



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

**DESEMPENHO DE CISTERNAS DO P1MC NO ATENDIMENTO À
DEMANDA HÍDRICA FAMILIAR: O CASO DO SEMIÁRIDO DA
PARAÍBA**

GABRIELA DA LUZ LINS

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO DE 2024

GABRIELA DA LUZ LINS

DESEMPENHO DE CISTERNAS DO P1MC NO ATENDIMENTO À
DEMANDA HÍDRICA FAMILIAR: O CASO DO SEMIÁRIDO DA
PARAÍBA

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Carlos de Oliveira Galvão

Coorientador: Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega (University of Bristol, Reino Unido)

Campina Grande – PB

Março de 2024

L759d

Lins, Gabriela da Luz.

Desempenho de cisternas do P1MC no atendimento à demanda hídrica familiar: o caso do semiárido da Paraíba / Gabriela da Luz Lins – Campina Grande, 2024.

60 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, Prof. Dr. Rodolfo Luiz Bezerra Nóbrega."

Referências.

1. Reservatórios. 2. Recursos Hídricos. 3. Confiabilidade. 4. Resiliência. 5. Simulação. I. Galvão, Carlos de Oliveira. II. Nóbrega, Rodolfo Luiz Bezerra. III. Título.

CDU 628.13(043)

GABRIELA DA LUZ LINS

**DESEMPENHO DE CISTERNAS DO P1MC NO ATENDIMENTO À
DEMANDA HÍDRICA FAMILIAR: O CASO DO SEMIÁRIDO DA
PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade Federal de Campina
Grande, como requisito para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em 12/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão – UFCG
Orientador

Prof. Dr. Rodolfo Luiz Bezerra Nobrega – University of Bristol
Coorientador

Prof. Dr. Valterlin Da Silva Santos – UFCG
Examinador Interno

Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior – UFPB
Examinador Externo



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): GABRIELA DA LUZ LINS / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. RODOLFO LUIZ BEZERRA NÓBREGA - UNIVERSITY OF BRISTOL – COORIENTADOR, DR. VALTERLIN DA SILVA SANTOS – UFCG – EXAMINADOR INTERNO, DR. GILSON BARBOSA ATHAYDE JÚNIOR – UFPB – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 16/2024). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “DESEMPENHO DE CISTERNAS DO P1MC NO ATENDIMENTO À DEMANDA HÍDRICA FAMILIAR: O CASO DO SEMIÁRIDO DA PARAÍBA” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INÍCIO: 14:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEOCONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEOCONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 12 DE MARÇO DE 2024**

5.

6.

7.

8.

9. **RODOLFO LUIZ BEZERRA NÓBREGA – COORIENTADOR**

10.

11.

12.

13.

14.

Documento assinado digitalmente
gov.br GILSON BARBOSA ATHAYDE JUNIOR
Data: 18/03/2024 08:42:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

GILSON BARBOSA ATHAYDE JÚNIOR – EXAMINADOR EXTERNO



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS DE OLIVEIRA GALVAO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/03/2024, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GABRIELA DA LUZ LINS, Usuário Externo**, em 12/03/2024, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VALTERLIN DA SILVA SANTOS, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/03/2024, às 19:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 13/03/2024, às 08:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4257907** e o código CRC **7A84100A**.

A Vovó Penha (in memoria) que sempre me incentivou e me quis ver Doutora um dia. A vovô José Francisco, meu maior engenheiro das artes do dia. A vocês dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao pai celestial por toda orientação e discernimento das atitudes do dia a dia, gratidão por cada desafio e cada vitória conquistada.

Painho (Ronaldo), por me mostrar quão grandioso é o estudo do abastecimento para a população e a felicidade de cada um em receber água em sua residência. “Filho de peixe, peixinho é”. Mainha (Denise), por cada momento de aflição, conselhos e cuidados, sendo uma professora em sala e na vida, me instiga a seguir o caminho da educação. Rafinha, por cada noite em discussão, cada apelido carinhoso compartilhado, revisão do texto e motivação para seguir, obrigada! Anderson, obrigada pela paciência, por não soltar minha mão mesmo nos momentos em que pensei desistir, por cada palavra de carinho e por sempre me lembrar dos propósitos que sonhei em minha vida.

Professor Carlos Galvão, meus mais sinceros e honestos “Obrigada!”, por não desistir de mim e me instigar a seguir, por cada pérola e ensinamento dentro de sala de aula. O senhor me incentiva a ser cada vez uma pessoa melhor.

Rodolfo, obrigada por cada aconselhamento, orientação e carinho. Suas contribuições foram essenciais para chegar até aqui.

Laisa, Matheus, Diego, Breno, Sabrina, Carlinda, Telma, Rejane, Higor, Eduarda, Jaqueline, Dona Uda, Professora Iana, Professor John, obrigada por cada momento de parceria, por cada almoço e compartilhamento de ideias e estudos. A família Laboratório BU, meu obrigada!

Renan, Fátima, Aldir, Ellen e toda a família Oliveira, por todo companheirismo e por entender todo o processo, gratidão!

Encerro um ciclo, com a certeza de que o próximo já está batendo na porta!

RESUMO

A água é garantia da manutenção da vida humana e de setores indispensáveis na sociedade. Sua distribuição, comumente nos centros urbanos, é gerida por companhias de abastecimento. Entretanto, nas comunidades rurais e/ou difusas, esse acesso torna-se mais precário devido à ausência de redes de abastecimento de água. Somado a essa dificuldade, tem-se a irregularidade chuvosa do semiárido e as suas altas taxas de evaporação que reduzem o escoamento superficial. Para suprir a necessidade do consumo humano, surgem então as soluções alternativas de abastecimento, como o SAAC (Sistema de Aproveitamento de Água de Chuva). Uma iniciativa do Governo Federal para a implantação em larga escala dessa tecnologia foi o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), que promoveu a construção de cisternas de uso domiciliar com capacidade de 16 mil litros, com o objetivo de atender a demanda de uma família por até oito meses de estiagem. Este trabalho pretende avaliar o desempenho desses equipamentos no atendimento da demanda dos usuários, utilizando indicadores de desempenho (confiabilidade, eficiência e resiliência). A área de estudo trata-se do Semiárido Paraibano, com um horizonte temporal de 30 anos (1993-2022). Foi possível observar que os indicadores (confiabilidade e eficiência) se apresentavam de forma semelhante para as regiões homogêneas pluviométricas da região estudada. Quanto ao indicador resiliência, foi necessário readaptá-lo para a realidade da tecnologia estudada, ajustando o tempo de recuperação para a realidade do equipamento estudado. Consequentemente, ocorreu a necessidade de recalcular o indicador de confiabilidade para esse novo estado. Pode-se observar também regiões propícias a aumentar a capacidade dos reservatórios devido aos extravasamentos ocorridos, como também aumentar as áreas de captação para o aumento da confiabilidade do equipamento.

Palavras-chaves: Confiabilidade; Resiliência; Simulação.

ABSTRACT

Water guarantees the maintenance of human life and essential sectors of society. Its distribution, commonly in urban centers, is managed by supply companies. However, in rural and/or diffuse communities, this access becomes more precarious due to the absence of water supply networks. Added to this difficulty is the irregular rainfall in the semi-arid region and its high evaporation rates that reduce surface runoff. To meet the need for human consumption, alternative supply solutions emerge, such as the SAAC (Rainwater Harvesting System). An initiative by the Federal Government for the large-scale implementation of this technology was the One Million Cisterns Program (P1MC), which promoted the construction of cisterns for domestic use with a capacity of 16 thousand liters, with the aim of meeting the demand for a family for up to eight months of drought. This work aims to evaluate the performance of these equipment in meeting user demand, using performance indicators (reliability, efficiency, and resilience). The study area is the Semiarid Paraibano, with a time horizon of 30 years (1993-2022). It was possible to observe that the indicators (reliability and efficiency) were presented similarly for the homogeneous rainfall regions of the studied region. As for the resilience indicator, it was necessary to readapt it to the reality of the technology studied, adjusting the recovery time to the reality of the equipment studied. Consequently, there was a need to recalculate the reliability indicator for this new state. One can also observe regions that are prone to increasing the capacity of reservoirs due to overflows, as well as increasing catchment areas to increase the reliability of the equipment.

Key words: Reliability; Resilience; Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Aproveitamento de Água de Chuva	16
Figura 2 - Área de Captação do SAAC	17
Figura 3 - Calhas e Condutores do SAAC.....	18
Figura 4 - Cisternas de Placa	18
Figura 5 - Cisterna de Polietileno.....	19
Figura 6 - Dispositivo de descarte das primeiras águas	19
Figura 7 - Sistema de Captação de Água de Chuva do P1MC	22
Figura 8 - Metodologia utilizada pelo Programa Cisternas	23
Figura 9 - Cisterna Calçadão	24
Figura 10 - Cisterna de Enxurrada	25
Figura 11 - Barragem Subterrânea	25
Figura 12 - Sistema de Tanque de Pedra.....	26
Figura 13 - Ilustração de Barreiros Trincheiras	26
Figura 14 - Metodologia do trabalho.....	29
Figura 15 - Área do Semiárido Paraibano	30
Figura 16 - Portal VISDATA	31
Figura 17 - Programa Cisternas	32
Figura 18 - Desempenho de um sistema	34
Figura 19 - Simulação dos dados para o município de Alagoinha - PB.....	37
Figura 20 - Implantação de Cisternas por ano no estado da Paraíba	38
Figura 21 - Concentração de cisternas	39
Figura 22 - Valores de confiabilidade dos municípios do SAPB	40
Figura 23 - Análise da Concentração de Precipitação do município de Nova Palmeira - PB.....	41
Figura 24 - Valores de confiabilidade dos municípios do SAPB no ano de 1993.....	42
Figura 25 - Valores de confiabilidade dos municípios do SAPB no ano de 2009.....	43
Figura 26 - Valores de eficiência dos municípios do SAPB	44
Figura 27 - Valores de eficiência dos municípios do SAPB no ano de 1993.....	45
Figura 28 - Valores de eficiência dos municípios do SAPB no ano de 2009.....	46
Figura 29 - Regiões homogêneas pluviométricas da Paraíba	47
Figura 30 - Simulação município Campina Grande - PB.....	48
Figura 31 - Comparação de valores de Resiliência	50
Figura 32 - Confiabilidade recalculada	51
Figura 33 - Volume extravasado	52
Figura 34 - Valores de confiabilidade após o aumento da área de captação	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis de Priorização	39
Tabela 2 - Resiliência dos municípios.....	47
Tabela 3 - Resiliência Recalculada	49

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data

GEE - Google Earth Engine

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICP – Índice de Concentração de Precipitação

MDS – Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome

MIC – Ministério da Cidadania

ONU – Organização das Nações Unidas

P – Precipitação

P1MC – Programa Um Milhão de Cisternas

SAAC – Sistema de Aproveitamento de Água de Chuva

SAB – Semiárido Brasileiro

SAPB – Semiárido Paraibano

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1. SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA.....	16
3.1.1. COMPONENTES DO SAAC.....	17
3.1.2. DIMENSIONAMENTO DOS SAAC.....	20
3.1.3. APLICAÇÕES NA LITERATURA.....	20
3.2. O PROGRAMA UM MILHÃO DE CISTERNAS.....	21
3.2.1. Programa Cisternas.....	23
3.2.1.1. Cisterna Calçadão.....	24
3.2.1.2. Cisterna de Enxurrada.....	24
3.2.1.3. Barragem Subterrânea.....	25
3.2.1.4. Tanque de Pedra.....	25
3.2.1.5. Barreiros Trincheiras.....	26
3.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SAAC.....	26
4. METODOLOGIA	29
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	29
4.2. AQUISIÇÃO DE DADOS.....	30
4.2.1. Dados de Implantação das Cisternas.....	30
4.2.2. Dados Pluviométricos.....	32
4.3. ÍNDICES DE DESEMPENHO.....	33
4.3.1. Confiabilidade.....	33
4.3.2. Eficiência.....	34
4.3.3. Resiliência.....	34
4.4. SIMULAÇÃO DO USO DAS CISTERNAS E CÁLCULO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO.....	35
4.4.1. Armazenamento Diário.....	35

	12
4.4.2. Confiabilidade	36
4.4.3. Eficiência	36
4.4.4. Resiliência.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1. CONCENTRAÇÃO DE CISTERNAS.....	38
5.2. CONFIABILIDADE.....	40
5.2.1. Confiabilidade média	40
5.2.2. Confiabilidade mínima	42
5.2.3. Confiabilidade máxima.....	43
5.3. EFICIÊNCIA.....	44
5.3.1. Eficiência média	44
5.3.2. Eficiência mínima.....	44
5.3.3. Eficiência máxima	45
5.4. RESILIÊNCIA	46
5.4.1 Resiliência média.....	46
5.4.2. Resiliência das cisternas do P1MC.....	48
5.4.3. Recálculo da Confiabilidade.....	50
5.5. EXTRAVASAMENTOS	51
5.6. DISCUSSÃO DOS ÍNDICES.....	52
5.7. ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO PARA O PROGRAMA CISTERNAS.....	53
6. CONCLUSÕES	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem universal e garantia de qualidade para todos, sendo essencial a busca pelo acesso e fornecimento contínuo para a manutenção da vida humana. Além do mais, assegura também a manutenção de diversos setores como a indústria, comércio e agricultura. De acordo com o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), o Brasil deve até 2030 alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos (ONU, 2024).

Comumente, o fornecimento de água para a sociedade ocorre através de sistemas coletivos de abastecimento, geralmente geridos por companhias de abastecimento. Entretanto, em comunidades isoladas, como as encontradas em zonas rurais, diante da falta de soluções coletivas de abastecimento, utilizam-se soluções de abastecimento individuais para suprir a demanda hídrica. De acordo com o censo do IBGE de 2010, 17,37% da população rural utilizava “outras fontes” para seu abastecimento, ou seja, não possuíam abastecimento por rede de distribuição e nem utilizavam poços (IBGE, 2010). Na época da redação desse trabalho, o IBGE ainda não tinha realizado a divulgação dos dados acerca da zona rural coletados no censo de 2022.

Todavia, diversas regiões do Brasil sofrem com o cenário da seca, o que motiva o uso de métodos para o acúmulo de água que busca a conservação da autonomia das famílias. Uma região que sofre com a seca trata-se do Semiárido Brasileiro, característico da baixa incidência pluviométrica, corrobora ainda as circunstâncias de escassez hídrica provocada pelo desequilíbrio da demanda e disponibilidade dos recursos. Além disso, a baixa disponibilidade hídrica acentua, também, o desenvolvimento da região e atinge as produções agrícolas do meio, influenciando no cultivo das famílias.

Ademais, as precipitações médias anuais dos municípios que compõem essa região oscilam em torno de 300 a 1250 mm. A maior parte dessa região encontra-se em áreas onde ocorrem chuvas inferiores a 875 mm (cerca de 77%), afetando a agricultura de subsistência ali difundida. Adicionadas à baixa precipitação, corroboram ainda as altas taxas de evapotranspiração que contribuem para que apenas 10% da precipitação torne-se escoamento superficial. Portanto, a captação de água de chuva se torna muito importante na convivência com a irregularidade hídrica (Silva et al., 2017; Lourenço et al., 2019).

Em virtude dessas circunstâncias, surgiram incentivos à construção de cisternas, tornando-se mais conhecido o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), tendo, estrategicamente, a implementação na região semiárida que sofre com o agravamento da sua situação hídrica (ASA, 2023). A própria Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) ressalta em um de seus objetivos a necessidade do aproveitamento de águas pluviais (BRASIL, 1997). De acordo com o Ministério da Cidadania, foram entregues de 2004 a 2022 em torno de 967 mil cisternas, para consumo humano, sendo amplamente intensificada nos 10 primeiros anos, em torno de 71%, entre 2004 e 2014 (MIC, 2023).

