}(F(x)) \quad (\text{Equação 15})$$

Em que: $\Gamma(\eta)$ é a função gama; $\theta > 0$ é o parâmetro de escala de tempo da distribuição gama; $\eta > 0$ é o parâmetro de forma da distribuição gama; x é a variável de precipitação anual; P é o total de precipitação no tempo de análise; n é o número de observações com chuva maior do que zero; q é a probabilidade de ocorrência de precipitação zero; m é número de observações com chuva igual a zero; φ é a função de distribuição normal reduzida.

A determinação do valor do SPI depende de uma escala de tempo (denotada por " θ "), que se refere ao período de acumulação das precipitações, e envolve a utilização de quantis derivados da distribuição normal acumulada. Essa abordagem leva em consideração a chuva acumulada durante uma série histórica. Os resultados obtidos podem ser classificados de acordo com a Tabela 6, que define as categorias para eventos de seca ocorridos nos anos de estudo.

Tabela 6 – Classificação dos valores de SPI

Classe	SPI
Seca extrema	<-2.0
Seca severa	-2.0 a -1.5
Seca moderada	-1.5 a -1.0
Seca leve	-1.0 a 0.0
Seca extrema	<-2.0
Seca severa	-2.0 a -1.5

Fonte: Unep (1992).

4.4.5 Índice de Aridez (IA)

O Índice de Aridez consiste em medida que indica o grau de aridez de uma determinada região com base na disponibilidade de água e na demanda climática (Matallo Júnior, 2003). Nesse contexto, é possível compreender o quanto uma região é árida, bem como a intensificação da aridez, a partir de uma série histórica climática. Assim, a estimativa do IA é realizada a partir da Equação 16, proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Unep, 1992), para classificar locais susceptíveis aos processos de desertificação.

$$IA = \frac{PMA}{EMA} \quad (\text{Equação 16})$$

Em que: PMA consiste na precipitação média anual para o período de análise; e EMA consiste na evaporação média anual para o mesmo período de análise.

Dessa forma, o IA foi calculado para os municípios de Dormentes e Canhotinho, a partir dos dados de precipitação anuais da série histórica em estudo. Foram estimados os valores do referido índice para todos os anos do período de estudo, possibilitando verificar a dinâmica temporal da intensidade de aridez. Com isso, os municípios em questão, diante dos valores anuais de IA, foram classificados quanto ao clima, conforme é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação dos valores de IA

Classes climáticas	Índice de aridez
Úmido	$IA \geq 1,00$
Subúmido Úmido	$0,65 < IA < 1,00$
Subúmido Seco	$0,50 < IA \leq 0,65$
Semiárido	$0,20 < IA \leq 0,50$
Árido	$0,05 < IA \leq 0,20$
Hiperárido	$IA \leq 0,05$

Fonte: Unep (1992).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São relatados nas seções a seguir os resultados e discussões para desenvolver a ferramenta de suporte de modo a auxiliar na tomada de decisão e criação de políticas públicas, tendo em vista a implantação de tecnologias hídras em comunidades difusas no semiárido brasileiro, com intuito de reduzir os efeitos da vulnerabilidade hídrica.

Com o objetivo de apoiar os processos de planejamento e suporte à tomada de decisão, os resultados são apresentados, em forma de mapa, referendados pelos setores censitários com dados hierarquizados através de uma legenda de cores, a saber: mapas com as tecnologias de acesso à água, sobre as quais existem dados georreferenciados disponíveis (poços e tecnologias sociais de acesso à água), além do mapeamento por meio de imagens de satélite dos reservatórios e açudes com área de lâmina d'água a partir de 0,18 ha; mapas da distribuição populacional; e finalmente gráficos e figuras dos parâmetros climáticos elaborados a partir das normais climatológicas dos anos de 1980 a 2016.

5.1 POTENCIAL DE CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO HÍDRICO POR SETOR CENSITÁRIO A PARTIR DA INFRAESTRUTURA HÍDRICA DISPONÍVEL

Os dados georeferenciados das tecnologias hídras recombinados com áreas de cada setor censitário e também volumes precipitados, são os principais parâmetros para a apresentação dos resultados.

5.1.1 Índice pluviométrico por setor censitário

Em relação ao quantitativo de chuvas distribuídas por setor censitário, o mapa apresentado na Figura 13 representa a normal de precipitação das áreas de todo o estado de Pernambuco.

Observa-se que as regiões foram divididas em 5 classes: 653 setores censitários estão classificados com precipitação média anual de 451 mm a 566 mm (nesta classe existe apenas um setor censitário da mesorregião do Agreste); 19% das regiões do Sertão Pernambucano com destaque negativo, acumulando as menores médias de precipitação do estado, percentual onde está a mesorregião do Sertão do São Francisco, na qual mais de 98% dos setores censitários recebem essa faixa de precipitação – vale ressaltar que, de acordo com Salgueiro e Montenegro (2008), a mesorregião do Sertão do São Francisco é a parte mais seca do Estado com

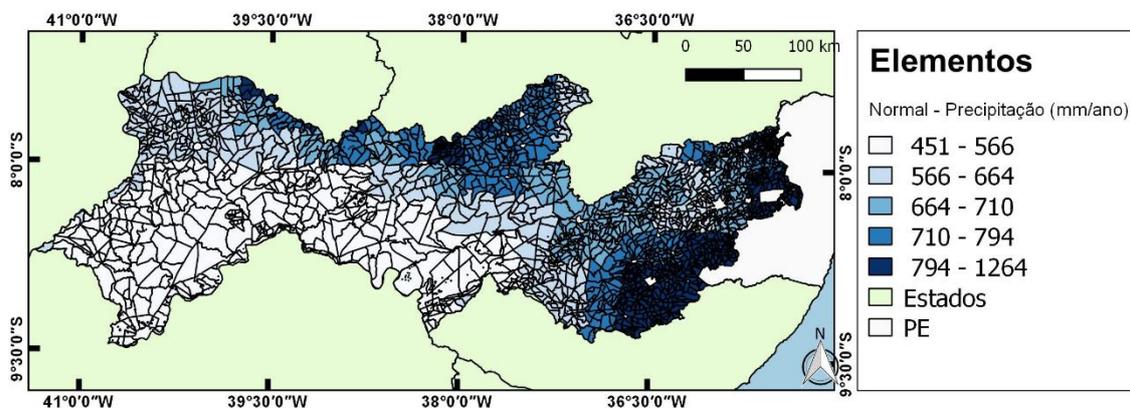
precipitações médias de 484 mm a 530 mm, aproximadamente.

A mesorregião do Sertão Pernambucano foi a que apresentou a maior variação das médias pluviométricas (Figura 13), com setores censitários distribuídos em todas as faixas de classificação, com destaque para os setores na classe com índices pluviométricos de 566 mm a 664 mm, representando 33% dos setores censitários, além de 13% situando-se na faixa de 664 mm a 710 mm, e finalmente 28% das regiões registrando índices médios de 710 mm a 794 mm.

O Agreste foi a mesorregião com melhores precipitações, com apenas um único setor figurando na classe dos piores índices do estado. Por outro lado, apresenta 682 de seus setores censitários (40%) situando-se na faixa classificatória com melhores índices pluviométricos do semiárido Pernambucano (de 794 mm a 1264 mm) e 30% das regiões apresentando média anual de 664 mm a 710 mm. Andrade *et al.* (2018) encontraram valores de precipitação diferentes para a região Agreste, com quantitativos em torno de 436,76 mm. Eles explicam que houve uma alteração no comportamento da média da precipitação anual ao longo do tempo com decréscimo da precipitação, uma vez que avaliaram uma série temporal de 33 anos.

Em geral, o Agreste foi a região que apresentou os melhores índices pluviométricos, principalmente em sua porção mais ao sul. Pode-se constatar nela os melhores índices pluviométricos, enquanto as áreas censitárias com os menores índices pluviométricos estão na região do Sertão do São Francisco. Porém, em todo o Sertão, principalmente em sua porção mais ao norte, nas regiões da divisa com os estados da Paraíba e do Ceará, os índices pluviométricos também são considerados bons, sendo um pouco menores que a média do Agreste.

Figura 13 – Classificação da normal pluviométrica por setor censitário



Fonte: Elaboração própria (2024).

5.1.2 Identificação dos reservatórios e determinação de área de lâmina d'água através de imagens de satélite: imageamento orbital

5.1.2.1 Classificação dos reservatórios

A pesquisa identificou 22.978 reservatórios na zona rural do semiárido Pernambucano, resultado que demonstra elevado grau de proximidade em relação ao estudo contratado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2024). A análise comparativa revela que a empresa contratada pela APAC identificou 25.101 massas d'água em todo o Estado de Pernambuco, ao custo total de R\$ 1.169.155,60¹. A diferença quantitativa entre os dois estudos é justificável, considerando que a presente pesquisa abrangeu exclusivamente as áreas rurais do semiárido, enquanto o estudo contratado pela APAC contemplou todo o território estadual.

Os resultados obtidos nesta pesquisa destacam sua relevância e eficiência. Utilizando metodologias baseadas em sensoriamento remoto (através do índice NDWI), foi possível identificar massas d'água de maneira rápida e com custos significativamente baixos, em comparação ao elevado investimento realizado pela APAC. Essa abordagem proporciona uma alternativa economicamente viável e acessível para levantamentos hidrográficos em regiões semiáridas, com aplicações potenciais em monitoramento e planejamento hídrico.

Ao oferecer dados precisos e detalhados a um custo próximo de zero, este estudo pode representar uma ferramenta importante para subsidiar ações de gestão pública, pesquisa científica e tomada de decisões por parte de investidores e gestores regionais. Ademais, ele aponta para a possibilidade de potencialização de recursos financeiros e operacionais, conferindo maior agilidade e eficiência no monitoramento da situação de abastecimento hídrico da população, contribuindo assim para atender parte da demanda do Estado brasileiro, a qual indica necessidade de fortalecimento da gestão integrada de recursos hídricos no semiárido brasileiro (Brasil, 2024).

Ao analisar dados da pesquisa, identifica-se que a maior densidade de reservatórios está situada na mesorregião do Sertão Pernambucano (Figura 14). Apesar da detecção de um importante número de reservatórios, os achados também indicaram que existem 1.270 setores censitários sem nenhum reservatório, áreas que representam 28% da região do Sertão, 41%

¹ Os levantamentos foram realizados em duas etapas. Na primeira etapa (2021 a 2023) o levantamento objetivou o cadastramento de barragens e empreendedores, capacitação de usuários, avaliação do potencial agrícola nas bacias dos rios Moxotó, Pajeú e Terra Nova, e estudo de viabilidade econômica para irrigação a partir dos eixos Norte e Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco - PISF. Os levantamentos referentes ao cadastro das barragens e empreendedores foram feitos inicialmente de forma remota, com confirmação em campo, para as barragens identificadas com capacidade de acumulação superior a 50.000 m³. Na segunda etapa (2023 a 2024), os levantamentos foram realizados de forma remota, com a caracterização das barragens identificadas com capacidade de acumulação superior a 50.000 m³, em todo o território estadual, exceto nas bacias contempladas no levantamento anterior.

da região do Agreste e 48% das regiões localizadas no Sertão do São Francisco. A mesorregião que apresenta melhor distribuição espacial dessas tecnologias é o Sertão Pernambucano.

A mesorregião com o maior desequilíbrio entre a quantidade de setores censitários, a quantidade de reservatórios construídos e a capacidade de armazenamento destes é o Agreste, podendo ser considerada, dessa forma, uma mesorregião com déficit de reservatórios (Tabela 8).

Tabela 8 – Distribuição dos reservatórios por mesorregião

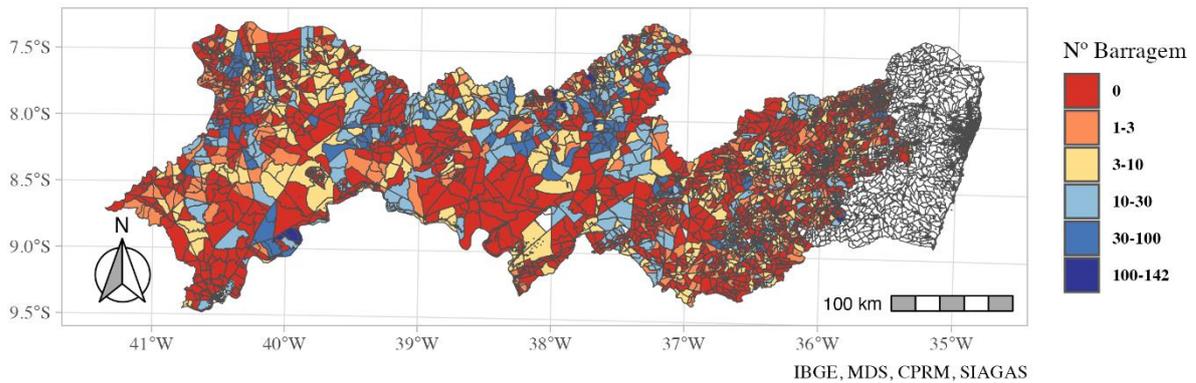
Mesorregião	Número de setores censitários	% em relação ao total de setores censitários	Número de reservatórios	% em relação à quantidade de reservatórios	Volume em m ³	% em relação ao volume total de armazenamento
Agreste	1728	55%	8.239	36%	280.429.791	30%
Sertão	970	31%	10.953	48%	533.250.861	56%
Sert. S. Fr.	470	15%	3.786	16%	136.696.908	14%

Fonte: Elaboração própria (2025).

Do total de reservatórios identificados, 18.639, representando mais que 81% do universo de amostragem, têm espelhos d'águas de até 1 hectare (Tabela 9). Somados, os reservatórios que ocupam uma área de até 5 hectares representam mais de 97% do número dessas tecnologias. Juntos, apresentam um potencial de acúmulo total de mais de 311 milhões de metros cúbicos, o que representa 33% do potencial total de armazenamento que todos os reservatórios em conjunto podem armazenar (950 milhões de metros cúbicos).

Dessa forma, o volume disponível para armazenamento pode indicar possibilidades importantes para a gestão da água, contudo são fontes de armazenamento com altos índices de evaporação, uma vez que seus volumes médios disponíveis, depois de 7 meses de estação seca, sofrem perdas superiores a 93% da capacidade retida durante a estação chuvosa (Molle, 1994).

Figura 14 – Classificação dos setores censitários pela quantidade de reservatórios construídos



Fonte: Elaboração própria (2025).

Tabela 9 – Classificação dos reservatórios identificados na zona rural do semiárido Pernambucano

Área do reservatório em ha	Número de reservatórios	% em relação à quantidade de reservatórios	Volume em m ³	% em relação ao volume total de armazenamento
0 a 1	18.639	81	148.960.354	16
1,1 a 3	2.985	13	111.157.324	12
3,1 a 5	608	3	51.552.304	5
5,1 a 10	403	2	61.215.806	6
10,1 a 30	225	1	84.970.631	9
30,1 a 70	62	0,3	61.171.327	6
70,1 a 100	16	0,07	28.764.085	3
100,1 a 400	28	0,12	125.613.402	13
400 a 856	12	0,05	276.972.326	29

Fonte: Elaboração própria (2025).

No outro extremo, detectou-se que os 40 maiores reservatórios, com área de lâmina d'água de 100 a 856 hectares, representam apenas 0,17% do universo amostral. Porém, têm capacidade de armazenamento de mais de 402 milhões de metros cúbicos, representando 42% do volume de acúmulo de água em relação ao total dos reservatórios situados na zona rural do semiárido Pernambucano. É importante registrar que a equação usada para relacionar a capacidade de armazenamento com a área do espelho d'água trouxe resultados muito distintos das capacidades de acumulação de água dos grandes reservatórios informadas pelos órgãos oficiais.

Como dado comparativo, pode-se apresentar as capacidades de acumulação dos dois maiores reservatórios de Pernambuco, Eng. Francisco Saboia (Poço da Cruz) – Ibimirim e Barragem de Entremontes - Parnamirim, cujas capacidades segundo a Agência Pernambucana

de Água a Clima - APAC, são de 540.000.000 e 339.333.700 m³, respectivamente, somadas resultam num potencial acima de 879 milhões de m³.

O resultado de 879 milhões de m³, para apenas 2 reservatórios, é muito superior dos calculados no estudo, onde somados todos os 40 maiores reservatórios, estimou-se uma capacidade máxima pouco superior a 402 milhões de metros cúbicos.

Isso deve ser compreendido por duas razões: primeiro, a fórmula usada possivelmente é melhor aplicável a pequenos reservatórios. Segundo, os espelhos d'água imageados (cujo dado é a referência para estimar o volume), não refletem seu limite máximo, principalmente porque somente em raras ocasiões os reservatórios do semiárido atingem sua capacidade plena. Destarte, ao calcular o volume, utilizando-se apenas a área dos espelhos d'água, em geral a capacidade do reservatório será calculada a menor, a menos que no momento da captura da imagem, o reservatório esteja com sua capacidade máxima de água reservada. Desta forma, possivelmente a fórmula sugerida por Molle, poderá calcular dados mais próximos aos estimados em campo.

Contudo os resultados tendem a ficar mais próximos da realidade quanto menor os reservatórios, uma vez que, estes, com pequenas precipitações já atingem o seu nível máximo, sendo passível das imagens coletadas conseguirem captar mais facilmente o momento da maior área de lâmina d'água possível e conseqüentemente calcular valores mais precisos.

5.1.2.2 Equação de determinação da bacia de contribuição para a captação de água em reservatórios

Um dos resultados do estudo em questão foi o desenvolvimento de uma equação de regressão linear relacionando a área da bacia de contribuição hídrica e a área de lâmina d'água do reservatório (Figura 15), representada pela Equação 5, que apontou uma forte correlação entre a área de lâmina d'água das barragens e a suas bacias de contribuição hídrica:

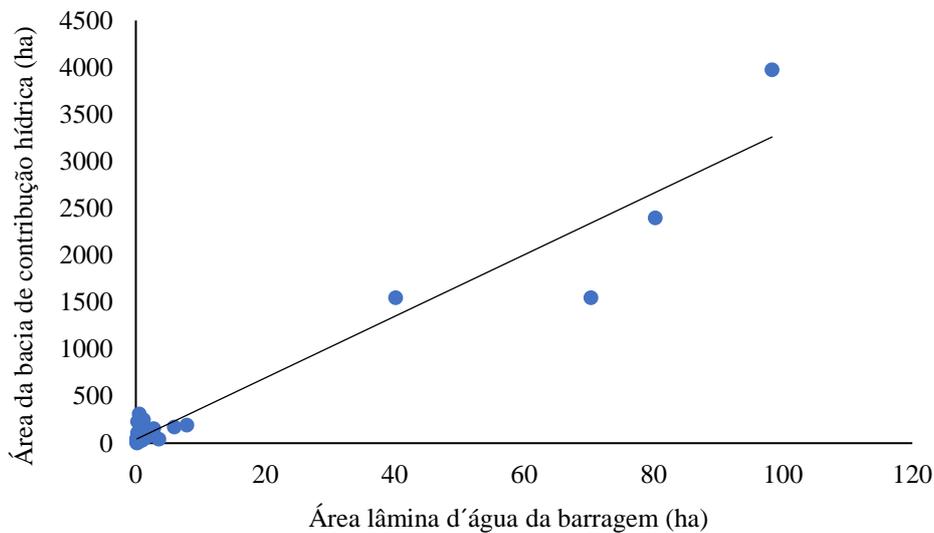
$$y=36,4431+33,7182*x \quad (\text{Equação 5})$$

Onde x representa a área do reservatório e y, a área da bacia de captação (ha). O coeficiente de determinação (**R² = 0,9215**) apresentou-se satisfatório (>0,5), com alta significância.

Dessa forma, conclui-se que a área da bacia de captação de reservatórios do semiárido

pode ser dimensionada, com grau de confiabilidade de 92%, a partir da área de lâmina d'água do reservatório, utilizando-se a equação $y = 36,4431 + 33,7182 * x$. Essa equação pode configurar-se como uma ferramenta para auxiliar a determinar a capacidade hídrica de microrregiões, agilizando e diminuindo os custos desse tipo de análise, pois, apesar de não substituir a aferição in loco, constitui-se como instrumento inovador para auxiliar análises de imagens de satélite, principalmente para pequenos reservatórios.

Figura 95 – Relação entre a área de lâmina d'água e a área da bacia de contribuição hídrica de reservatórios no semiárido



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.1.3 Tecnologias sociais (TS)

5.1.3.1 Distribuição de cisternas de 16 mil litros por setor censitário

Do total dos 3.168 setores censitários localizados na zona rural do semiárido Pernambucano (Figura 16), 758 regiões não apresentaram nenhuma cisterna implantada. A mesorregião percentualmente menos beneficiada com essa tecnologia foi o Sertão do São Francisco, com 47% de seus setores censitários sem nenhuma cisterna de 16 mil litros implantada. Em contrapartida, o Sertão Pernambucano apresentou-se com a melhor cobertura de cisternas com essa tecnologia, presente em mais de 83% de seus setores censitários.

