

GOVERNANÇA DA ÁGUA VULNERABILIDADE À ESCASSEZ HÍDRICA

**MATHEUS DUARTE DE ARAÚJO
YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
RUI DE OLIVEIRA**

GOVERNANÇA DA ÁGUA VULNERABILIDADE À ESCASSEZ HÍDRICA

**MATHEUS DUARTE DE ARAÚJO
YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
RUI DE OLIVEIRA**

2021 - Editora Amplla
Copyright © Editora Amplla
Copyright do Texto © 2021 Os autores
Copyright da Edição © 2021 Editora Amplla
Editor Chefe: Leonardo Pereira Tavares
Diagramação: Higor Costa de Brito
Edição de Arte: Higor Costa de Brito
Revisão: Os autores

Governança da água: vulnerabilidade à escassez hídrica por Matheus Duarte de Araújo, Yáscara Maia Araújo de Brito e Rui de Oliveira está licenciado sob CC BY 4.0.



Esta licença exige que as reutilizações deem crédito aos criadores. Ele permite que os reutilizadores distribuam, remixem, adaptem e construam o material em qualquer meio ou formato, mesmo para fins comerciais.

O conteúdo da obra e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, não representando a posição oficial da Editora Amplla. É permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor. Todos os direitos para esta edição foram cedidos à Editora Amplla pelos autores.

ISBN: 978-65-88332-24-5

Editora Amplla
Campina Grande – PB – Brasil
contato@ampllaeditora.com.br
www.ampllaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

Andréia Monique Lermen – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Bergson Rodrigo Siqueira de Melo – Universidade Estadual do Ceará
Bruna Beatriz da Rocha – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Caio César Costa Santos – Universidade Federal de Sergipe
Carina Alexandra Rondini – Universidade Estadual Paulista
Carla Caroline Alves Carvalho – Universidade Federal de Campina Grande
Carlos Augusto Trojaner – Prefeitura de Venâncio Aires
Cícero Batista do Nascimento Filho – Universidade Federal do Ceará
Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Daniela de Freitas Lima – Universidade Federal de Campina Grande
Denise Barguil Nepomuceno – Universidade Federal de Minas Gerais
Dylan Ávila Alves – Instituto Federal Goiano
Edson Lourenço da Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Elane da Silva Barbosa – Universidade Estadual do Ceará
Érica Rios de Carvalho – Universidade Católica do Salvador
Gilberto de Melo Junior – Universidade Federal de Goiás
Higor Costa de Brito – Universidade Federal de Campina Grande
Italan Carneiro Bezerra – Instituto Federal da Paraíba
Ivo Batista Conde – Universidade Estadual do Ceará
Jessica Wanderley Souza do Nascimento – Instituto de Especialização do Amazonas
João Henriques de Sousa Júnior – Universidade Federal de Santa Catarina
João Manoel Da Silva – Universidade Federal de Alagoas
João Vitor Andrade – Universidade de São Paulo
Joilson Silva de Sousa – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
José Cândido Rodrigues Neto – Universidade Estadual da Paraíba
Jose Henrique de Lacerda Furtado – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Josenita Luiz da Silva – Faculdade Frassinetti do Recife
Karina de Araújo Dias – SME/Prefeitura Municipal de Florianópolis
Lafze Lantyer Luz – Universidade Católica do Salvador
Lindon Johnson Pontes Portela – Universidade Federal do Oeste do Pará
Lucas Capita Quarto – Universidade Federal do Oeste do Pará
Luciana de Jesus Botelho Sodrê dos Santos – Universidade Estadual do Maranhão
Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Luiza Catarina Sobreira de Souza – Faculdade de Ciências Humanas do Sertão Central
Manoel Mariano Neto da Silva – Universidade Federal de Campina Grande
Marcelo Alves Pereira Eufrazio – Centro Universitário Unifacisa
Marcelo Williams Oliveira de Souza – Universidade Federal do Pará
Marcus Vinicius Peralva Santos – Universidade Federal da Bahia
Marina Magalhães de Moraes – Universidade Federal de Campina Grande
Nadja Maria Mourão – Universidade do Estado de Minas Gerais
Natan Galves Santana – Universidade Paranaense
Nathalia Bezerra da Silva Ferreira – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
Neide Kazue Sakugawa Shinohara – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Neudson Johnson Martinho – Faculdade de Medicina da Universidade Federal de Mato Grosso
Patrícia Appelt – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Paulo Henrique Matos de Jesus – Universidade Federal do Maranhão
Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Rafael Rodrigues Gomides – Faculdade de Quatro Marcos
Reângela Cíntia Rodrigues de Oliveira Lima – Universidade Federal do Ceará
Rebeca Freitas Ivanicska – Universidade Federal de Lavras
Ricardo Leoni Gonçalves Bastos – Universidade Federal do Ceará
Rodrigo da Rosa Pereira – Universidade Federal do Rio Grande
Sabrynna Brito Oliveira – Universidade Federal de Minas Gerais
Samuel Miranda Mattos – Universidade Estadual do Ceará
Shirley Santos Nascimento – Universidade Estadual Do Sudoeste Da Bahia
Silvana Carloto Andres – Universidade Federal de Santa Maria
Silvio de Almeida Junior – Universidade de Franca
Tatiana Paschoalette Rodrigues Bachur – Universidade Estadual do Ceará
Telma Regina Stroparo – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Thayla Amorim Santino – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Virgínia Maia de Araújo Oliveira – Instituto Federal da Paraíba
Virginia Tomaz Machado – Faculdade Santa Maria de Cajazeiras
Walmir Fernandes Pereira – Miami University of Science and Technology
Wanessa Dunga de Assis – Universidade Federal de Campina Grande
Wellington Alves Silva – Universidade Estadual de Roraima
Yáscara Maia Araújo de Brito – Universidade Federal de Campina Grande
Yasmin da Silva Santos – Fundação Oswaldo Cruz
Yuciara Barbosa Costa Ferreira – Universidade Federal de Campina Grande

2021 - Editora Ampla

Copyright © Editora Ampla

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Editora Ampla

Editor Chefe: Leonardo Pereira Tavares

Diagramação: Higor Costa de Brito

Edição de Arte: Higor Costa de Brito

Revisão: Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sueli Costa CRB-8/5213

Araújo, Matheus Duarte de
Governança da água [livro eletrônico] vulnerabilidade
à escassez hídrica / Matheus Duarte de Araújo, Yáscara
Maia Araújo de Brito, Rui de Oliveira. - Campina Grande :
Editora Ampla, 2021.
58 p.

Formato: PDF

ISBN: 978-65-88332-24-5

1. Alocação de água 2. Seca plurianual 3. Secas
4. Mitigação de impactos ambientais I. Brito, Yáscara Maia
Araújo de II. Oliveira, Rui de III. Título

CDD-918.131

Índices para catálogo sistemático:

1. Secas : Nordeste 918.131

“Perto de muita água, tudo é feliz.”

Guimarães Rosa

APRESENTAÇÃO

As secas históricas que atingem a região semiárida brasileira datam desde o descobrimento do Brasil, fazendo parte do cotidiano do povo nordestino. Entre os seus inúmeros impactos está a escassez hídrica, que impossibilita o atendimento às múltiplas demandas de água, uma vez que há uma brusca redução na oferta de recursos hídricos para o abastecimento humano, animal, agrícola e industrial. Diante desse obstáculo, é um desafio da ciência e tecnologia de recursos naturais gerenciar o problema a fim de mitigar ao máximo os impactos oriundos da seca.

A temática desse livro insere-se na discussão histórica quanto a necessidade de gestão eficiente nos aspectos de identificação e avaliação de vulnerabilidade à escassez hídrica em regiões semiáridas. Os autores objetivam que as experiências técnico-metodológicas possam contribuir para identificação, avaliação e remediação da escassez hídrica em regiões vulneráveis. Uma gestão proativa que planeje o que será feito antes do desastre chegar é essencial para reduzir os impactos ambientais, econômicos e sociais sobre a população e o ambiente.

Sabendo-se que a água é um elemento vital à vida e com o intuito de fornecê-lo apropriadamente, a governança desse bem comum busca constantemente por metodologias e experiências que acrescentem ao debate sobre a convivência com a seca. Isto posto, os capítulos apresentados objetivam demonstrar a vulnerabilidade, os impactos e as medidas adotadas pelo Semiárido Nordeste durante as secas recorrentes; simular estratégias de operação de reservatórios; além de estabelecer critérios a serem adotados prioritariamente nos tratamentos de esgotos domésticos.

Esperamos que apreciem a leitura e se multiplique o conhecimento sobre a água, nosso bem mais precioso.

Matheus Duarte de Araújo
Yáscara Maia Araújo de Brito

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - VULNERABILIDADE DO AGRESTE PARAIBANO DIANTE DA SECA PLURIANUAL 2012 - 2017* ..	9
RESUMO	9
1.1 INTRODUÇÃO.....	9
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	16
CAPÍTULO II - SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO ATRAVÉS DE UM MODELO MATEMÁTICO DE QUANTIDADE DE ÁGUA EM REDE DE FLUXO*	17
RESUMO	17
2.1 INTRODUÇÃO.....	17
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
CAPÍTULO III - IMPACTOS E MITIGAÇÕES DECORRENTES DA SECA 2014-2017 NA BACIA ESTENDIDA DO RIO SÃO FRANCISCO	25
RESUMO	25
3.1 INTRODUÇÃO.....	25
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
CAPÍTULO IV - ANÁLISE COMPARATIVA DE RESERVATÓRIOS EM REGIÕES DE ESCASSEZ QUANTO AO ATENDIMENTO ÀS DEMANDAS HÍDRICAS.....	34
RESUMO	34
4.1 INTRODUÇÃO.....	34
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35

4.3	RESULTADOS.....	40
4.4	CONCLUSÕES.....	43
CAPÍTULO V - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO VIKOR PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS*		44
	RESUMO	44
5.1	INTRODUÇÃO.....	44
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		51
SOBRE OS AUTORES		56

* A primeira versão deste trabalho foi publicada nos anais do I Congresso Virtual de Estudantes e Profissionais de Engenharia Ambiental e Sanitária (I CONVEPEAS), ano 2020.

RESUMO

O Agreste Paraibano é uma mesorregião do Estado da Paraíba de transição entre o litoral e o sertão. Apesar dessa condição, todo o seu território enquadra-se dentro da delimitação do Semiárido Brasileiro. Isso indica que as secas são desastres naturais recorrentes nessa região e que estão se tornando cada vez mais intensos. O impacto mais preocupante para a população residente nessa região é a escassez hídrica. Diante disso, o artigo tem como objetivo analisar a vulnerabilidade do Agreste da Paraíba frente aos impactos agrícolas, pecuários e hidrológicos oriundos da seca plurianual de 2012 a 2017. Os dados de entrada utilizados para tais análises são provenientes de duas pesquisas anuais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, que são a Pesquisa Agrícola Municipal e a Pesquisa da pecuária Municipal. São utilizados também dados de acompanhamento do volume armazenado de água em dois importantes reservatórios de abastecimento da mesorregião. Verifica-se que, apesar da seca ser um fenômeno recorrente e frequente nessa área, tida como uma característica do clima, a população residente ainda não aprendeu a conviver de forma proativa com os seus efeitos. Ao longo do período analisado, as perdas agropecuárias foram registradas, os reservatórios chegaram ao colapso, com volumes inferiores a 3% da capacidade total e as medidas adotadas para mitigar os seus efeitos são de cunho, predominantemente, estrutural.

1.1 INTRODUÇÃO

O Agreste Paraibano é uma mesorregião de transição entre o litoral e o sertão do Estado da Paraíba. Apesar de ser uma zona de transição, toda a sua extensão está inserida no Semiárido Brasileiro (SAB), região delimitada pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). De acordo com a Resolução SUDENE nº 107/2017, os critérios necessários para que uma municipalidade faça parte do SAB, são: i. precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; ii. Índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; iii. percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. Se um desses critérios for satisfeito, o município está apto a adentrar na delimitação, e assim beneficiar-se de políticas de crédito e benefícios fiscais.

Verifica-se, portanto, que o Agreste é uma mesorregião que convive com as secas recorrentes, frequentes e cada vez mais intensas que atingem, sobretudo, o sertão nordestino. A

escassez hídrica é a principal consequência do evento para essa região e ocorre quando a demanda de água é superior à oferta (MAGALHAES, 2016). A partir origina-se uma série de impactos que atingem o abastecimento humano, agrícola, animal, entre os demais usos múltiplos dos recursos hídricos. Ainda de acordo com Magalhaes (2016), “são as atividades humanas que precisam se adaptar às condições do Semiárido, e não o contrário”.

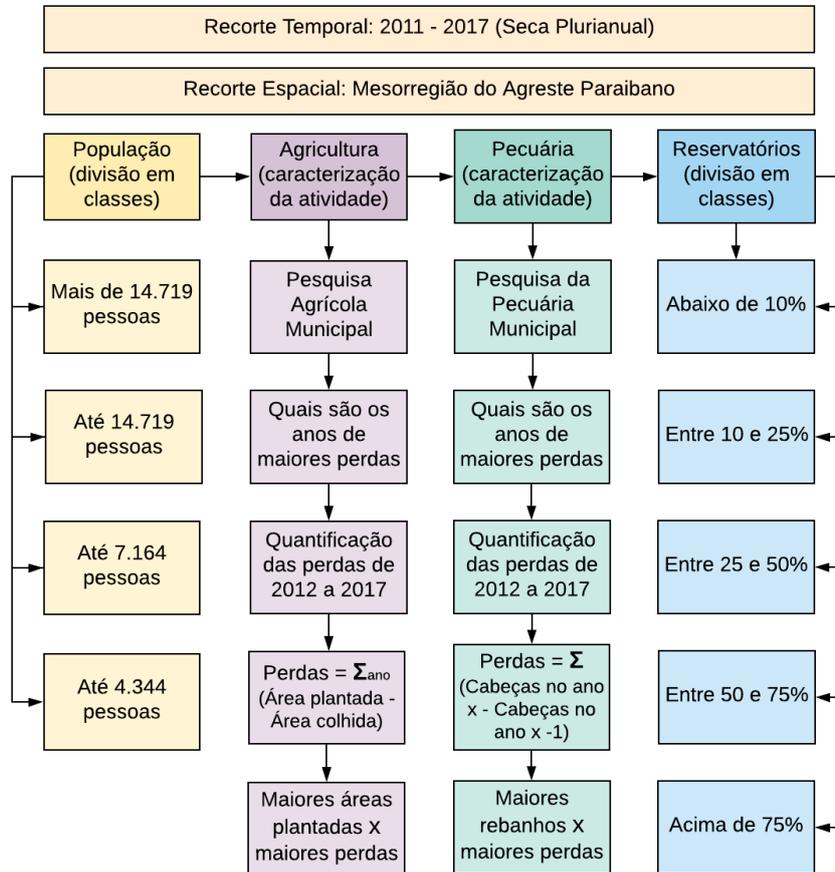
Diante do exposto, o artigo tem como objetivo analisar a vulnerabilidade dos 66 municípios da mesorregião do Agreste Paraibano à seca plurianual que se estendeu de 2012 a 2017. Para essa análise, as variáveis consideradas são as perdas agrícolas representadas pela relação entre os hectares de área plantada e colhida de culturas temporárias e permanentes; as perdas pecuárias que são indicadas pela variação do efetivo de cabeças do rebanho bovino de cada município; e os impactos hidrológicos que são analisados a partir da variação do volume armazenado de água em dois dos principais reservatórios de abastecimento da mesorregião, que são o açude de Boqueirão e o Argemiro de Figueiredo.

1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo tem como enfoque os municípios da mesorregião do Agreste Paraibano, para o recorte temporal que se estende entre 2011 e 2017. Para esse período, verificam-se quais são os impactos que a seca plurianual 2012-2018 trouxe para a atividade agrícola, pecuária e para dois reservatórios de abastecimento da região. A primeira etapa consiste em caracterizar os municípios do ponto de vista populacional, através de técnicas de mapeamento realizadas no software *ArcGIS Desktop 10.5*, conforme aponta a Figura 1.

Em seguida, os dados de entrada que permitem quantificar as perdas agrícolas e pecuárias são obtidos a partir da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) e da Pesquisa Pecuária Municipal (PPM), respectivamente, ambas divulgadas anualmente pelo IBGE. A variável da PAM considerada no estudo são as perdas agrícolas resultantes de culturas temporárias e permanentes para os 66 municípios do Agreste Paraibano. Esse cálculo é realizado da seguinte forma: Área plantada ou destinada à colheita (hectares) - Área colhida (hectares) somados ano a ano de 2012 a 2017. O recorte temporal utilizado foi o 2012 a 2017, pois, são caracterizados como anos de seca plurianual que se iniciou em 2012 e perdurou até meados de 2018.