Além disso, as cisternas podem ser utilizadas, também, como estratégias de adaptação e instrumentos de combate à seca. Esses equipamentos armazenam não só água de chuva, como também de água oriunda de carros pipas e até outras fontes. Funcionam, assim, como um elemento de redução de vulnerabilidade e um instrumento de gestão de crise. Entretanto, é notório observar sua funcionalidade em períodos de alta variabilidade pluviométrica, sendo necessário também avaliar diversas regiões e principalmente aquelas que possuem uma baixa relação de cisternas por habitantes (Andrade et al., 2015).

Todavia, as cisternas visam o atendimento à necessidade dos seus usuários, alcançando então o atendimento da demanda desses. Entretanto, a irregularidade da precipitação e longos períodos de estiagem podem ocasionar falhas a esse atendimento. Surge então a necessidade de quantificar o desempenho desses equipamentos na perspectiva do atendimento da demanda hídrica familiar, utilizando simulações e análises de índices para verificar as falhas do sistema. Cohim (2013), ao analisar a confiabilidade de um sistema na cidade de Araci-BA, observou que em 33% dos dias do período estudado não é possível obter o volume necessário para uma família de cinco pessoas na residência. Logo, ocorre a precisão de, além de disponibilizar o sistema, verificar seu desempenho quanto ao atendimento da demanda hídrica familiar.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa trata-se de avaliar o desempenho de cisternas do Programa Um Milhão de Cisternas no atendimento às demandas dos usuários.

São objetivos específicos:

- Determinar, mediante índices, o atendimento à demanda hídrica dos usuários da região do Semiárido Paraibano;
- Propor novas ações para o Programa Cisternas na implantação de novos equipamentos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA

Com os crescentes problemas de escassez hídrica, associados ao crescimento populacional, a urbanização e a incerteza pluviométrica de algumas regiões, buscam-se outras fontes de abastecimento de água na tentativa de aumentar a segurança hídrica dos usuários e diminuição da dependência de uma única fonte. Para suprir as demandas desses usuários, surgem as soluções alternativas. A solução alternativa tende a receber água potável, mas por não possuir uma rede de distribuição ou o cenário não ser favorável para essa existir, acaba recebendo água de outras fontes. Esse fato se perpetua recorrentemente nas regiões rurais e nas comunidades difusas, devido, na maioria das vezes, à sua distância dos núcleos urbanos, topografia e investimentos financeiros do poder público. De acordo com o Censo de 2010, 53,2% das residências rurais do Nordeste eram abastecidas por outras formas de abastecimento (Excluem-se das outras formas poços e redes de abastecimento) (IBGE, 2010).

Como uma alternativa para esses usuários, têm-se os Sistemas de Aproveitamento de Água de Chuva (SAAC). São sistemas que utilizam, através de dutos e calhas, mecanismos que captam a água que incide sobre o telhado da residência para um reservatório próximo. A Figura 1 exemplifica esse tipo de alternativa.

Figura 1 - Sistema de Aproveitamento de Água de Chuva



Fonte: ASA (2024).

Os sistemas de aproveitamento e coleta de água de chuva existem há milhares de anos, tendo seu conceito remetido ao Império Romano na Sardenha, onde a população construiu sistemas para armazenar água de chuva e abastecer a população.

Posteriormente, esse método alcançou extrema utilidade para abastecimento em regiões como África, Ásia e América do Sul (Cirilo et al., 2007).

Vale ressaltar que esses sistemas podem ser utilizados também na zona urbana, de modo a desafogar os sistemas de abastecimentos das Concessionárias, reduzindo a demanda e corroborando para um possível aumento da eficiência do sistema de abastecimento, como também reduz o volume de água escoado ocasionando uma redução nas inundações e enchentes da zona urbana fortemente impermeabilizada (SOUZA, 2015). Ennenbach, Larrauri e Lall (2017) observam em seu estudo que em condados nos Estados Unidos da América de baixa densidade populacional, conseguem suprir sua demanda utilizando apenas aproveitamento de água de chuva.

3.1.1. COMPONENTES DO SAAC

A NBR 15527/2019 é a norma técnica responsável por nortear os projetos de aproveitamento de água de chuva. O documento ressalta que o SAAC é composto basicamente pela captação, transporte e armazenamento.

A captação ocorre comumente através da precipitação que incide sobre telhados ou pisos, como demonstrado na Figura 2.

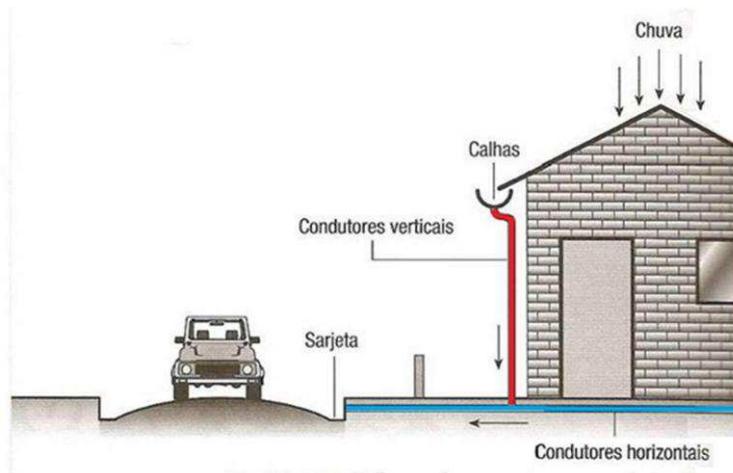
Figura 2 - Área de Captação do SAAC



Fonte: CEDAE (2024).

Após a captação, o volume de água coletado é transportado através de calhas e dutos, conforme demonstrado na Figura 3.

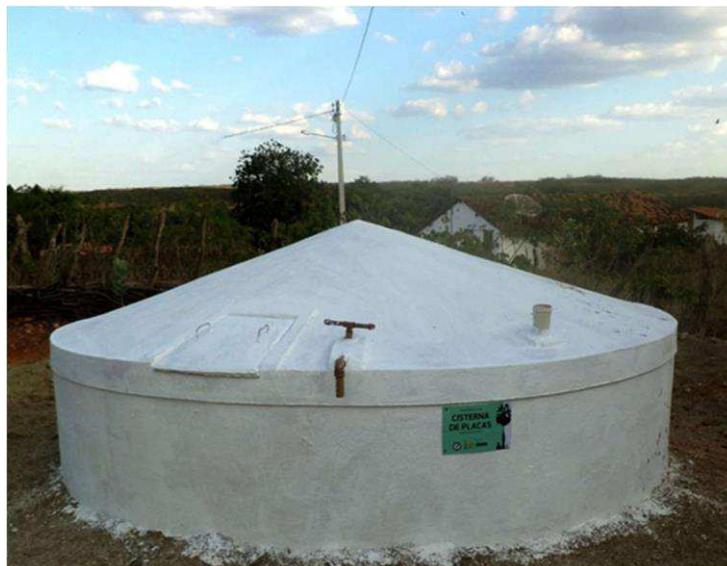
Figura 3 - Calhas e Condutores do SAAC



Fonte: Guia da Engenharia (2024).

Por fim, são armazenados em reservatórios, podendo ser de diversos materiais. Usualmente são de concreto, como as cisternas de placa (Figura 4) ou de polietileno, como as caixas d'água (Figura 5).

Figura 4 - Cisternas de Placa



Fonte: Plataforma Sabiá (2024).

Figura 5 - Cisterna de Polietileno

Fonte: EMBRAPA (2024).

A norma ressalta, também, a importância da instalação de um dispositivo de descarte das primeiras águas, comumente esse volume serve para a lavagem dos telhados, um exemplo desse equipamento está na Figura 6 (BRASIL, 2019).

Figura 6 - Dispositivo de descarte das primeiras águas

Fonte: Transforma! (2024).

3.1.2. DIMENSIONAMENTO DOS SAAC

Cada sistema deve ser dimensionado para que os critérios econômicos, ambientais e técnicos sejam suficientes para o atendimento dos usuários e sua manutenção. Em sua versão anterior, a norma sobre aproveitamento de água de chuva elencou métodos para o dimensionamento dos reservatórios, entretanto o recomendado atualmente é avaliar o cenário de precipitação local com as demandas necessárias e avaliar a melhor situação a ser empregada.

Tomaz (2010) elenca que, para o cálculo do volume aproveitável, devem ser consideradas no sistema as perdas por limpeza, evaporação entre outros. O autor ressalta também um valor médio de 0,85 para o Coeficiente de Escoamento Superficial de telhas cerâmicas, corrugadas de metal e cimento amianto. A NBR recomenda que, em casos de ausência de dados, pode-se considerar a eficiência do sistema de descarte adotar o valor de 0,85. Numericamente, pode ser expresso pela equação abaixo:

$$V = P * A * C * n$$

Onde **P** é a precipitação que ocorre na localidade, **A** é a área de captação, **C** é o Coeficiente de Eficiência e **n** a Eficiência do sistema de descarte.

Pode-se generalizar e resumir ambos os coeficientes e atribuir um valor adimensional de 0,75, ao observar que a maioria dos telhados brasileiros é composta de telhas de amianto ou cerâmicas e, ao multiplicarmos os coeficientes, generaliza-se a um valor médio.

3.1.3. APLICAÇÕES NA LITERATURA

Diversos autores estudam a viabilidade de implantação dos SAAC em diversos tipos de empreendimentos ou usos, podendo mensurar tais quais.

Andrade (2019) realizou um estudo em um campus universitário em Vitória da Conquista–BA. O autor observa que, com a área de captação disponível no campus, seria possível manter a autonomia dos usuários. Além disso, poderia atribuir uma economia de quase R\$ 16.000,00 em um ano aos cofres da universidade e evitar problemas de escassez ao depender apenas da concessionária.

Jesus e Albuquerque (2016) avaliaram o aproveitamento de água de chuva em uma unidade do SENAC em Aracaju–SE. Os autores observam a presença de uma variação pluviométrica durante o ano, mas que ainda assim consegue atender às necessidades. O prédio consegue ter sua demanda (103,98 m³/mês) atendida nos 11 meses de um ano e, ao avaliar o investimento econômico em menos de 4 anos, é possível ter o retorno do valor inserido.

Souza et al. (2023) analisaram a viabilidade da implantação de um sistema de aproveitamento de água de chuva em um edifício da zona urbana do Recife–PE. O prédio possui uma demanda média mensal de 909,34 m³ e uma área de captação de 6.793,95 m². O sistema consegue atender 100% da demanda do edifício em metade dos meses do ano e consegue suprir 51% durante o período de escassez. Os autores analisaram também as características físico-químicas da água coletada e a mesma encontrava-se dentro dos padrões de potabilidade exigidos. Quanto à economia financeira, relatam que é possível economizar 80% do valor da tarifa anual e o retorno do investimento acontece num período de cinco anos e oito meses.

Silva, Galvão e Ribeiro (2023) estudaram acerca do potencial de economia de água potável de um edifício universitário ao fazer uso de um sistema de aproveitamento de água de chuva na cidade de Campina Grande–PB. Ao analisarem três cenários, os autores observam no cenário mais favorável uma economia de 193,68 m³ por ano, para uma área de captação de 1090 m². Os autores elencam que quanto maior a demanda estudada, maior é a variação do potencial de economia de água potável.

3.2. O PROGRAMA UM MILHÃO DE CISTERNAS

A década de 90 foi marcada por severas secas, perda de lavouras e mortes de animais, desencadeando um processo de luta da sociedade civil, marcada principalmente pelos moradores da região do Semiárido Paraibano. Surge então em 1993 a Articulação no Semiárido (ASA) com a estratégia de não mais se combater a seca, mas sim aprender a conviver com ela e superar suas problemáticas (Santos, 2016). Até então, as obras de combate à seca promovidas pelos órgãos públicos se resumiam a açudes e ações emergenciais assistencialistas. Associado a isso, tem-se a população rural e/ou difusa como um dos maiores desafios a serem atendidas com suas necessidades hídricas (Buriti e Barbosa, 2018).

Surtem então como alternativa para convivência no SAB e a adaptação de uma nova maneira de abastecimento da população, as cisternas de placa para armazenamento de água de chuva. Esses equipamentos se constituem como uma das principais formas de abastecimento da população rural do Semiárido brasileiro (Buriti e Barbosa, 2018). Em 2001 a ASA baseada nas suas experiências idealiza o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), apresentam ao Governo Federal como o programa uma proposta de acesso à água potável às comunidades rurais a partir de uma simples estrutura de captação de água de chuva dos telhados das próprias residências dos usuários e armazenado em tanques próximos à residência (Gomes, Heller, Pena, 2012).

Através do convênio entre a ASA e o Governo Federal, o órgão federal passa a ser o principal financiador para a implantação da tecnologia nas comunidades. As cisternas são construídas através de placas de concreto pré-moldadas fabricadas pelos próprios moradores, e através de um sistema de calha inserido ao telhado recebem e armazenam o volume de chuva precipitado. As cisternas do P1MC possuem capacidade de armazenamento de 16 mil litros, o suficiente para atender a uma família por oito meses de estiagem para os usos de beber, cozinhar e escovar os dentes (Gomes e Heller, 2016). A Figura 7 ilustra o sistema utilizado.

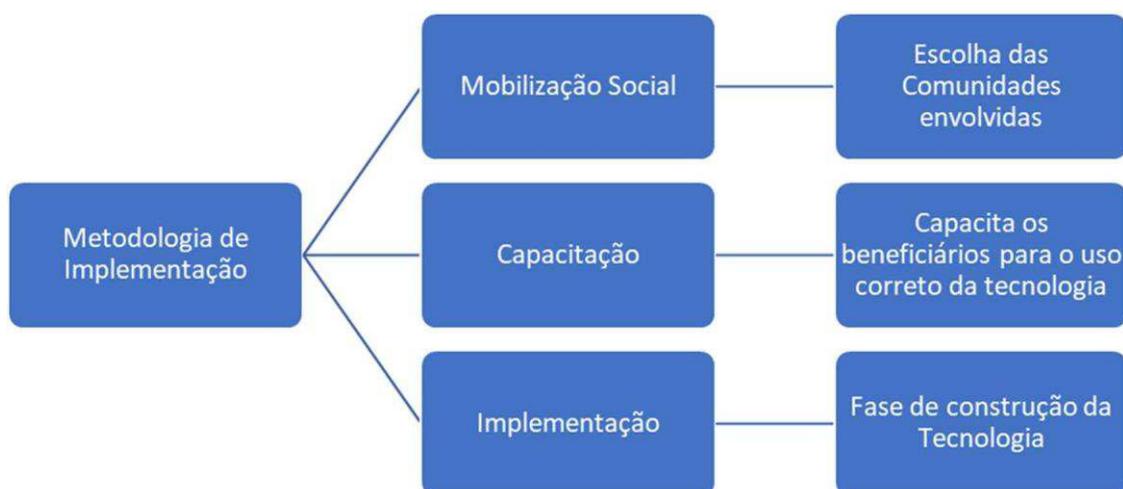
Figura 7 - Sistema de Captação de Água de Chuva do P1MC



Fonte: Gomes e Heller (2016).

As famílias contempladas para receber a tecnologia colaboram na escavação do alicerce e no transporte dos materiais, recebem capacitação para o uso adequado e orientações para a manutenção. Com a presença do equipamento, as famílias não precisam mais se deslocar para açudes ou cacimbões a fim de conseguir água para consumo, uma vez que o reservatório se mantém próximo à residência (ASA, 2023). A participação da comunidade é de suma importância, pois serão eles os responsáveis por zelar pela manutenção do equipamento. A metodologia empregada pelo programa pode ser descrita através da Figura 8.

Figura 8 - Metodologia utilizada pelo Programa Cisternas



Fonte: MDS (2024).