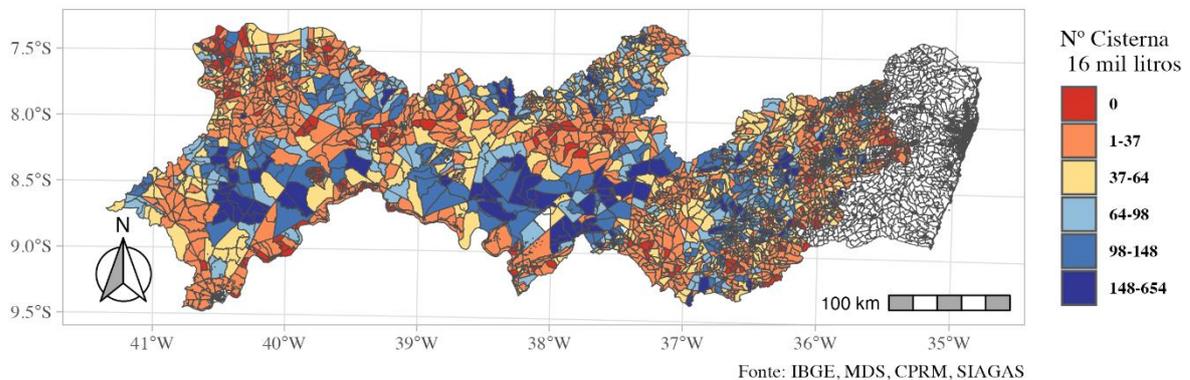
Levando-se em consideração as regiões onde existem cisternas de 16 mil litros implantadas, encontra-se uma média de 43 unidades e uma mediana de 15 cisternas por setor. Existem 279 setores onde a concentração de cisternas é bem maior que a média estadual, oscilando de 98 a 645 unidades por área. Essa concentração de tecnologias é mais significativa

na mesorregião do Agreste, representando 12% dos setores censitários. Os resultados dialogam com a densidade demográfica regional, pois o Agreste é a região semiárida pernambucana, com maior concentração de pessoas por km², fato que pode explicar uma maior concentração de cisternas em algumas das áreas censitárias dessa mesorregião (IBGE, 2022).

Entre as sete classes que foram contempladas com a distribuição de cisternas de 16 mil litros, a que apresenta o quantitativo de 1 a 37 tecnologias implantadas tem a maior representatividade na região de estudo, com 44% do total, o que constitui numericamente quase 1.400 setores censitários.

De forma geral, o número de cisternas nas regiões do semiárido Pernambucano aumentou ao longo dos anos devido a programas sociais como o Programa um milhão de cisternas (P1MC), o Programa uma terra duas águas (P1+2) e o Programa “Água para Todos (Silva *et al.*, 2015). Mas, apesar dos resultados positivos para a população na implantação dessa tecnologia, ainda são necessárias análises que levem em consideração a garantia da segurança hídrica e as políticas de manutenção (Silva *et al.*, 2022).

Figura 106 – Classificação das áreas censitárias por quantidades de cisternas de 16 mil litros

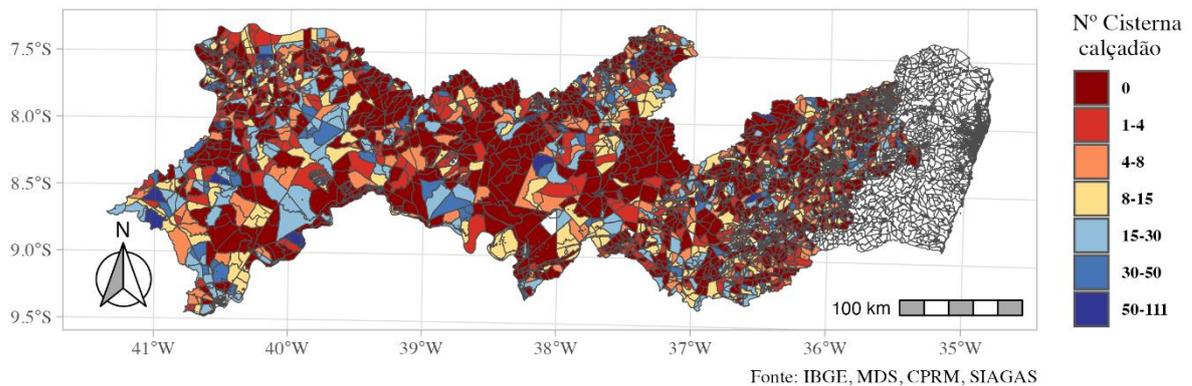


Fonte: Elaboração própria (2025).

5.1.3.2 Distribuição das cisternas calçadão de 52 mil litros por setor censitário

As cisternas calçadão de 52 mil litros representaram a segunda tecnologia social mais implantada na região de estudo. Foi possível normatizar e plotar em mapa 23.683 unidades (Figura 17) desse tipo de tecnologia, o que demonstra tratar-se de um percentual significativo de pouco mais de 17% das TS passíveis de análise implantadas em Pernambuco.

Figura 17 – Classificação das áreas censitárias por quantidade de cisterna de 52 mil litros



Fonte: Elaboração própria (2025).

As cisternas calçadão estão distribuídas em praticamente 62% dos setores censitários da área de estudo. A região do Agreste foi a que apresentou uma melhor distribuição interna dessas tecnologias, com 64% de dois setores censitários com ao menos uma cisterna calçadão implantada.

Ao analisar os quantitativos implantados em cada mesorregião, observa-se um equilíbrio condizente com a representatividade dessas mesorregiões em relação ao número de setores censitários que cada uma representa. Constatou-se que o Agreste detém 54% dos setores censitários das zonas rurais do semiárido Pernambucano e recebeu 52% das cisternas calçadão implantadas. Já o Sertão, representando 31% dos setores censitários estudados, recebeu 30% das tecnologias. E finalmente no Sertão do São Francisco, onde estão 15% dos setores censitários, foram implantados 16% do total das cisternas calçadão.

A distribuição espacial dessa tecnologia de forma equânime nas regiões é muito importante, uma vez que tal recurso social tem como um dos objetivos dar pertencimento à população de saberes sobre suas técnicas de construção e gestão. O fato de a implantação ter respeitado as subdivisões regionais oportuniza a um maior quantitativo de beneficiários o conhecimento dessa tecnologia, propiciando um entendimento sobre tal recurso, ao ponto de implementar as melhores técnicas de gestão de água, bem como promover as manutenções necessárias, como apresentado por Santana (2015).

5.1.3.3 Distribuição dos poços por setor censitário

Os 19.606 poços perfurados na zona rural do semiárido Pernambucano, extraídos da base de dados da CPRM, foram alocados de acordo com seus dados georreferenciados e

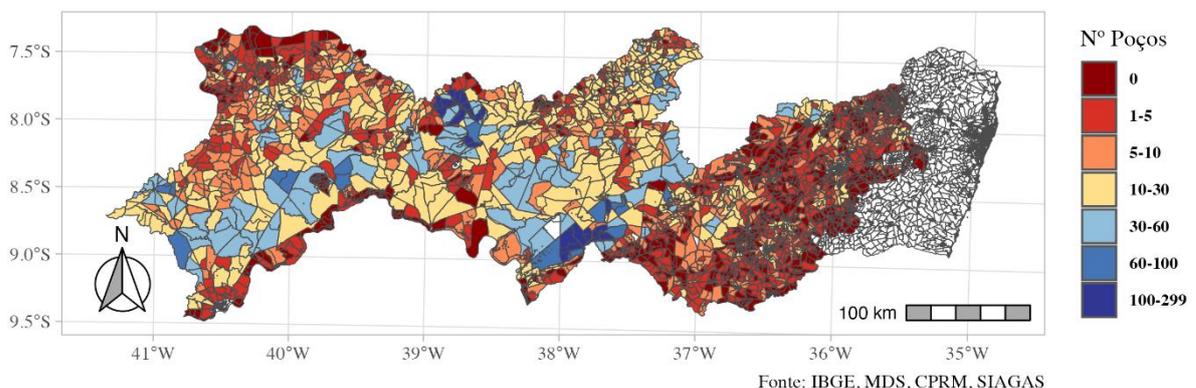
quantificados em cada setor censitário (Figura 18).

Apesar da importante contribuição que os poços podem gerar em relação ao aumento do volume hídrico disponibilizado, infelizmente as informações contidas na base de dados da CPRM (Peixinhos; Diniz, 2019) possivelmente podem estar muito aquém do que efetivamente se tem perfurado, posto que uma grande quantidade de poços são instalados, porém não são notificados ou repassados aos órgãos responsáveis pelo monitoramento e controle. Essa prática dificulta o trabalho de análise dessa importante tecnologia hídrica, contudo a avaliação diante dos dados oficiais é válida, uma vez que o número informado é significativo. Nesse sentido, deve-se buscar a conscientização da população no sentido de fazer uso da água de forma mais sustentável e aumentar as práticas de fiscalização, uma vez que a perfuração de poços sem o devido controle poderá acarretar uma exaustão hídrica, pois alguns poços identificados já estão sem água (Valões *et al.*, 2022).

Analisando as distribuições dos poços por setor censitário, observou-se de imediato a discrepância nas quantidades escavadas, levando-se em consideração as mesorregiões, uma vez que o Sertão Pernambucano concentra 60% das perfurações, seguido do Agreste com 25%.

Ao observar com maior profundidade os dados, constatou-se que dos dez setores censitários que têm o maior número de poços perfurados, todos eles situados na mesorregião do Sertão, cinco localizam-se na microrregião de Salgueiro, no município de São José do Belmonte e uma em Mirandiba, setores censitários de municípios limítrofes, que somados apresentam 1.093 poços, concentrando em apenas seis regiões o equivalente a 5,5% de todas as perfurações, e outras quatro sendo setores censitários dos municípios fronteiriços de Ibimirim e Inajá, localizados da microrregião do Sertão do Moxotó, contabilizando 864 poços, 4,4% do total de perfurações encontradas na região de estudo.

Figura 18 – Classificação das áreas censitárias por quantidade de poços perfurados



Fonte: Elaboração própria (2025).

A concentração de perfurações em regiões específicas é comum no semiárido Pernambucano, uma vez que o solo em sua grande maioria é composto por rochas cristalinas, com lençol freático profundo, proporcionando baixas vazões e água com altas taxas de sais, fato que a torna não recomendada para o consumo humano. Dessa forma, as poucas regiões que propiciam água no subsolo em quantidade e qualidade são largamente exploradas.

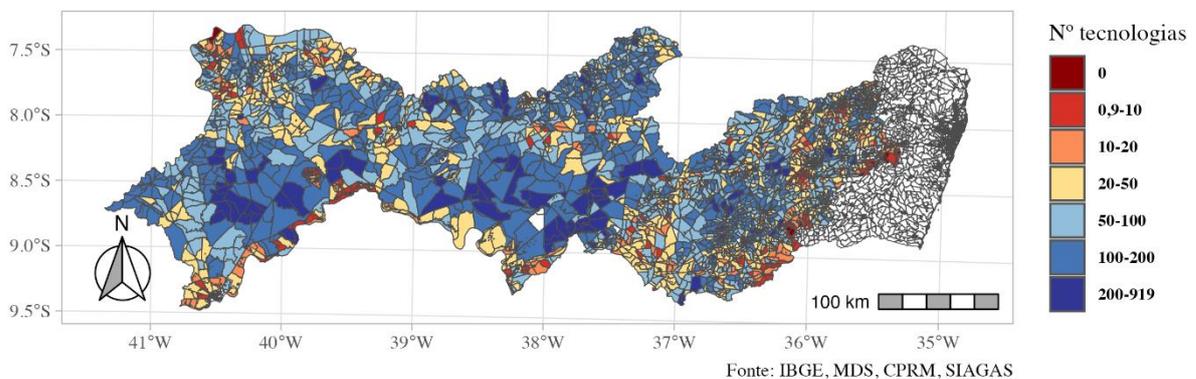
O baixo potencial hidrogeológico da região está relacionado a reduzidas condições de circulação e armazenamento. As características do clima semiárido favorecem a expressiva salinização das águas, com médias de vazões muito baixas e teores de sólidos totais dissolvidos bastante elevados. Apenas 16% da área estadual é constituída de rochas sedimentares porosas e que representam aquíferos de maiores potencialidades (Diniz *et al.*, 2019).

5.1.3.4 Taxa de cobertura: distribuição de todas as tecnologias de recursos hídricos por setor censitário

Do total de TS implantadas em Pernambuco, as tecnologias sociais de 1ª água (cisternas de 16 mil litros) representam um quantitativo de 104.221 (78%), ao passo que as TS denominadas de 2ª água (produção e dessedentação animal), juntas, somam 30.094 unidades (22%), sendo que as cisternas calçadão apresentam a maior representatividade (Brasil, 2024).

Aliadas às tecnologias sociais de recursos hídricos, os poços e os reservatórios representam 19.606 e 22.998 unidades implantadas respectivamente, em todas as regiões do estado. A Figura 19 apresenta a distribuição dessas tecnologias de recursos hídricos por setor censitário, classificando as regiões pela quantidade total de unidades nelas construídas.

Figura 19 – Classificação dos setores censitários pela quantidade de estruturas hídricas instaladas



Fonte: Elaboração própria (2025).

Do total, dos 3.168 setores censitários localizados na zona rural do semiárido Pernambucano, 108 setores (3%) não têm nenhuma tecnologia implantada, 502 têm entre 1 e 10 construídas, em 411 setores foi construído de 10 a 20 tecnologias, e em cerca de 42% dos setores censitários é possível encontrar 50 ou mais tecnologias implantadas.

Ao analisar a distribuição geográfica por mesorregião estadual, verifica-se que a melhor atendida é o Sertão Pernambucano, onde se localizam 31% das áreas censitárias do estado, contudo receberam 40% das tecnologias implantadas. A região mais desigual, considerando o referencial de número de áreas censitárias e a quantidade de tecnologias implantadas, é o Agreste, que representa 54% dos setores censitários e conta com 48% das tecnologias construídas na área de estudo. É importante analisar que os municípios do Sertão do São Francisco e Pernambucano, têm maior extensão territorial e assim era de se esperar maior quantidade de TS, contudo tem menor densidade populacional, quando comparados com o Agreste.

Em relação aos vazios, ou seja, à quantidade de mesorregiões que têm mais áreas censitárias sem nenhuma tecnologia hídrica, destaca-se o Sertão do São Francisco, com 11% de seus setores censitários sem nenhuma tecnologia disponível (dialogando com o resultado de menor densidade populacional, menos tecnologias implantadas), seguido do Agreste Pernambucano, com 2,7%, esse é um dado preocupante, uma vez que das mesorregiões analisadas, essa é a região com maior densidade populacional. Figura com menos áreas descobertas o Sertão Pernambucano, com menos de 1% de suas áreas sem tecnologias implantadas.

5.1.3.5 Disponibilidade hídrica por setor censitário

As simulações dos volumes distribuídos por setor censitário são demonstradas nesta subseção. Os resultados são expostos em metros cúbicos/ano. Vale ressaltar que nos volumes finais calculados não foram consideradas as possíveis perdas de água como evaporação ou infiltração.

Ressalta-se que os dados pluviométricos utilizados são resultantes do cálculo da normal pluviométrica obtida da série histórica de 1980 a 2016, números calculados a partir dos dados de Xavier, King e Scanlon (2016), evitando-se, dessa forma, incorrer em análises de períodos curtos, que podem mascarar os resultados, apontando dados que pudessem estar relacionados apenas a períodos de anos extremos de seca ou de chuvas.

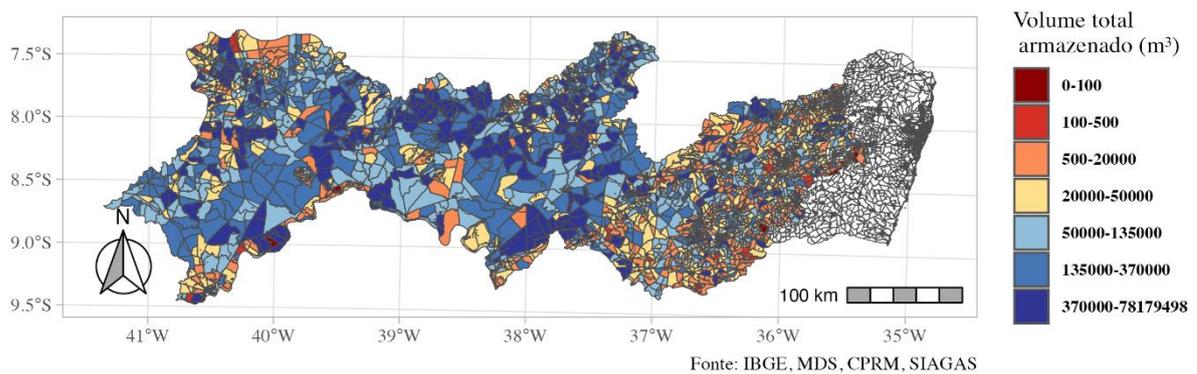
5.1.3.5.1 Volume total armazenável x setor censitário

As análises dos volumes acumuláveis levam em consideração apenas o somatório dos volumes úteis das tecnologias distribuídas nos setores censitários, sem utilizar a variável chuvas. Esse cálculo representa a capacidade instalada de armazenamento de chuvas.

Levando em consideração todas as tecnologias hídricas implantadas na zona rural do semiárido Pernambucano, observou-se que a capacidade total de metros cúbicos armazenável foi de 1,046 bilhão de metros cúbicos/ano. A variável ano aplica-se a esse somatório, em decorrência da metodologia do estudo, que leva em consideração que as vazões supostamente produzidas pelos 19.631 poços (poços + BAP) instalados foram calculadas como volume armazenável, definindo que cada poço produz (armazena) 12 m³/dia, conseqüentemente 4.380 m³/ano.

O volume armazenável é um valor significativo, uma vez que está distribuído em 3.059 setores censitários do estado que dispõem de estruturas hídricas de armazenamento (Figura 20), portanto democratizando o acesso à água, uma vez que representa em geral a possibilidade de acesso hídrico em locais próximos das residências, conferindo às tecnologias hídricas de pequeno porte uma estratégia fundamental e complementar às obras hídricas de grande porte, como integração de bacias e grandes represas (Aragão *et al.*, 2022).

Figura 20 – Volume total armazenável x setor censitário



Fonte: Elaboração própria (2025).

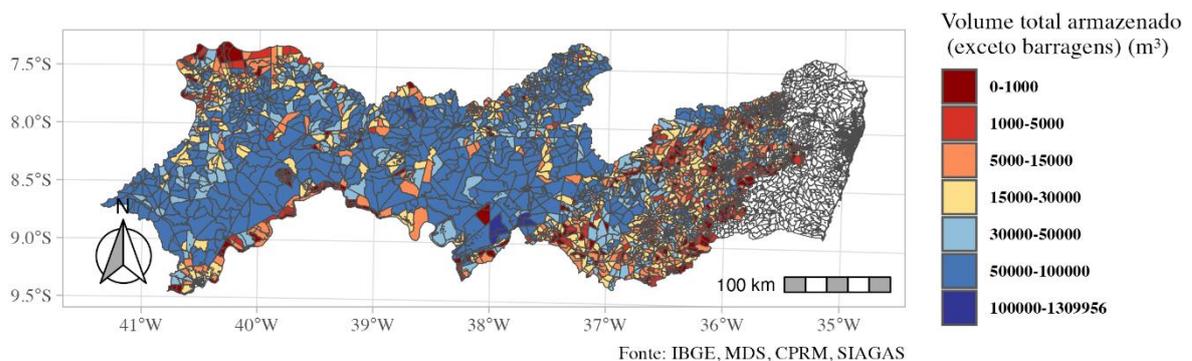
O mesmo cálculo de volume armazenável, dessa vez desprezando os quase 23 mil reservatórios identificados no estudo, apresenta uma capacidade instalada mais modesta, 95,7 milhões de m³/ano, contudo mais consistente no tocante à disponibilidade de uma água de melhor qualidade, pois, apesar dos pequenos reservatórios terem um aspecto importante na

estratégia da convivência com o semiárido, a qualidade da água em geral é imprópria para consumo humano (Santos; Paiva; Silva, 2016), porém ainda sim é um volume de armazenamento representativo e importante para uma região em situação permanente de escassez hídrica.

A mesorregião do Sertão Pernambucano destacou-se no somatório das áreas destinadas ao armazenamento hídrico (Figura 21), superando 56 milhões de m³/ano. Também é a mesorregião com a maior média de volume armazenável por setor censitário, com 58 mil m³/ano, enquanto que o menor volume médio por setor censitário foi registrado no Agreste Pernambucano, apresentado apenas 14 mil m³/ano. Segundo Cirilo (2008), o semiárido brasileiro enfrenta desafios mais difíceis de superar em comparação com outras regiões de características semelhantes ao redor do mundo. Isso se deve à combinação de solos rasos, altas temperaturas que resultam em elevadas taxas de evaporação, e, sobretudo, alta concentração populacional, uma das maiores entre os semiáridos do mundo.

Os 470 setores censitários do Sertão do São Francisco que têm estruturas hídricas instaladas apresentam uma média de capacidade instalada de armazenamento hídrico de 30 mil m³/ano, volume dos qual se excetua os possivelmente armazenados pelos reservatórios.

