



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGUAÇÃO DE RECURSOS
HÍDRICOS

CARLA FERNANDA FORTUNATO

**ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS EM REGIÕES
SEMIÁRIDAS**

Recife

2020

CARLA FERNANDA FORTUNATO

**ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS EM REGIÕES
SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.

Recife
2020

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- F745e Fortunato, Carla Fernanda.
Estratégias de operação de reservatórios em regiões semiáridas / Carla
Fernanda Fortunato – Recife, 2020.
116 f.: figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de
Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos, 2020.
Inclui referências e anexos.
1. Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. 2. Otimização da operação
de reservatórios. 3. Regiões semiáridas. 4. Secas no nordeste brasileiro. I.
Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

UFPE

333.91 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-134

CARLA FERNANDA FORTUNATO

**ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS EM REGIÕES
SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídrico. Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 27/01/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra – UFPE
(examinador externo)

Prof. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – UFPE
(examinador interno)

Dedico este trabalho a minha maior incentivadora, Mãe.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por ter me mantido firme para que cumprisse essa missão.

A minha mãe, **Maria do Carmo da Silva**, por todo amor incondicional, por toda dedicação a família e por ser minha maior motivação de vida.

Ao meu namorado, **Gabriel Bidá**, por todo companheirismo, por todo incentivo, por todo amor dedicado, em todos os momentos, meu ponto de equilíbrio.

A minha vó, **Dona Santa**, meu exemplo de força, amor, bondade e alegria, minha raiz mais linda. A minha família, que mesmo inconscientes me incentivaram.

A minha irmã, **Tainan Caroline**, pela alegria contagiante, por compartilhar de momentos únicos, por sua evolução como pessoa, irmã e mulher.

A minha amiga, **Jéssica Araújo**, trazida pela “lei natural dos encontros” e que se faz presente em minha vida, obrigada pela parceria nessa caminhada, por ter me acolhido como amiga, certamente será para a vida toda.

Ao casal de amigos, **Ana e Sérgio Athaíde**, por terem me amparado com tanta generosidade, presteza e carinho, obrigada pelas gargalhadas de sempre.

Ao professor **Almir Cirilo**, pelo privilégio e responsabilidade de ser sua aluna de mestrado, por ter me estendido a mão nos meus primeiros dias de universidade, por ter acreditado em mim, mesmo nos momentos que pensei não ser capaz.

A **Universidade Federal de Pernambuco**, pela oportunidade de aprendizado, pela experiência adquirida e pela honra de poder fazer parte dessa instituição. A **Agência Nacional de Águas**, pela oportunidade de cursar o mestrado em rede nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

A minha cidade de coração, **Recife**, a imensa gratidão por tudo que foi experienciado nos últimos anos, são parte das melhores lembranças.

Por fim, agradeço à vida pelos momentos vividos, agradáveis ou não, foram válidos para que chegasse ao fim de mais um ciclo.

Súplica Cearense¹

“Oh! Deus, perdoe este pobre coitado
Que de joelhos rezou um bocado
Pedindo pra chuva cair sem parar

Oh! Deus, será que o senhor se zangou
E só por isso o sol arretirou
Fazendo cair toda a chuva que há

Senhor, eu pedi para o sol se esconder um tiquinho
Pedi pra chover, mas chover de mansinho
Pra ver se nascia uma planta no chão

Oh! Deus, se eu não rezei direito o Senhor me perdoe
Eu acho que a culpa foi
Desse pobre que nem sabe fazer oração

Meu Deus, perdoe eu encher os meus olhos de água
E ter-lhe pedido cheinho de mágoa
Pro sol inclemente se arretirar

Desculpe eu pedir a toda hora pra chegar o inverno
Desculpe eu pedir para acabar com o inferno
Que sempre queimou o meu Ceará”

¹ Gordurinha e Nelinho. In: Luiz Gonzaga. Súplica Cearense. **Gonzagão e Fagner**. Salvador: RCA, 1984. LP (2h 55 min). Faixa 4 (2 min 09 s).

RESUMO

Recentemente a sequência dos anos de estiagem de 2012-2016 resultou no colapso de diversos reservatórios do Agreste de Pernambuco, como ocorreu em Jucazinho. Nesse contexto, propõe-se estratégias de operação para reservatórios de usos múltiplo das bacias hidrográficas do rio Capibaribe, Ipojuca e Una, com vistas a maximizar o aproveitamento hídrico desses sistemas, empregando-se técnicas de simulação e otimização. Foram definidos três períodos históricos: até 1996 (considerado como sem secas críticas), até 2011 (considerando os eventos críticos do final do século passado: 1998 e 1999) e até 2016 (incluindo o período de seca mais severa: 2012 a 2016). Os resultados mostraram a mesma tendência para todos os reservatórios analisados: redução da vazão média regularizada na medida que os eventos de seca foram ocorrendo, com os menores valores obtidos até 2016. Quanto ao uso de regras de operação otimizada, as vazões regularizadas foram significativamente superior quando comparadas à operação convencional, mostrando que o emprego das técnicas de simulação-otimização auxilia no aproveitamento mais racional dos sistemas hídricos. Em síntese, a análise valida e enfatiza que os eventos de secas podem afetar severamente a disponibilidade hídrica dos sistemas de abastecimento, sendo fundamental a escolha do período adequado para quantificação das vazões que podem ser captadas e a definição de mecanismos estratégicos para a alocação de água em situações climáticas extremas.

Palavras-chave: Otimização da operação de reservatórios. Regiões semiáridas. Secas no Nordeste brasileiro.

ABSTRACT

Recently, the sequence of the drought years 2012-2016 resulted in the collapse of several reservoirs of the Agreste de Pernambuco, as occurred in Jucazinho. In this context, it is proposed operating strategies for multiple use reservoirs of the Capibaribe, Ipojuca and Una river basins, with a view to maximizing the water use of these systems, using simulation and optimization techniques. Three historical periods were defined: until 1996 (considered as without critical droughts), until 2011 (considering the critical events of the end of the last century: 1998 and 1999) and until 2016 (including the most severe drought period: 2012 to 2016). The results showed the same trend for all reservoirs analyzed: reduction of the average regularized flow as drought events occurred, with the lowest values obtained until 2016. Regarding the use of optimized operation rules, the regularized flows were significantly higher. When compared to conventional operation, showing that the use of simulation-optimization techniques helps in the more rational use of water systems. In summary, the analysis validates and emphasizes that drought events can severely affect the water availability of the supply systems. It is essential to choose the appropriate period to quantify the flows that can be captured and to define strategic mechanisms for water allocation. in extreme weather situations.

Keywords: Optimization of reservoir operation. Semiarid regions. Droughts in Northeastern Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Nova delimitação do semiárido brasileiro.....	18
Figura 2 –	Série de tempo das anomalias de chuva durante a quadra chuvosa (Fevereiro-Maio) no Nordeste de 1951 a 2015.....	21
Figura 3 –	Número de dias com déficit hídrico para os anos hidrológicos 2011-2012 (a), 2012-2013 (b), 2013-2014 (c), 2014-2015 (d) e 2015-2016 (e).....	22
Figura 4 –	Ciclo de gestão de riscos de desastres.....	26
Figura 5 –	Mapa do Monitor de Secas do Nordeste para os meses outubro de 2017 e 2018.....	28
Figura 6 –	Distribuição do volume útil do reservatório em zonas.....	36
Figura 7 –	Variáveis intervenientes na operação de um reservatório.....	43
Figura 8 –	Fluxograma para a definição da matriz de retiradas em função do estado inicial do reservatório.....	49
Figura 9 –	Hidrografia de Pernambuco dividida em bacias hidrográficas	51
Figura 10 –	Mesorregiões das bacias hidrográficas do rio Capibaribe, Ipojuca e Una.....	52
Figura 11 –	Localização da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	53
Figura 12 –	Diagrama unifilar bacia hidrográfica do rio Capibaribe.....	55
Figura 13 –	Localização da bacia hidrográfica do rio Ipojuca.....	59
Figura 14 –	Diagrama unifilar bacia hidrográfica do rio Ipojuca.....	61
Figura 15 –	Localização da bacia hidrográfica do rio Una.....	65
Figura 16 –	Diagrama unifilar bacia hidrográfica do rio Una.....	67
Figura 17 –	Isoietas anuais médias de precipitação (mm) na bacia do Rio Capibaribe	68
Figura 18 –	Isolinhas anuais médias de evapotranspiração potencial de Hargreaves (mm).....	69
Figura 19 –	Isotermas anuais médias (°C) na bacia do rio Capibaribe.....	70
Figura 20 –	Isoietas anuais médias de precipitação na bacia do rio Ipojuca...	71
Figura 21 –	Isotermas anuais médias (°C) na bacia do rio Ipojuca.....	72

Figura 22 –	Isolinhas anuais médias de evapotranspiração potencial de Hargreaves (mm).....	73
Figura 23 –	Precipitação anual média na bacia do rio Una.....	74
Figura 24 –	Curva área x volume reservatório de Jucazinho.....	79
Figura 25 –	Curva cota x volume reservatório de Jucazinho.....	80
Figura 26 –	Curva área x volume reservatório de Poço Fundo.....	80
Figura 27 –	Curva cota x volume reservatório de Poço Fundo.....	80
Figura 28 –	Curva área x volume reservatório de Pão de Açúcar.....	81
Figura 29 –	Curva cota x volume reservatório de Pão de Açúcar.....	81
Figura 30 –	Curva área x volume reservatório de Pedro Moura Jr.....	81
Figura 31 –	Curva cota x volume reservatório de Pedro Moura Jr.....	82
Figura 32 –	Curva área x volume reservatório de Bituri.....	82
Figura 33 –	Curva cota x volume reservatório de Bituri.....	82
Figura 34 –	Curva área x volume reservatório do Prata.....	83
Figura 35 –	Curva cota x volume reservatório do Prata.....	83
Figura 36 –	Localização das barragens e estações fluviométricas da bacia do rio Capibaribe.....	84
Figura 37 –	Localização das barragens e estações fluviométricas da bacia do rio Ipojuca.....	85
Figura 38 –	Localização das barragens e estações fluviométricas da bacia do rio Una.....	86
Figura 39 –	Volume acumulado no reservatório de Jucazinho com as regras de operação otimizadas e com as regras do Monitor de Secas.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Categorização de secas, definem a intensidade de seca no Mapa do Monitor e os possíveis impactos associados.....	29
Tabela 2 –	Cenários de seca: estado, gatilhos e metas de resposta.....	33
Tabela 3 –	Municípios que integram a bacia hidrográfica do Capibaribe.....	54
Tabela 4 –	Principais reservatórios da bacia hidrográfica do Capibaribe.....	55
Tabela 5 –	Características técnicas do reservatório de Jucazinho.....	57
Tabela 6 –	Características técnicas do reservatório Poço Fundo.....	58
Tabela 7 –	Municípios que integram a bacia hidrográfica do Ipojuca.....	60
Tabela 8 –	Principais reservatórios da bacia do rio Ipojuca.....	61
Tabela 9 –	Características técnicas do reservatório Pão de Açúcar.....	62
Tabela 10 –	Características técnicas do reservatório Pedro Moura Jr.....	63
Tabela 11 –	Principais características técnicas do reservatório de Bituri.....	64
Tabela 12 –	Municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Una.....	66
Tabela 13 –	Principais reservatórios da bacia hidrográfica do rio Una.....	67
Tabela 14 –	Características técnicas do reservatório do Prata.....	67
Tabela 15 –	Postos pluviométricos referente a cada reservatório em estudo...	76
Tabela 16 –	Estações fluviométricas inseridas na área de influência de cada reservatório.....	77
Tabela 17 –	Evaporação total mensal para as bacias do rio Capibaribe, Ipojuca e Una.....	78
Tabela 18 –	Postos fluviométricos com área de contribuição por reservatório	84
Tabela 19 –	Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Toritama) – 2016.....	87
Tabela 20 –	Vazão média regularizada com regras de operação simulada.....	88
Tabela 21 –	Vazão média regularizada com retirada constante (a) e com matriz de operação (b).....	89

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	14
1.1	<u>OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS</u>	15
2	<u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	16
2.1	<u>REGISTRO HISTÓRICO DE SECAS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO</u>	19
2.1.1	<u>Secas e Variabilidade Climática</u>	22
2.2.1	<u>Mudança de Paradigma na Gestão das Secas</u>	24
2.2.2	<u>Monitor de Secas do Nordeste</u>	26
2.2.3	<u>Planos de Preparação para a Seca e o Monitor</u>	28
2.2.4	<u>Monitor de Secas Aplicado a Hidrossistemas</u>	29
2.2.5	<u>Modelo de Operação de Reservatório</u>	30
2.3	<u>SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS</u>	32
2.3.1	<u>Operação de Sistemas Hídricos</u>	33
2.3.2	<u>Modelos de Análise de Sistemas Hídricos</u>	35
2.3.3	<u>Modelo de Otimização</u>	35
2.3.4	<u>Modelo de Simulação</u>	36
3	<u>METODOLOGIA PROPOSTA</u>	40
3.1	<u>MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DO RESERVATÓRIO</u>	40
3.1.1	<u>Gradiente Reduzido Generalizado</u>	42
3.2	<u>DESCRIÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO</u>	43
3.2.1	<u>Cálculo da Matriz de Vazões Máximas de Captação</u>	44
3.2.2	<u>Ajuste da Matriz de Vazões Máximas de Captação</u>	45
3.3	<u>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</u>	48
3.4	<u>HIDROGRAFIA E USOS DA ÁGUA NA BACIA DO RIO CAPIBABIBE</u>	50
3.4.1	<u>Reservatório de Jucazinho</u>	53
3.4.2	<u>Reservatório Poço Fundo</u>	55
3.5	<u>HIDROGRAFIA E USOS DA ÁGUA NA BACIA DO RIO IPOJUCA</u>	56
3.5.1	<u>Reservatório Pão de Açúcar</u>	59
3.5.2	<u>Reservatório de Pedro Moura Junior</u>	60
3.5.3	<u>Reservatório Bituri</u>	61
3.6	<u>HIDROGRAFIA E USOS DA ÁGUA NA BACIA DO RIO UNA</u>	62
3.6.1	<u>Reservatório do Prata</u>	65

<u>3.7</u>	<u>CLIMA E PRECIPITAÇÕES</u>	66
<u>3.7.1</u>	<u>Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe</u>	66
<u>3.7.2</u>	<u>Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca</u>	69
<u>3.7.3</u>	<u>Bacia Hidrográfica do Rio Una</u>	72
<u>3.8</u>	<u>BASE DE DADOS ESPACIAIS</u>	73
<u>3.8.1</u>	<u>Geração de Parâmetros Físicos</u>	74
<u>3.9</u>	<u>BASE DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS</u>	76
<u>3.9.1</u>	<u>Dados Pluviométricos</u>	76
<u>3.9.2</u>	<u>Dados Fluviométricos</u>	76
<u>3.9.3</u>	<u>Dados Evaporimétricos</u>	77
<u>4</u>	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	79
<u>4.1</u>	<u>VAZÃO MÁXIMA DE CAPTAÇÃO</u>	86
<u>4.1.1</u>	<u>Reservatório de Jucazinho</u>	89
<u>4.1.2</u>	<u>Reservatório de Poço Fundo</u>	91
<u>4.1.3</u>	<u>Reservatório de Pão de Açúcar</u>	91
<u>4.1.4</u>	<u>Reservatório de Pedro Moura Júnior</u>	91
<u>4.1.5</u>	<u>Reservatório de Bituri</u>	92
<u>4.1.6</u>	<u>Reservatório do Prata</u>	92
<u>5</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	94
<u>6</u>	<u>RECOMENDAÇÕES</u>	96
	<u>REFERÊNCIAS</u>	97
	<u>ANEXO A – RELAÇÃO CAV POR RESERVATÓRIO</u>	102
	<u>APÊNDICE A – MATRIZ DE OPERAÇÃO POR RESERVATÓRIO</u>	105
	<u>APÊNDICE B – VOLUME ACUMULADO</u>	115

1 INTRODUÇÃO

No semiárido brasileiro, precisamente na região Nordeste, as características de variabilidade temporal e espacial do regime de chuvas, rios intermitentes e altas taxas de evaporação são fatores que marcam várias incertezas quanto à disponibilidade de água nessa região. Nesse sentido, torna-se necessário buscar alternativas para o gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis, de modo a equacionar as questões da escassez relativa da água, com vistas a sua melhor utilização para atendimento das demandas.

À medida que as demandas por água crescem, agravam-se os conflitos e disputas por esse recurso, enquanto os sistemas hídricos tendem a se tornar maiores e complexos. Por sua vez, a construção e gerenciamento desses sistemas estão ligados a investimentos de grande porte, longos prazos e políticas cuidadosas de operação e manutenção (PORTO; AZEVEDO, 2002). Diante dessas limitações, torna-se imprescindível maximizar o aproveitamento das estruturas hídricas já existentes, resultando no uso mais racional da água que possibilite o atendimento de maiores parcelas da sociedade.

O Agreste pernambucano sempre foi cenário de problemas decorrentes da baixa oferta hídrica, recentemente a sequência dos anos de estiagem marcou a seca plurianual de 2012 - 2016, considerada a mais grave dos últimos 100 anos, trazendo um resultado devastador para as cidades abastecidas pelos mananciais existentes na região, muitos deles em estado de colapso ou com percentuais mínimos de acumulação, como ocorreu com o reservatório de Jucazinho, quadro desse estudo (RAMOS, 2017).

Esses fatos demonstram que soluções estruturais, embora necessárias, são insuficientes para suportar a sequência de vários anos de chuvas abaixo da média, servindo de alerta para um desafio presente e uma oportunidade para aprimorar métodos e práticas que minimizem os efeitos adversos da variabilidade climática, bem como evidenciando a necessidade de mecanismos de gestão que melhorem a capacidade governamental para responder de forma antecipada e eficaz a escassez hídrica.

Diante disso, torna-se fundamental que se tenha mecanismos para otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos existentes para um melhor enfrentamento dos períodos de estiagem recorrentes. O emprego de técnicas de simulação e otimização são ferramentas significativas no processo de tomada de decisão, sendo utilizadas para definição de regras de operação de reservatórios, possibilitando dentre outros benefícios atenuar o desequilíbrio entre a oferta e demanda de água.

As regras para operação de reservatórios são diversas, porém todas indicam o armazenamento ou descarga alvo que se pretende obter em determinados intervalos de tempo, com vistas a atender à solicitação de vazão efluente e demandas do sistema para aperfeiçoar determinados objetivos (ANA, 2015). No que se refere a disponibilidade hídrica, os modelos de otimização e simulação podem ser configurados para atender diversos propósitos, seja maximizar o volume acumulado, maximizar a oferta de água, minimizar vertimentos ou perdas por evaporação, dentre outros.

Nesse sentido, o presente trabalho funda-se no desenvolvimento e aplicação de um modelo baseado em regras de operação com vistas a estimar as disponibilidades hídricas para reservatórios do Agreste do estado de Pernambuco, empregando-se técnicas de otimização e simulação, sendo definidas, em complemento, estratégias para melhorar a quantificação das retiradas de água desses sistemas hídricos, de modo a maximizar o aproveitamento das águas armazenadas.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O presente trabalho foi desenvolvido objetivando propor estratégias de operação para reservatórios de abastecimento de água das bacias hidrográficas dos rios Capibaribe, Ipojuca e Una, com vistas a maximizar as condições de aproveitamento hídrico desses sistemas. Para tanto foram estabelecidos como objetivos específicos:

- a) Definir regras de operação de reservatórios com base no histórico de dados hidrometeorológicos das bacias hidrográficas, visando obter aquelas que melhor atenuem os efeitos dos eventos de secas;
- b) Aplicar regras de operação para reservatórios do Agreste de Pernambuco, propondo-se a analisar seu comportamento frente aos diferentes cenários de secas;
- c) Identificar as vazões máximas disponíveis para captação em cada reservatório, diante dos volumes acumulados em períodos predefinidos;
- d) Comparar os resultados das regras de operação utilizadas no Monitor de Secas do Nordeste com a metodologia proposta para o reservatório de Jucazinho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Nordeste do Brasil é uma região muito grande, de 1.561.177 km² de área, cerca de 18,26% do território nacional, abriga cerca de 53 milhões de habitantes, distribuídos em nove estados da Federação Brasileira: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. No entanto, assim como as demais localidades do país não é uma região homogênea (MARENGO et al., 2016). Em seu arranjo mais conhecido é subdividido em quatro sub-regiões, sendo: meio norte, zona da mata, agreste e sertão, caracterizando uma diversidade resultante do efeito conjunto de fatores geomorfológicos, climáticos, vegetacionais e hídricos distintos.

Com base em Rebouças (1997), são descritas brevemente cada sub-região:

- Meio Norte: formada pelos estados do Maranhão e do Piauí, é a área de transição amazônica, com pluviometria entre mil a 2.500 mm ano⁻¹, caracterizando rios perenes e grandes reservas de água subterrânea;
- Zona da Mata: faixa litorânea que se estende do Rio Grande do Norte ao sul da Bahia, estão as áreas mais urbanizadas e industrializadas do Nordeste. Constitui-se uma região úmida com pluviosidade entre mil e 2.000 mm ano⁻¹, nos casos de secas extremas pode ser atingida, mas em geral está imune aos seus efeitos;
- Agreste: corresponde a uma faixa localizada paralelamente à costa litorânea. Caracteriza-se como área de transição entre as sub-regiões Zona da Mata e Sertão, com pluviometria variando entre 700 e mil mm ano⁻¹;
- Por fim a porção correspondente ao Sertão, também referido como Semiárido, que normalmente sofre com os déficits hídricos e que é a região mais afetada pelas secas frequentes. A pluviosidade varia entre 300 e 800 mm ano⁻¹, predominando secas periódicas e cheias frequentes dos rios de regime intermitentes.

Quando se fala em secas no Nordeste, geralmente está se referindo ao Sertão ou Semiárido. A região Semiárida oficial brasileira foi criada pela Lei Federal n.º 7.827 de 27 de setembro de 1989 em substituição ao Polígono das Secas, delimitada pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene).

Trata-se de uma sub-região com área de 1.128.697 km², atualmente, composta por 1.262 municípios, abrangendo nove estados do nordeste (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia) e parte do estado de Minas Gerais (Figura 1). Juntos, tais municípios concentram uma população superior a 27 milhões de habitantes numa região marcada pela irregularidade de chuvas e alto índice de aridez (SUDENE, 2018).

Figura 1 – Nova delimitação do semiárido brasileiro



Fonte: SUDENE, 2018.

As resoluções do Conselho Deliberativo da Sudene de nº 107 de 27/07/2017 e de nº 115 de 23/11/2017, estabelecem os critérios técnicos e científicos para delimitação da região, sendo: “I – *Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm*; II – *Índice de Aridez de Thorntwaite igual ou inferior a 0,50*; III – *Percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano*” (SUDENE, 2018). Com base nas resoluções, são considerados aptos para inclusão no semiárido os municípios que alcancem pelo menos um dos critérios citados nos incisos I, II e III em qualquer porção de seu território dentro da área de atuação da Sudene.

Além dos baixos índices pluviométricos e da irregularidade de seu regime, a região Semiárida caracteriza-se por apresentar temperaturas elevadas durante todo o ano, baixas amplitudes térmicas, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração, que normalmente superam os totais pluviométricos irregulares, configurando taxas negativas no balanço hídrico (ANA, 2017).

Cirilo (2008), descreve o semiárido nordestino como uma região pobre em volume de escoamento dos rios, em função da variabilidade temporal das precipitações e das características geológicas predominantes, formada por uma extensa área de solos rasos sobre um embasamento de rochas cristalinas e, conseqüentemente baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente, resultando em uma densa rede de rios temporários.

A precipitação média anual pode variar espacialmente de 400 a 2.000 mm, de verão (dezembro-fevereiro) e de outono (março-maio), tendo o Sul da semiárido maior precipitação de verão e a parcela setentrional precipitações de outono. Este regime de chuvas se dá sob acentuada sazonalidade, ocorrendo praticamente sobre um período do ano (SOUZA FILHO, 2011).

Suassuna (2007), destaca que apesar de ser considerada uma das regiões semiáridas mais chuvosas do planeta (volume precipitado em torno de 700 bilhões de $\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$), as descargas anuais de seus rios em direção ao oceano registram baixas infiltrações em seus aquíferos (em torno de 58 bilhões de m^3) quando comparadas aos volumes precipitados anualmente. Essa desigualdade não decorre apenas das características geológicas existentes, mas sobretudo pela intensa evaporação. O potencial evaporimétrico é superior a 2.000 mm anuais, numa região em que chove, em média, até 800 mm. Desse potencial escoado, o homem maneja cerca de 27 bilhões de $\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$.

Rebouças (1997), ressalta que em função da baixa permeabilidade das rochas que compõem seu embasamento geológico regional e de suas complexas configurações estruturais, se instalou uma densa rede hidrográfica, a qual propicia locais favoráveis à construção de açudes, caracterizando uma feição marcante da paisagem do semiárido.

A construção de infraestrutura física de transporte da água no tempo, é uma forma de enfrentar a escassez devido à alta variabilidade temporal do regime fluvial. Logo, o reservatório passa a ser um transportador de água no tempo, para compensar a sazonalidade e a variabilidade interanual. Reservatórios de pequeno porte são capazes de compensar somente a sazonalidade do regime de vazões, transportando a água do período úmido de cada ano para o período seco do mesmo ano. Já os reservatórios de

médios e grandes porte, face à variabilidade interanual, podem transportar água do período úmido de um ano para os anos subsequentes (SOUZA FILHO, 2011).

Tendo em vista que a presença de água no contexto do semiárido é naturalmente limitada no tempo e no espaço, para manter uma maior garantia hídrica é de extrema necessidade reservar água nos períodos úmidos para ofertar nos períodos mais secos. Nesse sentido, as infraestruturas de armazenamento e de transferência hídrica reduzem significativamente a vulnerabilidade em diversos locais do semiárido nordestino, sendo de grande importância o conhecimento das especificidades desses sistemas locais.

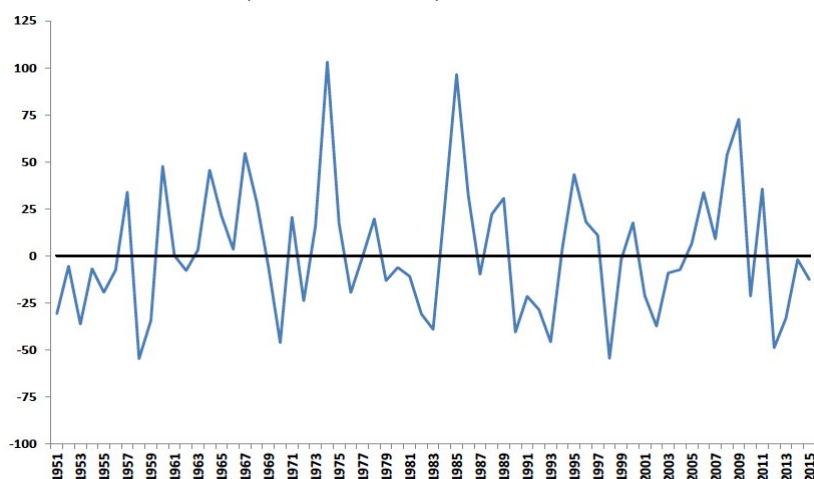
2.1. REGISTRO HISTÓRICO DE SECAS NO SEMIÁRIDO NORDESTINO

A deficiência média de chuvas no semiárido nordestino é um problema histórico e, apesar do primeiro registro de seca ter ocorrido em 1583 no Brasil colônia, a sistematização da ocorrência desses eventos só começaram no século XIX. Os primeiros registros de secas foram realizados em função dos impactos a ela associados, enquanto as secas mais recentes são baseadas em observações meteorológicas (CAMPOS, 2014).

Ao longo da história, uma série de grandes eventos de seca ocorreram no Nordeste do Brasil datados nos períodos de 1583, 1603, 1624, 1692, 1711, 1723–24, 1744–46, 1754, 1760, 1772, 1766–67, 1777–80, 1784, 1790–94, 1804, 1809, 1810, 1816–17, 1824–25, 1827, 1830–33, 1845, a maior de todas, em 1877–79 dizimou metade da população e quase todo o rebanho bovino; depois outras grandes secas seguiram: 1888–89, 1891, 1898, 1900, 1902–03, 1907, 1915, 1919, 1932–33, 1936, 1941–44, 1951–53, 1958, 1970, 1979–81, 1982–83, 1992–93, 1998, 2001–02, 2010, 2012–16, esse último período afetando quase 9 milhões de pessoas (MARENGO et al., 2018; DE NYS et al., 2016; MARENGO; BERNASCONI, 2015).

A Figura 2 mostra que 2010 já foi um ano seco, e que no período de 2010-2015, apenas 2011 teve chuvas acima da média, mas este foi seguido de déficits de precipitação mais graves em 2012. Segundo Marengo et al. (2016), as estações chuvosas no Nordeste, de fevereiro a maio em 1998 e 2012 foram as mais secas entre 1961 e 2012, caracterizadas pelo percentil muito seco.

Figura 2 - Série de tempo das anomalias de chuva (mm mês⁻¹) durante a quadra chuvosa (Fevereiro-Maio) no Nordeste de 1951 a 2015

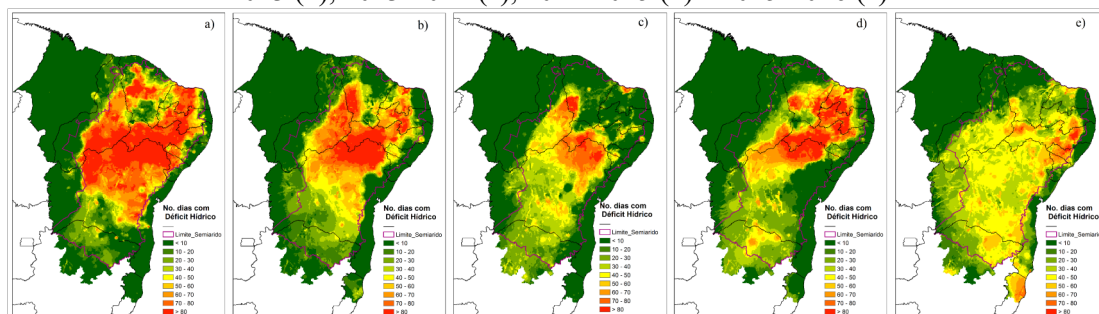


Fonte: Marengo et al. 2016.

Os anos de 2010 e 2012-2016 marcaram um período de chuvas irregulares, sendo este último período constatado como a pior seca dos últimos cem anos no Nordeste brasileiro. Os anos de 2010-2011 foram irregulares: poucas chuvas em algumas regiões do estado, precipitações que encheram os reservatórios da bacia do rio Capibaribe, cheias catastróficas na Mata-Sul e partes do Agreste. Contudo, a partir de 2012 até 2016 a região enfrentou um caso de secas plurianuais, causando além de perdas nas atividades agrícolas, a exaustão de diversos reservatórios de pequenos e médios, e, mesmo de grande porte como ocorreu no reservatório de Jucazinho, cenário desse estudo. Na realidade, tendo em vista a situação da maioria dos mananciais neste ano de 2019, muitos em colapso ou pré-colapso, não se pode afirmar que a seca hidrológica tenha terminado.

A Figura 3 apresenta a evolução temporal e o padrão espacial da seca considerando o número de dias com déficit hídrico (NDDH), calculado a partir do modelo de balanço hídrico desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), estima o número de dias em que o crescimento da vegetação é restrito em razão da insuficiência de água no solo (MARENGO et al., 2016).

Figura 3 - Número de dias com déficit hídrico para os anos hidrológicos 2011-2012 (a), 2012-2013 (b), 2013-2014 (c), 2014-2015 (d) e 2015-2016 (e).



Fonte: Marengo et al., 2016

Observa-se que nos períodos desde 2011 até 2014 o semiárido apresenta uma grande área com deficiência hídrica, onde o balanço hídrico é negativo em função da falta de chuva, temperaturas elevadas e altas taxas de evapotranspiração. No ano hidrológico de 2011-2012, a região com deficiência hídrica compreende quase toda a região semiárida, desde o centro-sul da BA até o RN, CE e PI, o acumulado de precipitação na região não ultrapassou os 500 mm. Já em 2012-2013 a 2014-2015 a maior concentração de dias com déficit hídrico é identificada em parte dos estados da região central do semiárido, os quais incluem o norte da BA, oeste do PB, leste do PI e oeste do CE.

Quadro 1- Precipitação acumulada nos anos hidrológicos na região semiárida

Ano hidrológico	Acumulado de precipitação
2011-2012	496 mm
2012-2013	611 mm
2013-2014	706 mm
2014-2015	631 mm
2015-2016	588 mm
Média	650 mm

Fonte: Adaptado de Marengo et al. (2016).

Conforme o Quadro 1, no ano hidrológico de 2013-2014, o acumulado de precipitação na região semiárida foi maior do que nos anos anteriores (706 mm). Com isso, os impactos da seca também foram menos intensos, o total de áreas impactadas foi reduzida para 40%. O impacto da seca atingiu a capacidade máxima durante o ano hidrológico de 2011-2012 (496 mm) e 2015-2016 (588 mm), continuando em menor grau nos anos de 2012-2013 e 2014-2015 (611 e 631 mm).

Houve uma redução na intensidade da seca do Nordeste, em todo estado de Pernambuco os impactos da seca ainda são de longo prazo. As chuvas acumuladas no

primeiro quadrimestre do ano de 2019 variaram de normal a acima do normal no norte e oeste da região nordeste, colaborando para diminuir a intensidade da seca ou acabar com a condição de seca em algumas áreas. De modo geral, apresenta-se com impacto de longo prazo, que é principalmente o déficit hídrico dos grandes reservatórios, em consequência da seca dos anos anteriores. Com melhora em algumas áreas com impactos de curto prazo, com recuperação das pastagens, acúmulo de água em pequenos reservatórios e cisternas, colheita em algumas áreas plantadas (APAC, 2019).

2.1.1 Secas e Variabilidade Climática

De acordo com estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), alguns dos maiores impactos dessas mudanças ocorrerão sobre as regiões semiáridas do planeta, incluindo o Nordeste do Brasil. Cenários globais e regionais demonstram que no próximo século a região será afetada pelo déficit de precipitação e aumento da aridez, com um provável incremento tanto na frequência quanto na intensidade das secas, assim como sua duração, como tem ocorrido em certas regiões do país (MARENGO; BERNASCONI, 2015).

No caso do Nordeste, muitos dos impactos futuros das mudanças do clima remetem aos impactos de variação climática em secas extremas, como as ocorridas recentemente em 2010 e 2012-2016. Com o predomínio de eventos cada vez mais intensos, os setores mais vulneráveis são a agricultura de sequeiro e o abastecimento de água para a população e para outros fins (DE NYS, ENGLE, MAGALHÃES, 2016).