Figura 1 – Percurso metodológico seguido no estudo



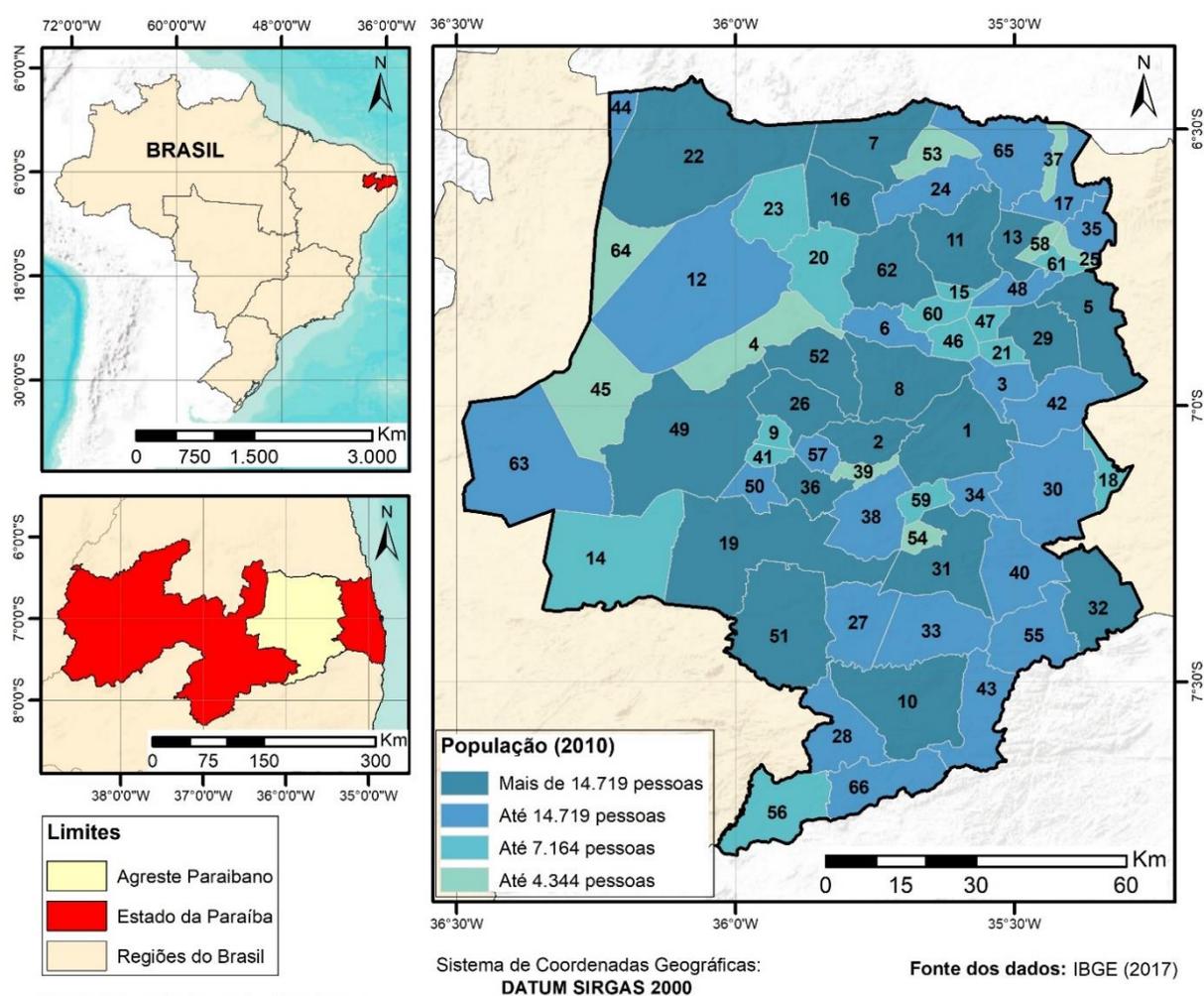
Fonte: Autoria própria.

Já para quantificar as perdas pecuárias, utiliza-se da variável “efetivo de rebanhos (cabeças)” para o tipo de rebanho bovino. Os valores alocados sobre cada município representam as perdas de cabeças que foram quantificadas pela PPM de 2011 a 2017. Foram adquiridos os metadados da plataforma SIDRA do IBGE para a variável e para os anos citados; em seguida o cálculo das perdas foi calculado de um ano em relação ao anterior e somados.

Por fim, são analisados os volumes percentuais de água armazenada em dois dos principais reservatórios de abastecimento da mesorregião do Agreste paraibano, que são o açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) e o Acauã (Argemiro de Figueiredo). Boqueirão localiza-se no município de mesmo nome e possui uma capacidade total de armazenamento de 466,5 hm³, enquanto o segundo localiza-se na cidade de Itatuba e tem um armazenamento máximo de 253,0 hm³ (INSA, 2020).

O Agreste Paraibano é uma das quatro mesorregiões do Estado da Paraíba e concentra em sua delimitação um total de 66 municípios, como mostra a Figura 1. A região ocupa 22,9% do Estado, através de uma área que se estende ao longo de 12.931,27 km². Apenas dois dos seus municípios não são de pequeno porte, que são Campina Grande (o 2º maior do Estado) e Guarabira (IBGE, 2020).

Figura 2 – Ano que caracteriza o maior número de impactos para os municípios



Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 permite visualizar todos os municípios que fazem parte do estudo, e os seus respectivos números de habitantes, de acordo com o Censo 2010 do IBGE. A mesorregião é uma zona de transição entre o litoral do Estado e o Sertão. Apesar dessa condição, 100% da sua área encontra-se dentro da delimitação do Semiárido Brasileiro (SAB).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Erro! Fonte de referência não encontrada.-A representa a espacialização de dados de uma pesquisa anual do IBGE intitulada Produção Agrícola Municipal (PAM) para os anos de 2012 a 2017. A legenda refere-se às cores que estão dispostas no mapa e evidenciam a informação de qual foi o ano de maiores perdas para cada município. Nota-se que o ano com maior ocorrência de perdas é 2012, contando com 24 municípios. Foi o primeiro ano de uma seca pluri-anual que durou 8 anos e que não aparecia com tanta severidade desde o início do século XXI, o que pode explicar tamanho súbito de perdas para os agricultores. Em seguida, tem-se 2014 registrando as maiores perdas para 19 localidades e 2016 com 10 municípios em maior gravidade. Os demais anos retratam cenários de menores prejuízos.

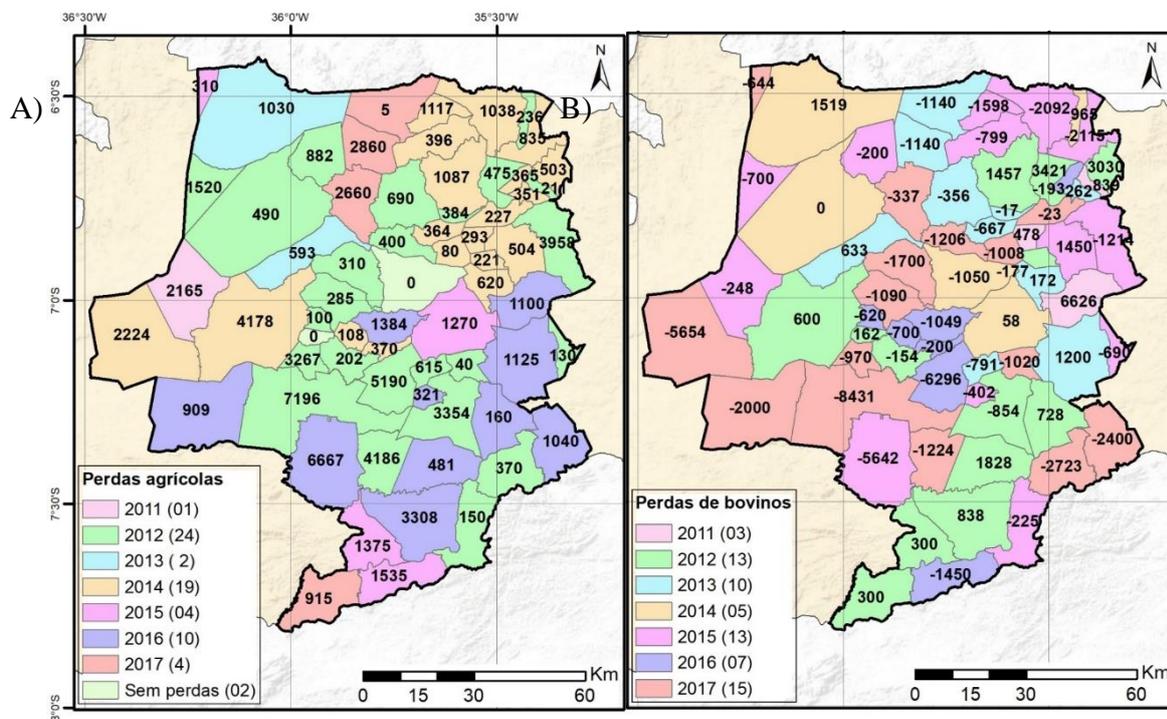
Destaca-se os municípios de Areia e Montadas os quais não tiveram perdas agrícolas em nenhum dos anos de análise, ou seja, todos os hectares destinados à colheita atingiram sua produtividade máxima. Observa-se que os valores de perdas cumulativas para a Mesorregião em estudo variaram de 0 a 7196 hectares perdidos. No entanto, excluindo os dois citados anteriormente que não foram acometidos pelas perdas, 39 municípios em análise tiveram perdas de até 1000 hectares, ou seja, 59% do total.

Outros 38% contaram com prejuízos superiores à 1000 hectares, com ênfase à Campina Grande, que foi o município mais prejudicado, seguido por Queimadas, Massaranduba, Fagundes, Pocinhos com perdas de respectivamente 6667, 5190, 4186 e 4178 hectares. Estes são os municípios com valores superiores a 4000 hectares perdidos. Ao contrapor esses dados de municípios de maiores perdas com os de maiores áreas plantadas a fim de verificar se há uma relação existente entre maior plantio e consequentemente maiores perdas, conclui-se que apenas Campina Grande apresenta a segunda maior área de plantio dentre os municípios citados com 29.311 hectares, o maior destes é Alagoa Nova com plantação de 44553 hectares para os anos de 2012-2017.

A Erro! Fonte de referência não encontrada., por sua vez, retrata a espacialização de dados da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), também do IBGE, para os anos de 2011 a 2017 para a Mesorregião do Agreste. As cores do mapa referem-se ao ano de menor número de cabeças para cada município. Por exemplo, subtrai-se o número de cabeças de 2012 em relação às de 2011, verificando se houve acréscimo ou decréscimo. E assim foi feito de 2013 em relação à 2012, 2014 a 2013 e assim sucessivamente até o 2017 em relação ao 2016. Por fim, todos estes acréscimos ou decréscimos de um ano relativo ao anterior foram somados a fim de obter um

valor único que quantificasse se aquele município, ao longo da seca plurianual, aumentou ou reduziu o seu rebanho bovino.

Figura 3 – A) Perdas agrícolas em municípios do Agreste Paraibano em hectares; B) Perdas de cabeças de rebanho bovino ao longo dos anos 2011-2017



Fonte: Autoria própria.

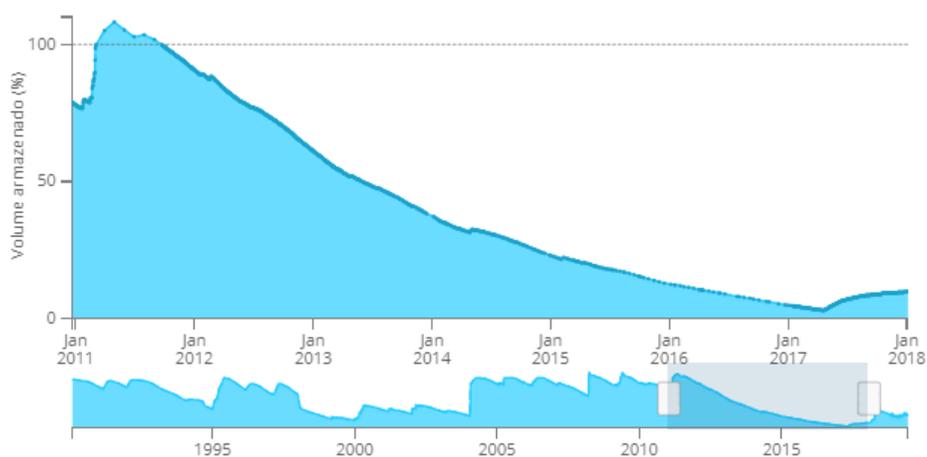
O ano de 2017 quantificou a maior quantidade de localidades com os menores rebanhos, contabilizando 15 municípios. Por conseguinte, 2012 e 2015 ficaram na segunda posição com 13 desses em maior gravidade para cada ano. Por fim, os déficits anuais restantes foram bem menores. Os valores variaram de - 8.421 a 6.626, ou seja, foram reduzidas 8421 cabeças ao longo da seca e aumentaram 6.626 cabeças de 2011 a 2017, respectivamente nos municípios de Campina Grande e Mulungu. Dentre os 66 municípios analisados, 66,6% tiveram seus rebanhos bovinos reduzidos, em contraposição a 31,8% que aumentaram suas cabeças bovinas. Apenas um município, Barra de Santa Rosa, manteve seu rebanho constante entre os aumentos e decréscimos.

Os municípios que apresentaram ganhos de mais de 3.000 cabeças foram apenas Lagoa de Dentro e Belém, respectivamente com 3.030 e 3.421, além de Mulungu já citado. E quanto às perdas, além de Campina Grande, os de maiores decréscimos foram Massaranduba, Soledade e Queimadas, respectivamente com 6.296, 5.654 e 5.642. Os demais apresentaram déficits

inferiores a 2.800 cabeças. Dentre as localidades com os maiores rebanhos que são Campina Grande, Queimadas, Gurinhém, Araçagi e Alagoa Grande, a primeira foi a de maior decréscimo do seu rebanho. Gurinhém aumento em 1200 cabeças, Alagoa Grande em 58 e Araçagi decresceu em 1.214 bovinos.

O açude Epitácio Pessoa abastece a populosa cidade de Campina Grande, além de mais 25 municípios e distritos municipais ao seu redor. De acordo com a Figura 4, entre março e agosto de 2011, Boqueirão contava com mais de 100% do seu volume máximo. A partir de 2012 o cenário mudou, a seca dava seus primeiros indícios e em maio de 2013 o reservatório já registrava apenas 50% do volume armazenado. Apesar da imposição de regras de racionamento, o colapso não conseguiu ser evitado e assim, em abril de 2017, o Epitácio Pessoa chega a um volume inferior a 3% (RÊGO et. al., 2017; INSA, 2020).

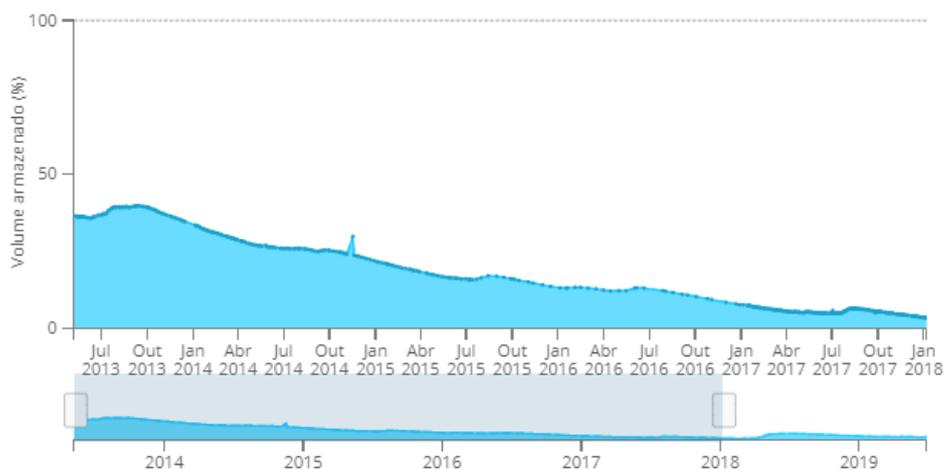
Figura 1 – Histórico do volume de água armazenado no açude Epitácio Pessoa (Boqueirão)



Fonte: INSA (2020).