Figura 21 – Classificação dos setores: volume total armazenável – exceto volumes dos reservatórios



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.1.3.5.2 Volume total potencial x setor censitário

Os cálculos de volume potencial levaram em consideração a projeção do volume de obtenção de chuvas, a partir das áreas de captação das tecnologias hídricas, não limitando-se aos volumes das áreas de armazenamento, uma vez que esse volume pode ser utilizado, evaporado ou infiltrado ao longo do ano, e a área de armazenamento, nesses casos, pode novamente ter seu espaço livre para estocar água.

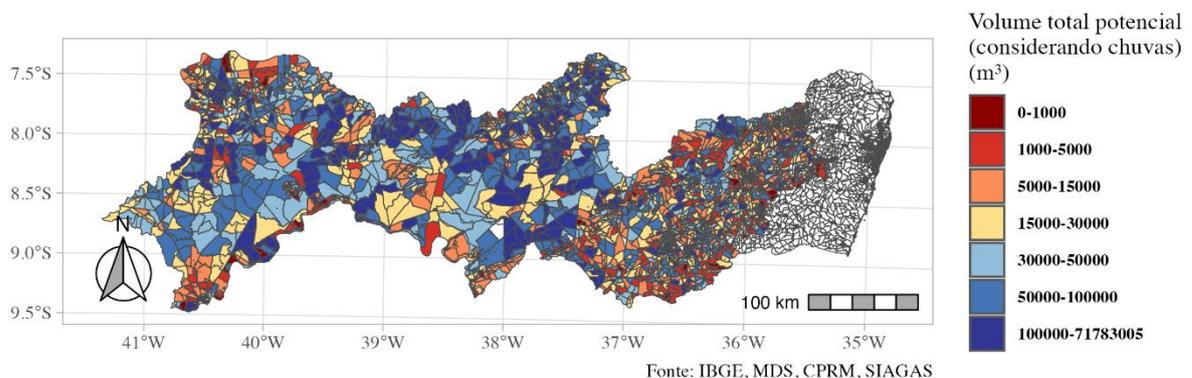
Pode-se considerar também que, em reservatórios e barraginhas (água exposta), poderá haver uma evaporação ou infiltração que permitirá armazenar novamente chuvas precipitadas, mesmo após atingida sua capacidade limite de armazenamento. Ressalta-se que os dados volumétricos nesta pesquisa não consideraram a variável de evapotranspiração (Eto).

Em relação à disponibilidade hídrica por setor censitário, que se restringe à capacidade volumétrica da área de armazenamento de cada tecnologia, levando em consideração a equação de captação de água (área x precipitação x coeficiente de escoamento), o estudo demonstrou que, em apenas 3% dos setores censitários, o volume precipitado não foi suficiente para encher as áreas de armazenamento das tecnologias construídas. Nas demais áreas censitárias onde existem tecnologias de captação hídrica, ocorrem chuvas suficientes para encher ao menos uma vez por ano os reservatórios.

O volume total potencial que pode ser acumulado através das áreas de captação, considerando todas as tecnologias, foi altamente significativo, uma vez que representou um total de 1,551 bilhão de m³/ano. Isso foi 1,4 vezes maior que o volume somado das áreas de armazenamento, evidenciando que as tecnologias podem ser melhor dimensionadas para armazenar todo o seu potencial de captação.

O somatório dos dez setores censitários que apresentam maiores volumes representa mais de 252 milhões de m³. Destes, 7 setores encontram-se na mesorregião do Sertão Pernambucano (Figura 22). Esses setores somados representam pouco mais de 13% do total potencial acumulável da zona rural do semiárido Pernambucano, portanto trata-se de uma concentração muito discrepante, que pode ser justificada possivelmente pela localização do Açude de Entremontes, o maior do estado.

Figura 22 – Volume total potencial de captação x setor censitário

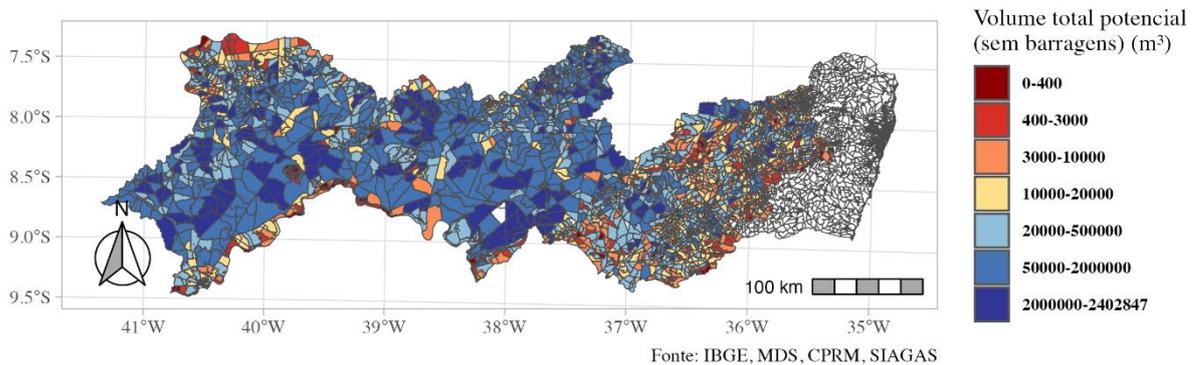


Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao retirar os volumes potenciais acumuláveis dos reservatórios, obteve-se uma melhor percepção da contribuição das demais tecnologias hídricas. O volume potencial, excetuando-se as barragens, é de pouco mais de 152 milhões m³/ano. A mesorregião do Sertão foi a que teve a melhor média de volume potencial por setor censitário, com 90,8 mil m³, seguida pelo Sertão do São Francisco, com 39,4 mil m³. Com a menor quantidade média de volume potencial, está o Agreste, com 26,5 mil m³/setor censitário/ano.

Analisando os setores censitários com média potencial de captação volumétrica menor que 400 m³/ano, conclui-se que a área estudada apresenta 15,5% de seus setores censitários nesse patamar (Figura 23). Destaca-se negativamente o Sertão do São Francisco, com 40% de seus setores, seguido do Agreste, com pouco mais que 13% nessas condições, e por fim do Sertão, com apenas 7,5% de suas áreas censitárias nessa situação de baixa capacidade de volume potencial de captação hídrica.

Figura 23 – Volume total potencial de captação x setor censitário – sem considerar os reservatórios



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁREAS CENSITÁRIAS A PARTIR DA TAXA DE ATENDIMENTO HÍDRICO DA POPULAÇÃO, COM BASE NAS TECNOLOGIAS INSTALADAS E VOLUMES CAPTADOS

Os dados demográficos recombinaados com quantitativos de tecnologias e também volumes precipitados foram os principais parâmetros para a apresentação dos resultados expostos nesta subseção.

5.2.1 Dados demográficos (quantitativos)

5.2.1.1 Densidade populacional por setor censitário

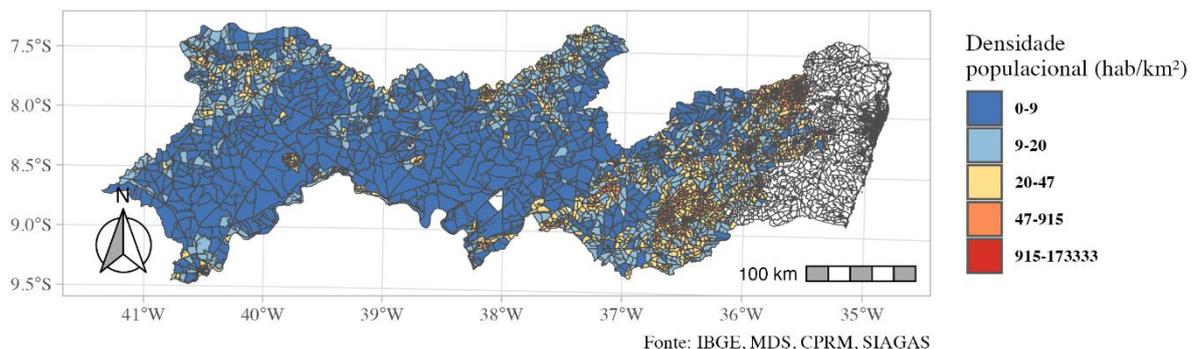
Ao apresentar espacialmente os resultados e as discussões referentes à distribuição demográfica (Figura 24), pode-se concluir que os setores censitários localizados no Agreste apresentam maiores densidades, principalmente quando comparados aos localizados nas regiões do Sertão Pernambucano e do Sertão do São Francisco, onde fica evidente a dispersão populacional, uma vez que os setores na cor azul representam densidade de até 9 habitantes por km², configurando regiões onde a população reside essencialmente de forma difusa.

Segundo o IBGE (2010), a média da densidade demográfica do semiárido brasileiro foi de 23,5 habitantes/km², ao passo que, na região de estudo, esses valores são muito distintos, tanto quando comparados com a média do semiárido, posto que o valor médio encontrado foi de 15,4 habitantes/km², tanto entre as zonas rurais das mesorregiões do Agreste, Sertão e Sertão do São Francisco, com 30, 10,7 e 8,3 habitantes/km², respectivamente.

A distinção entre o Agreste e as demais mesorregiões foi significativa, praticamente 3 vezes maior que a média das demais regiões. Esse fato amplia os desafios, no tocante a garantir a implantação de políticas públicas específicas para a população dessas regiões, incluindo as tecnologias hídras.

Dos setores censitários localizados na zona rural do semiárido de Pernambuco, 43% têm densidade populacional menor ou igual à média do semiárido, 23,5 habitantes/km². Por outro lado, uma quantidade considerável de setores, 40%, tem densidade acima dos 40 habitantes/km². Essa discrepância deve ser levada em consideração para auxiliar nas escolhas das tecnologias de recursos hídricos a serem implantadas nessas áreas, principalmente tecnologias de uso coletivo.

Figura 24 – Classificação dos setores censitários por densidade demográfica



Fonte: Elaboração própria (2025).

A dispersão ou a concentração demográfica no semiárido gera desafios distintos em relação à gestão hídrica. Em áreas com população mais dispersa, é necessário maior cuidado na implementação de sistemas que considerem volumes dimensionados para uso familiar. Por outro lado, em áreas com maior concentração populacional, a demanda volumétrica por água em um mesmo território aumenta significativamente. Nesses casos, é recomendável avaliar a construção de tecnologias de maior capacidade de armazenamento hídrico, incluindo a distribuição de água por meio de tubulações diretamente para cada residência, aproximando-se de sistemas mais tradicionais de distribuição hídrica.

Ao aprofundar o olhar sobre a situação do semiárido, constatam-se aspectos demográficos distintos, fato que torna mais desafiador a estratégia para disponibilizar meios de acesso à água em quantidade e qualidade. Ainda se evidencia a necessidade de políticas cada vez mais adaptadas às situações microrregionais distintas.

5.2.1.2 Relação habitantes x tecnologias

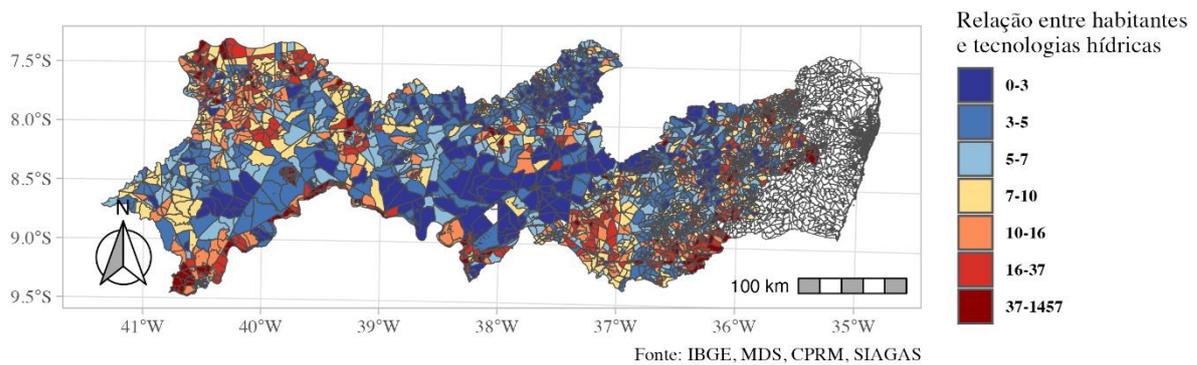
O estudo identificou que, em apenas 35% dos setores censitários, pode-se considerar essa relação (habitante x tecnologia) como satisfatória, ou seja, nessas regiões cada tecnologia serve a até 6 pessoas. Para melhor análise da relação entre habitantes e tecnologias, é importante levar em consideração que a média populacional por residência rural no semiárido Pernambucano é de 3,77 habitantes, segundo o IBGE (2010). Tendo esse parâmetro como ponto de partida, a análise da relação do número de pessoas por tecnologia hídrica é extremamente preocupante, uma vez que a grande maioria das tecnologias hídricas implantadas no semiárido tem finalidade de uso familiar, por tanto quanto mais próximo o valor da média de habitantes por residência (3,77) melhor a segurança hídrica da família.

Por outro lado, o estado tem 3% de setores censitários sem nenhuma tecnologia hídrica instalada. Considerou-se como contendo uma distribuição insuficiente os setores censitários nos quais existe ao menos uma tecnologia hídrica para servir entre 6 e 12 habitantes. Nessa classe, estão inseridos 25% dos setores censitários. Consideram-se extremamente precários 1.134 setores censitários (36%), onde existe apenas uma tecnologia para atender 12 ou mais habitantes (Figura 25).

Neste estudo, considerou-se que a relação de habitantes por tecnologia de abastecimento de água deve ser inversamente proporcional à vulnerabilidade hídrica. Ou seja, quanto menos habitantes dependem de uma mesma tecnologia, menor é a vulnerabilidade hídrica. Dessa forma, em apenas pouco mais de 15% dos setores censitários, a relação de habitantes por

tecnologia é considerada adequada, pois nesses setores a tecnologia atende até 3,77 pessoas. Isso está em conformidade com as recomendações que indicam a necessidade de 50 a 100 litros de água potável por pessoa por dia, e de 1.000 m³ de água por habitante ao ano, para garantir a segurança hídrica e evitar a escassez (Falkenmark, 1989; World Water Commission, 2000).

Figura 25 – Classificação dos setores censitários, com base na relação entre habitantes e tecnologias hídricas



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.1.3 Tecnologia x residências

A zona rural do semiárido Pernambucano é extremamente carente de tecnologias hídricas, uma vez que apenas 17 % dos setores censitários têm uma ou mais tecnologias disponíveis por residência, fator altamente limitante sob o ponto de vista da segurança hídrica e da permanência da população no ambiente rural semiárido, como está demonstrado na Figura 26.

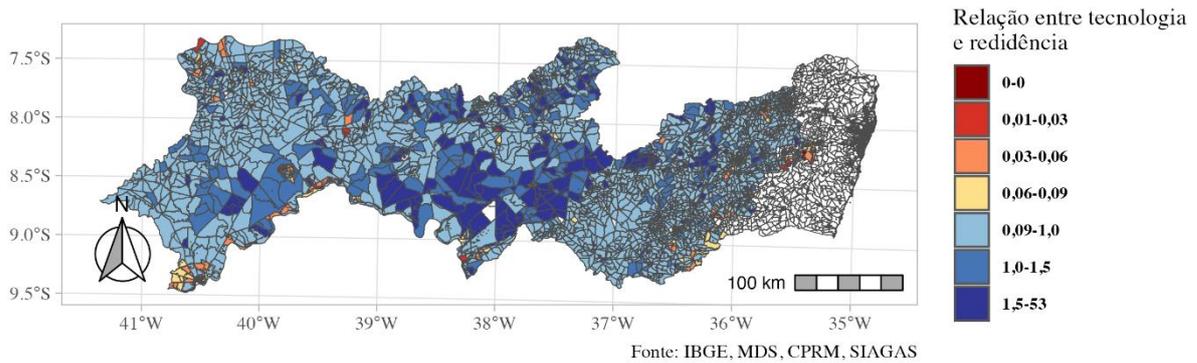
A análise dos resultados da relação dos números de tecnologias hídricas pela quantidade de residências nos setores censitários permite uma determinação mais direta das regiões potencialmente mais ou menos vulneráveis do ponto de vista hídrico.

Dada a permanente situação de escassez hídrica no semiárido, é possível concluir que, quanto maior o número e mais diversificados os tipos de tecnologias hídricas disponíveis por residência, melhores serão as condições de enfrentamento das condições climáticas severas (Montenegro *et al.*, 2022).

Em apenas 134 setores, foi detectado que a proporção de tecnologias por residência é maior que dois. Esse é um parâmetro importante, pois, tomando como base o Programa Cisternas do Governo Federal, que tem como meta atender a população minimamente com uma

TS para armazenar água de consumo humano e uma TS destinada à produção agrícola e à dessedentação animal, constata-se que as políticas públicas de acesso à água no semiárido ainda têm um longo caminho a percorrer.

Figura 26 – Classificação dos setores censitários a partir da relação entre tecnologia e residências



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.1.4 Disponibilidade hídrica: volume *per capita*

Os resultados das simulações dos volumes distribuídos por população residente em cada setor censitário são expostos a partir de duas óticas distintas. A primeira, volume total armazenável, analisa apenas os volumes de armazenamento das tecnologias construídas, desconsiderando se houve precipitação ou não, revelando o quanto a população está em situação de vulnerabilidade hídrica, a partir do parâmetro para realizar a coleta e armazenamento das chuvas, caso elas ocorram.

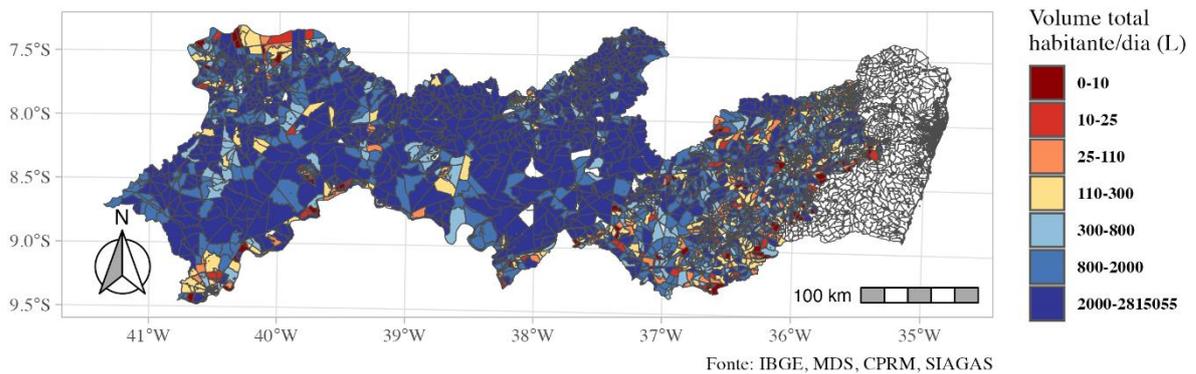
A segunda ótica analítica, volume potencial, leva em consideração a possível captação de água, a partir da precipitação, e o comportamento de acúmulo de água por meio da área de captação e índice de escoamento superficial das tecnologias instaladas. Ambos os resultados expostos são apresentados em litros/dia.

5.2.1.4.1 Volume total armazenável x habitantes

Para os volumes armazenáveis, foram realizadas duas simulações, uma considerando o somatório do volume das áreas de armazenamento de todas as tecnologias identificadas no setor censitário (Figura 27), resultando numa média de 5.783 litros/dia por habitante, ou seja, 2.111 m³/hab./ano. Contudo, ressalta-se que esse dado levou em consideração o volume dos

reservatórios, que em sua grande maioria, está exposto a intensa evaporação (não considerada neste estudo), além de ser uma fonte de água de baixíssima qualidade para o consumo humano, sendo disponível em geral apenas para a dessedentação animal e para a utilização em técnicas de irrigação de salvamento (Santos; Paiva; Silva, 2016; Silva *et al.*, 2023).

Figura 27 – Classificação dos setores censitários por volume (litros) total armazenável por habitante/dia



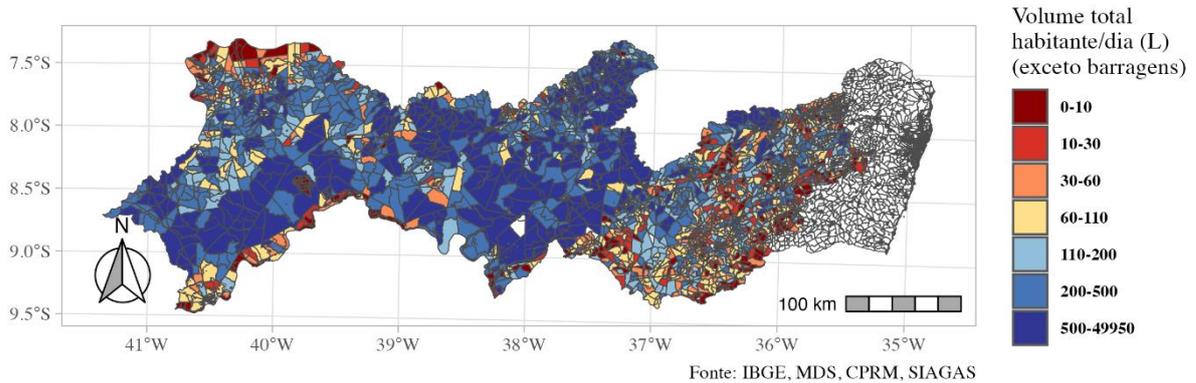
Fonte: Elaboração própria (2025).