O Nordeste brasileiro é a região Semiárida com maior densidade populacional do mundo (34 hab./km²), em que vivem cerca de 53 milhões de habitantes. Vieira et al. (2015) destacam que a variabilidade da precipitação, a degradação da terra e a desertificação são fatores que somados, podem tornar essa região uma das mais vulneráveis aos efeitos das mudanças do clima global.

As situações de maior déficit hídrico ocorrem no Semiárido nordestino, que além de apresentar o menor nível de chuvas do país e altas temperaturas, sofre influência dos eventos *El Niño* e Oscilação-sul (ENOS). Estudos relatam que dos 46 eventos de *El Niño* registrados durante o período de 1849 a 1992, foi verificado que 21 estavam associados com as secas no Nordeste do Brasil. Dos eventos mais recentes de 1992, 1998, 2002, 2010 e 2012-2015, apenas nos de 1998, 2002 e 2015 coincidiram

com os anos de ocorrência do fenômeno (MARENGO; TORRES; ALVES; 2017; KANE, 1997).

As elevadas taxas de evaporação e grande variabilidade interanual dos deflúvios resultam em significativa oscilação na disponibilidade hídrica em superfície da região, cujo futuro climático também não é promissor, conforme pesquisas do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas a região poderá sofrer uma redução de cerca de 22% do nível de chuvas até 2100 (PBMC, 2017).

Entretanto, os riscos relacionados à falta de água não se limitam apenas ao futuro climático do Brasil, haja vista que ainda existem problemas estruturais de abastecimento. O diagnóstico do Atlas Brasil, constatou cerca de 55% a 35% das capitais e conglomerados brasileiros foram catalogados nas classes de “requer novo manancial” ou “requer novo sistema de produção”, respectivamente, indicando que grande parte dos sistemas de produção instalados e em operação estavam no limite de sua capacidade operacional (ANA, 2010).

Cabe ressaltar que existem limitações para uma análise mais conclusiva em relação a disponibilidade hídrica no futuro, principalmente em função discordância entre modelos climáticos para grande parte do território brasileiro, no que diz respeito às tendência de precipitações e vazões.

2.2 A GESTÃO DE SECAS NO NORDESTE BRASILEIRO

Historicamente, a região Nordeste tem uma longa experiência de enfrentamento das secas. No entanto, esse fenômeno continua sendo um evento inesperado que, apesar da evolução e melhoria no modo como os governos reagem, costuma haver um certo imprevisto quando ocorre um novo evento e a sociedade precisa reagir.

O gerenciamento das secas no Brasil tem sido voltado para uma resposta reativa: decide-se o que fazer apenas quando uma nova seca ocorre. Apesar da preocupação por parte dos decisores políticos em implementar ações para reduzir vulnerabilidades futuras, as decisões de uma forma ou de outra, sempre foram tomadas como resposta a uma nova seca (DE NYS, ENGLE, MAGALHÃES, 2017; 2016).

Nas décadas de 1990 e 2000 foram realizados pesados investimentos em infraestrutura hídrica, que pareciam uma resposta promissora aos impactos das secas, pelo menos quanto ao atendimento das demandas ligadas aos hidrossistemas construídos, como abastecimento urbano e agricultura irrigada. Contudo, a seca

plurianual de 2012 a 2016, considerada a mais grave dos últimos 100 anos, demonstrou que soluções estruturais, apesar de necessárias, não foram suficientes para suportar essa sequência de vários anos com precipitações abaixo da média (MARTINS et al., 2015).

Nesse contexto, Nys, Engle, Magalhães (2016); Martins e Magalhães (2015), relatam que os mecanismos de resposta são organizados durante épocas de seca por comitês temporários, liderados em nível federal, representando arranjos de coordenação específicos que muitas vezes não fornecerem ações abrangentes e coordenadas em conjunto com os estados. Os estados por suas fragilidades institucionais, de recursos humanos e financeiros, ficam limitados aos programas da União.

Adicionalmente, tem-se a falta de uma ação mais concertada entre as esferas da administração federal e estadual em atribuir o nível de severidade de seca para certa região, havendo divergências na identificação das necessidades de mobilização de recursos, especialmente aqueles de natureza emergencial (DE NYS, ENGLE, MAGALHÃES, 2016; MARTINS et al., 2015).

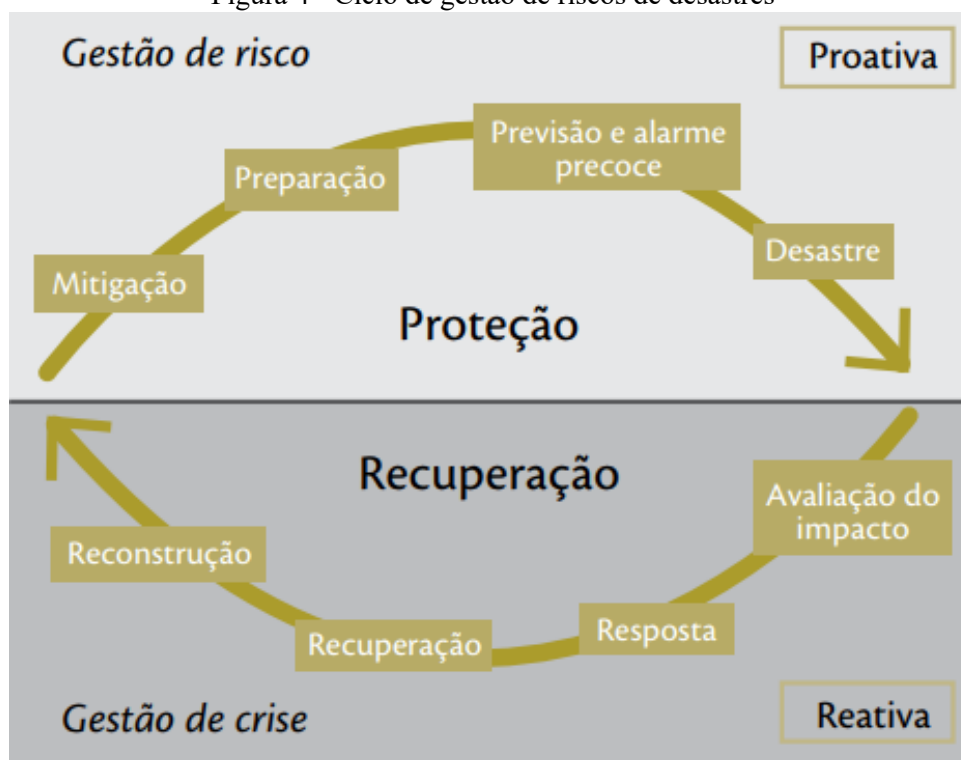
Outra característica é que a diversidade de instituições, com seus produtos associados ao monitoramento sistemático das secas, não resultou no aumento do nível de alerta quanto à severidade desses eventos. Informações úteis são geradas, mas não são aplicadas da forma eficiente, indicando a necessidade de criação de um sistema integrado para o entendimento comum das secas, bem como o aumento da eficácia das respostas de políticas públicas para assistência à população (TEIXEIRA; MACHADO, 2015).

2.2.1 Mudança de Paradigma na Gestão das Secas

Conforme o exposto, existe a necessidade de uma mudança de paradigma, passando da Gestão de Crises para uma Gestão de Riscos diante da possibilidade de ocorrência de uma seca. A Gestão de Riscos, ou, em outras palavras, uma Gestão Proativa da seca, significa tratar as vulnerabilidades, e não os sintomas, a partir de mecanismos para melhor monitorar e antecipar eventos de seca, o que deve orientar as medidas de preparação e alívio aos seus efeitos.

Com base no Centro Nacional de Mitigação de Seca (NDMC), Universidade de Nebraska-Lincoln (EUA), Nys, Engle, Magalhães (2017); Martins et al. (2015), apresentam sucintamente o ciclo da gestão de desastres que se aplica às secas, inundações, terremotos, dentre outros eventos, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Ciclo de gestão de riscos de desastres



Fonte: Nys, Engle, Magalhães (2017).

Esse ciclo se diferencia por duas partes: a superior indica a mudança de paradigma buscada pelo Brasil na preparação para a seca baseada em gestão de risco. Inclui ações proativas que antecedem o desastre, objetivando evitar ou reduzir impactos futuros. Incluem alerta precoce e monitoramento, planejamento, mitigação e o desenvolvimento de políticas nacionais de gestão da seca. Já a segunda parte, refere-se à gestão de crise tradicional, uma abordagem reativa com uma série de ações subsequentes a um desastre, incluindo avaliação de impactos e ações de resposta, recuperação e reconstrução para restaurar o local afetado (NYS, ENGLE, MAGALHÃES, 2017; 2016).

Em nível internacional, em 2013 ocorreu em Genebra, Suíça, a primeira Reunião de Alto Nível sobre Políticas Nacionais sobre Secas (HMNDP), sigla em inglês para *High Meeting on National Drought Policies*), que levou várias organizações a promoverem uma mudança de paradigma, com o objetivo de auxiliar os países com maior aptidão à seca a formular e adotar políticas nacionais com base em risco. No evento o Brasil foi um dos países mais determinados a desenvolver políticas proativas de gestão de seca (FUNCEME, 2019; TEIXEIRA; MACHADO, 2015).

Diante desse cenário, o Ministério da Integração Nacional (MI) solicitou assistência técnica ao Banco Mundial, dada sua prática em articular o acesso a experiências internacionais, com vistas a subsidiar no desenvolvimento de um programa de colaboração técnica sobre preparação para a seca e resiliência climática.

O programa foi estruturado em três pilares de preparação para a seca, sendo igualmente importantes, conforme caracteriza Teixeira e Machado (2015), Gutiérrez et al. (2014): (1) - monitoramento (indicadores e gatilhos de ação associados a impactos); (2) - avaliação de riscos (identificação de quem e o que está em risco e porque) e (3) - plano de preparação (programas pré-seca e ações para reduzir riscos).

Dada a dimensão continental do Brasil, a proposta foi elaborada para desenvolver as principais ferramentas de uma política nacional proativa de gestão de secas, iniciando com um piloto na região Nordeste e, posteriormente, estender as ações para o restante do país. Dois instrumentos foram essenciais para o avanço em direção a uma política baseada na preparação para a seca e no marco dos três pilares descritos, sendo: 1) um Monitor de Secas para todo o Nordeste e 2) Planos de Preparação para Seca em locais específicos na região (GUTIÉRREZ et al., 2014).

2.2.2 Monitor de Secas do Nordeste

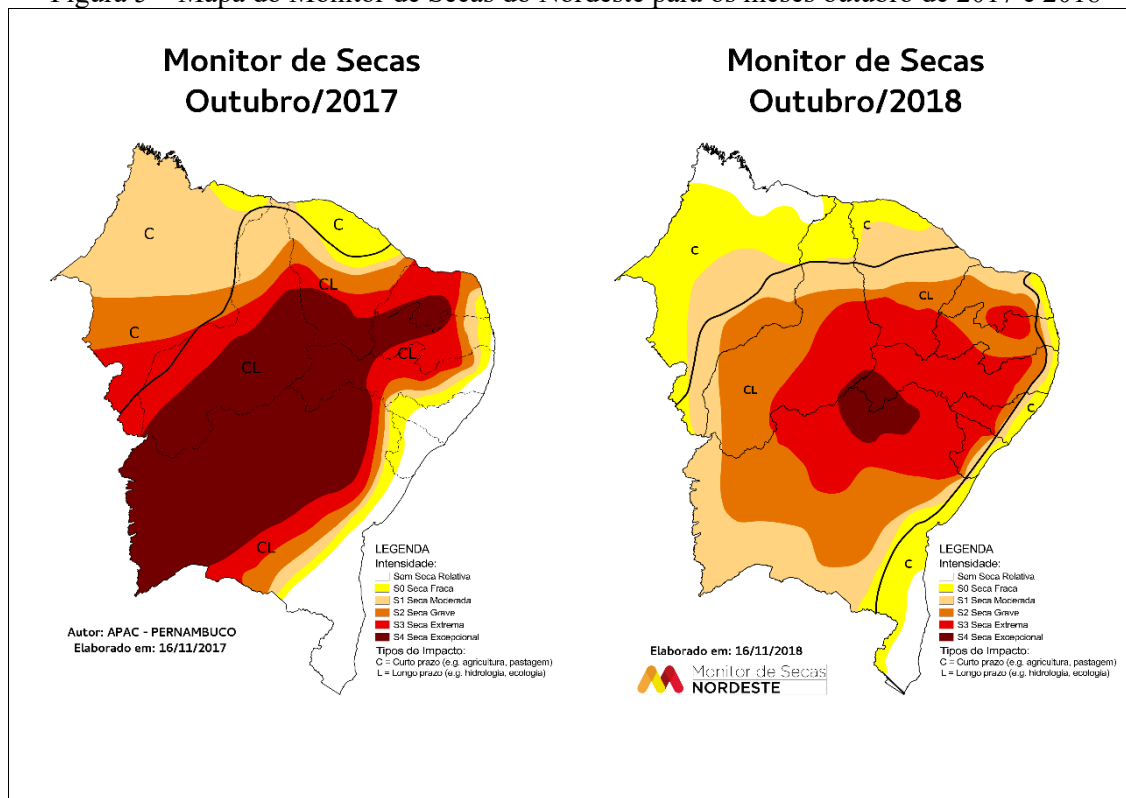
O Monitor de Secas implementado no Nordeste brasileiro, precisamente na região do semiárido, foi fundamentado no Monitor de Secas dos EUA (*US Drought Monitor*) programa elaborado pelo Centro Nacional de Mitigação de Secas dos EUA, México e Espanha, passando por diversos ajustes de acordo com as condições locais do nordeste brasileiro, para que assim fosse possível sua implantação.

Compreende o acompanhamento regular e periódico da situação da seca no Nordeste, cujo objetivo é integrar o conhecimento técnico e científico já existente em diferentes instituições para alcançar um entendimento comum das condições de seca, como: sua severidade, a evolução espacial e no tempo e seus impactos sobre os diferentes setores envolvidos (ANA, 2019).

Em sua essência, o processo do monitor consiste em combinar diversas fontes de dados, produtos, informações de todos os sistemas de monitoramento seja meteorológico, hidrológico e agrícola/pecuário da União e dos estados participantes, apoiados por informação local trazida por quem realmente vivencia a seca (ANA, 2019). Diferentemente dos métodos tradicionais de monitoramento, onde instituições e

produtos são tratados de forma independente, no monitor o processo é baseado na convergência de evidências, cujos resultados consolidados são divulgados por meio do Mapa do Monitor de Secas, conforme exemplifica a Figura 5.

Figura 5 – Mapa do Monitor de Secas do Nordeste para os meses outubro de 2017 e 2018



Fonte: ANA, 2019.

No mapa são identificadas as regiões com seca de diferentes níveis, divididas em cinco categorias de severidade (S0: seca fraca; S1: seca moderada; S2: seca grave; S3: seca extrema; S4: seca excepcional) representada por cores distintas, sinalizando a intensidade e tempo de duração do evento. Mensalmente, produz e divulga-se o mapa que reflete a seca, seja física ou natural, indicando as áreas com severidade fraca até a mais grave. A partir da análise do mapa atual e anteriores, pode-se verificar a evolução tanto espacial como temporal da seca na região monitorada, identificando se um evento está dando indícios de melhora ou piora.

A Tabela 1 apresenta as categorias de secas e seus impactos associados utilizados pelo Monitor de Secas do NDMC para melhorar a definição e a caracterização das secas no Nordeste do Brasil.

Tabela 1 – Categorização de secas, definem a intensidade de seca no Mapa do Monitor e os possíveis impactos associados

Categoria	Percentil	Descrição	Impactos Possíveis
S0	30	Seca fraca	Entrando na seca: seca de curto prazo desacelera o plantio e crescimento de culturas/pastagens. Saindo da seca: déficit hídrico remanescente, culturas e pastagens ainda não se recuperaram completamente
S1	30	Seca moderada	Alguns danos às culturas, pastagens; rios, reservatórios ou poços com baixo nível de água. Faltas de água em desenvolvimento ou intermitentes; solicitação de restrições voluntárias do uso da água
S2	10	Seca grave	Provável perda de culturas ou pastagens; faltas de água são comuns; restrições hídricas são impostas
S3	5	Seca extrema	Grandes perdas de culturas/pastagens; amplas faltas de água ou restrições hídricas
S4	2	Seca excepcional	Perdas de culturas ou pastagens excepcionais e amplas; falta de água em reservatórios, rios e poços, gerando emergências hídricas

Fonte: Adaptado de Nys; Engle; Magalhães, 2016.

O Monitor de Secas do Nordeste constitui um processo participativo que conta com o apoio de instituições do setor climático, de recursos hídricos e da agricultura dos diversos estados, bem como de instituições federais seletas, visando identificar a severidade da seca em suas dimensões meteorológica, hidrológica e agrícola. Adicionalmente, é também um mecanismo para o diálogo entre os governos federal e estaduais sobre o tratamento dos riscos e condições no Semiárido, bem como a preparação para as secas, gerando consenso e integração institucional.

2.2.3 Planos de Preparação para a Seca e o Monitor

A seca pode ser entendida como um desvio em relação às condições de longo prazo das variáveis precipitação, umidade do solo, água subterrânea e vazão fluvial. Decorre de um índice de água natural abaixo da média devido a variabilidade climática, resultando em baixa precipitação e/ou alta evaporação (DE NYS; ENGLE; MAGALHÃES, 2016). No entanto, é importante distinguir a seca de escassez de água. A seca é um fenômeno natural; já a escassez ocorre quando a falta de água é causada por interferência humana usando-se mais água do que naturalmente disponível.

O processo do monitor reflete a seca com causa natural ou física, ou seja, quando a disponibilidade hídrica fica abaixo da média em função da variabilidade climática. Quanto à seca operacional pode ser decorrente de uma sequência de decisões na forma de gerir determinado sistema, neste caso um sistema de reservatório, podendo acelerar os impactos de uma seca física sobre o sistema.

Nesse contexto, visando estabelecer conexões entre o monitor (dimensões físicas) e os sistemas gerenciáveis (dimensões operacionais) criou-se um programa piloto com uma série de estudos de caso para a região Nordeste, tendo como instrumento os Planos de Preparação para as Secas juntamente com o Monitor de Secas, com o intuito de demonstrar o uso de ferramentas e estratégias concretas para a gestão proativa da seca.

O programa elaborou cinco planos de preparação para estudo dentro de quatro contextos: abastecimento urbano, planejamento de bacia hidrográfica, gerenciamento de reservatório multiuso e agricultura de sequeiro familiar. Os planos caracterizam os impactos da seca e vulnerabilidades, os principais atores institucionais, as medidas de planejamento para a mitigação dos riscos de seca e as respostas de emergência.

O sistema hídrico de Jucazinho, inserido no Agreste de Pernambuco, foi escolhido para aplicação do estudo no contexto do gerenciamento de reservatório multiuso. Optou-se por este sistema por estar inserido num contexto regional que tem a seca como principal evento climático, podendo ser modelo de referência para todos os locais acometidos por esse tipo de evento.

2.2.4 Monitor de Secas Aplicado a Hidrossistemas

A definição da regra de operação dos reservatórios é o primeiro passo da alocação da água armazenada. Tem por objetivo a definição da vazão a ser liberada para se atender a uma demanda, em função do estado atual do reservatório ou do estado do sistema de reservatórios, caso ele seja operado de forma integrada a outros.

A construção das regras de operação do reservatório de Jucazinho, foi descrita pela metodologia aplicada por Souza Filho et al. (2014), que utilizaram como indicador a disponibilidade dos estoques de água para operação do reservatório e construção dos níveis metas.

Os indicadores são baseados nas variáveis meteorológica, hidrológica ou de alguma característica do hidrossistema, funcionando como gatilhos que acionam a

vazão disponível para alocação em cada estado de seca. Esse indicador será utilizado para decidir uma resposta apropriada ao evento e, conseqüentemente para definir as ações adequadas a cada resposta.

Foram delineados quatro estados de severidade de seca em reservatórios, sendo: alerta, seca, seca severa e seca extrema, conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2 – Caracterização dos estados de secas conforme a severidade

Estado	Características
Alerta	Constitui-se da preparação administrativa e operacional do início de uma seca. Este nível não atinge nenhum agente social e se restringe as instituições de gestão e de abastecimento público.
Seca	Fase de menor impacto econômico e social. Os gestores tentam reduzir o consumo hídrico através de campanhas educacionais e buscam aumentar a disponibilidade hídrica de alguns usos em detrimento a outros. Nela são utilizadas principalmente as ações de comunicação, como a informação ao consumidor e para a mídia e as ações de acompanhamento da situação do risco.
Seca Severa	Estado que pode acarretar situações críticas de escassez hídrica nas cidades. Ela impactará a sociedade, o ambiente e a economia por isso, deve ser implementadas limitações para o uso da água com vistas a reduzir o consumo de todos os setores econômicos e sociais e deve ser realizado o monitoramento do consumo e da qualidade de água.
Seca Extrema	Situação mais grave de seca e que pode causar escassez hídrica generalizada. Gera impactos sociais e econômicos de longo alcance e os gestores devem realizar racionamentos com a vistas a garantir volumes de água que atendem as necessidades básicas da população. Possui como ênfase a limitação e o monitoramento do consumo de água, além do monitoramento da qualidade de água.

Fonte: Adaptado de Souza Filho et al. (2014).

Cada estado está associado ao volume do reservatório, que foi definido como indicador por representar o resultado de todos os fatores que afetam a oferta hídrica como precipitação, escoamento superficial e umidade do solo, bem como, pela finalidade de uso da água acumulada no manancial.

2.2.5 Modelo de Operação de Reservatório

Baseado no programa Monitor de Secas do Nordeste, Souza Filho et al. (2014) aplicaram a metodologia, a qual constituiu-se na definição de níveis-meta tomados a partir da disponibilidade hídrica do reservatório, utilizando a otimização de uma curva genérica calculada da seguinte forma:

- a) inicialmente foi feito o cálculo de acumulação do reservatório, utilizando a equação do balanço hídrico que será descrita adiante;

- b) construção da primeira curva de disponibilidade (C1) tomando como ponto de origem um volume h_1 , definida como 80% do volume de acumulação máxima do reservatório, para o primeiro nível meta;
- c) utilizou-se a equação do balanço hídrico com vazão afluyente zero e retirada mensal, inicialmente, igual a 30% da média das vazões afluentes da série histórica disponível, para o cálculo da acumulação dos onzes meses subsequentes;
- d) construção de uma segunda curva (C2), tomando-se como o volume do décimo segundo mês o mesmo valor h_1 . Utiliza-se a mesma equação do balanço para o cálculo dos onzes meses anteriores. Sendo a retirada operacional igual à da curva construída anteriormente;
- e) uma terceira curva (C3) é construída tomando-se o volume afluyente igual a um determinado quantil da série histórica de vazões. Constrói-se uma matriz de probabilidade de não excedência, e toma-se o valor de vazões afluentes do ano corresponde, igual a mediana das probabilidades de não excedência. A equação do balanço hídrico será utilizada para a construção da terceira curva, sendo o volume inicial e a retirada operacional com valores iguais ao da curva C1.

Por fim, a definição do nível meta se dá pela utilização dos valores correspondentes, mês a mês, pelo máximo entre a curva C1 e curva C3, e o mínimo entre esse resultado e a curva C2.

Nessa sequência, são construídos os outros níveis metas definidos a partir de um plano de operação para o reservatório. Repetindo-se o mesmo algoritmo proposto e modificando os valores de volume inicial para cada nível meta, por exemplo, $h_2 = 0.5 \times V_{\text{máx}}$; $h_3 = 0.4 \times V_{\text{máx}}$; $h_4 = 0.3 \times V_{\text{máx}}$, construindo-se quatro níveis metas. Definido os níveis metas, o algoritmo inicia o cálculo da acumulação do reservatório utilizando a equação do balanço hídrico, sujeita a uma regra de operação citada anteriormente.

A definição dos estados de seca pode ser calculada por meio do zoneamento do reservatório. Sendo que a sinalização de cada estado ocorre por meio de faixas/zonas de ocorrência do indicador (nesse caso o volume do reservatório), em que cada faixa é associada à liberação de uma vazão, de forma a constituir o regime de operação do reservatório que, por sua vez, define a quantidade de água disponível.

Conforme descrito e aplicado por Souza Filho et al. (2014), a Tabela 2 apresenta os cenários de severidade de seca em reservatórios, sendo cada um referente a um gatilho (percentual do volume máximo disponível) e associado às metas de respostas.

Tabela 2 - Cenários de seca: estado, gatilhos e metas de resposta

CENÁRIOS DE SECA		
Estado	Gatilhos das secas*	Metas de resposta
Alerta	80%	Redução 10% no consumo
Seca	60%	Redução 20% no consumo
Seca Severa	45%	Redução 30% no consumo
Seca Extrema	30%	Redução 60% no consumo

Fonte: Adaptado de Souza Filho et al. (2014)

*Gatilho de seca – Percentual do volume máximo

Com base no exposto, tem-se que: i) quando o reservatório estiver com 80% do seu volume total será acionado um gatilho onde a meta de resposta deverá ser uma redução de 10% no volume captado a partir do mês seguinte; ii) quando o reservatório estiver com 60% de sua capacidade total a redução na captação deverá ser de 20%; iii) quando atingir 45% do volume total a redução será de 30% do consumo e por fim; iv) quando estiver com apenas 30% da capacidade total a meta de resposta será um total de restrição de 60%.

Nesse sentido, cada vez que o limite superior de uma faixa é ultrapassado, define-se um estado de seca e aciona-se um conjunto de ações. O conjunto das ações associadas a um estado de seca objetiva cumprir uma meta, seja de ampliação da oferta, de redução da demanda, de adaptação da população e/ou mitigação os impactos e conflitos (DE NYS, ENGLE, MAGALHÃES, 2016; SOUZA FILHO et al., 2014).

Afim de verificar o comportamento das barragens na perspectiva do suprimento de água das cidades do Agreste de Pernambuco, Ramos (2017), aplicou em sua tese a metodologia do Monitor de Secas para alguns reservatórios dessa região, dentre eles o reservatório de Jucazinho e do Prata, admitindo-se as mesmas regras de operação propostas por Souza Filho et al. (2014), considerando a simplificação de que essas também fossem válidas para o reservatório do Prata.

2.3 SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Um sistema é uma estrutura formada por vários componentes que interagem entre si, recebem impulsos, efetuam transformações e emitem respostas. Aplicando-se aos recursos hídricos, um reservatório é uma estrutura hidráulica formada por vários componentes (barragem, vertedouro, tomada de água) que interagem entre si, recebem impulsos (precipitação pluvial, deflúvios), efetuam transformações e emitem repostas

(vazão regularizada, vertimentos e perdas por evaporação) (CAMPOS, 2009). Em síntese, um reservatório é um sistema que transporta água ao longo do tempo para transformar os padrões aleatórios providos pela natureza em padrões de consumo da sociedade.

A análise de sistemas hídricos é o processo em que os componentes do sistema de recursos hídricos e suas interações são descritas em termos quantitativos por meio de equações matemáticas e funções lógicas. Em geral, procura-se o arranjo dos componentes do sistema que gerem o melhor resultado, ou o ótimo, de uma equação (função objetivo). Além de definir a melhor solução, dentro de critérios preestabelecidos, este enfoque permite que se estruture o problema, indicando como os vários elementos interagem. A construção do problema é tão importante quanto sua solução, é nessa etapa que os pontos relevantes são decididos para fazer parte dos diferentes modelos que compõem o sistema (CAMPOS, 2009; BRAGA, et al., 1998).

2.3.1 Operação de Sistemas Hídricos

Operar um reservatório consiste em decidir quanta água deverá ser armazenada ou liberada para determinadas finalidades e usos. Os reservatórios são projetados para atender às demandas múltiplas, como abastecimento de água, geração de energia elétrica, controle de enchentes e outros. Tendo em vista as incertezas quanto ao volume de recarga desses sistemas, torna-se um desafio determinar as estratégias de operação que melhor atendam aos seus diferentes usos.

As simulações de reservatórios, em sua essência, baseiam-se no modelo do balanço de massa hídrica. Esse modelo reproduz o desempenho hidrológico do reservatório para determinadas regras operacionais. Existem diferentes regras de operação de reservatórios, mas, em geral, todas utilizam como variável de decisão o volume do reservatório ou a vazão defluente que se pretende atingir em determinados intervalos de tempo, como o diário, semanal ou mensal (LOUCKS et al., 2017).

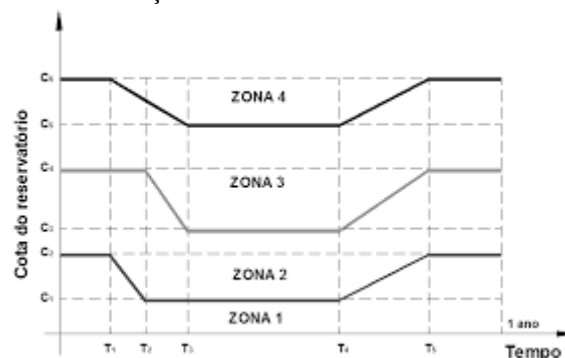
As regras de operação são definidas na forma das chamadas “curvas-guia” ou “curvas de operação”, sendo usadas para indicar os volumes, níveis d’água ou limites de vazão meta ou ideais do reservatório com vistas a atender dado objetivo. Nas curvas ocorre a liberação de uma vazão específica para cada valor de armazenamento em cada período dentro de um determinado ano (WURBS, 2011). Nesse sentido, períodos com zonas de armazenamento mais altas são associados às maiores liberações no

reservatório, paralelamente, baixos armazenamentos à menores quantidade de água liberada.

Assim definidas, as curvas são utilizadas num modelo de simulação na operação de um reservatório ou de um sistema de reservatórios. Por fim, o modelo de simulação é vinculado a um modelo de otimização para produzir regras de operação otimizadas (BRAVO et al., 2008).

Uma das regras de operação comumente utilizada inclui a divisão do volume útil do reservatório em diferentes zonas que possuem políticas de descarga hídrica específicas. A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano ou variar sazonalmente (WURBS, 2005). A Figura 6 exemplifica a divisão do volume de reservatório em diferentes zonas.

Figura 6 – Distribuição do volume útil do reservatório em zonas



Fonte: Bravo et al. (2008)

As regras para operação de reservatórios são diversas, porém todas indicam o armazenamento ou descarga alvo que se pretende obter em determinados intervalos de tempo. Essas regras visam atender à solicitação de vazão efluente e demandas do sistema para aperfeiçoar determinados objetivos, sejam conservação de água no reservatório, geração hidrelétrica ou manutenção da vazão à jusante do mesmo (ANA, 2015).

Os modelos de análise de sistemas de reservatórios têm sido tradicionalmente categorizados como simulação, otimização e/ou combinações de ambos. São técnicas utilizadas para definição das curvas-guias aplicadas por diversos pesquisadores (SOUZA FILHO et al., 2014; WURBS, 2011; BRAVO et al., 2008; LOUCKS et al., 2017) para definir regras de operação de reservatórios ou de sistemas de reservatórios.

2.3.2 Modelos de Análise de Sistemas Hídricos

Campos (2009), define modelo como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico, que com base em uma teoria científica busca explicar ou prever as propriedades de um sistema. Num sentido mais amplo, é a conceitualização do sistema a qual mesmo não se conhecendo todas as suas características, um modelo consegue, com certo grau de segurança, simular seu comportamento quando submetido a diferentes condições.

Para Tucci (1998), um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Consiste numa ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

Os modelos hidrológicos apresentam tipologia diversa, distinguindo-se em função do seu objetivo (simulação ou otimização), quanto à origem podendo ser empírica, conceitual ou de processos físicos e, no que diz respeito à discretização espacial, variando de concentrados a distribuídos. O tempo é também uma dimensão relevante a ser levada em conta, havendo modelos orientados para simular eventos isolados e outros para a simulação contínua (ALMEIDA; SERRA, 2017).

2.3.3 Modelo de Otimização

O termo otimização é usado como sinônimo de programação matemática para se referir a um algoritmo que calcula um conjunto de valores de variáveis de decisão que minimizam ou maximizam uma função sujeita a restrições, para equacionar problemas de análises de sistemas de reservatórios (WURBS, 2011).

Para Campos (2009), são algoritmos matemáticos que procuram identificar os pontos máximos ou mínimos da função objetivo, que por meio de uma equação matemática representa os objetivos definidos na operação. A chamada função objetivo depende de um número finito de variáveis, as quais podem ser independentes entre si ou podem ser relacionadas a uma ou mais restrições.

Para representar um sistema de reservatórios com modelo de otimização e tornar o problema de operação solucionável, é necessário adotar hipóteses e simplificações,

para que haja convergência e solução dessas equações, geralmente fornecendo resultados sem grandes refinamentos (BRAGA et al., 1998).

2.3.4 Modelo de Simulação

Um modelo de simulação é representação de um sistema usado para prever seu comportamento sob um determinado conjunto de condições variáveis, como planos operacionais alternativos (WURBS, 2011). Consiste num conjunto de expressões matemáticas construída em sequência lógica, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo. Seu objetivo é representar e operar o sistema de forma mais detalhada possível e fornecer informações para avaliar seu comportamento real (CAMPOS, 2009).

Simular um sistema consiste em avaliar qual teria sido seu comportamento se determinadas regras de operação tivessem sido obedecidas, e certos impulsos tivessem ocorrido. No sentido mais técnico, o termo simulação é usado para descrever o comportamento de um sistema representado por semelhanças com outros sistemas ou equações matemáticas (BRAGA et al., 1998).

A operação simulada de reservatórios realiza, a cada intervalo, o balanço de massa dos reservatórios; sendo especificadas as afluências nas áreas de interesse, as características físicas do sistema e as regras de operação. Deste modo, utiliza-se uma série histórica de vazões afluentes e outras variáveis de interesse, elaboram-se as regras de operação, usa a equação da continuidade e por fim, verifica-se o comportamento do reservatório caso as regras de operação fossem obedecidas. Assim, simula-se o passado para decidir o futuro (CAMPOS, 2009).

Os modelos de otimização e simulação podem ser configurados para atender diversos objetivos, tais como: custos e benefícios econômicos (maximizar a oferta de água, minimizar custos num sistema de distribuição, minimizar perdas econômicas decorrentes de escassez hídrica, etc.); disponibilidade de água (maximizar o volume acumulado ao final de um horizonte de otimização, minimizar vertimentos ou perdas por evaporação); geração hidroelétrica (maximizar a energia potencial de água armazenada no sistema, minimizar a escassez de energia, etc.) (ANDRADE et al., 2001).

