UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIENCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

RONNER BRAGA GONDIM

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO REÚSO DE ÁGUAS NA ALOCAÇÃO HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS DA BACIA DO RIO ACARAÚ, CEARÁ

FORTALEZA
2018

RONNER BRAGA GONDIM

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO REÚSO DE ÁGUAS NA ALOCAÇÃO HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS DA BACIA DO RIO ACARAÚ, CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Conservação de Água e Solo no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G635a Gondim, Ronner Braga.
Avaliação do impacto do reúso de águas na alocação hídrica dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, Ceará / Ronner Braga Gondim. – 2018.
146 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.
Coorientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

1. Escassez hídrica. 2. modelos hidrológicos. 3. Alocação de água. 4. Reúso de água. 5. Bacia do rio Acaraú. I. Título.

CDD 630

RONNER BRAGA GONDIM

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO REÚSO DE ÁGUAS NA ALOCAÇÃO HÍDRICA DOS RESERVATÓRIOS ESTRATÉGICOS DA BACIA DO RIO ACARAÚ, CEARÁ.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Conservação de Água e Solo no Semiárido.

Aprovada em: 26/06/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Guillermo Gamarra Rojas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Méllo Júnior
Universidade de São Paulo (USP)

Dedico esse trabalho a minha esposa e filha
pelo amor, apoio e atenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força e saúde para realizar este trabalho, e a minha esposa Amanda e filha Luísa por terem me apoiado em todos os momentos por terem sido tão compreensivas com minha falta de tempo. Também aos meus pais por terem dado todo o suporte para que eu vencesse meus desafios profissionais.

Aos meus orientadores e amigos, Prof. José Carlos Araújo e Carlos Alexandre Gomes Costa, agradeço profundamente o apoio e a orientação valiosa, e também aos amigos da UFC que tornaram o ambiente acadêmico mais familiar. Obrigado ao Grupo HIDROSED pelas sugestões que me ajudaram a refinar o trabalho.

Meus agradecimentos aos amigos da Cagece, especialmente ao José Carlos Asfor, Raul Tigre, Raquel Almeida, Ana Karolina Machado, Lara Campana, Narcélio Filho e Silvano Pereira. Todos, de alguma forma, foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão da pesquisa.

Agradeço ainda a participação vital da FUNCEME e sua equipe de TI no apoio à operacionalização do SIGA, principalmente ao Robson Franklin Vieira Silva, Eduardo Sávio e ao Sergio Vieira.

Sou bastante grato ainda a todo o apoio da COGERH no fornecimento de dados e informações operacionais, na pessoa do Bruno Rebouças, Micaella Rodrigues e Elano Joca.

Ao Prof. Arisvaldo Méllo, meu muito obrigado pela nossa discussão intensiva na USP. Sua participação no início da pesquisa foi fundamental para organizar a estrutura do trabalho.

Agradeço, finalmente, ao PPGEA e seus excelentes professores, ao DENA e CNPq pelo apoio e convivência.

"Não nego meu sangue, não nego meu nome,
Olho para fome e pergunto: o que há?
Eu sou brasileiro filho do Nordeste,
Sou Cabra da Peste, sou do Ceará."

(Patativa do Assaré)

RESUMO

A intensificação da escassez hídrica ameaça bilhões de pessoas em várias partes do mundo obrigando-as a se concentrarem em regiões com maior infraestrutura hídrica, aumentando os impactos antrópicos de seu entorno e a heterogeneidade espacial. Esse movimento tem aumentado o desafio de fornecer água de forma mais eficiente e tem exigido modelos de gestão de recursos hídricos mais sofisticados. A gestão dos reservatórios do semiárido nordestino possui importância estratégica na garantia do abastecimento de água para múltiplos usos. A elevada perda de água por evaporação e infiltração na superfície dos reservatórios e na transposição de água são importantes processos que reduzem a eficiência no suprimento hídrico. Portanto, é imprescindível que os modelos de gestão sejam auxiliados por modelos hidrológicos e de alocação eficientes. Geralmente, o retorno das águas residuárias geradas pelas múltiplas demandas aos corpos hídricos são desconsiderados nos modelos, ou seja, ignora-se o reúso indireto que incrementa as vazões afluentes de reservatórios a jusante. A presença de polos industriais e perímetros irrigados nas bacias cearenses também cria a possibilidade do reúso direto das águas residuárias para fins não potáveis, o que reduziria o consumo de água de superfície e aumentaria o estoque dos reservatórios para o abastecimento humano e dessedentação de animais. O objetivo deste estudo é avaliar o impacto quantitativo do reuso direto e indireto de águas na alocação hídrica dos reservatórios estratégicos da bacia do Rio Acaraú atendendo ao limite de vazão outorgável no Ceará de 90% de Q_{90}. Foram utilizados os Modelos VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*) para quantificação da vazão máxima outorgável; o WASA (*Water Availability in Semi-Arid Environments*) como modelo hidrológico para geração de deflúvio e o SIGA (Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água) como ferramenta de simulação operacional dos reservatórios e de alocação de água. Comparando os resultados dos cenários com e sem reúso de águas, foi possível constatar que a inclusão do reúso direto e indireto resultaram em baixo impacto na garantia dos reservatórios estratégicos, na ordem de 0,2 a 1,7%. Entretanto, a importância do reúso se torna evidente ao analisar o período da seca de 2012-17, com aporte médio entre de 3,3 a 18%, e máximo entre 9,2 e 71,2%, para o reúso indireto. Acrescentando o reúso direto, o aporte médio variou de 9,4 e 18%, e o aporte máximo de 21,7 e 71,2%. O projeto proposto de reúso na região de Sobral possui potencial para atendimento pleno de suas demandas industriais e agrícolas com custo de implantação estimado em R$ 52 milhões e vazão de 265 L/s.

Palavras-chave: Escassez hídrica. Modelos hidrológicos. Alocação de água. Reúso de água. Bacia do rio Acaraú.