A situação mais crítica em relação aos volumes *per capita* disponíveis para armazenamento de água é encontrada no Agreste, apresentado apenas 918 m³/hab./ano, com valores abaixo dos sugeridos pela ONU, que considera 1.500 m³/hab./ano como a quantidade potencial de água mínima (água bruta) para o bem-estar e desenvolvimento de qualquer região.

Ao excluir os reservatórios do cálculo de água armazenável disponível *per capita*, os volumes diminuem drasticamente, apresentando uma média de 243 litros/hab./dia ou 89 m³/hab./ano.

Uma análise mais detalhada (sem os volumes dos reservatórios) permitiu classificar os setores censitários em sete classes distintas, levando-se em consideração o volume disponível/dia/habitante. Como exposto na Figura 28, pode-se observar que, em mais de 1/4 dos setores censitários, os volumes das áreas de reservatórios permitiram o acúmulo médio de 2 litros *per capita*/dia, menor que 3 m³/hab./ano. Esse volume é considerado extremamente baixo para qualquer parâmetro mundial, segundo dados da ONU (Gramkow, 2020).

Figura 28 – Volume (litros) total armazenável por habitante/dia, exceto o volume de reservatórios



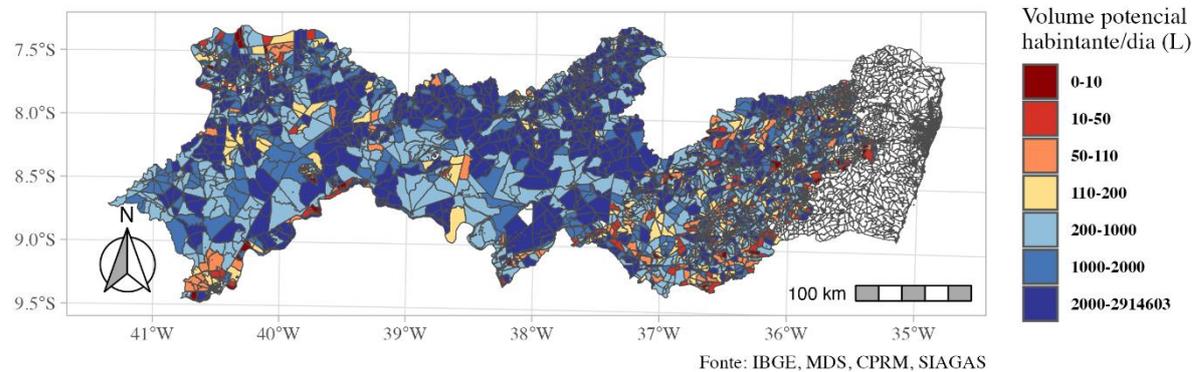
Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.1.4.2 Volume total potencial x habitantes

Ao analisar o volume potencial (considerando chuvas) disponível de água bruta em todas as tecnologias, verifica-se que 76% dos setores censitários apresentam potencial de captação superior a 110 litros *per capita* por dia, o que favorece a permanência das famílias na zona rural do semiárido. No entanto, ainda é possível constatar que mais de 10% dos setores censitários teriam uma disponibilidade inferior a 10 litros por pessoa por dia (Figura 29). Dos setores censitários que apresentam menos de 10 litros pessoa (considerado o volume potencial disponível), 52% encontram-se no Agreste, 32% no Sertão do São Francisco e 12% no Sertão Pernambucano.

Ao utilizar o volume potencial disponível, considerando os volumes dos reservatórios, a média é considerada alta, uma vez que representa 8.493,87 litros/hab./dia, ou 3.100 m³/hab./ano. O volume dos reservatórios corresponde a 90% do volume potencial disponível nos setores censitários, totalizando pouco mais de 1,3 bilhão de m³. Exceto em casos extremamente atípicos, essa água será destinada ao consumo humano. Portanto, é essencial apresentar cálculos que excluam os volumes coletados por essas tecnologias para uma avaliação mais precisa da disponibilidade hídrica.

Figura 29 – Classificação dos setores censitários por volume (litros) total potencial, por habitante/dia



Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao realizar o cálculo do volume potencial disponível, desprezando o volume encontrado para os reservatórios, o contexto da disponibilidade hídrica, se altera consideravelmente, uma vez que se detecta que pouco mais de 22% das regiões estudadas sequer teriam disponibilidade de 10 litros/dia por habitante, o que representa quase 290 mil pessoas vivendo em condições de escassez extrema (Figura 30).

Ao analisar o parâmetro estabelecido pelas Nações Unidas para as necessidades básicas humanas, de 110 litros/hab./dia, constata-se que ao menos em 54% dos setores o volume potencial seria menor que o recomendável. Isso representa um quantitativo de pouco mais de 780 mil pessoas vivendo numa região de clima extremamente seco, com recursos hídricos extremamente limitados.

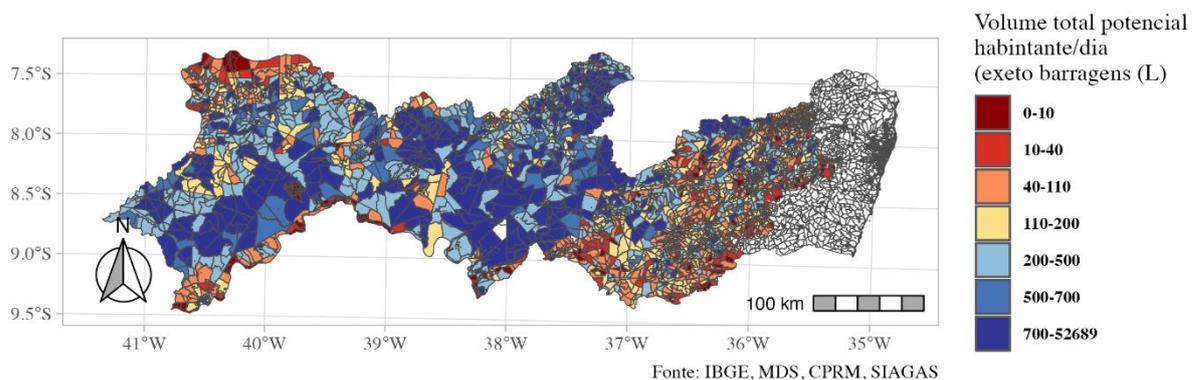
A partir de uma análise regionalizada, foi possível observar situações preocupantes em todas as mesorregiões, uma vez que os dados de volume potencial disponível, excluindo-se os reservatórios, apresentam indicadores de vulnerabilidade hídrica, no Agreste, no Sertão Pernambucano e no Sertão do São Francisco, representando respectivamente 73, 262 e 112 m³/hab./ano para cada região.

O volume potencial de água disponível depende de diversas variáveis para sua efetiva concretização. Os volumes captados frequentemente excedem a capacidade de armazenamento das tecnologias disponíveis, dependendo das condições antropológicas, como a gestão e o uso da água. Para que o armazenamento adicional seja viável, é necessário que o uso da água ocorra de maneira eficiente e em volumes adequados, permitindo a liberação de espaço para novo armazenamento. Além disso, fatores climáticos, como intensidade, duração e frequência das chuvas, bem como os índices de evaporação, desempenham um papel crucial. Se a precipitação for excessivamente intensa, toda a chuva pode não ser captada, pois as áreas de armazenamento

podem já estar operando em sua capacidade máxima.

A situação das famílias residentes na zona rural do semiárido é extremamente delicada, marcada por uma dicotomia crítica entre utilizar a água disponível nos reservatórios e esperar novas chuvas para reabastecê-los, ou restringir o uso da água armazenada e viver com severas limitações hídricas, sem garantias de que novas precipitações ocorrerão. É fundamental proporcionar orientação contínua às famílias, oferecendo informações meteorológicas precisas e regionalizadas sobre as previsões de chuva ao longo do ano. Isso permitirá que os habitantes gerenciem seus recursos hídricos de maneira mais eficaz e sustentável, adaptando-se às condições climáticas e melhorando a segurança hídrica nas regiões semiáridas.

Figura 30 – Classificação dos setores censitários pelo volume (litros) total potencial, por hab./dia, exceto o volume dos reservatórios



Fonte: Elaboração própria (2025).

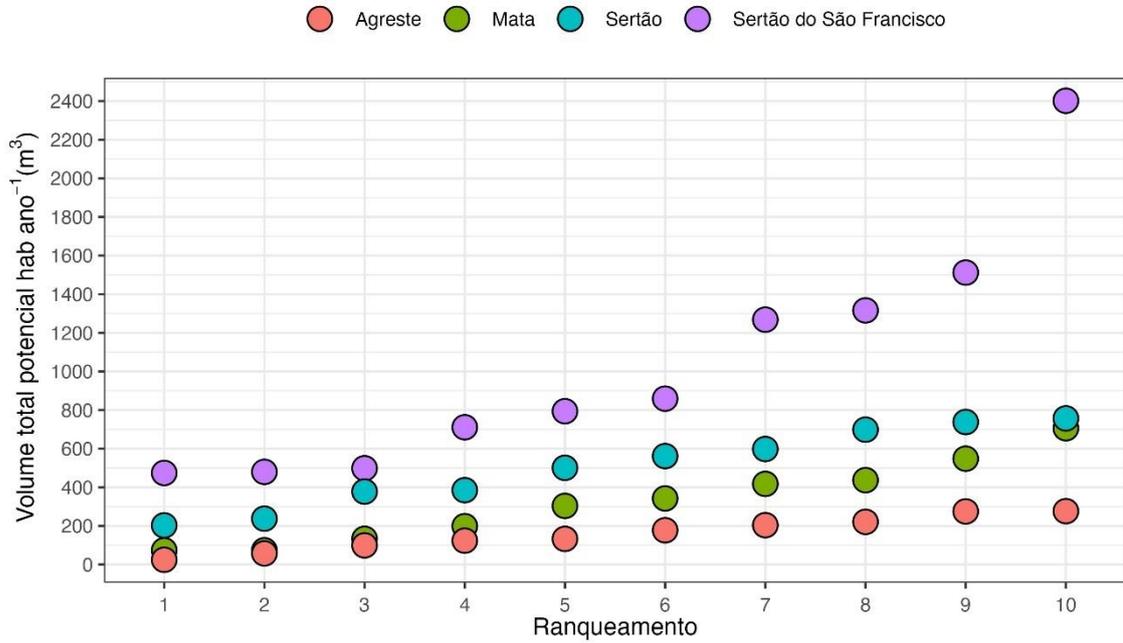
5.2.1.4.3 Ranking das regiões e municípios em relação à disponibilidade hídrica

Mesmo considerando os setores censitários como foco deste estudo, estende-se que a apresentação de uma parte dos resultados, levando-se em consideração o aspecto municipal e regional, pode auxiliar numa melhor visualização dos achados. Considerou-se neste estudo, quanto à disponibilidade hídrica, os dados do volume potencial total incluindo os reservatórios (área de armazenamento x chuvas x habitantes).

A partir do volume potencial hídrico, identificaram-se os dez municípios mais críticos em cada mesorregião (Figura 31). Os dados indicam que os municípios do Agreste destacam-se negativamente em todas as classificações, ocupando do primeiro ao décimo lugar nas piores disponibilidades hídricas. Em seguida, surgem os municípios da região da Mata, do Sertão Pernambucano e do Sertão do São Francisco (Figura 32). Essa constatação reflete um cenário

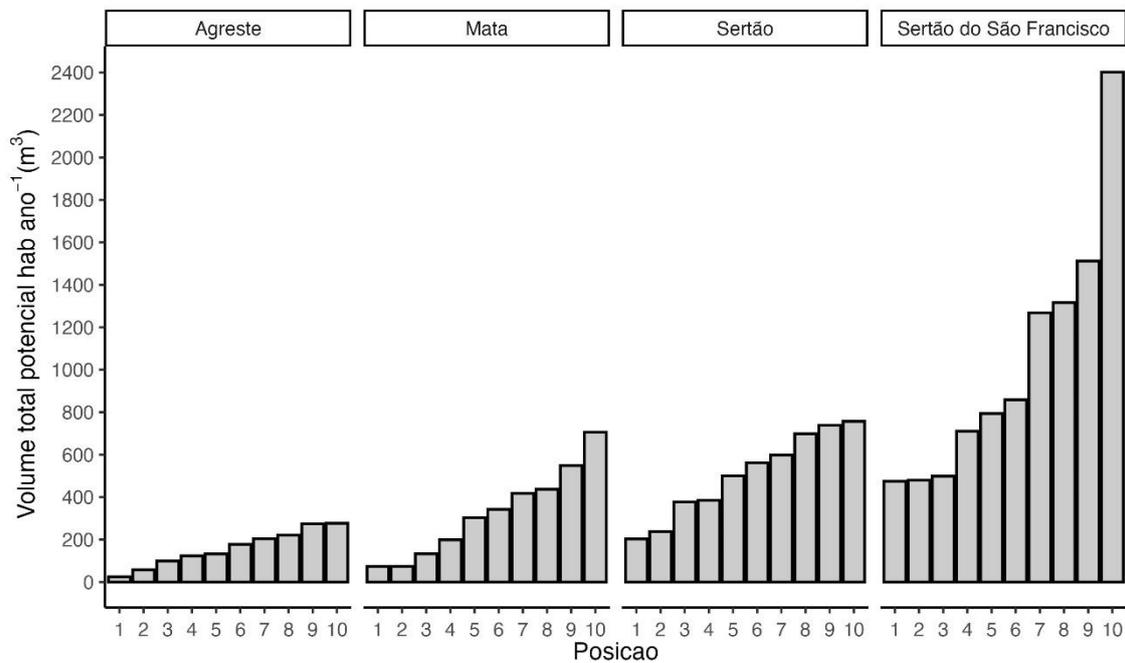
de maior pressão sobre os recursos hídricos no Agreste, o que requer estratégias específicas de gestão.

Figura 31 – Ranqueamento, por mesorregião, dos dez municípios com piores disponibilidades hídricas



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 32 – Posicionamento das mesorregiões a partir dos dez municípios com piores disponibilidades hídricas



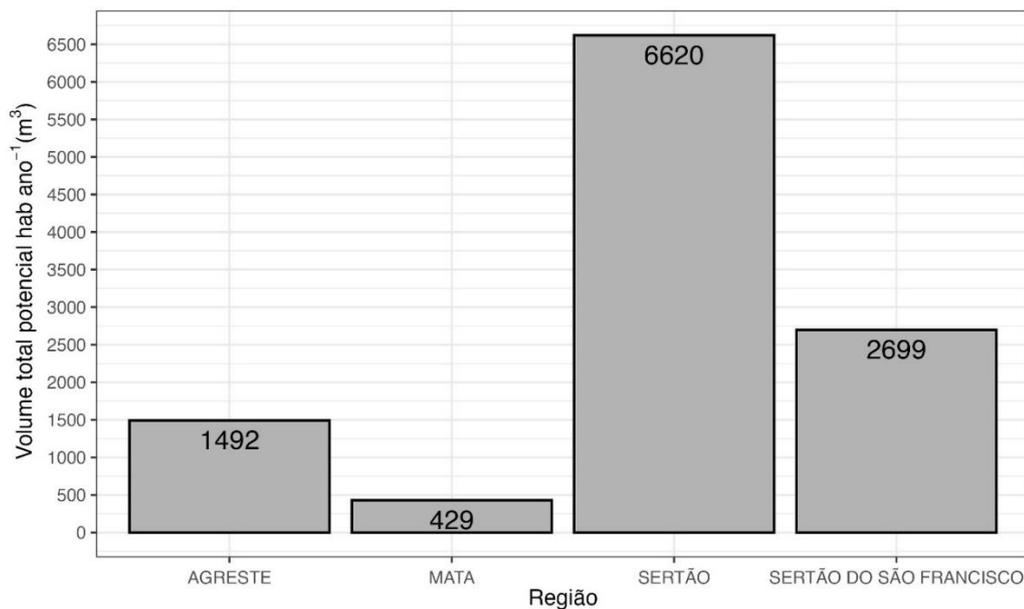
Fonte: Elaboração própria (2025).

Ao analisar a disponibilidade hídrica média de cada município (agrupando todos os

setores censitários) e, posteriormente, classificar essas médias por mesorregião, constata-se uma situação crítica na região da Mata. Embora a pesquisa tenha contemplado apenas 11 municípios do semiárido nessa mesorregião, sua disponibilidade hídrica média é de apenas 429 m³/habitante/ano, seguida pela região do Agreste, com 1.492 m³/habitante/ano. Tais valores são preocupantes quando comparados à recomendação mínima de 1.500 m³/habitante/ano estabelecida pela ONU.

Por outro lado, as mesorregiões do Sertão do São Francisco e do Sertão Pernambucano apresentam melhores indicadores, atingindo 2.699 e 6.620 m³/habitante/ano, respectivamente (Figura 33). Esses dados sugerem uma distribuição desigual dos recursos hídricos em Pernambuco, reforçando a necessidade de políticas públicas específicas para as áreas mais vulneráveis e de estratégias que contemplem as particularidades de cada mesorregião.

Figura 33 – Disponibilidade hídrica média por mesorregião, considerando os municípios estudados



Fonte: Elaboração própria (2025).

Quando colocados em ordem crescente de disponibilidade hídrica, nota-se que, dos 139 municípios acompanhados no estudo, apenas 46 apresentam volumes anuais *per capita* maiores que 1.500 habitantes/ano⁻¹/m³. Mais de 66% dos municípios apresentam índice abaixo do mínimo recomendado pela ONU. Numa classificação dos piores 40 municípios (Tabela 10), todos apresentam disponibilidade hídrica igual ou menor que 500 habitantes/ano⁻¹/m³, ou seja, numa análise geral do estado de Pernambuco, constata-se que 21% dos municípios têm em sua zona rural uma disponibilidade hídrica inferior a 1/3 do mínimo recomendado pelas Nações Unidas para uma vida digna.

Tabela 10 – *Ranking* dos municípios com pior disponibilidade hídrica na zona rural

Posição	Municípios	Disponibilidade hídrica hab./ano ⁻¹ /(m ³)
1	Palmeirina	24.61
2	Machados	57.70
3	Jaqueira	73.63
4	Belém de Maria	73.77
5	Vertente do Lério	99.18
6	Tupanatinga	123.73
7	Toritama	132.82
8	Chã Grande	133.21
9	Limoeiro	177.47
10	Catende	198.79
11	Cedro	202.81
12	Iati	203.89
13	Lajedo	221.09
14	Triunfo	237.57
15	Jurema	274.99
16	Jataúba	276.37
17	São Benedito do Sul	303.82
18	Canhotinho	315.64
19	Jucati	331.05
20	Quipapá	342.29
21	Saloá	344.70
22	Bonito	353.47
23	Agrestina	377.18
24	Mirandiba	377.81
25	Quixaba	385.14
26	Correntes	391.14
27	Barra de Guabiraba	394.26
28	Venturosa	402.67
29	Panelas	416.62
30	Vitória de Santo Antão	417.66
31	Tacaimbó	421.14
32	Brejo da Madre de Deus	433.14
33	Glória do Goitá	436.98
34	Capoeiras	458.64
35	Surubim	473.77
36	Afrânio	474.24
37	Tacaratu	479.96
38	Angelim	483.10
39	Floresta	498.58
40	Arcoverde	500.72

Fonte: Elaboração própria a partir do volume médio dos setores censitários da variável: volume total potencial de armazenamento hab./ano⁻¹/m³ (2025).

5.3 TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS, BASEADO NA COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES EXTREMAS (LESTE-OESTE) DO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

As tendências dos índices extremos de temperatura e chuva para as localidades analisadas no presente estudo estão resumidas na Tabela 11, indicando também seu nível de significância. Na sequência, será apresentada a variabilidade temporal observada, discutindo os dados obtidos que possibilitam identificar como os extremos de temperatura e de chuva têm

variado em Dormentes e Canhotinho, no período de 1980 a 2016.

Tabela 11 – Tendências dos índices de extremos de temperatura, precipitação e umidade para as duas localidades analisadas no estado de Pernambuco

Índice climático (unidade)	Dormentes - Sertão	Canhotinho - Agreste
TN10p (%) - Noites frias	-0,800*	-0,755*
TN90p (%) - Noites quentes	0,780*	-0,038
TX10p (%) - Dias frios	-0,411*	-0,322*
TX90p (%) - Dias quentes	0,507*	0,297
DCS (dias) - Dias consecutivos secos	-0,593	0,379
DCU (dias) - Dias consecutivos úmidos	-0,230*	-0,885*
PRCPTOT (mm) - Chuva total	-2,246	0,473
R95p (mm) - Chuva em dias muito úmidos	-0,700	4,705
RX5day (mm) - Chuva máxima em 5 dias	-0,138	0,585
R10 (dias) – N° de dias com chuva ≥ 10 mm	-0,055	0,238
R20 (dias) – N° de dias com chuva ≥ 20 mm	0,003	0,115
R30 (dias) – N° de dias com chuva ≥ 30 mm	0,001	0,057

* Indica que o valor da tendência é significativo ao nível de significância de 95% ($p < 0,05$); N° - número.