O açude Acauã tem o seu gráfico de volume percentual armazenado ao longo dos anos de 2013 a 2017 apresentado da Figura 5. Pode-se verificar que entre julho e outubro de 2013 o reservatório detinha o maior armazenamento hídrico dentre o período de análise, com valores que atingem 40% da sua capacidade total. Daí em diante o volume apenas decresce até que, em dezembro de 2017, o volume chega a apenas 3,6 da capacidade máxima do açude, cenário de colapso semelhante ao ocorrido em Boqueirão no mesmo período.

Figura 2 – Histórico do volume de água armazenado no açude de Acauã (Argemiro de Figueiredo)



Fonte: INSA (2020).

1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, conclui-se que as perdas agrícolas e pecuárias ocorreram de forma mais intensa no início da seca plurianual iniciada em 2012. A região não registrava um evento tão intenso desde o início do século XXI e além disso 2011 foi um ano de grandes cheias, como pôde ser visto no volume máximo atingido pelo açude de Boqueirão. Frente a isso, os agricultores e pecuaristas não estavam preparados para enfrentar a seca que estava a chegar.

Destaca-se a necessidade não apenas do monitoramento das secas, mas também das previsões. Esses instrumentos, em conjunto com um adequado plano de preparação para as secas, permitem um gerenciamento de risco voltado a reduzir os impactos oriundos do fenômeno, principalmente no que se refere à população que depende das atividades mais vulneráveis às secas.

Enquanto os impactos agropecuários ocorreram ao longo de todo o período, os impactos hidrológicos associados ao abastecimento iam tornando-se mais graves à medida que a seca avançava. Isso pode ser visto, pois, os reservatórios analisados tem capacidade para o abastecimento de seus usos múltiplos por um período plurianual, diferente do que ocorre com os pequenos reservatórios.

* A primeira versão deste trabalho foi publicada nos anais do I Congresso Virtual de Estudantes e Profissionais de Engenharia Ambiental e Sanitária (I CONVEPEAS), ano 2020.

RESUMO

Diante da escassez hídrica que afeta diversas regiões do nordeste, destaca-se o desafio do atendimento às múltiplas demandas de água, sendo necessário desenvolver ferramentas capazes de gerir e planejar a manutenção da disponibilidade desse recurso para atuais e futuras gerações. Nesse contexto, esse estudo consiste na simulação do gerenciamento do reservatório Poções, em Monteiro, na Paraíba, a partir de estratégias e condições de operação. Foram simuladas três estratégias, baseadas no objetivo fundamental do gestor, através do modelo matemático de modelagem de água em rede de fluxo, AcquaNet. A partir disso, com o objetivo de simular possíveis mudanças climáticas ou falhas à jusante do reservatório, o hidrossistema foi simulado para um cenário de referência em condições normais, que é inerente aos dados hidrológicos históricos, e três cenários de possíveis reduções em 20%,30% e 40% da vazão afluyente ao reservatório. Os resultados indicam que a demanda de abastecimento humano é 100% confiável para as estratégias e cenários simulados. O atendimento à demanda de irrigação pode atingir confiabilidade máxima quando é priorizada frente à manutenção do reservatório, porém, admite-se assim um risco à sustentabilidade do reservatório. Desse modo, as simulações permitem sugerir medidas de redução da demanda como melhor opção de gerenciamento da água.

2.1 INTRODUÇÃO

O atendimento as múltiplas demandas de água é um desafio para várias microrregiões na região Nordeste (MORAIS, FADUL e CERQUEIRA, 2018). Desse modo, a gestão e operação dos reservatórios de acumulação se tornam objeto de pesquisa no intuito de assistir e beneficiar a disponibilidade hídrica para os usos diversos. De modo geral, os reservatórios no semiárido e cariri paraibanos, neste caso de estudo o reservatório Poções na cidade de Monteiro, se caracterizam por estarem em regiões de baixa disponibilidade hídrica e com peculiaridades climáticas, o que gera risco à vida humana e ao desenvolvimento das regiões pela incerteza no atendimento às necessidades hídricas (SANTOS, OLIVEIRA e SILVA, 2018).

A gestão ineficaz é ainda fator contributivo para a escassez hídrica nestas regiões, de modo que gerenciar o uso de modo adequado e criterioso é um desafio de governança, que deve ser de exercício compartilhado entre gestores e usuários (FABBRO NETO e SOUZA, 2017). Entre

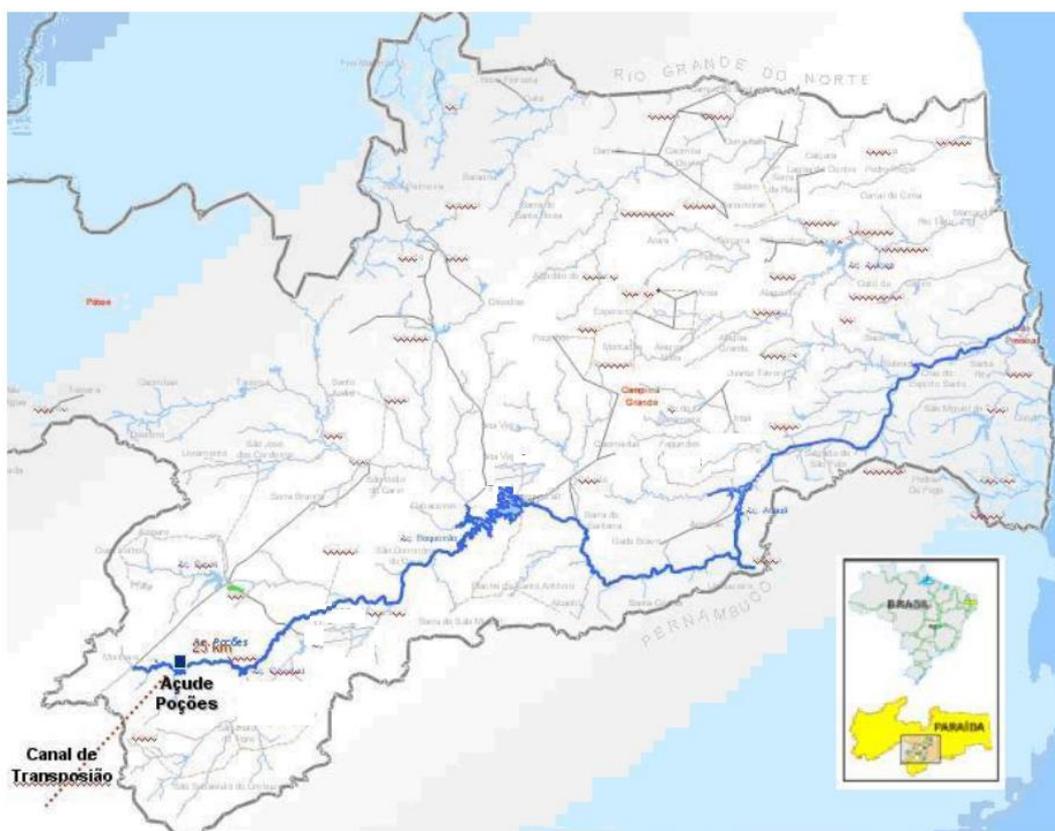
as ferramentas de apoio à decisão na gestão de recursos hídricos, destaca-se modelagem de rede de fluxo para a alocação de água em sistemas complexos como nas aplicações de Avarideh, Attari, Moridi (2017), Silva et al. (2019) e Da Silva e Vieira, 2017. Esses sistemas são compostos por uma base de dados que simulam, em cenários, o comportamento físico e hidrológico dos reservatórios, a partir de modelos matemáticos em software, os quais podem prever o atendimento às demandas em situações diversas.

Nesse contexto, o presente estudo consiste na utilização do modelo matemático de modelagem de rede de fluxo AcquaNet, escolhido por apresentar fácil operacionalização entre o usuário e o computador, para simulação da operação de um sistema hídrico complexo, a partir de estratégias de prioridades de alocação e reduções de afluência hídrica ao sistema, com o intuito de verificar o comportamento do reservatório Poções diante do atendimento às múltiplas demandas.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido no reservatório Poções, que possui barragem situada no riacho Mulungu, no município de Monteiro na Paraíba, aproximadamente 15 km à jusante da sede municipal. A bacia do reservatório tem 656 km², o mesmo recebe aporte hídrico da transposição do Rio São Francisco e tem como finalidade principal o aproveitamento do potencial hídrico para irrigação (BRITO, 2019). A localização do reservatório está representada na Figura 6.

Figura 6 – Localização do Reservatório Poções no estado da Paraíba



Fonte: Farias, 2009.

As simulações seguiram a metodologia propostas por Araújo, Ribeiro e Braga (2019) para o período de 2012-2017, sendo utilizados o relatório dos reservatórios do semiárido brasileiro da agência nacional de águas – ANA (ANA, 2017) para os dados físicos e das demandas do reservatório Poções, as vazões de entrada coletadas pelo sistema HidroWeb da ANA e os dados médios mensais de evaporação apresentados por Farias (2009). Os dados climatológicos médios do hidrossistema estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados climatológicos de entrada do modelo (Fonte: adaptado de Farias, 2009).

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Precipit. (mm)	69	38,2	81,9	90	48,8	31,9	32,5	7,05	1,96	1,7	4,88	50,2
Vazão (m ³ /s)	1,07	0,54	1,53	2,23	1,32	0,72	1,1	0,13	0,01	0	0,01	0,33
Evapor. (mm)	233	178	156	116	115	127	156	206	239	263	266	273

Fonte: Autoria própria.

A modelagem matemática foi operada a partir de três estratégias de prioridades de atendimento (E1, E2, E3) definidas por Araújo, Ribeiro e Braga (2019), que propôs diferir conceitualmente em prioridades no atendimento às demandas pelos códigos P1, P2, P3 e P4,

tendo ordem de prioridade P1 menor e P4 maior, e P2 e P3 com prioridades intermediárias. O objetivo das estratégias é simular o comportamento do sistema para identificar os melhores métodos de gerenciamento como sistema de suporte à decisão. As estratégias de alocação e operação dos reservatórios estão expostas a seguir e apresentadas na Tabela 2.

Estratégia 1 – Abastecimento Humano: a estratégia 1 prioriza o abastecimento humano, como consequência da prerrogativa estabelecida pela Lei nº 9.433/1997 (da Política Nacional de Recursos Hídricos) que o abastecimento humano possui prioridade em casos de escassez hídrica.

Estratégia 2 – Irrigação: a estratégia 2 objetiva maior desenvolvimento do setor agrícola, aferindo maior flexibilidade aos usos, conferindo maior prioridade à demanda de irrigação em comparação ao volume meta do reservatório, que é um percentual de volume que deve ser mantido no reservatório de um mês para outro.

Estratégia 3 – Sistema de Reuso e Gestão da Demanda de Água (GDA): a estratégia 3 prevê uma redução de 20% da demanda por parte dos usuários, esta configuração é justificada na proposição de mudanças de hábitos no uso da água mediante a adoção de aparelhos poupadores e por técnicas de reuso.

Tabela 2 – Estratégias de atendimento às demandas e condições de operação dos reservatórios (Fonte: Araújo, Ribeiro e Braga, 2019).

Estratégias de Alocação	Estratégia e Reservatório	Prioridade
Estratégia 1 (E1) – Abastecimento Humano	E1 V30: Volume meta do reservatório definido em 30%	Demanda humana: P1 Vol. Reservatório: P2
	E1 V10: Volume meta do reservatório definido em 10%	Demanda Irrigação: P3 Demanda Pecuária P2
Estratégia 2 (E2) – Irrigação	E2 V30: Volume meta do reservatório definido em 30%	Demanda humana: P1 Vol. Reservatório: P3
	E2 V10: Volume meta do reservatório definido em 10%	Demanda Irrigação: P2 Demanda Pecuária P2
Estratégia 3 (E3) – GDA Sistema de Reuso e Gestão da Demanda de Água	E3V30: Volume meta do reservatório definido em 30%	Demanda humana: P1 Vol. Reservatório: P2
	E3 V10: Volume meta do reservatório definido em 10%	Demanda Irrigação: P3 Demanda Pecuária P2

Fonte: Autoria própria.

Por fim, com o objetivo de simular o comportamento do hidrossistema em possíveis mudanças climáticas, seguindo as aplicações de cenarização em sistemas ambientais de Boran (2018) e Shahraki, Shahraki e Hashemi Monfared (2018), o sistema foi operado em 1 cenário de referência e outros 3 cenários de reduções de afluência, definidos em: Cenário 1 – cenário de referência com os dados reais, Cenário 2 – redução de 20% da vazão de afluência ao reservatório, Cenário 3 – redução de 30% da vazão de afluência e Cenário 4 – redução de 40% da vazão de

afluência, reduções essas que podem acontecer por motivos que variam desde a peculiaridade climática das regiões até mudanças no sistema hídrico à montante do reservatório.

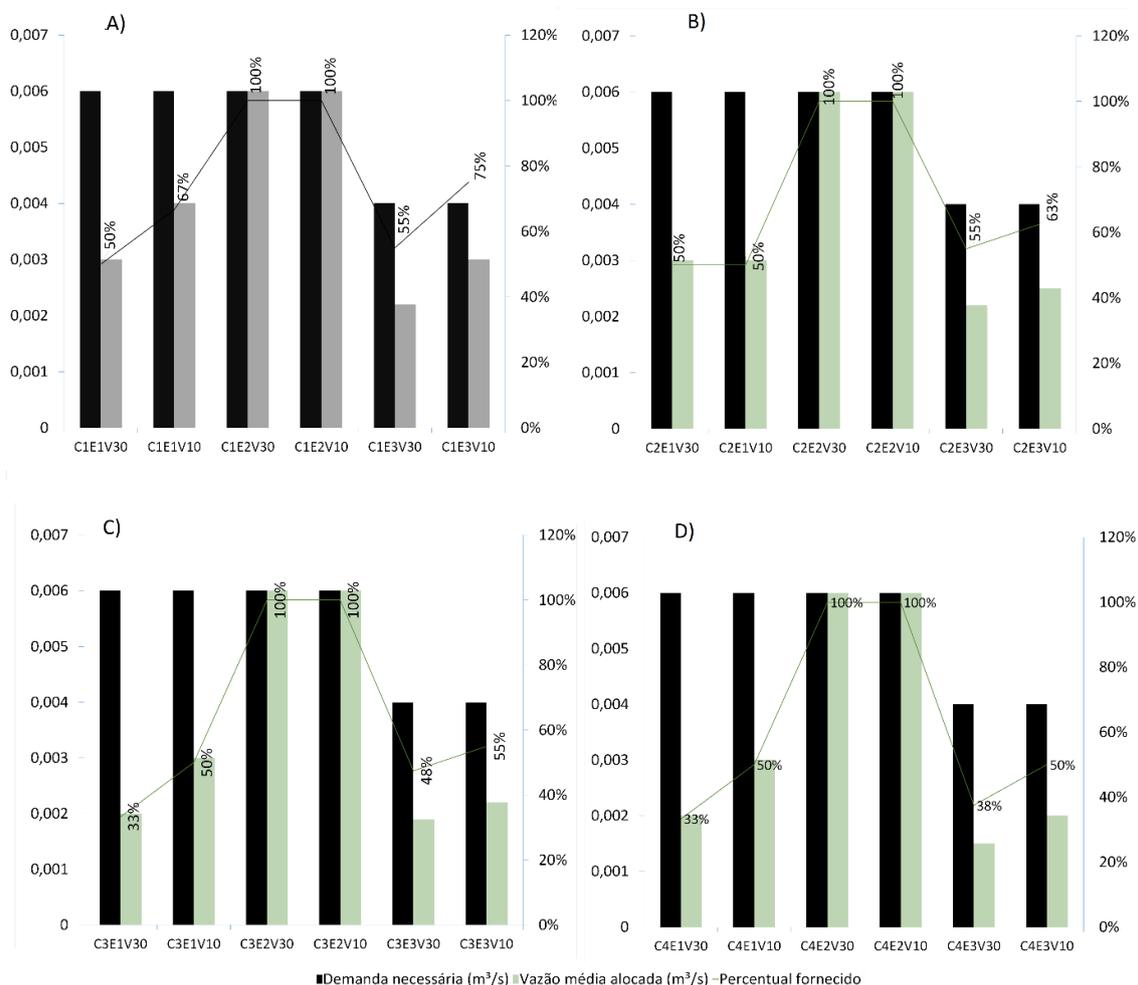
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das estratégias de alocação de águas em prioridades, foi elaborada a rede de fluxo para modelagem matemática do sistema hídrico complexo do reservatório Poções com base nos diferentes usos e fatores hidrológicos. Os resultados são apresentados para a análise do atendimento à irrigação, que é a principal finalidade do reservatório, e para a frequência do reservatório abaixo do volume meta.

