

**SUSTENTABILIDADE HIDROLÓGICA E DIMENSIONAMENTO DE
CISTERNAS: IMPACTO NA SEGURANÇA SANITÁRIA - SEMIÁRIDO DO
EESTADO DE PERNAMBUCO**

**HYDROLOGICAL SUSTAINABILITY AND CISTERN SIZING: IMPACT ON
SANITARY SECURITY - SEMIARID REGION OF THE STATE OF
PERNAMBUCO**

**SUSTENTABILIDAD HIDROLÓGICA Y DIMENSIONAMIENTO DE
CISTERNAS: IMPACTO EN LA SEGURIDAD SANITARIA - SEMIÁRIDO DEL
ESTADO DE PERNAMBUCO**



10.56238/revgeov17n4-032

Margarida Regueira da Costa

Doutora em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Orcid: 0009-0009-6727-0797

Helena Regueira

Orcid: 0009-0003-9669-2258

Roberta de Melo Guedes Alcoforado

Doutora em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Orcid: 0009-0009-7520-4319

Alexandre Luiz Souza Borba

Mestre em Geociências
Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Orcid: 0009-0002-4776-7447

Alberto Antônio da Silva

Doutor
Instituição: Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)
Orcid: 0000-0002-4733-9226

Arquimedes Parente Paiva Mororó

Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
Instituição: Universidade Federal de Rondonópolis (UFR)
Orcid: 0009-0008-2252-6800

Keven Costner Pereira Sobral

Orcid: 0009-0006-2970-8442



Murilo Gonçalves da Silva Júnior

Orcid: 0009-0005-1636-9595

Fernanda Soares de Miranda Torres

Mestre em Geociências

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Orcid: 0009-0005-6142-4709

RESUMO

O problema da escassez hídrica é um limitador global ao desenvolvimento, sendo particularmente acentuado no semiárido do Nordeste brasileiro, que apresenta baixa precipitação anual (entre 400mm e 900mm) e alta variabilidade climática. Este estudo teve como objetivo quantificar a confiabilidade hidrológica de cisternas de placa com 16m³ de volume para o abastecimento de comunidades rurais difusas em Pernambuco. A análise da sustentabilidade operacional foi conduzida por um modelo de balanço hídrico sequencial, utilizando séries históricas de precipitação de até 73 anos de 280 postos pluviométricos da SUDENE. Os critérios de projeto incluíram uma área mínima de captação de telhado de 40m² e o desempenho foi avaliado pelo índice de falha no tempo para diferentes cenários de demanda. Os resultados demonstram que, hidrologicamente, a infraestrutura de 16 m³ é inviável para atender ao consumo de 100 litros/dia (padrão ONU), devido às elevadas taxas de falha. A viabilidade é estritamente condicionada a uma retirada diária inferior a 50 litros/dia. Contudo, falhas operacionais significativas (acima de 30% do tempo) persistem em 34 municípios, o que exige a adoção de estratégias de mitigação, como o uso de múltiplas cisternas em microclimas. Conclui-se que o sucesso do programa depende da implementação obrigatória de mecanismos de filtragem e desinfecção (cloração) e de um programa de gestão do consumo alinhado ao limite sustentável de 50L/dia. Tais medidas são vitais para a manutenção da qualidade da água e para a mitigação do risco sanitário e da mortalidade infantil por doenças de veiculação hídrica na região.

Palavras-chave: Sustentabilidade Hídrica. Cisterna. Semiárido. Índice de Falha. Saúde da Família.

ABSTRACT

The problem of water scarcity is a global limiting factor for development, being particularly pronounced in the semi-arid region of Northeast Brazil, which presents low annual rainfall (between 400mm and 900mm) and high climatic variability. This study aimed to quantify the hydrological reliability of 16m³ slab cisterns for supplying water to dispersed rural communities in Pernambuco. The operational sustainability analysis was conducted using a sequential water balance model, utilizing historical rainfall series of up to 73 years from 280 rain gauge stations of SUDENE (Superintendency for the Development of the Northeast). The design criteria included a minimum roof catchment area of 40m², and performance was evaluated by the failure rate over time index for different demand scenarios. The results demonstrate that, hydrologically, the 16 m³ infrastructure is unfeasible to meet the consumption of 100 liters/day (UN standard), due to high failure rates. Viability is strictly conditioned on a daily withdrawal of less than 50 liters/day. However, significant operational failures (above 30% of the time) persist in 34 municipalities, requiring the adoption of mitigation strategies, such as the use of multiple cisterns in microclimates. It is concluded that the success of the program depends on the mandatory implementation of filtration and disinfection (chlorination) mechanisms and a consumption management program aligned with the sustainable limit of 50L/day. Such measures are



vital for maintaining water quality and mitigating health risks and infant mortality from waterborne diseases in the region.