ABSTRACT

The intensification of water scarcity threatens billions of people in various parts of the world, forcing them to concentrate in regions with greater water infrastructure, increasing the anthropic impacts of their surroundings and the spatial heterogeneity. This movement has increased the challenge of providing water more efficiently and has required more sophisticated water resource management models. The management of Northeastern semi-arid reservoirs has strategic importance in guaranteeing the water supply for multiple uses. The high loss of water by evaporation and infiltration on the surface of the reservoirs and in the water transposition are important processes that reduce the efficiency of water supply. Therefore, it is imperative that models be supported by efficient hydrological and allocation models. Generally, the return of the wastewater generated by the multiple demands to the water bodies is disregarded in the models, that is, the indirect reuse is ignored, which increases the inflow of downstream reservoirs. The presence of industrial poles and irrigated perimeters in the Ceará basins also creates the possibility of direct reuse of wastewater for non-potable purposes, which would reduce the consumption of surface water and increase the stock of the reservoirs for human and animal supply. The objective of this study is to evaluate the quantitative impact of direct and indirect water reuse on the water allocation of the strategic reservoirs of the Acaraú River basin, taking into account the 90% Q_{90} flow limit in Ceará State. VYELAS (Volume-Yield Elasticity) Model was used to quantify the maximum allowable water flowrate, WASA (Water Availability in Semi-Arid Environments) model as a hydrological model for the runoff generation and SIGA (Information System for Water Allocation Management) as a tool of operational simulation of the reservoirs and water allocation. Comparing the results of the scenarios with and without water reuse, it was possible to verify that, in the majority of cases, the inclusion of direct and indirect reuse resulted in a low impact on the strategic reservoirs reliability, in the range of 0.2 to 1.7%. However, the importance of water reuse becomes evident when analyzing the drought period of 2012-17, with an average contribution of between 3.3 and 18%, and a maximum of between 9.2 and 71.2%, for indirect reuse. Adding the direct reuse, the average contribution varied from 9.4 and 18%, and the maximum contribution of 21.7 and 71.2%. The proposed reuse project in the Sobral region has the potential to fully meet its industrial and agricultural demands with an estimated cost of R$ 52 million and flowrate of 265 L/s.

Keywords: Water scarcity. Hydrological models. Water allocation. Water reuse. Acaraú river basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Delimitação do semiárido brasileiro 21
Figura 2 – Mapa da seca dos anos 2014 a 2017 na Região Nordeste do Brasil 22
Figura 3 – Aporte hídrico dos reservatórios operados pela COGERH 25
Figura 4 – Reúso indireto não planejado 30
Figura 5 – Tipos de problema de otimização 36
Figura 6 – Esquema básico de integração entre modelo de simulação e otimização 39
Figura 7 – Discretização espacial hierarquizada no WASA 47
Figura 8 – Traçado da rede de fluxo no SIGA 49
Figura 9 – Exemplo de gráfico do módulo de resultados do SIGA 54
Figura 10 – Interface de entrada para geração de parâmetros do WASA no SIGA 55
Figura 11 – Fluxograma de discretização hierárquica do WASA no SIGA 56
Figura 12 – Fluxograma metodológico da pesquisa 60
Figura 13 – Localização geográfica da bacia do rio Acaraú 61
Figura 14 – Hidrografia da bacia do rio Acaraú 64
Figura 15 – Temperaturas históricas mínimas, médias e máximas de Acaraú 67
Figura 16 – Temperaturas históricas mínimas, médias e máximas de Sobral 67
Figura 17 – Mapa hidrogeológico e de poços da bacia do rio Acaraú 70
Figura 18 – Classes de vegetação da bacia do rio Acaraú 72
Figura 19 – Estações de tratamento de água e esgoto operadas pela Cagece 75
Figura 20 – Localização das indústrias da bacia do rio Acaraú 80
Figura 21 – Fluxograma hídrico das sub-bacias da bacia do rio Acaraú 81
Figura 22 – SIG da bacia do rio Acaraú 82
Figura 23 – Histograma da densidade de estações utilizadas no polígono de Thiessen 83
Figura 24 – Estações do INMET utilizadas como fonte de dados de evaporação 85
Figura 25 – Número de dados de evaporação por fonte de dados 86
Figura 26 – Curva cota x volume do Açude Ayres de Sousa. 88
Figura 27 – Curva cota x área do Açude Ayres de Sousa. 89
Figura 28 – Rede de fluxo da bacia do rio Acaraú no SIGA 91
Figura 29 – Histograma dos dados de vazão afluente das sub-bacias estudadas 92
Figura 30 – Tela de regras de alocação de água no SIGA 103
Figura 31 – Comportamento do volume dos reservatórios 108
Figura 32 – Comparação entre os volumes observados e calculados 109
Figura 33 – Gráfico de dispersão entre valores observados e calculados 111
Figura 34 – Comportamento das garantias no SIGA e VYELAS 113
Figura 35 – Parcelas de reúso no estoque dos reservatórios para a seca 2012-17 121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estoque hídrico em 31/12/2017 por bacia hidrográfica 26
Tabela 2 – Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais 27
Tabela 3 – Definições da OMS relativas à reúso de águas 29
Tabela 4 – Pesquisas com SSDs no semiárido nordestino 34
Tabela 5 – Modelos de simulação e otimização aplicados a recursos hídricos. 40
Tabela 6 – Parâmetros de entrada do modelo VYELAS 44
Tabela 7 – Principais estudos no semiárido nordestino utilizando o modelo WASA 45
Tabela 8 – Sequência temporal do modelo WASA 48
Tabela 9 – Modelos hidrológicos incorporados ao SIGA 50
Tabela 10 – Dados de entrada do SIGA para o método de simulação 52
Tabela 11 – Resultados obtidos pelo modelo SIGA por tipo de entidade de rede 53
Tabela 12 – Principais dados de entrada do SIGA e suas fontes 59
Tabela 13 – Percentuais em área dos municípios pertencentes à bacia do rio Acaraú. 62
Tabela 14 – População estimada da bacia do rio Acaraú em 2017. 63
Tabela 15 – Característica dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú 65
Tabela 16 – Índices de água e esgoto nos municípios da bacia do rio Acaraú 74
Tabela 17 – Perímetros irrigados federais no Ceará 76
Tabela 18 – Consumo de água por atividade industrial 79
Tabela 19 – Estações meteorológicas utilizadas na pesquisa 84
Tabela 20 –Variáveis usadas no preenchimento de falhas da série de evaporação 87
Tabela 21 – Volumes mínimo, máximo e de partida dos reservatórios 88
Tabela 22 – Parâmetros de entrada dos vertedores 90
Tabela 23 – Dados de entrada do Modelo VYELAS 93
Tabela 24 – Vazões liberadas dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú 94
Tabela 25 – Regras de liberação de água dos reservatórios 95
Tabela 26 – Demandas de abastecimento humano adotadas no estudo 97
Tabela 27 – Demanda de água dos perímetros irrigados da bacia do rio Acaraú 98
Tabela 28 – Vazões de perenização e perda em trânsito da bacia do rio Acaraú 100
Tabela 29 – Demandas difusas dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú 100
Tabela 30 – Reservatórios estratégicos e demandas hídricas da bacia do rio Acaraú 101
Tabela 31 – Ordem de prioridade de fornecimento de água bruta para as demandas 102
Tabela 32 – Vazões máximas outorgáveis determinadas pelo modelo VYELAS 104
Tabela 33 – Alterações de vazões decorrentes da revisão das vazões liberadas 106
Tabela 34 – Vazões e volumes dos reservatórios 107
Tabela 35 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) 110

Tabela 36 – Comparação de garantias calculadas pelo SIGA e VYELAS 112
Tabela 37 – Teste-T Student para as garantias geradas pelo VYELAS e SIGA 114
Tabela 38 – Nível de atendimento das demandas sem reúso 115
Tabela 39 – Projetos propostos de reúso direto não potável 116
Tabela 40 – Garantias do SIGA com suporte do reúso direto e indireto..... 117
Tabela 41 – Nível de atendimento das demandas com reúso direto e indireto 118
Tabela 42 – Parcela de reúso no estoque dos reservatórios - ano 2012-17 119
Tabela 43 – Parâmetros de cálculo da potência instalada das estações elevatórias 125
Tabela 44 – Custo estimado de infraestrutura para reúso na região de Sobral..... 125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará

CAV – Cota-Área-Volume

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos

DIBAU – Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú

DIPAN - Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado Araras Norte

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

NS – Coeficiente Nash-Sutcliffe

PERH – Política Estadual de Recursos Hídricos

PLANERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos

Q_{90} – Vazão com garantia de 90%

SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SIGA - Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água

SSD – Sistema de Suporte à Decisões

VYELAS - *Volume-Yield Elasticity*

WASA - *Water Availability in Semi-arid Environments*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

2 OBJETIVOS 19

2.1 Objetivo geral 19

2.2 Objetivos específicos 19

3 REVISÃO DE LITERATURA 20

3.1 A gestão de recursos hídricos no semiárido nordestino 20

3.1.1 A utilização de reservatórios no estado do Ceará 24

3.1.2 Vazões de referência e de outorga 26

3.1.3 O reúso de águas na gestão dos recursos hídricos 28

3.1.4 As perdas em trânsito no semiárido 31

3.2 Sistemas de suporte à decisão (SSD) aplicados aos recursos hídricos 33

3.2.1 Métodos de otimização aplicados aos recursos hídricos 35

3.2.2 Métodos de simulação aplicados aos recursos hídricos 38

3.2.3 A combinação de otimização e simulação 39

3.3 Modelos adotados na pesquisa 41

3.3.1 VYELAS (Volume-Yield Elasticity) 41

3.3.2 WASA – Water availability in semi-arid environments 44

3.3.3 SIGA - Sistema de informações para gerenciamento da alocação de água 48

3.3.3.1 Módulo Desenho de Rede 49

3.3.3.2 Módulo Hidrologia 50

3.3.3.3 Módulo Calibração 51

3.3.3.4 Módulo Operação 52

3.3.3.5 Módulo Resultados 53

3.3.3.6 Acoplamento do WASA ao SIGA 54

4 MATERIAL E MÉTODOS 57

4.1 Justificativa da escolha da área de estudo 57

4.2 Resumo metodológico 58

4.3 Caracterização da área de estudo 61

4.3.1 Localização 61

4.3.2 População 62

4.3.3 Hidrografia 64

4.3.4 Reservatórios 65

4.3.5 Clima 66

4.3.6 Geologia 68

4.3.7 Hidrogeologia *69*
4.3.8 Vegetação *71*
4.3.9 Relevo *73*
4.3.10 Solos *73*
4.3.11 Serviços de água e esgoto *73*
4.3.12 Agricultura *76*
4.3.13 Pecuária *78*
4.3.14 Indústria *78*
4.4 Sistema de informação geográfica (SIG) 81
4.5 Dados meteorológicos 83
4.5.1 Precipitação diária *83*
4.5.2 Evaporação diária *84*
4.6 Dados dimensionais dos reservatórios 87
4.6.1 Volumes mínimo, máximo e inicial dos reservatórios *87*
4.6.2 Curvas Cota-Área-Volume (CAV) dos reservatórios *88*
4.6.3 Características dos vertedouros *89*
4.7 Desenho da rede no SIGA 90
4.8 Geração de vazões no modelo WASA 92
4.9 Vazões máximas outorgáveis 93
4.10 Vazões liberadas dos reservatórios 94
4.10.1 Regras de liberação *94*
4.11 Estudo de demandas 95
4.11.1 Caracterização da demanda *95*
4.11.2 Demanda de abastecimento humano *96*
4.11.3 Demanda de irrigação *98*
4.11.4 Demanda industrial *98*
4.11.5 Demanda difusa *98*
4.11.6 Balanço geral entre oferta e demanda *100*
4.11.7 Prioridade das demandas *102*
4.11.8 Regras de alocação das demandas *102*
4.11.9 Coeficiente de retorno das demandas *103*
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **104**
5.1 Vazões máximas outorgáveis obtidas no modelo VYELAS 104
5.2 Revisão das vazões liberadas dos reservatórios e suas demandas 105
5.3 Cenário 1 – Simulação sem reúso direto e indireto 106
5.3.1 Comportamento dos volumes dos reservatórios *106*

5.3.2 Análise de garantias *112*
5.3.3 Atendimento das demandas *114*
5.4 Cenário 2 – Simulação com reúso direto e indireto 116
5.4.1 Análise das garantias *117*
5.4.2 Atendimento das demandas *117*
5.4.3 Impacto do reúso direto e indireto em período de seca *119*
5.4.4 Viabilidade dos projetos de reúso direto não potável *122*
5.4.5 Estimativas de custo para o reúso direto *124*
6 CONCLUSÃO **126**
7 RECOMENDAÇÕES **129**
REFERÊNCIAS **130**

1 INTRODUÇÃO

Mais de quatro bilhões de pessoas vivem ameaçadas pela escassez de água em diferentes partes do mundo. O restante opta por viver em regiões adensadas providas de infraestrutura básica. Esta solução provoca impactos ambientais importantes pelo elevado consumo de água, energia, alimentos, e pela geração de poluentes de forma concentrada (GRANT *et al.*, 2012; MOLINOS-SENANTE; DONOSO, 2016; JAEGER *et al.*, 2017). Não é diferente, no território brasileiro, a constatação de má distribuição desses recursos em escala intra e inter-regional, sendo, o país, afetado tanto pela escassez quanto pela abundância (CIRILO, 2015).

Apesar do Brasil ser um país privilegiado com relação aos seus recursos hídricos, detendo aproximadamente 14% das águas doces do planeta, possui graves problemas de diagnóstico, avaliação estratégica e gestão de seus recursos hídricos (BICUDO; TUNDISI; SCHEUENSTUHL, 2010; JACOBI; GRANDISOLI, 2017).

O problema da escassez hídrica é ainda maior para o semiárido brasileiro, região de aproximadamente 970.000 km^2, que envolve 8 (oito) estados do Nordeste e Norte de Minas Gerais. É considerada a região mais seca do país com histórico de precipitação média anual abaixo de 750mm, sendo característico o padrão irregular de chuvas durante o ano, os rios intermitentes e o baixo escoamento superficial (BRASIL, 2005; ROCHA; SOARES, 2015).

Várias estratégias de enfrentamento da escassez hídrica têm sido sugeridas: redução do fornecimento de água, reservação subterrânea, reúso de efluentes, dessalinização de água marinha, eficientização da gestão do uso da água, uso de culturas de baixa necessidade hídrica e aplicação de tarifas mais caras (KAHIL; DINAR; ALBIAC, 2016; MOLINOS-SENANTE; DONOSO, 2016). Para Cirilo (2015), deve-se adotar diversas estratégias de mitigação da escassez hídrica, tais como: combate aos desperdícios no transporte, na distribuição e no uso da água; utilização racional de água bruta e promoção do reúso da água.