3.2.1. Programa Cisternas

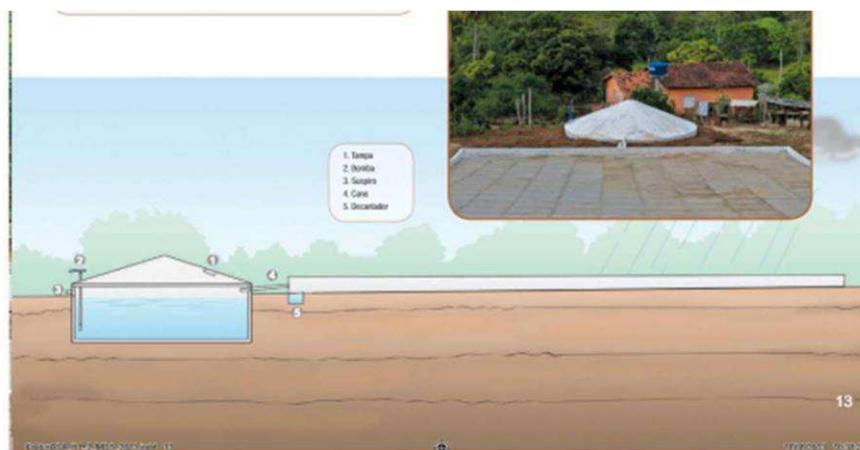
Atualmente, o programa P1MC recebeu o nome de Programa Cisternas (Regulamentado pelo Decreto 9.606/2018) e leva ao SAB não só mais cisternas de consumo de 16 mil litros, mas também cisternas para a agricultura (segunda água). Os principais tipos dessa tecnologia são: cisterna Calçadão e de Enxurrada, Barragem Subterrânea, Tanques de Pedra e Barreiros Trincheiras. Esses equipamentos possuem uma capacidade de armazenamento maior (podem chegar até 500 mil litros de

armazenamento) e auxiliam na produção agrícola e na criação de pequenos animais (BRASIL, 2018).

3.2.1.1. Cisterna Calçadão

Esse tipo de sistema consiste na captação de água de chuva através de um calçadão de 200 m² sobre o solo. A cisterna possui capacidade de 52 mil litros e o calçadão pode ser utilizado para secagem de grãos da colheita (ASA, 2015). A Figura 9 exemplifica esse tipo de tecnologia.

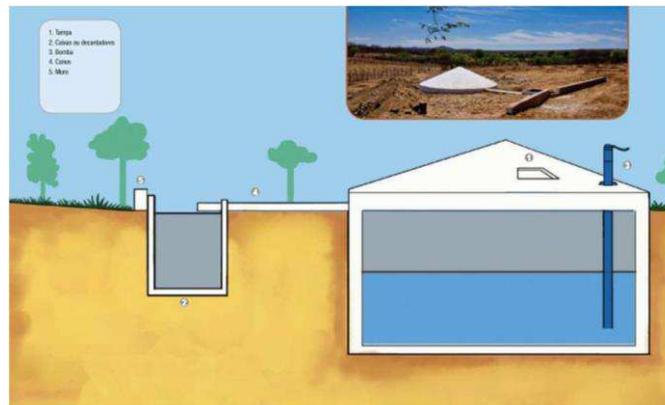
Figura 9 - Cisterna Calçadão



Fonte: ASA (2015).

3.2.1.2. Cisterna de Enxurrada

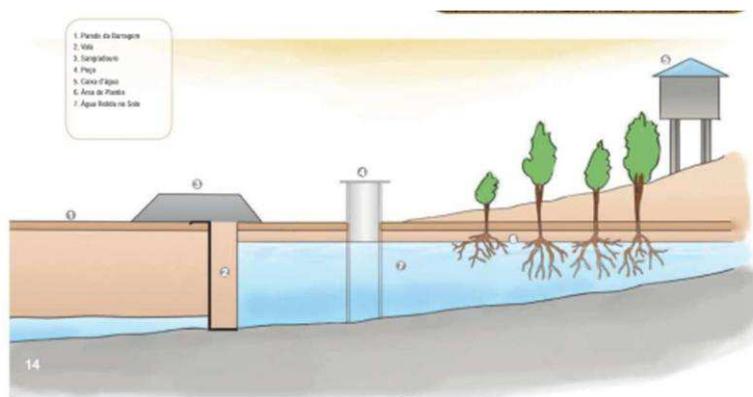
A cisterna de enxurrada funciona de forma semelhante à cisterna de calçadão, a principal diferença é que não existe a área impermeável que forma o calçadão, posto que o solo é o próprio local de coleta. Para evitar que as partículas do solo adentrem ao sistema, são construídos tanques com a intenção de decantar os sólidos em suspensão (ASA, 2015). A Figura 10 ilustra a tecnologia.

Figura 10 - Cisterna de Enxurrada

Fonte: ASA (2015).

3.2.1.3. Barragem Subterrânea

As barragens subterrâneas são construídas em áreas de baixas, onde no inverno formam-se rios e córregos. A barragem é feita escavando uma vala no solo e impermeabilizando com uma lona, de modo que a água que flui no solo fique retida naquela região (ASA, 2015). A Figura 11 exemplifica tal equipamento.

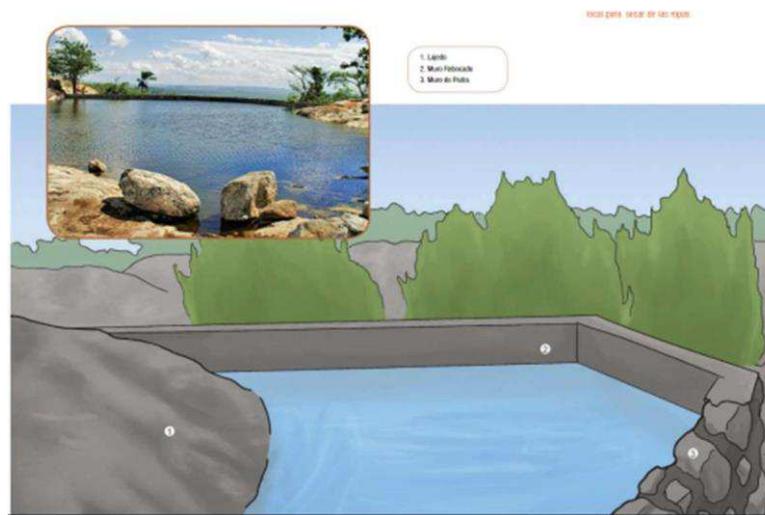
Figura 11 - Barragem Subterrânea

Fonte: ASA (2014).

3.2.1.4. Tanque de Pedra

Essa tecnologia é muito comum em áreas serranas ou onde existem lajedos que funcionam como captação de água de chuva. O volume armazenado depende das dimensões da área, na perspectiva de aumentar essa capacidade são erguidas paredes na parte mais baixa para reter a água no local. Esse tipo de sistema é coletivo, geralmente beneficia dez famílias próximas, serve para consumo de animais, afazeres domésticos e irrigação (ASA, 2015). A Figura 12 ilustra essa tecnologia.

Figura 12 - Sistema de Tanque de Pedra



Fonte: ASA (2015).

3.2.1.5. Barreiros Trincheiras

Os barreiros trincheiras (Figura 13) são tanques escavados no próprio solo, construídos para serem estreitos para evitar a evaporação e perdas de lâmina d'água. Essas escavações conseguem armazenar no mínimo 500 mil litros de água, sendo utilizado para a dessedentação animal, para a produção da agricultura. Dependendo da estocagem de água, seu excedente pode até ser utilizado para comercialização (ASA, 2015).

Figura 13 -Ilustração de Barreiros Trincheiras



Fonte: ASA (2015).

3.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SAAC

Ao trilharmos o uso de sistemas de aproveitamento de água de chuva na zona rural, nos deparamos com a dependência dessa fonte de abastecimento para a população

e muitas vezes a única fonte segura para o consumo. Ou seja, um mau dimensionamento do sistema pode ocasionar um novo problema de déficit de abastecimento desses usuários, o que gera a observar o desempenho do equipamento perante as demandas a serem atendidas.

Andrade, Maia e Lúcio (2016) observam em seu estudo uma forte interferência do regime pluviométrico na eficiência do sistema. Ao analisarem diversos cenários, é possível compreender que para áreas de captação superior a 50 m² o regime pluviométrico não apresenta tamanha distorção para cada área de estudo. Os autores elencam também que para regiões onde a precipitação ocorre muito concentrada, é interessante analisar o aumento da capacidade dos reservatórios, desenvolvendo assim um incremento na sua eficiência.

Cruz, Bezerra e Maia (2017) relatam que ao comparar diversos métodos de dimensionamento de cisternas para quatro municípios do Rio Grande do Norte (Caicó, Natal, Martins e Mossoró), cada município representa uma região homogênea pluviométrica do estado. É possível observar entre todos que o maior valor atingido da eficiência foi o que alcançou o maior volume dimensionado. Os autores informam também que alguns métodos fogem totalmente da realidade, subdimensionando o sistema ao ponto de tornar-se totalmente ineficaz ao atendimento das demandas.

Cohim e Orrico (2015), ao entrevistarem e analisarem 947 cisternas no estado da Bahia, constataram que, à medida que o número de moradores da residência e a área do telhado diminuem, tem-se uma redução da eficiência do sistema. Os autores ressaltam, também, que a utilização de um volume único de cisternas no P1MC pode não ser favorável para cada cenário de uso, ou seja, podem ocorrer casos de um volume inferior a 16 mil litros ser suficiente para a família, como também pode ocorrer o inverso.

Santos e Abrantes (2023), ao analisarem 260 famílias usuárias de cisternas do P1MC na cidade de Souza–PB, simularam o seu uso quanto ao atendimento das necessidades em um ano extremo (seca). Para famílias com cinco usuários, os autores observam que só é possível atender as garantias de atendimento a suas necessidades hídricas para uma residência com área de captação de no mínimo 90m². Os autores elencam também que, à medida que reduz a área de captação, o atendimento só é alcançado caso a família possua uma quantidade menor de participantes (inferior a cinco).

Marinho, Campos e Lima (2019), ao estudarem a importância das cisternas de placa na comunidade rural da Torre no município de Serra Redonda–PB, observaram após entrevista com 30 famílias usuárias que os principais usos da água armazenada no equipamento se dá para o consumo e manutenção de atividades domésticas. Os entrevistados relatam, também, estarem satisfeitos com a obra e reconhecem o seu valor econômico e social.

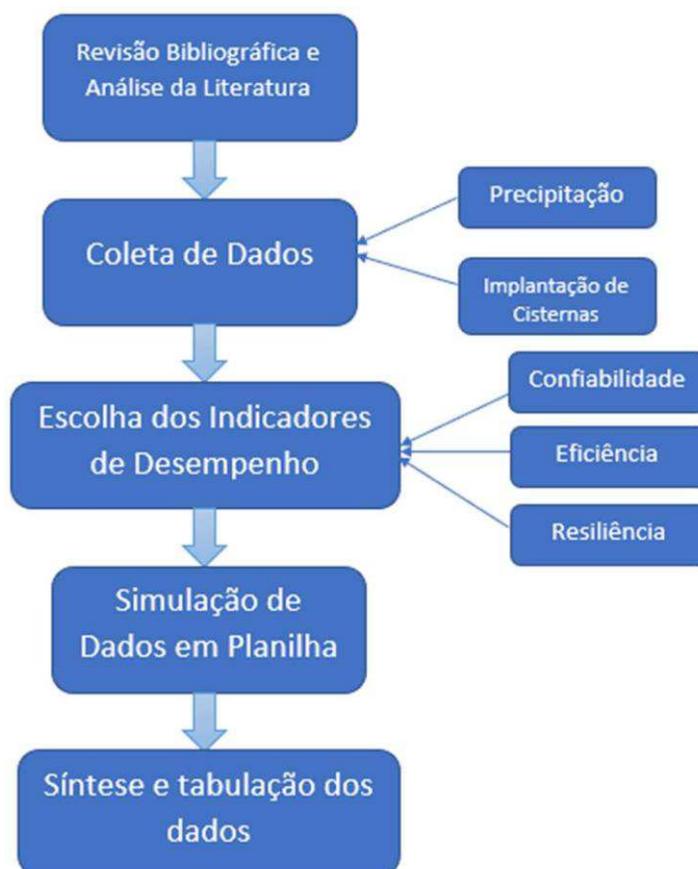
Moura, Marques e Almeida (2024) analisaram três municípios da Paraíba (Cabaceiras, Boqueirão e Barra de Santana) que, mesmo com sua irregularidade pluviométrica, demonstram elevado potencial de captação de água de chuva. Os autores analisam o desempenho de cisternas do tipo calçadão e verificam que não é recomendável estabelecer uma área de captação fixa (no caso estudado, 200m²) e nem o volume da cisterna (200 m³ no caso estudado). Os autores indicam que essas características devem ser determinadas após análise dos usos do equipamento e da característica pluviométrica da região.

Rocha et al. (2021) analisaram o desempenho de cisternas, considerando uma área de captação de 40 m², com influência da variação climática. Os autores relatam que, para o clima atual, é possível observar que a vulnerabilidade desse sistema é alta, com 50% dos resultados estimando o déficit hídrico entre 13,82% e 32,15%. Mesmo possuindo um valor elevado, os autores comentam que para 2050 a vulnerabilidade deve sofrer um acréscimo de em média 4,35%. Como medida de adaptação, os autores realizaram simulações para uma área de captação de 60 m² e observaram para o ano de 2050 reduções médias nas vulnerabilidades mínima, mediana e máxima de 8,4%, 14,88% e 16,71%.

4. METODOLOGIA

O trabalho desenvolveu-se inicialmente com a busca na literatura para, em seguida, iniciar a coleta de dados para alimentar o banco de dados. Munido dos dados, utilizaram-se simulações para observar o desempenho das cisternas através dos dados de cada município da região estudada. O resumo do processo metodológico pode ser observado no fluxograma da Figura 14.

Figura 14 - Metodologia do trabalho



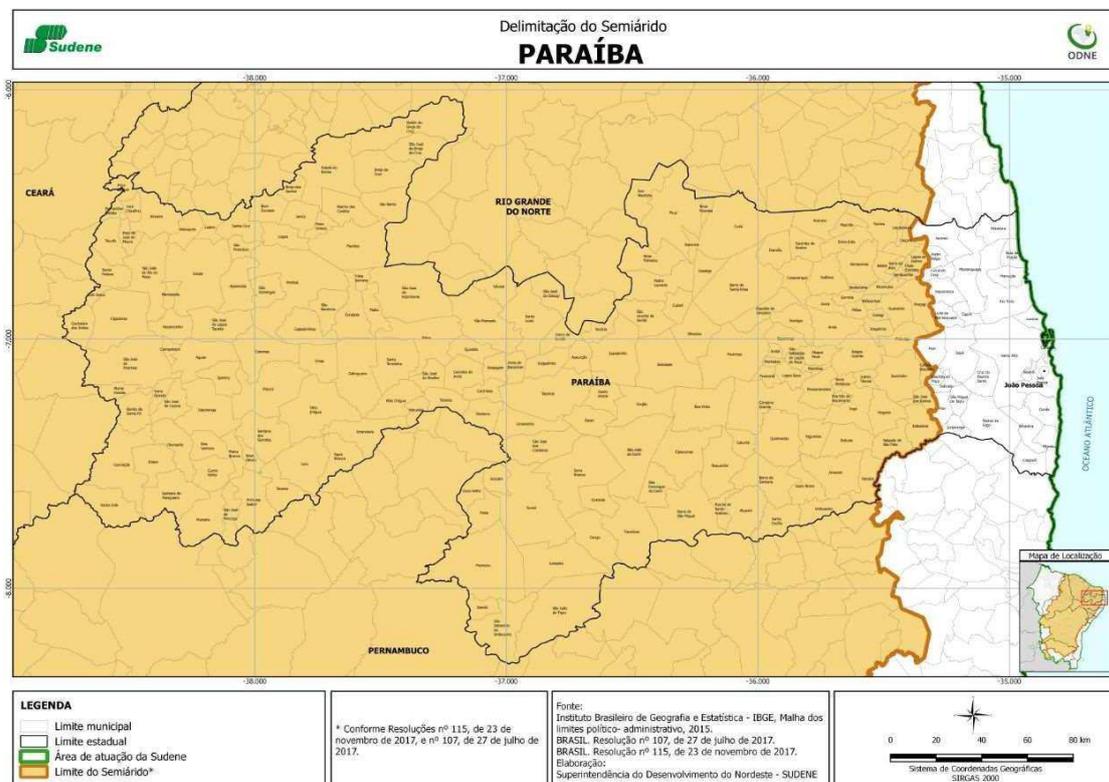
Fonte: Autor (2024)

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abordada neste trabalho trata-se do semiárido paraibano, composto por 194 municípios, cerca de 91% do território paraibano, correspondente a uma área de 51.334,637 km² e delimitada pela Resolução N^o 115 de 23 de novembro de 2017 da SUDENE (BRASIL, 2017). De acordo com o censo de 2010 do IBGE, a população dessa região era estimada em 2.092.400 pessoas, dos quais 32% residiam na zona rural (IBGE, 2010). Os municípios possuem uma média pluviométrica entre 400

mm a 1260 mm, sendo o menos chuvoso o município de Gurjão e o mais chuvoso o município de Pilõezinhos. A Figura 15 mostra a área estudada.