Keywords: Water Sustainability. Cistern. Semi-Arid Region. Failure Rate. Family Health.

RESUMEN

El problema de la escasez de agua es un factor limitante global para el desarrollo, particularmente acentuado en la región semiárida del noreste de Brasil, que presenta bajas precipitaciones anuales (entre 400 mm y 900 mm) y alta variabilidad climática. Este estudio tuvo como objetivo cuantificar la confiabilidad hidrológica de cisternas de losa de 16 m³ para el suministro de agua a comunidades rurales dispersas en Pernambuco. El análisis de sostenibilidad operativa se realizó utilizando un modelo secuencial de balance hídrico, empleando series históricas de precipitación de hasta 73 años de 280 estaciones pluviométricas de SUDENE (Superintendencia para el Desarrollo del Noreste). Los criterios de diseño incluyeron un área mínima de captación de techo de 40 m², y el desempeño se evaluó mediante el índice de tasa de fallas a lo largo del tiempo para diferentes escenarios de demanda. Los resultados demuestran que, hidrológicamente, la infraestructura de 16 m³ es inviable para satisfacer el consumo de 100 litros/día (estándar ONU), debido a las altas tasas de fallas. La viabilidad está estrictamente condicionada a una extracción diaria inferior a 50 litros/día. Sin embargo, persisten importantes fallos operativos (superiores al 30% del tiempo) en 34 municipios, lo que exige la adopción de estrategias de mitigación, como el uso de múltiples cisternas en microclimas. Se concluye que el éxito del programa depende de la implementación obligatoria de mecanismos de filtración y desinfección (cloración) y de un programa de gestión del consumo alineado con el límite sostenible de 50 L/día. Estas medidas son vitales para mantener la calidad del agua y mitigar los riesgos para la salud y la mortalidad infantil por enfermedades transmitidas por el agua en la región.

Palabras clave: Sostenibilidad del Agua. Cisterna. Región Semiárida. Tasa de Fallos. Salud Familiar.



1 INTRODUÇÃO

A constatação de que a escassez é um limitador ao desenvolvimento sinaliza para a hipótese de que a água pode vir a ser motivo de sérios confrontos futuros em pelo menos cinco regiões do mundo. A Organização das Nações Unidas sugere que há cerca de 300 conflitos potenciais severos associados à questão hídrica, uma vez que mais de 2 bilhões de pessoas no mundo carecem de acesso a água potável. As tensões são mais graves nos países em desenvolvimento, onde os recursos hídricos disponíveis são mais poluídos e desperdiçados.

A análise em escala global aponta que 261 dos grandes rios do planeta têm cursos que atravessam territórios de dois ou mais países, sem que existam acordos disciplinando o uso de suas águas. Fronteiras compartilhadas por rios trazem mundo afora histórico de conflitos, tratados e acordos. Em grandes áreas do planeta, enfrentando escassez de água, as pessoas, principalmente mulheres e crianças, têm que andar 10 km ou mais para obter um pouco de água para beber e cozinhar. A pergunta seria: O que é mais razoável? Levar água para as populações dispersas em áreas onde há pouca ou nenhuma água, ou transferir a população para regiões onde há maior segurança hídrica?

O Brasil, apesar de ter uma situação de disponibilidade hídrica privilegiada (detentor da maior disponibilidade hídrica do planeta), apresenta problemas relacionados à disponibilidade hídrica intra e inter-regionais, sendo afetado tanto pela escassez quanto pela abundância.