Segundo Gude (2017), o enfrentamento da escassez hídrica requer o envolvimento da população, do Governo, da indústria e das instituições de ensino e pesquisa, para implantação de uma abordagem holística de gestão do problema, compreendendo ações de mitigação da demanda (precificação e conservação da água) e de aprimoramento da oferta (transferência da água, açudagem e reúso de águas).

O estado do Ceará, quase todo inserido na região semiárida, convive permanentemente com a estiagem de forma cíclica, sendo a açudagem e a transposição de água as principais estratégias adotadas de enfrentamento da seca nas últimas décadas (MOLLE, 1994; CAMPOS, 2014; CIRILO, 2015). Porém, pouco se avançou na prática do reúso de águas

que poderia contribuir para aumentar a disponibilidade hídrica para fins mais nobres (consumo humano e dessedentação de animais) e reduzir o aporte de poluentes aos mananciais. Por outro lado, na maioria das bacias cearenses, constata-se o reuso indireto não planejado, que é quando a água, após consumida em atividades humanas, é descarregada no meio ambiente e utilizada a jusante de maneira não intencional e não controlada, sendo seu efeito negativo percebido nos reservatórios que recebem importantes aportes de nutrientes e outros contaminantes, causando problemas como eutrofização e redução de oxigênio dissolvido.

O reúso indireto e direto, de forma planejada, são práticas mais sustentáveis, pois ambas pressupõem um controle quantitativo e qualitativo das águas residuárias para atendimento aos requisitos legais e ambientais. A classificação de reúso "direto" e "indireto" tipifica a forma de uso: o primeiro é caracterizado pela utilização direta por consumidores específicos, normalmente de origem industrial e/ou agrícola; e o segundo pelo retorno das águas ao meio ambiente para sua utilização a jusante, normalmente na forma diluída (WHO, 1973; BRASIL, 2005; MORUZZI, 2008; HESPANHOL, 2015).

Torna-se cada vez mais importante que os recursos hídricos, tanto de fontes naturais quanto de reúso de águas, sejam melhor gerenciados para enfrentar os problemas de escassez hídrica e de piora de qualidade. Para isso, cada vez mais, ferramentas computacionais avançadas têm sido adotadas para simulação e otimização de sistemas hídricos.

Segundo Vieira e Curi (2016), nas últimas decadas, novos modelos de simulação têm sido implementados, calibrados e validados para operação de sistemas de recursos hídricos. Várias experiências têm sido realizadas por meio da utilização de técnicas de simulação, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. O autor destaca ainda que, a combinação de técnicas de simulação e otimização, vem sendo cada vez mais difundida.

Há diversos modelos de simulação e otimização disponíveis para a gestão de recursos hídricos, como por exemplo, o AQUARIUS, que usa técnicas de programação quadrática, o CALSIM, que utiliza técnicas simplificadas de programação não-linear, e o MODSIM e sua versão brasileira ACQUANET, que utilizam a programação em rede de fluxo por meio do algorítmo *out-of-kilter*. Os diversos modelos existentes utilizam variadas técnicas de simulação e otimização, tais como a programação linear, não-linear, dinâmica, multiobjetivo, rede de fluxo e programação heurística (algoritmos genéticos e evolucionários). Os principais processos hidrológicos considerados nos modelos são a evaporação, infiltração, precipitação e vazão afluente (VIEIRA; CURI, 2016).

As instituições governamentais responsáveis pela gestão de recursos hídricos no estado do Ceará tem adotado a ferramenta SIGA - Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água para a definição de regras de operação de seus reservatórios.

O SIGA foi desenvolvido e tem sido aprimorado constantemente pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), com apoio de diversos técnicos e pesquisadores, para atendimento das especificidades locais no que se refere à gestão dos recursos hídricos e definição de regras operacionais. Sua versatilidade permite a adoção de diversos modelos hidrológicos para a geração da série de vazões afluentes, tais como o SACR (*Sacramento Model*), também conhecido como SAC-SMA *(Sacramento Soil Moisture Accounting Model)*; WASA *(Water Availability in Semi-arid Environments)*; SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*); GWLF (*Generalized Watershed Loading Functions*); HYMOD (*Hydrological Model)* e CN3S (*Curve Number with Three Step Antecedent Precipitation*) (CEARÁ, 2015).

Por se tratar de um modelo físico, determinístico, semidistribuído, com calibração dispensável, o WASA tem sido bastante adotado como modelo hidrológico para geração de série de vazões afluentes. Sua robustez e confiabilidade na representação dos processos hidrológicos do semiárido tem sido constatadas em diversos estudos de balanço hídrico, geração de vazões, conectividade e transporte de sedimentos realizados por Güntner (2002), Güntner e Bronstert (2004), Güntner *et al*. (2004), Mamede (2008), Medeiros (2009), Francke (2009), Mueller *et al*. (2009), Araújo (2012), Kleine (2012), Costa A. C. (2012), Costa C. A. G (2012), Malveira, Araújo e Güntner (2012), Medeiros; de Araújo (2014) e Bronstert *et al*. (2014); parametrização, paralelização e calibração realizados por Müller *et al*. (2008), Costa *et al*. (2013), Noronha *et al*. (2013) e Santiago *et al*. (2015); discretização e variabilidade espacial desenvolvidos por Güntner e Bronstert (2004), Souza *et al*. (2013), Pilz, Francke e Bronstert (2017).

A bacia do rio Acaraú, adotada como área de estudo, possui relevância estratégica do ponto de vista técnico-científico, por representar aproximadamente 10% do território cearense, abrangendo 28 municípios, sendo 11 de forma integral, e por ter características fisiográficas e climáticas heterogêneas, podendo-se destacar sua hidrografia com 11 açudes estratégicos e seu principal rio, o Acaraú, com 315 km de extensão e quase 1000 m de desnível geométrico. Sua capacidade de estoque hídrico de aproximadamente 1700 hm^3, precisa ser bem gerido considerando os aspectos físicos, hidrográficos, políticos, sociais e ambientais de cada região demandante, tanto em ambiente urbano, quanto em rural, e para diferentes tipos de uso, tornando a gestão hídrica da bacia do Acaraú uma atividade complexa. Tal atividade necessita do apoio de uma ferramenta computacional para simulação dos estoques hídricos de alocação

de água, considerando a parcela de reúso que normalmente não é considerada nos modelos computacionais.

Este trabalho consistiu no desenvolvimento de um modelo de operação dos reservatórios da bacia do Acaraú com e sem considerar o reúso de águas. Para isso foram montados 2 (dois) cenários de simulação operacional: o primeiro não considera o retorno das águas residuárias ao meio ambiente (reúso indireto), e, o segundo, contempla o retorno das águas residuárias geradas pelas demandas e acrescenta possibilidades de reúso direto não potável para aplicação industrial e agrícola (perímetros irrigados). Os 2 (dois) cenários foram analisados limitando a vazão de liberação dos reservatórios praticada pela COGERH em 90% do Q_{90} (vazão com garantia de 90%). Adotou-se como hipótese do estudo a afirmativa de que o reúso de águas aumenta significativamente a garantias dos reservatórios e, consequentemente, o nível de atendimento das suas demandas.