Os resultados das simulações apontam para confiabilidade de 100% no o atendimento à demanda humana nos cenários analisados, resultados estes que são congêneres ao estudo para distribuição de água no eixo leste da transposição do rio São Francisco proposto por Farias (2009).

A Figura 7 apresenta as demandas de irrigação e as vazões médias alocadas por estratégia nos cenários avaliados, e o percentual de atendimento da demanda necessária.

Figura 7 – A) Cenário 1 – Cenário de referência; B) Cenário 2 – Redução de 20% da vazão afluente; C) Cenário 3 – Redução de 30% da vazão afluente; D) Cenário 4 – Redução de 40% da vazão afluente: vazões médias alocadas para irrigação por estratégia, percentual de volume meta e percentual de atendimento da demanda necessária



Fonte: Autoria própria.

Nos cenários analisados, a estratégia E1 que prioriza o atendimento humano e a manutenção do volume meta apresenta menores índices de atendimento à demanda de irrigação, o que pode implicar em decréscimo no desenvolvimento econômico da região, porém previne a captação de água em níveis baixos do reservatório, o que se configura em vantagem para a manutenção ecológica e da qualidade da água captada.

As demandas de irrigação são 100% atendidas na estratégia E2, que prioriza a irrigação diante da manutenção do volume meta. Pondera-se que a captação em níveis menores do reservatório, ou abaixo do volume meta, devem dispor de uma análise eficiente, caso necessite de tratamento especial, para sua utilização no abastecimento humano.

A estratégia E3 se configura como uma solução de caráter racional, moderno e sustentável, que reduz o consumo, proporcionando possíveis ganhos nos reservatórios à jusante do rio Paraíba e proporcionando maiores índices de atendimento à demanda de irrigação.

Para análise da confiabilidade do sistema, os percentuais das falhas no atendimento à demanda de irrigação, ou seja, a frequência que a demanda não foi completamente atendida, e a frequência de operação do reservatório abaixo do volume meta são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Falhas do reservatório Poções e de atendimento à demanda de irrigação por estratégia de alocação e cenário (Fonte: elaborado pelo autor, 2020).

Estratégias	Falhas no sistema							
	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Res. (%)	Irrig. (%)	Res. (%)	Irrig. (%)	Res. (%)	Irrig. (%)	Res. (%)	Irrig. (%)
C1E1V30	48,6	50,0	55,6	50,0	55,6	67,0	63,9	67,0
C1E1V10	41,7	33,3	41,7	33,3	41,7	50,0	48,6	50,0
C1E2V30	55,6	0,0	55,6	0,0	62,5	0,0	63,9	0,0
C1E2V10	41,7	0,0	41,7	0,0	48,6	0,0	55,6	0,0
C1E3V30	48,6	50,0	55,6	52,0	62,5	55,0	62,5	60,0
C1E3V10	41,7	25,0	41,7	35,0	48,6	38,0	48,6	47,0

Fonte: Autoria própria.

A partir das falhas no hidrossistema, percebe-se que na estratégia E2, que prioriza a irrigação diante da manutenção do volume, o reservatório opera abaixo do volume meta em maior frequência, constituindo risco para a sustentabilidade do reservatório e para a qualidade da água.

Nota-se que implementar medidas de gestão da água, a partir do uso de mecanismos poupadores e de reuso (E3), podem reduzir a operação abaixo do volume meta e reduzir as falhas no atendimento à irrigação, favorecendo as gerações futuras e a disponibilidade hídrica à jusante do reservatório através da redução do consumo.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática do hidrossistema Poções em rede de fluxo pelo software AcquaNet permitiu observar falhas no atendimento as demandas do sistema, em particular, a operação do reservatório abaixo do volume meta e o atendimento à irrigação.

A metodologia de cenarização pode ser uma ferramenta importante na previsão de medidas de gestão em hidrossistemas, como é no caso de estudo, permitindo simular medidas de gerenciamento, dados de entrada e analisar as respostas do sistema. Desse modo, a estratégia

simulada que induz a utilização de mecanismos poupadores e reuso apresentou melhor atendimento às demandas com menor pressão sobre o reservatório.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a simulação do hidrossistema Poções a partir de previsões de crescimento das demandas, como o aumento dos polos de irrigação da região e a capacidade do reservatório de abastecer uma maior vazão para consumo humano.

RESUMO

As secas atingem sobretudo o Semiárido Brasileiro, desde o início da sua colonização. Embora os impactos provenientes do fenômeno estejam mais sutis com o passar dos séculos, a intensidade das secas torna-se maior. O estudo objetivou verificar quais são os impactos provenientes da seca e as medidas adotadas pelos municípios da Bacia Entendida do rio São Francisco, para os anos de 2013 a 2016. Entre as medidas estruturais estão a construção de cisternas e poços, que foram adotadas por 53,1% e 66,7% dos municípios, respectivamente. Por outro lado, dentre as medidas não-estruturais, apenas 19,8% dos municípios apresentam plano de convivência com a seca. Os resultados permitem concluir que as localidades apresentam posturas predominantemente reativas de convivência com o evento, com instrumentos que visam a construção de infraestrutura hídrica em detrimento de planos de preparação. Isso significa que, enquanto não houver uma mudança de paradigma, com a estruturação de uma gestão proativa de secas, os impactos resultantes do fenômeno continuarão substancialmente severos.

3.1 INTRODUÇÃO

As secas são fenômenos naturais recorrentes e transitórios que atingem regiões por todo o mundo (WILHITE, 2000). No Brasil, a região mais afetada por esses eventos é o Sertão Nordeste, que tem registros das primeiras secas em meados do século XVI, logo após a sua colonização (CAMPOS, 2014). Esses fenômenos causam impactos diversos à população que com eles convive. Tais impactos são ainda mais graves quanto maior a vulnerabilidade da região atingida.

Ressalta-se, porém, que esta é uma condição atrelada ao clima da região Semiárida, ou seja, a sociedade deve aprender a conviver com o fenômeno, preparando-se através das previsões e monitoramento dos eventos futuros (MAGALHAES, 2016). A última seca que atingiu essa região estendeu-se por 7 anos, entre 2012 e 2018, e atingiu todas as regiões do Brasil. De acordo com o Monitor de Secas, o período de maior gravidade, com registros de seca excepcional em mais de 65% do território nordestino, corresponde aos meses de novembro e dezembro de 2016 e janeiro de 2017. Entre os possíveis impactos estão “perdas de cultura/pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência” (ANA, 2020).

Diante do exposto, o artigo tem como objetivo verificar quais os impactos que a seca plurianual 2012-2018 causaram aos municípios da Bacia Estendida do rio São Francisco (BESF), como também as medidas mitigadoras estruturais e não-estruturais que foram adotadas para lidar com tais impactos. A análise tem como base os dados da Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC), com ano de referência em 2017, e considera o quadriênio 2013-2016 como período de análise.

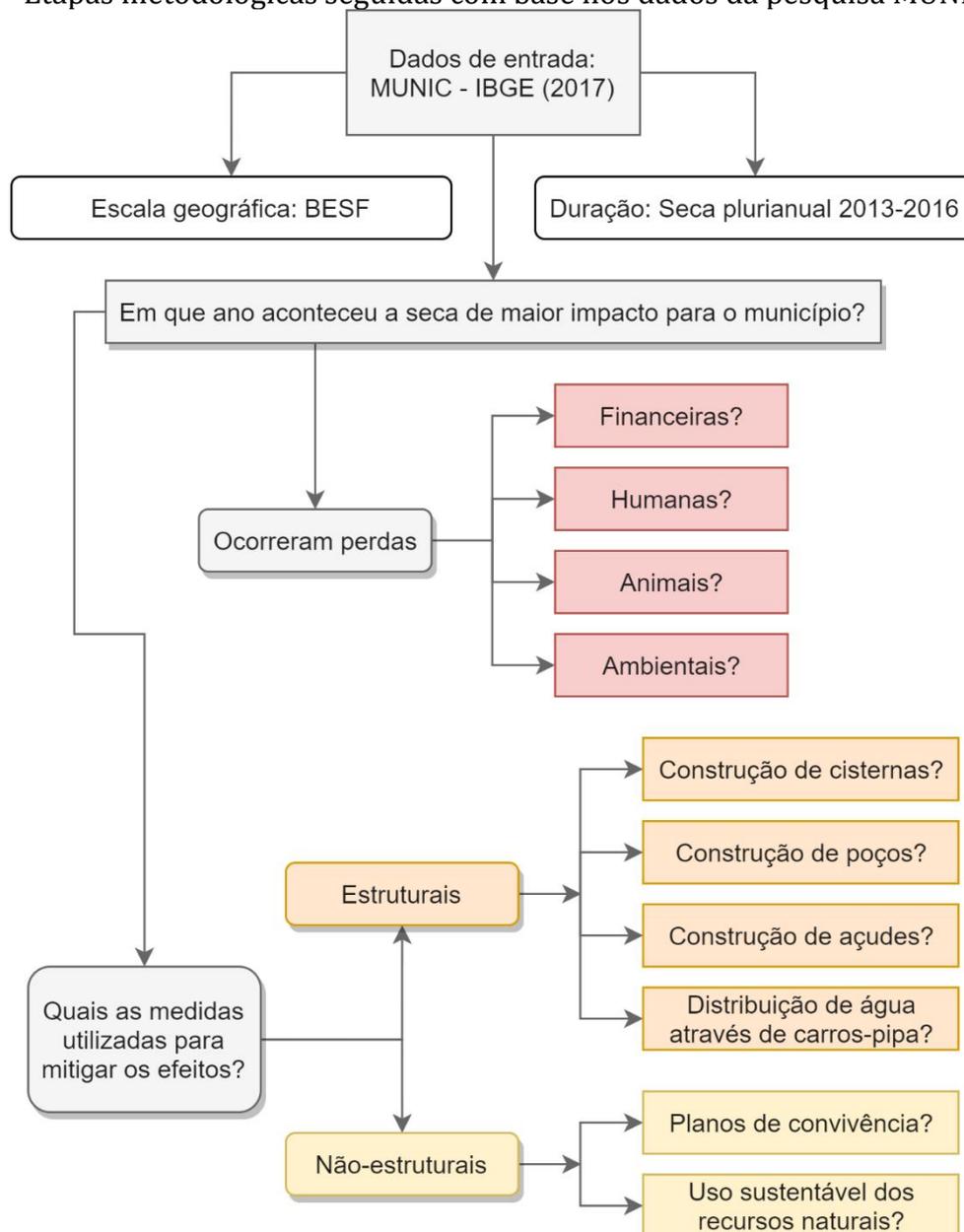
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo tem como dados de entrada informações obtidas a partir MUNIC, publicadas no ano de 2017, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As variáveis analisadas referem-se ao evento plurianual de seca ocorrido no quadriênio 2013-2016, para a escala geográfica da BESF, através dos seus municípios. Os aspectos observados correspondem, primeiramente, à definição do ano de maiores impactos do evento para as localidades. Em seguida, a MUNIC aborda a ocorrência de perdas financeiras, humanas, animais e agrícolas decorrentes da seca.

Posteriormente, expõe quais as medidas adotadas pelos municípios para mitigar os efeitos, que foram divididos nesse artigo em estruturais e não-estruturais. Estes correspondem à existência de Planos de Convivência com a seca e a adoção de ações que incentivem o uso sustentável dos recursos naturais, enquanto aqueles indicam a construção de cisternas, açudes, poços e distribuição de água através de carros-pipa.

Com o intuito de facilitar a visualização de tais informações, visto que a área de estudo compreende uma grande extensão de área geográfica, além de um número elevado de municípios, utiliza-se de técnicas de geoprocessamento que consistem no mapeamento das variáveis de estudo da MUNIC, através do software *ArcGIS Desktop 10.5 desktop*. Todo esse caminho metodológico descrito encontra-se delineado na Figura 8, com todas as etapas postas em resumo.

Figura 8 – Etapas metodológicas seguidas com base nos dados da pesquisa MUNIC do IBGE



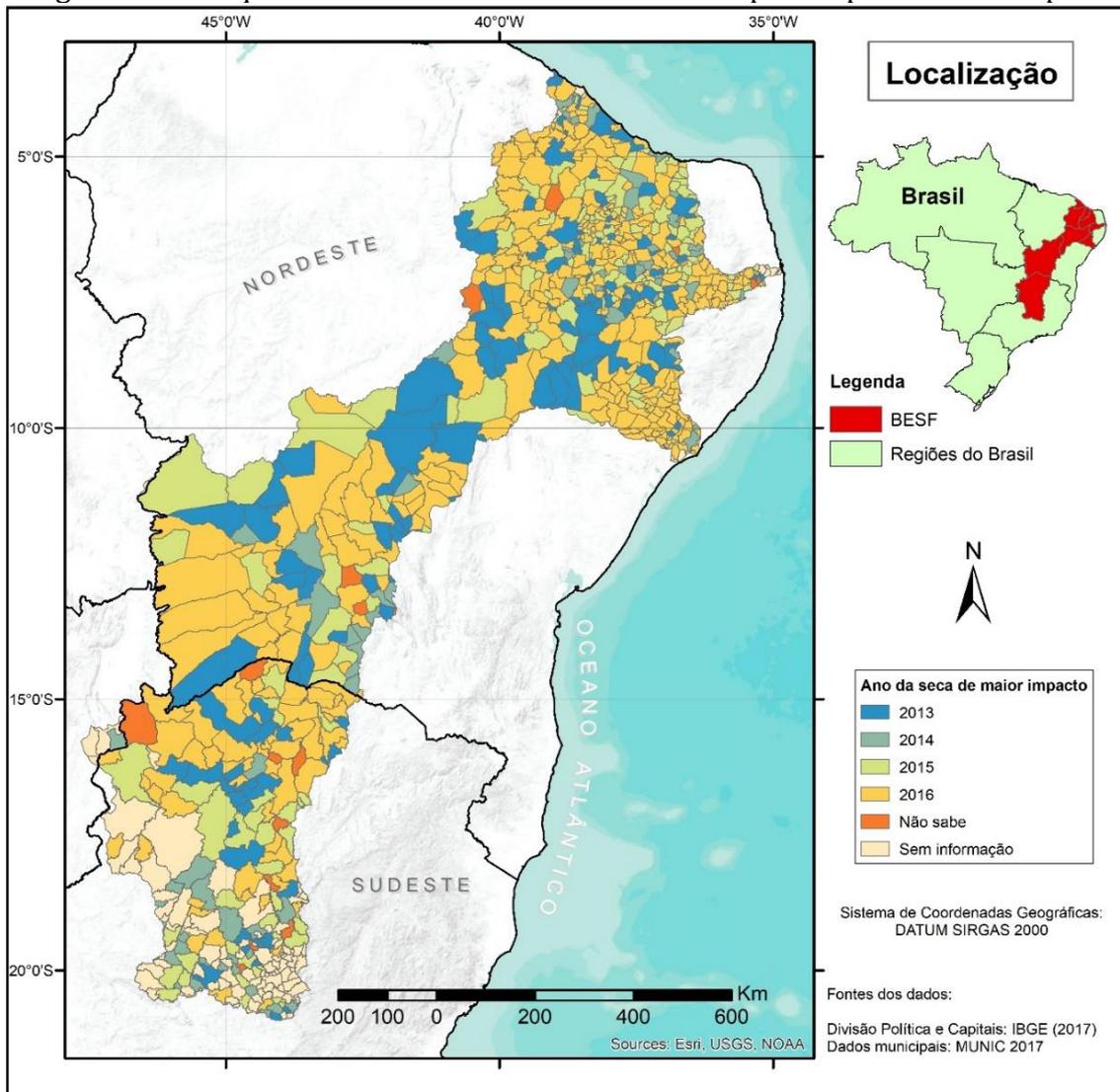
Fonte: Autoria própria.

A Área de estudo compreende a BESF corresponde à Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) em conjunto com as bacias hidrográficas receptoras das águas da transposição do rio São Francisco. Ao todo, a delimitação compreende 10 unidades da Federação, dentre os quais estão sete estados nordestinos, além de Goiás, Minas Gerais e o Distrito Federal. A área de drenagem da BESF estende-se por 787.000 km², dos quais 212.453 km² corresponde às bacias receptoras (ANA, 2018).

A Figura 9 indica a localização da BESF no Brasil e demonstra qual o ano de maiores impactos para cada município, para o intervalo 2013-2016. O ano de piores efeitos registrados

consiste em 2016, de acordo com 42,9% das localidades. Tem-se 2015, 2013 e 2014, respectivamente, com a maior quantidade de dados causados pela seca, conforme 19,0%, 14,3% e 8,6% das municipalidades da BESF.