Embora a otimização e simulação sejam abordagens com características distintas, ambas são utilizadas em conjunto na modelagem de sistemas hídricos. Um

procedimento de otimização pode envolver execuções iterativas de um modelo de simulação, assim como algoritmos de otimização podem ser incorporados em modelos de simulação (WURBS, 2005).

Na literatura, vários estudos foram realizados utilizando abordagem combinada de modelos de otimização-simulação para derivar regras de operação de reservatórios em regiões áridas e semiáridas do Brasil e do mundo. Como exemplo, cabe ressaltar os trabalhos de Van Oel et al. (2012), realizaram um estudo no reservatório de Orós na bacia do rio Jaguaribe semiárido do estado do Ceará, a fim de identificar a influência de estratégias de operação de reservatórios na distribuição do uso da água em caso de diminuição de chuvas. Foram aplicados um modelo de balanço hídrico, um modelo climático (ECHAM4) e o modelo Abstract, projetado para simular a interação de disponibilidade e uso de água em bacias que lidam com escassez. Foi simulado um período de 50 anos de série histórica, dividida em três cenários: uso da água em estação chuvosa, uso da água em estação seca e uso anual da água. Como resultado, mostrou que a diminuição na precipitação leva a uma transição do uso da água da estação chuvosa para uma estação seca, com o aumento da escassez dependendo da estratégia de operação aplicada. Em geral, aplicando-se uma operação estratégica é possível compensar os efeitos adversos da redução da precipitação e escoamento, aumentando o suprimento de água ou reduzindo de acordo com cada cenário.

Bolouri-Yasdeli et al. (2014), compararam o desempenho de várias regras operacionais aplicadas ao reservatório de Karoom-IV, localizado numa região Semiárida do Irã, cujo objetivo é suprir a demanda total a jusante desse sistema. Para as regras foram utilizados os métodos política de operação padrão (SOP), programação dinâmica estocástica (SDP), regra de decisão linear (LDR) e regra de decisão não linear (NLDR), com várias ordens de volume de entrada e armazenamento de reservatório; para o cálculo das curvas de regra foi usada a linguagem de otimização interativa (LINGO). Foi considerado um período de 48 anos, com série de dados para ano seco, normal e chuvoso. Os melhores resultados foram obtidos com os métodos LDR e NLDR, mostrando-se menos vulneráveis e com maior resiliência na operação do reservatório, sendo regras de decisão flexíveis para incorporar em um modelo matemático e regular de forma eficiente a liberação ou armazenamento de água no reservatório para atender a vários fins operacionais.

Farias et al. (2011) utilizaram um modelo baseado em Otimização Estocástica Implícita (ISO) e Rede Neural Artificial (RNA) para derivar regras operacionais diárias

em um sistema de reservatórios, Coremas-Mãe d'água, localizado no semiárido do Paraíba. O objetivo principal da operação foi encontrar alocações de água que melhor atendessem as demandas totais sem comprometer o sistema. O procedimento consistiu em otimizar o sistema de reservatório para possíveis cenários de entrada e, em seguida, analisar os melhores resultados para gerar regras operacionais num horizonte de 100 anos. Foi observado que o modelo de otimização tenta mitigar grandes déficits, diminuindo as saída de água em períodos de escassez, para que o déficit geral também diminua. Em síntese, os resultados mostraram que as regras de operação ISO-RNA e o modelo determinístico empregado geraram melhores de operação do sistema que as regras operacionais padrão, podendo consequentemente ajudar no processo de tomara de decisão para a operação de sistemas hídricos em regiões semiáridas.

Goodarzi et al. (2013), utilizaram técnicas otimização para determinar regras de operação mensal para o reservatório de Doroudzan, inserido na região semiárida do Irã. Como objetivo, buscou-se investigar a eficiência do reservatório sob a perspectiva de diferentes estratégias de operação, com vistas a maximizar a quantidades de água liberada para atender as demandas a jusante do reservatório (doméstica, industrial e agrícola). O período de análise foi de 21 anos (1986 a 2006), sendo utilizado um algoritmo de programação linear e a ferramenta de otimização LINGO. Como resultado da otimização houve o aumento da água armazenada no reservatório em 75% das estratégias testadas; havia 211 meses em déficit hídrico e a confiabilidade do sistema era de 16%, após a otimização a confiabilidade aumentou em todas as estratégias adotadas. O reservatório não pode fornecer água para todas as demandas simultaneamente, contudo, o emprego das políticas de operação reduziu o déficit hídrico mensal e aumentou a eficiência no gerenciamento da água disponível e prioridades de demandas.

Gomes et al. (2019) utilizaram a operação estratégica de reservatórios com o objetivo de otimizar a alocação de água do reservatório Cruzeta na bacia Piancó-Piranhas-Açu, localizado na região semiárida entre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Foram utilizadas curvas-guia baseada na divisão de zonas com a finalidade de racionar os usos da água em função do nível de armazenamento do reservatório. Como algoritmo foi utilizado o NSGA-II para otimizar os limites ideais dessas zonas para o período de 1962 a 2009, sendo definido diferentes cenários de racionamento para verificar a melhor regra de operação possível de ser implementada. Os resultados indicaram que considerar racionamentos na regra de alocação de água em Cruzeta pode

aumentar a garantia de atendimento às demandas prioritárias de 56% no tempo analisado (48 anos) para 97%. A metodologia utilizada mostrou-se satisfatória, sendo uma ferramenta para os gestores diante da possibilidade de discutir diferentes cenários em busca da regra ideal que concilie o uso mais racional do recurso hídrico.

Nunes et al. (2016) realizaram um estudo no reservatório de Boqueirão, localizado no semiárido do estado da Paraíba, considerando a hipótese de aproveitamento da água vertida e/ou evaporada para suprir demandas não atendidas pela vazão outorgável do reservatório, utilizando uma vazão máxima excedente para incrementar essa vazão. Foram efetuadas a simulação do balanço hídrico e otimização, sendo desenvolvida uma curva-guia de 1963 a 1983 para operação do reservatório a fim identificar a vazão excedente máxima explorável em períodos de cheia, e o período de 2004 a 2015, para verificar seu desempenho em situações contrastantes: uma sequência de anos relativamente chuvosos (2004-2011), seguido por uma série de anos secos (2012-2015). Como algoritmo de otimização foi empregada a ferramenta Evolver, implementada como suplemento para Microsoft Excel. Como resultados encontrados, pode-se concluir que há a possibilidade de utilizar uma vazão excedente em períodos de grandes afluições sem que o abastecimento em períodos secos seja prejudicado. A construção da curva de operação provou ser adequada para uso em reservatório, mostrando resultados satisfatórios e consistentes, podendo ser utilizada para auxiliar na implementação de instrumento de direitos da água.

Diversas são as estratégias de operação de reservatórios, cada uma seguindo especificações de acordo com os métodos empregados e objetivos que se pretende atingir. Voltando-se para o abastecimento, as regras de operação têm-se mostrado uma alternativa adequada para apoiar o processo de tomada de decisão em sistemas hídricos onde existem restrições de quantidade de água, como exemplo em regiões semiáridas, viabilizando valores ótimos de exploração para esses sistemas mesmo em condições de seca.

Nesse sentido, diante da complexidade e incertezas envolvendo o gerenciamento de recursos hídricos, torna-se necessário o processo de resolução de problemas por análise de sistemas de recursos hídricos que possuam um enfoque racional para permitir a tomada de decisão com base na organização sistemática de informações relevantes.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Uma das questões mais discutidas em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos diz respeito a como selecionar e formalizar critérios que orientarão a escolha da melhor alternativa (GOÉS FILHO, 2012). Nesse sentido, a análise de sistemas de recursos hídricos constitui uma ferramenta fundamental para este fim, pois permite sistematizar o processo de planejamento com elementos quantitativos.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento e aplicação de um modelo baseado em regras de operação para estimar as disponibilidades hídricas para seis reservatórios do Agreste do estado de Pernambuco, empregando-se técnicas de otimização e simulação. Para isso estruturou-se um modelo de simulação do balanço hídrico baseado na conservação da massa, derivado do método de *Puls*. Em complemento, utilizando técnicas de otimização, foram determinadas estratégias para aprimorar a quantificação das retiradas de água do reservatório, de modo a maximizar o aproveitamento das águas armazenadas.

Para o processo foram utilizadas planilhas do programa Microsoft Excel, que possuem rotinas de otimização inseridas no suplemento Solver disponível no programa.

3.1 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DO RESERVATÓRIO

O modelo construído corresponde ao balanço hídrico mensal com simulações sucessivas para cada reservatório em estudo conforme os períodos de interesse. Para o cálculo da acumulação dos reservatórios foi aplicada a equação do balanço hídrico seguindo recomendações de Tucci (1998), obtendo-se pela fórmula:

$$V_{t + \Delta t} = V_t + I_t - E_t \cdot A_t - R_t - P_t \quad (1)$$

Onde,

$V_{t + \Delta t}$ = volume do reservatório no período $t + \Delta t$, $\Delta t = 4 \text{ horas}$

V_t = volume armazenado no início do período t ;

I_t = volume afluente ao reservatório no período t ;

E_t = lâmina evaporada durante o período t , suposta constante ao longo do período;

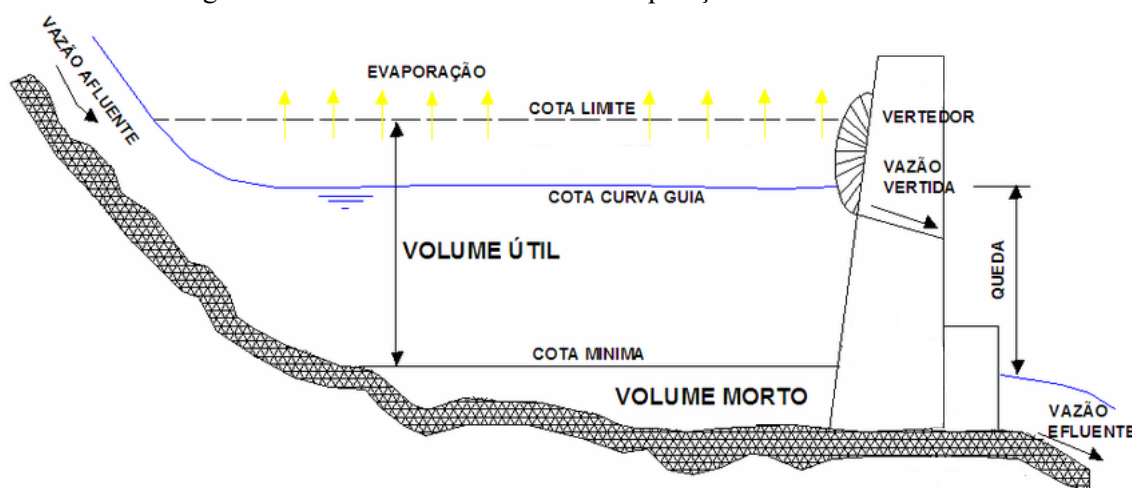
- A_t = área do espelho d'água no início do período t , suposta constante para intervalos de tempos curtos;
 R_t = retiradas operacionais visando suprimento das demandas e vertimentos;
 P_t = perdas por infiltração.

No caso do presente estudo, a variável de infiltração (P_t) não foi considerada no cálculo por ser um parâmetro que apresenta pouca influência no resultado do balanço hídrico de reservatórios.

Os dados utilizados de vazão e precipitação são diários. Em função da operação dos vertedouros das barragens a vazão foi reduzida para períodos menores, sendo que para o cálculo dos volumes na equação de balanço hídrico esses dados foram interpolados a cada quatro horas.

De posse da série que traduz o balanço de entradas e de saídas parte-se do estado inicial do reservatório para simular seu comportamento, com vistas a identificar quais as retiradas possíveis em cada sistema. A Figura 7, ilustra as principais variáveis integrantes da operação de reservatórios.

Figura 7 – Variáveis intervenientes na operação de um reservatório



Fonte: Adaptado de Bravo et al. (2008).

No caso do presente estudo, tendo em vista que a crise hídrica tem levado ao aproveitamento dos reservatórios no semiárido até praticamente os mesmos secarem (captando o volume morto por meio de bombas flutuantes), considerou-se no processo de otimização o valor mínimo de operação de 1 milhão de m³.

Para simular a operação dos reservatórios o cálculo da massa hídrica foi realizado com dados reais (observados) da vazão afluyente, precipitação, evaporação, além de características do hidrossistema, volume de acumulação, área hidráulica, cotas, que serão detalhadas posteriormente.

3.1.1 Gradiente Reduzido Generalizado

O algoritmo utilizado foi o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), apresentado por Abadie e Carpentier em 1969 para solucionar problemas de programação matemática com uma função objetivo não linear e restrições lineares (RAO, 2009). Sendo utilizada sua segunda geração o GRG2 já contendo melhorias o tornando-o mais rápido e eficiente.

É um método muito empregado na resolução de problemas de múltiplas respostas, devido a sua facilidade de implantação e ser disponibilizado no pacote Solver que acompanha o programa Microsoft Excel. Para sua aplicação foram necessárias as etapas:

- a) **Variáveis de Decisão:** vazão recomendada de captação para cada estado inicial do reservatório em cada mês; é uma matriz contendo 132 valores de vazões (11 estados iniciais do reservatório e 12 meses);
- b) **Função Objetivo:** maximização da variável de decisão. O resultado da otimização uma matriz com as vazões recomendadas otimizadas;
- c) **Especificação das Restrições:** são implementadas de forma a restringir o algoritmo a permanecer dentro da região viável de busca. As restrições aplicadas foram: a não-negatividade das vazões e o volume mínimo de água estocada em qualquer tempo, imposto para os maiores reservatórios como um volume mínimo de operação estimado em 1 milhão de m^3 , exceto para o reservatório de Bituri cujo volume mínimo foi considerado igual a 100.000 m^3 . Observa-se que na criticidade da seca mesmo o volume morto dos reservatórios, aquele abaixo do ponto de captação convencional, tem sido explorado mediante colocação de bombas sobre sistemas flutuantes no espelho d'água.

Como não há dependência entre as vazões de referência a otimizar e os estados iniciais do reservatório/mês, a otimização é feita de forma isolada para cada mês e cada estado inicial. Portanto, o processo foi repetido 132 vezes.

Após o estabelecimento destes parâmetros foi escolhida a utilização do GRG como o algoritmo de busca a ser utilizado pelo Solver e selecionada a opção de maximizar a função objetivo, que nesse trabalho consiste na vazão regularizada de longo termo.

O algoritmo funcionou bem para a metodologia utilizada, alcançando a convergência entre 6 a 10 iterações para cada mês/estado inicial. O Quadro 4 apresenta a relação de variáveis utilizadas no modelo de otimização.

Quadro 4 – Variáveis utilizadas no modelo de otimização

Variáveis	Tipo de Variável
vazão diária precipitação diária evaporação diária	dado de entrada
vazão de referência	variável de decisão
vazão média captada	função objetivo
área cota vazão vertida volume afluente volume evaporado volume vertido volume precipitado volume acumulado	variável de estado

Fonte: Autora, 2019.

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO

Antes da construção das curvas-guia é importante definir o objetivo que irá conduzir a operação do reservatório. No caso dos reservatórios do Agreste, objeto desse estudo, a principal função é identificar qual a exploração máxima para esses sistemas hídricos de modo que não atinjam o estado de exaustão, haja vista que são importantes fontes de abastecimento humano da região e representam a principal demanda estimada para os reservatórios.

O modelo de operação do reservatório é integrado pelo modelo de balanço hídrico e pelo modelo de otimização. O modelo de otimização comanda o processo definindo os valores das variáveis de decisão a serem testadas. No balanço da massa hídrica são definidas as vazões afluentes, defluentes, máximas, mínimas, vertidas, os

níveis de água no reservatório para cada intervalo de tempo; com base no resultado dessas variáveis é calculado o valor da função objetivo que é otimizada para identificar as vazões máximas de captação em cada reservatório conforme cada estado inicial e mês.

Esse processo se repete em forma iterativa, em cada iteração novos valores das variáveis de decisão são testados até satisfazer um critério de parada estabelecido. No caso do presente estudo, as curvas-guia são formadas por limites das vazões máximas que podem ser captadas no tempo, abrangendo períodos anuais com discretização mensal e são utilizadas em cada ano do período de simulação. O modelo de operação de reservatório utilizado parte de algumas premissas básicas:

- 1) Em cada mês do ano, parte-se da hipótese que o reservatório esteja com 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% até atingir 100% de capacidade de acumulação, esses são os estados iniciais da simulação;
- 2) A regra fundamental é que, independentemente do estado inicial o reservatório não entre em colapso por dois anos consecutivos, representado por um volume mínimo na condição mais crítica. Ao fim desses dois anos admite-se que o reservatório volte ao estado inicial para simulação dos próximos dois anos e assim sucessivamente até completar todo período histórico da série de dados;
- 3) Nas condições dos itens anteriores, deve-se calcular a vazão máxima captada que não gere o colapso do reservatório em nenhum ciclo de dois anos consecutivos;
- 4) Os cálculos das vazões de captação para cada estado do reservatório em cada mês compõem uma matriz que em princípio representa a operação ideal para as premissas estabelecidas, porém é necessário ainda avaliar o comportamento do sistema hídrico para todo o período de análise. Desta forma, é feita uma simulação de longo termo com os dados históricos de vazão afluente, precipitação e evaporação, de modo a corrigir a matriz de retiradas mediante um valor de $\pm \Delta Q$ aplicado à matriz obtida.

Assim, o modelo de operação proposto compreendeu-se de dois processos de otimização: no primeiro foi realizado o cálculo da matriz de vazões de captação (matriz de operação) para cada reservatório; no segundo processo foi realizado o ajuste dessa matriz de operação considerando o período contínuo de simulação.

3.2.1 Cálculo da Matriz de Vazões Máximas de Captação

O modelo de operação foi estruturado adotando-se para cada reservatório diferentes estados, ou seja, percentuais de acumulação conforme sua capacidade, começando pelo estado inicial de 5% de sua capacidade total, seguidos de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, até atingir a capacidade máxima de 100% de acumulação. Resulta-se, assim, um total de onze estados iniciais para cada um dos meses do período de simulação.

A partir dessa relação obteve-se para cada reservatório uma matriz contendo o conjunto das vazões máximas de captação para cada estado/mês de simulação. Cada matriz de operação corresponde às vazões máximas que podem ser captadas de modo que os reservatórios não atinjam o volume mínimo de operação definido como 1 milhão de m³ ao final de cada ciclo de dois anos de simulação. Sendo assim o primeiro modelo de otimização é descrito como:

$$\max. Z = Q_j^t$$

Sujeito a:

$$V_j^t \geq V_{min} ; Q_j^t \geq 0$$

Sendo:

$$\begin{aligned} Q_j^t &= \text{vazão de referência (limite recomendado para captação)} \\ V_j^t &= \text{volume mínimo acumulado no período} \\ V_{min} &= \text{volume mínimo recomendado} \\ j &= 1, 2, 3, \dots, 11 \text{ (estados iniciais do reservatório)} \\ t &= 1, 2, 3, \dots, 12 \text{ (meses)} \end{aligned}$$

Observe-se que a otimização é feita de forma independente para cada estado inicial do reservatório e cada mês. O fluxograma na Figura 8 a seguir ilustra o procedimento de otimização adotado nesta primeira fase. Exemplo: supondo que o reservatório se encontre acumulado em 20% de sua capacidade em um mês de setembro: para todo o período histórico determina-se qual a máxima retirada que pode ser feita de modo que entre o mês de setembro do ano K e agosto do ano $K + 1$ o volume mínimo não seja inferior ao mínimo convencionado; para cada ciclo de dois anos admite-se que em setembro do ano $K + 2$ o volume retorne aos 20% iniciais.

3.2.2 Ajuste da Matriz de Vazões Máximas de Captação

Uma vez definida a matriz de operação para todos os estados iniciais, a mesma deve ser validada/ajustada para o período contínuo, sem reinicialização do volume inicial do reservatório. Neste caso, admite-se um $\pm \Delta Q$ para toda a matriz, considerando a mesma restrição do volume mínimo. Assim, o segundo processo de otimização consiste no ajuste fino da matriz de decisões, considerando agora o período contínuo. A matriz inicial é aplicada à simulação de operação dos reservatórios, considerando as retiradas sendo iguais a $Q_j^t \pm \Delta Q$, sendo ΔQ uma variável de decisão que leve à maximização da vazão captada média no longo período. O modelo pode ser descrito como:

$$\max. Z = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n Q_{cap}^t$$

Sendo:

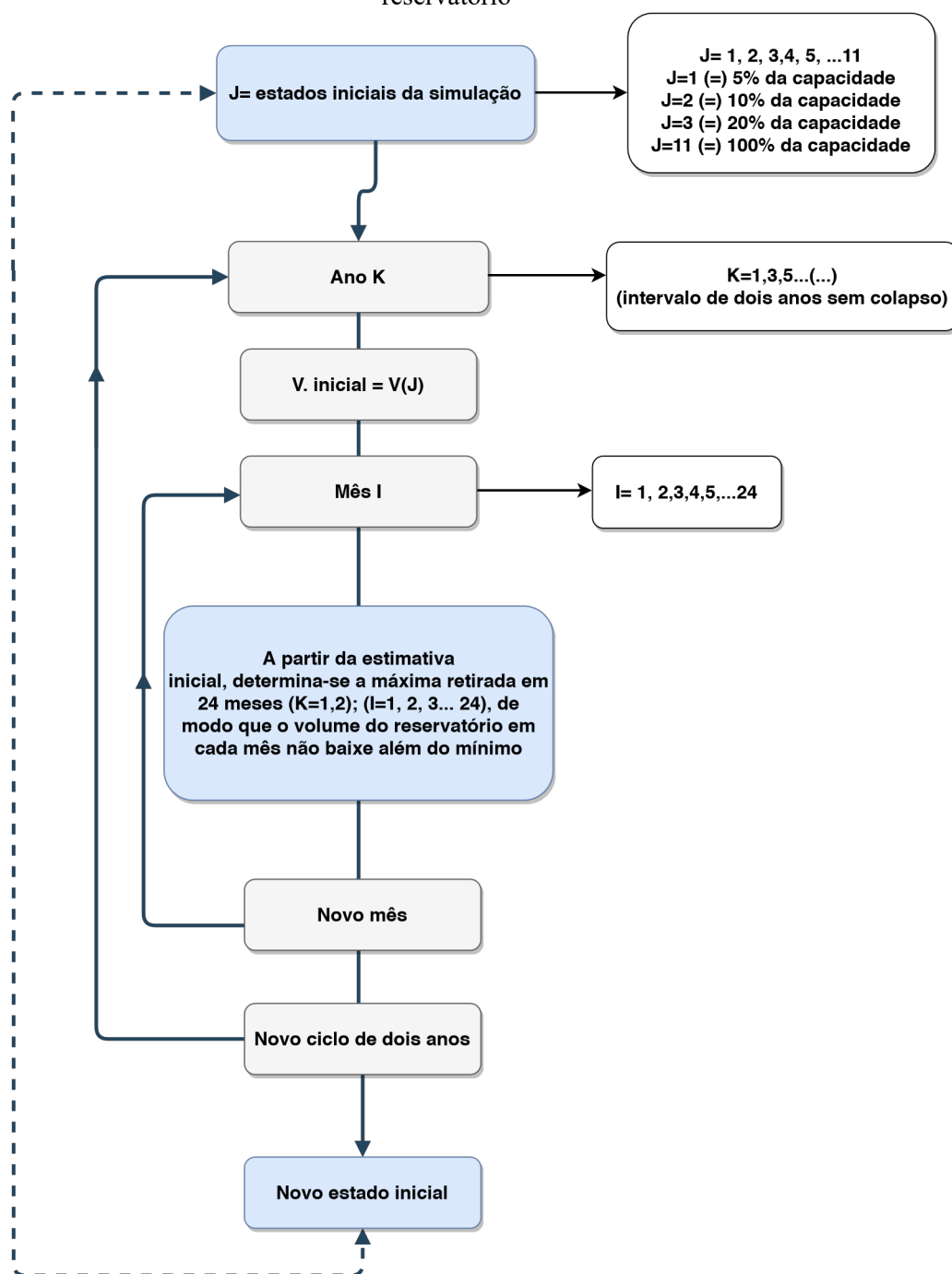
$Q_{cap}^t = Q_j^t \pm \Delta Q$; j o estado de acumulação no reservatório no tempo t e n o número de dias da simulação.

Sujeito a:

$$V^t \geq V_{min} ; Q_{cap}^t \geq 0$$

Obtido o valor de ΔQ a matriz de decisão operacional é corrigida. Z representa a vazão média a ser captada no longo período.

Figura 8 – Fluxograma para a definição da matriz de retiradas em função do estado inicial do reservatório



Fonte: A autora, 2019.

Com base no registro histórico de ocorrência de secas dos últimos 60 anos foram escolhidos os últimos eventos mais severos para servirem como cenário do comportamento de cada reservatório diante dos fenômenos observados. São eles: 1998-

1999 e 2011-2016. Assim, foram definidos três períodos históricos limitados por anos específicos:

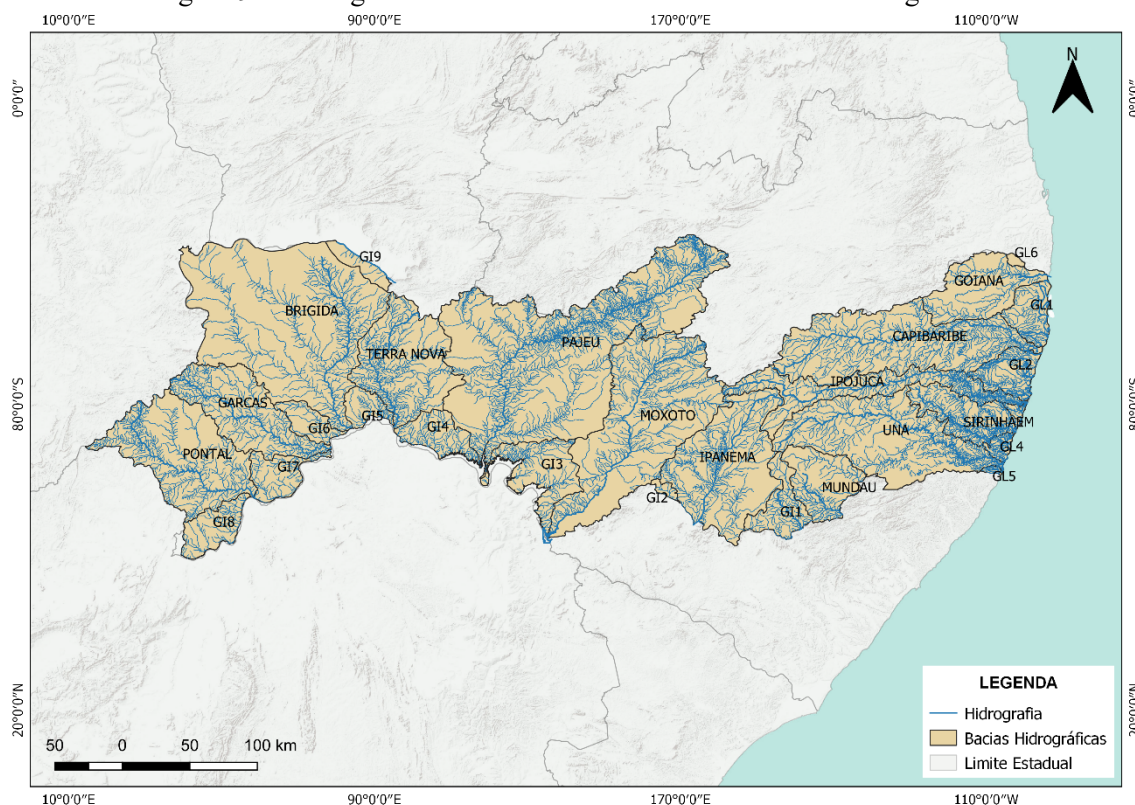
- o primeiro concluído em 1996, portanto sem nenhum dos eventos de seca crítica registrados;
- o segundo se estendeu até 2011, portanto incluindo os eventos mais críticos do final do século passado (1998-1999);
- o terceiro até dezembro de 2016, assim incorporando também os anos de seca mais severa dos últimos cem anos (2012-2016).

Dessa forma, os períodos de simulação foram iniciados em 1973 para todos os reservatórios com exceção do Prata, cujos dados permitiram que a simulação fosse iniciada em 1960. Nota-se que esses períodos de simulação antecedem a existência dos reservatórios, que foram construídos posteriormente.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estado de Pernambuco, para efeito da avaliação de seus recursos hídricos foi dividido em 29 unidades de planejamento (UP) por determinação do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH-PE) de 1998. Correspondendo às bacias de Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una, Mundaú, Ipanema, Moxotó, Pajeú, Terra Nova, Brígida, Garças e Pontal, num total de treze e as demais por grupos de bacias, das quais seis de pequenos rios litorâneos (GL1 a GL6), nove de pequenos rios interiores (GI1 a GI9) e uma de pequenos rios que compõem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha (Figura 9), conforme dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2018).

Figura 9 – Hidrografia de Pernambuco dividida em bacias hidrográficas

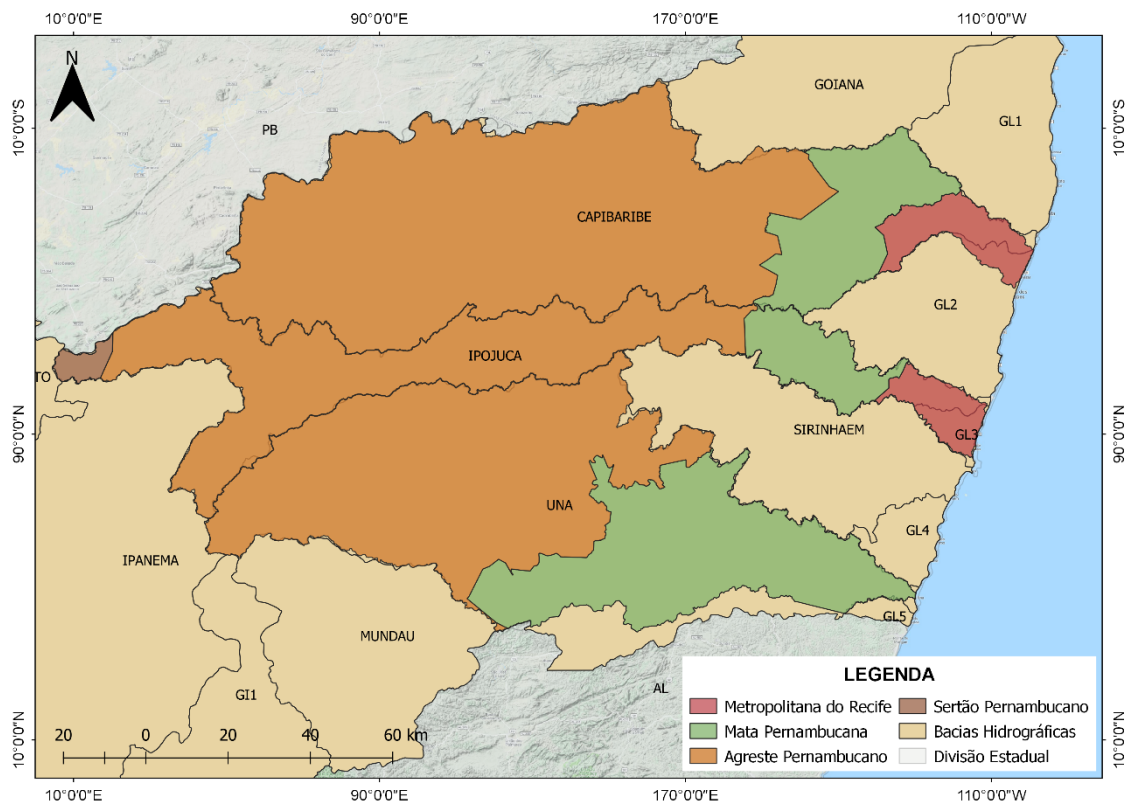


Fonte: Autora, 2019.

A Mesorregião do Agreste Pernambucano, cenário desse estudo, é formada por 71 municípios distribuídos em seis microrregiões (Vale do Ipanema, Garanhuns, Brejo Pernambucano, Vale do Ipojuca, Alto Capibaribe e Médio Capibaribe), ocupando uma área aproximada de 24.400 km², correspondente a 24,75% do território estadual e uma população de cerca de 1,8 milhão de habitantes.

O presente estudo tem como objeto as bacias hidrográficas do rio Capibaribe, do rio Ipojuca e do rio Una, definidas como bacias de grande relevância para o estado de Pernambuco devido ao potencial hídrico e usos múltiplos de suas águas, no abastecimento público, irrigação, pecuária, lazer e turismo. A Figura 10 apresenta a divisão das bacias em estudo conforme suas mesorregiões.

Figura 10 - Mesorregiões das bacias hidrográficas do rio Capibaribe, Ipojuca e Una



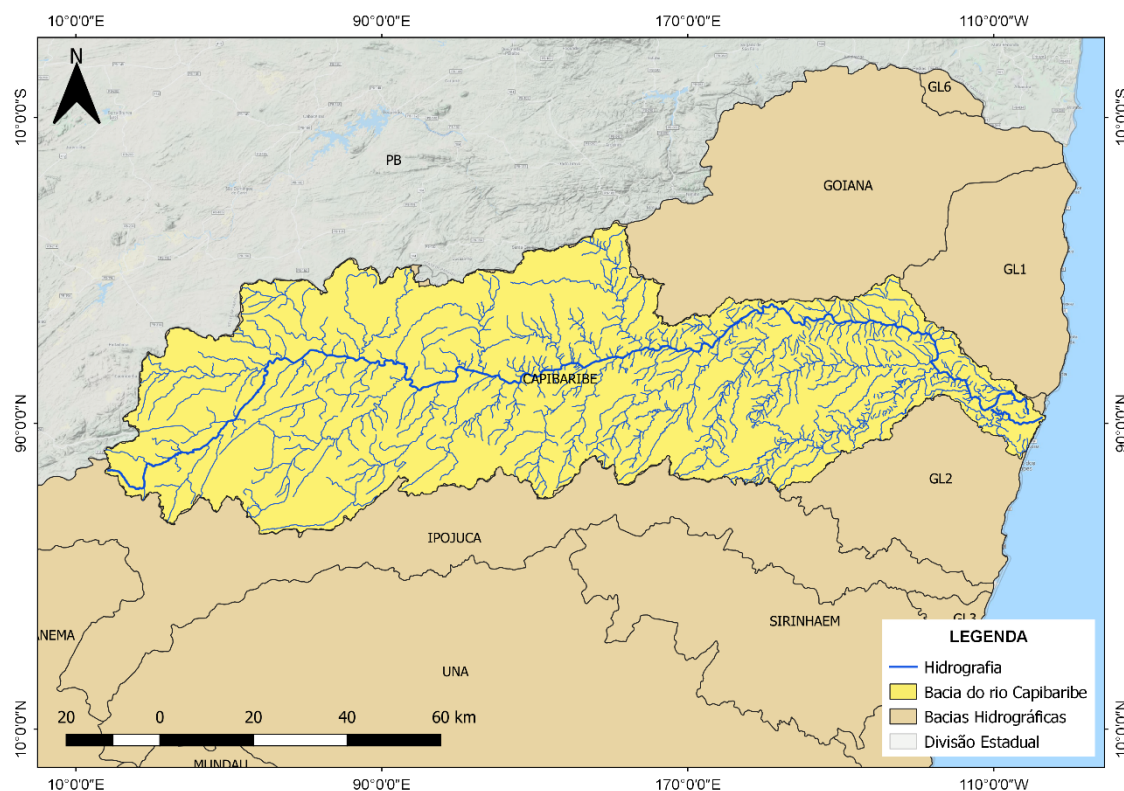
Fonte: A autora, 2019.