O estudo foi desenvolvido utilizando o modelo WASA *(Water Availability in Semi-arid Environments)* para a geração das vazões afluentes aos reservatórios e o SIGA (Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água) para as simulações de alocação de água. Para determinar vazão máxima a ser liberada pelos reservatórios correspondente à 90% do Q_{90} (limite outorgável), adotou-se o Modelo VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*), desenvolvido por Araújo, Güntner e Bronstert (2006).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto do reúso direto e indireto na alocação de água dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, considerando o limite de vazão outorgável no Ceará de 90% de Q_{90}.

2.2 Objetivos específicos

a) Avaliar a dinâmica dos volumes dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, identificando os eventos históricos de estiagem e comparando os estoques hídricos observados e calculados;
b) Avaliar os resultados de garantia, calculados pelos modelos VYELAS e SIGA, identificando diferenças inerentes de uma ferramenta de planejamento e de simulação operacional;
c) Avaliar o impacto quantitativo do retorno das águas residuárias nas sub-bacias a jusante (reúso indireto) e do reúso direto não potável ao polo industrial de Sobral e perímetros irrigados;
d) Estimar investimentos na infraestrutura de recursos hídricos para a implementação do reúso direto não potável.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A gestão de recursos hídricos no semiárido nordestino

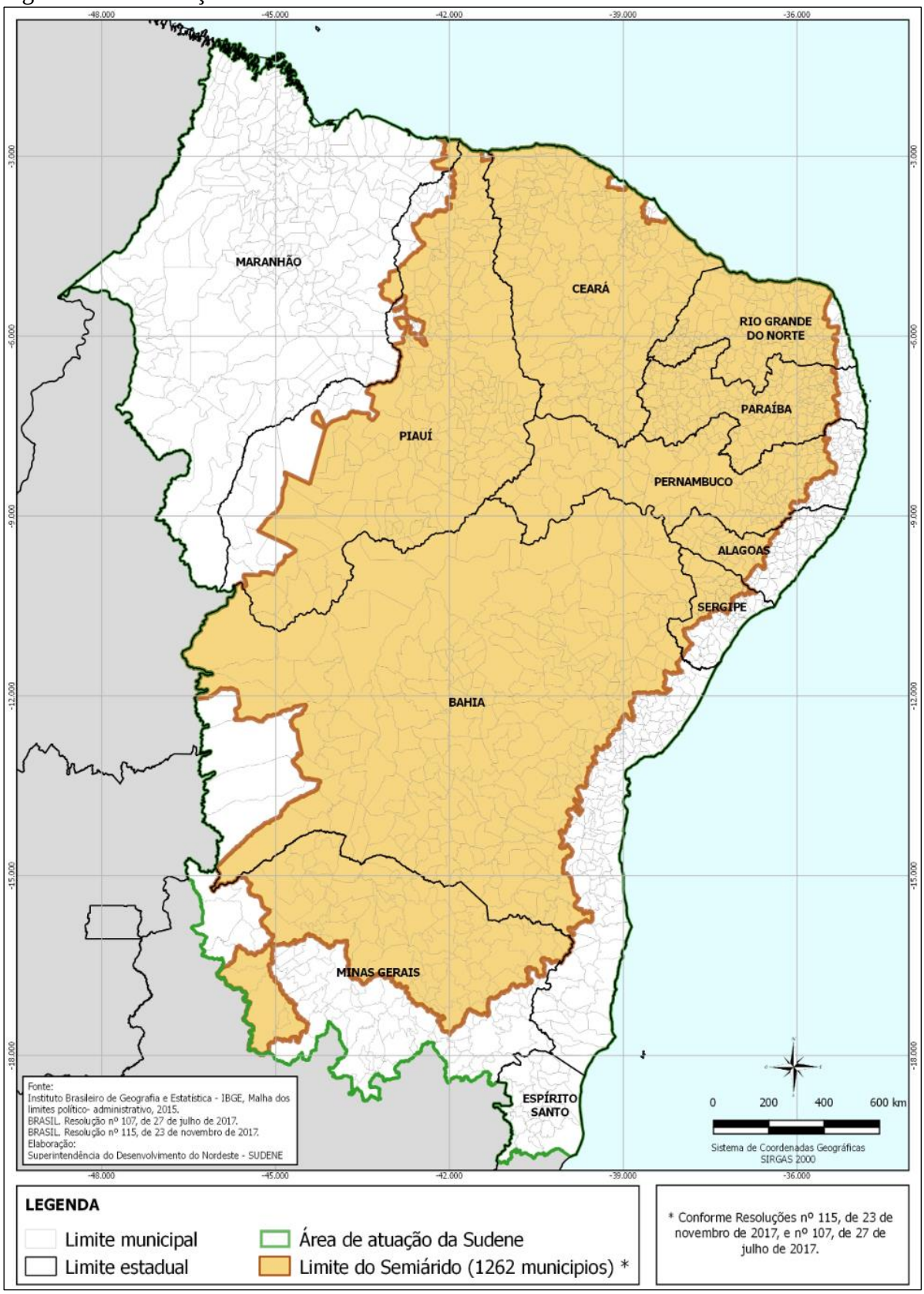
Os impactos das mudanças climáticas e o crescimento preocupante da demanda hídrica têm intensificado a competição por água em muitas regiões áridas e semiáridas (GHEYI *et al*., 2012; KAHIL; DINAR; ALBIAC, 2016). Cirilo (2015) aponta que a escassez hídrica é um limitador ao desenvolvimento e sinaliza para a hipótese de que a água possa vir a ser motivo de sérios confrontos futuros em pelo menos cinco regiões do mundo. O Autor comenta que a Organização das Nações Unidas (ONU) registrou cerca de 300 conflitos potenciais severos associados à questão hídrica envolvendo mais de dois bilhões de pessoas no mundo que carecem de acesso a água potável.

Segundo Cirilo (2015), as regiões áridas e semiáridas estão mais propensas à escassez hídrica, sendo a do tipo física presente para aproximadamente 2,8 bilhões de pessoas (25% da população mundial) e, a do tipo econômica, para em torno de 1 bilhão de pessoas.

O Brasil, embora considerado privilegiado por deter grande parcela da água doce disponível no mundo, possui significativa área de clima semiárido (Figura 1), abrangendo boa parte da Região Nordeste e o extremo norte mineiro (ANDRADE; NUNES, 2014). A região semiárida caracteriza-se, principalmente, pela escassez de água, decorrente da incidência de chuvas em períodos curtos, de três a cinco meses por ano, irregularmente distribuídas no tempo e no espaço. A precipitação média anual no semiárido é de aproximadamente 750 mm e, a evapotranspiração potencial média, de 2500 mm/ano. A região sofre com elevados déficits hídricos, favorecendo à concentração de solutos nas águas superficiais que gera degradação da qualidade das águas, principalmente pelos processos de eutrofização e salinização (GARJULLI, 2003; CIRILO, 2008; GHEYI *et al*., 2012; ROCHA; SOARES, 2015).