Figura 15 - Área do Semiárido Paraibano



Fonte: SUDENE (2023)

4.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

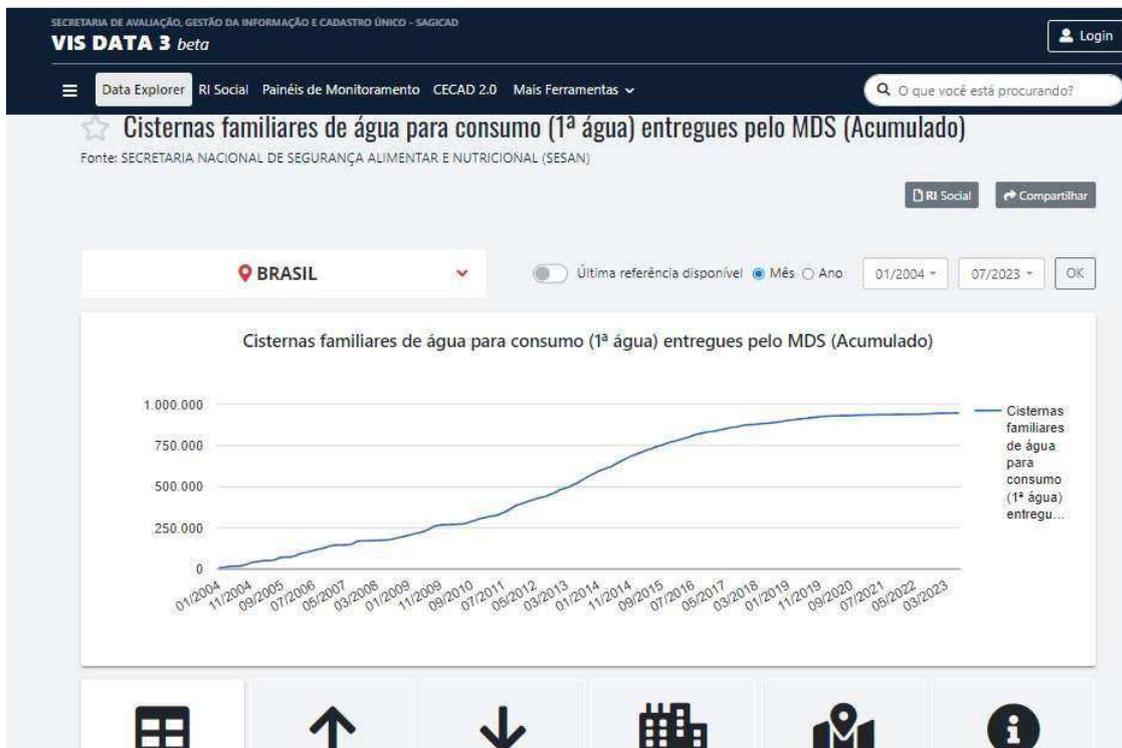
4.2.1. Dados de Implantação das Cisternas

Ao se catalogar os dados disponíveis sobre a implantação de cisternas, foi possível identificar diversas fontes de informação, das quais elencamos duas a serem utilizadas neste trabalho.

A primeira delas trata-se das cisternas familiares de água para consumo (1ª água) entregues pelo Ministério da Cidadania, quantidades essas fornecidas pela SAGICAD (Secretaria de Avaliação, Gestão da Informação e Cadastro Único), que está inclusa no Ministério da Cidadania. Nesse portal, denominado VISDATA, é possível observar a quantidade de cisternas implantadas mensalmente em escala nacional, estadual e municipal. Entretanto, o portal não informa qual tipo de cisterna está sendo utilizada (cisterna escolar, cisterna domiciliar, etc.), apenas informa que se dá para consumo

humano (1º água). Para efeito deste estudo, foram consideradas que todas as cisternas são domiciliares. A Figura 16 apresenta o *site* e o resumo dos seus dados.

Figura 16 - Portal VISDATA



Fonte: MIC (2023)

A segunda fonte é o banco de dados do Programa Cisternas; seus dados são alimentados pelo Ministério de Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. Por esse portal é possível observar, a tecnologia implementada, o município em que está construída e o beneficiário. Porém, não há informação sobre o ano de construção das cisternas para triagem dos dados. A Figura 17 ilustra o *site* utilizado.

Figura 17 - Programa Cisternas

UF	Município	Nome do Beneficiário	Tecnologia Implementada
PB	ALAGOA GRANDE	LUIS ANTONIO DOS SANTOS	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	JURANDI JOSE DOS SANTOS FILHO	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	ANTONIO GONCALO DA SILVA	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	SEVERINO CRISPIM DA SILVA	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	MARIA HELENA DA SILVA FRANCA	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	MARIA AMARO DE ARAUJO SANTOS	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	CICERO PEDRO DE SOUZA	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	JOSE HORACIO DA SILVA	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	RAFAEL ANTONIO DOS SANTOS	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	JOSE BARBOSA DA SILVA	Tanque de Pedra
PB	ALAGOA GRANDE	PAULO CELESTINO	Tanque de Pedra

Fonte: BRASIL (2023)

No intuito de observar a implantação das cisternas de forma homogênea, utilizou-se uma razão entre o número de cisternas e o número de habitantes rurais, semelhante ao utilizado por Andrade et al. (2015). A partir dos dados do VISDATA, coletou-se o quantitativo de cada município, e para a população rural empregaram-se os dados disponíveis do censo de 2010. Mesmo tendo ocorrido o censo no ano de 2022, não ocorreu a divulgação dos dados a tempo de utilizar nesse trabalho.

4.2.2. Dados Pluviométricos

Com o objetivo de simular o cenário mais próximo da realidade, utilizou-se uma série histórica diária de 30 anos de precipitação (1993–2022). Os dados foram extraídos através da base CHIRPS Daily e interpolados para a escala local e tempo através do Google Earth Engine (GEE). O produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data (CHIRPS) é uma série de dados praticamente global, mesclando dados de estações in situ com imagens de satélite, gerando séries históricas de precipitação (Funk et al., 2015). Sua escala temporal é diária, mensal e anual, e possui resolução espacial de $0,05^\circ$. Para esta pesquisa utilizou-se a escala diária.

Utilizando as funções do GEE *ee.filterBounds*, para determinar o recorte espacial, e a função *ee.filterDate*, para determinar o intervalo de tempo, é possível delimitar a região de interesse e o período de interesse. Para a região, utilizou-se a delimitação do Semiárido estabelecida pela SUDENE em formato de Shapefile, filtrando os municípios pertencentes apenas ao estado da Paraíba. Vale salientar, ainda, que a

precipitação extraída foi coletada município por município e não uma interpolação da região.

Os municípios paraibanos possuem uma rede pluviométrica disponibilizada pela AESA, entretanto optou-se por utilizar dados de sensoriamento remoto para este trabalho devido à rapidez de coleta dos dados e à interpolação da área estudada, abrangendo não só um ponto fixo, mas sim a região toda. Além do mais, com um simples código no ambiente do GEE é possível coletar dados de todo o mundo na escala desejada.

Com a coleta de cada município, os dados foram armazenados em uma planilha no Excel, onde, a partir dos dados de precipitação, foram realizadas as simulações para cada município.

4.3. ÍNDICES DE DESEMPENHO

No intuito de avaliar o desempenho das cisternas quanto ao atendimento às demandas dos usuários, utilizaram-se três índices para mensurar tal alcance. Esses índices revelam particularidades do sistema que são extremamente importantes para os períodos de seca, nas demandas de pico e em condições meteorológicas extremas.

4.3.1. Confiabilidade

A confiabilidade diz respeito ao estado satisfatório do sistema, em outras palavras, se o sistema consegue suprir a demanda para a qual foi construído. O índice expressa a probabilidade do sistema em atender às necessidades dos usuários, ou seja, de não ocorrer falha no atendimento. Entretanto, o índice não mensura a gravidade da ocorrência da falha, que pode ser medida por outros critérios. Tal índice é amplamente utilizado para a gestão e planejamento dos recursos hídricos. O mesmo pode ser expresso por (Hashimoto, Stedinger e Loucks, 1982):

$$Conf = \frac{\sum_{t=1}^T X_t}{S} * 100\%$$

Onde o somatório de X_t trata-se do somatório de dias em que o equipamento se encontra no estado satisfatório e Conf (confiabilidade) é a probabilidade desse conjunto pertencer a um estado satisfatório (S).

4.3.2. Eficiência

A eficiência revela a gravidade da falha no atendimento à demanda dos usuários. O índice busca observar qual a parcela da demanda dos usuários foi atendida; diferentemente da confiabilidade, o índice observa também os dias de falha do sistema. O sistema foi avaliado conforme mensurado por Fewkes (1999), numericamente expresso por:

$$\eta = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{Y_t}{D_t}}{\sum_{t=1}^T 1} * 100\%$$

Onde Y_t é o volume fornecido ao usuário e D_t a demanda necessária para atendimento do estado satisfatório do sistema. A eficiência pode ser considerada, também, como o complemento da vulnerabilidade definida por Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982). De acordo com os autores, a vulnerabilidade diz respeito à magnitude da falha, ou seja, enquanto a eficiência observa o quanto foi atendido da demanda, a vulnerabilidade analisa o volume que faltou para atender a demanda; à frente, a consideraremos como déficit hídrico.

4.3.3. Resiliência

A resiliência retrata a capacidade de recuperação do sistema para retornar ao seu estado satisfatório, ou seja, quanto tempo o sistema gasta para voltar a atender à demanda necessária do sistema (Hashimoto, Stedinger e Loucks, 1982). A resiliência pode ser interpretada pelo período médio correspondente à área hachurada do gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Desempenho de um sistema



Fonte: Risso et al. (2021)

Numericamente, a resiliência pode ser expressa por:

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ \sum_{j=1}^i \gamma_j | \sum_{j=1}^i \gamma_j \}$$

Nada mais é do que o tempo de recuperação médio, se o dia posterior alcançou o estado satisfatório, quantos dias anteriores se mantiveram em falha.

4.4. SIMULAÇÃO DO USO DAS CISTERNAS E CÁLCULO DOS ÍNDICES DE DESEMPENHO

A simulação foi realizada de modo que se pode observar os volumes armazenados nas cisternas durante um período de 30 anos e também avaliar, através dos índices, os desempenhos desses equipamentos no atendimento aos usuários.

4.4.1. Armazenamento Diário

O armazenamento diário da cisterna é calculado com base na equação do balanço hídrico do reservatório,

$$V_t = V_{t-1} + C_t - D_t$$

$$0 \leq V_t \leq C$$

Onde,

- V_t é o volume armazenado no dia t (m³);
- V_{t-1} é o volume armazenado no dia t-1 (m³);
- C_t é o volume captado no dia t (m³);
- D_t é o volume consumido no dia t (m³);
- C é a capacidade da cisterna.

Para o primeiro dia do armazenamento, ou seja, quando t=1, considera-se $V_{t-1} = 0$. Quando o volume armazenado é superior à capacidade da cisterna, deve-se considerar a diferença como um volume extravasado, que será calculado por:

$$E_t = V_t - C$$

O volume captado no dia t é calculado por:

$$C_t = A_t * \alpha * \beta$$

Onde,

- A_t é a área de captação (m²);

- P é a precipitação do dia (m);
- C é o coeficiente de perdas do sistema.

O coeficiente de perdas do sistema teve seu valor definido em 0,75, de modo semelhante ao estudado por Rocha et al. (2022), ao analisar o desempenho de cisternas no Nordeste Brasileiro.

O consumo é definido pela parcela atendida da demanda, matematicamente pode ser expresso por:

$$C_{t-1} = \begin{cases} D & (C_{t-1} + C_{t-2}) \geq D \\ C_{t-1} + C_{t-2} & (C_{t-1} + C_{t-2}) < D \end{cases}$$

Quando o consumo é inferior à demanda, ocorre um déficit hídrico, ou seja, o sistema não atendeu às necessidades para as quais foi construído. Esse valor deve ser considerado da seguinte forma:

$$D - C_t$$

As simulações ocorreram com as seguintes características: capacidade da cisterna (Cc) 16 m³, demanda (D) 0,075 m³/dia (em torno de 0,015 m³/pessoa/dia para atender uma família composta por cinco pessoas) e área de captação do telhado 40 m². Estas características correspondem ao padrão dos usuários beneficiários do P1MC (ASA, 2015).

4.4.2. Confiabilidade

Como o índice pretende expressar o atendimento à demanda, ele pode ser calculado por:

$$C_{t-1} = \frac{\sum_{t=1}^T C_{t-1}}{D} * 100$$

Ou seja, a razão entre o somatório de dias em que o volume armazenado foi superior a zero pelo período estudado.

4.4.3. Eficiência

Uma vez que o índice propõe observar a parcela de atendimento à demanda, no caso do sistema estudado, ele pode ser formulado pela razão entre o volume consumido e o volume demandado no dia. A equação abaixo retrata a expressão a ser utilizada:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{t=1}^T \bar{R}_t}{\sum_{t=1}^T 1} * 100$$

4.4.4. Resiliência

Ao considerarmos que a resiliência é o tempo de recuperação do equipamento, essa contagem de dias começa a partir do dia da primeira falha (quando o volume armazenado no início do dia é zero, após a sua primeira recarga), conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Simulação dos dados para o município de Alagoinha - PB

DIA	Armazenamento no início do dia (m³)	Chuva (mm)	Volume que entra na cisterna (m³)	Armazenamento Parcial (m³)	Demanda de água (m³)	Consumo (m³)	Armazenamento no final do dia (m³)
01/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
02/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
03/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
04/01/1993	0	2,771	0,124635	0,124635	0,075	0,075	0,049635
05/01/1993	0,049635	4,854	0,21843	0,268125	0,075	0,075	0,193125
06/01/1993	0,193125	2,156	0,09702	0,290145	0,075	0,075	0,215145
07/01/1993	0,215145	0,787	0,035415	0,25056	0,075	0,075	0,17556
08/01/1993	0,17556	1,474	0,06633	0,24189	0,075	0,075	0,16689
09/01/1993	0,16689	0	0	0,16689	0,075	0,075	0,09189
10/01/1993	0,09189	0	0	0,09189	0,075	0,075	0,01689
11/01/1993	0,01689	0	0	0,01689	0,075	0,01689	0
12/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
13/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
14/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
15/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
16/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
17/01/1993	0	5,485	0,246825	0,246825	0,075	0,075	0,171825
18/01/1993	0,171825	0	0	0,171825	0,075	0,075	0,096825
19/01/1993	0,096825	0	0	0,096825	0,075	0,075	0,021825
20/01/1993	0,021825	3,056	0,13752	0,159345	0,075	0,075	0,084345
21/01/1993	0,084345	0	0	0,084345	0,075	0,075	0,009345
22/01/1993	0,009345	0	0	0,009345	0,075	0,009345	0
23/01/1993	0	1,049	0,047205	0,047205	0,075	0,047205	0
24/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0
25/01/1993	0	0	0	0	0,075	0	0

Fonte: Autor (2024)

Observe que nesse período estudado, a cisterna começa a encher no dia 05/01/1993 e começa a apresentar falha no dia 12/01/1993, recuperando-se no dia 18/01/1993. Nessa situação, o equipamento levou 7 dias para se recuperar nesse intervalo. A resiliência desse caso foi de sete dias, porém esse fato se repete em vários outros períodos e a resiliência é então a média desses dias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CONCENTRAÇÃO DE CISTERNAS

Com a ascensão do P1MC, o SAPB teve a implementação de 94.180 cisternas para fins de uso domiciliar (tanques de 16 m³) entre os períodos de 2004 a 2022 (MDS, 2023). De forma semelhante ao que ocorreu nos outros Estados, o maior número de cisternas implantadas no SAPB ocorreu entre 2004 e 2015 (cerca de 85%), com maiores números em 2006 (10.046) e em 2015 (10.349), como observado na Figura 20.