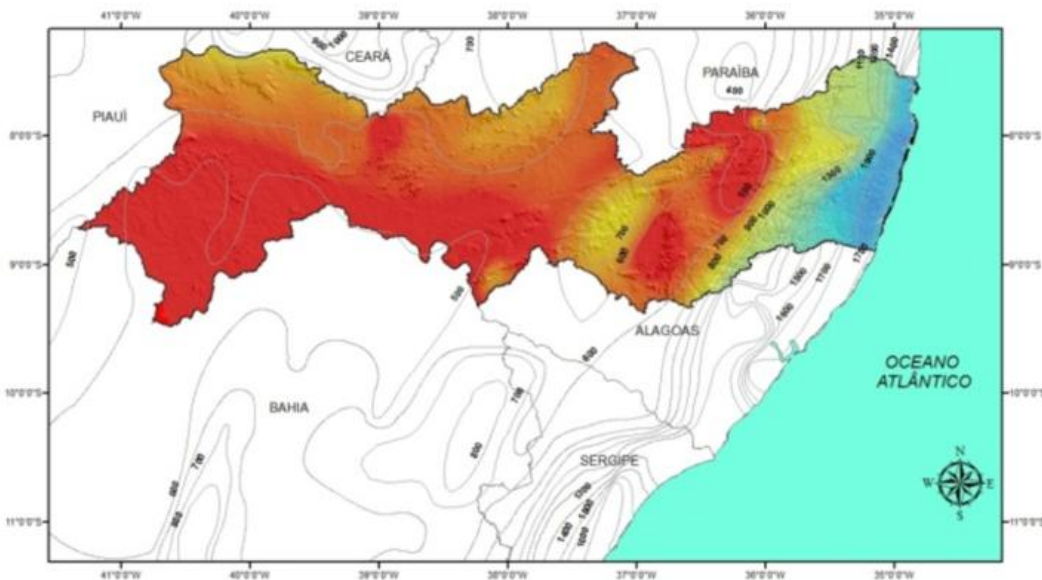
A Região Nordeste, em particular, possui grande parte do seu território sob o regime de clima semiárido, caracterizado por uma precipitação anual média na casa dos 900 mm, que pode atingir valores próximos a 400 mm em algumas sub-regiões. A criticidade hídrica regional é agravada pela elevada evapotranspiração potencial (ETP), que supera a precipitação, e pela predominância de rochas cristalinas, que limitam a extração de águas subterrâneas. Os solos rasos, esparsos e com pouca ou nenhuma vegetação (caatinga e cerrado) agravam os picos de cheias devido à incapacidade de reter a água da chuva, fazendo com que a mesma escoe rapidamente para os rios. Como consequência, esta região chamada de “Polígono das Secas”, concentra somente 3% da disponibilidade hídrica nacional. Uma realidade crítica nesta região é o alto índice de mortalidade infantil, frequentemente causado por diarreia, resultado direto das más condições de qualidade da água consumida. Ciente desta realidade, e da vulnerabilidade da população dispersa, governos e órgãos gestores de recursos hídricos estão cada vez mais empenhados em desenvolver e aprimorar políticas eficazes para mitigação da escassez hídrica, de modo que a falta de suprimento de água não constitua mais um motivo para a continuidade da pobreza, fome e miséria. É importante, entretanto, que essas ações sejam baseadas em estudos que demonstrem as alternativas mais adequadas para cada região, visando a otimização dos recursos hídricos disponíveis, com foco na relação custo-benefício e na facilidade de operação e manutenção da infraestrutura. Neste contexto, a implantação de tecnologias de captação de água de chuva (CAC) demonstra uma viabilidade econômico-financeira favorável, notadamente quando comparada ao alto



custo logístico e tarifário da distribuição por caminhões-pipa, ou de sistemas de adução de longa distância, consolidando a cisterna como uma solução de custo por metro cúbico significativamente inferior a longo prazo.