Figura 9 – Ano que caracteriza o maior número de impactos para os municípios



Fonte: Autoria própria.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são expostos através de mapas que permitem visualizar a espacialização das variáveis a fim de entender como as secas atingiram os municípios da BESF, ao longo do recorte temporal 2013-2016. A Figura 10 demonstra quais as perdas causadas pelas secas aos municípios em estudo. A cor laranja indica que “sim” as localidades registram perdas devido à

seca, enquanto a cor verde indica a não existência de perdas, sejam estas financeiras, humanas, animais e agrícolas.

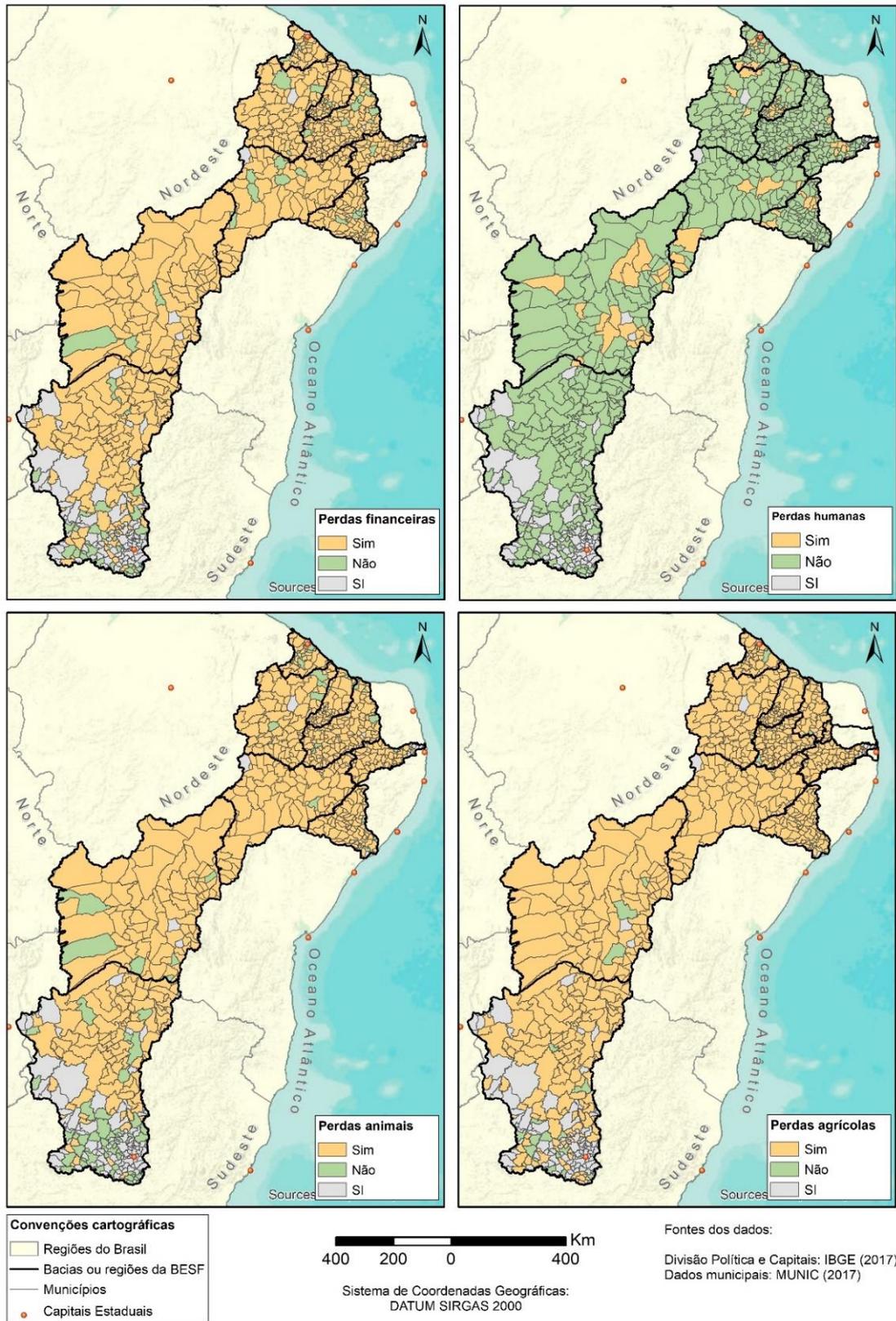
Verifica-se que poucos municípios registraram perdas humanas, diferente do que acontecia nas primeiras secas registradas no sertão nordestino no século XVI (CAMPOS, 2014). O mesmo não ocorre para as demais perdas. Constata-se que as perdas agrícolas ocorreram em 81,8% dos municípios, enquanto as perdas animais em 73,4%. A seca plurianual atingiu a região nordeste a partir de 2012, estendendo-se até meados de 2018. Isso significa que, durante o período de análise, a seca estava em seus anos intermediários, entretanto, um número predominante de localidades já sofria com os seus efeitos.

A fim de minimizar os impactos causados pelo evento, medidas estruturais e não-estruturais são adotadas. No Sertão nordestino brasileiro, há uma cultura de convivência com a seca que consiste em uma gestão predominantemente reativa. Ou seja, ações de mitigação são tomadas apenas após a ocorrência da seca, não há um plano de preparação prévio. Diante disso, as principais medidas estruturais utilizadas são: a construção de cisternas, de poços, de açudes e a distribuição de água através de carros-pipa, conforme apresentadas na Figura 11.

Pouco mais de 50% dos municípios recorreram à construção de cisternas para o armazenamento de água. Destaca-se a atuação do Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), desenvolvido pela Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA) no início dos anos 2000, e visa a construção de 1 milhão de cisternas de placas de cimento para garantir o acesso à água a famílias da zona rural dos municípios do Semiárido Brasileiro (SAB) (ASA BRASIL, 2020).

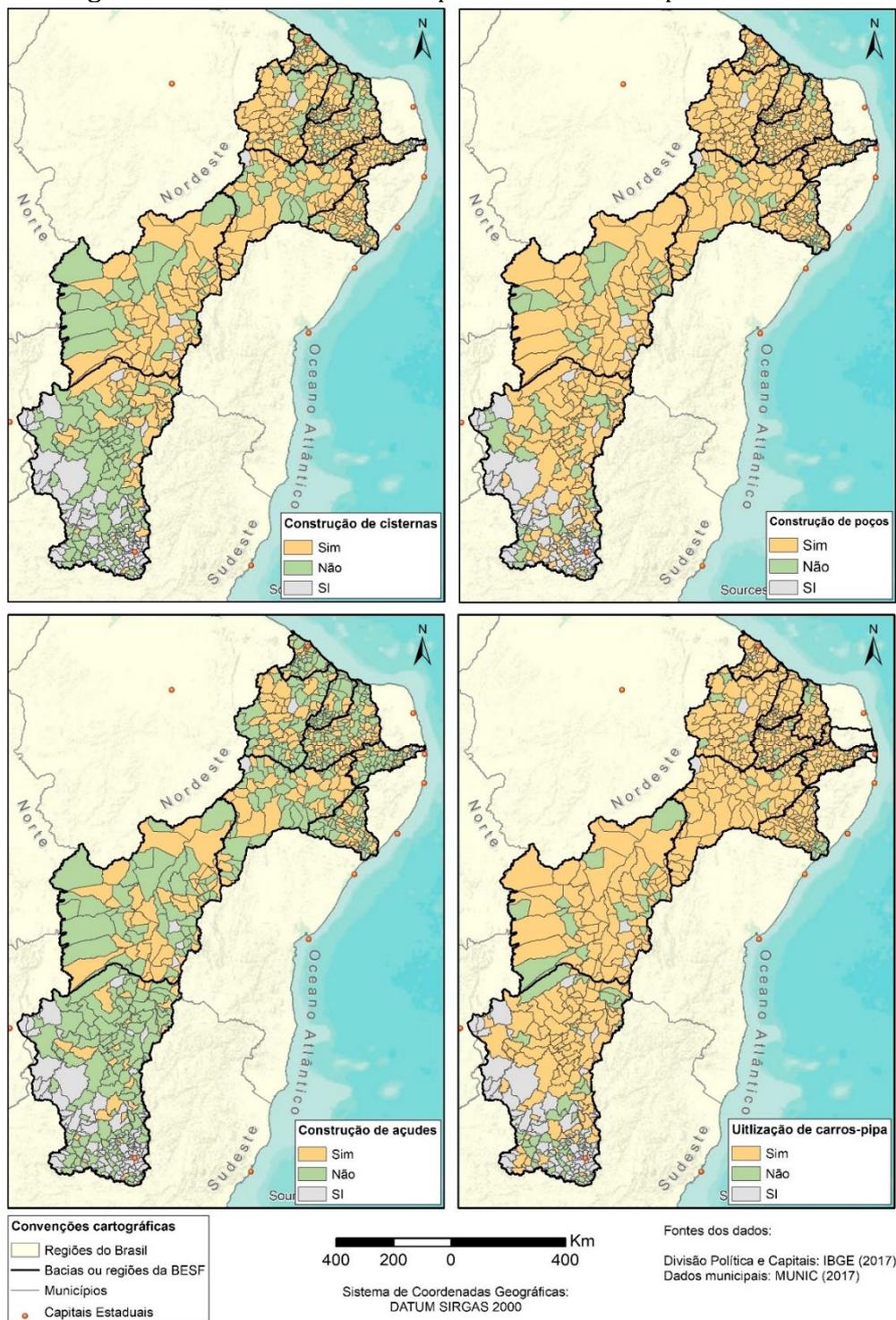
Outra medida estrutural bastante aplicada visa a perfuração de poços para abastecimento. Uma proporção de 66,7% dos municípios da BESF afirma utilizar-se desse método para provimento hídrico. A seca plurianual analisada provocou impactos de grande magnitude, à medida que atingiu, em alguns meses, a intensidade excepcional (ANA, 2020). Muitos reservatórios importantes para o abastecimento colapsaram (INSA, 2020).

Figura 10 – Perdas decorrentes da seca 2014-2017



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Medidas adotadas para minimizar impactos da seca

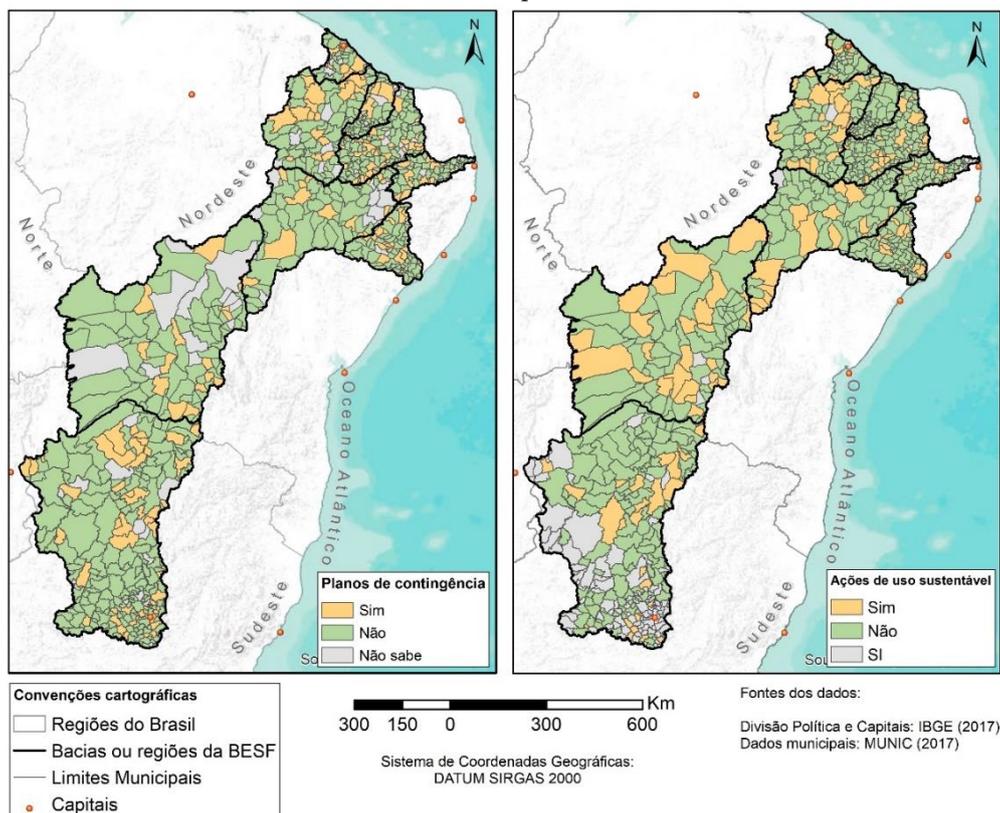


Fonte: Autoria própria.

Quanto às medidas não-estruturais, tem-se a análise sobre a presença ou ausência de planos municipais de convivência ou de prevenção para as secas e também sobre a existência de ações de uso sustentável dos recursos naturais, como por exemplo, a obtenção de energia a partir de fontes renováveis e se há programas de conscientização ou de sensibilização. A Figura 12

expõe que apenas 19,8% dos municípios da BESF apresentam planos de preparação para as secas. Isto significa que, apesar de ser um fenômeno tão recorrente, sobretudo no SAB, os gestores municipais não apresentam um nível de consciência sobre a necessidade desse instrumento para o planejamento da convivência com a seca.

Figura 12 – Medidas não-estruturais adotadas para minimizar os danos causados pela seca



Fonte: Autoria própria.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto tem-se que, embora a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, assim como as bacias hidrográficas receptoras das águas da sua transposição, registre secas cada vez mais intensas, a escala municipal ainda não atua de forma integrativa e participativa na gestão do fenômeno natural em questão. No entanto, essa não é uma dificuldade vista apenas na menor escala de planejamento, ocorre também em níveis estaduais, uma vez que, entre os Estados do Nordeste, apenas o Ceará detém um plano de convivência com a seca que se baseia apenas em ações emergenciais e estruturantes.

Isso significa que, enquanto não houver uma mudança de paradigma, com a estruturação de uma gestão proativa de secas, os impactos resultantes do fenômeno continuarão substancialmente severos, com a implementação de medidas unicamente estruturais, como a

construção de cisternas, poços, açudes ou a distribuição de água por carros pipa. A maior ação de cunho estrutural já levantada na bacia hidrográfica consiste nas vultosas obras de transposição. Apesar do aumento da oferta de água para as bacias receptoras, se essa não for devidamente gerenciada, os impactos decorrentes da escassez hídrica tornarão a ressurgir.

RESUMO

A Bacia Apodi-Mossoró no semiárido do Brasil enfrenta escassez de água. Este problema é exacerbado pela degradação ambiental, efeitos de mudanças climáticas, má gestão dos recursos hídricos, juntamente com uma grande dependência da procura de água na oferta limitada nos recursos de águas subterrâneas. Neste estudo, a modelagem de rede de fluxo foi utilizada para simular estratégias de gerenciamento para a Gestão de Recursos Hídricos na Bacia Apodi-Mossoró. A análise mostra falhas no atendimento às demandas do sistema, amenizadas nas estratégias que incorporam a gestão da demanda de água e o aporte da transposição do Rio São Francisco. Os resultados permitem sugerir medidas adaptativas de economia de água e o reuso como mitigadoras no planejamento do sistema.

4.1 INTRODUÇÃO

A escassez de água é uma realidade vivida pelos habitantes da região semiárida brasileira desde sempre. A crescente demanda hídrica (abastecimentos humano, industrial e agrícola), agravada pela poluição dos mananciais, aumenta a pressão sobre os recursos hídricos se constituindo em problema para o desenvolvimento social e econômico (AMORIM, RIBEIRO e BRAGA, 2016).

Para o atendimento dos usos, os reservatórios possuem destaque primordial pois são insumos de garantia hídrica para o abastecimento humano. Os gestores de recursos hídricos são obrigados a preservar as águas armazenadas nos reservatórios, mantendo os espelhos de água, dentro do possível, nas melhores elevações. (DAMASCENO, 2013; NEZAMI, 2013).