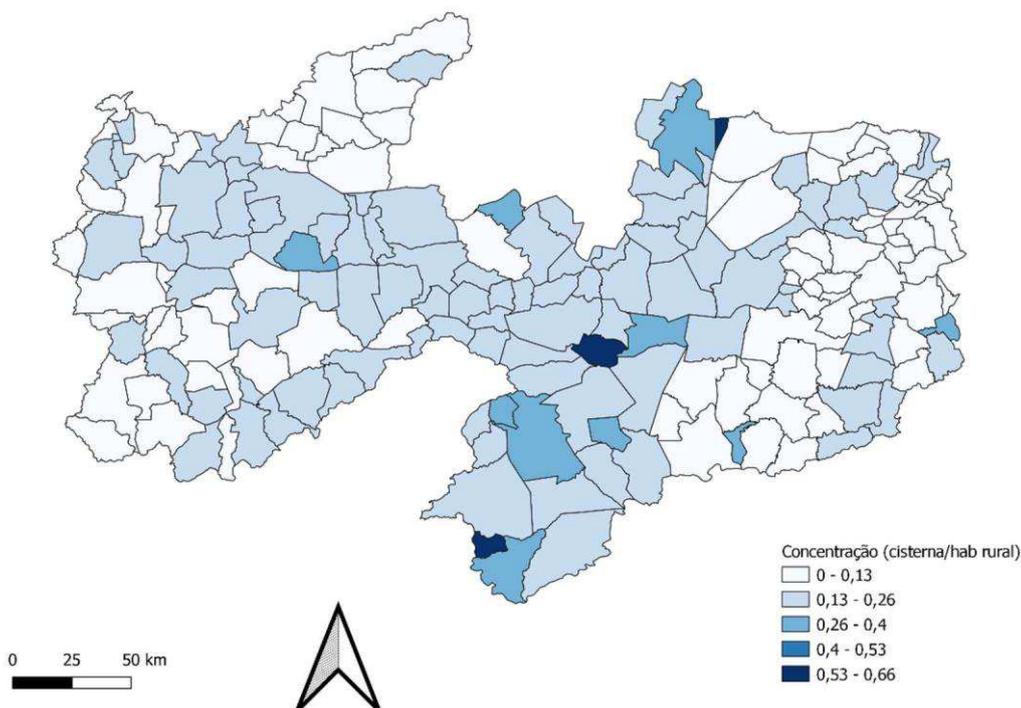
Figura 20 - Implantação de Cisternas por ano no estado da Paraíba



Fonte: MDS (2023)

No mais, vale salientar ainda que, devido ao tempo de construção, esses equipamentos podem ser acometidos de patologias, ocasionando até a interrupção do seu uso. Essas patologias podem estar relacionadas tanto a erros na construção (desabamentos) como também por utilização (fissuras e vazamentos). Alguns autores relatam casos de cisternas que sequer chegaram a ser utilizadas devido ao seu esvaziamento rápido e percolação da água pelas fissuras (Meira Filho, 2014; Mendes, 2018).

Entretanto, considerando que cada município tem populações rurais distintas, procurou-se observar a concentração de cisternas por habitante rural. Os dados utilizados para a população rural são os dados do censo de 2010 do IBGE. A Figura 21 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Figura 21 - Concentração de cisternas

Fonte: Autor (2024)

Fonseca et al. (2018) discutem acerca da prioridade de implantação de cisternas nos municípios do Semiárido Brasileiro. De acordo com os autores, o Ministério do Desenvolvimento Social e a Embrapa elencaram sete variáveis a serem analisadas, três delas do quadro natural (índice de aridez, registros de eventos de seca e o índice de unidades hidroestratigráficas) e quatro delas do quadro social (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, Índice de vulnerabilidade à desnutrição, Demanda qualificada por cisternas e a taxa de mortalidade infantil por doenças diarreicas). Ao pontuar uma variável de cada quadro, o índice de aridez pelo quadro natural e o IDHM pelo quadro social, têm-se os valores da Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis de Priorização

MUNICÍPIO	ÍNDICE DE ARIDEZ	FONTE	IDHM	FONTE
Zabelê	0,277	Lima et al. (2017)	0,623	IBGE (2010)
Guarabira	0,77	Silva e Nascimento (2020)	0,673	IBGE (2010)

Fonte: Autor (2024)

Ao se observar os valores extremos, os municípios com a maior e a menor concentração são Zabelê e Guarabira. Zabelê está inserida na Microrregião do Cariri Ocidental, possui uma área de 106,811 km² e uma população rural composta por 1926 habitantes (IBGE, 2022), enquanto Guarabira está localizada na microrregião de Guarabira, possui uma área de 162,387 km² e uma população rural composta por 6366 habitantes (IBGE, 2022). Ao compararmos as precipitações médias dos últimos 30 anos das duas cidades, Zabelê possui 669,50 mm/ano enquanto Guarabira possui 1113,07 mm/ano.

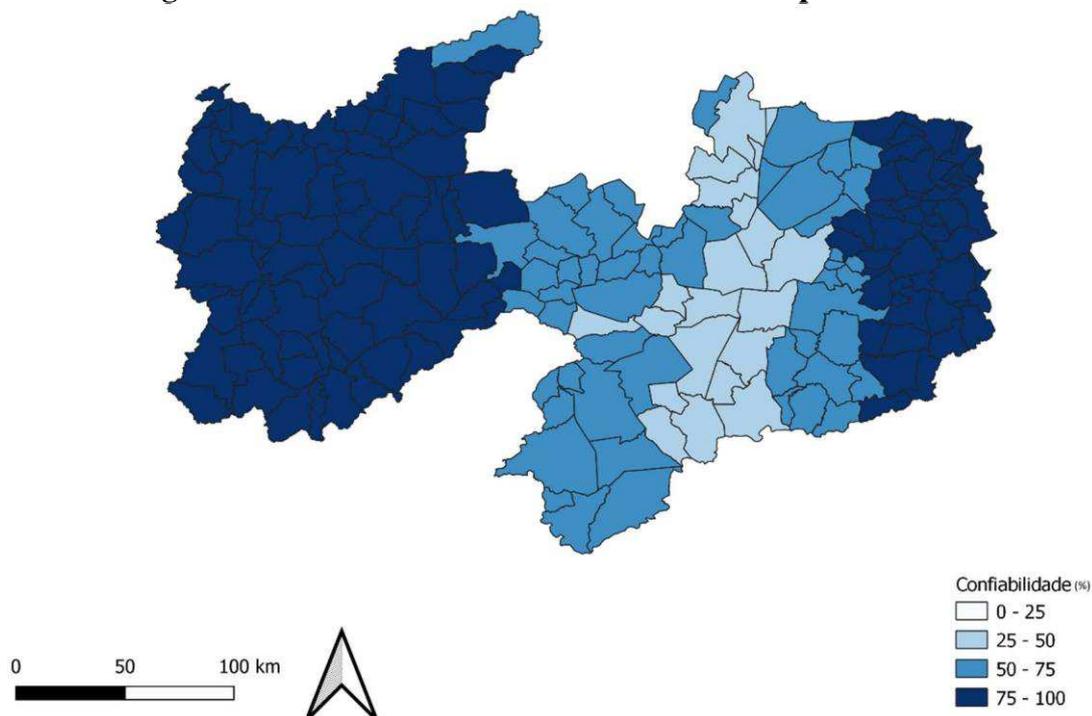
Nota-se que a prioridade indicada pelos órgãos foi respeitada ao observar-se esses parâmetros.

5.2. CONFIABILIDADE

5.2.1. Confiabilidade média

A confiabilidade foi avaliada para o telhado de 40 m², tendo como resultado para cada município os valores apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Valores de confiabilidade dos municípios do SAPB



Fonte: Autor (2024)

Dentre os municípios, Nova Palmeira apresentou o menor valor para a confiabilidade (29,31%), porém Gurjão foi o município que apresentou menor precipitação no levantamento dos dados (398,63 mm). Era de se esperar que fosse também o município com a menor confiabilidade calculada, já que a confiabilidade é proporcional à precipitação. Um fato a ser destacado trata-se da distribuição temporal da precipitação, em outras palavras, como a concentração da precipitação atua no município de modo que interfira no desempenho do equipamento.

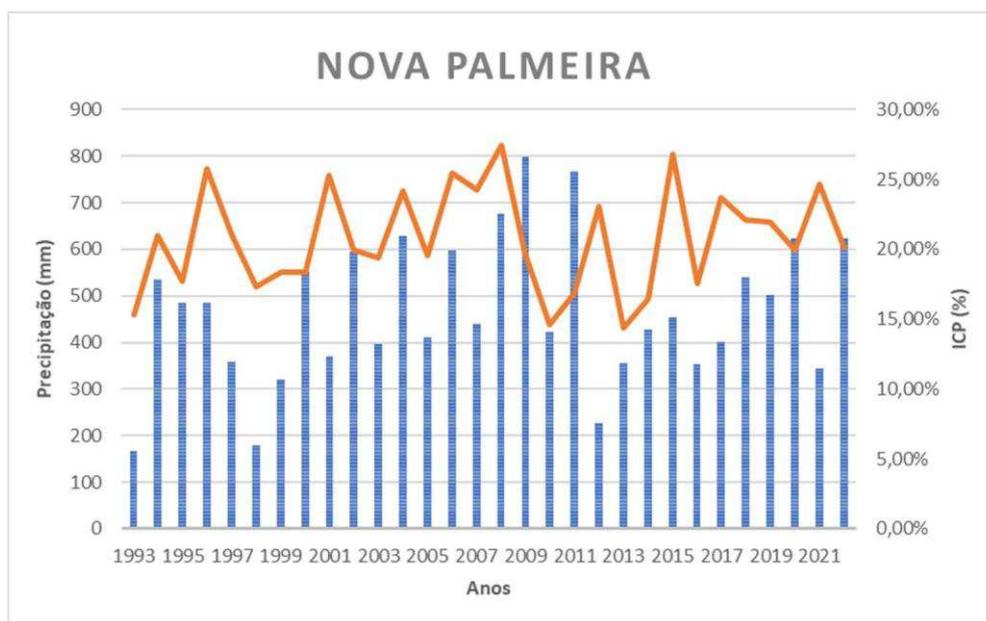
Um modo de analisar essa concentração, ou sazonalidade, se dá pelo índice de concentração de precipitação (ICP), proposto por Luis et al. (2011). O índice é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$ICP = \frac{\sum_{T=1}^{12} P_i^2}{(\sum_{I=1}^{12} P_i)^2}$$

Onde P_i é a precipitação mensal para cada ano.

Ao analisar a concentração da precipitação e a precipitação anual para o município de Nova Palmeira, tem-se como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Análise da Concentração de Precipitação do município de Nova Palmeira - PB



Fonte: Autor (2024)

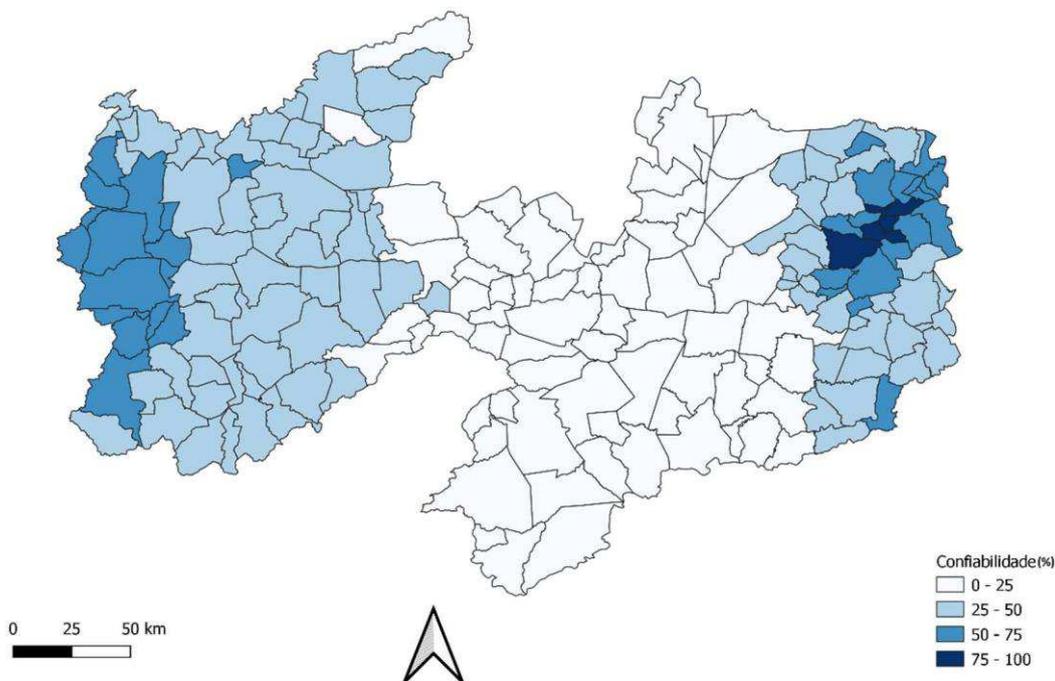
Luis et al. (2011) destacam que, para o ICP superior a 16%, o município apresenta sazonalidade na precipitação. No município estudado, a média do ICP é de 20,74%, indicando uma forte sazonalidade no dado, acarretando alteração e justificando o baixo índice de desempenho do sistema estudado. Ou seja, quanto à tomada de decisão da implantação e da determinação do volume da cisterna e à observação do desempenho das cisternas, a precipitação média deve ser avaliada, mas não por ela em si só, deve-se também observar a variabilidade da precipitação entre os anos.

Outro dado a elencar é que apenas 28 dos 194 municípios alcançaram uma confiabilidade acima de 90%, sendo Pilões o município a alcançar o maior valor para o índice estudado (99,24%). Todos os municípios que superam o valor dos noventa por cento possuem precipitação média anual superior a 800 mm.

5.2.2. Confiabilidade mínima

O ano de 1993 apresentou a menor confiabilidade entre os municípios estudados. Vale salientar, também, que se trata do ano com a menor precipitação para o período estudado, com precipitação média da região estudada inferior a 400 mm. A Figura 24 mostra a espacialização da confiabilidade para o ano mencionado.