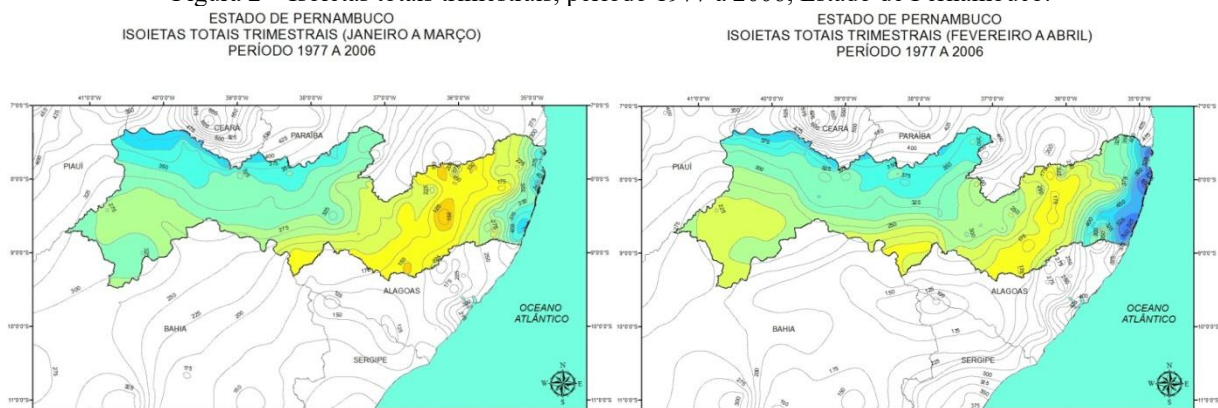
No estado de Pernambuco, as intensidades das chuvas decrescem à medida que se adentra no continente (Figura 1), sendo possível observar a presença de microclimas de altitude em alguns municípios, onde as temperaturas são baixas em determinadas épocas do ano. Na parte mais próxima do Sertão, região em estudo, a contribuição da ZCIT (zona de convergência intertropical) é mais efetiva do que dos sistemas de leste. O período mais chuvoso no Sertão vai de fevereiro a julho, com ocorrência de 67% da precipitação anual média (Figura 2). Este cenário demonstra a necessidade da adoção de uma alternativa de abastecimento de água a ser utilizada nas comunidades difusas do semiárido nordestino para convivência com a seca.

Figura 1 – Isoietas totais anuais, período 1977 a 2006, Estado de Pernambuco.



Fonte: Atlas pluviométrico do Brasil, (CPRM, 2011).

Figura 2 – Isoietas totais trimestrais, período 1977 a 2006, Estado de Pernambuco.



Fonte: Atlas pluviométrico do Brasil, (CPRM, 2011).



2 OBJETIVO

Avaliar tecnicamente a viabilidade de implantar cisternas para o abastecimento hídrico de comunidades rurais dispersas nos municípios do semiárido pernambucano. A principal métrica de desempenho utilizada será o índice de falha no tempo, que mede a confiabilidade do sistema.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada consistiu na análise da viabilidade técnica para o suprimento de água para consumo humano através da tecnologia de cisternas, objetivando verificar a capacidade do sistema de atender às demandas diárias das famílias ao longo de todo o ano.

3.1 AQUISIÇÃO E CONSISTÊNCIA DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Foram utilizadas as médias anuais e mensais históricas de precipitação de 280 postos pluviométricos implantados pela SUDENE no estado de Pernambuco, com séries pluviométricas extensas, com duração de até 73 anos (CPRM, 2011), garantindo robustez à análise estatística. Foi assim selecionado um subconjunto que cobrisse o Estado (Tabela 1). A análise de consistência das séries históricas incluiu o teste de homogeneidade e a imputação de dados faltantes por métodos de regressão e proporcionalidade para garantir a integridade da série temporal. A estacionariedade das séries foi preliminarmente assumida para a modelagem do balanço hídrico.

3.2 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

O cálculo do volume de armazenamento (16m^3) e os critérios de viabilidade foram estabelecidos com base nos seguintes parâmetros técnicos: Volume de armazenamento de 16m^3 , período de estiagem de oito meses, área mínima de captação do telhado de 40m^2 , e precipitação média pluviométrica mínima de 500mm/ano , estabelecida pela ASA.

Para o cálculo da Captação Efetiva (C_{cap}), a precipitação sobre a área de telhado de 40m^2 foi ajustada por um Coeficiente de Escoamento (C_{run}). Adotou-se o valor de $C_{\text{run}} = 0,85$ (valor típico para telhados de fibrocimento ou cerâmica em boas condições), o que reflete a eficiência de 85% da área de captação em conduzir o volume de chuva para o reservatório, descontando perdas por molhamento e infiltração superficial.

3.3 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE OPERACIONAL

A metodologia de simulação aplicada objetivou quantificar a sustentabilidade operacional e a confiabilidade hidrológica dos sistemas de captação de água de chuva (CAC), focando na avaliação das falhas de suprimento.



- **Modelo de Simulação:** A avaliação foi executada por meio de um modelo de balanço hídrico sequencial (*Reservoir Routing Model*), com passo de tempo mensal, utilizando as séries históricas de pluviometria média mensal. O volume de armazenamento (V_t) no reservatório ($16m^3$) é determinado pela equação:

$$V_t = V_{t-1} + C_{cap} - Q_{dem} \quad (1)$$

Onde:

V_{t-1} é o volume inicial;

C_{cap} é a contribuição de captação efetiva no mês t ; e

Q_{dem} é a demanda de retirada no mês t .