3.4 HIDROGRAFIA E USOS DA ÁGUA NA BACIA DO RIO CAPIBABIBE

A bacia do rio Capibaribe (UP2), insere-se na porção nordeste do estado de Pernambuco situada nas regiões de desenvolvimento do Agreste Central e Setentrional, da Mata Sul e Mata Norte e da Região Metropolitana, entre as coordenadas 07°41'20" e 08°09'30" de latitude sul, e 34° 51'00" e 36°41'58" de longitude oeste.

Abrange uma área de 7.454,88 km² equivalente a 7,58% da área total do estado, sendo uma das mais importantes bacias pernambucanas. A Figura 11 apresenta a bacia do Capibaribe com o seu curso principal e a divisão político-administrativa.

Figura 11 – Localização da bacia hidrográfica do rio Capibaribe



Fonte: A autora, 2019.

Limita-se ao norte com o estado da Paraíba e com a bacia do rio Goiana (UP1), ao sul com a bacia do rio Ipojuca (UP3), ao leste com o Oceano Atlântico e com o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 1 – GL1 (UP14) e 2 -GL2 (UP15).

O curso hídrico principal do rio Capibaribe nasce nas encostas da Serra de Jacarará a uma altitude aproximada de 1.000 metros, entre os municípios de Poção e Jataúba, percorre cerca de 270 km até à sua foz na cidade de Recife. Sua área de drenagem integra 42 municípios (Tabela 3), dos quais 15 estão totalmente inseridos na bacia e 26 possuem sua sede nela (PERNAMBUCO, 2010). Sua rede hídrica tem como constituintes principais pela margem direita: o riacho Aldeia Velha, riacho Tabocas, riacho Carapotós, rio Cachoeira, riacho das Éguas, riacho Cassatuba, riacho Grota do Fernando, rio Cotunguba, riacho Goitá, rio Tapacurá e muitos outros de menor porte e, pela margem esquerda, o riacho Jundiá, riacho do Pará, riacho Tapera, riacho do Arroz, riacho da Topada, riacho Caiá, rio Camaragibe, além outros de pequeno porte (PERNAMBUCO, 2010).

Tabela 3 – Municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Município	Área na bacia (%)	Município	Área na bacia (%)	Município	Área na bacia (%)
Belo Jardim	5,50	Gravatá	3,22	Salgadinho	1,12
Bezerros	2,97	Jataúba*	9,57	Sanharó	0,08
Bom Jardim	0,73	João Alfredo	0,72	Santa Cruz do Capibaribe*	4,55
Brejo da Madre de Deus*	10,19	Lagoa do Carro	0,52	Santa Maria do Cambucá*	1,18
Camaragibe*	0,46	Lagoa do Itaenga*	0,76	São Caetano	0,17
Carpina*	4,02	Limoeiro*	1,85	São Lourenço da Mata*	2,82
Caruaru	7,13	Moreno	0,21	Surubim*	3,44
Casinhas*	1,41	Passira*	4,57	Tacaimbó	0,35
Chã de Alegria*	0,66	Paudalho*	3,57	Taquaritinga do Norte*	5,96
Chã Grande	0,18	Pesqueira	0,05	Toritama*	0,41
Cumaru*	3,99	Poção	0,23	Tracunhaém	0,14
Feira Nova*	1,42	Pombos*	2,04	Vertente do Lério*	0,94
Frei Miguelinho*	2,93	Recife*	0,92	Vertentes*	2,62
Glória do Goitá*	3,11	Riacho das Almas*	4,11	Vitória de Santo Antão*	2,71

Fonte: Pernambuco (2010).

*Município com sede urbana da bacia.

Os principais reservatórios são: Jucazinho, Carpina, Tapacurá, Goitá, Poço Fundo. Além desses, vale a pena citar outros reservatórios tais como: Engenho Gercino de Pontes, Várzea do Una, Oitís, Santa Luzia, Matriz da Luz, Machado e Lagoa do Porco. O rio Capibaribe apresenta regime fluvial intermitente no seu alto e médio cursos, somente a partir da cidade de Limoeiro, no seu baixo curso, torna-se perene.

A Tabela 4 apresenta os principais reservatórios da bacia do rio Capibaribe com capacidade máxima acima de 1 milhão de m³.

Tabela 4 - Principais reservatórios da bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Reservatório	Município	Capacidade m ³	Finalidade
Jucazinho	Cumaru/Surubim	327.035.818	Abastecimento/piscicultura
Carpina	Lagoa do Itaenga/Lagoa do Carro	270.000.000	Abastecimento/controle de enchentes
Cursai	Paudalho	13.000.000	Abastecimento
Tabocas	Caruaru/Brejo da Madre de Deus	13.600.000	Abastecimento
Goitá	Paudalho/São Lourenço da Mata	52.000.000	Controle de enchentes
Poço Fundo	Brejo da Madre de Deus/Santa Cruz do Capibaribe	27.000.000	Abastecimento e Irrigação
Tapacurá	São Lourenço da Mata	94.20.000	Abastecimento/controle de enchentes
Várzea do Una	São Lourenço da Mata	11.568.010	Abastecimento

Fonte: Adaptado de Pernambuco (2010).

3.4.1 Reservatório de Jucazinho

O reservatório de Jucazinho está localizado entre os municípios de Surubim e Cumaru (UP2), entre as coordenadas geográficas de 7°57'53,41 latitude Sul e 35°44'33,52" longitude Oeste, sendo de grande relevância para o efeito da disponibilidade hídrica nesta unidade.

A montante de Jucazinho estão quatro outros reservatórios que merecem atenção quanto a disponibilidade hídrica, tanto pela localização na bacia de drenagem como suas reduzidas possibilidade de vertimentos, sendo: Poço Fundo, Machado e Engenho Gercino Pontes, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12- Diagrama unifilar bacia hidrográfica do rio Capibaribe



Fonte: APAC (2019).

Construído pela DNOCS, a barragem de Jucazinho foi concluída e inaugurada em 1998, com a capacidade máxima identificada na época de 327 milhões m³ (hoje reconhecida oficialmente como apenas 204,80 milhões, conforme discutido posteriormente). Embora Jucazinho tenha sido construído para controle de cheias, é amplamente utilizado para o abastecimento público de vários municípios, incluindo alguns com sede fora da bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Sua função para controle de cheias é hoje reduzida, tanto pela redução do volume útil originalmente informado quanto pelos usos prioritários a que se destina.

Com base no Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe (PHA), o sistema adutor de Jucazinho contém duas principais linhas adutoras a Norte e a Sul, que justas somam a extensão de 270,9 km de Surubim a Gravatá, e a capacidade de aduzir 1.810 L/s aos municípios de Surubim, Salgadinho, Passira, Cumaru, Vertente do Lério, Santa Maria da Cumbuca, Frei Miguelinho, Vertentes, Caruaru, Riacho das Almas, Gravatá e mais 45 distritos com população total de cerca de 800 mil habitantes nas bacias dos rios Capibaribe e Ipojuca (PERNAMBUCO, 2010).

Apesar de não ser utilizado para o controle de enchentes, ressalta-se que as cidades de Salgadinho e Limoeiro podem ser favorecidas com sensíveis reduções do risco de inundações e conferir ainda um aumento do fator de segurança relativo à proteção da cidade de Recife contra enchentes de grande magnitude.

A Tabela 5 apresenta as principais características técnicas do reservatório Jucazinho.

Tabela 5 – Características técnicas do reservatório de Jucazinho

Reservatório Jucazinho	
Área da bacia hidrográfica	4.264 km ²
Volume total do reservatório	204.820 x 106 m ³
Volume para atenuação de enchentes	100 x 106 m ³
Volume útil	227 x 106 m ³
Vazão afluente média (100%)	6.336,50 L/s
Evaporação média	594,30 L/s
Vertimento médio	2.891,90 L/s
Vazões Regularizadas	
com 100% de garantia	2.972,80L/s
com 90% de garantia	3.890,90L/s
com 80% de garantia	4.634,80L/s
Volume anual médio (90%)	122,70 x 106m ³ /ano
Cota do coroamento	299m
Extensão do coroamento	442m
Cota do sangradouro	292m
Extensão do sangradouro	170m
Cota da tomada d'água	250m
Diâmetro da tomada d'água	2.000m

Fonte: Adaptado de APAC (2019); Pernambuco (2010a).

3.4.2 Reservatório Poço Fundo

O reservatório Poço Fundo localiza-se no rio Capibaribe, nas coordenadas 07° 57' 43" de latitude Sul e 36° 20' 59" longitude Oeste, entre as cidades de Jataúba e Santa Cruz do Capibaribe, cerca de 15km a Leste de Jataúba. Dentre as finalidades de uso, atende principalmente demandas para abastecimento da cidade de Santa Cruz do Capibaribe e Brejo da Madre de Deus, além de demandas menos expressivas para uso na irrigação.

Construída no ano de 1986 pelo Governo do Estado de Pernambuco, a obra foi um marco importante para o município de Santa Cruz do Capibaribe e região. A bacia hidrográfica do reservatório possui área em torno de 926 km², situada numa região com índices pluviométricos em torno de 590 mm anuais. A capacidade máxima de armazenamento do reservatório Poço Fundo é de 27.750.000 m³.

O reservatório Poço Fundo faz parte do Sistema Capibaribe que opera atualmente de forma isolada dos outros reservatórios da bacia, sem liberações para a jusante. A sua montante, localiza-se o reservatório Jataúba que abastece a cidade de

mesmo nome, porém devido à baixa capacidade de armazenamento não será considerado neste estudo.

Tabela 6- Características técnicas do reservatório Poço Fundo

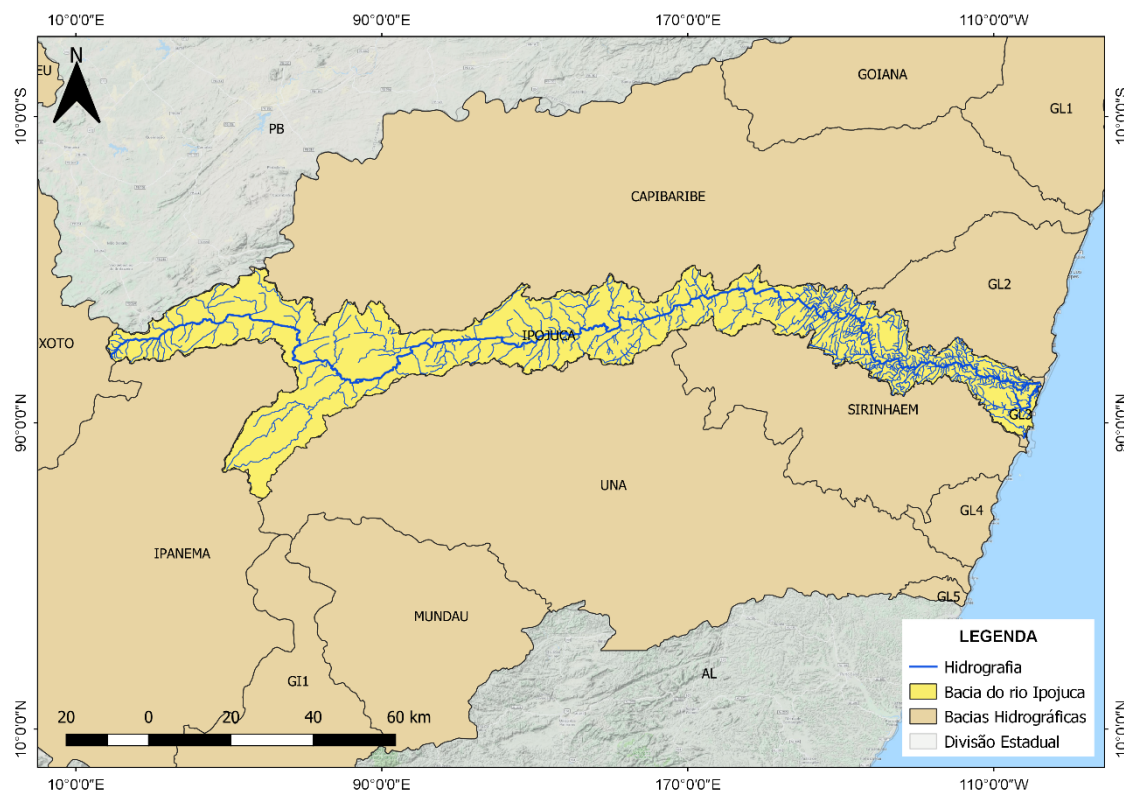
Reservatório Poço Fundo	
Área da bacia hidrográfica	926,00 km ²
Volume total do reservatório	27,75 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	27,75 x 10 ⁶ m ³
Vazão afluyente média (100%)	1.473,10 L/s
Evaporação média	348,20 L/s
Vertimento médio	967,40 L/s
Vazões Regularizadas	
com 100% de garantia	256,50L/s
com 90% de garantia	542,30L/s
com 80% de garantia	728,20L/s
Volume anual médio (90%)	17,10 x 10 ⁶ m ³ /ano
Cota do coroamento	478,50m
Extensão do coroamento	178,0 m
Cota do sangradouro	472,50m
Extensão do sangradouro	75,0 m
Cota da tomada d'água	463,20 inferior, 469,88 superior m
Diâmetro da tomada d'água	400 mm

Fonte: Adaptado de Compesa (2018) e Pernambuco (2010a).

3.5 HIDROGRAFIA E USOS DA ÁGUA NA BACIA DO RIO IPOJUCA

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca (UP3) é totalmente inserida no estado de Pernambuco, entre as coordenadas geográficas de 08° 09' 50" e 08° 40' 20" de latitude Sul e, 34° 57' 52" e 37° 02' 48" de longitude Oeste. Devido seu formato longitudinal no sentido oeste-leste, insere-se em três microrregiões: Vale do Ipojuca, Vitória de Santo Antão e Recife (Figura 13).

Figura 13 – Localização da bacia hidrográfica do rio Ipojuca



Fonte: A autora, 2019.

Seus limites são identificados ao norte pelas bacias dos rios Capibaribe (UP2) e Paraíba; a oeste pelas bacias afluentes do rio São Francisco (Moxotó e Ipanema); ao sul pelas bacias dos rios Una (UP3) e Sinharém (UP4); e a leste pelas bacias Litorâneas de Pernambuco e pelo Oceano Atlântico (ANA, 2017).

Apresenta área de aproximadamente de 3.500 km², equivalendo a 4% do território estadual, abrange parcialmente 25 municípios, dos quais 12 possuem sede dentro da bacia hidrográfica. O principal curso d'água da bacia, o rio Ipojuca, tem sua nascente na Serra das Porteiras, no município de Arcoverde/PE. Percorre cerca de 320km no sentido Oeste-Leste até desaguar no Oceano Atlântico no município de Ipojuca, cortando as regiões fisiográficas do agreste, mata sul e metropolitana de Pernambuco.

A Tabela 7 apresenta os municípios que fazem parte da bacia do rio Ipojuca com os percentuais de área na bacia.

Tabela 7 - Municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Ipojuca

Município	Área na bacia (%)	Município	Área na bacia (%)
Agrestina	0,04	Pesqueira	17,42
Alagoinha	1,77	Poção *	5,34
Altinho	0,08	Pombos	1,95
Amaraji	1,76	Primavera *	2,60
Arcoverde	2,80	Riacho das Almas	0,24
Belo Jardim *	6,83	Sairé	2,25
Bezerras *	6,02	Sanharó *	7,12
Cachoeirinha	0,05	São Bento do Una	2,06
Caruaru *	11,31	São Caetano *	7,49
Chã Grande *	1,79	Tacaimbó *	4,10
Escada *	5,68	Venturosa	0,05
Gravatá *	5,55	Vitória de Santo Antão	1,14
Ipojuca *	4,45		

Fonte: Pernambuco (2010b). *Municípios com sede dentro da bacia.

Seu regime fluvial é intermitente, tornando-se perene a partir do seu médio curso, próximo à cidade de Caruaru. Seus principais afluentes pela margem direita são: riacho Liberal, riacho Taquara e riacho do Mel. Pela margem esquerda, destacam-se: riacho do Coutinho, riacho dos Mocós, riacho do Muxoxo e rio Bituri (ANA, 2017). Os principais reservatórios são: Pão de Açúcar, Engenheiro Severino Guerra (Bituri), Pedro Moura Júnior (Belo Jardim), Manuino, Taquara, Pintada, Brejão, Menino Cipó, Serra dos Cavalos, Guilherme de Azevedo, Caroá, Poção, Jenipapo, Boa Vista e São Caetano.

O sistema de reservatórios da bacia do rio Ipojuca, em toda a sua extensão é formado por sessenta e seis reservatórios, do qual trinta e três possuem capacidade abaixo de 100.000 m³, seis tem capacidade máxima acima de 1.000.000 de m³, e apenas três tem capacidade superior a 10.000.000 de m³. Em média o volume armazenado na bacia do rio Ipojuca nos reservatórios interanuais é na ordem de 76.36 milhões de m³.

Os principais reservatórios da bacia estão relacionados na Tabela 8, por ordem de localização, capacidade máxima e finalidade de uso.

Tabela 8 – Principais reservatórios da bacia do rio Ipojuca

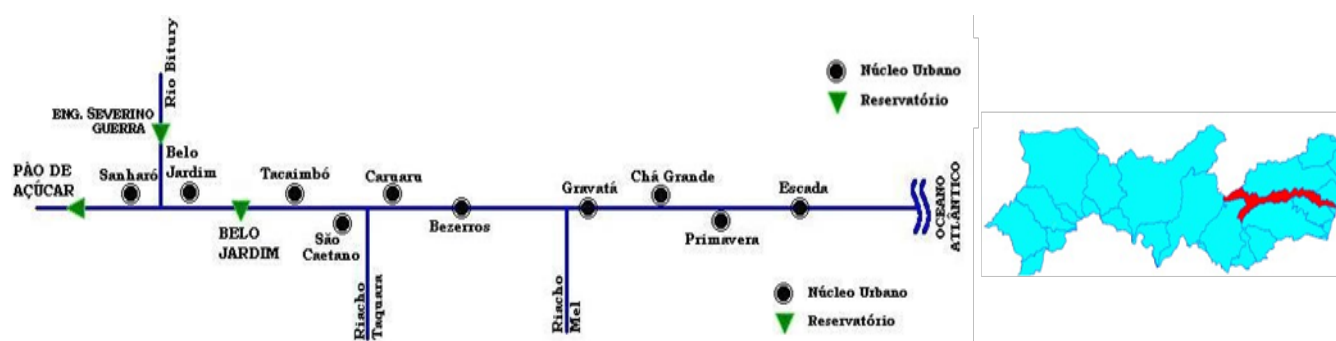
Reservatório	Município	Capacidade m ³	Finalidade
Pão de Açúcar	Pesqueira	34.230.000	Abastecimento/irrigação
Pedro Moura Jr.	Belo Jardim	30.000.000	Abastecimento
Bituri	Belo Jardim	17.776.470	Abastecimento
Manuíno	Bezerros	2.021.000	Abastecimento
Brejão	Sairé	1.625.000	Abastecimento
Taquara	Caruaru	1.100.000	Abastecimento
Guilherme de Azevedo	Caruaru	786.000	Abastecimento
Serra dos Cavalos	Caruaru	761.000	Abastecimento
Jaime Nejaim	Caruaru	600.000	Abastecimento
Antônio Menino	Caruaru	538.740	Abastecimento

Fonte: Adaptado de Pernambuco (2010b).

Os reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca têm basicamente a função de abastecimento urbano e agropecuário. A Figura 14 detalha o conjunto dos principais reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca.

Para a presente pesquisa serão considerados os reservatórios de maior capacidade da bacia, sendo: Pão de Açúcar, Pedro Moura Jr. (Belo Jardim) e Bituri (Eng. Severino Guerra), os quais serão detalhados posteriormente.

Figura 14– Diagrama unifilar bacia hidrográfica do rio Ipojuca



Fonte: APAC (2019).

3.5.1 Reservatório Pão de Açúcar

Situado no município de Pesqueira, o reservatório tem capacidade de armazenar 34.230.600 m³ de água e destina-se ao abastecimento das cidades de Pesqueira, Poção e Sanharó, além de uso menos expressivos para a irrigação e piscicultura (ANA, 2017).

Construído no ano de 1987 pelo Governo do Estado, porém situado em terras indígenas. Inicialmente foi projetado para uso como regulador de um sistema de perenização do rio com barragens sucessivas, no entanto, teve sua finalidade alterada passando a ser utilizado como manancial para abastecimento público.

A bacia hidrográfica, delimitada a partir do barramento, possui área em torno de 438 km², situada em uma região com índice pluviométrico em torno de 800 mm anuais. O coeficiente de escoamento é de 3,9% e o deflúvio médio anual de 30 mm. Possui uma vazão de efluência de cerca de 2,83 m³ s⁻¹ indicando uma vazão de saída relativamente alta para a região, com grande retirada de água (PERNAMBUCO, 2010b).

A Tabela 9, apresenta as características técnicas do reservatório Pão de Açúcar.

Tabela 9 - Características técnicas do reservatório Pão de Açúcar

Reservatório Pão de Açúcar (código 8)	
Área da bacia hidrográfica	438 km ²
Volume total do reservatório	34.230 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	33.230 x 10 ⁶ m ³
Vazão afluente média (100%)	433.10 L/s
Evaporação média	56.8 L/s
Vertimento médio	134.3 L/s
Vazões Regularizadas	
com 100% de garantia	233,00 L/s
com 90% de garantia	270,50 L/s
com 80% de garantia	288,30 L/s
Volume anual médio (90%)	8,53 x 10 ⁶ m ³ /ano
Cota do coroamento	741m
Extensão do coroamento	640m
Cota do sangradouro	736m
Extensão do sangradouro	175m
Cota da tomada d'água	710m
Diâmetro da tomada d'água	100mm

Fonte: Adaptado de APAC (2019) e Pernambuco (2010b).

3.5.2 Reservatório de Pedro Moura Junior

O reservatório de Pedro Moura Junior, também conhecido como Belo Jardim, foi construído em 1998 pelo Governo do Estado de Pernambuco. Situa-se no rio Ipojuca à cerca de 4km a Sudeste da cidade de mesmo nome, sua localização permite que receba afluxo do riacho Liberal, um afluente do rio Ipojuca pela margem direita. Sua bacia hidrográfica possui uma área aproximada de 1319 km².

A área hidráulica do reservatório é de 320ha, com capacidade máxima de acumulação de cerca de 27.700.000 m³. A principal finalidade de uso é para

abastecimento do sistema adutor Bituri, que supri várias cidades do Agreste. A pluviometria média na bacia hidrográfica é cerca de 650mm, sendo os meses de março e abril responsáveis por 38% do total médio anual. O coeficiente de escoamento é de 3,1% e o deflúvio anual de 20mm (PERNAMBUCO, 2010b).

Nos anos secos, o reservatório Belo Jardim abastece as sedes urbanas de Angelim, Belo Jardim, Cachoeirinha, Calçado, Capoeiras, Ibirajuba, Jucati, Jupi, Lajedo, Sanharó, São Bento do Una, São Caitano, São João e Tacaimbó (ANA, 2017).

A Tabela 10, apresenta as principais características técnicas desse reservatório.

Tabela 10 - Características técnicas do reservatório Pedro Moura Jr

Reservatório Pedro Moura Jr. (código 834)	
Área da bacia hidrográfica	12 km ²
Volume total do reservatório	29.24 x 10 ⁶ m ³
Volume útil do reservatório	27.70 x 10 ⁶ m ³
Evaporação média	650 mm
Vertimento médio	134.30 L/s
Vazões Regularizadas	
com 100% de garantia	136.99 L/s
com 90% de garantia	285.39 L/s
com 80% de garantia	384.32 L/s
Volume anual médio (90%)	78,76 x 10 ⁶ m ³ /ano
Cota do coroamento	603m
Extensão do coroamento	347m
Cota do vertedouro	599m
Extensão do vertedouro	170m
Cota da tomada d'água	587.50
Diâmetro da tomada d'água	300mm

Fonte: Adaptado de APAC (2019) e Pernambuco (2010b).

3.5.3 Reservatório Bituri

O reservatório Bituri, também conhecido como Eng. Severino Guerra, situa-se no município de Belo Jardim, Agreste Setentrional de Pernambuco. Inserido na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, tem como cursos principais os rios Bituri, Tabocas e Taboquinhas, além de pequenos riachos, que colaboram para suprir o volume de água armazenada no reservatório.

A bacia hidrográfica do reservatório Bituri possui uma área total com cerca de 68,57 km², em uma região com índices pluviométricos em torno de 600mm. Sua capacidade de acumulação total era de 17 milhões m³, no entanto, houve uma redução de 20% em função do assoreamento de sua bacia hidráulica (PERNAMBUCO, 2010b).

Construído pelo DNOCs no início da década de 1960, foi projetado inicialmente para atender apenas as demandas ao abastecimento humano da cidade de Belo Jardim, tornando-se com o tempo responsável pelo abastecimento de outros municípios por meio do sistema adutor Bituri, sendo além de Belo Jardim: Cachoeirinha, Sanharó, São Bento do Uma e Tacaimbó, atendendo ainda as demandas de indústrias de grande e médio porte da região (ANA, 2017).

A Tabela 11 apresentada as principais características técnicas do reservatório Bituri.

Tabela 11 - Principais características técnicas do reservatório Bituri

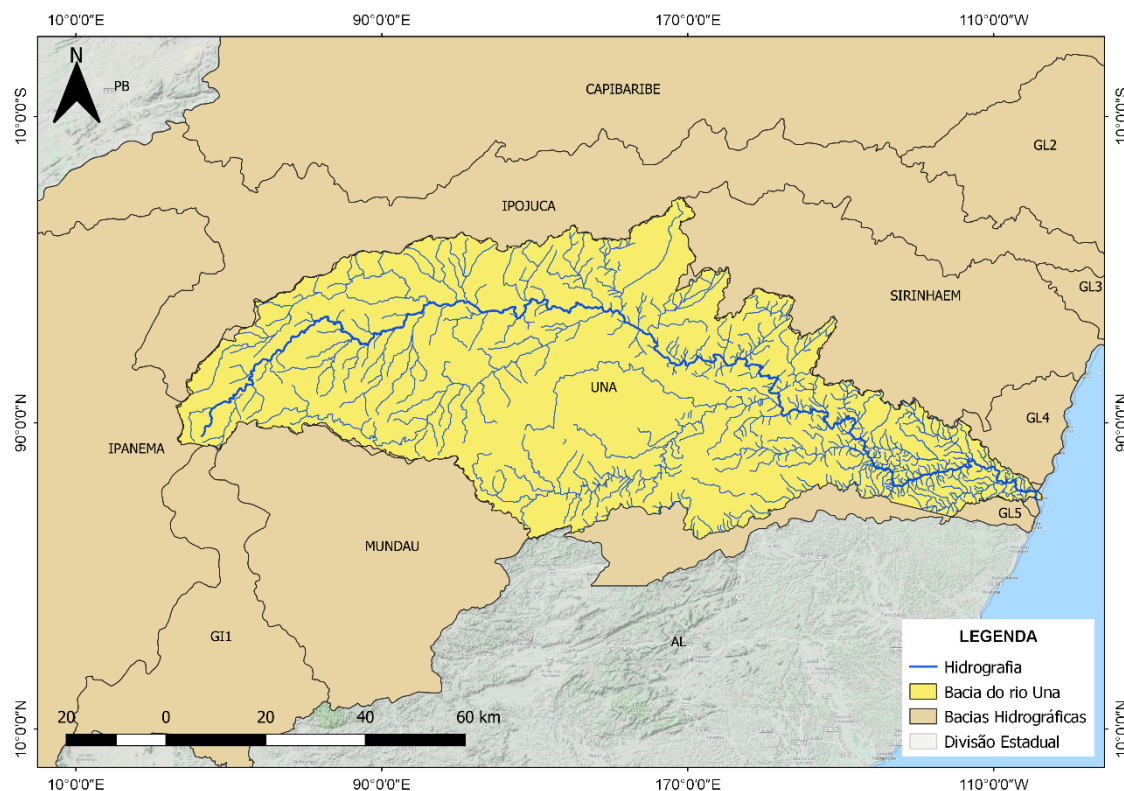
Reservatório Bituri (código 24)	
Área da bacia hidrográfica	69 km ²
Volume total do reservatório	17.70 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	15.60 x 10 ⁶ m ³
Vazão afluyente média (100%)	166.00 L/s
Evaporação média	68.50 L/s
Vertimento médio	37.00 L/s
Vazões Regularizadas	
com 100% de garantia	61.00 L/s
com 90% de garantia	85.40 L/s
com 80% de garantia	104.40 L/s
Volume anual médio (90%)	2.69 x 10 ⁶ m ³ /ano
Cota do coroamento	98.7 m
Extensão do coroamento	354 m
Cota do vertedouro	95.20m
Extensão do vertedouro	68 m
Cota da tomada d'água	81.20 m
Diâmetro da tomada d'água	400mm

Fonte: Adaptado de APAC (2019) e Pernambuco (2010b).

3.6 HIDROGRAFIA E USOS DA ÁGUA NA BACIA DO RIO UNA

A bacia hidrográfica do rio Una (UP05), está localizada no litoral Sul de Pernambuco, entre as coordenadas 08°17'14" e 08°55'28" de latitude Sul, e 35°07'48" e 36°42'10" de longitude Oeste, conforme ilustra a Figura 15. Faz parte de áreas de duas mesorregiões, Agreste Pernambucano e Mata Pernambucana, e das microrregiões do Vale do Ipojuca, Brejo Pernambucano e Mata Meridional Pernambucana.

Figura 15 - Localização da bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: Autora, 2019.

Limita-se ao norte com as bacias dos rios Ipojuca (UP3) e Sirinhaém (UP4); ao sul com a bacia do rio Mundaú (UP6), o estado de Alagoas e o grupo de bacias de pequenos rios interiores GI1 (UP20); ao leste com o Oceano Atlântico, o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos GL4 (UP17) e GL5 (UP18); e, a oeste, com as bacias do rio Ipanema (UP7) (APAC, 2018).

O rio Una nasce na serra da Boa Vista situada no município de Capoeiras com altitude de 900m. Com direção oeste-leste, seu curso percorre uma extensão aproximada de 255 km até sua foz no oceano Atlântico, no município de São José da Coroa Grande. Possui área territorial de 6.785,79 km², dos quais cerca de 93% estão inseridos no estado de Pernambuco e o restante em Alagoas. A área da bacia correspondente a Pernambuco, tem um percentual de 6,32% do total do estado e abrange 42 municípios, dos quais 27 possuem suas sedes inseridas na bacia conforme exposto na Tabela 12.

Tabela 12 - Municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Una

Município	Área na bacia (%)	Município	Área na bacia (%)
Agrestina*	100,0	Jucati*	20,1
Água Preta*	89,7	Jupí*	57,2
Altinho*	98,8	Jurema*	94,8
Barra De Guabiraba	4,2	Lagoa dos Gatos*	100,0
Barreiros*	84,9	Lajedo*	98,7
Belém De Maria*	100,0	Maraial*	100,0
Bezerros	11,7	Palmares*	100,0
Bonito*	72,3	Panelas*	100,0
Cachoeirinha*	98,9	Pesqueira	1,7
Caetés	7,7	Quipapá*	100,0
Calçado*	70,9	Rio Formoso	6,7
Camocim de São Félix	26,7	Sanharó	0,0
Canhotinho	8,6	São Benedito do Sul*	100,0
Capoeiras*	73,5	São Bento do Una*	89,2
Caruaru	1,2	São Caetano	28,2
Catende*	100,0	São Joaquim do Monte*	94,9
Cupira*	100,0	São José da Coroa Grande	24,9
Gameleira	12,7	Tacaimbó	26,2
Ibirajuba*	100,0	Tamandaré	45,0
Jaqueira*	100,0	Venturosa	1,1
Joaquim Nabuco*	58,7	Xexéu*	100,0

Fonte: Adaptado de Pernambuco (1998).

Em seu alto curso o rio Una apresenta regime fluvial intermitente até aproximadamente a cidade de Altinho, a partir daí torna-se perene. Essa perenização é provocada essencialmente pelo aumento dos índices pluviométricos. Os principais tributários do rio Una são pela margem direita são: os riachos Salobra, Salgadinho, Quatis, da Mandioca; os rios: Chata, Piranji e Jacaúpe; na margem esquerda, os riachos: Games, Gravatá, Exú; e os rios Mentiroso, Maracujá, Camevô, Preto, Camocim-Mirim e José da Costa (PERNAMBUCO, 2006).

Os principais reservatórios da bacia do rio Una são: Serro Azul, Prata, Pau Ferro, Gurjão, Poço de Areia, Caianinha e Brejo do Buraco, ilustrados na Figura 16.

Figura 16– Diagrama unifilar bacia hidrográfica do rio Una



Fonte: APAC (2019)

A Tabela 13 apresenta os principais reservatórios da bacia do rio Una, por ordem de localização, capacidade e finalidade de uso.

Tabela 13 – Principais reservatórios da bacia hidrográfica do rio Una

Reservatório	Município	Capacidade m ³	Finalidade
Brejo do Buraco	Altinho	1.070.000	Abastecimento
Caianinha	São Joaquim do Monte	1.361.314	Abastecimento
Gurjão	Capoeiras	3.897.000	Abastecimento/Irrigação
Pau Ferro	Quipapá	12.175.000	Abastecimento/Irrigação
Poço da Areia	Bezerros	2.300.000	Abastecimento
Prata	Bonito	42.147.000	Abastecimento
Serro Azul	Palmares	303.120.000	Abastecimento

Fonte: APAC, 2018.

3.6.1 Reservatório do Prata

Situado no rio Una, o reservatório do Prata localiza-se entre os municípios de Bonito e Belém de Maria, Agreste de Pernambuco. Sua bacia hidrográfica possui uma área aproximada de 151 km², a área hidráulica do reservatório é de 660ha com capacidade máxima de acumulação de cerca de 42x10⁶ m³ de água. A Tabela 14 apresenta as principais características técnicas do reservatório.