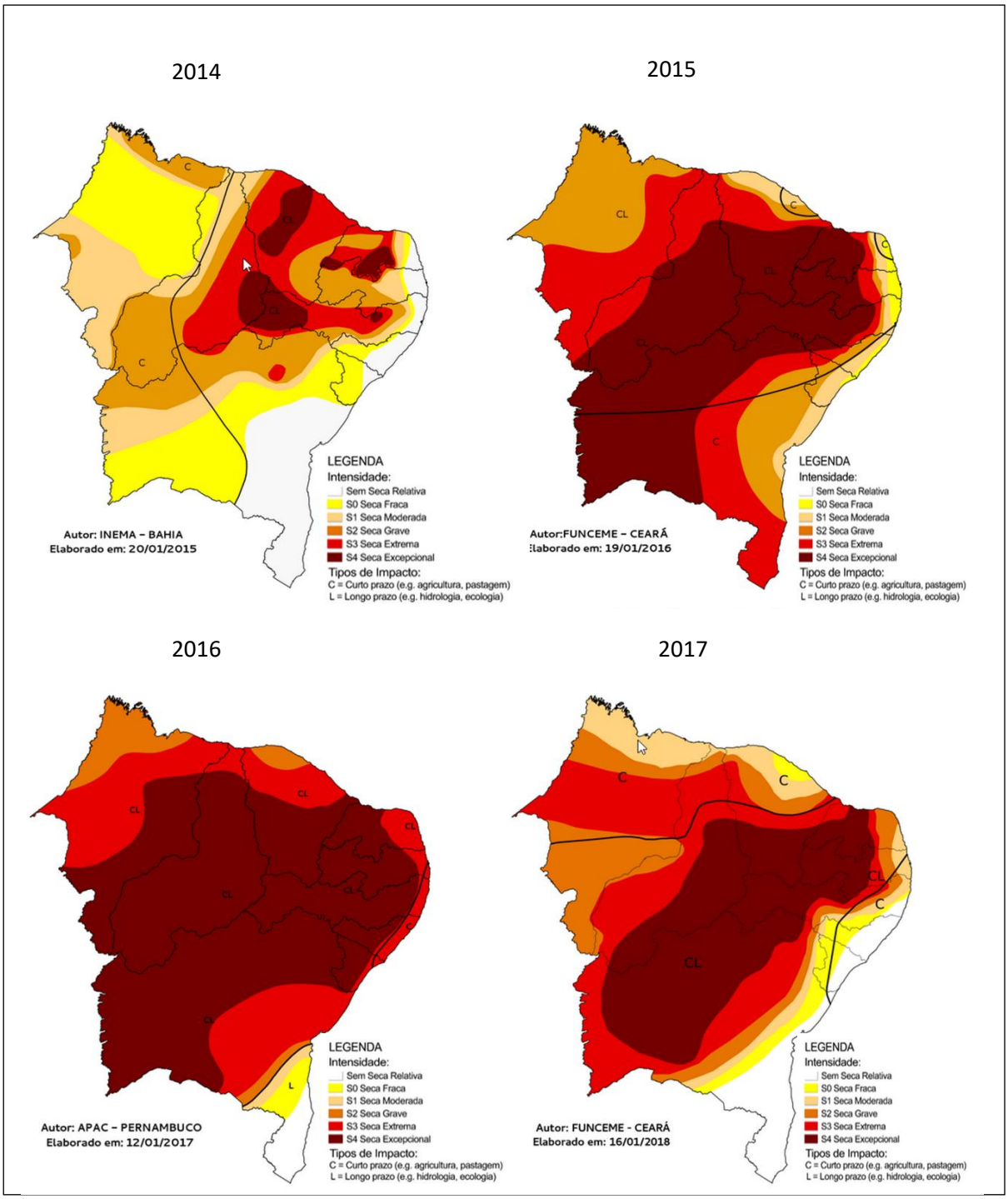
Cirilo (2015) reporta tendências apontadas em relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) de eventos mais frequentes e severos de seca em regiões semiáridas, com o número de dias sucessivos sem chuva tendendo a aumentar. O autor recomenda ações de construção de reservatórios para conter enchentes ou para acumular água, integração de bacias hidrográficas, revitalização de áreas degradadas para reduzir erosões, gerenciamento da demanda por água, reúso das águas servidas e adoção de sistemas de suporte à decisão. A última seca, na Região Nordeste, iniciou-se em 2012 e seus efeitos perduram até 2017, sendo 2016 o pior ano, como é possível constatar no Monitor das Secas (Figura 2).

Figura 1 – Delimitação do semiárido brasileiro



Fonte: SUDENE (2017).

Figura 2 – Mapa da seca dos anos 2014 a 2017 na Região Nordeste do Brasil



Fonte: Monitor das Secas (ANA, 2018).

Legenda: [S0-Seca Fraca] - Entrando em seca: veranico de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas; [S1-Seca Moderada]: Alguns danos às culturas, pastagens; córregos, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas; [S2-Seca Grave]: Perdas de cultura ou pastagens prováveis; escassez de água comuns; restrições de água impostas; [S3-Seca Extrema]: Grandes perdas de culturas / pastagem; escassez de água generalizada ou restrições; [S4-Seca Excepcional]: Perdas de cultura / pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência

Os principais usos da água no Brasil são destinados à irrigação, abastecimento humano e animal, industrial, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer. O conhecimento acerca desses usos vem sendo constantemente ampliado através de levantamentos diretos, estudos setoriais e cadastros de usuários. A atividade de maior consumo de água é a irrigação com 67,2% do total de água consumida no território brasileiro, seguido de abastecimento animal (11,1%) e humano (8,8%). A demanda por uso de água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% do total retirado de água nas últimas duas décadas. A previsão é de que, até 2030, a retirada aumente 30% (BRASIL, 2017a).

Para atender aos desafios de fornecimento de água, a política de recursos hídricos desenvolvida no Brasil, se baseia na gestão integrada da qualidade e da quantidade da água, na gestão adaptada às condições biogeofisiográficas locais e regionais, na articulação com programas de uso do solo e gestão ambiental, e na integração das bacias hidrográficas continentais com os sistemas estuários e costeiros. Os principais instrumentos de gestão preconizados pelo marco regulatório de recursos hídricos (Lei Nº 9.433/1997), conhecido como Lei das Águas, são: planos de bacia hidrográfica, enquadramento dos corpos de água, outorga, cobrança pelo uso de recursos hídricos e sistema de informações (TUNDISI, 2014). Dentre os fundamentos legais da Lei das Águas, ficou estabelecido que a gestão de recursos hídricos deve ser descentralizada, contando com o envolvimento do Poder Público, dos usuários e das comunidades, procurando também garantir uma representação minimamente equitativa de Estado e sociedade nos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH). Para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), foi criada pela Lei nº. 9.984, de 17 de julho de 2000, a Agência Nacional de Águas (ANA) (GHEYI *et al*., 2012; TUNDISI, 2014).