O fluxo de água coletado seguiu a ordem cronológica dos eventos chuvosos.

- **Métrica de Desempenho:** O desempenho do sistema foi quantificado pelo Índice de Falha no Tempo, que representa a porcentagem de meses (ou o número de meses) em que o volume armazenado (V_t) se torna nulo ($V_t \leq 0$), resultando na incapacidade de atender à demanda para cada município do Estado.
- **Cenários de Demanda Avaliados:**
 - **Cenário de Alto Consumo (100 litros/dia):** Este padrão, frequentemente associado à referência de consumo per capita da ONU, foi utilizado para testar os limites da infraestrutura padrão. As simulações demonstraram inviabilidade hidrológica, com falhas chegando a 83,9% do tempo em algumas localidades, comprovando a inadequação desta demanda para o dimensionamento da cisterna de $16m^3$.
 - **Cenário de Consumo Sustentável (50 litros/dia):** Adotado como o padrão de referência para a sustentabilidade nas políticas públicas de convivência com o semiárido, representando o limite operacional garantido para o consumo prioritário (ingestão e preparo de alimentos). Este consumo representa um limite *per capita* de 10 litros/dia para uma família média de 5 indivíduos.
- **Estabilidade da Simulação:** Para validar a robustez do modelo, foram testadas diferentes condições iniciais de volume do reservatório (cisterna cheia, vazia e com 50% da capacidade) e diferentes inícios de ano hidrológico. Os resultados finais se mostraram estáveis e convergentes, dada a extensão e o volume dos dados pluviométricos utilizados. O desempenho foi medido pelo índice de falha no tempo, ou seja, o número de meses em que as cisternas ficariam vazias.



Tabela 1 - Postos pluviométricos implantados pela SUDENE no estado de Pernambuco.

Posto	Localidade	Média	Nº. de anos
Algodoeiro	Santa Maria da Boa Vista	487.9	22
Amaro	Buíque	457.7	22
Apolinário (St.)	Brejo da Madre De Deus	478.1	17
Barra da Forquilha (Fz.)	Floresta	489.5	09
Belém de S. Francisco	Belém de Sã Francisco	442.6	73
Brejo do Pioré	Ibimirim	453.5	22
Cabo	Cabo	2213.9	15
Cabrobó	Cabrobó	469.2	56
Cabrobó	Cabrobó	619.4	09
Cabrobó	Cabrobó	466.1	36
Cachoeirinha	Cachoeirinha	453.6	22
Carapotos	Caruaru	429.5	20
Craibas (Fz.)	Itaiba	482.1	18
Floresta	Floresta	478.6	66
Garcia (Fz.)	Águas Belas	440.5	20
Gravatá	Gravatá	474.0	42
Henrique Dias	Sertânia	433.7	18
Henrique Dias	Sertânia	352.8	19
Icó	Petrolina	550.6	17
Icó	Petrolândia	403.2	38
Icó	Petrolândia	419.4	17
Inajá	Inajá	392.9	40
Ingazeira	Tabira	385.9	12
Itacuruba	Itacuruba	386.0	22
Jacaré	Ouricuri	608.8	14
Jacaré	Parnamirim	488.9	20
Jacaré (Fz.)	Floresta	484.0	23
Japecanga	Pedra	418.2	19
Lagoa do Félix (St.)	Pesqueira	464.5	16
Logradouro (St.)	Brejo da Madre De Deus	437.6	01
Malhada Real	Santa Maria da Boa Vista	454.1	42
Moderna	Sertânia	473.8	21
Moxotó	Ibimirim	429.9	50
Mulungu (St.)	Santa Cruz do Capibaribe	486.2	18
Orocó	Orocó	483.5	20
Pau Ferro	Petrolina	347.0	46
Pernambuco (Fz.)	Inajá	385.3	17
Petrolândia	Petrolândia	448.0	49
Petrolina	Petrolina	415.7	63
Poco Fundo	Santa Cruz do Capibaribe	408.2	16
Ponta da Vargem	Buíque	461.6	23
Rodrigues	Santa Maria da Boa Vista	490.7	24
Sã Bento	São Lourenço da Mata	954.4	04
São Bento (Fz.)	Santa Maria da Boa Vista	475.6	18
São Caetano	São Caetano	478.8	39
Salgado (St.)	Santa Cruz do Capibaribe	358.3	21
Sítio Novo (Fz.)	Floresta	347.1	23
Soares (Fz.)	Petrolândia	488.5	23
Santa Fé	Petrolina	379.7	12
Santa Maria da Boa Vista	Santa Maria da Boa Vista	462.8	63
Tara	Pedra	445.7	43
Várzea Comprida (Fz.)	Floresta	489.3	18
Vila do Pará	Santa Cruz Do Capibaribe	303.6	19

Fonte: Autores.