Tabela 14 – Características técnicas do reservatório do Prata.

Reservatório do Prata (código 988)	
Área da bacia hidrográfica	151 km ²
Volume total do reservatório	41.9 x 10 ⁶ m ³
Volume útil	39.5 x 10 ⁶ m ³
Vazão afluyente média (100%)	650 L/s
Vazão regularizada com (95%)	484 L/s
Volume anual médio (90%)	38 x 10 ⁶ m ³ /ano
Cota do coroamento	397m
Extensão do coroamento	405m
Cota do vertedouro	393.5m
Extensão do vertedouro	25m
Cota da tomada d'água	380m

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Construída no ano de 1998 pelo Governo do Estado de Pernambuco, a barragem do Prata foi projetada para atender plenamente o abastecimento do município de Caruaru. A principal finalidade de uso do manancial é para suprimento das demandas das cidades de Caruaru, Agrestina, Altinho, Ibirajuba e Cachoeirinha, num total de mais de 500 mil habitantes (IBGE, 2010).

A Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) detém a concessão dos serviços públicos de saneamento básico no Estado de Pernambuco, estando a cargo da operação e manutenção das barragens do estado.

3.7 CLIMA E PRECIPITAÇÕES

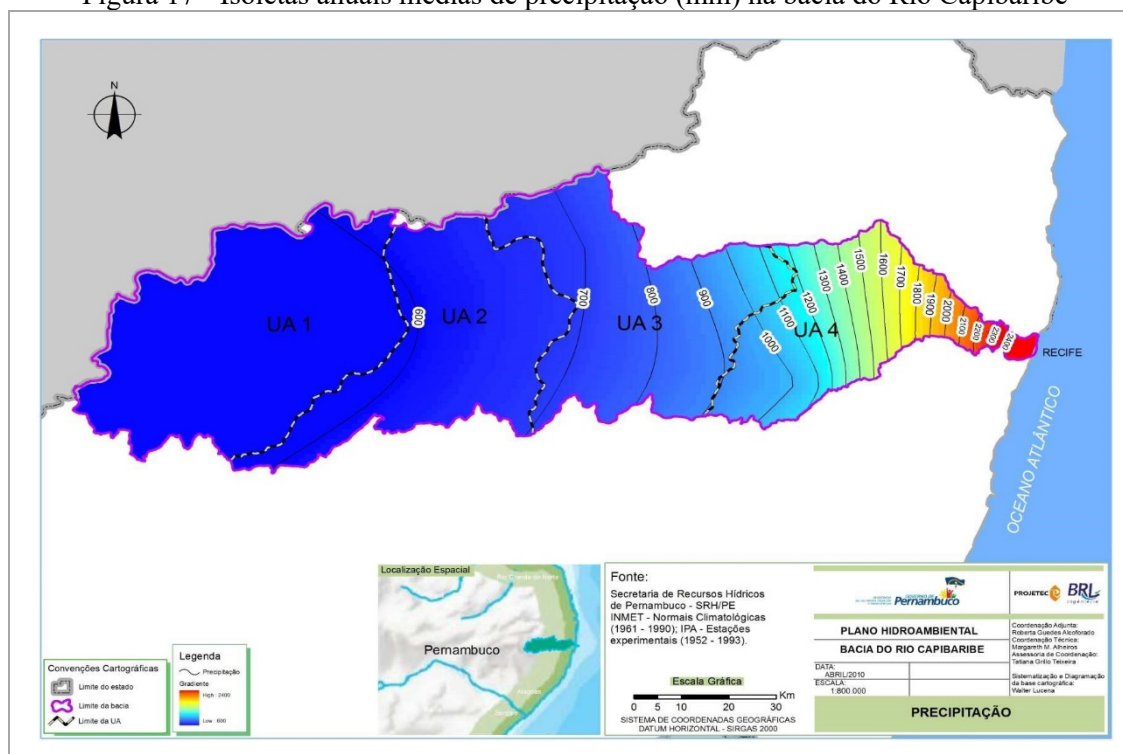
Genericamente, existem duas estações no ano, a chuvosa e a seca, justamente por haver apenas estes dois tipos de variabilidade de clima no Nordeste brasileiro. Isto é válido, já que não se observam mudanças relevantes de temperatura ou de outras variáveis meteorológicas ao longo do ano (APAC, 2019). A seguir são descritas brevemente o comportamento das variáveis climáticas em cada bacia em estudo.

3.7.1 Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe

O clima na bacia subdivide-se em dois tipos distintos, em seu alto e médio curso, localizados no Agreste, prevalece o clima quente e semiárido, enquanto em seu baixo curso apresenta clima quente tropical úmido (RIBEIRO NETO et al., 2014). De acordo com a Figura 17, é possível notar a alta variabilidade da precipitação a qual a bacia

hidrográfica do rio Capibaribe está submetida, com valores entre 600 a 2400 mm ao ano.

Figura 17 - Isoietas anuais médias de precipitação (mm) na bacia do Rio Capibaribe



Fonte: Pernambuco (2010a).

Com base no PHA do rio Capibaribe, os totais anuais precipitados possuem uma média de 1133 mm, com o aumento da precipitação à medida que os postos se aproximam do Litoral. Sendo constatado também que o aumento da precipitação está associado à diminuição da altitude dos postos analisados (PERNAMBUCO, 2010a). Já a evapotranspiração potencial varia entre 1500 a 1900 mm/ano, com uma tendência inversa à precipitação, sendo maior do Agreste e menor no Litoral (Figura 18).

Figura 18- Isolinhas anuais médias de evapotranspiração potencial de Hargreaves (mm)

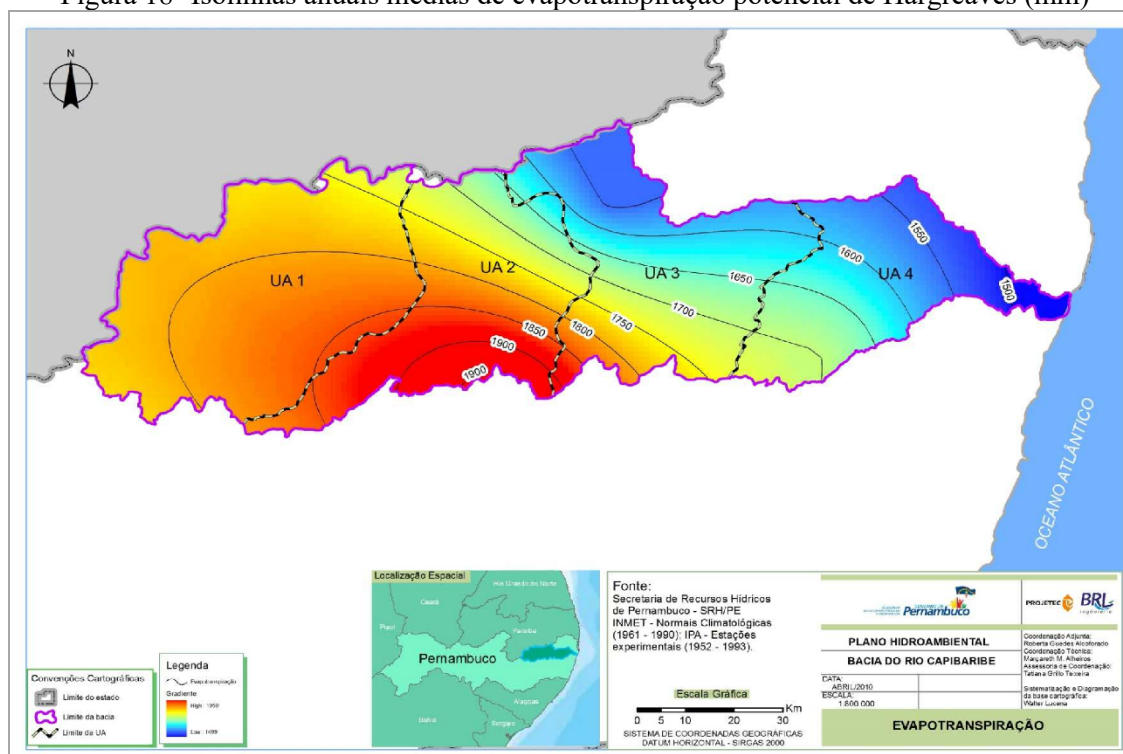
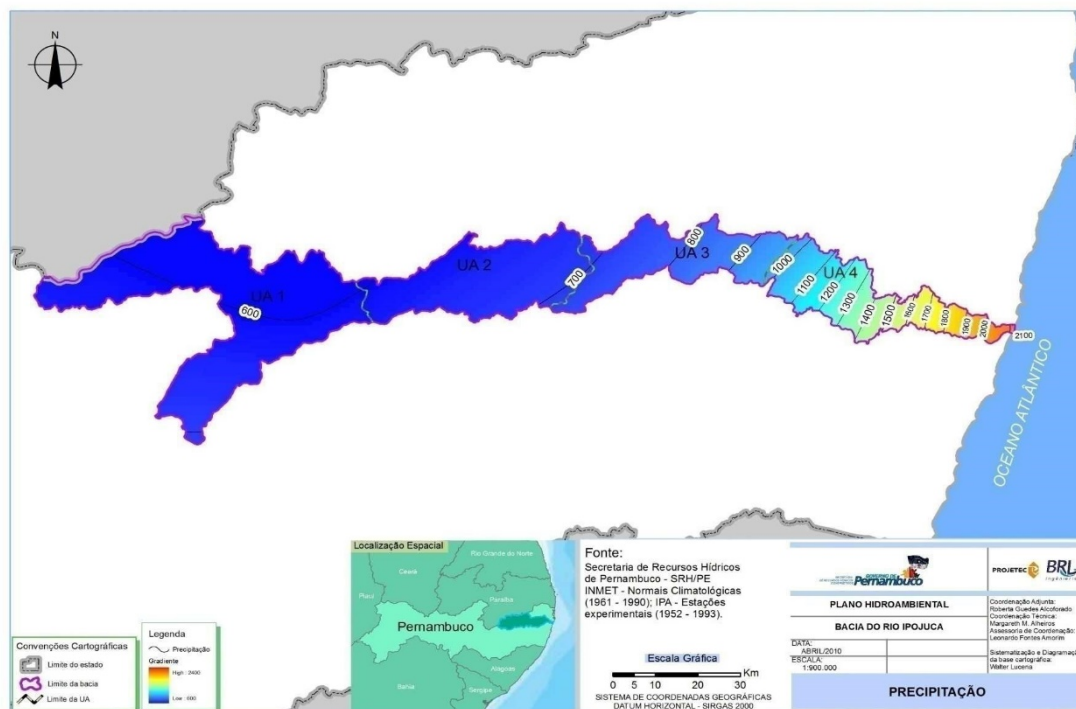


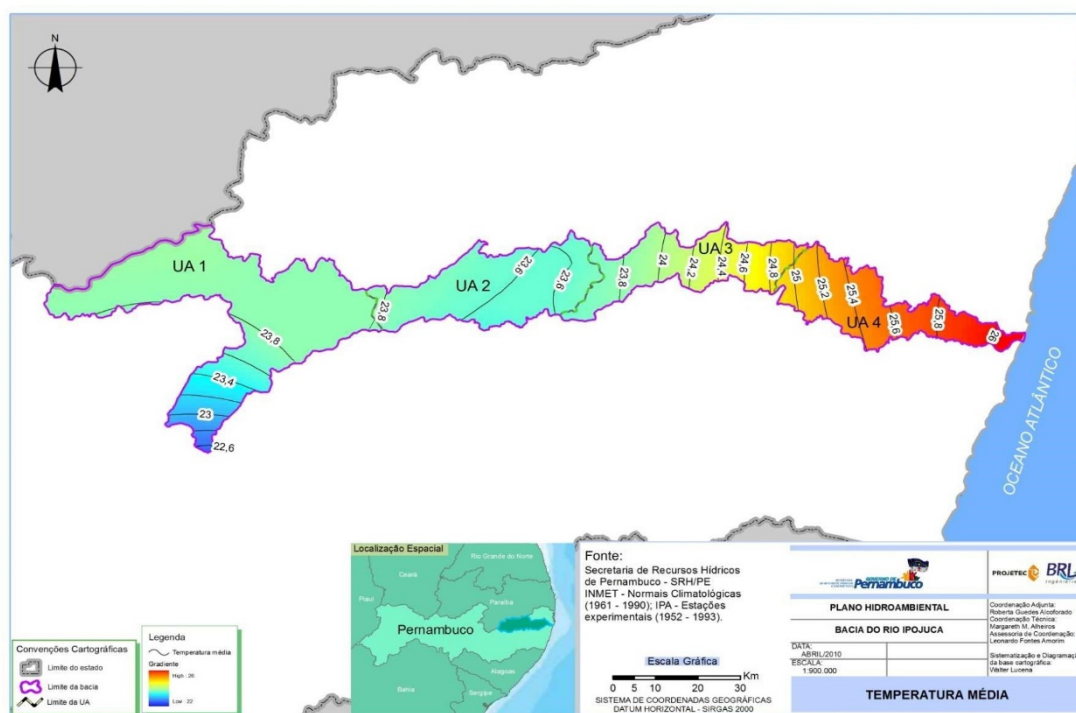
Figura 20 – Isoietas anuais médias de precipitação (mm) na bacia do rio Ipojuca



Fonte: Pernambuco (2010b)

As isoietas anuais médias de precipitação (Figura 20), evidenciam a alta variabilidade a qual a bacia do rio Ipojuca está submetida, com valores que vão de 600 a 2100 mm ao ano, com os totais anuais precipitados em média de 1133 mm. A temperatura anual média oscila entre 22,6°C e 26 °C, enquanto a temperatura máxima oscila entre 27,8°C e 29,4°C, como apresentado na Figura 21 (PERNAMBUCO, 2010b).

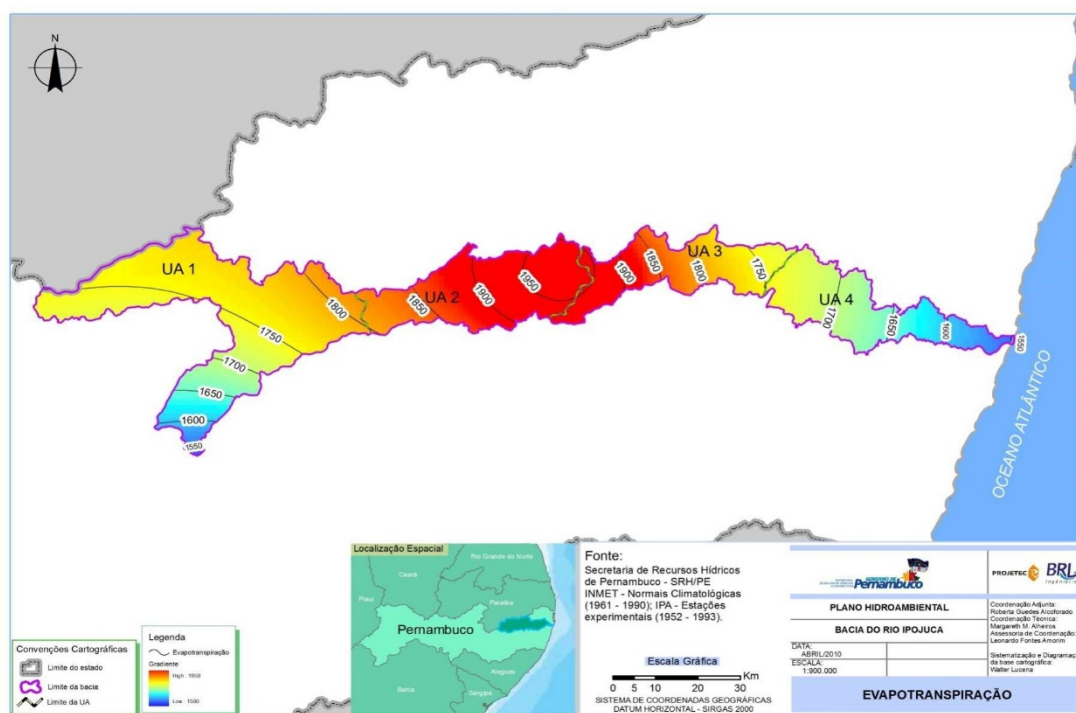
Figura 21- Isotermas anuais médias (°C) na bacia do rio Ipojuca



Fonte: Pernambuco (2010b).

O comportamento da evapotranspiração potencial é bem heterogêneo, variando entre cerca de 1900 mm até cerca de 1550 mm ao ano, ao leste da bacia hidrográfica do rio Ipojuca. Observa-se uma diminuição da evapotranspiração na medida em que se aproxima do litoral, conforme ilustra a Figura 22.

Figura 22 – Isolinhas anuais médias de evapotranspiração potencial de Hargreaves (mm)

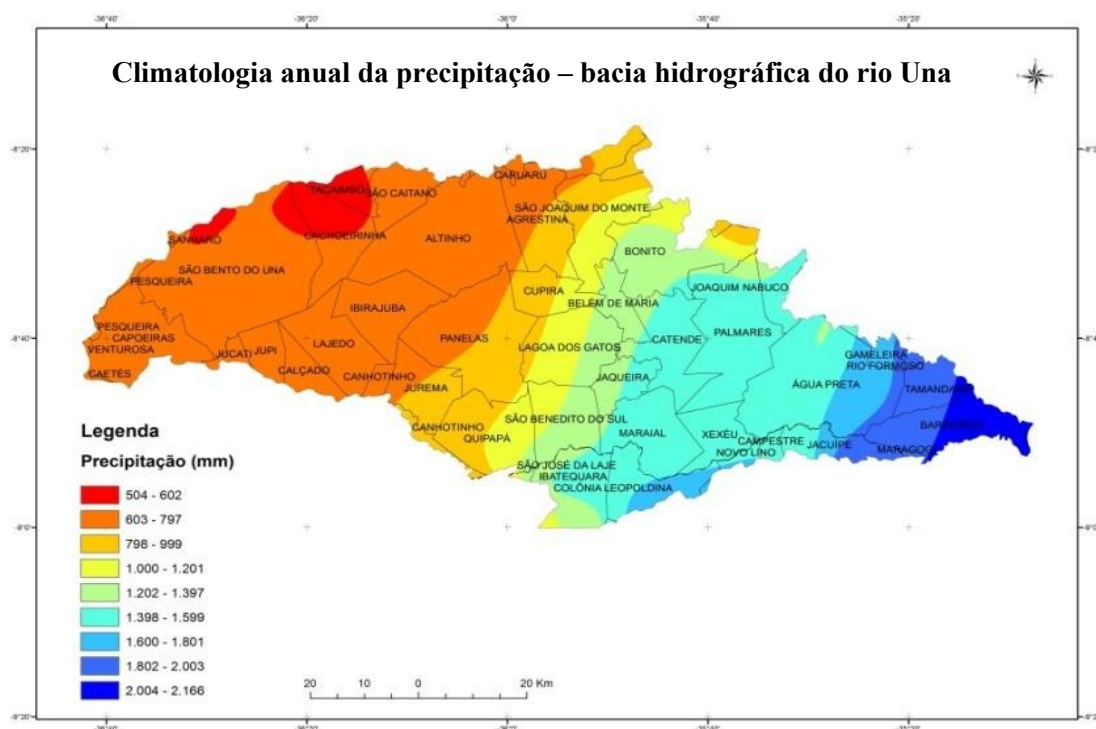


Fonte: Pernambuco (2010b)

3.7.3 Bacia Hidrográfica do Rio Una

A bacia do rio Una possui dois comportamentos climáticos, caracterizado pelo clima tropical úmido e o semiárido. O primeiro é característico da área da Zona da Mata, com totais anuais de precipitação elevados (superiores a 1000mm). Quanto ao clima semiárido, predominante no Agreste, possui precipitações mais concentradas, sendo o mês de março o mais chuvoso (precipitação anual média entre 600 e 800 mm) (PERNAMBUCO, 2006).

Figura 23– Precipitação anual média na bacia do rio Una



Fonte: APAC/ITEP (2011)

A Figura 23 ilustra a grande irregularidade na precipitação na bacia do rio Una, com valores de precipitação total anual oscilando, em média, entre 600 mm no setor oeste da bacia até 2200 mm no setor leste. Conforme o Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), os quatro meses mais chuvosos correspondem ao período de abril a julho, com o mês de julho como mais chuvoso, com precipitação máxima aproximada de 160 mm; o período de outubro a dezembro é considerado mais seco, com o mês de novembro com o menor valor histórico de precipitação, registrado em torno de 25 mm (ITEP, 2011).

O balanço hídrico na bacia é positivo, tendo como referência a precipitação média de 1800mm/ano. A temperatura média na bacia é de 24°C, enquanto a evaporação média é de 1.025mm/ano e umidade relativa média de 80%, sendo maior nos meses de maio e junho e menor no período de outubro a dezembro (PERNAMBUCO, 2006; 1998).

3.8 BASE DE DADOS ESPACIAIS

O programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), iniciado pela Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos de Pernambuco (SRHE-PE) em 2013 e concluído

em 2016, constitui-se em uma base de dados espaciais de toda área continental de Pernambuco, resultante de uma varredura a laser por meio da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (CIRILO et al., 2014). Como produto, obteve-se modelos digitais do terreno, modelos digitais de elevação e orto-imagens com escalas de 1:5000 e 1:1000, sendo disponibilizadas pelo endereço eletrônico <http://www.pe3d.pe.gov.br/>.

Inicialmente, pretendia-se utilizar a base de dados do PE3D. No entanto, devido à grande extensão das bacias e a alta resolução das imagens, optou-se por utilizar a base de dados cartográficos produtos da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 1 Arco-Segundo (30 metros) disponibilizado em formato GeoTiff (.tif), obtidos gratuitamente por meio da página do site <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Para orientação sobre a área de estudo, foram utilizados dados vetoriais que serviram para localização das estações pluviométricas e fluviométricas, das bacias hidrográficas, rede de rios e outros, disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

3.8.1 Geração de Parâmetros Físicos

Para obtenção dos parâmetros físicos da área em estudo foi realizada a delimitação e extração da rede de drenagem das bacias hidrográficas do Capibaribe, Ipojuca e Una. Para tal processo foi utilizado o produto SRTM e o software livre de geoprocessamento QGIS nas versões 2.6.1 e 3.2.0, empregando a ferramenta TauDem (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) e aplicando-se a sequência de algoritmos seguinte:

1. *Pit Remove*
2. *D8 Flow Directions*
3. *D8 Contributing Area*
4. *Stream Definition by Threshold*
5. *Stream Reach and Watershed*

Como produto, foram elaborados os mapas de localização, contendo a área das bacias hidrográficas, a localização dos postos pluviométricos e fluviométricos, a área de drenagem das barragens, dentre outros.

Os dados hidrológicos utilizados neste estudo foram obtidos a partir da base de dados disponibilizada pela ANA, pelo acesso à plataforma *HidroWeb* onde se encontra o acervo de todas as estações operadas por diferentes órgãos do território nacional.

3.9 BASE DE DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Para representar o comportamento hidrológico de uma dada área de interesse é necessária a seleção de estações pluviométricas, fluviométricas e evaporimétricas, que na medida do possível retratem o regime de precipitação, vazão e evaporação naturais, uma vez que o desempenho do modelo de simulação de operação de reservatórios, dependerá dos dados de vazão utilizados em seu ajuste.

3.9.1 Dados Pluviométricos

Para a precipitação pluviométrica foram selecionadas as estações referente a área de influência de cada reservatório. Para cada posto foi utilizado dados observados de precipitação diária, considerando sua distribuição no espaço e no tempo conforme o intervalo de dados disponíveis, priorizando as séries mais longas e contínuas.

A Tabela 15 expõem os postos pluviométricos utilizados na pesquisa, conforme cada reservatório, código, localização e órgão responsável.

Tabela 15 - Postos pluviométricos referente a cada reservatório em estudo

Reservatório	Posto Pluviométrico	Código	Coordenadas Geográficas		Órgão Responsável
			Latitude	Longitude	
Jucazinho	Salgadinho	00735067	-7.9427	-35.6341	ANA-CPRM
Poço Fundo	St. Cruz do Capibaribe	00736041	-7.9619	-36.2022	ANA-CPRM
Pedro Moura Jr	Belo Jardim	00836004	-8.3333	-36.4555	APAC-PE
Pão de Açúcar	Sanharó	00836043	-8.3655	-36.5602	ANA-CPRM
Bituri	Caruaru	00835106	-8.3028	-36.0108	ANA-CPRM
Prata	Belém de Maria	00835163	-8.5581	-35.8289	ANA-CPRH

Fonte: Adaptado de ANA (2019).

3.9.2 Dados Fluviométricos

Para os dados de vazão foram selecionadas estações fluviométricas para a área de influência de cada reservatório conforme a disposição espacial, priorizando àqueles nas proximidades da barragem e com a maior série de dados. A Tabela 16 apresenta as estações selecionadas, assim como o código, a localização e o órgão responsável.

Tabela 16 – Estações fluviométricas inseridas na área de influência de cada reservatório

Reservatório	Posto Fluviométrico	Código	Coordenadas Geográficas		Órgão Responsável
			Latitude	Longitude	
Jucazinho	Toritama	39130000	-8.0128	-36.05	ANA
	Limoeiro	39145000	- 7.8789	- 35.45	ANA
Poço Fundo	Toritama	39130000	-8.0128	-36.05	ANA
Pedro Moura	Caruaru	39340000	- 8.3028	- 36	ANA
Pão de Açúcar Bituri	Sanharó	39310000	- 8.3656	- 36.55	ANA
Una	Belém De Maria	39541000	-8.6247	-35.833	CPRH
	Capivara	39540000	- 8.4975	-35.9	ANA

Fonte: Adaptado de ANA (2019).

3.9.3 Dados Evaporimétricos

Os dados de evaporação utilizados na pesquisa são provenientes do acervo do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir do acesso à Normal Climatológica do Brasil no período de 1981-2010.

Para cada bacia em estudo, do rio Capibaribe, do rio Ipojuca e do rio Una, foi escolhido um posto de evaporação central que representasse cada sub-bacia delimitada. Os valores mensais de evaporação são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Evaporação total mensal para as bacias do rio Capibaribe, Ipojuca e Una
NORMAL CLIMATOLÓGICA DO BRASIL 1981 – 2010 Evaporação Total (mm)

Mês	Posto Surubim	Posto Pesqueira	Posto Garanhuns
Janeiro	196.2	223.4	109.8
Fevereiro	180.5	184.6	96.5
Março	165.3	184.6	98.0
Abril	128.4	133.4	72.3
Maior	108.2	104.0	58.2
Junho	80.8	82.6	39.7
Julho	85.1	87.4	38.8
Agosto	102.8	113.2	43.1
Setembro	146.0	162.9	69.9
Outubro	199.4	216.8	106.4
Novembro	214.5	229.5	135.0
Dezembro	223.0	235.1	138.6
Ano	1830.2	1957.5	1006.3

Fonte: Adaptado de INMET (2010).

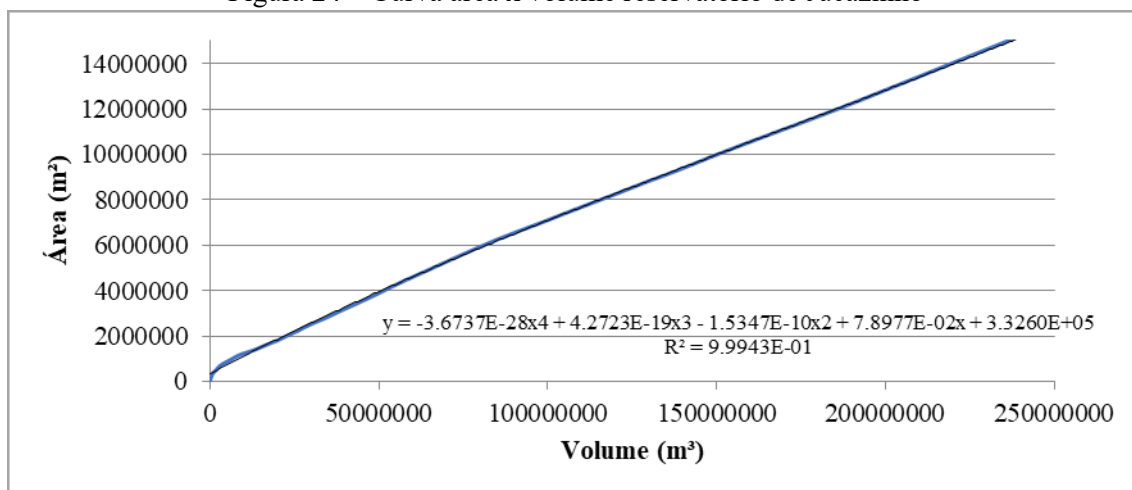
Observa-se que o posto de Garanhuns apresenta uma evaporação bastante reduzida quando comparada aos demais postos, sendo este posto escolhido por representar o microclima mais próximo da região de estudo (bacia do rio Una), característico de uma área mais úmida com predomínio de brejos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinado nível d'água medido no reservatório, é necessário estabelecer a cota, o volume armazenado e a área correspondente do espelho d'água, relação denominada de cota-área-volume (CAV). Os registros de CAV dos reservatórios em estudo foram obtidos por meio do acesso à base de dados da APAC-PE, sendo utilizados na construção das curvas de cada sistema hídrico. Em anexo são apresentados os quadros contendo essa relação para cada reservatório em estudo.

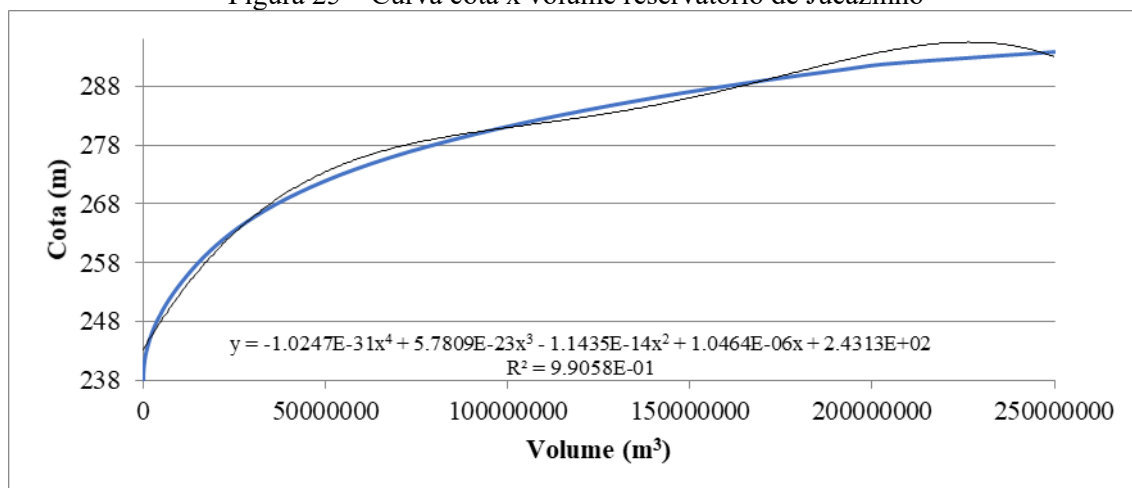
A partir dos registros de CAV de cada sistema hídrico em estudo, foram construídas as curvas referentes à área (m²)-volume (m³) e cota (m)-volume (m³) para cada reservatório, sendo as funções resultantes dessa relação utilizadas na simulação do balanço hídrico e da operação dos reservatórios para cálculo das vazões defluentes.

Figura 24 – Curva área x volume reservatório de Jucazinho



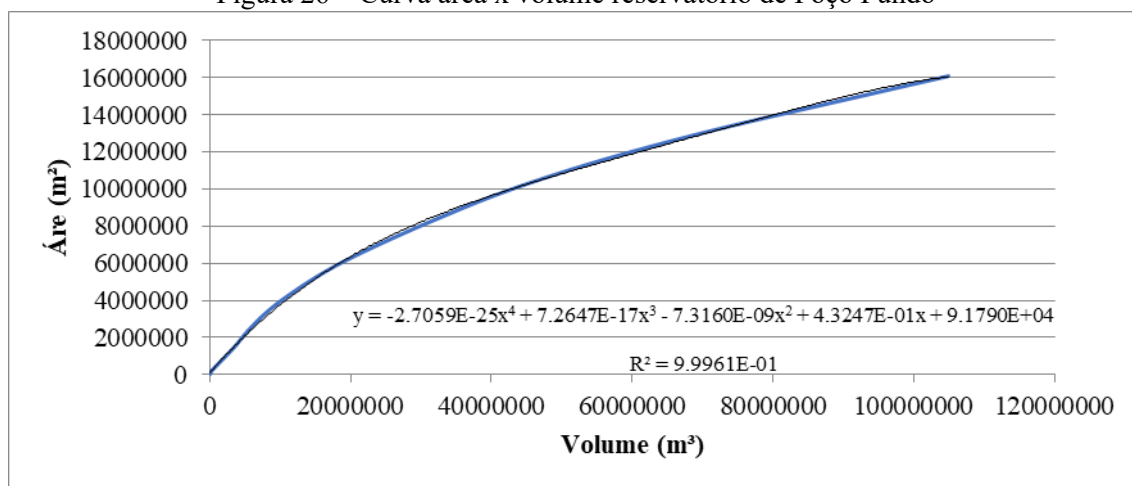
Fonte: A autora, 2019.

Figura 25 – Curva cota x volume reservatório de Jucazinho



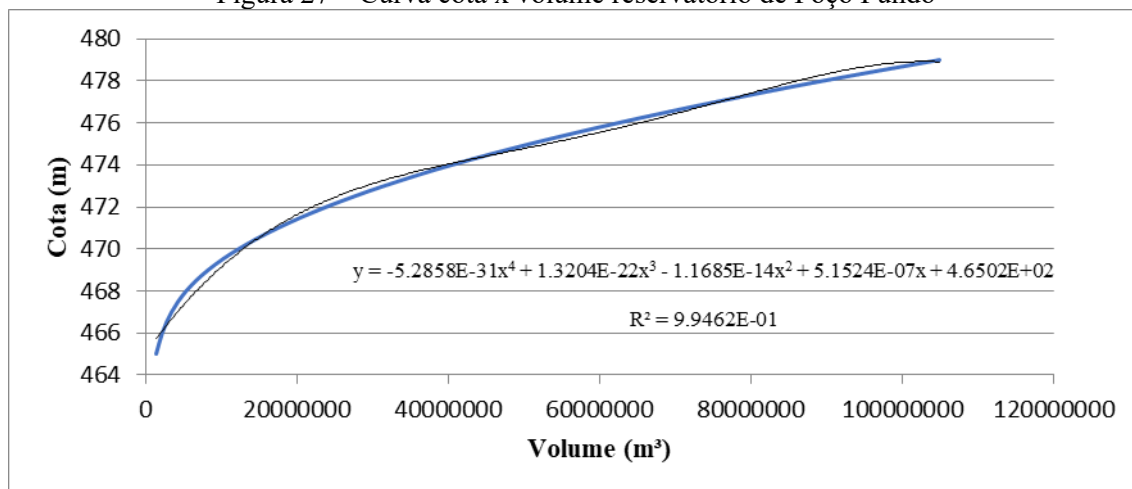
Fonte: A autora, 2019.