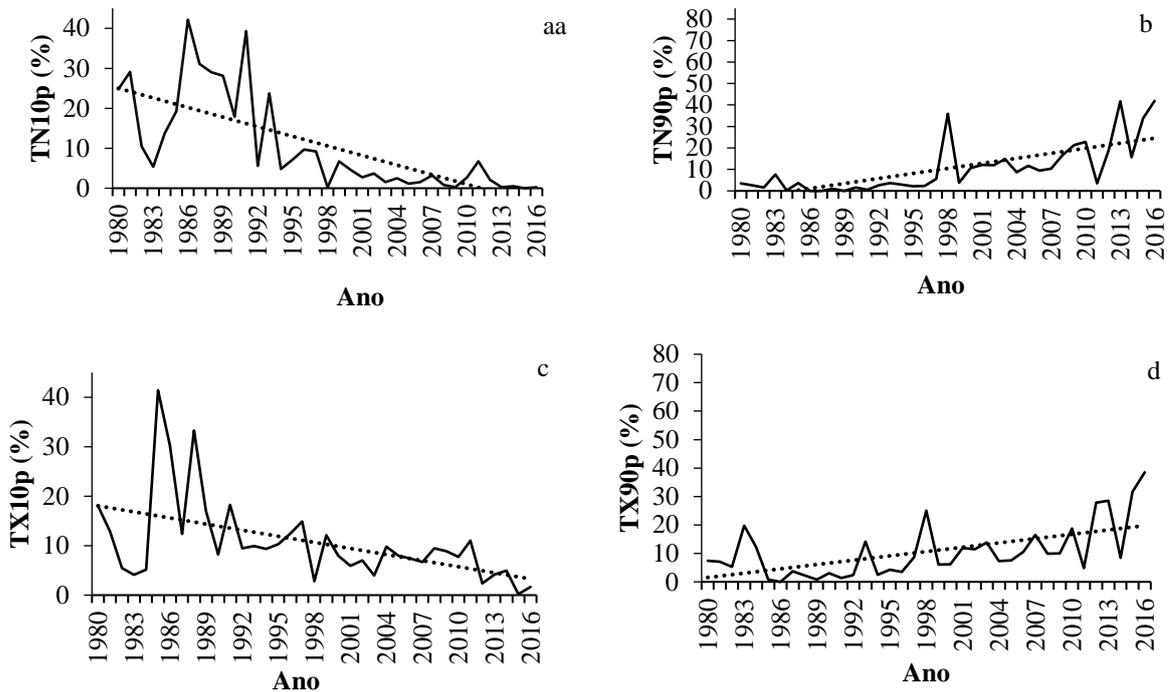
Fonte: Elaboração própria (2025).

5.3.1 Índices de extremos de temperatura

As séries temporais dos índices extremos de temperatura, referentes às tendências de noites frias (TN10p), noites quentes (TN90p), dias frios (TX10p) e dias quentes (TX90p), para Dormentes e Canhotinho, são mostradas nas Figuras 34 e 35, respectivamente. O índice TN10p em Dormentes e Canhotinho apresentou tendência de redução de noites frias, a uma taxa de -0,800% e -0,755% ao ano, respectivamente, ambos com nível de significância de 5% (Figuras 34a e 35a, Tabela 11). Em concordância com a diminuição de noites frias, o índice de noites quentes (TN90p), apresentou tendência de aumento apenas na região de Dormentes (Figura 34b) a uma taxa de 0,780% ao ano, sendo essa tendência significativa ao nível de significância de 5%.

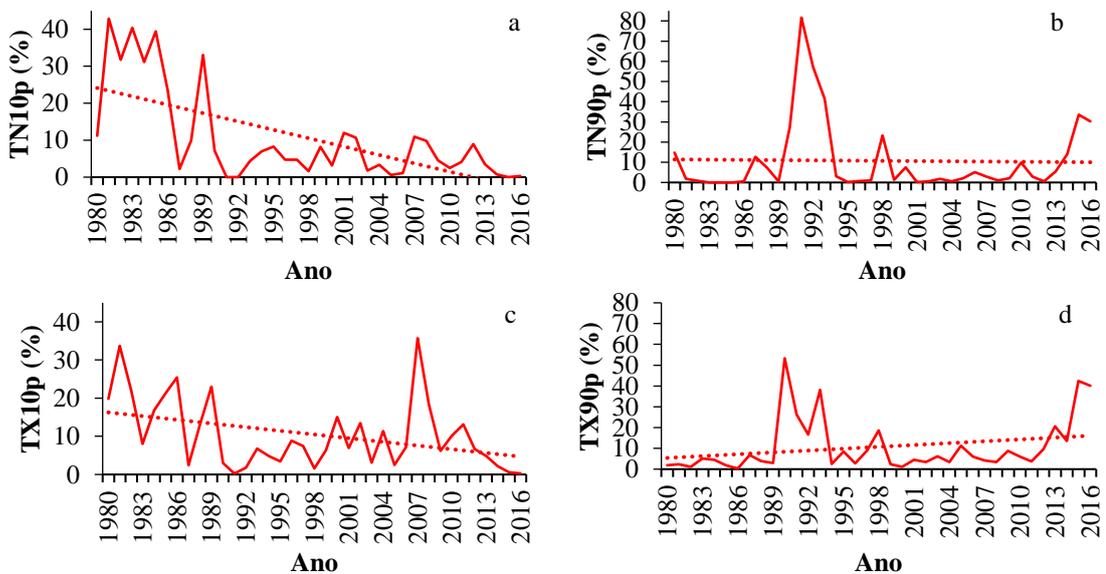
Foram observadas ainda redução de dias frios (TX10p), a uma taxa de -0,411% e -0,322% (Figuras 34c e 35c), e tendência de aumento dos dias quentes (TX90p) da ordem de 0,507% e 0,297% ao ano (Figuras 34d e 35d) ao ano, em Dormentes e Canhotinho, respectivamente. Apenas o valor de TX90p em Canhotinho não foi significativo ao nível de significância de 5%, conforme detalhado na Tabela 11. Desse modo, há uma consistência quanto ao aspecto de aquecimento aqui observado, indicando maior frequência de noites e dias quentes e menor número de noites e dias frios, com a temperatura mínima apresentando maiores taxas de aumento.

Figura 34 – Tendência nas frequências (em %) de: (a) noites frias (TN10p), (b) noites quentes (TN90p), (c) dias frios (TX10p) e (d) dias quentes (TX90p) em Dormentes, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 35 – Tendência nas frequências (em %) de: (a) noites frias, (TN10p), (b) noites quentes (TN90p), (c) dias frios (TX10p) e (d) dias quentes (TX90p) em Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

Esse padrão de tendências de aumento nos extremos quentes e redução nos extremos frios corrobora o aquecimento global (IPCC, 2021). Além disso, como já identificado em

estudos anteriores, o aumento da temperatura mínima é maior do que a temperatura máxima, reduzindo a amplitude térmica diária, condicionando ambiente mais quente (Easterling *et al.*, 1997; Vose; Easterling; Gleason, 2005; Gil-Alana, 2018).

5.3.2 Índices de extremos de chuva

As Figuras 36 e 37 mostram as séries temporais observadas dos índices extremos de chuva, referentes aos dias consecutivos secos (DCS), dias consecutivos úmidos (DCU), chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p), chuva máxima em 5 dias (RX5day), e número de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30), para Dormentes e Canhotinho, respectivamente. Conforme a Tabela 11, apenas o índice DCU apresentou tendência significativa em nível de significância de 5%.

Na análise de tendência de dias consecutivos secos (DCS), observa-se que Dormentes apresenta tendência de redução no número de dias consecutivos secos, a uma taxa de -0,593 dias ao ano, enquanto Canhotinho apresenta tendência de aumento no mesmo período, de 0,379 dias ao ano (Figuras 36a e 37a, Tabela 11). Quanto ao índice DCU, Dormentes e Canhotinho, apresentaram tendência significativa de redução no número de dias consecutivos úmidos, a uma taxa de -0,230 dias e -0,885 dias ao ano, respectivamente. A chuva total acumulada no ano (PRCPTOT, Figuras 36b e 37b, Tabela 11) apresenta tendência de redução em Dormentes e aumento em Canhotinho, a uma taxa de -2,246 mm e 0,473 mm ao ano, respectivamente.

Deve-se ter atenção especial ao fato de os DCU apresentarem redução significativa, um parâmetro geralmente negligenciado nos estudos. A redução no número de dias com chuva agrava o efeito da disponibilidade hídrica devido à descontinuidade das chuvas (menor frequência) e impacta negativamente as culturas agrícolas (Sanches *et al.*, 2019). Os DCU também exercem influência no escoamento superficial das áreas de captação de tecnologias de recursos hídricos, impactando diretamente na quantidade de água armazenada (Santana, 2015).

Os índices que representam a chuva anual acumulada em dias úmidos (R95p) e em 5 dias consecutivos (RX5day) mostram tendência negativa de -0,700 mm e -0,139 mm ao ano em Dormentes, e tendência positiva de 4,705 mm e 0,585 mm ao ano em Canhotinho (Figuras 36b e 37b). Nas Figuras 36c e 37c, os índices que representam os dias com chuvas, R10, R20, e R30, apresentaram estabilidade, com leves tendências positivas para o número de dias com chuvas acima de 10, 20 e 30 mm (exceto em Dormentes para R10), a uma taxa de -0,055 dias, 0,003 dias e 0,001 dias ao ano em Dormentes e 0,238 dias, 0,115 dias e 0,057 dias ao ano em Canhotinho, respectivamente (Marengo *et al.*, 2020a).

O aumento no total anual de chuva em Canhotinho, com redução significativa nos dias consecutivos úmidos, está relacionado com o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos. Resultado similar foi encontrado na Região Metropolitana de São Paulo (Marengo *et al.*, 2020), onde as chuvas intensas têm se concentrado em poucos dias, separados por períodos mais longos de seca. Considerando que os índices R95p e RX5day estão relacionados a chuvas intensas, a exemplo do que foi identificado em Canhotinho, com tendência de aumento de 4,705 mm e 0,585 mm ao ano (Figura 37b e Tabela 11), estas podem resultar em maiores impactos em ambiente urbano, devido ao processo de impermeabilização de superfícies, dificultando a infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial, contribuindo com enchentes, inundações e deslizamentos (Marengo *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2021).

Por outro lado, Dormentes historicamente com chuvas irregulares e escassas, mostra tendência de redução no acumulado total (e principalmente, redução na intensidade dos eventos de chuva, como visto na Tabela 11), aumentando o risco de secas e estiagens que têm seus impactos na produção de alimentos, na geração de energia e na saúde das populações (Brasil, 2017). Os eventos de seca do Nordeste brasileiro têm sido associados ao El Niño e ao aquecimento do Oceano Atlântico Tropical Norte, resultando em um aumento da vulnerabilidade social da região (Cunha *et al.*, 2018; Marengo *et al.*, 2018; 2023; Medeiros; Oliveira, 2021).

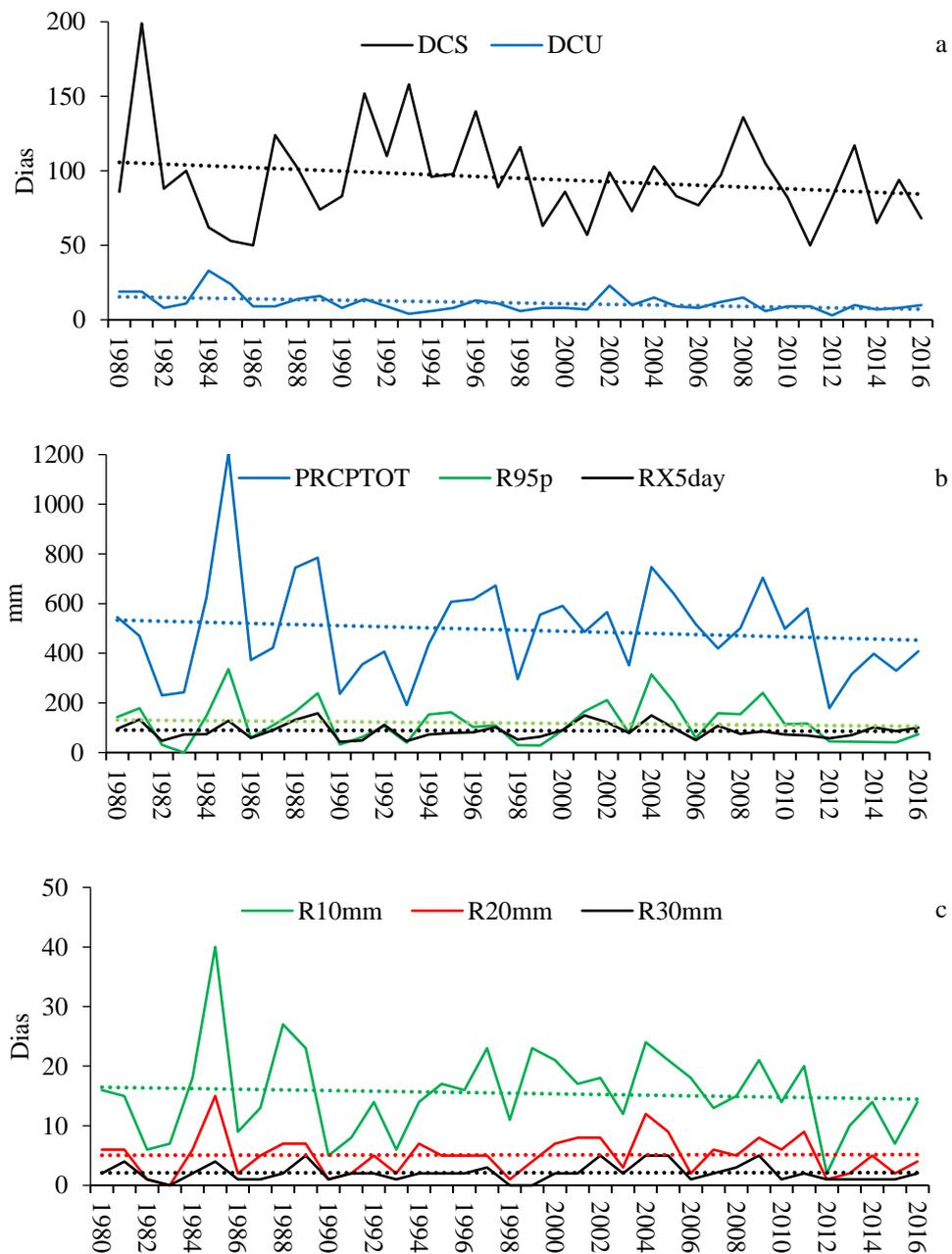
Considerando que grande parte da agricultura na região Nordeste do país é de sequeiro, a falta de chuvas ocasiona impactos devido a secas severas, aumentando, assim, a vulnerabilidade hídrica na região. Somado a isso, a seca das últimas duas décadas teve uma intensidade e um impacto econômico e social sem precedentes (Carvalho *et al.*, 2020; Sanches *et al.*, 2019), sendo identificadas as maiores perdas agrícolas no bioma Caatinga, uma vez que a seca e a estiagem são desastres recorrentes na região.

Portanto, os resultados encontrados concordam parcialmente com as previsões realizadas para a sub-região Nordeste da América do Sul (IPCC, 2021), que abrange o Nordeste brasileiro, indicando alta confiança de que haverá aumento na duração da seca, e confiança média de que aumentarão a intensidade e a frequência das chuvas extremas.

Essas alterações nos extremos de chuva e temperatura podem estar relacionadas à variabilidade natural do clima, ou ainda ao aumento nas emissões de gases de efeito estufa na atmosfera pelas atividades antrópicas (Marengo *et al.*, 2020), mas mecanismos de escala regional também podem exercer influência no ambiente, a exemplo de mudanças no uso e cobertura do solo (Tomasella *et al.*, 2018). Embora os índices de chuva não tenham se mostrado significativos em suas tendências de aumento ou diminuição (exceto para o índice DCU), os

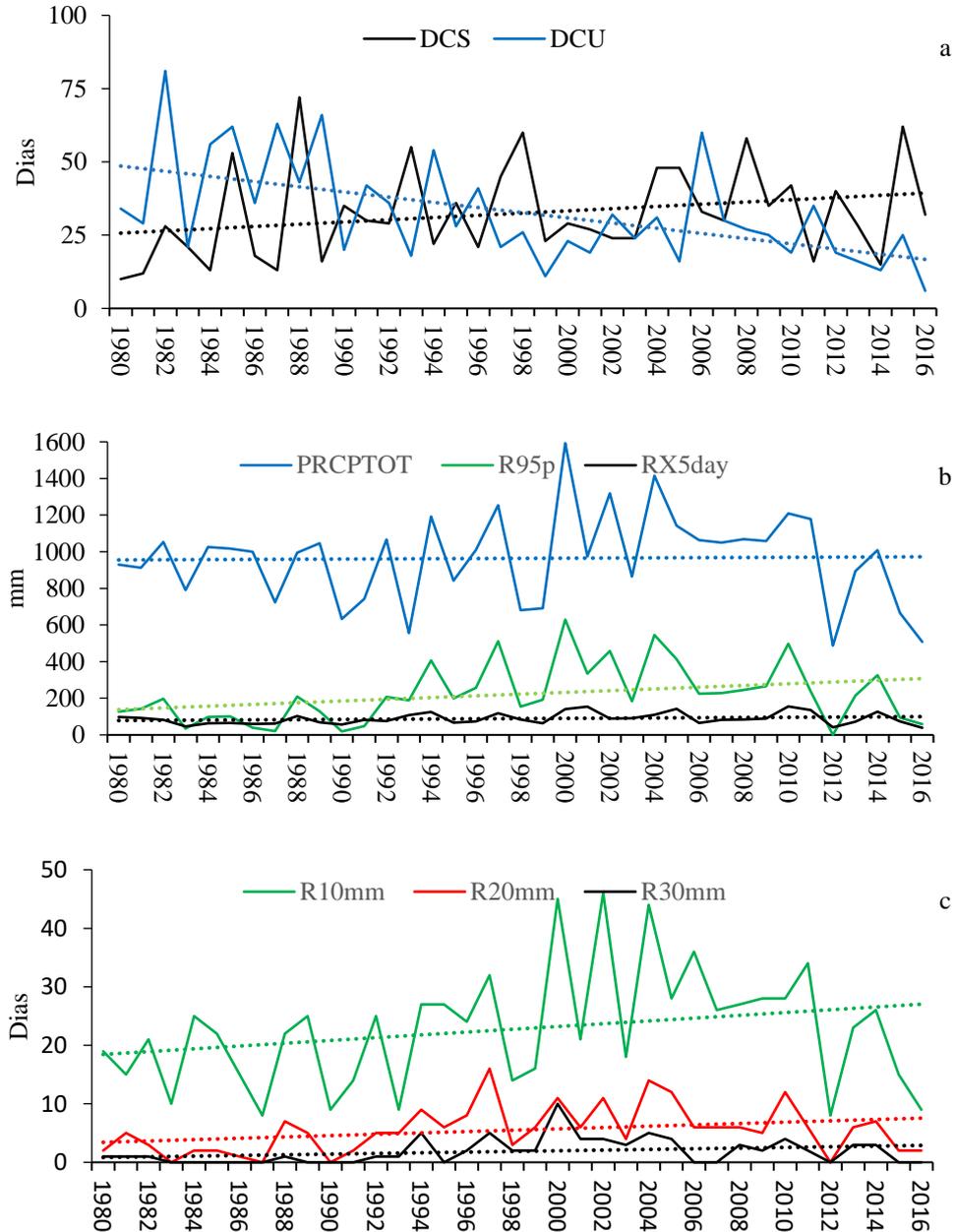
resultados evidenciam um aumento nas disparidades regionais do padrão de distribuição da chuva. Já os índices de temperatura apresentaram, na sua maioria, tendências significativas de aquecimento (máxima e mínima). A maior incerteza em relação à mudança nos índices de chuva corrobora trabalhos anteriores (Bender; Sentelhas, 2018; IPCC, 2021).