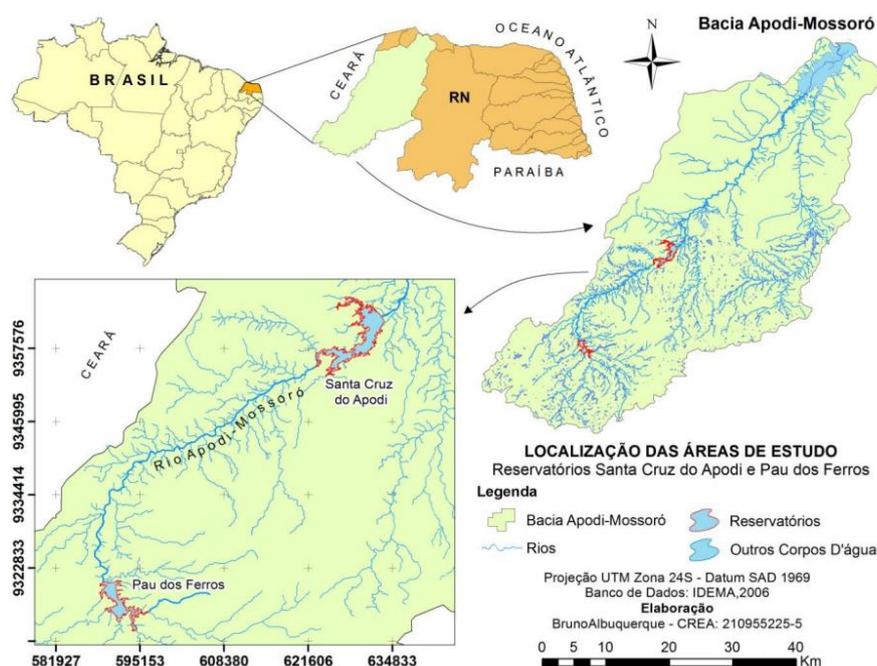
Entre as ferramentas para gestão de recursos hídricos, destaca-se a alocação de água como uma opção eficaz para distribuir água entre os seus diversos usos baseado no conhecimento e cadastramento dos principais usuários e adoção de princípios de uso sustentável, eficiência econômica e equidade social. Esse instrumento de gerenciamento deve ser feito a partir de um planejamento de operação previamente estudado, com base em uma modelagem que defina o comportamento físico do sistema, com o objetivo de maximizar os benefícios advindos da disponibilidade hídrica (CAP-NET, 2008).

Nesse contexto, este estudo realizar a modelagem de rede de fluxo e analisar cenários de gerenciamento da demanda hídrica, em dois reservatórios em regiões de escassez hídrica, sob diferentes estratégias de gestão e operação.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi feito na bacia Apodi-Mossoró (Figura 13), que ocupa uma superfície de 14.276 km², o que corresponde a cerca de 27% do território estadual. A bacia apresenta dominialidade estadual, de modo que é totalmente inserida nos limítrofes do Rio Grande do Norte. A bacia é a segunda maior do estado no abastecimento de 52 municípios. A nascente se encontra na cidade de Luis Gomes, com o rio se estendendo por 120 km até a deságuas entre os municípios de Areia Branca e Grossos (PERH-RN, 1998).

Figura 13 – Localização da área de estudo, reservatórios Santa Cruz do Apodi e Pau dos Ferros no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil



Fonte: Autoria própria.

A análise se restringe aos dois açudes do rio Apodi-Mossoró situados na porção cristalina no médio curso da bacia, devido o envolvimento nos projetos de abastecimento de Mossoró-RN, maior cidade da bacia. São eles a barragem de Pau dos Ferros e a barragem de Santa Cruz do Apodi que compõem o hidrossistema Apodi-Mossoró (SEMARH, 2017).

O reservatório de Pau dos Ferros, localizado no município de Pau dos Ferros ocupa uma área de 259.960 km² e capacidade total de 54 846 000 m³. O reservatório foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e inaugurado em dezembro de 1968 e tem como principal finalidade o abastecimento fornecendo água para os municípios de Pau dos Ferros, Francisco Dantas, Rafael Fernandes, Água Nova, Major Sales e Luís Gomes (ANA, 2015).

O reservatório de Santa Cruz (5°46'02,26"S e 037°47'53,36"W) está localizado no município de Apodi, no trecho médio do rio Apodi/Mossoró. Teve sua construção concluída em 2002 e possui área de 3.413,36 ha e capacidade máxima de aproximadamente 600 milhões de m³ de água (ANA, 2015).

Os reservatórios Santa Cruz e Pau dos Ferros que compõem o hidrossistema Apodi-Mossoró, possuem projetos de sistemas de adutoras complexos (podendo induzir a diversos usos conflitantes pela água). Os projetos analisados neste estudo são: Sistema Alto Oeste para abastecimento de municípios do alto curso da BHAM, a Adutora Apodi/Mossoró para abastecimento do município de Mossoró-RN e região (baixo curso) e o Projeto de Irrigação Santa Cruz na construção da adutora para o Perímetro Irrigado da Chapada do Apodi (CAERN, 2017).

O sistema Alto Oeste tem como objetivo principal abastecer a região do alto curso por um sistema integrado entre os reservatórios Pau dos Ferros e Santa Cruz. Atualmente o reservatório Pau dos Ferros está com volume nulo, desse modo é realizado um estudo de viabilidade de uma adutora expressa vinda do reservatório Santa Cruz para reativá-lo. O nível zero gerou a necessidade de uma adutora emergencial de engate rápido que opera temporariamente do reservatório Santa Cruz para o abastecimento dos municípios que eram abastecidos por Pau dos Ferros (CAERN, 2017).

A Adutora Santa Cruz – Mossoró pode possibilitar a elevação em 60% da atual oferta de água no Município de Mossoró e é justificada pela disponibilidade hídrica da barragem de Santa Cruz e a possível substituição da adutora Açú/Mossoró que capta água dos poços profundos do aquífero Açú em regime de exaustão localizado a jusante da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves e responsável pelo abastecimento do município, tendo em vista a preservação do lençol subterrâneo que está (PMM, 2010). O Projeto de Irrigação Santa Cruz a partir da construção da adutora para o Perímetro Irrigado da Chapada do Apodi objetiva a ampliação do sistema para o desenvolvimento das áreas irrigadas no médio e baixo curso da bacia (CAERN, 2017).

Para auxílio nas tomadas de decisões os atores envolvidos na gestão de recursos hídricos podem contar com o emprego de ferramentas denominadas sistemas de suporte à decisões –

SSD. Os SSD são utilizados como ferramenta para auxiliar a resolução de problemas. Existem, atualmente, alguns SSD que simulam com eficiência sistemas complexos de recursos hídricos, assim como modelos que calculam a demanda. Nesse sentido, é possível simular os sistemas a ponto de tornar-se a alocação da água disponível aos diversos usos, de modo que as condições sociais, econômicas e legislativas sejam verificadas.

Para isto, o desenvolvimento de regras de operação de reservatórios e a modelagem a partir de funções matemáticas, simulam o comportamento físico do sistema e quantificam, dentro de prioridades de atendimento, um julgamento qualitativo do seu uso, a fim de otimizar os possíveis benefícios.

Dentre os softwares de modelagem de alocação de água, é utilizado o AcquaNet, haja visto ser um sistema amigável, de fácil operacionalização entre usuário-computador, o que difere de modelos como CALSIM, Aquarius, RiverWare, Water Ware, que requerem habilidades avançadas (PORTO, 2003).

Foram utilizados os relatórios dos reservatórios disponibilizados pela ANA (2015) para informações dos dados físicos dos reservatórios. As vazões afluentes foram estimadas através de modelo SMAP no período de 1955-1985 a partir dos dados referentes à climatologia coletados do website HidroWeb pertencente à Agência Nacional de Águas. Os dados de evapotranspiração são do estudo de Santos et. al (2016), o qual sistematizou os dados por variação mensal em um ano de referência para a região. Essa variação foi adotada para o intervalo supracitado. Os dados físicos iniciais dos Reservatórios são dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Hidrossistemas e reservatórios: capacidade, volume inicial e meta

Hidrossistema	Reservatório	Legenda	Capacidade (Mm ³)	Volume inicial (Mm ³)	Volume Meta 30%	Volume Meta 10%
BHAM	Santa Cruz	SCruz	599,71	1.358,00	178,47	59,97
	Pau dos Ferros	Pferros	54,85	54,85	15,35	5,48

Fonte: ANA (2015).

A partir das demandas de abastecimento urbano, irrigação e pecuária estimadas neste estudo do presente século, o modelo simula a alocação de água dos reservatórios para ser possível analisar os impactos nas condições volumétricas, fornecimento e falhas as vazões alocadas por diferentes estratégias de prioridades. A Figura 14 apresenta a rede de fluxo elaborada no modelo AcquaNet e utilizada para simular os rendimentos dos dois reservatórios que estão sendo estudados. No modelo de rede de fluxo, as demandas foram estrategicamente

proposição de mudanças de hábitos no uso da água mediante a adoção de aparelhos poupadores e por técnicas de reuso de água.

Segundo os estudos de Segundo Vieira (2008), é possível atingir reduções no consumo dos usuários de água. As tabelas 5 e 6 indicam as alternativas.

Tabela 5 – Custos e economia de água das alternativas por residência

Alternativa	Redução do consumo de água mensal (%)
Captação de água de chuva	36
Torneiras e chuveiros econômicos	21,83
Aparelhos poupadores	38,33

Fonte: VIEIRA (2008).

Tabela 6 – Custos e economia de água das alternativas por edifício

Alternativa	Redução do consumo de água mensal (%)
Torneiras e chuveiros econômicos	21,83
Aparelhos poupadores	38,33
Medição Individualizada	25
Reuso de água em edifícios	36

Fonte: VIEIRA (2008).

A demanda para irrigação nesta estratégia também recebe a influência de um sistema de reuso da água. Um sistema de utilização de água servida para irrigação proposto por Silva et al. (2010) composto por: uma motobomba de 0,5 cv, um filtro de tela com aberturas de 130 µm, uma linha principal em PVC de 32 mm e quatro linhas laterais de polietileno de 16 mm, dotadas de gotejadores autocompensantes de 4,0 L h⁻¹, que como corrobora Dantas et al., (2014), possibilita redução no consumo de 34%.

Estratégia 4 – Flexibilização: a média de água perdida no estado do Rio Grande do Norte no processo de abastecimento é entre 49% e 51% (CAERN, 2017). Diante do desperdício de água da distribuição, Martins et. al (2013) propôs na análise de estratégias de alocação para a Bacia do rio Piranhas-Açu, uma configuração para analisar a remoção da prioridade absoluta da demanda urbana prevista em lei. O objetivo é evitar a penalização para usos mais eficientes. A configuração propõe que depois de atendidos os 60% iniciais da demanda urbana (P1), a água restante começa a atender uma parte das demandas de irrigação e pecuária (P2). Completados 60% das demandas Agrícola e Pecuária, os próximos 40% são fornecidos da demanda urbana (P3) e então é distribuído para os últimos 40% das demandas de irrigação e pecuária (P4). A

Tabela 7 dispõe das Estratégias de atendimento as demandas e condições de operação dos reservatórios.

Tabela 7 – Estratégias de atendimento as demandas e condições de operação dos reservatórios

Estratégias de Alocação	Estratégia e Reservatório	Prioridade
Estratégia 1 - Urbana	E1 V30: Volume meta dos reservatórios definido em 30%	Demanda Urbana: P1 Vol. Reservatório: P2
	E1 V10: Volume meta dos reservatórios definido em 10%	Demanda Irrigação: P3 Demanda Pecuária P2
Estratégia 2 – Agrícola	E2 V30: Volume meta dos reservatórios definido em 30%	Demanda Urbana: P1 Vol. Reservatório: P3
	E2 V10: Volume meta dos reservatórios definido em 10%	Demanda Irrigação: P2 Demanda Pecuária P2
Estratégia 3 – GDA	E4 V30: Volume meta dos reservatórios definido em 30%	Demanda Urbana: P1 Vol. Reservatório: P2
	E4 V10: Volume meta dos reservatórios definido em 10%	Demanda Irrigação: P3 Demanda Pecuária P2
Estratégia 4 – Flexibilização	E3 V30: Volume meta dos reservatórios definido em 30% E3 V10: Volume meta dos reservatórios definido em 10%	Demanda Urbana: 60% - P1 Demanda Urbana: 40% - P3 Vol. Reservatório: P2 Demanda Irrigação: 60% - P2 Demanda Irrigação: 40% - P4 Demanda Pecuária: 60% - P2 Demanda Pecuária: 40% - P4

(1) O volume meta corresponde ao percentual máximo que deve ser mantido no reservatório de um mês para outro.

(2) As prioridades são definidas pelos códigos P1, P2, P3 e P4. A ordem de prioridades é: P1 > P2 > P3 > P4.

Fonte: Autoria própria.

4.3 RESULTADOS

De acordo com as estratégias de alocação definidas, foi elaborado um sistema de rede de fluxo para o cenário de ampliação do sistema hídrico da BHAM com os projetos Alto Oeste, Integração Santa Cruz-Mossoró e a Irrigação do perímetro irrigado de Santa Cruz. As estratégias correspondem, respectivamente, a estratégia de prioridades para a alocação, a fração definida de volume meta e, por fim, a presença ou ausência da contribuição da transposição. Os resultados para as falhas e frequência abaixo do volume meta pode ser conferidas na Tabela 8.

Tabela 8 – Falhas e Frequência abaixo do Volume Meta por estratégia de alocação

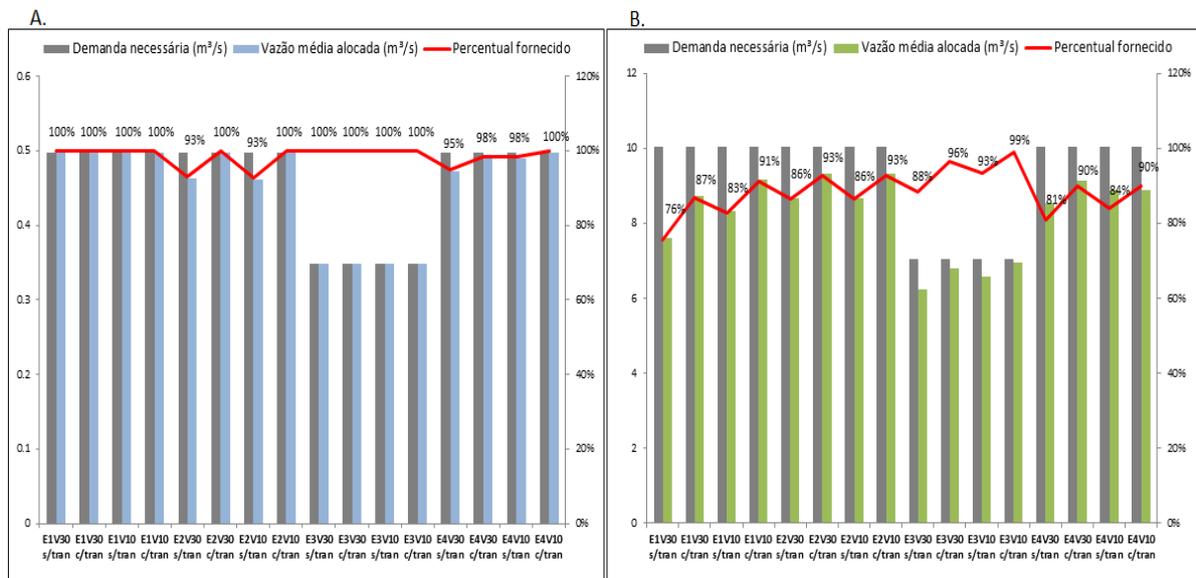
Bacia Apodi-Mossoró	Estratégia	Frequência abaixo do Volume Meta (%)		Falha irrigação (%)	Falha abastecimento urbano (%)	Falha pecuária (%)
		PFERROS	SCRUZ			
Ampliação do Sistema: Adutora Alto Oeste, Adutora Santa Cruz – Mossoró, Adutora Irrigação Santa Cruz.	E1V30 s/trans	22,78	17,50	21,99	0,00	17,59
	E1V30 c/trans	16,94	13,06	11,11	0,00	8,05
	E1V10 s/trans	7,50	8,33	15,37	0,05	13,06
	E1V10 c/trans	0,00	0,00	7,59	0,00	0,00
	E2V30 s/trans	51,11	48,89	6,95	6,95	11,85
	E2V30 c/trans	31,11	30,83	4,44	3,82	4,26
	E2V10 s/trans	31,11	28,33	12,41	4,18	12,17
	E2V10 c/trans	16,11	16,11	4,63	1,08	4,31
	E3V30 s/trans	12,50	9,72	10,42	0,00	0,00
	E3V30 c/trans	2,22	2,22	2,96	0,00	0,00
	E3V10 s/trans	7,50	5,83	6,53	0,00	0,00
	E3V10 c/trans	0,00	0,00	0,92	0,00	0,00
	E4V30 s/trans	25,28	21,67	15,72	9,31	14,68
	E4V30 c/trans	20,18	15,42	12,83	7,06	11,39
	E4V10 s/trans	18,06	15,28	9,47	7,38	8,96
	E4V10 c/trans	6,18	4,32	9,49	5,97	8,33

Fonte: Autoria própria.