Figura 26 – Curva área x volume reservatório de Poço Fundo



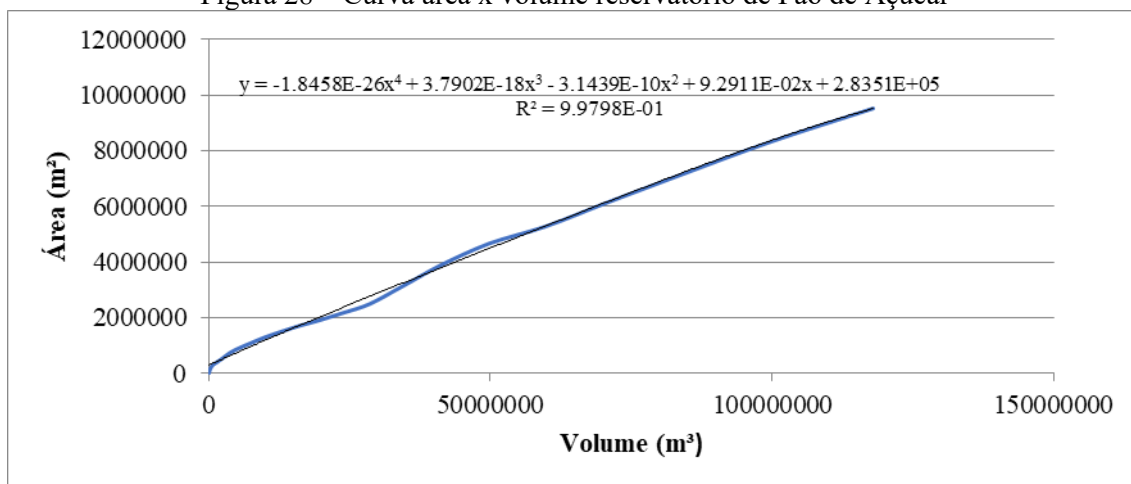
Fonte: A autora, 2019.

Figura 27 – Curva cota x volume reservatório de Poço Fundo



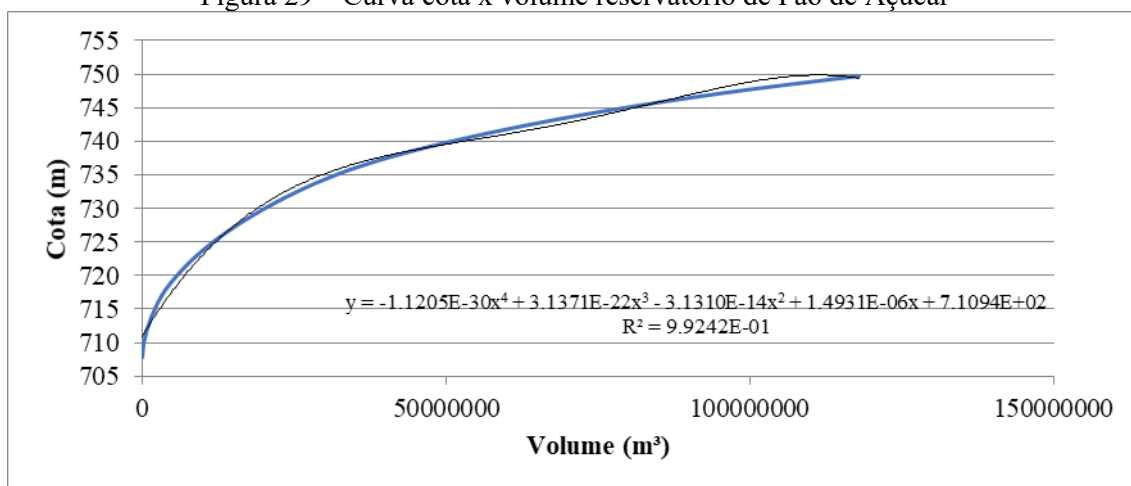
Fonte: A autora, 2019.

Figura 28 – Curva área x volume reservatório de Pão de Açúcar



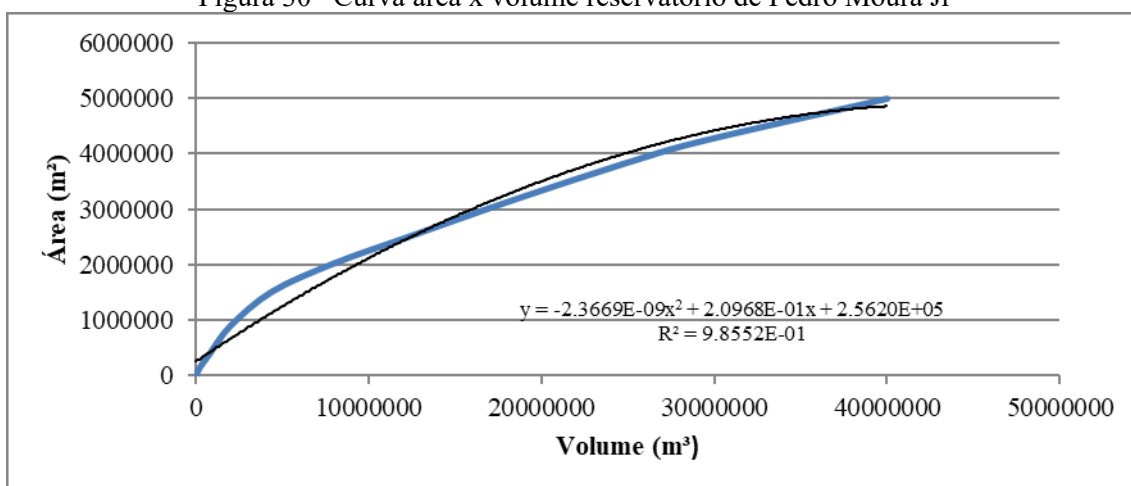
Fonte: A autora, 2019.

Figura 29 – Curva cota x volume reservatório de Pão de Açúcar



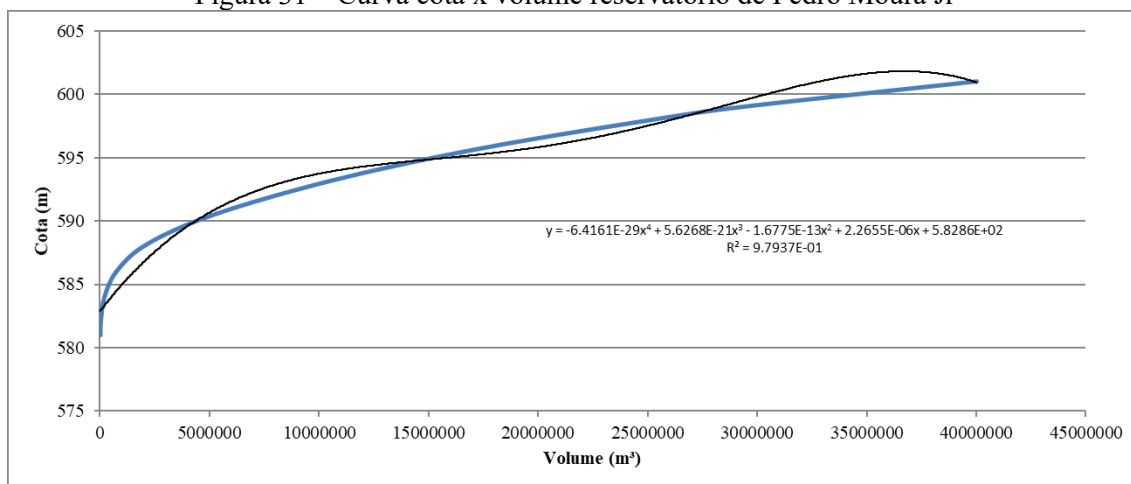
Fonte: A autora, 2019.

Figura 30– Curva área x volume reservatório de Pedro Moura Jr



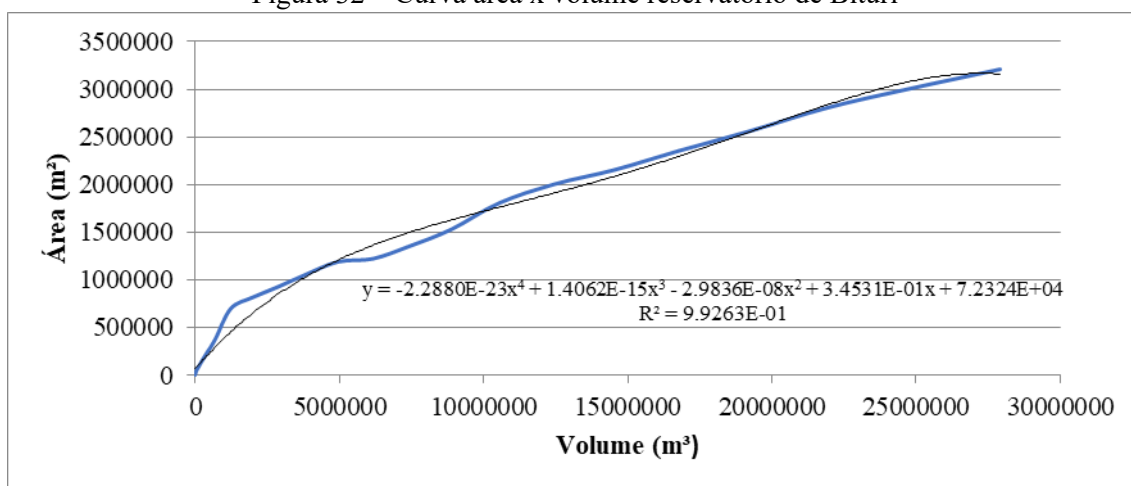
Fonte: A autora, 2019.

Figura 31 – Curva cota x volume reservatório de Pedro Moura Jr



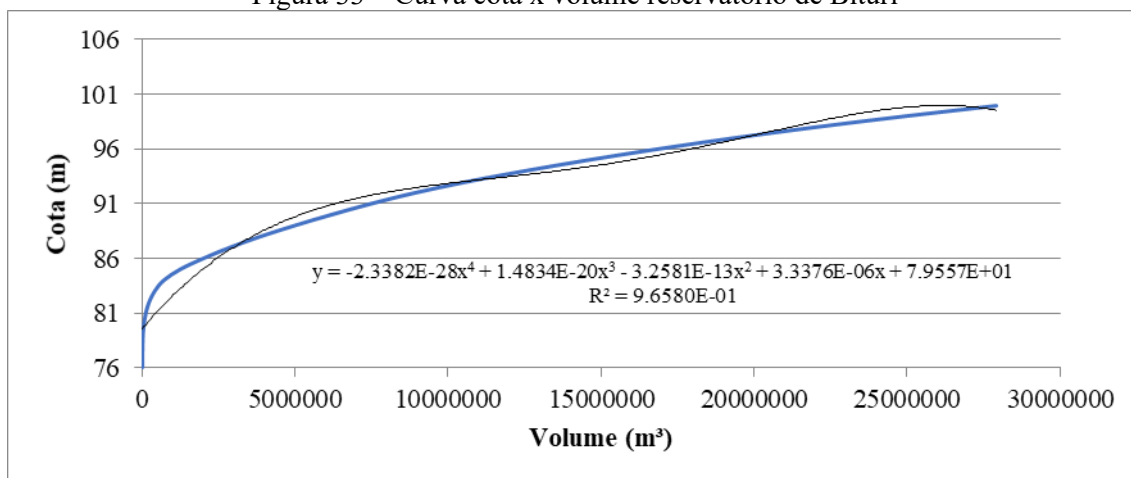
Fonte: A autora, 2019.

Figura 32 – Curva área x volume reservatório de Bituri



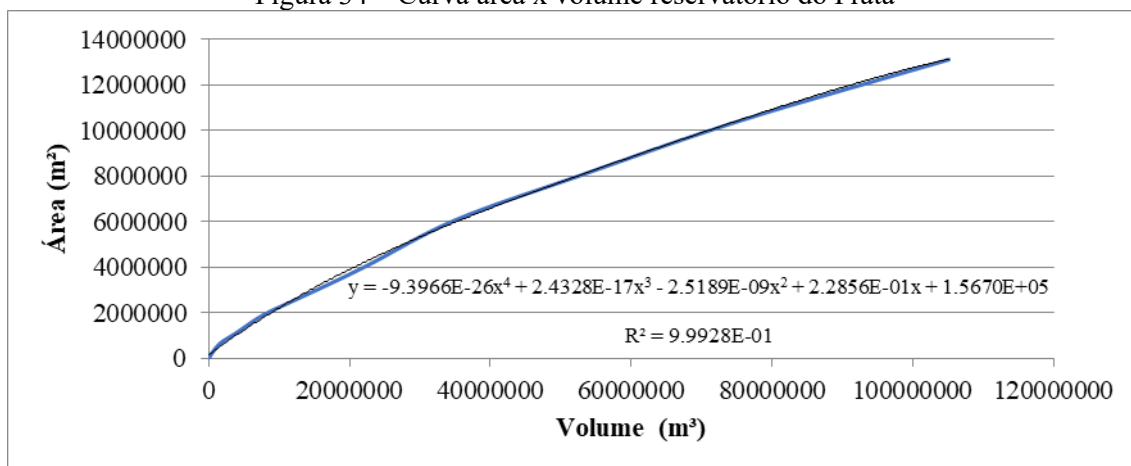
Fonte: A autora, 2019.

Figura 33 – Curva cota x volume reservatório de Bituri



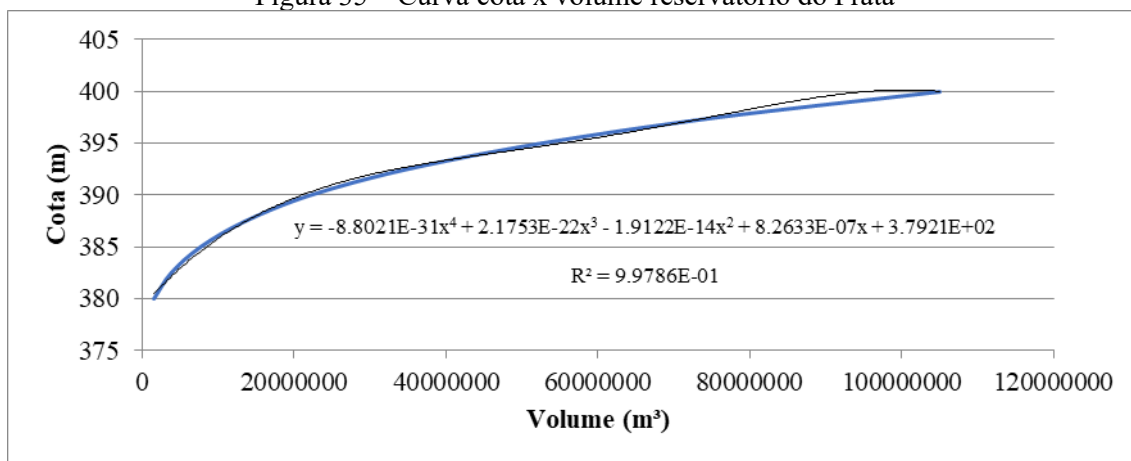
Fonte: A autora, 2019.

Figura 34 – Curva área x volume reservatório do Prata



Fonte: A autora, 2019.

Figura 35 – Curva cota x volume reservatório do Prata



Fonte: A autora, 2019.

A partir do modelo de balanço de massa hídrica de cada reservatório, foram constatadas as entradas, saídas e volumes acumulado nas barragens de Jucazinho, Poço Fundo, Pão de Açúcar, Pedro Moura Jr., Bituri e Prata. As simulações foram realizadas utilizando a base de dados hidrológicos no período de 01-03-1973 a 31-12-2016, com exceção do reservatório do Prata, com o intervalo de 01-06-1960 a 31-12-2016, correspondendo a um período de 43 e 56 anos, respectivamente. Observa-se que as simulações foram feitas para períodos mais longos que a operação real das barragens.

A estimativa da vazão de cada reservatório foi dada considerando a área de contribuição das estações fluviométricas que envolviam cada reservatório com a respectiva proporção de área aplicada. A Tabela 18 correlaciona os postos fluviométricos utilizados por reservatório, com nome, código e área de contribuição calculada.

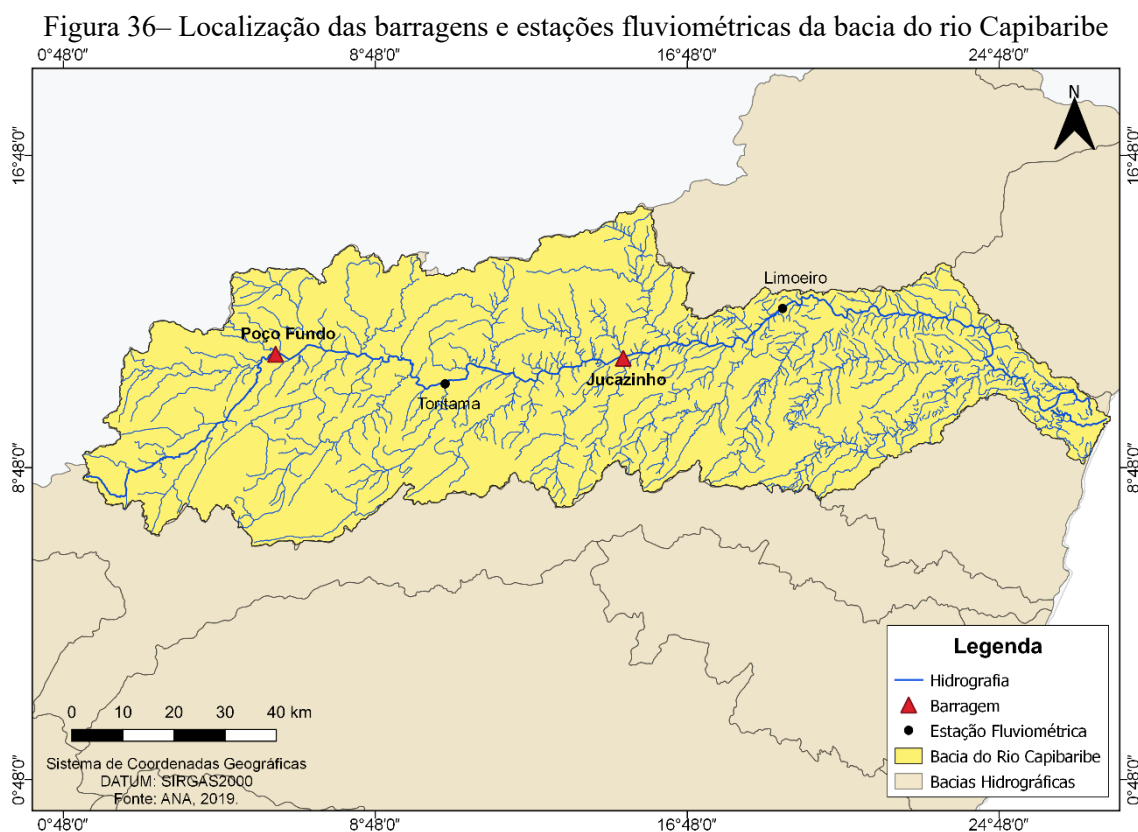
Tabela 18 – Postos fluviométricos com área de contribuição por reservatório

Reservatório	Posto Fluviométrico	Código	Área km ²
Jucazinho	Toritama	39130000	2450,0
Poço Fundo	Limoeiro	39145000	5580,0
Pedro Moura Jr	Caruaru	39340000	2000,0
Pão de Açúcar	Sanharó	39310000	672,0
Bituri			
Prata	Belém de Maria	39541000	388,0
	Capivara	39540000	2610,0

Fonte: Adaptado de ANA, 2019.

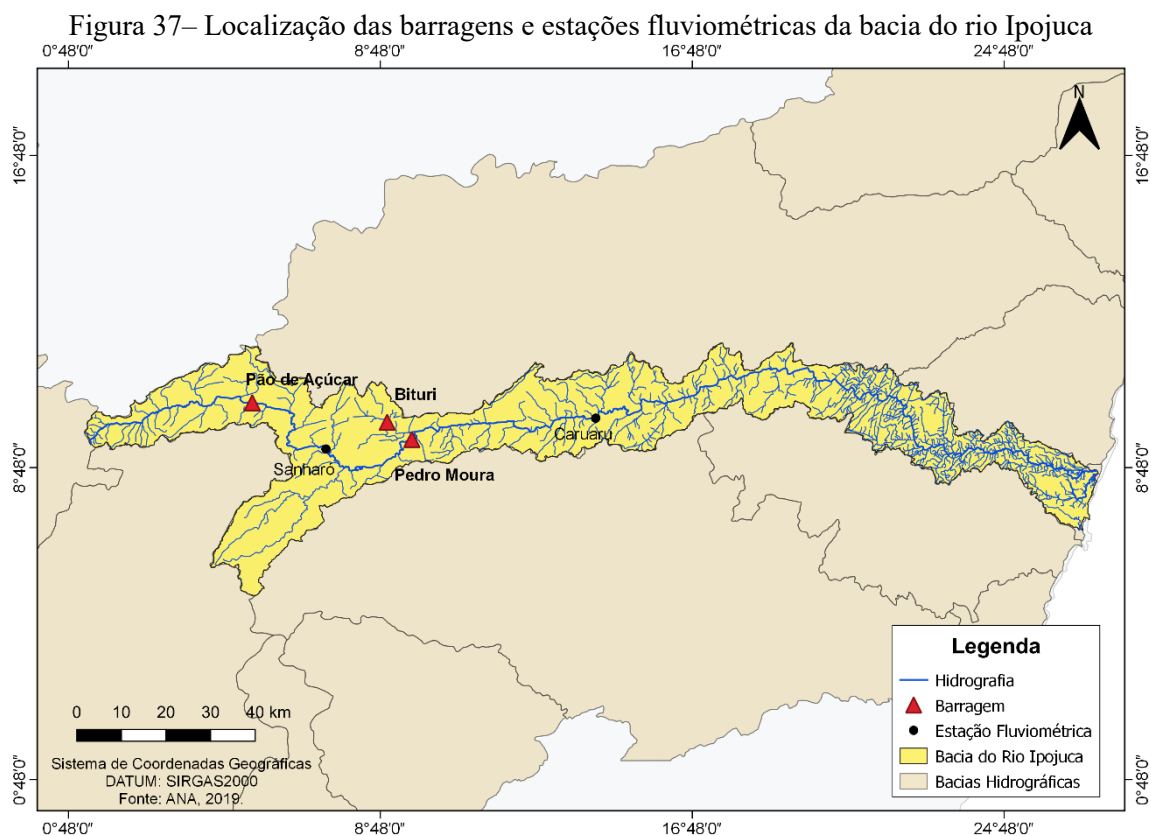
Com exceção do reservatório de Poço Fundo, as análises foram feitas sob a perspectiva de dois postos de vazão próximos a cada reservatório, a fim de verificar o que apresentasse melhor resultado no valor de vazão defluente. As Figuras 36, 37 e 38, apresentam a localização das barragens para cada bacia hidrográfica em estudo, com as respectivas estações fluviométricas utilizadas na análise de cada uma.

Para o reservatório de Jucazinho as simulações foram realizadas com os dados das estações fluviométricas de Limoeiro (39145000) e Toritama (39130000), e para Poço Fundo a estação de Toritama, conforme ilustra a Figura 36, ambas inseridas na bacia do rio Capibaribe com as áreas de contribuição de 2450 e 5580 km², respectivamente.



Fonte: A autora, 2019.

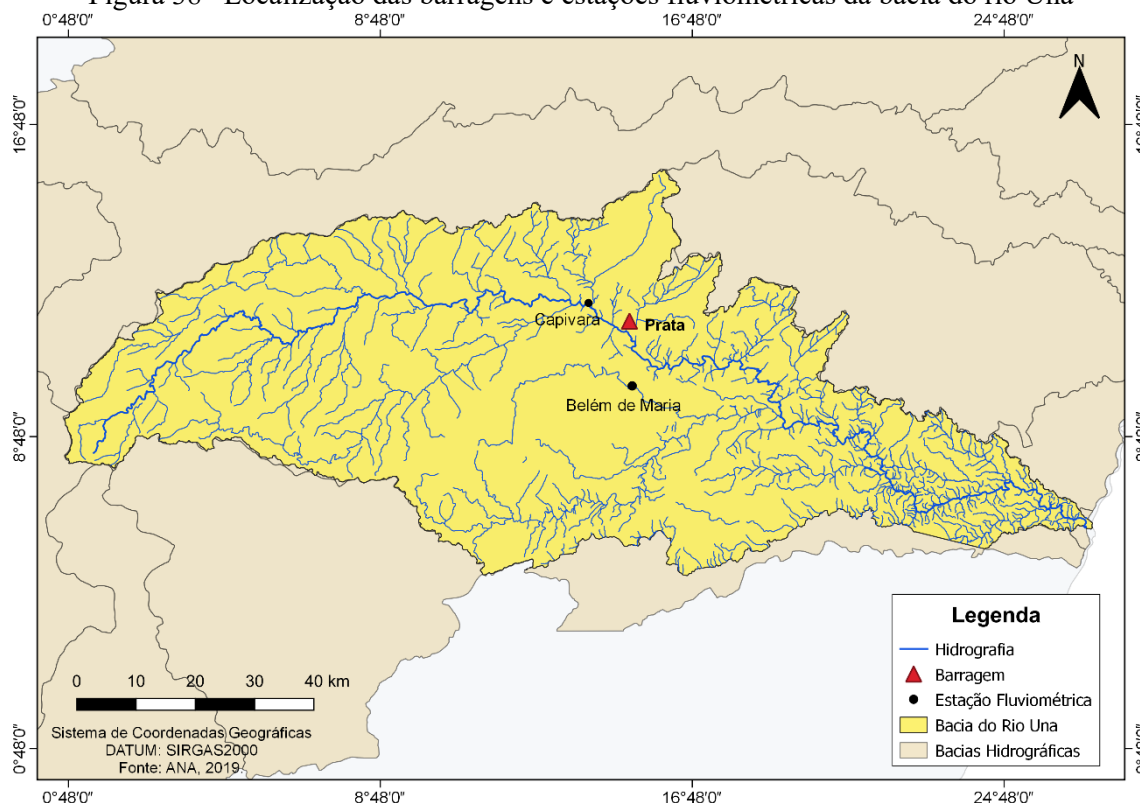
Para reservatórios contidos na bacia do rio Ipojuca, sendo Pão de Açúcar, Pedro Moura Jr. e Bituri, as vazões foram simuladas com dados das estações fluviométricas de Caruaru (39340000) e Sanharó (3931000), ambas inseridas dentro do limite da área da bacia (Figura 37), com as área de contribuição de 2000 e 672 km², respectivamente.



Fonte: A autora, 2019

O reservatório do Prata integrante da bacia do rio Una, foi simulado com as vazões das estações fluviométricas de Belém de Maria (39541000) e Capivara (39540000), inseridas no limite da bacia hidrográfica, com área de contribuição de 388 e 2610 km², respectivamente (Figura 38).

Figura 38— Localização das barragens e estações fluviométricas da bacia do rio Una



Fonte: A autora, 2019.

4.1 VAZÃO MÁXIMA DE CAPTAÇÃO

Aplicando-se as técnicas de simulação e otimização, conforme foram descritas na metodologia (Capítulo 3), obteve-se a matriz de operação para cada reservatório em estudo conforme cada período histórico estabelecido. Cada matriz de operação reúne o conjunto das vazões máximas de captação ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) em função do volume acumulado no reservatório, com base em cada um dos estados iniciais considerados como premissa.

A partir dos estados iniciais foi determinada a máxima vazão de retirada de modo que o volume dos reservatórios em cada mês não atingisse o valor mínimo de operação. Admite-se que ao fim de cada ciclo de dois anos o reservatório volte ao estado inicial. Como resultado, foram geradas para cada reservatório três matrizes de operação, considerando as séries até 1996, 2011 e 2016.

A Tabela 19 apresenta a matriz de operação resultante da simulação para o reservatório de Jucazinho, utilizando os dados de vazão do posto de Toritama (39130000) com correção proporcional às áreas de drenagem até o posto fluviométrico e até à barragem, para o período histórico até 2016. A matriz já validada para o período contínuo de simulação (sem considerar o intervalo de dois anos para reiniciar o volume

inicial do reservatório), neste caso sendo calculado o valor da soma do $\Delta Q = 0,28$ m³/s para toda a matriz, considerando a restrição do volume mínimo de operação.

Tabela 19 – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Toritama) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	0.399	0.398	0.397	0.396	0.396	0.396	0.397	0.397	0.401	0.401	0.401	0.402
2.04E+07	0.1	0.547	0.545	0.544	0.542	0.542	0.542	0.544	0.545	0.550	0.551	0.552	0.552
4.08E+07	0.2	0.843	0.840	0.838	0.835	0.835	0.836	0.839	0.841	0.850	0.853	0.853	0.854
6.12E+07	0.3	1.141	1.137	1.133	1.129	1.129	1.131	1.136	1.139	1.151	1.155	1.155	1.156
8.16E+07	0.4	1.440	1.434	1.429	1.425	1.424	1.427	1.434	1.438	1.452	1.457	1.458	1.459
1.02E+08	0.5	1.739	1.732	1.726	1.721	1.720	1.723	1.732	1.737	1.755	1.761	1.762	1.763
1.22E+08	0.6	2.039	2.031	2.024	2.018	2.017	2.021	2.031	2.037	2.058	2.065	2.066	2.067
1.43E+08	0.7	2.340	2.330	2.322	2.316	2.315	2.319	2.331	2.338	2.361	2.369	2.371	2.372
1.63E+08	0.8	2.641	2.630	2.621	2.614	2.613	2.618	2.631	2.639	2.665	2.674	2.676	2.677
1.84E+08	0.9	2.942	2.930	2.920	2.912	2.911	2.916	2.931	2.941	2.969	2.979	2.981	2.982
2.04E+08	1	3.244	3.231	3.220	3.211	3.210	3.215	3.232	3.243	3.273	3.284	3.286	3.288

Fonte: A autora, 2019.

Conforme expõe a Tabela 19, observa-se que ocorreu pouca ou nenhuma variação da vazão entre os meses do período de simulação, resultado semelhante para todos os reservatórios analisados. Sendo assim, o estado inicial do reservatório foi o fator preponderante para definir a vazão máxima que pode ser captada.

A relação com todas as matrizes de operação para cada reservatório e período histórico encontram-se no final deste documento (Apêndice A).

A partir da matriz de vazões máximas de captação foi realizada a segunda simulação da operação otimizada dos reservatórios considerando as retiradas para todo o período de análise, obtendo-se as vazões médias regularizadas para cada reservatório, período e posto fluviométrico correspondente, conforme apresenta a Tabela 20.

De acordo com a Tabela 20, para o reservatório de Jucazinho obteve-se a maior vazão média regularizada com o posto fluviométrico de Toritama (39130000) localizado no rio Capibaribe; no entanto, a escolha deste foi devido a série de dados que se pode utilizar ser até o ano de 1998, visto que a partir dessa data a acumulação em Jucazinho influencia as vazões do posto de Limoeiro (39145000), a jusante. Observa-se que quando se utilizou a série até 1996 a vazão regularizada com os dados do posto de Limoeiro foi maior pelo fato de que a barragem de Jucazinho não estava ainda operando.

Tabela 20 - Vazão média regularizada com regras de operação simulada (m³/s)

Reservatório	Vazão Posto	2016	2011	1996
Jucazinho	Toritama	2,042	2,539	2,989
	Limoeiro	1,845	2,242	3,454
Poço Fundo	Toritama	0,145	0,202	0,274
Prata	Belém de Maria	0,700	0,716	0,720
	Capivara	0,092	0,094	0,100
Bituri	Caruaru	0,042	0,044	0,060
	Sanharó	0,028	0,030	0,030
Pedro Moura Jr.	Caruaru	0,212	0,220	0,290
	Sanharó	0,158	0,166	0,141
Pão de Açúcar	Caruaru	0,215	0,225	0,278
	Sanharó	0,143	0,153	0,141

Fonte: A autora, 2019.

Para o reservatório do Prata, os resultados mais consistentes com os dados reais de operação do reservatório (RAMOS, 2017) foram obtidos com a vazão do posto de Belém de Maria (39541000) situado no rio Pannels, afluente do rio Una. Os dados do posto Capivara subestimaram significativamente as vazões regularizadas.

Para os reservatórios de Pão de Açúcar, Pedro Moura Jr. e Bituri, os resultados da vazão média regularizada mais coerentes foram obtidos a partir do posto fluviométrico de Caruaru (39340000) localizado no rio Ipojuca, sendo escolhido para a análise.

Analisando cada reservatório de acordo com cada evento histórico estabelecido na simulação, observa-se uma redução em todas as vazões médias regularizadas conforme a ocorrência dos períodos de seca considerados: 1996 – definido como o limite de um período sem a ocorrência de secas graves; 2011 – caracterizado pela ocorrência dos dois últimos eventos de seca críticos do século passado (1998-1999); e o período até 2016, abrangendo o evento mais severo de seca dos últimos cem anos (2012-2016).

Esse resultado foi semelhante quando calculada as vazões médias regularizadas supondo que os reservatórios fossem operados de modo a obter uma vazão fixa de retirada constante, conforme é usualmente realizado na operação desses sistemas.

A Tabela 21 expõe essa estimativa por reservatório, posto fluviométrico e período de análise, para as vazões médias regularizadas com retirada constante e com a matriz de operação calculada.

Tabela 21 - Vazão média regularizada com retirada constante (a) e com matriz de operação (b)

Reservatório	Vazão (m³/s)	2016		2011		1996	
		A	b	a	b	a	b
Jucazinho	Toritama	0,945	2,042	1,841	2,539	2,217	2,989
Poço Fundo	Toritama	0,032	0,145	0,109	0,202	0,165	0,274
Prata	Belém de Maria	0,647	0,700	0,659	0,716	0,690	0,720
Bituri	Caruaru	0,014	0,042	0,014	0,044	0,032	0,060
Pedro Moura	Caruaru	0,039	0,212	0,042	0,220	0,128	0,290
Pão de Açúcar	Caruaru	0,077	0,215	0,077	0,225	0,157	0,278

Fonte: A autora, 2019.