Figura 36 – Tendências da duração (em dias) de dias consecutivos secos (DCS) e dias consecutivos úmidos (DCU) (a); intensidade (em mm) de chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p) e chuva máxima em 5 dias (RX5day) (b); e frequência (em dias) de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30) (c), em Dormentes, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

Figura 37 – Tendências da duração (em dias) de dias consecutivos secos (DCS) e dias consecutivos úmidos (DCU) (a); intensidade (em mm) de chuva total (PRCPTOT), chuva em dias muito úmidos (R95p) e chuva máxima em 5 dias (RX5day) (b); e frequência (em dias) de dias com chuva acima de 10, 20 e 30 mm (R10, R20 e R30) (c), em Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

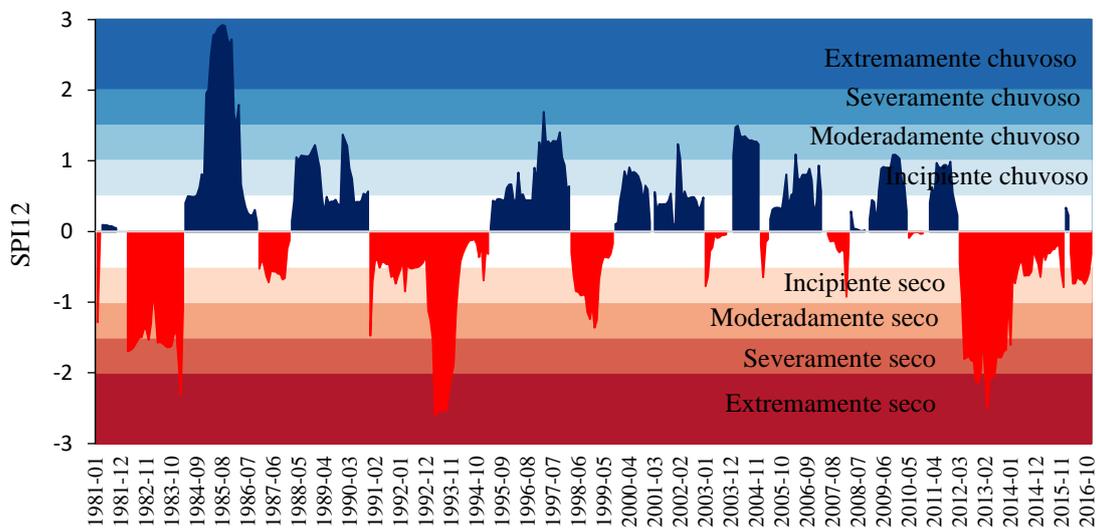
5.3.3 Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI)

Adicionalmente, para dar maior suporte aos índices de extremos climáticos, foi calculado o SPI, considerando que ele pode ser utilizado para auxiliar na quantificação e no monitoramento de condições associadas a secas e excesso de chuva em diferentes escalas de

tempo (McKee; Doesken; Kleist, 1993). Os eventos climáticos representados por valores de SPI superiores/inferiores a 0,5/-0,5 indicam o início do período chuvoso/seco.

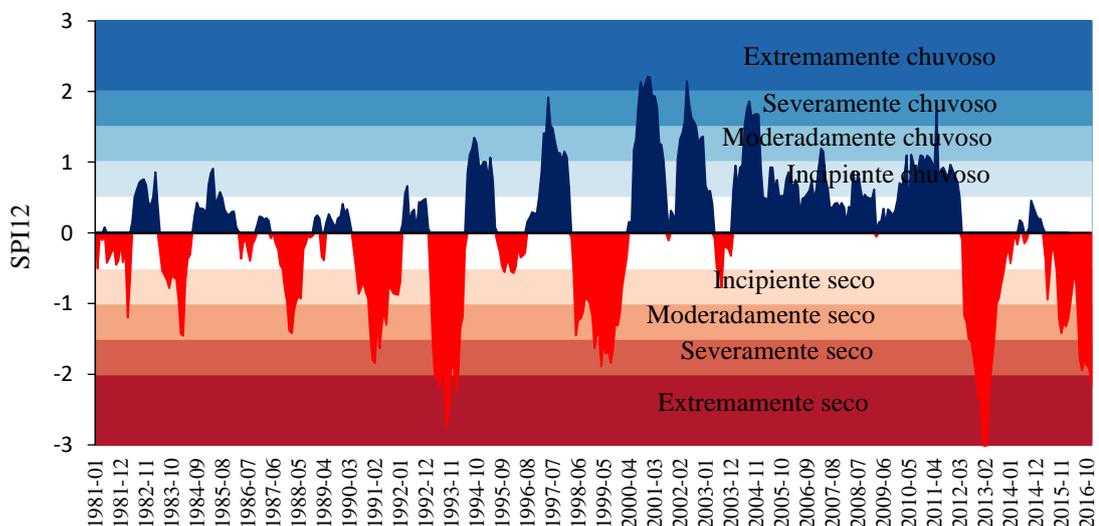
As Figuras 38 e 39 mostram a variabilidade do SPI para as regiões de Dormentes e Canhotinho, respectivamente, com a área em azul/vermelha indicando condições úmidas/secas. Em conformidade com Cunha *et al.* (2018), os episódios de 1982-1983, 1992-1993, 1997-1998 e 2012-2016 foram os eventos secos de maior intensidade que afetaram a região, sendo este último, o mais intenso, duradouro e abrangente (Cunha *et al.*, 2018; Marengo; Torres, Alves, 2017; Marengo *et al.*, 2018). O índice SPI em Dormentes indica tendência negativa (embora não significativa), o que sugere um aumento na frequência de eventos secos nos últimos anos.

Figura 38 – Série temporal mensal do SPI em escala de 12 meses no período de 1981 a 2016 para Dormentes, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

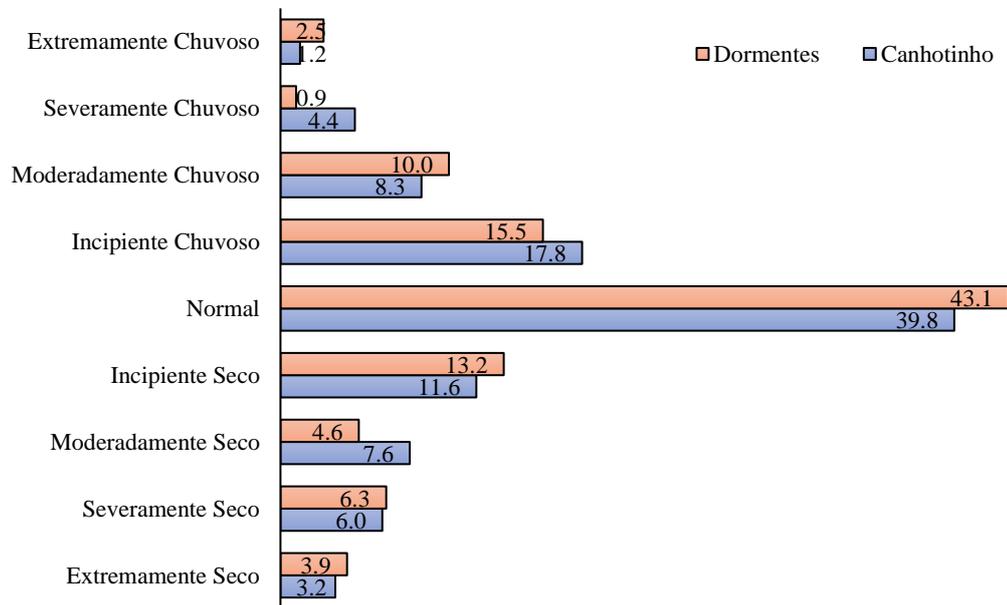
Figura 39 – Série temporal mensal do SPI em escala de 12 meses no período de 1981 a 2016 para Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

Na Figura 40, observa-se que, para Dormentes, predominam eventos que se enquadram na categoria normal (43,1%), ao passo que as categorias incipiente, moderada, severa e extrema para os eventos secos e chuvosos apresentam frequências de 13,2%; 4,6%; 6,3% e 3,9% e, 15,5%; 10,0%; 0,9% e 2,5%, respectivamente. Portanto, o número de ocorrências dos eventos secos (28,0%) e chuvosos (28,9%) são similares, no entanto, as secas de maiores/menores intensidades, a exemplo das categorias severa e extrema/incipiente e moderada, são mais/menos frequentes se comparados aos eventos chuvosos na mesma categoria.

Figura 40 – Frequência dos eventos secos e chuvosos (%) de acordo com o SPI (1981-2016), para Dormentes e Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

Para Canhotinho também predominam eventos na categoria normal (39,8%), ao passo que as categorias incipiente, moderada, severa e extrema para os eventos secos e chuvosos apresentam frequências de 11,6%; 7,6%; 6,0% e 3,2%, e 17,8; 8,3%; 4,4% e 1,2%, respectivamente (Figura 40). Portanto, para a região do Agreste, ocorre a predominância de eventos chuvosos (31,7%), em comparação aos eventos de seca (28,5%), porém as chuvas, na sua maioria, concentram-se nas categorias incipiente e moderada.

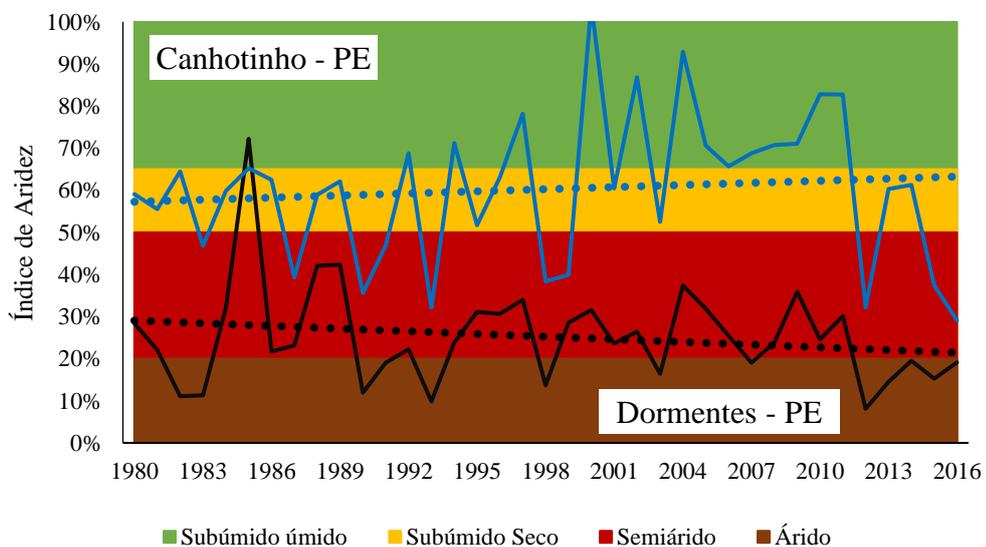
5.3.4 Índice de aridez

Considerando que a classificação de terras suscetíveis ao processo de desertificação pode ser determinado através do índice de aridez obtido a partir do quociente entre a chuva total anual e a evapotranspiração potencial total anual (Unep, 1992), constatou-se neste estudo um ambiente condicionado por índices pluviométricos decrescentes (-22,46 mm/década, Tabela 11

e Figura 36), no qual o aumento da temperatura média (a uma taxa de $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$) induz a uma maior taxa de evapotranspiração, o que implica em menor índice de aridez e maior suscetibilidade a desertificação, a exemplo do que se observa em Dormentes, de acordo com a Figura 41. Já na região de Canhotinho, historicamente com maiores acumulados de chuva (somados à tendência de aumento a uma taxa de $4,73\text{ mm}/\text{década}$, Tabela 11 e Figura 37), a taxa decrescente na evapotranspiração (a uma taxa de $-30,82\text{ mm}/\text{década}$) induz a um índice de aridez crescente, reduzindo ainda mais a suscetibilidade à degradação. Em ambos os casos, para interpretação do gráfico (Figura 41), deve-se levar em consideração que as linhas pontilhadas representam a tendência do índice e a linha contínua reflete a variação da série ao longo dos anos.

Considerando áreas suscetíveis à desertificação aquelas com índice de aridez variando de 5% a 65%, a suscetibilidade pode variar de muito alta (5% a 20%), alta (21% a 50%) até moderada (51% até 65%), de acordo com o próprio índice de aridez, isto é, quanto mais seco, mais susceptível à desertificação (Unep, 1992). Portanto a região de Dormentes, com regime de chuvas concentrado em poucos meses, marcado por forte irregularidade interanual e com temperatura média de $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, que determina altas taxas de evapotranspiração, configurando déficit hídrico, apresenta tendência de transição de área semiárida para árida, colocando-a em uma condição de elevado risco (alto e muito alto) de desertificação. Já Canhotinho tem tendência de transição de área subúmida seca para subúmida úmida, e está em uma condição de moderado risco (moderado e baixo) à degradação.

Figura 41 – Variabilidade interanual do índice de aridez e tendência climática à desertificação para Dormentes e Canhotinho, Pernambuco



Fonte: Elaboração própria (2024).

Soma-se ao risco do aumento das áreas semiáridas e surgimento de áreas áridas (Marengo *et al.*, 2020b) a redução da produção, a perda de biodiversidade e a degradação dos ecossistemas, principalmente em áreas de pastagem e Caatinga (Tomasella *et al.*, 2018; Vieira *et al.*, 2015), processos acelerados por eventos de seca mais intensos, longos e abrangentes observados de 2012 a 2018 (Brito *et al.*, 2018; Cunha *et al.*, 2019).

5.4 FERRAMENTA DE SUPORTE PARA AUXILIO NA TOMADA DE DECISÃO E CRIAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS

Os dados obtidos a partir das análises da distribuição geográfica de poços e tecnologias de armazenamento hídrico, combinados com informações demográficas, disponibilidade hídrica e estudos climatológicos, bem como projeções de tendências de mudanças climáticas, constituem-se numa metodologia (ferramenta), reproduzida num fluxograma, que se destina a apoiar o planejamento hídrico em comunidades rurais difusas no semiárido brasileiro (Figura 42). A aplicação desta metodologia pode se constituir numa ferramenta estratégica para subsidiar a tomada de decisão no desenvolvimento e na implementação de políticas públicas voltadas à gestão hídrica em áreas rurais vulneráveis.

Para facilitar a compreensão, o fluxograma foi organizado em cinco níveis hierárquicos, identificados por cores distintas:

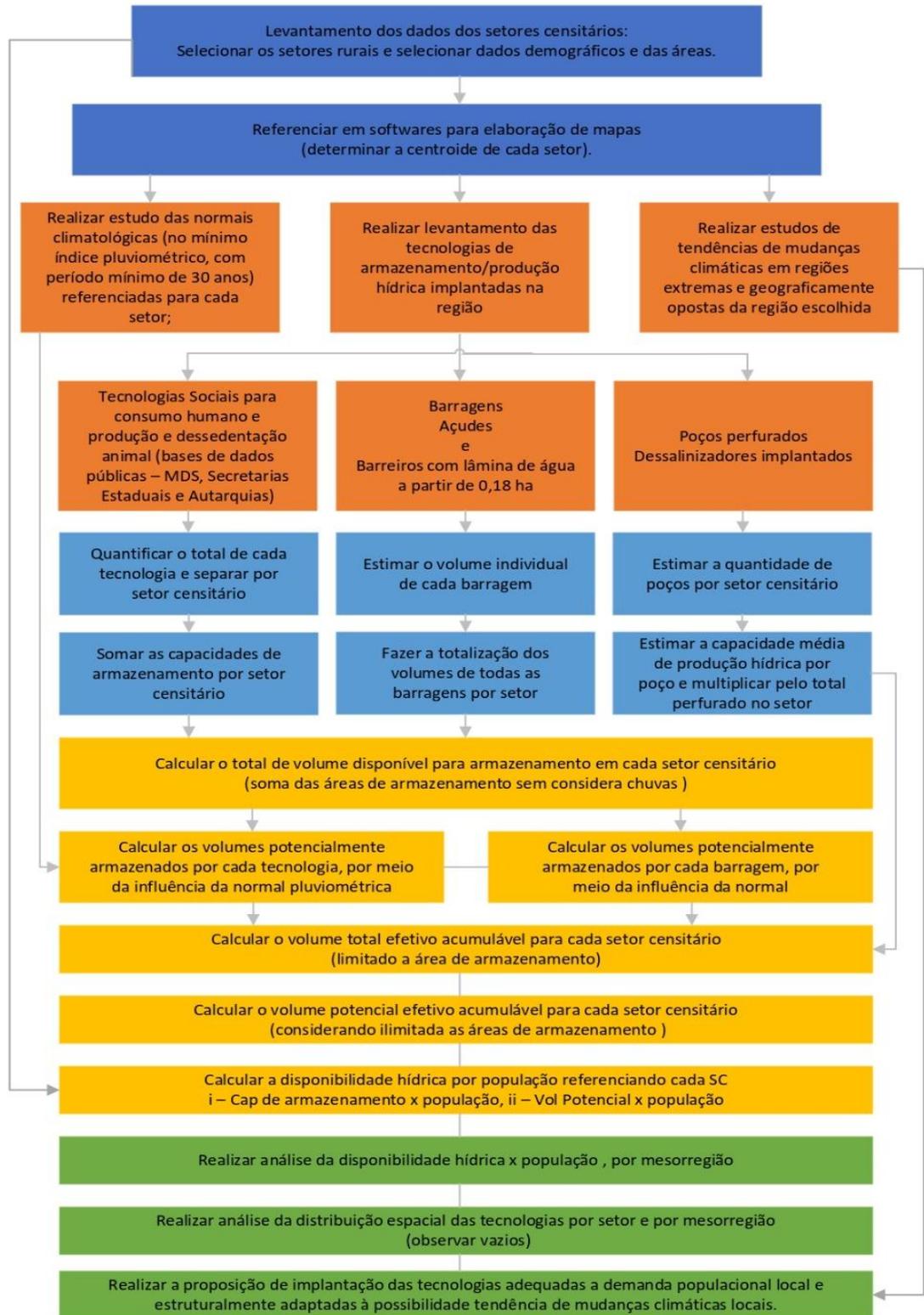
1. Primeiro nível: Corresponde à definição e seleção dos dados primários, incluindo informações demográficas e geográficas, bem como a escolha dos softwares de georreferenciamento que serão utilizados para análise e mapeamento espacial.
2. Segundo nível: Envolve a consolidação dos estudos climatológicos, com destaque para a análise das normais pluviométricas e a avaliação de tendências climáticas regionais. Além disso, realiza-se o levantamento das tecnologias hídricas já implantadas na região, categorizadas por suas funcionalidades e capacidades.
3. Terceiro nível: Foca na quantificação das tecnologias hídricas existentes, classificando-as por setor censitário e determinando suas respectivas capacidades de armazenamento. Essa etapa é essencial para identificar o potencial de cada tecnologia em relação às demandas locais.
4. Quarto nível: Engloba os cálculos de volumes disponíveis e potenciais. Essa etapa utiliza cruzamentos de dados, integrando áreas dos setores censitários, número e tipos de tecnologias, volumes de armazenamento, e os impactos da pluviometria local. Recombinam-se esses dados com informações demográficas para avaliar a disponibilidade

hídrica efetiva e potencial por setor.

5. Quinto nível: Consiste na análise regional dos dados consolidados nos níveis anteriores. Esse nível finaliza com a elaboração de recomendações para intervenções hídricas específicas, levando em conta os resultados obtidos e as necessidades locais, com vistas a promover maior resiliência hídrica e minimizar a vulnerabilidade das comunidades diante de mudanças climáticas.

Embora a ferramenta metodológica proposta, apresente uma abordagem robusta e detalhada, é importante enfatizar que ele não substitui a metodologia de planejamento hídrico já existente no Brasil, baseada em bacias hidrográficas. Em vez disso, a metodologia deve ser compreendida como uma ferramenta acessória, que contribui para aumentar a eficiência do planejamento hídrico, fornecendo análises complementares em escalas menores, como setores censitários, e priorizando soluções adaptadas a comunidades rurais. Dessa forma, esta ferramenta de planejamento se propõe a aprimorar o processo de gestão hídrica, particularmente em regiões de alta vulnerabilidade, como o semiárido brasileiro.

Figura 42 – Fluxograma de apoio ao planejamento hídrico em comunidades rurais (ferramenta de planejamento)



Fonte: Elaboração própria (2025).

5.4.1 Potencialidades de desagregação de dados

A partir dos dados apresentados no Atlas Águas: Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano (ANA, 2021), no Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040 (ANA, 2022) e na ferramenta metodológica de planejamento hídrico elaborada nesta pesquisa, propõe-se avançar no diagnóstico de vulnerabilidade hídrica em âmbitos regional, municipal e censitário, através da utilização de bases georreferenciadas. Enquanto o Atlas e o PNRH fornecem macrodiretrizes para a gestão de recursos hídricos, a ferramenta apresenta uma metodologia complementar que aborda as lacunas na análise detalhada das zonas rurais.

Estudos anteriores demonstram que a vulnerabilidade hídrica não se distribui de forma homogênea nos territórios municipais. Em cidades do semiárido, áreas periféricas e comunidades rurais isoladas apresentam maior exposição aos efeitos da escassez hídrica.

A utilização de dados censitários combinados com dados climatológicos, e identificação da capacidade de armazenamento hídrico, conforme estruturado na ferramenta, pode revelar informações cruciais em locais difusos, permitindo o cruzamento destas informações com dados de condições socioeconômicas e infraestrutura de saneamento, podendo possibilitar o direcionamento de ações específicas para mitigar as disparidades (ANA, 2021; 2022).

5.4.2 Integração da ferramenta do estudo com planejamentos existentes

A metodologia proposta na pesquisa, pode representar uma evolução em relação aos instrumentos tradicionais de planejamento hídrico. Ele detalha etapas essenciais, como:

1) Levantamento e organização de dados:

- Identificação de tecnologias hídricas existentes, como reservatórios, poços, dessalinizadores e tecnologias sociais de captação de água de chuva (cisternas de placa, barragens subterrâneas e tanques de pedra), segmentadas por setor censitário;
- Integração de informações de normais climatológicas e dados populacionais, permitindo uma análise mais precisa da disponibilidade hídrica.

2) Cálculo de disponibilidade hídrica:

- A ferramenta permite estimar volumes de água armazenados ou potenciais em

cada setor censitário, considerando influências climáticas locais e tecnologias implantadas. Essa abordagem pode agregar valor ao Atlas Águas, que foca na segurança hídrica em âmbito municipal urbano (ANA, 2021).