Figura 24 - Valores de confiabilidade dos municípios do SAPB no ano de 1993

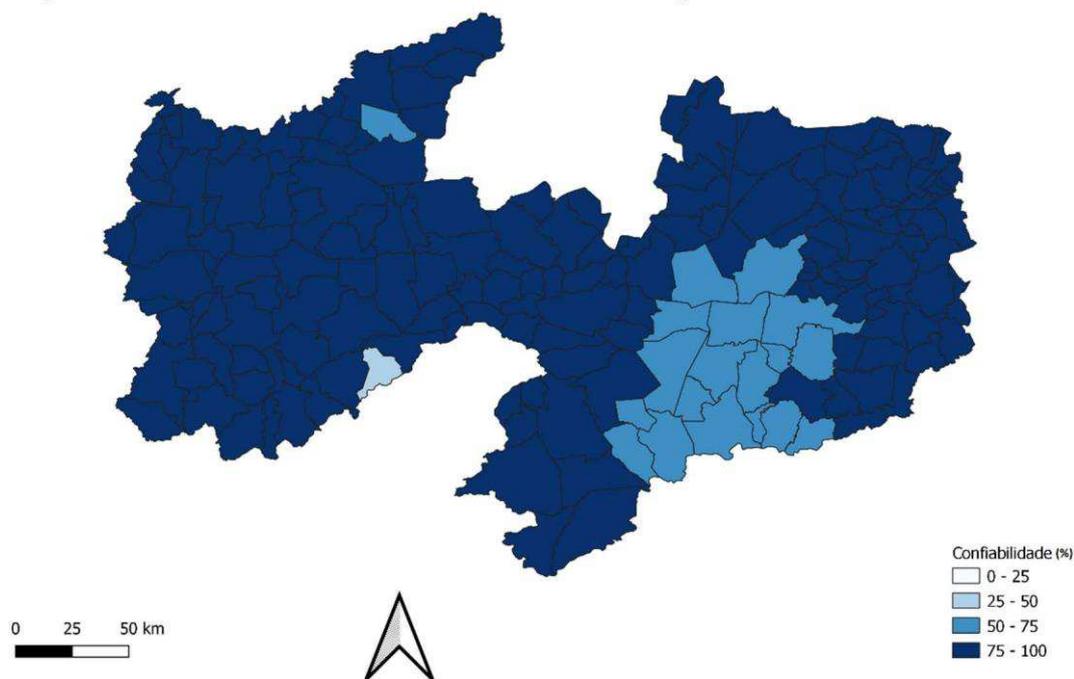


Mesmo sendo um ano seco e com precipitação abaixo da média, ainda assim a região do Brejo Paraibano consegue alcançar um índice superior a 50%, demonstrando assim uma região com bom desempenho dos equipamentos. O município com o maior valor do índice, Areia, atingiu o valor de 81%, porém o município de Gurjão só atingiu 7% de confiabilidade para o ano. Ou seja, para o ano de 1993, as cisternas pertencentes ao município de Gurjão só conseguiram atender às necessidades dos usuários em 26 dias.

5.2.3. Confiabilidade máxima

O ano de 2009 revelou-se como o ano com a maior confiabilidade média entre os municípios, em torno de 94%; trata-se, também, do ano mais chuvoso, com precipitação média superior a 1050 mm. A Figura 25 mostra a espacialização dos dados para o ano mencionado.

Figura 25 - Valores de confiabilidade dos municípios do SAPB no ano de 2009



Fonte: Autor (2024).

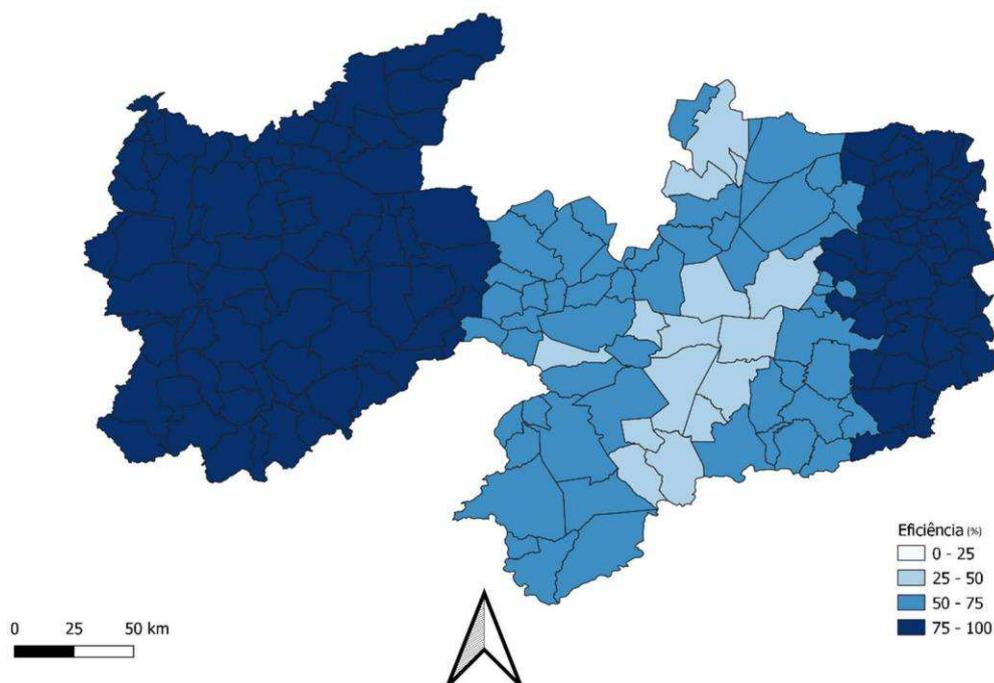
Com o ano chuvoso característico, nenhum município apresentou confiabilidade inferior a 50%, sendo o menor valor de 62% (Caraúbas) e em torno de 80% dos municípios atingiram mais de 90% de confiabilidade.

5.3. EFICIÊNCIA

5.3.1. Eficiência média

A eficiência média foi calculada para os municípios da região estudada e tem-se como resultado a Figura 26.

Figura 26 - Valores de eficiência dos municípios do SAPB



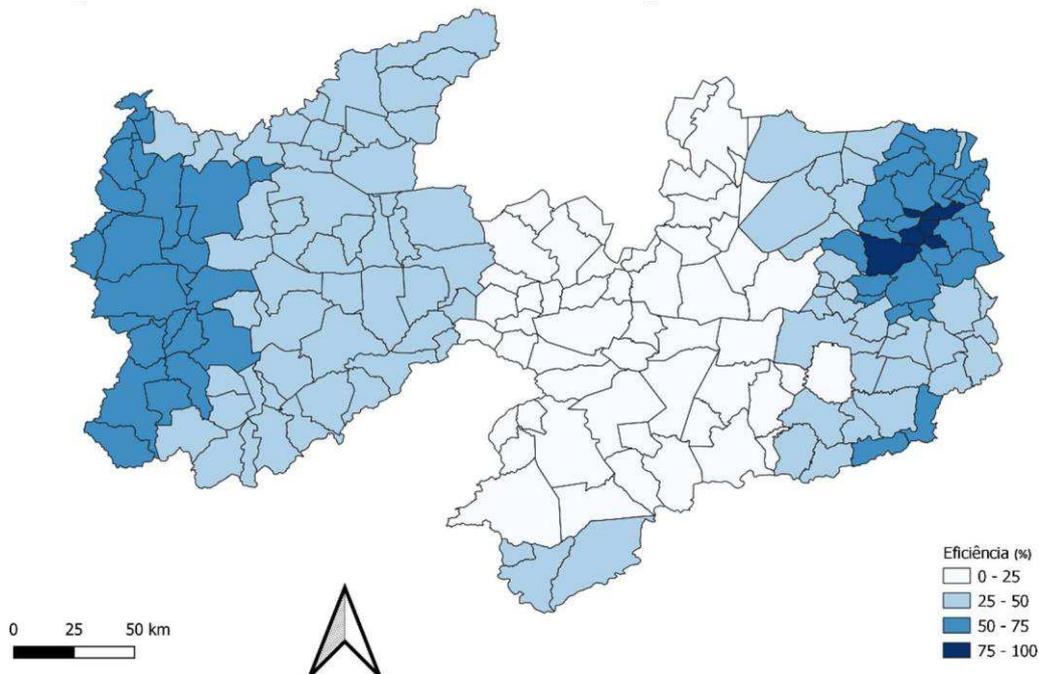
Fonte: Autor (2024).

De modo semelhante à confiabilidade, o município com o menor índice foi o município de Nova Palmeira (30,72%). Dos municípios estudados, apenas 32 apresentaram eficiência superior a 90% e em sua maioria são municípios pertencentes à região do brejo paraibano. Entretanto, diferentemente da confiabilidade, o município que apresentou o maior valor do índice estudado foi Areia (99,35%).

5.3.2. Eficiência mínima

De modo semelhante à confiabilidade, o ano de 1993 apresentou a menor eficiência média entre os municípios estudados, alcançando o valor de 40%, ou seja, para esse ano, em média, menos da metade da demanda necessária foi atendida aos usuários. O resumo dos dados especializados segue na Figura 27.

Figura 27 - Valores de eficiência dos municípios do SAPB no ano de 1993



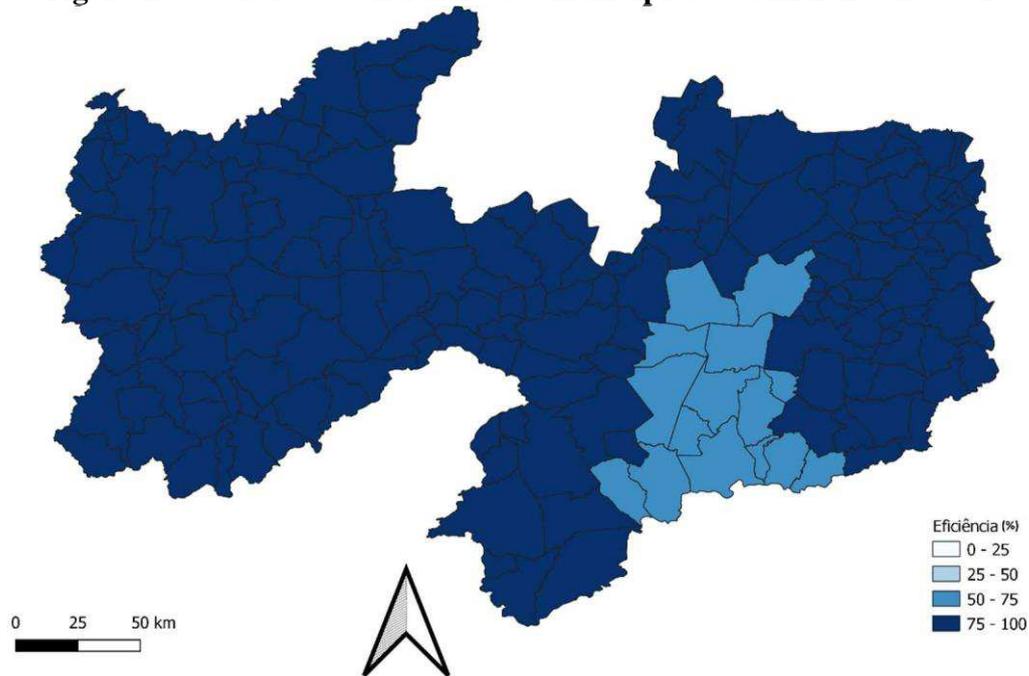
Fonte: Autor (2024).

O município de Areia apresentou a maior eficiência para esse ano (82%) e Gurjão apresentou o menor valor para o índice estudado (12%). Todavia, esses não foram os municípios com as precipitações extremas (menores e maiores). De modo semelhante à confiabilidade, a sazonalidade da precipitação influencia no valor do índice.

5.3.3. Eficiência máxima

Semelhante ao índice anterior, o ano de 2009 apresentou o maior valor médio entre os municípios estudados (95%), sendo Caraúbas o município com o menor valor (65%) e para esse ano em torno de 81% dos municípios alcançaram o valor de 90% no índice. A Figura 28 espacializa o resumo dos resultados.

Figura 28 - Valores de eficiência dos municípios do SAPB no ano de 2009

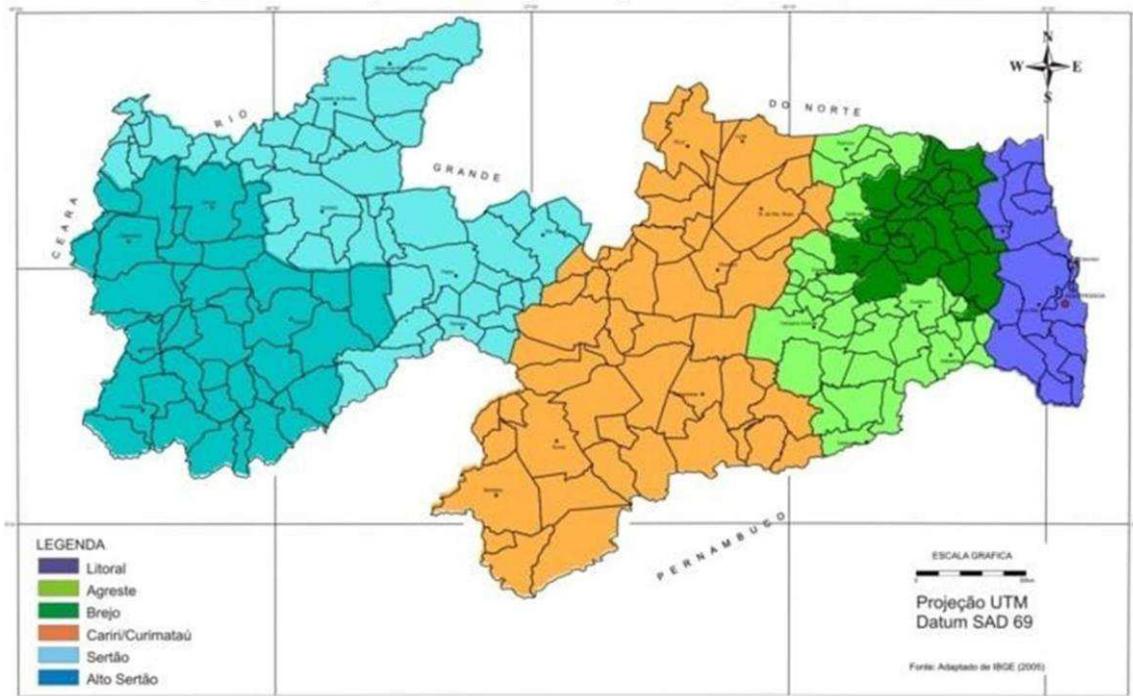


Fonte: Autor (2024).

5.4. RESILIÊNCIA

5.4.1 Resiliência média

Para observar minuciosamente o comportamento quanto ao índice da resiliência, selecionaram-se cinco municípios, cada um referente a uma região homogênea pluviométrica. Estudada por Braga e Silva (1990), a Paraíba possui seis regiões homogêneas, distribuídas conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Regiões homogêneas pluviométricas da Paraíba

Fonte: Braga e Silva (1990).

Como a região do litoral não compõe o semiárido paraibano, essa área não foi levada em conta. Portanto, para a região do Brejo temos a cidade de Alagoa Grande, para o Agreste a cidade de Campina Grande, para o Cariri/Curimataú a cidade de Sumé, para o Sertão a cidade de Patos e para o Alto Sertão a cidade de Cajazeiras. Para cada município, calculou-se a resiliência (Tabela 2).

Tabela 2 - Resiliência dos municípios

Município	Região	Resiliência média (dias)	Precipitação (mm)
Alagoa Grande	Brejo	8	1039,63
Campina Grande	Agreste	12	563,51
Sumé	Cariri/Curimataú	17	552,10
Patos	Sertão	21	720,60
Cajazeiras	Alto Sertão	16	893,03

Fonte: Autor (2024)

Não é possível observar correlação entre a precipitação e a resiliência para os municípios com um maior valor do índice. Entretanto, para o município da região mais chuvosa, observa-se uma recuperação mais rápida do equipamento após a falha. Porém, um fato a ser observado é que, diferentemente de um reservatório como um açude ou uma barragem (onde a demanda a ser atendida é consideravelmente maior), a cisterna se recompõe muito rápido de uma falha. Para atingir a demanda necessária neste estudo (0,075 m³), basta que ocorra um evento de precipitação de apenas 2,5 mm/dia, ou seja, uma precipitação muito baixa, mas que representa o atendimento para que nesse dia seja considerado satisfatório.