O reservatório Pau dos Ferros operou em maior frequência abaixo do volume meta devido a menor capacidade volumétrica que o reservatório Santa Cruz e menor demanda requerida. As estratégias 2 e 4 que favorecem o uso das águas para irrigação, não são recomendadas se for optado por manter os reservatórios em maior nível (Volume meta 30%).

As vazões alocadas pelo modelo (Figura 15) variam de acordo com a estratégia de alocação inserida no mesmo. As estratégias 1 e 3 que priorizam o abastecimento urbano e a manutenção do volume meta do reservatório implicam em vazão inferior de irrigação frente ao cenário 2 que propõe prioridade P2 para Irrigação e P3 para manutenção do Volume meta. A Figura 15 apresenta os resultados da confiabilidade do sistema em função das demandas existentes a partir dos diferentes usos considerados. Quanto mais próximo de 100% o percentual fornecido, maior é o atendimento das demandas necessárias e mais confiável o sistema.

Figura 15 - A. abastecimento urbano. B. Irrigação: vazões médias alocadas por uso e estratégia e o percentual de atendimento da demanda necessária



Fonte: Autoria própria.

No atendimento às demandas necessárias, a Estratégia 1 – Urbana apresentou 100% de percentual fornecido (Figura 15) para o abastecimento urbano, porém maiores falhas para irrigação (Tabela 8) dada a prioridade de manutenção do reservatório. A falha resulta em prejuízos para o desenvolvimento econômico das regiões.

O percentual fornecido para irrigação na Estratégia 2 – Agrícola assume os melhores resultados para o padrão de consumo de 10,51m³/s. A vazão alocada para as estratégias que admitem volume meta em 10% é superior, dada a possibilidade da captação mesmo em níveis emergenciais dos reservatórios. A vantagem desta configuração é a maior capacidade de atendimento às demandas de irrigação, sendo a água um insumo necessário para o desenvolvimento econômico. Porém, na instabilidade das chuvas e presença de longos períodos de estiagem, operar os reservatórios em níveis abaixo de 10% é um risco para o atendimento das necessidades vitais da população no abastecimento urbano em possíveis regimes de seca extrema.

A flexibilidade da prioridade absoluta do abastecimento urbano da Estratégia 4 – Flexibilidade possibilitou maior percentual fornecido para irrigação, de modo que o déficit de demanda como insumo ao desenvolvimento agrícola é reduzido e compartilhado entre os outros usuários, porém, ressalva-se que a estratégia está em desacordo com a Lei das Águas que prioriza o abastecimento urbano em situação de escassez. A estratégia prejudica o usuário final do

abastecimento, o que é um erro, pois a penalização da ineficiência do abastecimento e perdas no abastecimento deve ser imposta as companhias responsáveis pela distribuição.

A Estratégia 3 – GDA apresenta os melhores percentuais de fornecimento para irrigação, chegando a alocação de 99% da demanda necessária se operada em volume meta de 10%, associada ao aporte da transposição do Rio São Francisco ainda mantendo eficiência total do abastecimento urbano. A redução da demanda resulta em maior confiabilidade do sistema e redução na frequência de operação dos reservatórios em nível baixo de água (Tabela 5).

Diante do quadro de falhas de atendimento, reduzir a demanda necessária, a partir da gestão da demanda de água e principalmente com técnicas de reuso, apresenta-se com maior eficácia para atender o fornecimento do abastecimento urbano e da irrigação para maiores percentuais diante das outras estratégias.

4.4 CONCLUSÕES

Por conseguinte, a resposta de alocação de água como resposta ao planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos permitiu observar falhas no atendimento as demandas do sistema. A estratégia que promove flexibilização das prioridades de atendimento dos usos, como a prioridade absoluta do abastecimento humano em relação a outros usos, indica perdas de abastecimento nos outros setores, como especialmente a irrigação.

A flexibilização para atenuar as perdas no abastecimento urbano crescem vazão para o setor agrícola, porém penaliza o usuário da água e é contra o que é previsto na Lei das Águas não sendo recomendada como estratégia de alocação.

Sugere-se ainda que uma associação efetiva de um sistema de gerenciamento de recursos hídricos e dos instrumentos da política nacional de recursos hídricos, associados a um sistema de gestão da demanda de água dotado de alternativas de reuso, proposto na Estratégia 3 – GDA, poderiam resultar em um melhor atendimento às demandas hídricas.

* A primeira versão deste trabalho foi publicada nos anais do I Congresso Virtual de Estudantes e Profissionais de Engenharia Ambiental e Sanitária (I CONVEPEAS), ano 2020.

RESUMO

No contexto dos riscos que a gestão hídrica ineficiente pode trazer aos aspectos sanitários, destaca-se, especialmente em regiões em desenvolvimento, o déficit na coleta e tratamento dos esgotos no Brasil. Além disso, a escolha da tecnologia para o tratamento de esgotos domésticos é uma abordagem de difícil processo de decisão e deve adotar uma abordagem holística e multidisciplinar. Deste modo, este estudo aplicou o método de análise multicritério VIKOR, com o objetivo de desenvolver um sistema de apoio à decisão para escolha do tratamento de esgoto doméstico para regiões em desenvolvimento no Brasil. A abordagem considerou 13 critérios distribuídos entre os aspectos ambientais, sociais e econômicos, para a classificação de 7 de alternativas de tecnologias de tratamento de águas residuárias. A partir da consulta aos especialistas pela literatura, foi aferido pesos aos critérios e, considerados os aspectos avaliados, o sistema que combina lagoa anaeróbia e lagoa facultativa foi a de melhor desempenho, enquanto a alternativa de sistema de reator UASB associado a um pós-tratamento foi a de menor preferência. A aplicação do método VIKOR proporcionou maior robustez para o processo de tomada de decisão, bem como uma abordagem holística da escolha da tecnologia de tratamento de águas residuárias.

5.1 INTRODUÇÃO

A deficiência da gestão hídrica, no que diz respeito à coleta e tratamento de esgoto nas comunidades brasileiras, causa consequências diretas que impactam desde a qualidade dos sistemas ambientais, até aspectos quantitativos na redução da capacidade dos usos múltiplos dos recursos hídricos (CRIZEL e LARA, 2020).

A partir do crescimento populacional e econômico, o esgotamento sanitário assume papel fundamental na prevenção de riscos, dentre outros, à contaminação, transmissão de doenças, redução da disponibilidade hídrica, maus odores, aumento da complexidade e aumento de custos de implantação e operação de estações de tratamento de efluentes (ROSA et al., 2020).

De acordo com o Atlas Esgoto (2017), o panorama dos serviços de esgotamento sanitário para a população urbana no Brasil dá-se em 43% que possuem esgoto coletado e tratado, 12%

que se utilizam de solução individual para tratamento, 18% que têm seu esgoto coletado e não tratado e 27% que não possuem qualquer serviço de esgotamento sanitário.

A diversidade de tecnologias disponíveis, somada à variedade de critérios, muitas vezes conflitantes entre si, torna a escolha da tecnologia de tratamento de efluentes uma questão de natureza complexa e que demanda ferramentas de apoio à decisão (GOFFI et al., 2017). A escolha, então, deve ser feita de modo estruturado, considerando o maior número de critérios e deve abordar as características técnicas, ambientais, sociais e econômicas das tecnologias de tratamento (FUKASAWA e MIERZWA, 2020).

Dentre as técnicas de apoio à decisão, destaca-se o método VIKOR (ViseKriterijumskaOptimizacija i KompromisnoResenje), que significa “otimização Multicritério e Solução de Compromisso” (DUCKSTEIN; OPRICOVIC, 1980). O método apresenta o índice de classificação multicritério com base na medida de “proximidade” da solução “ideal”. Em resumo, o método VIKOR consiste em classificar alternativas a partir das melhores escolhas, hierarquizando-as em relação aos critérios estabelecidos.

Diante desse contexto, o presente estudo objetiva utilizar o método VIKOR para desenvolver um sistema de apoio à decisão para escolha do tratamento de esgoto doméstico em regiões em desenvolvimento no Brasil, a partir de uma hierarquização das tecnologias, considerando critérios ambientais, sociais e econômicos.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O método VIKOR é um método de análise multicritério baseado em uma função de agregação de proximidade com o ideal. O fundamento provém do método de programação de compromisso (OPRICOVIC e TZENG, 2007). O método representa a distância da solução ideal, considerando a importância relativa de todos os critérios, e um equilíbrio entre satisfação total e individual.

O método foi desenvolvido a partir da métrica utilizada no estudo de análise multicritério por Leden, Yu e Eng, 1973. (1973) no conceito de programação por compromisso. O algoritmo do VIKOR, a partir de um conjunto de critérios contraditórios presentes, objetiva a construção de um ranking de alternativas, a solução de compromisso e os intervalos de estabilidade como consequência dos pesos iniciais dos critérios (KEUNECKE, HEIN e KROENKE, 2015).

O resultado de saída, disposto pelo método VIKOR, é um ranking de alternativas através de quatro etapas:

Etapa 1: Determinar os maiores valores f_i^* e os menores valores f_i^- de toda a função, $i = 1, 2, \dots, n$.

$$f_i^* = \max_j f_{ij}$$

$$f_i^- = \min_j f_{ij}$$

Sendo:

f_i^* : valor máximo apresentado pelo indicador i pelo conjunto de alternativas

f_i^- : valor mínimo apresentado pelo indicador i pelo conjunto de alternativas; e

f_{ij} : o valor do indicador i atribuído a alternativa j .

Etapa 2: Calcular os valores S_j (é o grupo de utilidade máxima) e R_j (é o peso individual mínimo), $j = 1, 2, \dots, n$, nas relações, em que w_i são os pesos dos critérios.

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)}$$

$$R_j = \max_j \left[\frac{w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right]$$

Sendo:

S_j : grupo de utilidade máxima da alternativa j ;

w_i : peso estratégico (normalmente $v=0.5$);

f_i^* : valor máximo apresentado pelo indicador i atribuído pelo conjunto de alternativas;

f_{ij} : o valor do indicador i atribuído a alternativa j ;

f_i^- : valor mínimo apresentado pelo indicador i pelo conjunto de alternativas; e

R_j : peso individual mínimo da alternativa j .

Etapa 3: Calcular os valores, Q_j $j = 1, 2, \dots, j$, pela relação, em que $S^* = \min_j S_j$, é introduzido $S^- = \max_j S_j$ e $R^* = \min_j R_j$, $R^- = \max_j R_j$, o valor de v é regularmente concebido como $v = 0,5$.

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + \frac{(1 - v)(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)}$$

Sendo:

v : 0,5;

Q_j : score final da alternativa j ;

- Q_j : grupo de utilidade máxima da alternativa j ;
 S^* : grupo mínimo de utilidade máxima do conjunto de alternativas;
 S^- : grupo máximo de utilidade máxima do conjunto de alternativas;
 R_j : peso individual mínimo
 R^* : menor peso individual mínimo
 R^- : e maior peso individual mínimo.

Etapa 4: Ordenar de modo decrescente as alternativas pelos valores obtidos por Q . Deste modo, o método apresenta como dado de saída a classificação das alternativas como ferramenta de apoio à decisão.

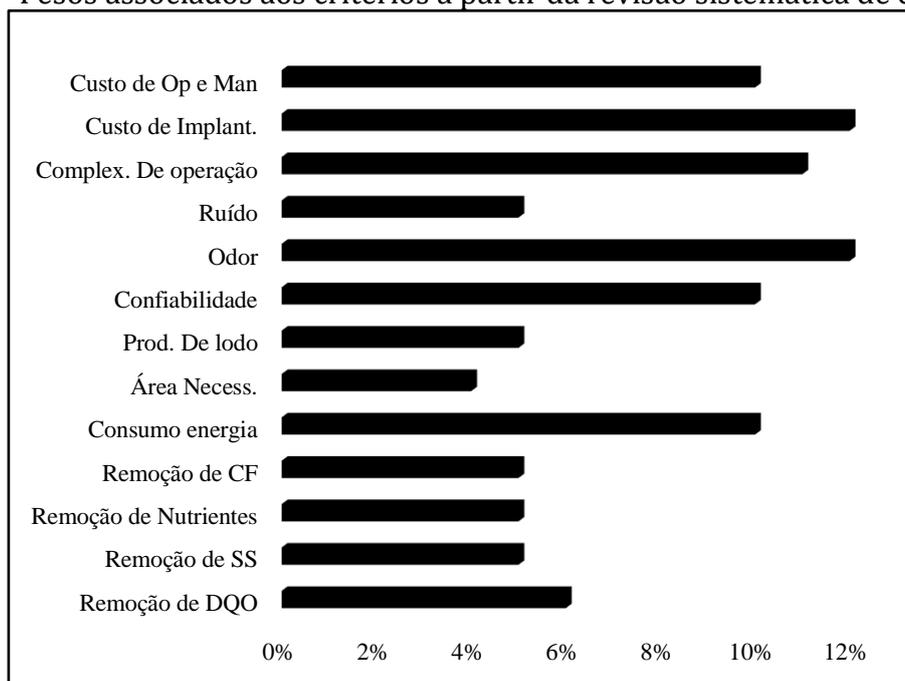
Caracterização da Análise Multicritério: a escolha da tecnologia de tratamento de esgoto doméstico depende das circunstâncias que envolvem a localidade atendida. Nesse sentido, seguindo as metodologias de Von Sperling (2016), Mahjouri et al. (2017) e Arroyo e Molinos-Senante (2018), a análise multicritério foi baseada em um estudo de caso hipotético para regiões conceituadas como “em desenvolvimento” definidas por Von Sperling (2016), que atribui importâncias aos critérios envolvidos na escolha da tecnologia em “regiões desenvolvidas e em desenvolvimento”.

A partir do Atlas esgoto (2017), enumerou-se tecnologias de tratamento de esgoto doméstico comumente utilizados no Brasil. Desse modo, sete alternativas de tecnologias de tratamentos foram avaliadas: Wetlands construídos (A_1); Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa (A_2); Reator Anaeróbio (UASB) (A_3); Fossa filtro/Fossa Séptica + Filtro aeróbio + Tanque inhoff + Filtro biológico (A_4); Lagoa Facultativa (A_5); Reator Anaeróbio + Filtro Biológico (A_6) e Lodos Ativados convencionais (A_7). Seguindo os estudos de Molinos-Senante et al. (2018) e Von Sperling (2016), 13 critérios foram considerados e, através da consulta aos especialistas, ponderados na avaliação da sustentabilidade para as tecnologias, sendo agrupados em 8 critérios ambientais (C1), 3 critérios sociais (C2) e 2 critérios econômicos (C3). Por conseguinte, analisou-se os critérios de aspectos ambientais: eficiência de remoção de DQO, eficiência de remoção de sólidos suspensos, eficiência de remoção de nutrientes, eficiência de remoção de coliformes totais, consumo de energia, área necessária, produção de lodo e confiabilidade. Da mesma forma, para os critérios de aspectos sociais: odor, ruído e complexidade de operação. Por fim, os critérios de aspectos econômicos considerados foram: custo de implantação e custo de operação e manutenção.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da consulta aos especialistas, os valores dos pesos dados aos critérios na escolha da tecnologia de tratamento de efluentes para regiões em desenvolvimento foram estabelecidos no cenário de referência para regiões em desenvolvimento. A Figura 16 apresenta a importância dos critérios.

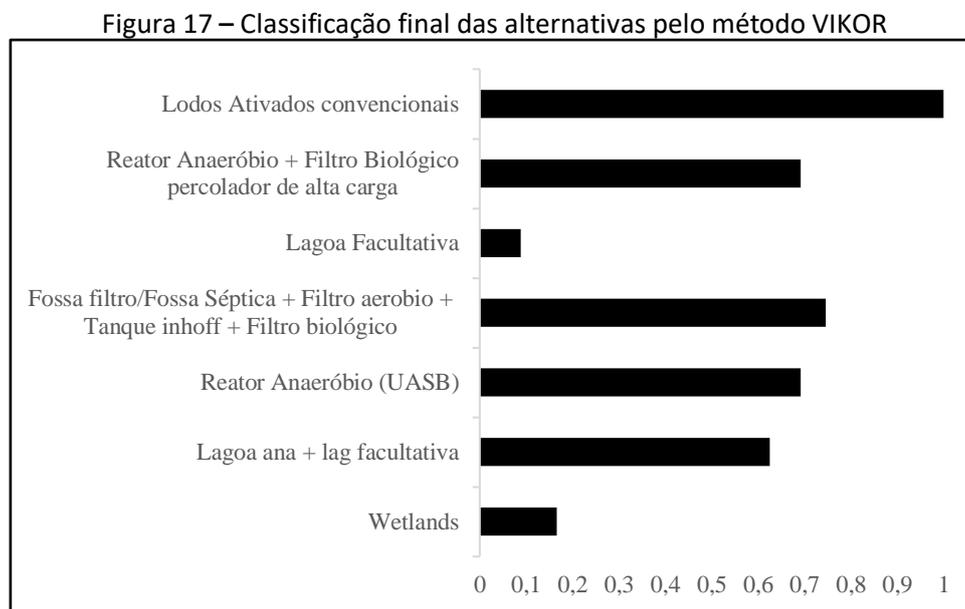
Figura 16 – Pesos associados aos critérios a partir da revisão sistemática de especialistas



Fonte: Autoria própria.