A gestão de recursos hídricos, no âmbito do Estado do Ceará, ficou inicialmente a cargo do DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca). Sua descentralização ocorreu em 1987 com a criação da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), ficando esta encarregada de coordenar, gerenciar e operacionalizar estudos, pesquisas, programas, projetos e serviços associados à água, além de promover a articulação entre os órgãos federais e municipais que atuam no setor das águas. Também, no mesmo ano, foi criada a SOHIDRA, como órgão executor das obras hídricas. Instrumentos legais, nos anos posteriores, consolidaram a gestão em âmbito estadual, a exemplo do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PLANERH) e da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), destacando o Estado do Ceará como pioneiro na gestão de recursos hídricos de forma institucional e governamental. Para atuar mais intensamente na gestão e planejamento, em 1993, foi implantada a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). A FUNCEME também foi

reestruturada para atuar no desenvolvimento de pesquisas no campo dos recursos hídricos e meteorologia (LINS, 2011; SABOIA, 2015).

O Estado do Ceará adotou, em sua Política Estadual de Recursos Hídricos, e nos seus instrumentos legais (Lei nº14.844/2010 e Decreto Estadual nº 31.076/2012), as seguintes prioridades de fornecimento de água: 1) abastecimento doméstico e dessedentação animal; 2) abastecimento coletivo especial (hospitais, quartéis, presídios e colégios); 3) outros abastecimentos coletivos não residenciais; 4) indústria, comércio e prestação de serviços e 5) fins agropecuários (CEARÁ, 2010a; CEARÁ, 2012; LIMA; SALES, 2015).

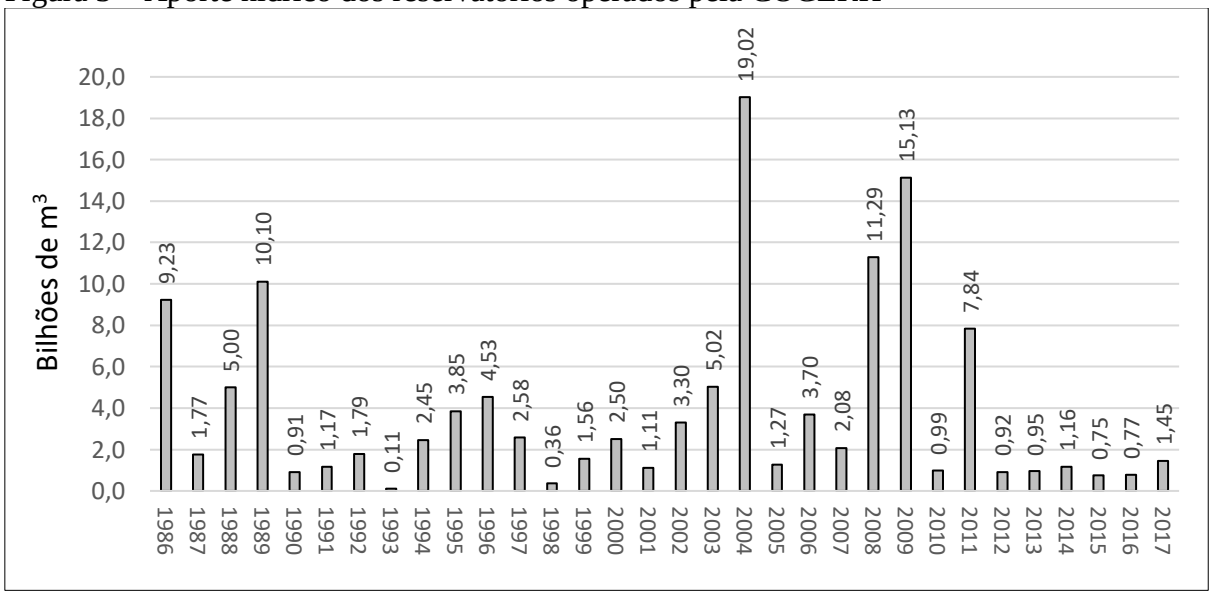
3.1.1 A utilização de reservatórios no estado do Ceará

A história do açude no Nordeste é tão antiga quanto a sua colonização pelos lusitanos. A técnica de construção dos açudes foi trazida pelos portugueses, os quais aprenderam, provavelmente, com os mouros que se fixaram por mais de cinco séculos na Península Ibérica. A açudagem foi, portanto, uma das primeiras técnicas de combate ou mitigação dos efeitos da seca (MOLLE, 1994; GHEYI *et al*., 2012; NETO, 2017). Especificamente no Estado do Ceará, desde a sua ocupação pelos colonizadores europeus, as instituições governamentais adotaram a açudagem como política central para amenizar os efeitos da escassez hídrica (CEARÁ, 2006; ARAÚJO, 2013; ANDRADE; NUNES, 2014; DANTAS; SALES, 2015).

Por outro lado, a construção de barramentos, do ponto de vista ambiental, é uma das intervenções antrópicas de grande impacto no ecossistema aquático, sendo causador de alterações de magnitude, frequência, duração, sazonalidade e periodicidade das vazões naturais do rio, o que promove uma série de alterações na dinâmica fluvial e nos ecossistemas aquáticos. Esses impactos, associados a alguns fatores, como: o crescimento populacional, a degradação da qualidade dos corpos d'água e o mau gerenciamento dos recursos hídricos, promovem pressões sobre as bacias hidrográficas, ocasionando conflitos de dimensões ambiental, social, cultural e de política pública (TORRES *et al*., 2015).

Com base no relatório da COGERH intitulado "Resenha Diária do Monitoramento", a Companhia gerencia 155 reservatórios com capacidade total de 18,63 bilhões de m^3 (CEARÁ, 2018a). É possível constatar, analisando o histórico do aporte hídrico anual no Ceará, entre 1986 e 2017 (Figura 3), que a reservação, desde o ano 2012, tem sido abaixo de 1,5 bilhão de m^3, o que tem agravado os efeitos da seca atual.

Figura 3 – Aporte hídrico dos reservatórios operados pela COGERH



Fonte: COGERH (2018).

Além do baixo aporte, a situação de escassez hídrica se agrava pelas elevadas perdas decorrentes de altas taxas de evaporação incidentes nas superfícies dos reservatórios (ARAÚJO, 2013; RABELO, 2017). Leão *et al*. (2013), por exemplo, determinaram a evaporação no Açude Banabuiú, região central do Ceará, por 6 (seis) diferentes métodos, obtendo valores entre 865 e 1570 mm/ano, o que representa uma vazão de aproximadamente 4,7 m^3/s para as áreas de espelho d'água estudadas. Já Aragão *et al*. (2017) estimaram a evapotranspiração na Cidade de Tauá-CE por 4 (quatro) diferentes métodos, obtendo valores entre 1087 e 2580 mm/ano.