5.4.2. Resiliência das cisternas do P1MC

Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982) conceituam que a resiliência é a capacidade do equipamento para se recuperar de uma falha. Ao triar os dados das cisternas, é possível observar em alguns casos uma recuperação rápida, entretanto, inconstante, ou seja, em um dia ocorre a recuperação, mas logo em seguida tem-se uma sequência de falhas novamente. O fato pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 - Simulação município Campina Grande - PB

19/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
20/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
21/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
22/04/1993	0	0,08	0,0024	0,0024	0,075	0,0024	0	0,073
23/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
24/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
25/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
26/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
27/04/1993	0	3,178	0,09534	0,09534	0,075	0,075	0,02034	0,000
28/04/1993	0,02034	0	0	0,02034	0,075	0,02034	0	0,055
29/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
30/04/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
01/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
02/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
03/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
04/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
05/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
06/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
07/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
08/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
09/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
10/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
11/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
12/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
13/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
14/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
15/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
16/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
17/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
18/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
19/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
20/05/1993	0	0	0	0	0,075	0	0	0,075
21/05/1993	0	1,331	0,03993	0,03993	0,075	0,03993	0	0,035

Fonte: Autor (2024)

Para o dia 28/04/1993, no município de Campina Grande, ocorreu uma recuperação após 10 dias de falhas, entretanto essa recuperação não se mantém, ocorrendo outra sequência de 22 dias de falhas. O que se discute neste trabalho é que, para a cisterna, a condição de recuperação de falha sendo um dia com atendimento à demanda não representa de fato uma recuperação, mesmo que esse dia seja de suma importância para os usuários no atendimento às suas necessidades. De modo semelhante, ocorre para alguns dias que gera uma falha pontual, mas a recuperação se mantém e se perpetua durante um longo período, mantendo-se sem falhas e garantindo o atendimento aos usuários. Para esse estudo, propõe-se uma nova avaliação do índice.

Na perspectiva de avaliar um novo cenário, considerou-se que o estado satisfatório do sistema não seria obter apenas um valor superior a zero no volume armazenado. Considerou-se a utilização de um volume mínimo, nesse caso o de 10% da capacidade da cisterna (1,6 m³), o suficiente para que, caso não ocorra a recarga, tenha-se o atendimento por 21 dias ininterruptos.

Portanto, os valores da resiliência para as cisternas do P1MC recalculados estão apresentados na Tabela 3. Propõe-se, nesta dissertação, este conceito modificado de resiliência como mais realista para o caso das cisternas.

Tabela 3 - Resiliência Recalculada

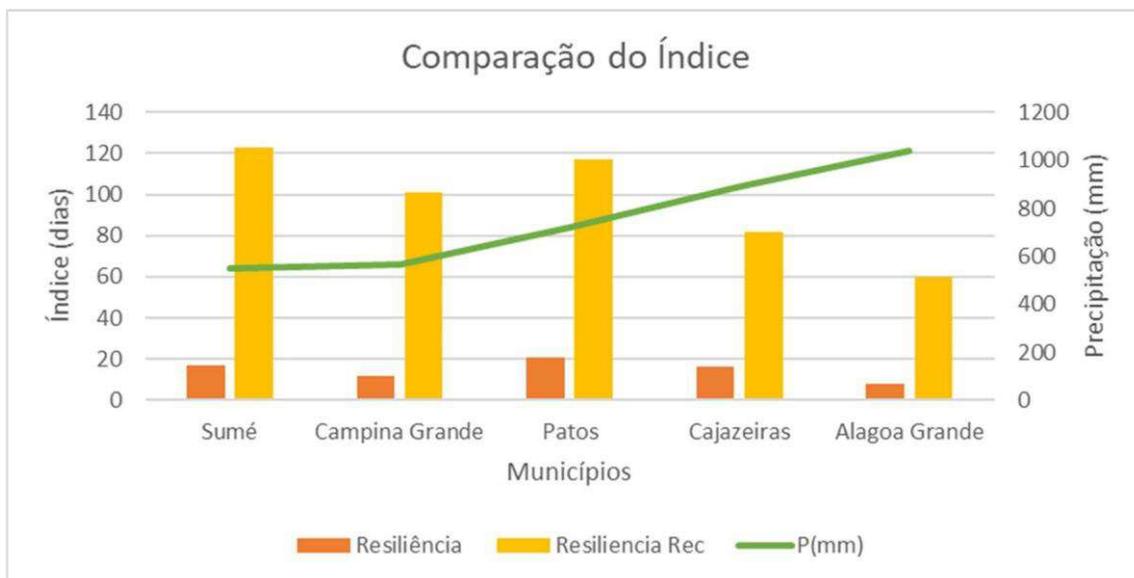
Município	Região	Resiliência (dias)
Alagoa Grande	Brejo	60
Campina Grande	Agreste	101
Sumé	Cariri/Curimataú	123
Patos	Sertão	117
Cajazeiras	Alto Sertão	82

Fonte: Autor (2024)

Ao reanalisar o índice, é possível observar um aumento significativo entre o tempo de recuperação dos equipamentos. O município de Sumé apresenta o maior valor

em dias (123 dias) como também apresenta o maior índice comparado aos demais. Com a nova avaliação da resiliência, é possível observar um crescimento inversamente proporcional à precipitação, ou seja, quanto maior o volume precipitado, menor o tempo de recuperação do equipamento. O resumo dos dados pode ser observado no gráfico da Figura 31.

Figura 31 - Comparação de valores de Resiliência



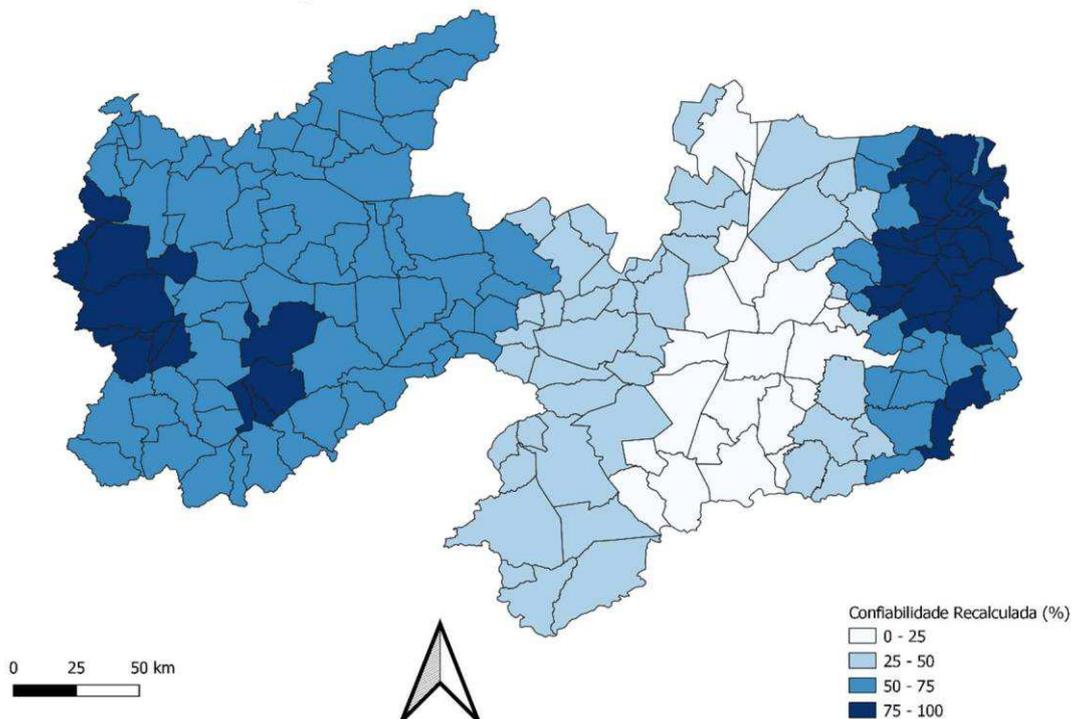
Fonte: Autor (2024)

Todavia, é importante relatar e observar o período de recuperação de cada equipamento e os usos de cada família. Em alguns casos, pode-se fazer necessário o uso de carros pipas nesse período para manter o atendimento das famílias e acesso à água.

5.4.3. Recálculo da Confiabilidade

Ao reconsiderarmos um volume mínimo para a recuperação da cisterna, devemos reconsiderar também o seu estado satisfatório. Inicialmente, o estado satisfatório foi considerado no dia em que o volume armazenado seja superior a zero, agora será considerado quando o volume armazenado for superior a $1,6\text{m}^3$. Realizaram-se as simulações para os municípios com esse novo parâmetro, o resumo dos dados especializados encontra-se na Figura 32 abaixo:

Figura 32 - Confiabilidade recalculada

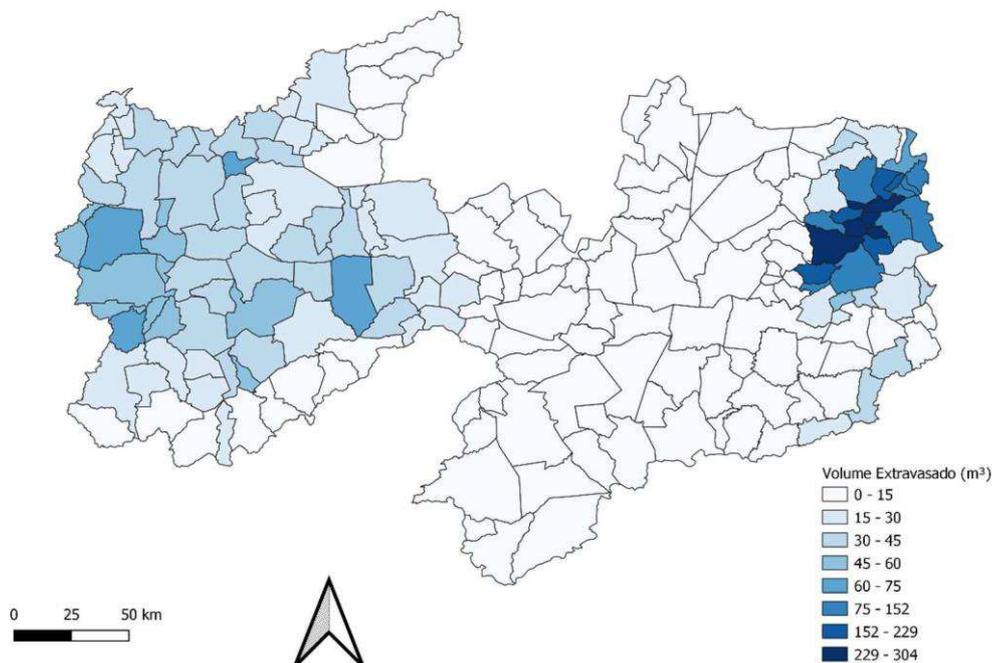


Observa-se com os novos resultados uma redução de faixa, ou seja, exceto a região do brejo e alguns municípios do alto sertão caem da faixa de valores (antes pertencentes à variação de 75-100, agora pertencem a 50-75). Portanto, alterar o volume mínimo para a recuperação influencia também na análise de outros indicadores, o que desperta o olhar para o desempenho dos equipamentos em outras perspectivas.

Utilizar um volume mínimo a permanecer no equipamento garante uma reserva para casos de baixa precipitação, ou seja, uma garantia para uma recarga artificial do equipamento para que os usuários não tenham seu acesso à água findado.

5.5. EXTRAVASAMENTOS

De modo semelhante aos índices estudados anteriormente, o extravasamento foi calculado, sendo somado o seu volume total para o período estudado (Figura 33).

Figura 33 - Volume extravasado

Fonte: Autor (2024).

Diferentemente da confiabilidade, os municípios que apresentavam maiores valores de precipitação (superiores a 750 mm) foram os que acarretaram um maior valor, sendo Pilõezinhos o município com maior valor calculado para ambos os cenários. Vale destacar também que esse município possui a maior média anual de volume precipitado, demonstrando, nesse caso, não ocorrer tamanha influência da sazonalidade.

Entretanto, devido ao estabelecimento do volume único de cisternas para o PIMC, essa quantidade de água acaba sendo, em muitos dos casos, perdida por não ocorrer ambiente para estocagem. A média do volume extravasado para os municípios estudados, utilizando a área de captação com os 40 m², alcança o valor em torno de 35 m³. Os números evidenciam a grande potencialidade para o incremento de um tanque em paralelo, ou o dimensionamento de volumes do tanque, avaliando a potencialidade da região a ser implantada.

5.6. DISCUSSÃO DOS ÍNDICES

Ao se analisar os índices de confiabilidade e eficiência, é possível observar que seus valores se comportam de forma semelhante nas regiões homogêneas de precipitação, ou seja, ainda que possua a influência da sazonalidade, os municípios das regiões se comportam de forma semelhante. Francisco et al. (2015) ressaltam que cada região

apresenta médias pluviométricas e quadrimestres chuvosos distintos, condizentes com a realidade climática de cada região.

Vale ressaltar, também, que mesmo possuindo concepções distintas, os índices de confiabilidade e eficiência apresentaram valores muito próximos. Esse fato ocorre pela baixa demanda necessária para atingir o estado satisfatório (alcançar a confiabilidade 100%), como também para atingir a demanda necessária (alcançar a eficiência 100%). Como comentado anteriormente, com apenas 2,5 mm/dia é possível atender tanto a confiabilidade quanto a eficiência, ou seja, ao se considerar uma precipitação diária correspondente a esse valor, seria necessária uma precipitação de aproximadamente 913 mm/ano, que consegue ser alcançada em quase 60% dos municípios da região estudada. Entretanto, essa consideração seria para um sistema tipo sem perdas, onde toda a chuva fosse distribuída regularmente na região, o que, visto em comentários anteriores, não ocorre. Pacheco e Alves (2021) observaram, também, que ao analisar métodos de estimativa de dimensionamento de cisternas para as cisternas com volume de 15 m³, os valores de eficiência e confiabilidade foram muito próximos.

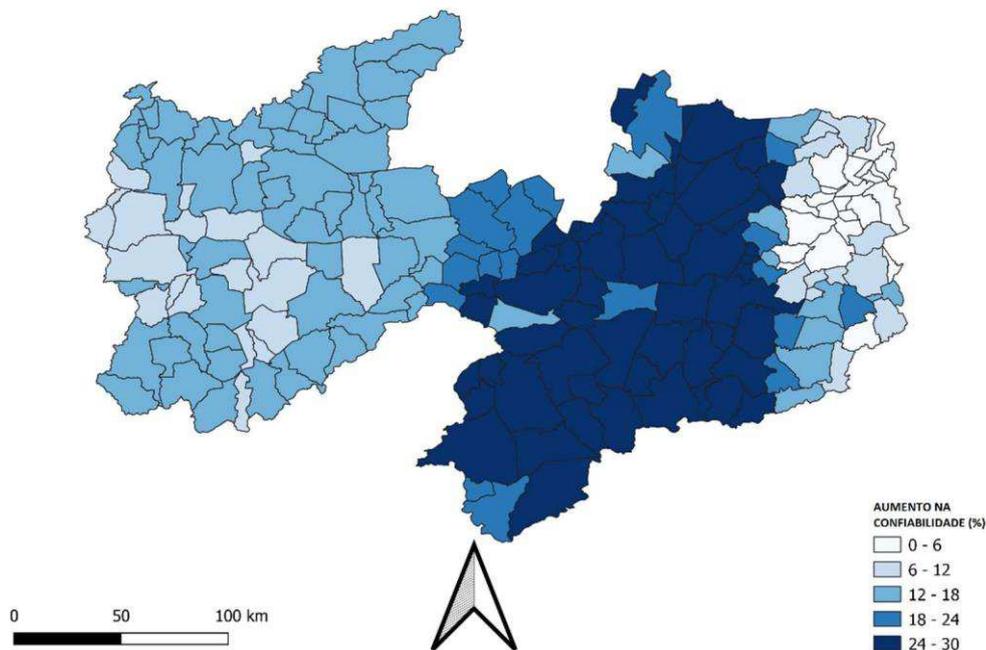
Quanto ao extravasamento, é possível observar sua ocorrência mais expressiva nos municípios da região do Brejo, conseqüentemente são os municípios com os maiores índices pluviométricos da região. Porém, com o volume único das cisternas, esse volume acaba sendo desperdiçado, que poderia corroborar tanto para outras atividades além da demanda do consumo como também para elevar os índices de desempenho do equipamento.