Nesta proposta de método de apoio à decisão, define-se os odores gerados pelo sistema de tratamento de esgotos domésticos e os custos de implantação como os critérios mais importantes para a escolha da tecnologia em regiões em desenvolvimento. Destaca-se ainda que os critérios de consumo de energia e complexidade de operação, que implicam custos inerentes ao processo, podem ser fatores limitantes da escolha pela dificuldade de regiões em desenvolvimento no aspecto de investimento financeiro. Capacidade de investimento essa que difere os pesos atribuídos aos critérios para regiões desenvolvidas e distingue o processo de escolha de tecnologias nessas regiões. Ressalta-se que alguns critérios, que são agrupados em critérios principais (ambientais, sociais e econômicos), possuem natureza interdisciplinar, percebendo-se assim que são reciprocamente conectados entre si.

A partir do método VIKOR, com os pesos dos critérios na ordenação das alternativas, tem-se o vetor de decisão para a preferência das tecnologias propostas. A Figura 17 apresenta a hierarquização ou classificação final das alternativas de tratamento em análise.



Fonte: Autoria própria.

Diante dos resultados, as alternativas de tecnologias de tratamento de esgoto doméstico em regiões em desenvolvimento foram classificadas como Lagoa Facultativa > Wetlands construídos > Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa > Reator UASB = Reator Anaeróbio + Filtro Biológico > Fossa filtro/Fossa Séptica + Filtro aeróbio + Tanque inhoff + Filtro biológico > Lodos ativados convencionais.

O sistema de lagoas facultativas (A₅) recebeu o melhor índice de desempenho, justificado por possuir vantagens em relação a baixa geração de odores, ausência de consumo de energia, e baixos custos de implantação e operação, que são fundamentais na hierarquia. A tecnologia de wetlands construídos (A₁) apresentou segunda preferência, sendo a alternativa que possui vantagem importante em relação a todas as outras alternativas com a não produção de lodo, porém é menos vantajosa nos aspectos de geração de odores.

O sistema de lagoas (A₂) apresentou-se em terceiro, com uma alternativa essa que possui baixa complexidade operacional, custo baixo, mas que, ainda que necessite de menor área quando comparada às lagoas facultativas isoladas (A₅), devido á anaerobiose, possui desvantagem, em relação a mesma, no critério mais importante, odor.

O reator UASB (A₃) e a tecnologia associada de um Reator UASB + Filtro Biológico (A₆), para estes padrões de interesse, apresentaram igualdade de preferência em quarto lugar. O reator UASB apresenta baixo requisito de área, critério que possui baixa relevância nestas regiões, porém a produção de lodo associada a baixa eficiência no tratamento dos parâmetros ambientais, justificam a inferior classificação. Do mesmo modo a tecnologia que provê um pós-tratamento ao reator UASB (A₆), pois apresenta custos consideráveis e alta complexidade operacional, critérios esses preponderantes em regiões em desenvolvimento.

Os sistemas com base na fossa séptica (A₄) receberam a penúltima preferência, pois, mesmo que possua baixa demanda de área e energia, custos reduzidos de implantação e operação e baixa complexidade de operação, apresenta elevada possibilidade de geração de maus odores, aspecto considerável entre os pesos associados aos critérios de escolha.

O sistema de lodos ativados convencionais (A₇) se destaca pela eficiência na remoção da matéria orgânica, no baixo requisito de área, e na redução significativa de maus odores, porém recebeu a última preferência. O resultado se justifica nas desvantagens nos aspectos de complexidade de operação, e altos custos de implantação e operação, tornando a tecnologia menos preferível para o cenário proposto.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de tomada de decisão em projetos de saneamento é de extrema importância em regiões em desenvolvimento que possuem poucos recursos financeiros e técnicos. Neste contexto, o presente estudo, a partir de critérios nos aspectos ambientais, sociais e econômicos, realizou a avaliação de desempenho das principais alternativas de tecnologias de tratamento de esgoto, para regiões em desenvolvimento, utilizando o método de análise multicritério VIKOR.

Metodologicamente, infere-se que a abordagem pode ser utilizada para diferentes regiões no Brasil, de modo que possibilita o agrupamento de critérios de caráter conflitantes e multidisciplinares, gerando uma tomada de decisão que abrange a problemática de modo amplo e holístico.

O modelo apresentou resultados satisfatórios, contudo, devido ao caráter genérico da região em estudo, faz-se necessários um número maior de testes que abordem questões específicas das localidades. Outra possibilidade, como sugestão para trabalhos futuros, é a adição de critérios que abordem, por exemplo, o marketing ambiental, esse tão proveitoso nos sistemas de Wetlands construídos, potencial de reuso, dentre outros fatores que possam influenciar no processo de escolha da tecnologia de tratamento dos esgotos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, A. L.; RIBEIRO, M. M. R.; BRAGA, F. C. Conflitos em bacias hidrográficas compartilhadas: O caso da bacia do rio Piranhas-Açu/PB-RN. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 36-45, 2015.
- ANA – Agência Nacional das Águas. **Programa Nacional de Consolidação do Pacto Nacional pela Gestão das Águas - Relatório Progestão 2015** - Rio Grande do Norte 2015. Disponível em: http://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/progestao-1/certificacao/2015/certificacao-das-metas-federativas/relatorios-progestao-015/rn_relatorio-progestao-2015.pdf. Acesso em: Junho de 2017.
- ANA – Agência Nacional de Água. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas**. 2018. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=586&currTab=distribution> Acesso em: 12 jun. 2019.
- ANA – Agência Nacional de Água. **Monitor de Secas**. 2020. Disponível em: <http://monitordesecas.ana.gov.br/>. Acesso em: 25 jul. 2020.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília**, 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/> 10 jul. 2020.
- ARAÚJO, Matheus Duarte de; RIBEIRO, Márcia Maria Rios; BRAGA, Cybelle Frazão Costa. Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1167-1181, 2019.
- ARROYO, Paz; MOLINOS-SENANTE, María. Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 819-827, 2018.
- ASA BRASIL – Articulação no Semiárido Brasileiro. **Programa 1 Milhão de Cisternas**. Disponível em: <<https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc>>. Acesso em: 30 jul. 2020.
- AVARIDEH, Fariba; ATTARI, Jalal; MORIDI, Ali. Modelling equitable and reasonable water sharing in transboundary rivers: the case of Sirwan-Diyala river. **Water Resources Management**, v. 31, n. 4, p. 1191-1207, 2017.
- BORAN, Fatih Emre. A new approach for evaluation of renewable energy resources: A case of Turkey. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, v. 13, n. 3, p. 196-204, 2018.
- BRASIL. **Lei nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Lei dos Recursos Hídricos**. Diário da República, 1997.
- BRITO, Virgínia da Costa. **Análise de perdas de água por meio de otimização para o projeto de integração do rio São Francisco, eixo leste-bacia do rio Paraíba**. 2019. 107 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

CAMPOS, José Nilson B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 28, n. 82, p. 65-88, oct./dez. 2014.

CAP-NET. Conflict resolution and negotiation skills for integrated water resources management. Training Manual. Rietfontein, **International Network for Capacity Building in Integrated Water Resources Mangement**, 2008.

COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTO DO ESTADO DO RIO GRAND DO NORTE (CAERN). **Ações para o abastecimento do Sistema em Colapso**. Disponível em: <<http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/DOC/DOC000000000145758.PDF>> Acesso em: Julho de 2017.

CRIZEL, Marcelo Guerreiro; LARA, Ana Claudia. Avaliação da eficiência de uma estação de tratamento de efluentes instalada em uma universidade federal: questão de gestão ambiental. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 3, 2020.

DA SILVA, Erika Lira; VIEIRA, Allan Sarmiento. Simulação integrada dos recursos hídricos nos reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo na Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 5, p. 892-901, 2017.

DAMASCENO, A. P. D. **O enquadramento dos corpos d'água segundo os usos preponderantes sob a perspectiva da participação social**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Universidade Federal da Bahia/UFBA, Salvador, 2013.

DANTAS, D.C.; FRANÇA E SILVA, E.F.; MÉLO, R. F.; DANTAS, M.S.M.; SILVA, G.F; SILVA, M.M. (2014) Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando efluente doméstico. **Revista Irriga**, v. 1, n. 1, p. 179-189.

DE NYS, Erwin; ENGLE, Nathan L.; MAGALHÃES, Antonio Rocha. Secas no Brasil: Política e gestão proativas. 1. ed. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Banco Mundial, 2016. 292 p.

FABBRO NETO, Francisco; SOUZA, Marcelo Pereira de. Leitura integrada da gestão dos recursos hídricos com o uso do solo em Caraguatatuba (SP). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 853-862, 2017.

FARIAS, Emmanuel Eduardo Vitorino. **Distribuição da água do projeto de integração do rio São Francisco no Estado da Paraíba-eixo leste: análise de perdas**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

FUKASAWA, Bruno Nogueira; MIERZWA, José Carlos. Modelo de suporte à decisão para implantação de programas de reúso não potável como ferramenta de planejamento/Decision support model for non-potable reuse programs as a planning tool. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 14604-14641, 2020.

- GOFFI, Andreia dos Santos et al. **Uso da análise multicritério para a seleção de tecnologias de tratamento de efluentes**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Agrícola Municipal**. 2018a. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. 2018b. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/tabelas>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa de Informações Básicas Municipais**. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- INSA – Instituto Nacional do Semiárido. **Olho N'água**. 2020. Disponível em: <<https://olhonagua.insa.gov.br/#!/>>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- INSA – Instituto Nacional do Semiárido. **Olho N'água**. 2020. Disponível em: <<https://olhonagua.insa.gov.br/#!/>>. Acesso em: 21 jul. 2020.
- KEUNECKE, Leandro; HEIN, Nelson; KROENKE, Adriana. **Avaliação de Insumos por meio do Método VIKOR–Um Estudo Multicriterial na Indústria Têxtil**. XLVII SBPO-Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Pernambuco-PE, p. 290-299, 2015.
- LEDEEN, R. W.; YU, R. K.; ENG, L. F. Gangliosides of human myelin: sialosylgalactosylceramide (G7) as a major component. **Journal of neurochemistry**, v. 21, n. 4, p. 829-839, 1973.
- MAGALHAES, A. R. Vida e seca no Brasil. **Secas no Brasil: Política e gestão proativas**. 1. ed. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos; Banco Mundial, 2016. 292 p.
- MAHJOURI, Maryam et al. Optimal selection of Iron and Steel wastewater treatment technology using integrated multi-criteria decision-making techniques and fuzzy logic. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, p. 54-68, 2017.
- MORAIS, José Luciano Mendonça; FADUL, Élvia; CERQUEIRA, Lucas Santos. Limites e desafios na gestão de recursos hídricos por comitês de bacias hidrográficas: um estudo nos estados do nordeste do Brasil. REAd. **Revista Eletrônica de Administração** (Porto Alegre), v. 24, n. 1, p. 238-264, 2018.
- NEZAMI, S. R. Environmentally sound water resources management in catchment level using DPSIR model and scenario analysis. **International Journal of Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. 569-580, 2013.
- OPRICOVIC, Serafim; TZENG, Gwo-Hshiung. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. **European journal of operational research**, v. 178, n. 2, p. 514-529, 2007.

- PORTO, R. L. L.; ROBERTO, A. N.; SCHARDONG, A.; MÉLLO JÚNIOR, A.V. **Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos**. In: Silva, R. C. V. Métodos numéricos em recursos hídricos. Porto Alegre: ABRH. cap.2, p.93-240. 2003.
- RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R.; NUNES, T. H. N. **A gestão de recursos hídricos e a transposição de águas do rio São Francisco para o açude Epitácio Pessoa – Boqueirão**. 2017. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, ABRH, 2017.
- ROSA, Altair et al. A contribuição de sistemas de tratamento de esgotos por zonas de raízes para gestão de recursos hídricos na região metropolitana de Curitiba/The contribution of sewage treatment systems by root zones for water resource management in the metropolitan region of Curitiba. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 17794-17805, 2020.
- SANTOS, R. D. A. S. D. **Indicadores de sustentabilidade ambiental urbana-ISAU-UFBA/SEI: potencialidades e limitações a partir de sua aplicação para a cidade do Salvador-BA**. 2016.
- SANTOS, Thayanna Maria Medeiros; OLIVEIRA, José Lucas Santos; SILVA, Edevaldo. Vulnerabilidade hídrica no Nordeste brasileiro: entre a urbanização e a Educação Ambiental. **REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 35, n. 3, p. 184-199, 2018.
- SHAHRAKI, Ali Sardar; SHAHRAKI, Javad; HASHEMI MONFARED, Seyed Arman. Application of Fuzzy Technique for Order-Preference by Similarity to Ideal Solution (FTOPSIS) to Prioritize Water Resource Development Economic Scenarios in Pishin Catchment. **International Journal of Business and Development Studies**, v. 10, n. 1, p. 77-94, 2018.
- SILVA, A. C. S.; GALVÃO, C. O. ; RIBEIRO, M. M. R. ; ANDRADE, T. F. . Adaptation to climate change: institutional analysis. In: Kolokytha, E.; Oishi, S.; Teegavarapu, R.. (Org.). **Sustainable Water Resources Planning and Management under Climate Change**. 1ed. Tokyo: Springer, 2017, v. 10, p. 261-280. 2017.
- SILVA, C. L. S.; SOUZA-LIMA, J. E. **Políticas públicas e indicadores para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Saraiva, 2010.
- SILVA, Samiria Maria Oliveira et al. Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de Fortaleza. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 239-250, 2019.
- SUDENE - SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **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.
- VIEIRA, Z. M. C. L. **Metodologia de análise de conflitos na implantação de medidas da gestão de demanda de água**. 2008. 237 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2008.
- VON SPERLING, Marcos. **Urban wastewater treatment in Brazil**. Washington (WA): Inter-American Development Bank, 2016.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: Wilhite DA (ed). **Drought: A Global Assessment**, 3-18.

SOBRE OS AUTORES

Matheus Duarte de Araújo possui graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (2014) e mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (2017). É doutorando em Engenharia Ambiental na Universidade Estadual da Paraíba. Trabalhou como professor da Faculdade Maurício de Nassau - Campina Grande e do Centro de Ensino Grau Técnico - Unidade Bezerra de Menezes. Atualmente desenvolve pesquisas na área de Tecnologias de Tratamento de Esgotos Domésticos e operação de reservatórios na região Semiárida Brasileira.

Yáscara Maia Araújo de Brito é doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais na Universidade Federal de Campina Grande. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (2017) pela Universidade Federal de Campina Grande. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (2017) pela Faculdade Integrada de Patos. Bacharela em Engenharia Civil (2015) pela Universidade Federal de Campina Grande. Atualmente desenvolve pesquisas na área de Geotecnologias Aplicadas à Gestão de eventos extremos, com enfoque nas temáticas de secas e recursos hídricos no Semiárido Brasileiro.

Rui de Oliveira é graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão (1974), Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (1983) e PhD em Engenharia Civil - Leeds University (1990). Professor aposentado da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, onde atuou entre março de 1977 e maio de 2007. Atualmente é Professor Associado B do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba onde ministra as disciplinas Introdução à Engenharia Sanitária e Ambiental, Gestão de Recursos Hídricos, Hidrologia, Análise de Risco e Análise de Águas. Tem experiência em pesquisa na área de Engenharia Sanitária, com ênfase em Técnicas Convencionais de Tratamento de Águas, particularmente lagoas de estabilização. Atualmente desenvolve pesquisa na área de Gestão da Qualidade da Água.

GOVERNANÇA DA ÁGUA: VULNERABILIDADE À ESCASSEZ HÍDRICA

**MATHEUS DUARTE DE ARAÚJO
YÁSCARA MAIA ARAÚJO DE BRITO
RUI DE OLIVEIRA**