3.4 MAPEAMENTO E ANÁLISE ESPACIAL

A interpolação dos dados pluviométricos pontuais para a escala municipal foi realizada pelo método dos Polígonos de Thiessen (ou Diagrama de Voronoi). Esta metodologia, embora robusta para a distribuição espacial de dados, pressupõe a homogeneidade de precipitação dentro dos limites do polígono, o que introduz um nível de incerteza inerente à variabilidade microclimática do semiárido.

- **Critérios de Mapeamento (Potencial de Abastecimento):** Foram estabelecidos critérios para representar o atendimento das necessidades básicas humanas em termos de captação da precipitação:
 - 8 m³ (atendimento de 50 % das necessidades no ano);
 - 16 m³ (atendimento de 100 % das necessidades no ano) em uma cisterna;
 - 16 m³ a 32 m³ em duas cisternas;
 - 32 m³ a 48 m³ em três cisternas; e
 - captação superior a 48 m³, com a construção de quatro ou mais cisternas.

Foram consideradas três situações iniciais partindo-se com a cisterna cheia, vazia e com 50% de sua capacidade. Observou-se que, em função do grande número de dados utilizados, os resultados finais obtidos foram os mesmos, diluindo-se qualquer influência inicial das condições de acumulação das cisternas. Raciocínio análogo pôde ser observado quanto ao período inicial da simulação: início, meio ou fim do ano hidrológico.

As tabelas e gráficos mostraram falhas de até 83,9 % no tempo (cisterna no município de São Caetano) para retirada de 100 litros diários, o que comprova a incapacidade de manutenção do padrão de consumo recomendado pela ONU.

A Figura 3 mostra espacialmente a distribuição dos resultados da simulação considerando o padrão de consumo de 100 litros diários, a partir das seguintes hipóteses: menos de 10% de falhas, entre 10 e 30 % e mais de 30 % de falhas no tempo. Apenas para 6 municípios, possivelmente pelas condições de microclima, seria viável a implantação de 3 ou 4 cisternas por domicílio.

Na Figura 4 é feita análise similar para padrão de consumo diário de 50 litros diários. Nesta análise, para os mesmos patamares de falha no tempo, observa-se melhor funcionamento das cisternas. Dos 114 municípios que não apresentam pluviometria para atendimento contínuo de 100 litros/dia, a simulação apresenta os seguintes índices de falha:

- para 5 municípios, menos de 10% de falhas no tempo;
- para 75 municípios, falhas entre 10 e 30% no tempo;
- para 34 municípios, falhas em mais de 30% do tempo, sendo que em 11 municípios, estas falhas se registram entre 40 e 43,2% (maior índice, registrado em Sertânia).



4 PRINCIPAIS RESULTADOS HIDROLÓGICOS

A análise do desempenho operacional da infraestrutura de captação de água de chuva (CAC) foi quantificada pelo Índice de Falha no Tempo (IFT), conforme o modelo de balanço hídrico sequencial.

4.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM CENÁRIO DE ALTA DEMANDA

A simulação para o Cenário de Consumo de 100L/dia (padrão de referência da ONU para uso doméstico básico) demonstrou a inviabilidade hidrológica da cisterna de 16 m³ para a perenização do suprimento. Os resultados indicaram taxas de falha sistêmica em todo o estado, com o IFT atingindo um máximo de 83,9% em municípios como São Caetano. Este resultado corrobora que o dimensionamento padrão da infraestrutura é inadequado para o atendimento irrestrito da demanda.