3) Proposição de soluções adaptadas:

- Baseado nos vazios identificados e nas demandas locais, a ferramenta orienta a implantação de tecnologias apropriadas, como sistemas de armazenamento adaptados a padrões climáticos específicos.

5.4.3 Contribuições para o fortalecimento da política

A ferramenta de planejamento proposta, propõe-se a complementar a gestão por bacias hidrográficas descrita na PNRH 2022-2040, oferecendo uma abordagem local e adaptada às particularidades do semiárido:

- *Diagnóstico detalhado e escalável*: a divisão por setor censitário permite identificar comunidades específicas que demandam atenção prioritária, ampliando a eficiência na alocação de recursos (ANA, 2022);
- *Planejamento de resiliência climática*: a metodologia incorpora dados históricos e projeções climáticas, alinhando-se às metas da PNRH para fortalecer a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental (ANA, 2021; 2022);
- *Inclusão social e participação comunitária*: o nível de detalhamento da análise pode favorecer a participação das comunidades na tomada de decisões, promovendo soluções cocriadas e adaptadas às necessidades locais.

6 CONCLUSÕES

Em relação ao objetivo 1, voltado à determinação do potencial de captação e armazenamento hídrico, o Agreste apresentou as melhores precipitações, com apenas uma região censitária nos piores índices.

Identificaram-se 22.978 reservatórios na zona rural do semiárido pernambucano, corroborando o estudo da APAC (2024), que listou 25.101 massas d'água. O uso do índice NDWI viabilizou mapeamento célere e praticamente sem custos, comprovando a eficiência de tecnologias de sensoriamento remoto. Determinou-se o potencial de captação (microbacia de contribuição) dos reservatórios com confiabilidade de 92%, por meio de equação baseada na área de espelho d'água.

Ressalta-se o Sertão do São Francisco, com 11% dos setores sem nenhuma tecnologia hídrica, e o Agreste, com volume médio de apenas 14 mil m³/ano por setor, além de 15,5% dos setores no semiárido apresentarem captação inferior a 400 m³/ano. Nesse cenário, o Sertão do São Francisco concentra 40% desses setores, o Agreste 13% e o Sertão 7,5%.

O volume total potencial de armazenamento é de 1,551 bilhão de m³/ano é 1,4 vezes superior a capacidade de armazenamento das tecnologias atual, sugerindo melhor dimensionamento para aproveitar todo o potencial de captação.

No objetivo 2, que classificou as áreas censitárias pela taxa de atendimento hídrico, constatou-se que as densidades populacionais rurais do Agreste, Sertão e Sertão do São Francisco são 30, 10,7 e 8,3 hab./km², exigindo tecnologias de maior capacidade e distribuição mais eficiente.

Em apenas 134 (4%) dos setores, há mais de duas tecnologias por residência, evidenciando lacunas diante do Programa Cisternas. Ademais, 22% das regiões, sem os volumes de reservatórios, não proveriam 10 litros diários por habitante, afetando cerca de 290 mil pessoas. As disponibilidades de água do Agreste, Sertão e Sertão do São Francisco (73, 262 e 112 m³/hab./ano, respectivamente) reforçam a necessidade de políticas públicas que ampliem o acesso a tecnologias hídricas.

No objetivo 3, sobre tendências climáticas, observou-se aumento progressivo das temperaturas. Dormentes e Canhotinho apresentaram redução significativa de noites e dias frios (TN10p, TX10p) e incremento de noites e dias quentes (TN90p, TX90p) em Dormentes. As taxas de aquecimento foram 0,5°C/década para Dormentes e 0,3°C/década para Canhotinho, sugerindo maior aquecimento no semiárido. Observou-se ainda tendência negativa de dias

consecutivos úmidos, apontando risco de secas mais intensas. Tais achados, somados a chuvas intensas em parte do Agreste, demandam revisão e adaptação das tecnologias hídricas às especificidades regionais.

Dialogando com o objetivo geral, a metodologia desenvolvida mostra potencial para integrar plataformas como o SNIRH, permitindo monitoramento e gestão em tempo real. Assim, amplia-se a precisão das projeções em locais difusos, contribuindo para a mitigação dos efeitos climáticos e a otimização do uso dos recursos hídricos no semiárido pernambucano.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observações acerca das tendências climáticas em diferentes regiões do semiárido pernambucano evidenciam a intensificação das disparidades entre áreas extremas (leste-oeste), com impactos diretos no volume potencial de armazenamento hídrico por setor censitário. A análise das variações nos volumes precipitados, das temperaturas máximas e mínimas e dos dias consecutivos úmidos permite estabelecer correlações e projeções valiosas, subsidiando sistemas de suporte à decisão que contemplem ações de médio e longo prazos.

O fluxograma desenvolvido na pesquisa demonstra elevado potencial para aprimorar a gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas. Podendo complementar os macrodiagnósticos do Atlas Águas e as diretrizes do PNRH 2022-2040, a ferramenta proposta pode impulsionar a eficiência no planejamento hídrico e fomentar ações voltadas à equidade e sustentabilidade no acesso à água. Valendo-se de dados públicos e de softwares abertos, a metodologia apresenta caráter replicável e fortalece a capacidade de enfrentar a vulnerabilidade hídrica no semiárido brasileiro, incentivando políticas públicas mais inclusivas e eficazes.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Com base na abordagem apresentada e ferramenta proposta, diversas oportunidades de pesquisa podem ser exploradas para aprofundar, validar e aprimorar os métodos e resultados obtidos. Algumas sugestões incluem:

6.2.1 Validação da ferramenta em diferentes regiões semiáridas

- Realizar estudos em outras áreas do semiárido brasileiro para testar a replicabilidade e a eficácia da metodologia em cenários com condições climáticas, sociais e econômicas

distintas;

- Ampliar a análise para regiões semiáridas de outros países, permitindo a comparação de metodologias e o intercâmbio de soluções hídricas sustentáveis.

6.2.2 Integração com Tecnologias Avançadas

- Investigar o uso de inteligência artificial e de aprendizado de máquina para refinar as análises preditivas relacionadas à vulnerabilidade hídrica;
- Avaliar a aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto em alta resolução para aumentar a precisão do diagnóstico hídrico em áreas rurais isoladas
- Desenvolver *software* ou aplicativo que possibilite replicar a ferramenta metodológica proposta, de forma mais rápida e automatizada.

6.2.3 Estudos de longo prazo e séries temporais

- Desenvolver estudos de longo prazo que analisem a eficácia da ferramenta proposta, considerando mudanças climáticas e alterações demográficas.
- Explorar séries históricas de dados hidrológicos e populacionais para calibrar modelos preditivos e identificar tendências emergentes;

6.2.4 Incorporação de indicadores socioeconômicos e ambientais

- Ampliar o escopo de análise para incluir indicadores de impacto socioeconômico, como o aumento da renda familiar e a melhoria na qualidade de vida decorrente do acesso à água;
- Avaliar os benefícios ambientais associados às tecnologias hídricas adaptadas, como a redução do impacto ambiental de sistemas de captação e armazenamento e reúso de água.

6.2.5 Engajamento comunitário e participação social

- Desenvolver estudos participativos que envolvam as comunidades locais na construção e validação de soluções baseadas na metodologia elaborada;
- Analisar como a inclusão de saberes tradicionais e práticas locais pode contribuir para a sustentabilidade das soluções propostas.

6.2.6 Modelagem integrada de recursos hídricos

- Investigar como a ferramenta pode ser integrada a modelos hidrológicos regionais e nacionais, considerando as bacias hidrográficas como unidades de gestão;
- Avaliar os impactos das políticas públicas baseadas nesse modelo em cenários de gestão integrada de recursos hídricos.

6.2.7 Exploração de fontes alternativas de recursos hídricos

- Realizar estudos para identificar e implementar fontes alternativas de água, como reúso de efluentes tratados, sistemas de dessalinização e técnicas avançadas de captação de água da chuva;
- Investigar a viabilidade técnica, econômica e social dessas fontes em comunidades rurais e setores censitários de alta vulnerabilidade.

Ao fomentar essas linhas de investigação, poderá ser possível não apenas consolidar a abordagem apresentada, como também aprimorar sua aplicabilidade em diferentes contextos e contribuir para a formulação de políticas públicas mais eficazes e inclusivas.

REFERÊNCIAS

- ABESSA, D. M. de S.; AMBROZEVICIUS, A. P. Government initiative and policies on water conservation and wastewater treatment in Brazil. *In: SINGH, Pardeep et al. (ed.). Water Conservation and Wastewater Treatment in BRICS Nations. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 215-231.*
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano.** Brasília: ANA, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019.** Brasília, DF: ANA, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020.** Brasília, DF: ANA, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil.** Brasília, DF: ANA, 2005. (Cadernos de Recursos Hídricos).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano Nacional de Recursos Hídricos: Plano de Ação – Estratégia para a Implementação do PNHR 2022-2040.** Brasília: ANA, 2022. v. 2.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUA E CLIMA (APAC). **Nota Técnica - Apac - Gerência de Segurança de Barragens - Nº 16/2024: Apresentação dos Resultados dos Levantamentos de Massas d'Água realizados pela Apac no Estado de Pernambuco.** Recife: Apac, 2024.
- ALEXANDER, L.; HEROLD, N. **ClimPACT2: Indices and software.** [S. l.]: World Climate Programme, 2016. Disponível em: https://epic.awi.de/id/eprint/49274/1/ClimPACTv2_manual.pdf. Acesso em: 20 dez. 2024.
- ALVALÁ, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S. S.; SELUCHI, M. E.; MARENGO, J. A.; MORAES, O. L.; CARVALHO, M. A. Drought monitoring in the Brazilian semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 91, p. 1-15, 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Zeitschrift**, [s. l.], n. 22, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, A. R. S.; NETO, A. H. G.; SILVA CRUZ, A. F.; ANDRADE, E. K. P.; SANTOS, V. F.; SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no agreste Pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 126-145, 2018. DOI: 10.24221/jeap.3.1.2018.1668.126-145. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/1668>. Acesso em: 19 dez. 2024.
- ANDRADE, J. A.; DE NUNES, M. A. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço**, [s. l.], n. 3, p. 28-39, 2014.

ANDRADE, J. A.; NUNES, M. A.; PÚBLICA, A.; PINHEIRO, J.; PÚBLICAS, P. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço**, [s. l.], n. 3, p. 28-39, 2014.

ARAGÃO, H. G.; PEREIRA, V. A.; CARNIATTO, I.; GONZALEZ, A. C. Democratização, acesso e gestão das águas pelo horizonte das geotecnologias com software livre. **Revista Presença Geográfica**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2022.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). **Sobre nós - história**. [Recife]: ASA, 2022.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). 2013. **BAP: Bomba D'água Popular**, 3. Ed. Recife: ASA, 2013. (Tecnologias sociais para convivência com o Semiárido - Série Estocagem de Água para Produção de Alimentos).

BACELAR, T. O papel da agricultura familiar para um novo desenvolvimento regional no nordeste-uma homenagem a celso furtado. **Revista Econômica do Nordeste**, [s. l.], v. 51, suplemento especial, p. 9-29, ago. 2020. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/80223/8054629/B_1261.pdf/3cc743be-0553-7b0f-fdc4-dad1958fee27. Acesso em: 4 nov. 2021.

BAIN, R.; CRONK, R.; HOSSAIN, R.; BONJOUR, S.; ONDA, K.; WRIGHT, J.; YANG, H.; SLAYMAKER, T.; HUNTER, P.; PRÜSS-USTÜN, A.; BARTRAM, J. Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review. **Trop. Med. Int. Health**, [s. l.], n. 19, p. 917-927, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/tmi.12334>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24811893/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

BARBOSA, José Etham de Lucena *et al.* Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management Ecosystemas aquáticos do semi-árido brasileiro: aspectos limnológicos e manejo. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 103-118, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000030>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. *Theor. Appl. Climatol*, [s. l.], v. 135, n. 1/2, p. 237-247, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2383-y>. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002871490>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar Radiation Models and Gridded Databases to Fill Gaps in Weather Series and to Project Climate Change in Brazil. **Adv. Meteorol.**, [s. l.], n. 15, p. 1-15, 2018. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2018/6204382>. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002892401>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of Regional Climate Change Impacts on Brazilian Potato Tuber Yield. **Int. J. Plant Prod.**, [s. l.], n. 14, p. 647-661, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00111-7>. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003002974>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BHERING, A. P.; ANTUNES, I. M. H. R.; MARQUES, E. A. G.; PAULA, R. S. Geological and hydrogeological review of a semi-arid region with conflicts to water availability (southeastern Brazil). **Environmental Research**. [s. l.], n. 202, 2021.

BOSCO, J. *et al.* Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agroindústria Tropical Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Implantação de Cisterna Calçadão em Área de Quintal Produtivo. **Embrapa Agroindústria Tropical Fortaleza**, 2018.

BOSCO, J. *et al.* Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Agroindústria Tropical Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Implantação de Cisterna Calçadão em Área de Quintal Produtivo. **Embrapa Agroindústria Tropical Fortaleza**, 2018.

BOUVY, M. *et al.* Limnological features in Tapacurá reservoir (northeast Brazil) during a severe drought. **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 493, n. 1, p. 115-130, 15 fev. 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1025405817350>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BRASIL. Empresa Brasileira de Comunicação. Disponível em: [https://agenciagov.etc.com.br/noticias/202406/programa-cisternas-avanca-e-promove-cidadania-as-familias-do-semiarido-nordestino#:~:text=S%C3%A3o%20mais%20de%2042%20mil,MDS\)%20e%20o%20Cons%C3%B3rcio%20Nordeste](https://agenciagov.etc.com.br/noticias/202406/programa-cisternas-avanca-e-promove-cidadania-as-familias-do-semiarido-nordestino#:~:text=S%C3%A3o%20mais%20de%2042%20mil,MDS)%20e%20o%20Cons%C3%B3rcio%20Nordeste). Acesso em: 06 fev. 2025.

BRASIL. **Decreto nº. 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643compilado.htm. Acesso em: 20 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Cidadania. Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água. **Modelo da tecnologia social de acesso à água nº 4: Barreiro Trincheira Familiar**. Brasília, DF: Ministério da Cidadania, 2017a.

BRASIL. Ministério da Cidadania. Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água. **Cisterna de enxurradas de 52 mil litros: Anexo da Instrução Operacional nº 12**. Brasília, DF: Ministério da Cidadania, 2017b.

BRASIL. Ministério da Cidadania. Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água. **Modelo da tecnologia social de acesso à água nº 23: Microaçude (Anexo da Instrução Operacional SESAN nº 1)**. Brasília, DF: Ministério da Cidadania, 2018.

BRASIL. Ministério da Cidadania. Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água : **Modelo da tecnologia social de acesso à água Nº 4 - Barreiro Trincheira Familiar**. Brasília, DF: Ministério da Cidadania, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Ministério da Integração Nacional. **Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança do clima**. 1. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente; Ministério da Integração Nacional; WWF, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; Ministério da Integração Nacional. WWF BRASIL. **Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança do clima**. Brasília, DF: MMA, 2017. Disponível em:

https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/estudo_secas_completo_com_isbn.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNISB). **Consulta de barragens**. Brasília, DF: SINISB, c2024. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 517-529, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5225>.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Desenvolvimento rural do Semiárido brasileiro: transformações recentes, desafios e perspectivas. **Confins: Revue Franco-Brésilienne de Géographie**, [s. l.], n. 19, 2013.

CARMO, M. V. N. S.; LIMA, C. H. R. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], n. 35, p. 233-242, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786352016>.

CARVALHO, A. T. F. Caracterização climática da quadra chuvosa de município do semiárido brasileiro, entre os anos de 2013 a 2017. **Geografia em Atos (Online)**, Presidente Prudente, v. 2, n. 17, p. 4-23, 2020. DOI: 10.35416/geoatos.v2i17.7116.

CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J.; DIAS, M. A. F. da S.; SILVA, M. G. A. J. da. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CENTRO DE EDUCAÇÃO POPULAR E FORMAÇÃO SOCIAL (CEPFS). Tanques em lajedos de pedra. **Fundação BB**, 2011. Disponível em: <https://transforma.fbb.org.br/tecnologia-social/tanques-em-lajedos-de-pedra>. Acesso em: 13 maio 2022.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAMPOS, J. N. B. A Questão da Água no Semiárido Brasileiro. In: BICUDO, E. D. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (ed.). **Águas do Brasil Análises Estratégicas**. 1. ed. São Paulo : Academia Brasileira de Ciências e Instituto de Botânica, 2010. p. 81-91.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados**, [s. l.], n. 22, p. 61-82, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200005>.

CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 45-58, 2015. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i106p45-58. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110102>. Acesso em: 18 dez. 2024.

CORTEZ, F.; MONICELLI, F.; CAVALCANTE, H.; BECKER, V. Effects of prolonged drought on water quality after drying of a semiarid tropical reservoir, Brazil. **Limnologica**, [s. l.], v. 93, id. 125959, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.LIMNO.2022.125959>. Disponível em: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2022Limng..9325959C/PUB_HTML. Acesso em: 18 dez. 2024.

COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D. Barragens subterrâneas & barragens de assoreamento: conceitos e construção. **Cadernos do Semiárido Riquezas Oportunidades**, [s. l.], v. 3, n. 42, 2015.

CODEVASF. Projeto Água, futuro e cidadania para mais brasileiros. Apresentação, Brasília, 15 de março de 2018 **SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS**. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/aceso-a-informacao/participacao-social/eventos/seminario-solo-e-agua-no-contexto-de-desenvolvimento-em-bacias-hidrograficas/iii-ssa/programacao/palestra-34-projeto-de-integracao-do-sao-francisco-pisf-situacao-atual-e-perspectivas-futuras.pdf>. Acesso em, 06 de Fev de 2025.

CUNHA, A. P. M. A.; TOMASELLA, J.; RIBEIRO-NETO, G. G.; BROWN, M.; GARCIA, S. R.; BRITO, S. B.; CARVALHO, M. A. Changes in the spatial-temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. **Atmospheric Science Letters**, [s. l.], v. 19, n. 10, e855, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.855>.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; LEAL, K. D.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; GARCIA, J. V. C.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, [s. l.], v. 10, n. 11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. **Nat. Clim. Chang.**, [s. l.], n. 3, p. 52-58, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>.

DINIZ, J. A.; SILVA, R. D. C. D.; MONTEIRO, A. B.; MOURA, I. B. M. D. **Revitalização de poços no estado de Pernambuco: relatório executivo**. [S. l.]: CPRM, 2019.

DPLYR. WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=dplyr>. Acesso em: 31 jan. 2025.

EASTERLING, D. R.; HORTON, B.; JONES, P. D.; PETERSON, T. C.; KARL, T. R.; PARKER, D. E.; SALINGER, M. J.; RAZUVAYEV, V.; PLUMMER, N.; JAMASON, P.; FOLLAND, C. K. Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. **Science**, [s. l.], v. 277, i. 5324, p. 364-367, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>.

FALKENMARK, M. The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed? **Ambio**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 112-118, 1989.

FONSECA, A., PRADO FILHO, J. F. Um esquecido marco do saneamento no Brasil: o sistema de águas e esgotos de Ouro Preto (1887-1890). **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, [s. l.], v. 17, p. 51-66, 2010.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; TANK KLEIN, A.M.G.; PETERSON, T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Clim. Res.**, [s. l.], n. 19, p. 193-212, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr019193>.

FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL (FBB). **Tecnologia Social: uma estratégia para o desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Fundação Banco do Brasil, 2004.

GALIZONI, Flávia Maria; RIBEIRO, Eduardo Magalhães. Notas sobre água e chuva: o Programa Um Milhão de Cisterna no semi-árido mineiro. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS*, 14., 2002.

GAO, B. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GARFI, M.; FERRER-MARTÍ, L.; BONOLI, A.; TONDELLI, S. Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes: a case study in semi-arid region of Brazil. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 92, n. 3, p. 665-675, mar. 2011.

GEOBR. PEREIRA, R. H. M.; GOLGHER, A.; COSTA, M. A. geobr: Download Official Spatial Data Sets of Brazil. R package version 1.9.1, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=geobr>. Acesso em: 31 jan. 2025.

GHISI, E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. **Build. Environ.**, [s. l.], n. 41, p. 1544-1550, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.03.018>.

GGPLOT2. WICKHAM, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer, 2016. Disponível em: <https://ggplot2.tidyverse.org>. Acesso em: 31 jan. 2025.

GGSPATIAL. DORMANN, C. F.; FOLKERTSMA, J.; CHAKRAVARTY, S.; MORAWIETZ, M. ggspatial: Spatial Data Framework for ggplot2. R package version 1.1.8, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ggspatial>. Acesso em: 31 jan. 2025.

GIL-ALANA, L. A. Maximum and minimum temperatures in the United States: Time trends and persistence. **Atmospheric Science Letters**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 1-3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/asl.810>.

GONDIM, G. *et al.* O uso do território na Atenção Primária à Saúde. *In: MENDONÇA, M. H. M. de; MATTA, G. C.; GONDIM, R.; GIOVANELLA, L. (ed.). Atenção Primária à Saúde no Brasil: Conceitos, Práticas e Pesquisa*. Fiocruz, Rio de Janeiro, 2018. p. 143-176.