4.1.1 Reservatório de Jucazinho

Com base nos resultados descritos na Tabela 20, observa-se que o reservatório de Jucazinho quando aplicadas as regras de operação até ano de 1996, considerado no presente estudo como um período sem ocorrência de secas graves, gera-se uma vazão média regulariza de cerca de 2,989 m³.s⁻¹, em seguida até o período de 2011 após sucedida a primeira seca, o valor da vazão cai para 2,539 m³.s⁻¹ e durante a última seca, considerando até o ano de 2016, a vazão média regularizada atinge 2,042 m³.s⁻¹.

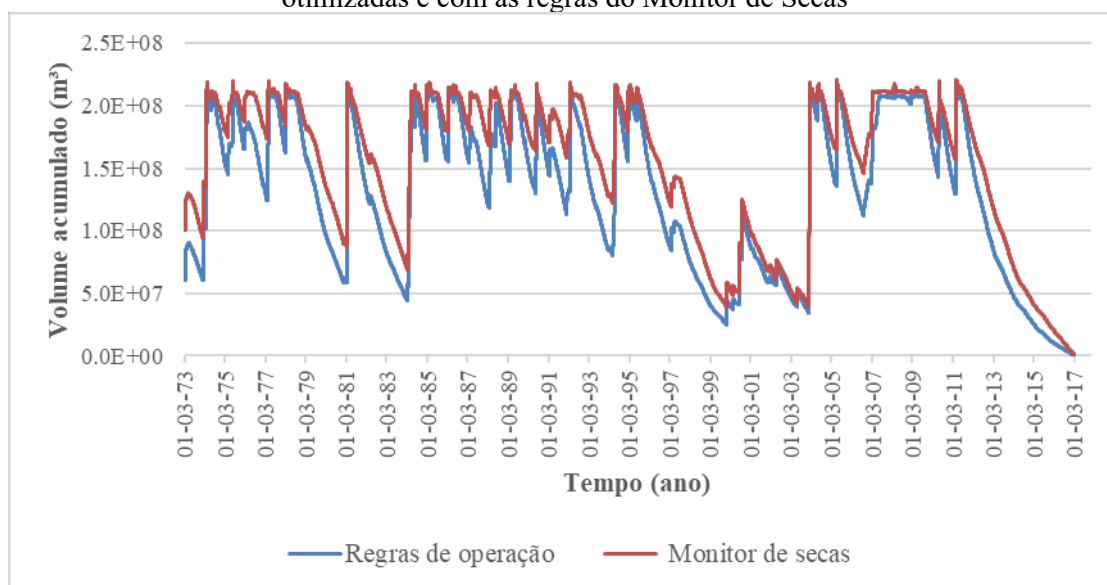
Quando realizada essa mesma comparação, porém utilizando-se uma regra de operação com retirada constante, conforme expõem a Tabela 21, obtém-se uma vazão média regularizada de 2,217 m³.s⁻¹ até o período considerado sem secas graves de 1996, reduzindo para 1,841 m³.s⁻¹ após a primeira seca em 2011 e no último e recente período de 2016 a vazão média com retirada constante cai para 0,945 m³.s⁻¹.

Ramos (2017), ao aplicar as regras de operação propostas por Souza Filho et al. (2014) na metodologia do Monitor de Secas, considerou para o reservatório de Jucazinho a capacidade de projeto que era de 327 milhões de m³. No entanto, recentemente estudos do Laboratório de Geoprocessamento do Campus Agreste (GEOLAB) da UFPE, constataram a partir da base de dados do projeto PE3D que o reservatório teria capacidade de 202 milhões de m³, posteriormente a ANA contratou a batimetria do manancial e verificou a capacidade de 204 milhões de m³. Em função disso, na presente pesquisa foi feita a correção da curva cota-área-volume com nova capacidade do reservatório.

Conforme expõe a Figura 39, foram plotados os volumes acumulados no reservatório até o período de 2016 para os resultados obtidos com as regras de operação simuladas nesse estudo e para os resultados com as regras de operação do Monitor de

Secas, com a capacidade corrigida de 204,8 milhões de m^3 . A correção para as regras do Monitor foi estimada modificando os “volumes-meta” proporcionalmente à relação entre as capacidades informada e real do reservatório.

Figura 39 – Volume acumulado no reservatório de Jucazinho com as regras de operação otimizadas e com as regras do Monitor de Secas



Fonte: A autora, 2019.

A partir das simulações da operação otimizada do reservatório de Jucazinho, obteve-se uma vazão média regularizada de $2,042 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ até o período de 2016, enquanto que ao se reproduzir as regras do monitor obteve-se para esse mesmo período uma vazão média regularizada de $1,450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, resultado cerca de 30% inferior ao obtido na simulação do presente trabalho. Em ambas as simulações foram utilizadas as vazões observadas do posto fluviométrico de Toritama.

Observa-se que o volume acumulado até 2016 foi superior com as regras do Monitor quando comparado às regras de operação simuladas no presente estudo, conforme ilustra a Figura 39. Evidencia-se que a exploração do reservatório de Jucazinho foi maximizada quando aplicadas as regras de operação otimizadas, resultando num menor volume acumulado e numa maior vazão média regularizada.

É importante registrar, porém, que o método utilizado por Souza Filho et al. (2014) teve seus volumes-meta ajustados proporcionalmente às capacidades original e corrigida do reservatório. Assim, não se pode afirmar que o método vá necessariamente apresentar resultados inferiores aos obtidos neste trabalho.

4.1.2 Reservatório de Poço Fundo

Para o reservatório de Poço Fundo, localizado no rio Capibaribe entre os municípios de Santa Cruz do Capibaribe e Jataúba, quando simuladas as regras de operação até o ano de 1996, obteve-se uma vazão média regularizada $0,274 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, em seguida, após a ocorrência do primeiro evento de seca considerado até o ano de 2011, a vazão reduziu para $0,202 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e até o período de 2016, considerando os eventos mais severos dos últimos anos, atingiu o valor médio de $0,145 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Seguindo o mesmo princípio, para as simulações com uma vazão de retirada constante, esse sistema hídrico teria até 1996 a vazão média de $0,165 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, caindo para $0,109 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ considerando até o período de 2011 e chegando ao valor mínimo de $0,032 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ durante a última seca em 2016, conforme apresenta a Tabela 21.

4.1.3 Reservatório de Pão de Açúcar

Seguindo o mesmo preceito descrito anteriormente, após as simulações foram obtidas para o sistema hídrico de Pão de Açúcar a vazão média regularizada de $0,278 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ quando simulado até o período considerado sem secas graves de 1996, seguidos de $0,225 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até 2011 e reduzindo para $0,215 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até o período de 2016, abrangendo os últimos anos mais secos (Tabela 20).

Quando considerado sob a perspectiva de uma vazão de retirada constante (Tabela 21), esse reservatório atingiu as vazões médias regularizadas de $0,157 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até o período de 1996 sem secas, e após sucedidas as secas dos anos de 2011 e 2016, o valor da vazão média de retirada constante reduziu para $0,077 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ em ambos intervalos.

4.1.4 Reservatório de Pedro Moura Júnior

Até o ano de 1996, considerado o período sem secas graves, o reservatório de Pedro Moura Jr. atingiu uma vazão média regularizada de $0,290 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, até 2011, considerando a ocorrência de eventos críticos do século passado, o valor da vazão média atingiu $0,220 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e após a ocorrência do evento mais crítico até o ano de 2016, o valor simulado caiu para $0,212 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Quando analisado para uma retirada constante, Pedro Moura Jr. apresentou uma vazão média de $0,128 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para o intervalo até 1996, reduzindo para $0,042 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $0,039 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ em 2011 e 2016, respectivamente, após os eventos de secas registrados.

4.1.5 Reservatório de Bituri

Seguindo os resultados da Tabela 20, nota-se que o reservatório de Bituri quando simulada as regras de operação até ano de 1996, gera uma vazão média regularizada de $0,060 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, em seguida até o intervalo de 2011 após ocorrida a primeira seca, o valor cai para $0,044 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e durante a última seca, considerando até o ano de 2016, a vazão média regularizada atinge $0,042 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

De modo semelhante, porém utilizando-se uma regra de operação com retirada constante (Tabela 21), têm-se uma vazão média regularizada de $0,032 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até o período de 1996, reduzindo para $0,014 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ após ocorrido os primeiros e os últimos período de seca em 2011 e 2016, respectivamente.

4.1.6 Reservatório do Prata

Para o reservatório do Prata, com base nos resultados descritos na Tabela 20 quando aplicadas as regras de operação até ano de 1996, considerado sem ocorrência de secas graves, chegou-se a uma vazão média regularizada de cerca de $0,720 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$; em seguida até o período de 2011, após sucedida a primeira seca, o valor da vazão cai para $0,710 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e durante a última seca, considerando até o ano de 2016, a vazão média regularizada atinge $0,700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Quando utilizada uma retirada de vazão constante (Tabela 21), obtém-se uma vazão média regularizada de $0,690 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ até o período sem secas graves de 1996, reduzindo para $0,659 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ após a primeira seca em 2011 e durante a seca recente até o período de 2016 a vazão média com retirada constante foi de $0,647 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Conforme descrito acima e apresentado na Tabela 20, constata-se que os reservatórios analisados nesse estudo demonstraram um comportamento semelhante, sendo possível observar os impactos dos eventos de secas na disponibilidade de água desses sistemas, havendo em todos os casos a redução da vazão média regularizada conforme a ocorrência dos períodos de seca em questão.

A vazão regularizada obtida para o períodos de 1973 a 2016, para os reservatórios de Jucazinho, Poço Fundo, Pão de Açúcar, Pedro Moura e Bituri, foi respectivamente cerca de 31%, 47%, 23%, 27%, 30% inferior ao valor da vazão média regularizada para o período de 1973 a 1996, ou seja, sem incluir a ocorrência dos períodos de seca de 1998-1999 e de 2012-2016, mostrando que as secas vivenciadas na região do Agreste pernambucano afetaram negativamente a disponibilidade hídrica desses sistemas.

O reservatório do Prata, analisado no período de 1960 a 2016, foi o único que demonstrou não sofrer grande influência na disponibilidade hídrica, considerando que a redução da vazão média regularizada para esse sistema foi de 3% quando comparada ao valor obtido para o intervalo de 1960 a 1996, sem os anos de seca. Pressupõe-se que o fato pode ser explicado devido ao microclima predominante na região desse manancial, característico de uma área de brejos, favorecendo a disponibilidade hídrica local.

Comparando os resultados da Tabela 21, que apresenta as vazões médias com uso de retirada constante e com regras de operação, evidencia-se que a captação controlada de reservatórios com regras otimizadas gera vazões médias regularizadas significativamente superior contrapondo-se à operação convencional com retirada constante, sendo esse resultado similar para todos os reservatórios em estudo e para cada período histórico analisado.

Na maioria dos reservatórios a vazão regularizada obtida com as regras de operação superou em mais de 50% as vazões oriundas de uma operação com retirada constante, a exemplo do reservatório de Jucazinho que apresentou para o período de 2016 uma vazão média de retirada constante de $0,945 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ contra a vazão média de $2,045 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ com o uso de uma operação controlada.

Conforme já explicado, o efeito da sazonalidade sobre a matriz das vazões regularizadas foi mínimo. Diante do resultado das vazões máximas de captação do reservatório de Jucazinho (Tabela 19), realizou-se para fins de comparação uma simulação utilizando como valor constante a média das vazões mensais, ou seja, substituindo-se a matriz por um vetor-coluna apenas considerando o estado inicial do reservatório. Para essa análise obteve-se uma vazão média captada de $2,043 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Em contrapartida, calculando por separado com o valor de cada mês, o valor obtido para a vazão média foi de $2,042 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, ou seja, confirmando que praticamente não houve influência da sazonalidade.

5 CONCLUSÕES

Observa-se que no caso dos reservatórios estudados, independente do mês de simulação, a vazão máxima obtida foi praticamente a mesma, havendo pouca ou nenhuma variação ao longo dos meses do ano, apenas ocorrendo diferenças significativas somente entre os estados de volume inicial do reservatório. Desta forma, nota-se que para análise desses reservatórios, efetivamente a sazonalidade não apresentou grande influência. Uma hipótese para esse resultado é o regime hidrológico dos rios analisados. Por outro lado, é preciso avaliar eventual dependência do tempo de ciclo considerado para retorno do reservatório ao estado inicial, neste caso considerado como sendo dois anos.

Analisando as vazões médias regularizadas obtidas para cada período histórico definido a partir da ocorrência das secas, observou-se a mesma tendência para todos os reservatórios, mostrando que as vazões estimadas foram piorando na medida que os eventos críticos foram acontecendo, resultando na redução da disponibilidade hídrica desses sistemas e obtendo-se o menor valor da vazão média regularizada para o período até 2016, que inclui o evento de seca mais crítico do século: 2012 a 2016.

Esses resultados validam e enfatizam que os eventos de seca afetam severamente a disponibilidade hídrica dos reservatórios, levando à redução acentuada do regime de vazões, em consequência interferindo e comprometendo os usos múltiplos desses sistemas, fato evidenciado na prolongada seca registrada nos últimos anos, que levou vários reservatórios do Agreste de Pernambuco à exaustão.

O uso de regras de operação otimizada resultou para todos os reservatórios analisados numa maior vazão regularizada de captação quando comparadas a uma operação convencional de retirada constante, mostrando que o emprego do método traz benefícios, sobretudo auxiliando num aproveitamento mais racional dos sistemas hídricos, conforme o volume disponível em cada período.

Quanto ao reservatório de Jucazinho, quando analisado sob a perspectiva das regras do Monitor de Seca, resultou numa menor vazão regularizada comparando-se com o emprego das regras de operação otimizadas no presente estudo, demonstrando a possibilidade de retirada de maiores vazões e consequentemente resultando num melhor aproveitamento desse sistema hídrico.

Desta forma, evidencia-se a importância de mecanismos de controle operacional para a alocação de água em regiões semiáridas, visto que a elevada variabilidade dos

deflúvios naturais, somada à ocorrência de séries históricas com anos de baixa pluviosidade levam a insegurança quanto aos valores de vazão regularizadas previstas, indicando a importância de medidas preventivas e mitigadoras que considerem situações climáticas extremas na gestão de recursos hídricos da região.

Como produto associado a este trabalho de pesquisa procurar-se-á oferecer à Compesa, APAC-PE, SRHE-PE e ANA os resultados, planilhas e descrição da metodologia para que os procedimentos possam ser úteis à gestão dos recursos hídricos em Pernambuco e até mesmo em outras regiões.

6 RECOMENDAÇÕES

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma avaliação prévia para detecção de ciclos nas vazões afluentes aos reservatórios que auxiliem a estimativa do tempo para que o reservatório retorne ao estado inicial. Também a utilização de modelos chuva-vazão para melhor avaliar a afluência a cada manancial pode aprimorar a análise.

Para tornar os resultados mais fidedignos propõe-se a avaliação das outorgas concedidas em cada rio e reservatório estudado, o que permitirá melhor análise da real disponibilidade de água a ser oferecida pela Compesa para abastecimento das cidades atendidas pelos mananciais.

REFERÊNCIAS

ABADIE, J.; CARPENTIER, J. **Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints**. Optimization, Sympos. Inst. Math. Appl. Univ. Keele, England, 1968, 37-47 (1969).

Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC. Bacias hidrográficas. Disponível em: < http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5 >. Acesso em: jan. 2019.

Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC. Boletim de Monitoramento dos reservatórios. Disponível: <http://www.apac.pe.gov.br/arquivos_portal/boletinsreservatorios/Boletim_Monitoramento_Reservatorios_15_10_2019.pdf> Acesso em 15 de dez. 2019.

Agência Nacional de Águas - ANA. Conjuntura dos recursos hídricos: informe 2015. 88 p. ISBN: 978-85-8210-030-1. Brasília, 2015.

Agência Nacional de Águas – ANA. Série Histórica das estações. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas> > Acesso: junho 2019.

Agência Nacional de Águas – ANA. Monitor de Secas do Nordeste. Brasília, 2019.

Agência Nacional de Águas - ANA. Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação: Relatório Síntese. Brasília, 2017.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

ANDRADE, P. R.; CURI, W. F.; CURI, R. C. **Alocação ótima de recursos de água associada a operação integrada de reservatórios de usos múltiplos-uma avaliação alternativa para reforço do abastecimento de Recife**. Seminário de Planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de água: O estado da arte e questões avançadas, p. 1-14, 2002.

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 73-95, 1998.

BRAVO, J. M.; TUCCI, C. E. M.; PILAR, J. V. COLLISTOCHONN, W. et al. Otimização de regras de operação de reservatórios com incorporação da previsão de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 181-196, 2008.

BOLOURI-YAZDELI, Y., BOZORG HADDAD, O., FALLAH-MEHDIPOUR, E., MARINÔ, M. A. 2014. **Evaluation of Real-Time Operation Rules in Reservoir Systems Operation**. Water Resources Management 2014, v. 28, n. 3, p. 715.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica, v. 1, p.166, 2009.

CAMPOS, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. **Estudos avançados**, v. 28, n. 82, p. 65-88, 2014.

CIRILO, J. A. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido**. Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H.; DA SILVA, L. A.; CAMPOS, J. H. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. (Ed.). **Drought in Brazil: proactive management and policy**. CRC Press, 2017.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos-CGEE, p. 292, 2016.

FARIAS, C. A. S., SANTOS, C. A. G., CELESTE, A. B. **Daily reservoir operating rules by implicit stochastic optimization and artificial neural networks in a semi-arid land of Brazil**. In: G. Blöschl, et al., eds. Risk in water resources management. Wallingford: IAHS Press, IAHS Publication. 347, 191–197.

GOES FILHO, A. **Gestão de reservatórios com sistema de apoio à decisão espacial: o caso do açude Castanhão**. 2012. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

GOMES, M. G.; MEDEIROS, J. D. F; MAIA, A. G. **Otimização da Alocação de Água em Reservatório Semiárido em Cenários de Escassez Hídrica**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Foz de Iguaçu – PR, 2019.

GOODARZI, E., ZIAEI, M., SHOKRI, N. Reservoir operation management by optimization and stochastic simulation. **Journal of Water Supply: Research and Technology—Aqua**, v. 62, n. 3, p. 138-154. 2013.

GUTIÉRREZ, A. P.; NYS, E. E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. **Drought preparedness in Brazil**. Weather and Climate Extremes, v. 3, p. 95-106, 2014. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010 Evaporação Total. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso: maio 2019.

Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP. Relatório de Impacto Ambiental: Estudo de Impacto Ambiental – EIA: Sistema de Controle de Cheias da Bacia do Rio Una- Barragem Serro Azul/ ITEP; Unidade Gestora de Projetos Barragens da Mata Sul. Recife, 2011.

KANE, R. P. **Prediction of droughts in north-east Brazil: Role of ENSO and use of periodicities.** International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, v. 17, n. 6, p. 655-665, 1997.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications.** Springer, 2017.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.C.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.. MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2018.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Clima Análise**, v. 3, p. 49-54, 2016.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. **Drought in Northeast Brazil—past, present, and future.** Theoretical and Applied Climatology, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. **Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections.** Climatic Change, v. 129, n. 1-2, p. 103-115, 2015.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R.. **A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos.** Parcerias Estratégicas, v. 20, n. 41, p. 107-128, 2016.

MARTINS, E.; NYS, E. MOLEJÓN, C. Q.; ENGLE, N. L. BIAZETO, B.; SILVA, R. S. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas.** Série Água, v. 10, 2015.

National Drought Mitigation Center - NDMC. Drought Basics. Disponível em: <<https://drought.unl.edu/Education/DroughtBasics.aspx>> Acesso em: 01 julho de 2019.

NUNES, T. H. C.; GALVAO, C. O.; REGO, J. C. Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico - RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 493-501, jul./set. 2016.

PERNAMBUCO. Bacia hidrográfica do rio Una, quarto e quinto grupos de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos – GL 4 e GL 5. Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco nº 3. CONDEPE/FIDEM, 85 p, Recife, 2006.

PERNAMBUCO. Secretaria Infraestrutura e Recursos Hídricos de Pernambuco (SRHE/PE). Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe (Tomo I – Diagnóstico Hidroambiental - Volume 01/03). Recife: 2010, 389p.

PERNAMBUCO. Secretaria Infraestrutura e Recursos Hídricos de Pernambuco (SRHE/PE). Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental - Volume 01/03). Recife: 2010b, 339p

PERNAMBUCO. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH-PE). Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente - SECTMA, v. 1., 263 p., Recife, 1998.

PBMC, 2016: Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PORTO, R. L.; AZEVEDO, L. G.. **Sistemas de suporte a decisões aplicadas a problemas de recursos hídricos**. In: TÉCNICAS quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS — ABRH, 2002.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4. Ed. New York: John Wiley & Sons, 813 p, 2019.

RAMOS, N. M. R. **Modelagem na gestão de sistemas hídricos integrados do semiárido brasileiro: estudo de caso do agreste pernambucano**. Tese: (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E.; SILVA, E. R.. **Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco**: simulação hidrológica-hidrodinâmica. Recife, 2015.

SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos - SIRH. Bacias Hidrográficas em Pernambuco. Disponível: <http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=55:baciasempdf&catid=42:documentos&Itemid=75> Acesso: maio de 2019.

SOUZA FILHO, F. A.; CID, D. A. C. ARAÚJO, L. M. Uso de simulação para definição de níveis metas de operação para o reservatório Jucazinho/PE. **Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2014.

SOUZA FILHO, F. A. **A Política nacional de recursos hídricos: Desafios para sua implantação no semiárido brasileiro**. In: Medeiros, S.S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. (ed.). Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. p.1-25, Campina Grande, 2011.

SUASSUNA, J. **Semiárido: proposta de convivência com a seca**. Cadernos de Estudos Sociais, v. 23, n. 1-2, 2007.
Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. Nova delimitação Semiárido. Ministério de Integração Nacional. Brasília, 2018.

TEIXEIRA, F. J. C.; MACHADO, J. **Secas no Brasil: a construção de outro modelo de gestão.** Seção 1. Políticas nacionais da seca. Ed. Esp., Brasília-DF, v. 20, n. 41, p. 89-106, jul-dez 2015.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** UFRGS/Associação Brasileira de recursos Hídricos, 1998 - 669 páginas.

TUCCI, C. E. M. **Modelos determinísticos.** In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/.ABRH, p. 211-324. 1987.

VAN OEL, P. R., KROL, M. S., HOEKSTRA, A. Y. **Application of multi-agent simulation to evaluate the influence of reservoir operation strategies on the distribution of water availability in the semi-arid Jaguaribe basin, Brazil.** Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C 47–48:173-181. December, 2012

VIEIRA, R. M.; TOMASELLA, J., ALVALÁ, R. C.; SESTINI, M. F., AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; DE OLIVEIRA, S. B.; DE SOUZA, M. S.; CALIL, P. M.; DE CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C.; SANTANA, M. O. **Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast, Solid Earth,**v. 6, n. 1, p. 347–360, 2015.

WURBS, R. A. **Generalized models of river system development and management.** Current Issues of Water Management. InTech, 2011.

WURBS, R. A. **Comparative evaluation of generalized river/reservoir system models.** Texas Water Resources Institute, 2005.

ANEXO A – RELAÇÃO CAV POR RESERVATÓRIO

Quadro – Relação CAV reservatório de Jucazinho

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
238	0	0	266	2580258	30710709
239	51703	8765.22	267	2745137	33371384
240	127051	101151.5	268	2937440	36210285
241	187992	259458.8	269	3156166	39254475
242	282896	495647.7	270	3370173	42518597
243	372948	827182.5	271	3609271	46005298
244	436516	1231137	272	3873741	49741843
245	499300	1698497	273	4171910	53759807
246	591992	2239663	274	4475937	58082073
247	691453	2883643	275	4781752	62711943
248	765964	3613047	276	5115608	67653774
249	831250	4412049	277	5472613	72949524
250	897537	5276418	278	5847358	78608639
251	972857	6210949	279	6228877	84645755
252	1060533	7227551	280	6601254	91068114
253	1149776	8332316	281	6978220	97853708
254	1217242	9518793	282	7398438	1.05E+08
255	1276914	10765341	283	7832898	1.13E+08
256	1337729	12072756	284	8289060	1.21E+08
257	1411783	13446016	285	8786239	1.29E+08
258	1504921	14900719	286	9285488	1.38E+08
259	1603937	16458445	287	9859134	1.48E+08
260	1702300	18109701	288	10441189	1.58E+08
261	1803469	19861805	289	11040266	1.69E+08
262	1939470	21733136	290	11668073	1.8E+08
263	2084479	23749047	291	12356136	1.92E+08
264	2224004	25900215	292	13115652	2.05E+08
265	2409004	28213572	300	19191780	3.07E+08

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Quadro – Relação CAV reservatório de Poço Fundo

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
458	0	0	471	5800000	175600001
460	70000	50000	472	7000000	23940002
462	210000	270000	473	8280000	31560001
464	460000	910000	474	9670000	40510002
465	680000	1480000	475	11000000	50830001
466	1000000	2280000	476	12280000	62470001
467	1500000	3520000	477	13530000	75370010
468	2370000	5440000	478	14760000	89510009
469	3450000	8340000	479	16100000	104930008
470	4580000	12360000	-	-	-

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Quadro – Relação CAV reservatório de Pão de Açúcar

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
707.75	28000	0	729.75	1930000	19686000
709.75	178000	206000	731.75	2189000	23805000
711.75	325000	709000	733.75	2506000	28500000
713.75	426000	1460000	735.75	3118000	34124000
715.75	568000	2454000	737.75	3898000	41140000
717.75	760000	3728000	739.75	4677000	49715000
719.75	939000	5481000	741.75	5286000	59678000
721.75	1114000	7534000	743.75	6185000	71149000
723.75	1316000	9962000	745.75	7203000	84539000
725.75	1514000	12794000	747.75	8353000	1E+08
727.75	1724000	16032000	749.75	9533000	1.18E+08

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Quadro – Relação CAV reservatório de Pedro Moura Jr

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
581	7345	9060.14	592	2037498	8003539
582	32250	24356.22	594	2543621	12562276
584	155653	195046.5	596	3166638	18259813
586	385813	733281.3	598	3878994	25273933
588	908348	1979102	599	4241436	29335997
590	1527815	4400364	-	-	-

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Quadro – Relação CAV reservatório de Bituri

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
76	0	0	89	1187900	4969900
77	3100	1550	90	1219250	6173475
78	6850	6525	91	1352800	7459500
79	15350	17625	92	1528000	8899900
80	47200	48900	93	1805000	10566400
81	79250	112125	94	2000500	12469150
82	137300	220400	95	2150000	14544400
83	226600	402350	96	2350500	16794650
84	375150	703225	97	2556600	19248200
85	695300	1238450	98	2800950	21926975
86	813250	1992725	99	3003750	24829325
87	921750	2860225	100	3204500	27933450
88	1054850	3848525	-	-	-

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Quadro – Relação CAV reservatório do Prata

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
373	0	0	387.5	2783250	13664500
375	54500	54500	390	4049500	22205438
377.5	263000	451375	392.5	6071625	34856844
380	687250	1639188	395	8020500	52472000
382.5	1142875	3926844	397.5	10464250	75577938
385	1932000	7770438	400	13134000	105075750

Fonte: Adaptado de APAC (2019).

APÊNDICE A – MATRIZ DE OPERAÇÃO POR RESERVATÓRIO

$$+ \Delta Q = 0.21$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Limoeiro) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	0.322	0.328	0.336	0.337	0.336	0.336	0.331	0.331	0.330	0.330	0.332	0.333
2.04E+07	0.1	0.469	0.481	0.492	0.492	0.491	0.491	0.482	0.482	0.481	0.481	0.484	0.487
4.08E+07	0.2	0.764	0.789	0.804	0.804	0.802	0.801	0.786	0.784	0.783	0.781	0.781	0.787
6.12E+07	0.3	1.060	1.087	1.110	1.116	1.113	1.113	1.090	1.086	1.079	1.075	1.076	1.084
8.16E+07	0.4	1.358	1.386	1.417	1.429	1.425	1.424	1.390	1.382	1.374	1.371	1.372	1.381
1.02E+08	0.5	1.656	1.686	1.724	1.742	1.737	1.731	1.688	1.679	1.671	1.667	1.668	1.680
1.22E+08	0.6	1.955	1.987	2.032	2.055	2.049	2.031	1.987	1.977	1.968	1.964	1.966	1.979
1.43E+08	0.7	2.254	2.288	2.340	2.368	2.362	2.332	2.287	2.276	2.265	2.262	2.264	2.279
1.63E+08	0.8	2.554	2.589	2.649	2.682	2.674	2.633	2.587	2.575	2.563	2.560	2.563	2.579
1.84E+08	0.9	2.854	2.891	2.958	2.985	2.987	2.934	2.887	2.874	2.862	2.858	2.862	2.879
2.04E+08	1	3.155	3.193	3.266	3.288	3.299	3.236	3.187	3.173	3.160	3.157	3.161	3.180

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.48$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Limoeiro) - 2011

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	0.597	0.603	0.611	0.619	0.626	0.634	0.643	0.651	0.662	0.672	0.672	0.687
2.04E+07	0.1	0.744	0.756	0.772	0.789	0.805	0.821	0.839	0.857	0.878	0.859	0.872	0.901
4.08E+07	0.2	1.039	1.064	1.080	1.112	1.142	1.166	1.170	1.198	1.229	1.227	1.261	1.313
6.12E+07	0.3	1.335	1.362	1.385	1.433	1.463	1.464	1.469	1.509	1.554	1.584	1.628	1.637
8.16E+07	0.4	1.633	1.661	1.692	1.748	1.763	1.762	1.769	1.821	1.880	1.925	1.928	1.940
1.02E+08	0.5	1.931	1.961	1.999	2.049	2.063	2.061	2.069	2.135	2.207	2.225	2.229	2.243
1.22E+08	0.6	2.230	2.262	2.307	2.351	2.365	2.361	2.371	2.449	2.535	2.525	2.531	2.546
1.43E+08	0.7	2.529	2.563	2.615	2.654	2.666	2.661	2.673	2.763	2.864	2.826	2.833	2.851
1.63E+08	0.8	2.829	2.864	2.924	2.957	2.969	2.962	2.975	3.078	3.193	3.127	3.136	3.155
1.84E+08	0.9	3.129	3.166	3.233	3.260	3.271	3.263	3.278	3.394	3.522	3.429	3.439	3.460
2.04E+08	1	3.430	3.468	3.541	3.563	3.574	3.565	3.581	3.709	3.852	3.731	3.742	3.765

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 1.35$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Limoeiro) - 1996

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	1.997	2.122	2.182	2.026	1.796	1.819	1.821	1.714	1.684	1.560	1.555	1.566
2.04E+07	0.1	2.323	2.404	2.486	2.355	1.969	2.002	2.031	1.912	1.893	1.780	1.792	1.822
4.08E+07	0.2	2.841	2.967	3.095	3.014	2.316	2.367	2.413	2.310	2.313	2.222	2.268	2.334
6.12E+07	0.3	3.360	3.393	3.482	3.588	2.662	2.708	2.761	2.685	2.705	2.646	2.712	2.662
8.16E+07	0.4	3.686	3.701	3.805	3.929	2.970	3.028	3.093	3.028	3.065	3.023	3.072	2.970
1.02E+08	0.5	3.991	4.010	4.129	4.270	3.279	3.348	3.425	3.373	3.425	3.401	3.375	3.279
1.22E+08	0.6	4.297	4.319	4.454	4.612	3.588	3.668	3.758	3.718	3.787	3.771	3.677	3.655
1.43E+08	0.7	4.603	4.629	4.778	4.954	3.897	3.989	4.091	4.063	4.149	4.073	3.981	3.960
1.63E+08	0.8	4.909	4.939	5.087	4.980	4.207	4.309	4.424	4.409	4.511	4.375	4.284	3.655
1.84E+08	0.9	5.216	5.199	5.087	4.980	4.516	4.630	4.757	4.755	4.873	4.677	4.588	4.571
2.04E+08	1	5.406	5.199	5.087	4.980	4.826	4.951	5.091	5.101	5.180	4.980	4.892	4.876

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.28$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Toritama) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	0.399	0.398	0.397	0.396	0.396	0.396	0.397	0.397	0.401	0.401	0.401	0.402
2.04E+07	0.1	0.547	0.545	0.544	0.542	0.542	0.542	0.544	0.545	0.550	0.551	0.552	0.552
4.08E+07	0.2	0.843	0.840	0.838	0.835	0.835	0.836	0.839	0.841	0.850	0.853	0.853	0.854
6.12E+07	0.3	1.141	1.137	1.133	1.129	1.129	1.131	1.136	1.139	1.151	1.155	1.155	1.156
8.16E+07	0.4	1.440	1.434	1.429	1.425	1.424	1.427	1.434	1.438	1.452	1.457	1.458	1.459
1.02E+08	0.5	1.739	1.732	1.726	1.721	1.720	1.723	1.732	1.737	1.755	1.761	1.762	1.763
1.22E+08	0.6	2.039	2.031	2.024	2.018	2.017	2.021	2.031	2.037	2.058	2.065	2.066	2.067
1.43E+08	0.7	2.340	2.330	2.322	2.316	2.315	2.319	2.331	2.338	2.361	2.369	2.371	2.372
1.63E+08	0.8	2.641	2.630	2.621	2.614	2.613	2.618	2.631	2.639	2.665	2.674	2.676	2.677
1.84E+08	0.9	2.942	2.930	2.920	2.912	2.911	2.916	2.931	2.941	2.969	2.979	2.981	2.982
2.04E+08	1	3.244	3.231	3.220	3.211	3.210	3.215	3.232	3.243	3.273	3.284	3.286	3.288

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.60$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Toritama) - 2011

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	0.740	0.744	0.750	0.759	0.769	0.783	0.799	0.717	0.725	0.733	0.741	0.749
2.04E+07	0.1	0.912	0.921	0.936	0.955	0.977	0.998	0.999	0.865	0.881	0.897	0.915	0.931
4.08E+07	0.2	1.255	1.277	1.309	1.348	1.319	1.297	1.301	1.161	1.194	1.226	1.262	1.296
6.12E+07	0.3	1.600	1.634	1.684	1.686	1.618	1.598	1.603	1.459	1.508	1.556	1.610	1.661
8.16E+07	0.4	1.945	1.992	2.059	1.987	1.918	1.925	1.907	1.758	1.823	1.887	1.959	2.028
1.02E+08	0.5	2.291	2.350	2.435	2.289	2.218	2.202	2.211	2.057	2.138	2.218	2.302	2.370
1.22E+08	0.6	2.637	2.710	2.795	2.592	2.520	2.505	2.516	2.357	2.455	2.550	2.621	2.701
1.43E+08	0.7	2.983	3.070	3.099	2.895	2.821	2.808	2.821	2.658	2.772	2.865	2.939	3.033
1.63E+08	0.8	3.330	3.430	3.403	3.198	3.124	3.112	3.126	2.959	3.089	3.174	3.258	3.365
1.84E+08	0.9	3.678	3.754	3.707	3.501	3.426	3.416	3.432	3.261	3.407	3.483	3.577	3.677
2.04E+08	1	4.025	4.055	3.983	3.805	3.729	3.720	3.737	3.563	3.724	3.792	3.897	3.978