4.2 SUSTENTABILIDADE OPERACIONAL E IDENTIFICAÇÃO DE RISCO

A avaliação no Cenário de Consumo Sustentável de 50L/dia (limite de retirada condicionado à sobrevivência) confirmou que a tecnologia é hidrológicamente viável na totalidade dos municípios. Contudo, a análise estatística revelou a presença de variabilidade crítica na confiabilidade:

- Zonas de Risco Intermediário: 75 municípios apresentaram um IFT entre 10% e 30%, indicando vulnerabilidade sazonal moderada.
- Zonas de Alto Risco Hidrológico: 34 municípios apresentaram um IFT superior a 30% do tempo, com falha máxima atingindo 43,2% na microrregião de Sertânia. Estas áreas são classificadas como de Alto Risco Hidrológico e requerem intervenções de engenharia para aumento da capacidade de armazenamento ou soluções complementares.

4.3 IMPLICAÇÕES SANITÁRIAS DOS RESULTADOS

O estudo reitera que o risco sanitário é um fator crítico. A exposição ao desabastecimento (IFT > 0) aumenta a vulnerabilidade da população à água de fontes alternativas e potencialmente contaminadas. A má qualidade da água coletada (por contaminação na área de captação e manuseio inadequado) é um fator direto no elevado índice de morbidade e mortalidade infantil por doenças de veiculação hídrica na região, demandando que as conclusões hidrológicas sejam indissociáveis das recomendações de engenharia sanitária.



Figura 3 – Índice de falhas no atendimento com sistemas para consumo diário de 100 litros

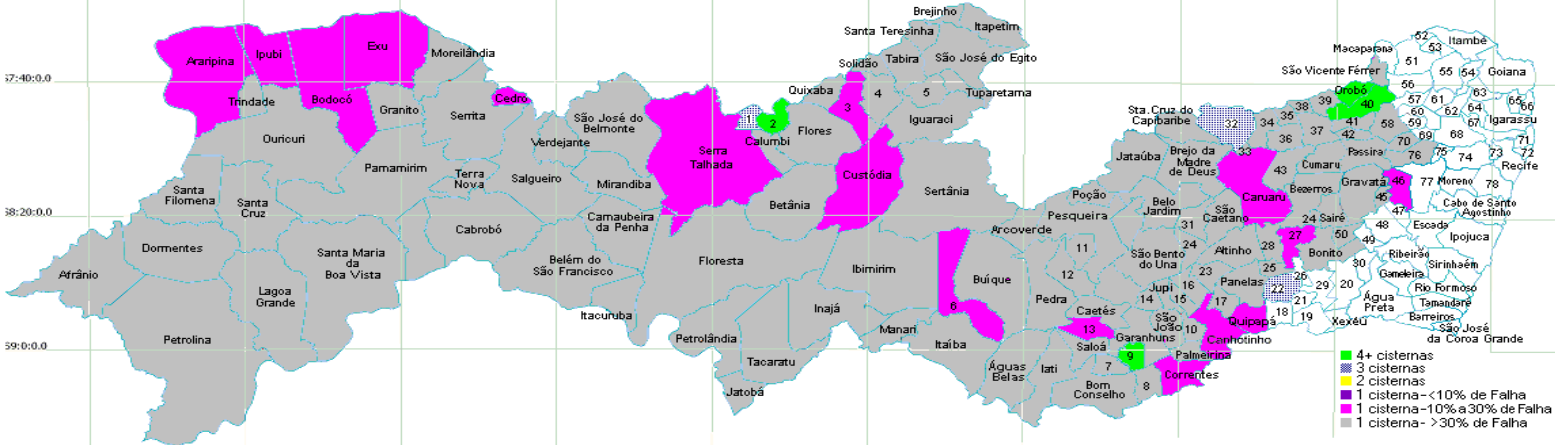
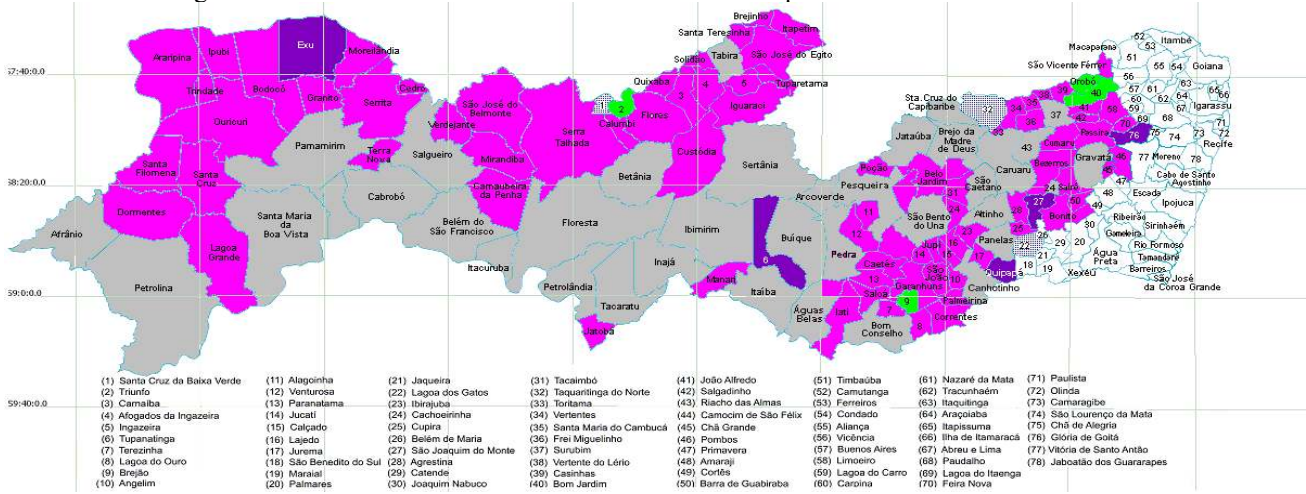