5.7. ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO PARA O PROGRAMA CISTERNAS

Em meados de julho de 2023, o Governo Federal Brasileiro anunciou recursos para a reativação do Programa Cisternas (nomenclatura atualizada para o antigo P1MC), serão mais de 50 mil cisternas a serem construídas na região semiárida do Brasil. Um questionamento a ser levantado após este estudo se dá pela avaliação de incrementos de área de telhados nas residências. Essa ampliação não só para área de captação, mas como também para outros ambientes da residência, incrementos e benfeitorias ou até ambientes de estocagem para a produção, resultaria em um incremento significativo no desempenho dos equipamentos. Cohim (2013) analisou o comportamento das 947 cisternas fornecidas pelo P1MC no município de Araci-BA e pôde observar que o telhado das residências variava entre 40 m² e 120 m². Para tanto, ao utilizar, para efeito de comparação aparente,

definiu-se utilizar a área de 40 m² e 60 m² para analisar o incremento de área nos imóveis a fim de ampliar os valores dos índices de desempenho. Os valores da variação da confiabilidade estão mostrados na Figura 34.

Figura 34 - Valores de confiabilidade após o aumento da área de captação



Fonte: Autor (2024)

Pode-se observar que os municípios mais sensíveis a essa adição de área de captação foram principalmente os municípios da região do Cariri/Curimataú, com detalhe para o município de Alcantil, que resultou em um incremento de quase 30% na confiabilidade, evoluindo de 59,73% (40 m³) para 89% (60 m²), o que resultaria em quase nove anos de atendimento satisfatório para o período estudado. Em média, para a região estudada, atingiria um acréscimo de 16,11% na confiabilidade, acarretando cinco anos em estado satisfatório do equipamento. Para a região do Brejo não se observa um incremento superior a 6%, entretanto essa região já apresenta um alto valor da confiabilidade devido ao seu regime pluviométrico. Ou seja, para os municípios da região mais sensível ao incremento de área de captação, deve-se observar a área de captação da residência e avaliar o incremento de área para adicionar autonomia aos usuários.

6. CONCLUSÕES

Corriqueiramente, é comum se analisar o desempenho de equipamentos utilizando com base em estudos anteriores ou experiências bem sucedidas, porém, ao avaliar o desempenho das cisternas utilizando indicadores de desempenho consolidados na literatura, foi possível observar suas particularidades. Mesmo sendo um reservatório de tamanho inferior (em comparação a açudes e barragens), o atendimento aos usuários permanece como o principal objetivo da sua utilização, sendo assim necessário um dimensionamento adequado com a realidade da localidade e dos usuários da cisterna. Ao analisar os valores dos indicadores da região é possível observar um desempenho significativo nas regiões com maiores índices pluviométricos (Brejo, Alto Sertão e parte do Sertão), na região do Cariri/Curimataú o incentivo a incrementos de área de telhado produz um aumento considerável na confiabilidade do equipamento. Quanto aos extravasamentos, na região do Brejo é suscetível ao aumento da capacidade de armazenamento. Observar os indicadores e interpretá-los analisando a luz da vivência dos usuários torna o equipamento adaptável à convivência de cenários extremos (seco e chuvoso).

Mesmo tendo a característica de uma região seca, o SAPB é uma região apta fortemente a explorar essa fonte de abastecimento não só para a zona rural. Com a continuidade do programa Cisternas, é importante observar as decisões a serem tomadas na implantação das novas cisternas, a ampliação de telhados ou alteração da capacidade da cisterna podem produzir aumentos significativos no atendimento das famílias. Essas decisões devem ser tomadas principalmente ao avaliar a localização da implantação e o regime pluviométrico da região.

Por fim, futuras pesquisas devem ser realizadas, ampliando a área de estudo e testando outras variáveis, a fim de corroborar para o desempenho do Programa Cisternas e conseqüentemente ao sucesso no atendimento e proporcionar qualidade de vida para as famílias da zona rural.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Hermes Alves de; GOMES, Maria V. de A. POTENCIAL PARA A CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CHUVA: ALTERNATIVA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NAS ESCOLAS PÚBLICAS DE CUITÉ, PB. **XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Guarapari - ES, 18 jul. 2011.

ANDRADE, Darly Fernando. **Meio Ambiente em Foco**. In: LESSA, Alvaro Magalhães; LEMOS, Emanuelle dos Santos; MASCARENHAS, Paulo S. M. Estimativa de captação da água de chuva do telhado do campus da faculdade Santo Agostinho em Vitória da Conquista – BA. 1. ed. Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2019. v. 8, cap. 7.

ANDRADE, Leonardo Rosa; MAIA, Adelena Gonçalves; LUCIO, Paulo Sérgio (2016). “Interferência do regime pluvial na eficiência dos sistemas de aproveitamento de água de chuva”. In: **XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, 13. ABRH. Sergipe, 2016. pp. 1-7.

ANDRADE, T. S.; NÓBREGA, R. L. B.; RIBEIRO NETO, A.; GALVÃO, C. O. Estratégias de adaptação e gestão do risco: o caso das cisternas no Semiárido brasileiro. **ClimaCom Cultura Científica**, v. 2, p. 4, 2015.

ASA, “Articulação do semiárido”. Ações – Programa um milhão de cisternas”. Disponível em <<http://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc>>. Acesso em: 18 ago. 2023.

ASA. **Programa Um Milhão de Cisternas**. 11 abr. 2015. Folder. Disponível em: https://issuu.com/articulacaosemiario/docs/folder_p1mc?utm_medium=referral&utm_source=www.asabrasil.org.br. Acesso em: 7 fev. 2024.

ASA. **Programa Uma Terra e Duas Águas**. 11 abr. 2015. Folder. Disponível em: https://issuu.com/articulacaosemiario/docs/folder_p1_2_editado2?utm_medium=referral&utm_source=www.asabrasil.org.br. Acesso em: 7 fev. 2024.

BRAGA, C.C.; SILVA, B.B. da. Determinação de regiões pluviométricamente homogêneas no Estado da Paraíba. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 6, Salvador. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Anais, 1:200-205, 1990.

BRASIL. Lei. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS**, Brasília - DF, 8 jan. 1997.

BRASIL. **Resolução nº 107, de 27 de julho de 2017**. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Recife, 27 jul. 2017.

BRASIL. **Decreto nº 9606, de 10 de dezembro de 2018**. Regulamenta o Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e Outras Tecnologias Sociais de Acesso à Água - Programa Cisternas. Brasília - DF, 10 dez. 2018.

BURITI, C. O.; BARBOSA, H. A. **Um século de secas: Por que as políticas hídricas não transformam o Semiárido Brasileiro**. 1. ed. BRASIL: Chiado Books, 2018. 432 p.

CEDAE, **Captação de Água de Chuva**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://cedae.com.br/captacaoaguachuva>. Acesso em: 13 mar. 2024.

CIRILO, José Almir *et al.* **O Uso Sustentável dos Recursos Hídricos em Regiões Semi-Áridas**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2007. 508 p.

COHIM, E. O volume único das cisternas rurais é adequado?. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves - RS, p. 1-8, 2013.

COHIM, Eduardo Henrique Borges; ORRICO, Sílvio Roberto Magalhães. A CONFIABILIDADE DO VOLUME DAS CISTERNAS DA ZONA RURAL PARA RESERVAR ÁGUA DE CHUVA. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Bahia, v. 3, ed. 2, p. 91-99, 2015.

CRUZ, Mariliza Medeiros da; BEZERRA, Andreza Fernandes; MAIA, Adelena Gonçalves. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE CISTERNAS NAS ZONAS PLUVIAIS HOMOGÊNEAS DO RIO GRANDE DO NORTE. **XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Florianópolis - SC, 2017.

EMBRAPA. **Cisterna pode ser solução em período de escassez hídrica**. [S. l.], 6 out. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/65351041/cisterna-pode-ser-solucao-em-periodo-de-escassez-hidrica>. Acesso em: 3 fev. 2024.

ENNENBACH, M. W.; LARRAURI, P. C.; LALL, U. County-Scale Rainwater Harvesting Feasibility in the United States: Climate, Collection Area, Density, and Reuse Considerations. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**. p. 1-20, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12607>.

FEWKES, A. Modelling the performance of Rainwater collection systems: towards a generalised approach. **Urban Water**, v.1, p.323-333, 1999.

FONSECA, Marcelo Fernando *et al.* Identificação de municípios prioritários para implantação de cisternas e outras tecnologias de acesso à água no Semiárido. **Embrapa Territorial**, Campinas, p. 36, 1 set. 2018.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Sci Data** 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GOMES, U.A.F.; HELLER, L.; PENA, J.L. (2012) A national program for large scale rainwater harvesting: an individual or public responsibility? **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2703-2714.

GOMES, Uende A.; HELLER, Leo. Acesso à água proporcionado pelo Programa de Formação e Mobilização Social para Convivência com o Semiárido: Um Milhão de

Cisternas Rurais: combate à seca ou ruptura da vulnerabilidade?. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, ed. 3, p. 623-633, jul/set 2016.

GUIA DA ENGENHARIA. **Águas pluviais**: dimensionamento de calhas. [S. l.], 25 mar. 2019. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/aguas-pluviais/>. Acesso em: 1 fev. 2024.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n.1, p. 14–20, 1982.

IBGE. **Censo 2010**. Brasília - DF, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 ago. 2023.

IBGE. **Cidades**. Brasília - DF, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 11 out. 2023.

JESUS, Thiago Barbosa de; ALBUQUERQUE, Tatiana Máximo Almeida. CAPTAÇÃO E APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS NO SENAC EM ARACAJU-SE. **XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, Aracaju-SE, 8 nov. 2016.

LIMA, Kaique M. A. de; ROCHA, Layane C. A.; ALENCAR, Maria L. S. de. CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE ARIDEZ DO CARIRI OCIDENTAL-PB. **III Workshop Internacional sobre Água no Semiárido Brasileiro**, Campina Grande-PB, 2017.

LOURENÇO, Dauany K. *et al.* AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES CONSTRUTIVAS E DA QUALIDADE DE ÁGUA DO PROGRAMA UM MILHÃO DE CISTERNAS NA COMUNIDADE RURAL DE POÇOS EM CAJAZEIRAS-PB. **Revista Interdisciplinar em Saúde**, Cajazeiras, v. 3, ed. 6, p. 45-66, jul/set 2019.

MARINHO, J. de O. .; CAMPOS, J. O. .; LIMA, V. R. P. de . A IMPORTÂNCIA DAS CISTERNAS DE PLACAS NA ZONA RURAL DE SERRA REDONDA - PB: UMA ANÁLISE DA COMUNIDADE TORRE. **Revista Geotemas**, Pau dos Ferros, v. 9, n. 1, p. 07–27, 2019. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/GEOTemas/article/view/907>. Acesso em: 17 mar. 2024.

MIC. **Cisternas familiares de água para consumo (1ª água) entregues pelo MDS (Acumulado)**. Brasília - DF, 2023. Disponível em: <https://aplicacoes.cidadania.gov.br/vis/data3/data-explorer.php>. Acesso em: 13 jul. 2023.

MENDES, M. A. M. **Avaliação ex post de implantação de sistemas rurais de aproveitamento de água de chuva**: o caso da comunidade do Mocambo, Patos, Paraíba. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

MEIRA FILHO, A. S. **Alternativas de telhados de habitações rurais para captação de água de chuva no semi-árido**. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2004.

MEIRA FILHO, A. S. **Patologias de sistemas de captação de água de chuva em edificações rurais do semiárido**. Tese (Doutor em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

MOURA, Maria do Socorro Barbosa de; MARQUES, Maysa Porto Farias; ALMEIDA, Hermes Alves de. Potencial de captação de água de chuvas para as localidades mais secas da Paraíba: Alternativa das cisternas calçadão. **Revista Caderno Pedagógico**, [s. l.], v. 21, ed. 3, p. 1-16, 2024.

ONU. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasília - DF, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 7 fev. 2024.

PACHECO, G. C. R.; ALVES, C. M. A. Impactos dos critérios de dimensionamento de reservatórios no comportamento dos sistemas de aproveitamento de água pluvial. **XIV Simpósio Nacional de Sistemas Prediais**, Catalão (GO), 2021.

PLATAFORMA SABIÁ. **Cisterna de 16 mil litros**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://plataformasabia.com/t/cisterna-de-16-mil-litros>. Acesso em: 2 fev. 2024.

RISSO, S. S. O. *et al.* Indicadores de desempenho estatísticos para reservatórios: Uma revisão de literatura. *In*: OLIVEIRA, R. J. (Org.) **Recursos hídricos: gestão, planejamento e técnicas em pesquisa**. Guarujá: Editoria Científica Digital, 2021. cap. 08, p. 113-139. ISBN 978-65-89826-78-1.

ROCHA, Marília S. D. *et al.* IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM CISTERNAS RURAIS DO NORDESTE BRASILEIRO. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Brasília, v. 9, ed. 3, p. 5-15, 2022.

SANTOS, Thiago Araujo. **Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA): A convivência com o semiárido e a construção de um regionalismo de assistência**. 2016. 232 f. Tese (Doutor em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SANTOS, Valterlin da Silva; ABRANTES, Antonione Pontes. Avaliação do modelo de cisterna adotado pelo programa um milhão de cisternas no município de Sousa-PB. **Revista DAE**, São Paulo, v. 71, ed. 242, p. 217-230, 2023.

SILVA, J.R.I. *et al.* Aplicação do método de Budyko para modelagem do balanço hídrico no semiárido brasileiro. **Scientia Plena**, v. 13, ed. 10, p. 1-10, 2017.

SILVA, Paulo Luan Ferreira da; NASCIMENTO, Robson de Sousa. BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO E ÍNDICE DE ARIDEZ PARA MUNICÍPIOS DA MICRORREGIÃO DE GUARABIRA, PARAÍBA. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã - SP, v. 14, ed. 2, p. 135-150, 2020.

SILVA, Maycon Breno Macena da; GALVÃO, Carlos de Oliveira; RIBEIRO, Marcia Maria Rios. Impacto da variabilidade climática intra e interanual no aproveitamento de água de chuva: Um estudo de Caso. **Revista Paranoa**, Brasília, v. 16, ed. 34, p. 1-15, 2023.

SOUZA, Tayron Juliano. Potencial de Aproveitamento de Água de Chuva no Meio Urbano: O caso de Campina Grande - PB. Orientador: Carlos de Oliveira Galvão. 2015.

70 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2015.

SOUZA, Amanda Marcelle Pinto de *et al.* Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso da água da chuva em edifício público na zona urbana de Recife – PE. **Paranoa**, [s. l.], v. 16, ed. 34, p. 1-19, 2023.

SUDENE. Superintendência Regional do Nordeste. Brasília - DF, 10 ago. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br>. Acesso em: 18 maio 2023.

TRANSFORMA. **Dispositivo Automático Para Proteção Da Qualidade Da Água De Chuva Das Cisternas**. Recife, 2013. Disponível em: <https://transforma.fbb.org.br/tecnologia-social/dispositivo-automatico-para-protecao-da-qualidade-da-agua-de-chuva-das-cisternas>. Acesso em: 2 fev. 2024.

WATERFALL, P.H. Harvesting Rainwater of Lanscape Use. **University of Arizona Cooperative**. Disponível em: <http://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1344.pdf>. Acesso em: 25 de fev. 2024.