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 1$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Jucazinho (Toritama) - 1996

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.02E+07	0.05	1.140	1.144	1.150	1.159	1.169	1.183	1.199	1.257	1.268	1.267	1.275	1.286
2.04E+07	0.1	1.312	1.321	1.336	1.355	1.377	1.398	1.399	1.419	1.421	1.420	1.433	1.450
4.08E+07	0.2	1.655	1.677	1.709	1.748	1.719	1.697	1.701	1.723	1.726	1.726	1.750	1.779
6.12E+07	0.3	2.000	2.034	2.084	2.086	2.018	1.998	2.003	2.028	2.033	2.033	2.067	2.109
8.16E+07	0.4	2.345	2.392	2.459	2.387	2.318	2.300	2.307	2.333	2.340	2.340	2.384	2.439
1.02E+08	0.5	2.691	2.750	2.835	2.689	2.618	2.602	3.221	2.639	2.648	2.648	2.702	2.770
1.22E+08	0.6	3.037	3.110	3.195	2.992	2.920	2.905	2.916	2.945	2.955	2.956	3.021	3.101
1.43E+08	0.7	3.383	3.470	3.499	3.295	3.221	3.208	3.221	3.252	3.264	3.265	3.339	3.433
1.63E+08	0.8	3.730	3.830	3.803	3.598	3.524	3.512	3.526	3.559	3.572	3.574	3.658	3.765
1.84E+08	0.9	4.078	4.190	4.107	3.901	3.826	3.816	3.832	3.866	3.881	3.883	3.977	4.091
2.04E+08	1	4.425	4.545	1.150	4.205	4.129	4.120	4.137	4.173	4.190	4.192	4.297	4.378

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.01$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Poço Fundo (Toritama) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.39E+06	0.05	0.019	0.020	0.021	0.021	0.021	0.020	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
2.78E+06	0.1	0.031	0.034	0.035	0.035	0.035	0.033	0.032	0.032	0.031	0.031	0.031	0.032
5.56E+06	0.2	0.058	0.063	0.064	0.064	0.065	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056	0.057	0.058
8.34E+06	0.3	0.085	0.093	0.094	0.094	0.095	0.087	0.085	0.083	0.082	0.082	0.083	0.085
1.11E+07	0.4	0.112	0.123	0.124	0.125	0.125	0.115	0.113	0.111	0.109	0.109	0.110	0.113
1.39E+07	0.5	0.141	0.154	0.156	0.156	0.156	0.144	0.141	0.138	0.136	0.136	0.138	0.142
1.67E+07	0.6	0.170	0.185	0.187	0.188	0.188	0.174	0.170	0.167	0.165	0.194	0.167	0.172
1.95E+07	0.7	0.200	0.217	0.220	0.220	0.220	0.204	0.200	0.196	0.194	0.174	0.196	0.202
2.22E+07	0.8	0.230	0.250	0.252	0.253	0.253	0.235	0.230	0.226	0.223	0.223	0.226	0.233
2.50E+07	0.9	0.232	0.252	0.255	0.255	0.255	0.238	0.232	0.228	0.225	0.226	0.228	0.235
2.78E+07	1	0.206	0.223	0.226	0.226	0.227	0.210	0.206	0.202	0.199	0.199	0.202	0.208

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.03$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Poço Fundo (Toritama) - 2011

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.39E+06	0.05	0.039	0.040	0.042	0.043	0.044	0.043	0.042	0.043	0.043	0.045	0.047	0.050
2.78E+06	0.1	0.051	0.054	0.057	0.060	0.062	0.061	0.060	0.060	0.062	0.065	0.069	0.075
5.56E+06	0.2	0.078	0.083	0.089	0.095	0.098	0.096	0.094	0.096	0.100	0.105	0.105	0.106
8.34E+06	0.3	0.105	0.113	0.122	0.130	0.136	0.133	0.130	0.133	0.138	0.135	0.134	0.137
1.11E+07	0.4	0.132	0.144	0.155	0.166	0.174	0.169	0.167	0.171	0.177	0.165	0.165	0.168
1.39E+07	0.5	0.161	0.175	0.189	0.203	0.213	0.207	0.204	0.209	0.208	0.195	0.196	0.200
1.67E+07	0.6	0.190	0.207	0.223	0.240	0.252	0.245	0.242	0.248	0.239	0.226	0.227	0.233
1.95E+07	0.7	0.220	0.239	0.259	0.278	0.292	0.283	0.280	0.289	0.271	0.257	0.259	0.266
2.22E+07	0.8	0.250	0.273	0.295	0.317	0.325	0.322	0.319	0.328	0.304	0.289	0.292	0.300
2.50E+07	0.9	0.252	0.275	0.297	0.319	0.325	0.325	0.322	0.328	0.306	0.291	0.295	0.302
2.78E+07	1	0.226	0.246	0.266	0.285	0.300	0.290	0.288	0.296	0.277	0.263	0.266	0.272

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.09$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Poço Fundo (Toritama) - 1996

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
--------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

5.87E+06	0.2	0.041	0.041	0.042	0.042	0.042	0.041	0.041	0.040	0.040	0.040	0.040	0.041
8.80E+06	0.3	0.079	0.080	0.081	0.081	0.081	0.080	0.079	0.078	0.077	0.077	0.078	0.079
1.17E+07	0.4	0.118	0.119	0.120	0.121	0.120	0.119	0.117	0.116	0.115	0.115	0.116	0.117
1.47E+07	0.5	0.157	0.158	0.160	0.160	0.160	0.158	0.156	0.154	0.153	0.153	0.154	0.156
1.76E+07	0.6	0.195	0.197	0.200	0.200	0.199	0.197	0.195	0.192	0.191	0.191	0.193	0.195
2.05E+07	0.7	0.234	0.236	0.240	0.240	0.239	0.237	0.234	0.231	0.229	0.230	0.231	0.234
2.35E+07	0.8	0.274	0.276	0.280	0.280	0.279	0.276	0.273	0.270	0.268	0.268	0.270	0.273
2.64E+07	0.9	0.313	0.316	0.320	0.320	0.319	0.316	0.312	0.309	0.306	0.307	0.309	0.313
2.93E+07	1	0.342	0.344	0.349	0.350	0.348	0.344	0.340	0.337	0.335	0.336	0.339	0.342

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.01$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Pão de Açúcar (Caruaru) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.71E+06	0.05	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
3.42E+06	0.1	0.028	0.029	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
6.85E+06	0.2	0.078	0.078	0.076	0.076	0.075	0.075	0.075	0.074	0.074	0.074	0.074	0.075
1.03E+07	0.3	0.127	0.127	0.123	0.124	0.123	0.123	0.122	0.121	0.121	0.121	0.121	0.122
1.37E+07	0.4	0.176	0.177	0.172	0.172	0.171	0.170	0.169	0.168	0.168	0.168	0.168	0.169
1.71E+07	0.5	0.225	0.226	0.220	0.220	0.219	0.218	0.217	0.215	0.214	0.215	0.215	0.217
2.05E+07	0.6	0.274	0.276	0.268	0.268	0.268	0.266	0.264	0.263	0.261	0.262	0.263	0.264
2.40E+07	0.7	0.324	0.325	0.316	0.316	0.316	0.314	0.312	0.310	0.309	0.309	0.310	0.312
2.74E+07	0.8	0.373	0.375	0.364	0.365	0.364	0.362	0.360	0.357	0.356	0.356	0.357	0.359
3.08E+07	0.9	0.422	0.424	0.413	0.413	0.412	0.410	0.407	0.405	0.403	0.403	0.405	0.407
3.42E+07	1	0.347	0.349	0.339	0.340	0.339	0.337	0.335	0.333	0.331	0.332	0.333	0.335

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.01$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Pão de Açúcar (Caruaru) - 2011

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.71E+06	0.05	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
3.42E+06	0.1	0.029	0.029	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
6.85E+06	0.2	0.078	0.078	0.076	0.076	0.075	0.075	0.075	0.074	0.074	0.074	0.074	0.075
1.03E+07	0.3	0.127	0.127	0.124	0.124	0.123	0.123	0.122	0.121	0.121	0.121	0.121	0.122
1.37E+07	0.4	0.176	0.177	0.172	0.172	0.171	0.170	0.169	0.168	0.168	0.168	0.168	0.169
1.71E+07	0.5	0.225	0.226	0.220	0.220	0.219	0.218	0.217	0.215	0.214	0.215	0.216	0.217
2.05E+07	0.6	0.274	0.276	0.364	0.268	0.268	0.266	0.264	0.263	0.262	0.262	0.263	0.264
2.40E+07	0.7	0.324	0.325	0.413	0.316	0.316	0.314	0.312	0.310	0.309	0.309	0.310	0.312
2.74E+07	0.8	0.373	0.375	0.364	0.365	0.364	0.362	0.360	0.357	0.356	0.356	0.357	0.360
3.08E+07	0.9	0.422	0.424	0.413	0.413	0.412	0.410	0.407	0.405	0.403	0.403	0.405	0.407
3.42E+07	1	0.347	0.349	0.339	0.340	0.339	0.337	0.335	0.333	0.331	0.332	0.333	0.335

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.04$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Pão de Açúcar (Caruaru) - 1996

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.71E+06	0.05	0.041	0.041	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
3.42E+06	0.1	0.066	0.066	0.068	0.068	0.068	0.068	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067
6.85E+06	0.2	0.116	0.117	0.119	0.120	0.119	0.119	0.118	0.118	0.117	0.117	0.118	0.118

1.03E+07	0.3	0.166	0.167	0.171	0.171	0.171	0.170	0.169	0.168	0.168	0.168	0.169	0.169
1.37E+07	0.4	0.217	0.218	0.223	0.223	0.223	0.222	0.220	0.219	0.218	0.218	0.219	0.220
1.71E+07	0.5	0.267	0.268	0.275	0.275	0.274	0.273	0.272	0.270	0.269	0.269	0.270	0.271
2.05E+07	0.6	0.317	0.319	0.326	0.327	0.326	0.325	0.323	0.321	0.320	0.320	0.321	0.323
2.40E+07	0.7	0.368	0.369	0.378	0.379	0.378	0.376	0.374	0.372	0.370	0.370	0.372	0.374
2.74E+07	0.8	0.418	0.420	0.430	0.431	0.430	0.428	0.425	0.422	0.421	0.421	0.423	0.425
3.08E+07	0.9	0.469	0.471	0.482	0.483	0.482	0.479	0.476	0.473	0.471	0.472	0.474	0.476
3.42E+07	1	0.392	0.394	0.404	0.404	0.403	0.401	0.399	0.396	0.395	0.395	0.395	0.399

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.009$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Pão de Açúcar (Sanharó) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.71E+06	0.05	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
3.42E+06	0.1	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029
6.85E+06	0.2	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
1.03E+07	0.3	0.126	0.127	0.128	0.128	0.128	0.127	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126
1.37E+07	0.4	0.175	0.176	0.177	0.178	0.177	0.176	0.175	0.174	0.173	0.173	0.174	0.175
1.71E+07	0.5	0.224	0.225	0.227	0.227	0.227	0.226	0.224	0.223	0.222	0.222	0.223	0.224
2.05E+07	0.6	0.273	0.275	0.277	0.277	0.276	0.275	0.273	0.271	0.270	0.270	0.272	0.273
2.40E+07	0.7	0.322	0.324	0.326	0.327	0.326	0.324	0.322	0.320	0.319	0.319	0.320	0.322
2.74E+07	0.8	0.372	0.373	0.376	0.377	0.376	0.374	0.371	0.369	0.367	0.367	0.369	0.371
3.08E+07	0.9	0.421	0.423	0.426	0.427	0.426	0.423	0.420	0.418	0.416	0.416	0.418	0.420
3.42E+07	1	0.346	0.348	0.351	0.351	0.350	0.348	0.346	0.344	0.342	0.343	0.344	0.346

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.009$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Pão de Açúcar (Sanharó) - 2011

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.71E+06	0.05	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
3.42E+06	0.1	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029
6.85E+06	0.2	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
1.03E+07	0.3	0.126	0.127	0.128	0.128	0.128	0.127	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126
1.37E+07	0.4	0.175	0.176	0.177	0.178	0.177	0.176	0.175	0.174	0.173	0.173	0.174	0.175
1.71E+07	0.5	0.224	0.225	0.227	0.227	0.227	0.226	0.224	0.223	0.222	0.222	0.223	0.224
2.05E+07	0.6	0.273	0.275	0.277	0.277	0.276	0.275	0.273	0.271	0.270	0.270	0.272	0.273
2.40E+07	0.7	0.322	0.324	0.326	0.327	0.326	0.324	0.322	0.320	0.319	0.319	0.320	0.322
2.74E+07	0.8	0.372	0.373	0.376	0.377	0.376	0.374	0.371	0.369	0.367	0.367	0.369	0.371
3.08E+07	0.9	0.421	0.423	0.426	0.427	0.426	0.423	0.420	0.418	0.416	0.416	0.418	0.420
3.42E+07	1	0.346	0.348	0.351	0.351	0.350	0.348	0.346	0.344	0.342	0.343	0.344	0.346

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.009$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Pão de Açúcar (Sanharó) - 1996

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.71E+06	0.05	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
3.42E+06	0.1	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029
6.85E+06	0.2	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.078	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
1.03E+07	0.3	0.126	0.127	0.128	0.128	0.128	0.127	0.126	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126

1.37E+07	0.4	0.175	0.176	0.177	0.178	0.177	0.176	0.175	0.174	0.173	0.173	0.174	0.175
1.71E+07	0.5	0.224	0.225	0.227	0.227	0.227	0.226	0.224	0.223	0.222	0.222	0.223	0.224
2.05E+07	0.6	0.273	0.275	0.277	0.277	0.276	0.275	0.273	0.271	0.270	0.270	0.272	0.273
2.40E+07	0.7	0.322	0.324	0.326	0.327	0.326	0.324	0.322	0.320	0.319	0.319	0.320	0.322
2.74E+07	0.8	0.372	0.373	0.376	0.377	0.376	0.374	0.371	0.369	0.367	0.367	0.369	0.371
3.08E+07	0.9	0.421	0.423	0.426	0.427	0.426	0.423	0.420	0.418	0.416	0.416	0.418	0.420
3.42E+07	1	0.346	0.348	0.351	0.351	0.350	0.348	0.346	0.344	0.342	0.343	0.344	0.346

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.001$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Bituri (Caruaru) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
8.89E+05	0.05	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004
1.78E+06	0.1	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
3.56E+06	0.2	0.031	0.031	0.032	0.033	0.033	0.033	0.033	0.034	0.033	0.033	0.034	0.034
5.33E+06	0.3	0.051	0.052	0.053	0.054	0.054	0.053	0.053	0.055	0.054	0.054	0.055	0.056
7.11E+06	0.4	0.072	0.073	0.075	0.075	0.075	0.074	0.075	0.076	0.076	0.076	0.078	0.078
8.89E+06	0.5	0.094	0.096	0.097	0.098	0.098	0.097	0.097	0.098	0.099	0.099	0.101	0.102
1.07E+07	0.6	0.117	0.119	0.121	0.122	0.121	0.120	0.120	0.121	0.123	0.123	0.124	0.126
1.24E+07	0.7	0.141	0.143	0.144	0.146	0.145	0.143	0.144	0.144	0.147	0.147	0.149	0.150
1.42E+07	0.8	0.165	0.167	0.169	0.170	0.170	0.167	0.168	0.168	0.171	0.171	0.173	0.174
1.60E+07	0.9	0.189	0.191	0.193	0.194	0.194	0.192	0.192	0.192	0.195	0.195	0.198	0.199
1.78E+07	1	0.213	0.216	0.218	0.219	0.218	0.216	0.216	0.192	0.220	0.220	0.222	0.224

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.001$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Bituri (Caruaru) - 2011

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
8.89E+05	0.05	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004
1.78E+06	0.1	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
3.56E+06	0.2	0.031	0.031	0.032	0.033	0.033	0.033	0.033	0.034	0.033	0.033	0.034	0.034
5.33E+06	0.3	0.051	0.052	0.053	0.054	0.054	0.053	0.053	0.055	0.054	0.054	0.055	0.056
7.11E+06	0.4	0.072	0.073	0.075	0.075	0.075	0.074	0.075	0.076	0.076	0.076	0.078	0.078
8.89E+06	0.5	0.094	0.096	0.097	0.098	0.098	0.097	0.097	0.098	0.099	0.099	0.101	0.102
1.07E+07	0.6	0.117	0.119	0.121	0.122	0.121	0.120	0.120	0.121	0.123	0.123	0.124	0.126
1.24E+07	0.7	0.141	0.143	0.144	0.146	0.145	0.143	0.144	0.144	0.147	0.147	0.149	0.150
1.42E+07	0.8	0.165	0.167	0.169	0.170	0.170	0.167	0.168	0.168	0.171	0.171	0.173	0.174
1.60E+07	0.9	0.189	0.191	0.193	0.194	0.194	0.192	0.192	0.192	0.195	0.195	0.198	0.199
1.78E+07	1	0.213	0.216	0.218	0.219	0.218	0.216	0.216	0.216	0.220	0.220	0.222	0.224

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.008$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Bituri (Caruaru) - 1996

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
8.89E+05	0.05	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
1.78E+06	0.1	0.027	0.028	0.028	0.028	0.028	0.026	0.024	0.024	0.024	0.023	0.023	0.024
3.56E+06	0.2	0.051	0.052	0.052	0.052	0.052	0.049	0.045	0.044	0.044	0.042	0.043	0.045
5.33E+06	0.3	0.075	0.076	0.076	0.077	0.074	0.073	0.067	0.066	0.065	0.063	0.065	0.067
7.11E+06	0.4	0.098	0.099	0.099	0.102	0.098	0.097	0.091	0.089	0.088	0.086	0.088	0.090

8.89E+06	0.5	0.122	0.123	0.123	0.126	0.122	0.121	0.115	0.112	0.111	0.109	0.112	0.114
1.07E+07	0.6	0.146	0.147	0.147	0.151	0.147	0.146	0.139	0.136	0.135	0.133	0.136	0.139
1.24E+07	0.7	0.171	0.172	0.172	0.176	0.172	0.171	0.164	0.161	0.159	0.157	0.161	0.164
1.42E+07	0.8	0.195	0.197	0.197	0.201	0.197	0.196	0.189	0.186	0.184	0.182	0.186	0.189
1.60E+07	0.9	0.220	0.223	0.222	0.227	0.222	0.222	0.214	0.211	0.209	0.207	0.211	0.214
1.78E+07	1	0.246	0.248	0.248	0.252	0.248	0.248	0.239	0.236	0.234	0.231	0.236	0.239

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.001$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Bituri (Sanharó) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
8.89E+05	0.05	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
1.78E+06	0.1	0.015	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
3.56E+06	0.2	0.035	0.036	0.036	0.036	0.035	0.033	0.032	0.032	0.031	0.031	0.031	0.032
5.33E+06	0.3	0.056	0.057	0.057	0.057	0.057	0.054	0.052	0.052	0.051	0.051	0.051	0.052
7.11E+06	0.4	0.078	0.080	0.079	0.079	0.079	0.075	0.074	0.073	0.072	0.072	0.072	0.074
8.89E+06	0.5	0.101	0.103	0.102	0.102	0.102	0.097	0.096	0.095	0.094	0.094	0.095	0.096
1.07E+07	0.6	0.124	0.126	0.126	0.126	0.126	0.121	0.119	0.118	0.116	0.117	0.118	0.119
1.24E+07	0.7	0.148	0.150	0.150	0.150	0.150	0.144	0.142	0.141	0.140	0.140	0.141	0.143
1.42E+07	0.8	0.172	0.175	0.174	0.175	0.175	0.168	0.166	0.165	0.163	0.164	0.165	0.167
1.60E+07	0.9	0.196	0.199	0.199	0.200	0.199	0.193	0.190	0.189	0.187	0.187	0.189	0.191
1.78E+07	1	0.221	0.223	0.224	0.225	0.224	0.217	0.215	0.213	0.211	0.211	0.213	0.215

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.001$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Bituri (Sanharó) - 2016

Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
8.89E+05	0.05	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005
1.78E+06	0.1	0.015	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.015
3.56E+06	0.2	0.035	0.036	0.036	0.037	0.035	0.034	0.032	0.032	0.033	0.033	0.034	0.035
5.33E+06	0.3	0.057	0.059	0.059	0.059	0.057	0.055	0.052	0.052	0.054	0.054	0.055	0.057
7.11E+06	0.4	0.079	0.081	0.082	0.082	0.079	0.078	0.074	0.074	0.076	0.076	0.078	0.079
8.89E+06	0.5	0.102	0.103	0.104	0.104	0.103	0.101	0.096	0.096	0.099	0.098	0.101	0.103
1.07E+07	0.6	0.125	0.127	0.128	0.128	0.127	0.124	0.119	0.120	0.122	0.122	0.125	0.127
1.24E+07	0.7	0.148	0.150	0.152	0.152	0.151	0.148	0.143	0.144	0.145	0.146	0.149	0.151
1.42E+07	0.8	0.172	0.174	0.176	0.176	0.175	0.172	0.167	0.168	0.169	0.170	0.173	0.176
1.60E+07	0.9	0.196	0.199	0.200	0.201	0.199	0.197	0.191	0.192	0.193	0.195	0.198	0.201
1.78E+07	1	0.221	0.223	0.225	0.225	0.224	0.221	0.215	0.217	0.217	0.219	0.223	0.226

Fonte: A autora, 2019.

$$+ \Delta Q = 0.001$$

Tabela – Vazão máxima de captação para o reservatório de Bituri (Sanharó) - 1996

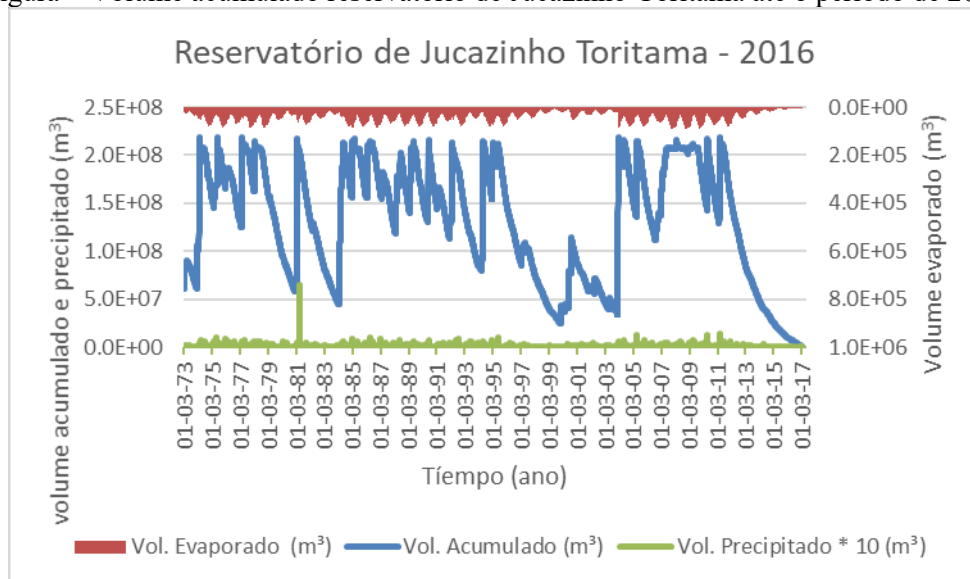
Volume	%	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
8.89E+05	0.05	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005
1.78E+06	0.1	0.015	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014
3.56E+06	0.2	0.035	0.036	0.036	0.037	0.035	0.034	0.032	0.032	0.033	0.033	0.034	0.035
5.33E+06	0.3	0.057	0.058	0.058	0.059	0.057	0.055	0.052	0.052	0.054	0.054	0.055	0.056
7.11E+06	0.4	0.080	0.082	0.082	0.082	0.079	0.078	0.073	0.074	0.076	0.075	0.077	0.079
8.89E+06	0.5	0.104	0.105	0.105	0.106	0.103	0.101	0.096	0.096	0.099	0.098	0.101	0.103

1.07E+07	0.6	0.128	0.130	0.130	0.130	0.127	0.124	0.119	0.120	0.122	0.122	0.124	0.127
1.24E+07	0.7	0.152	0.154	0.154	0.155	0.151	0.148	0.143	0.144	0.145	0.146	0.149	0.151
1.42E+07	0.8	0.177	0.179	0.179	0.180	0.176	0.173	0.167	0.168	0.169	0.170	0.173	0.176
1.60E+07	0.9	0.202	0.204	0.204	0.205	0.201	0.198	0.191	0.192	0.193	0.194	0.198	0.201
1.78E+07	1	0.227	0.230	0.230	0.230	0.226	0.222	0.215	0.216	0.217	0.219	0.223	0.226

Fonte: A autora, 2019.

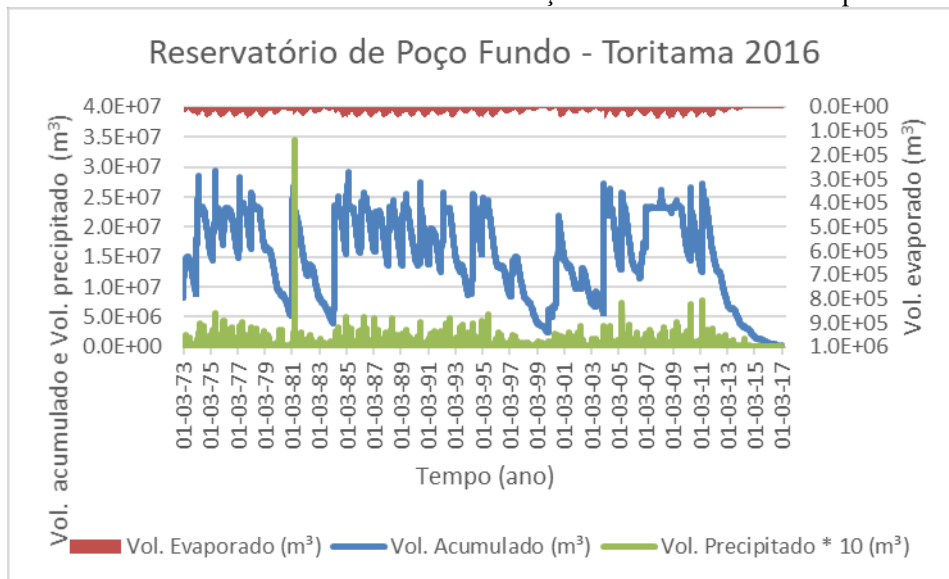
APÊNDICE B – VOLUME ACUMULADO

Figura – Volume acumulado reservatório de Jucazinho-Toritama até o período de 2016



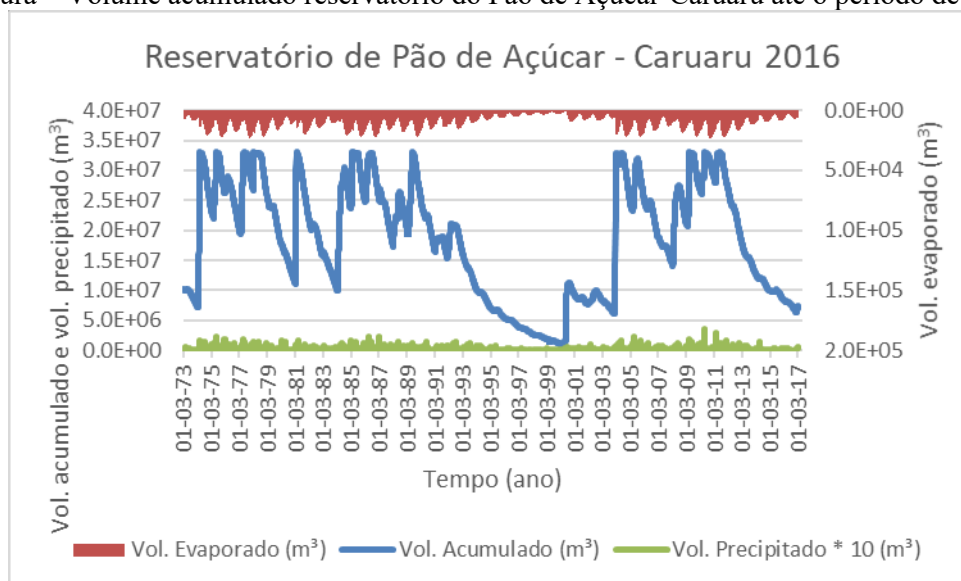
Fonte: A autora, 2019.

Figura – Volume acumulado reservatório do Poço Fundo-Toritama até o período de 2016



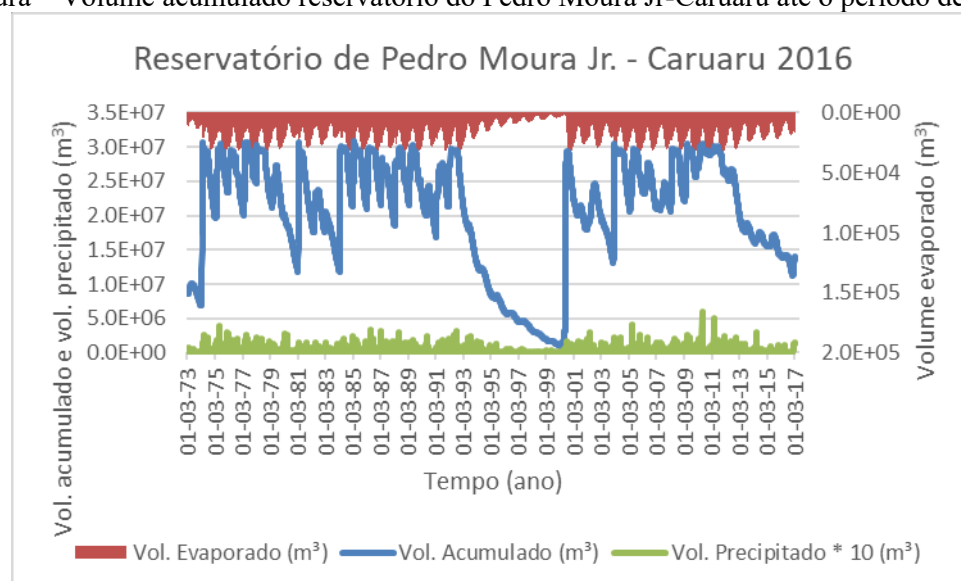
Fonte: A autora, 2019.

Figura – Volume acumulado reservatório do Pão de Açúcar-Caruaru até o período de 2016



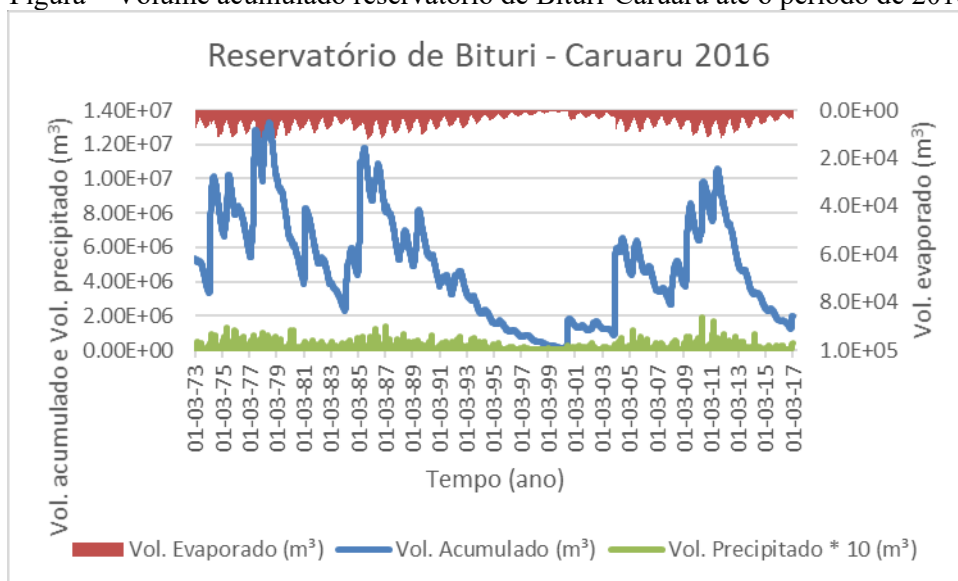
Fonte: A autora, 2019.

Figura – Volume acumulado reservatório do Pedro Moura Jr-Caruaru até o período de 2016



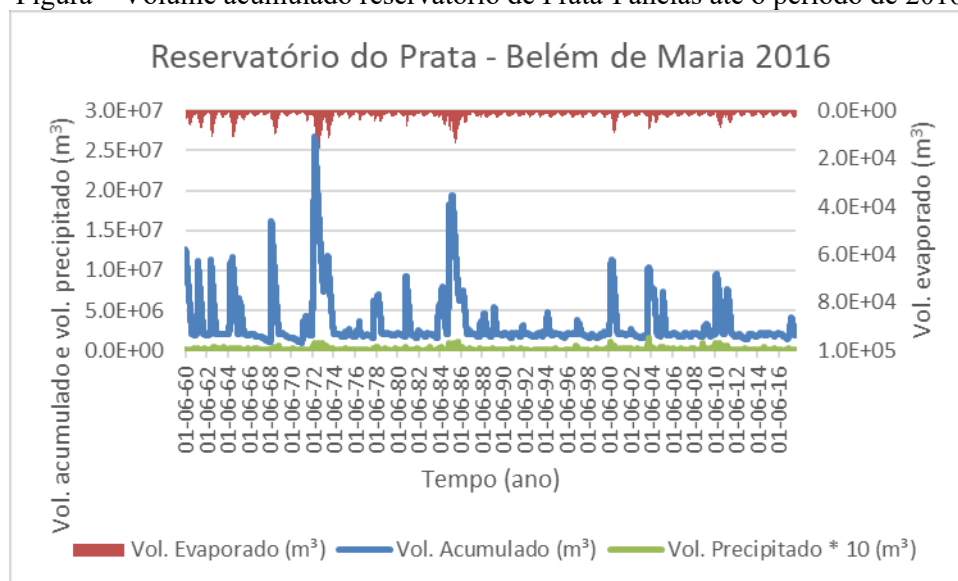
Fonte: A autora, 2019.

Figura – Volume acumulado reservatório de Bituri-Caruaru até o período de 2016



Fonte: A autora, 2019.

Figura – Volume acumulado reservatório de Prata-Panelas até o período de 2016



Fonte: A autora, 2019.