Figura 4 – Índice de falhas no atendimento com sistemas para consumo diário de 50 litros.



5 CONCLUSÕES

O estudo de sustentabilidade hidrológica, baseado no modelo de balanço hídrico sequencial e em séries pluviométricas históricas, confirmou a viabilidade da implantação da cisterna de 16m³ em todos os municípios de Pernambuco, desde que a demanda diária seja estritamente limitada a um patamar inferior a 50 litros/dia. O padrão de consumo de 100 litros/dia (referência ONU) foi comprovado como hidrológicamente insustentável para a infraestrutura básica analisada.

Apesar da viabilidade geral, o índice de falha no tempo revela a persistência de falhas operacionais significativas (>30% do tempo) em 34 municípios, classificando estas áreas como de Alto Risco Hidrológico. Para estas localidades, a segurança hídrica exige a ampliação do programa para o uso de múltiplas cisternas (até 4 em microclimas) ou a avaliação de tecnologias complementares de captação e armazenamento.

A sustentabilidade do programa transcende o componente de engenharia civil e requer intervenções sistêmicas em gestão e saúde pública:



1. **Gestão da Demanda:** É requisito essencial a implementação de um Programa de Educação para o Uso Racional da Água, alinhado rigorosamente ao limite de 50 litros/dia (ou menos), como condição indispensável para garantir a sustentabilidade operacional do sistema.
2. **Risco Sanitário:** É obrigatória a inserção de mecanismos de filtração e desinfecção nas cisternas para mitigar o risco de contaminação. A segurança hídrica exige a adoção de um protocolo de desinfecção que inclua a cloração residual com hipoclorito de sódio, mantendo-se um residual livre mínimo de 0,5mg/L de cloro livre no ponto de consumo, em conformidade com as normas de potabilidade. Esta ação de engenharia sanitária é vital para a inativação de patógenos e a redução da morbidade e mortalidade infantil por doenças de veiculação hídrica.
3. **Apropriação Tecnológica:** A continuidade da infraestrutura depende de programas de capacitação continuada para os usuários sobre o manejo, manutenção e operação da cisterna e do telhado, promovendo a apropriação e a gestão responsável dos recursos hídricos locais.
4. **Pesquisa Futura:** A análise de sustentabilidade de longo prazo deve considerar a não-estacionariedade climática. Recomenda-se que estudos futuros incorporem projeções climáticas regionalizadas (Modelos de Circulação Geral - GCMs) para avaliar a robustez das cisternas sob cenários de redução de precipitação e aumento da ETP, garantindo a adaptação da infraestrutura.



REFERÊNCIAS

BRASIL (ASA). Programa de formação e mobilização social para a convivência com o semiárido: um milhão de cisternas. Disponível em <http://www.asabrasil.org.br/p1mc.htm>. Acesso em: 9 dez. 2003.

COSTA, MARGARIDA REGUEIRA DA. Sustentabilidade hídrica e qualidade das águas: Avaliação das estratégias de convivência com o semiárido. Recife, 2009.

CPRM. ATLAS PLUVIOMETRICO DO BRASIL, 2011.