GRAMKOW, C. (org). **Investimentos transformadores para um estilo de desenvolvimento sustentável: estudos de casos de grande impulso (big push) para a sustentabilidade no Brasil**. Brasília, DF: Nações Unidas, 2020.

GRAMKOW, C. (org.). **Investimentos transformadores para um estilo de desenvolvimento sustentável: Estudos de casos de grande impulso (Big Push) para a sustentabilidade no Brasil**. Nações Unidas, 2020.

GUERREIRO, B. F. M. **Dessalinização para produção de água potável: perspectivas para Portugal**. 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

HALL, A. From Fome Zero to Bolsa Família: social policies and poverty alleviation under Lula. **Journal of Latin American Studies**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 689-709, 2006.

HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 3, n. 8, p. 893-904, 1990.

HASTENRATH, S.; WU, M-C.; CHU, P-S. Towards the monitoring and prediction of north-east Brazil droughts. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s. l.], v. 110, n. 464, p. 411-425, 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022: características gerais da população, religião e pessoas com deficiência**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas populacionais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **O Direito à água como política pública na América Latina**. Brasília, DF: Ipea, 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. [S. l.]: [s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press. 2021.

JATOBÁ, L.; LINS, R. **Introdução à Geomorfologia**. 5. ed. Recife: Bagaço, 2008.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. *In*: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 213-233.

KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 488-498, 1980.

KOUSKY, V. E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

LEITE, J. Nayara de Carvalho; BECKER, V. Impacts of drying and reflooding on water quality of a tropical semi-arid reservoir during an extended drought event. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [s. l.], v. 31, p. 15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X6918>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MALAGNOUX, M.; SÈNE, E. H.; ATZMON, N. Forests, trees and water in arid lands: a delicate balance. **Unasyiva-Fao**, [s. l.], v. 229, n. 58, p. 24-25, 2007.

MARENGO, J. A. *et al.* Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Natural Hazards**, [s. l.], v. 103, n. 2, p. 2589-2611, 16 jun. 2020b. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04097-3>. Acesso em: 22 abr. 2022.

MARENGO, J. A. *et al.* Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts. **Frontiers in Climate**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 1-13, 2020a.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. 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. 2, p. 1973-1985, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

MARENGO, J. A.; ALCÂNTARA, E.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C. A.; DOLIF, G.; GONÇALVES, D.; ASSIS DIAS, M.; CUARTAS, L. A.; BENDER, F.; RAMOS, A. M.; MANTOVANI, J. R.; ALVALÁ, R. C.; MORAES, O. L. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather Clim. Extrem.**, [s. l.], v. 39, i. 100545, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.WACE.2022.100545>.

MARENGO, J. A.; GALDOS, M. V.; CHALLINOR, A.; CUNHA, A. P.; MARIN, F. R.; VIANNA, M. dos S.; ALVALA, R. C. S.; ALVES, L. M.; MORAES, O. L.; BENDER, F. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Clim. Resil. Sustain**, [s. l.], 2021. <https://doi.org/10.1002/cli2.17>

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil — past, present, and future. **Theor. Appl. Climatol.**, [s. l.], n. 129, p. 1189-1200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil - Past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 129, n 3-4, p. 1189-1200, 2016.

MARENGO, José A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L. M.; BARRETO, N. J. C.; REBOITA, M.S.; RAMOS, A. M. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts. **Front. Clim.**, [s. l.], n. 2, p. 1-13, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.00003>.

- MARENGO, José A.; CUNHA, A. P. M. A.; NOBRE, C. A.; RIBEIRO NETO, G. G.; MAGALHÃES, A. R.; TORRES, R. R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L. M.; CUARTAS, L. A.; DEUSDARÁ, K. R. L.; ÁLVALA, R. C. S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. **Nat. Hazards**, [s. l.], n. 103, p. 2589-2611, 2020a. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>
- MATALLO JÚNIOR., H. A desertificação no mundo e no Brasil. *In*: SCHENKEL, C. S.; MATALLO JÚNIOR, H. (org.). **Desertificação**. Brasília, DF: Unesco, 2003.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relation of drought frequency and duration to time scales. *In*: Eighth Conference on Applied Climatology, 1993. p. 179-184. DOI: <https://doi.org/10.1002/jso.23002>.
- MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P. Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and its Climate Impacts in Northeast Brazil. **Pure Appl. Geophys.**, [s. l.], n. 178, p. 2315-2332, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02758-3>.
- MEDEIROS, L. DE, C.; MATTOS, A.; LÜRLING, M.; BECKER, V. Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. **Aquatic Ecology**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 293-307, 2015.
- MEDEIROS, S. de S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. de O.; PAZ, V. P. da S. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: INSA, 2011.
- MELLOR, J. E.; WATKINS, D. W.; MIHELICIC, J. R. Rural water usage in East Africa: Does collection effort really impact basic access? **Waterlines**, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2307/24686833>.
- MELO, S. W. C.; DE OLIVEIRA, L. G.; DE MIRANDA FILHO, R. J.; ASSAD, S. R. S.; LASSMANN, E. T.; DA CRUZ PIRES, L.; ARAÚJO, C. V. G. Inovação e Combate à Pobreza no Semiárido. **Boletim Gaúcho de Geografia**, [s. l.], v. 45, n. 1/2, 2019.
- MOLLE, F. **Geometria dos pequenos açudes**. 3. ed. Recife: Sudene, 1994.
- MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do Pequeno Açude**. Recife: Sudene, 1992.
- MONTENEGRO, A. A. A.; LIMA, J. L. M. P. de; SILVA, T. G.; MARINHO, A. V.; CARVALHO, A. A.; SILVA, Ê. F.; SOUSA, L. D. B. de. Tecnologias hídricas e conservacionistas para a sustentabilidade do semiárido. *In*: **Pesquisa e tecnologias hídricas para o desenvolvimento do semiárido de Pernambuco**. Recife: Editora da UFRPE, 2022.
- MORAES, A.; PERKINS, P. E. Women, equity and participatory water management in Brazil International Feminist Journal of Politics. **International Feminist Journal of Politics**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 485-493, 2007.
- MOSS, B.; JEPPESEN, E.; SØNDERGAARD, M.; LAURIDSEN, T. L.; LIU, Z. Nitrogen, macrophytes, shallow lakes and nutrient limitation: resolution of a current controversy? **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 710, n. 1, p. 3-21, 2013.

- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, [s. l.], v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- MOURA, T. DE O.; SANTANA, F. O.; CAMPOS, V. P.; DE OLIVEIRA, I. B.; MEDEIROS, Y. D. P. Inorganic and organic contaminants in drinking water stored in polyethylene cisterns. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 273, p. 45-51, 2019.
- MUSAYEV, S.; BURGESS, E.; MELLOR, J. A global performance assessment of rainwater harvesting under climate change. **Resour. Conserv. Recycl.**, [s. l.], n. 132, p. 62-70, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.023>.
- NASCHOLD, F. “The poor stay poor”: household asset poverty traps in rural semi- arid India. **World Development**, [s. l.], v. 40, n. 10, p. 2033-2043, 2012.
- NASELLI-FLORES, L. Man-made lakes in Mediterranean semi-arid climate: the strange case of Dr Deep Lake and Mr Shallow Lake. **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 506, n. 1, p. 13-21, 15 nov. 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:HYDR.0000008550.34409.06>. Acesso em: 26 nov. 2022.
- NOBRE, C. A.; REID, J.; SOARES VEIGA, A. P. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. São José dos Campos: Rede Clima; Inpe, 2012.
- NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. de L.; SANTOS, C. A. C. dos. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Rev. Bras. Meteorol.**, [s. l.], n. 30, p. 171-180, 2015.
- PACÍFICO, A. M. C. P.; NETO, R. A. L. DE A. A Proteção Nacional e Internacional aos Deslocados Ambientais. **Lumen**, Cambuci, 2017.
- PÁDUA, V. L. Proteção sanitária das cisternas utilizadas na preservação de águas pluviais para uso domiciliar: aspectos técnicos e educacionais. In: 5º Caderno de Pesquisa Em Engenharia de Saúde Pública, Estudos e Pesquisas. Brasília, DF: Coordenação de Comunicação Social, Divisão de Editoração e Mídias de Rede, 2013. p. 97-126.
- PAIVA, A. L. R. de; CABRAL, J. J. S. P.; FREITAS, D. A. Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 18, p. 235-247, 2013.
- PALHARES, J. C. P. **Captação de água de chuva e armazenamento em cisterna para uso na produção animal**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2016.
- PEIXINHO, F. C.; DINIZ, J. A. O. **Plano estratégico em recursos hídricos no Nordeste brasileiro**: uso sustentável da água subterrânea para aumento da oferta hídrica. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil, 2019. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21488>. Acesso em: 7 jul. 2022.

- PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agric. Water Manag.**, [s. l.], n. 108, p. 39-51, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.08.022>.
- PETERSON, T. C.; MANTON, M. J. Monitoring changes in climate extremes: A tale of international collaboration. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, [s. l.], n. 89, p. 1266-1271, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2501.1>.
- PETRELLA, R. Água, “a commodity final”, entrou para o mercado de ações. **Pobre água! Eco** 21, 19 jan. 2021.
- PIRES, A. P. N.; FERREIRA, I. M. Cercas e secas: reflexões sobre a água no Nordeste semi-árido. *In*: JORNADA DO TRABALHO, 13., 2012. **Anais [...]**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2012. p. 1-14.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, [s. l.], v. 22, p. 43-60, 2008.
- R CORE TEAM. 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/>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- RAJSEKHAR, D.; SINGH, V. P.; MISHRA, A. K. Multivariate drought index: an information theory based approach for integrated drought assessment. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 526, p. 164-182, 2015.
- RAO, V. B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 1754-1763, 1993.
- REBOUÇAS, A. da C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, São Paulo, p. 127-154, 1997.
- REGOTO, P.; DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **Int. J. Climatol.**, [s. l.], n. 41, p. 5125-5142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7119>.
- READXL. WICKHAM, H.; BRYAN, J. readxl: Read Excel Files. R package version 1.4.3, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=readxl>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- ROCHA JÚNIOR, Carlos Alberto Nascimento da *et al.* Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [s. l.], v. 30, e106, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/alb/a/CSgDrD8PBmH5jbyQrpLqS5t/?format=pdf&lang=en>. Acesso em 26 nov. 2022.
- ROCHA, R.; SOARES, R. R. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian semi-arid. **Journal of Development Economics**, [s. l.], v. 112, p. 72-91, 2015.

RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. de M. B.; SOUZA, D.O. de; ARAUJO, P. A. A. de; SILVA, A. C. N. da; SILVA, C. M. S. e. Probability of occurrence of extreme precipitation events and natural disasters in the city of Natal, Brazil. **Urban Clim.**, [s. l.], n. 35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100753>.

SALGUEIRO, J. H.; MONTENEGRO, S. M. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico. **Revista Tecnologia**, [s. l.], v. 29, n. 2, 2008.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil Trends Analysis of Precipitation and Temperature Data in Brazil. **Rev. Bras. Meteorol.**, [s. l.], n. 31, p. 64-73, 2016.

SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C.; NEVES, G. Z. F.; SILVA, M. S. D.; SOUZA, P. H.; TECH, A. R. B. Influência da variabilidade climática na produção canavieira na microrregião de São Carlos/SP no período de 1994 a 2014. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], n. 25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/ABCLIMA.V25I0.59157>.

SANTANA, A. Considerações sobre o acúmulo de água por cisterna calçadão: um estudo de caso no Agreste Pernambucano . *In*: SIMPÓSIO BRAS. RECUR. HÍDRICOS – ABRH, 21., 2015.

SANTANA, A. C. A. de; PAIVA, A. L. R. de; SANTOS, S. M. dos. A gestão da cisterna calçadão realizada por agricultores familiares: uma abordagem qualitativa. *In*: SIMPÓSIO BRAS. RECUR. HÍDRICOS – ABRH, 21., 2015.

SANTOS, J. Cisterna Telhadão: Inovações para convivência com o Semiárido. **Centro Sabiá**, [s. l.], p. 46, 2013.

SANTOS, S.M. dos; SILVA, J. F. F.; SANTOS, G. C.; MACEDO, P. M. T.; GAVAZZA, S., 2019. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. **J. Clean. Prod.**, [s. l.], n. 219, p. 639-648, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.01.068>

SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R.; SILVA, V. F. Qualidade da água em barragem subterrânea no semiárido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 651, 2016.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste**. Brasília, DF: CPRM, 2000.

SETTI, A. A. *et al.* **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Brasília, DF: 2001.

SF. PEBESMA, E. sf: Simple Features for R. R package version 1.0-14, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=sf>. Acesso em: 31 jan. 2025.

SHARMA, A. *et al.* Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. **SN Appl. Sci.**, [s. l.], v. 111, n. 1, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/S42452-019-1485-1>.

SILVA, A. K. P. DE M. **Sistemas de dessalinização como medida de adaptação às mudanças climáticas no semiárido Pernambucano**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SILVA, A. K. P. DE M. **Sistemas de dessalinização como medida de adaptação às mudanças climáticas no Semiárido Pernambucano**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SILVA, E. S. D. A. D.; PAES, N. A. Bolsa Família Programme and the reduction of child mortality in the municipalities of the Brazilian semiarid region. **Ciência & Saúde Coletiva**, [s. l.], v. 24, p. 623-630, 2019.

SILVA, J. B.; GUERRA, L. D.; GOMES, R. A.; QUEIROZ, J. G. Ecologia política da água e hidrobiopolítica no Semiárido nordestino: a hierarquia do acesso entre as cisternas de placas e os caminhões-pipas. **Caderno CRH**, [s. l.], v. 35, e022040, 2022.

SILVA, J. B.; GUERRA, L. D.; IORIS, A. A.; GOMES, R. A. Conflitos sociopolíticos, recursos hídricos e programa um milhão de cisternas na região semiárida da Paraíba. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 18, n. 2, p. 69-92, 2015.

SILVA, L. A. P.; SILVA, C. R.; SOUZA, C. M. P.; BOLFE, É. L.; SOUZA, J. P. S.; LEITE, M. E. Mapping of aridity and its connections with climate classes and climate desertification in future scenarios - Brazilian semi-arid region. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 35, e67666, 2023. DOI: <http://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-67666x>.

SOUZA, Y. A. S. de; MACHADO, P. J. de O. Os descaminhos das águas: do sagrado ao mercado. *Bol. Goiano Geogr.*, [s. l.], n. 38, p. 551-569, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56351>.

SUASSUNA, J. Semi-Árido: proposta de convivência com a seca. **Cad. Estud. Sociais**, [s. l.], n. 23, 2007.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). **Delimitação do Semiárido - 2021**. [Recife]: Sudene, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.

TARRASS, F.; BENJELLOUN, M. The effects of water shortages on health and human development. **Perspectives in public health**, [s. l.], v. 132, n. 5, p. 240-244, 2012.

TEFERI, M. *et al.* Strong effects of occasional drying on subsequent water clarity and cyanobacterial blooms in cool tropical reservoirs. **Freshwater Biology**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 870-884, abr. 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/fwb.12312>. Acesso em: 26 nov. 2022.

TERÊNCIO, D. P. S.; SANCHES FERNANDES, L. F.; CORTES, R. M. V.; MOURA, J. P.; PACHECO, F. A. L. Rainwater harvesting in catchments for agro-forestry uses: a study focused on the balance between sustainability values and storage capacity. **Sci. Total Environ.**, [s. l.], n. 613-614, p. 1079-1092, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.198>.

TIDYVERSE. WICKHAM, H. et al. tidyverse: Easily Install and Load the ‘Tidyverse’. R package version 2.0.0, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=tidyverse>. Acesso em: 31 jan. 2025.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. D. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000-2016. **Int. J. Applied Earth Obs. Geoinf.**, [s. l.], n. 73, p. 197- 206, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 112, n. 1-2, p. 253-272, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0718-7>.

TORRES, R. R.; LAPOLA, D. M.; MARENGO, J. A.; LOMBARDO, M. A. Socio-climatic hotspots in Brazil. **Climatic Change**, [s. l.], v. 115, p. 3-4, p. 597-609, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0461-1>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **World Atlas of Desertification**. Londres: UNEP, 1992.

UNITED STATES GEOLOGICAL SERVICE (USGS). **Earth Explorer: Landsat 8**. Washington (DC): USGS, fev. 2016.

VALÕES, D. C. P.; CABRAL, J. J. D. S. P.; ALMEIDA, S. M. Análise do zoneamento explotável de água subterrânea como instrumento de gestão na Bacia Sedimentar de São José do Belmonte-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 1863-1880, 2022.

VAN GEEST, G. J. *et al.* Succession of aquatic vegetation driven by reduced water-level fluctuations in floodplain lakes. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 251-260, abr. 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2664.2005.00995.x>. Acesso em: 26 nov. 2022.

VANDERLEY, Rayane F.; GER, Kemal A.; BECKER, Vanessa; BEZERRA, Maria Gabriela T. A.; PANOSSO, Renata. Abiotic factors driving cyanobacterial biomass and composition under perennial bloom conditions in tropical latitudes. **Hydrobiologia**, [s. l.], n. 848, p. 943-960, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04504-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10750-020-04504-7.pdf>. Acesso em 26 nov. 2022.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, [s. l.], n. 6, p. 347-360, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>.

VILANOVA, R. S. *et al.* Vegetation degradation in ENSO events: Drought assessment, soil use and vegetation evapotranspiration in the Western Brazilian Amazon. **Remote Sens. Appl. Soc. Environ.**, [s. l.], v. 23, i. 100531, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100531>.

VOSE, R. S.; EASTERLING, D. R.; GLEASON, B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004. **Geophys. Res. Lett.** [s. l.], n. 32, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL024379>.

WHO; UNICEF. **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2017**. Switzerland, 2017.

WMO. The Dublin Statement and Report of the Conference. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER AND THE ENVIRONMENT: DEVELOPMENT ISSUES FOR THE 21ST CENTURY, 1992. **Proceedings** [...]. 26-31 Dublin: 1992.

WORLD WATER COMMISSION. **A water secure world: Vision for water, life, and the environment**. World Water Council, 2000.

XAVIER, A. C.; KING, C.W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **Int. J. Climatol.**, [s. l.], n. 36, p. 2644-2659, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.

XAVIER, A. C.; KING, C.W.; SCANLON, B. R. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: SIMPÓSIO BRAS. SENSORIAMENTO REMOTO, p. 562-569, 2016.

YADAV, S. S.; LAL, R. Vulnerability of women to climate change in arid and semi- arid regions: the case of India and South Asia. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 149, p .4-17, 2018.

ZHANG, Q.; SINGH, V. P.; ASCE, M.; LI, J. Eco-Hydrological Requirements in Arid and Semiarid Regions: Case Study of the Yellow River in China. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], v. 18, i. 6, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000653).

ZHANG, X. *et al.* Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdiscip. **Rev. Clim. Chang.**, [s. l.], v. 2, p. 851-870, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.

ZHANG, X.; YANG, F. **RClimDex (1.0): User Manual**. Downsview: Climate Research Branch Environment Canada, 2004.

APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO: ESTUDO DE TENDÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS


Geografia Ensino & Pesquisa

Atual Arquivos Notícias Sobre - Q Buscar

[Início](#) / [Arquivos](#) / [v. 28 \(2024\): Publicação Contínua](#) / [Meio Ambiente, Paisagem e Qualidade Ambiental](#)

Estudo de tendência de mudanças climáticas, eventos extremos e análise comparativa entre dois municípios de regiões distintas do semiárido pernambucano

Alexandre Carlos Araújo de Santana
Universidade Federal de Pernambuco
<https://orcid.org/0000-0002-6717-5396>

Jocimar Coutinho Rodrigues Junior
Universidade Federal de Pernambuco
<https://orcid.org/0000-0002-4033-3243>

Timóteo Herculino Barros
Universidade de São Paulo 
<https://orcid.org/0000-0002-1242-9889>

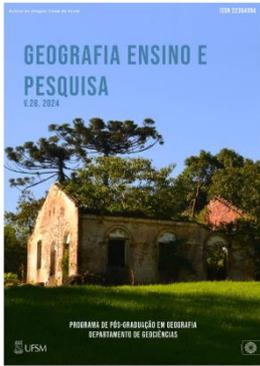
Níveo Rocha
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos 
<https://orcid.org/0009-0005-8417-8109>

Fabiani Denise Bender
Universidade de São Paulo 
<https://orcid.org/0000-0003-3634-5265>

José Almir Cirilo
Universidade Federal de Pernambuco 
<https://orcid.org/0000-0002-8672-0898>

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
Universidade Federal de Pernambuco 
<https://orcid.org/0000-0003-3475-1454>

DOI: <https://doi.org/10.5902/2236499486280>



[pdf](#)

Publicado
2024-12-13

Publicado por



[Enviar Submissão](#)

Sobre a Revista

Geografia
ISSN 2236-4994
DOI: 10.5902/22364994
Área do CNPq: Ciências Exatas e da Terra

Qualis (2017-2020): A2



4,673 Pageviews
Dec 17th - Jan 17th

Informações
Para Leitores

Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/86280>.