A pequena açudagem pode ser considerada também um agravante na perda de eficiência de um sistema hídrico. A presença de um grande número de reservatórios de pequena escala, constitui em uma importante causa de desconectividade hidrológica, além de reduzir a garantia dos reservatórios estratégicos interanuais (MALVEIRA, 2009; ALMEIDA, 2016). Conforme Rabelo (2017), a pequena açudagem representa cerca de 10% do total de água fornecida por açudes no Estado do Ceará, sendo objeto de estudos desenvolvidos pela SRH e pela COGERH para análise da sua influência na descarga regularizada dos açudes estratégicos.

Segundo a COGERH, o estoque hídrico dos reservatórios cearenses monitorados pela Companhia, no final do ano de 2017, alcançou o patamar de 7,2%, tendo como pior índice o percentual de 0,3% para a região dos Sertões de Crateús e 0,96% para o Baixo Jaguaribe (Tabela 1).

Tabela 1 – Estoque hídrico em 31/12/2017 por bacia hidrográfica

Região Hidrográfica	Capacidade (hm^3)	Estoque (hm^3)	Estoque (%)
Acaraú	1.718	294,08	17,1%
Alto Jaguaribe	2.779	176,06	6,3%
Baixo Jaguaribe	24	0,23	1,0%
Banabuiú	2.760	63,10	2,3%
Coreaú	304	154,84	51,0%
Curú	1.028	94,58	9,2%
Litoral	215	79,44	37,0%
Médio Jaguaribe	7.387	180,65	2,5%
Metropolitana	1.378	227,06	16,5%
Salgado	452	34,73	7,7%
Serra da Ibiapaba	141	27,84	19,7%
Sertões de Crateús	448	1,13	0,3%
Total	**18.634**	**1.333,74**	**7,2%**

Fonte: COGERH (2018).

3.1.2 Vazões de referência e de outorga

Um dos instrumentos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos é a outorga de direito de uso da água, servindo de ferramenta de suporte à gestão e ao gerenciamento de recursos hídricos. Estão sujeitos à outorga todos os usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo d'água. Uma das questões cruciais na concessão da outorga diz respeito ao valor máximo outorgável da fonte hídrica. (STUDART, 2002; BRASIL, 2013; KAYSER, 2014).

O Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direitos de Uso de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (BRASIL, 2013), afirma que há duas abordagens praticadas para definição de vazões mínimas de referência: vazões mínimas com determinado tempo de recorrência e vazões de curva de permanência. A primeira abordagem tem origem no setor de saneamento e é usada como critério em vários estados como São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Essa abordagem se baseia na utilização da vazão mínima de 10 anos e 7 dias de duração ($Q_{7,10}$), determinada estatisticamente. A segunda abordagem consiste em ordenar as vazões de maior valor para menor e identificar a vazão que é superada em uma porcentagem do período (garantia). A parcela de tempo em que esta não é satisfeita é usualmente associada ao risco (KAYSER, 2014). Essas vazões limites, que caracterizam uma condição de garantia de água no manancial, são chamadas de vazão de referência, sendo as mais utilizadas as vazões Q_{90} ou Q_{95} (BRASIL, 2011; KAYSER, 2014).

Segundo a ANA (BRASIL, 2011), o Q_{90} é a vazão determinada a partir das observações em um posto fluviométrico, em que 90% do período, as vazões são iguais ou

superiores a ela. O Q_{95} tem o mesmo significado, mas com uma garantia correspondente a 95% do tempo de observação.

Há ainda outros conceitos de vazão utilizados no meio técnico-científico, como por exemplo, vazão ecológica, vazão remanescente ou residual e vazão ambiental. Vazão ecológica é a vazão que deve ser mantida no rio para atender aos requisitos de conservação ou de preservação do meio ambiente. Já a vazão remanescente compreende, além da vazão ecológica, os outros usos a jusante, tais como a manutenção de calado para navegação e vazões para diluição de poluentes. A vazão ambiental tem um conceito mais abrangente e considera a vazão necessária para garantia da preservação da bacia de forma integrada, de modo a assegurar a sua sustentabilidade, levando em conta todo o ecossistema, não só o aquático, mas também as atividades antrópicas (BRASIL, 2011a).

Muitos órgãos reguladores adotam, como critério de outorga, um limite percentual relacionado ao Q_{90}, Q_{95} ou $Q_{7,10}$. Um resumo dos critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais

Órgão gestor	Vazão máxima outorgável	Legislação
ANA	70% da Q_{95} podendo variar em função das peculiaridades de cada região. Até 20% para cada usuário.	Não existe em função das peculiaridades do país.
Inema-BA	80% da Q_{90}. Até 20% para cada usuário.	Decreto Estadual nº 6.296/1997
SRH-CE	90% da Q_{90}	Decreto Estadual nº 23.067/1994 (a)
Semarh-GO	70% da Q_{95}	Não possui legislação específica
Igam-MG	30% da $Q_{7,10}$ para captações a fio d'agua e em reservatórios. Podem ser liberadas vazões superiores mantendo o mínimo residual de 70% da $Q_{7,10}$ durante todo o tempo	Portarias nº 010/1998 e 007/1999
Aesa-PB	90% da Q_{90reg}. Em lagos territoriais o limite é reduzido em 1/3	Decreto Estadual nº 19.260/1997
Ipaguás-PR	50% da Q_{95}	Decreto Estadual nº 4.646/2001
Apac-PE	Depende do risco que o requerente pode assumir	Não existe legislação específica
Semar-PI	80% da Q_{95} (rios) e 80% da Q_{90reg} (açudes)	Não existe legislação específica
Igam-RN	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 13.283/1997
DAEE-SP	50% da $Q_{7,10}$ por bacia. Até 20% da $Q_{7,10}$ para cada usuário	Não existe legislação específica
Semarh-SE	100% da Q_{90}. Até 30% da Q_{90} para cada usuário	Não existe legislação específica
Naturantins-TO	75% de Q_{90} por bacia. Até 25% da Q_{90} por usuário. Para barragens de regularização, 75% da vazão de referência adotada.	Decreto estadual aprovado pela Câmara de outorga do Conselho Estadual de Recursos Hídricos

Fonte: Adaptado da ANA (BRASIL, 2007).
(a) Revogado pelo Decreto nº 31.076, de 12 de dezembro de 2012, do Estado do Ceará

O estado do Ceará adotou a regra de vazão máxima outorgável de 90% do Q_{90}, conforme Decreto nº 31.076/2012 que regulamenta a Lei nº 14.844/2010. A mesma norma exclui deste limite o reúso de águas (CEARÁ, 2012).

3.1.3 O reúso de águas na gestão dos recursos hídricos

Vários estudos apontam para um aumento significativo da demanda de água para as próximas décadas em âmbito global. Além da demanda agrícola, que corresponde por 70% do consumo mundial, a demanda industrial e para produção de energia tem se destacado, estimulada pela urbanização acelerada dos municípios. A carga poluidora gerada pelas atividades antrópicas, como consequência, tem aumentado significativamente em todo o globo, gerando um grande problema social e ambiental que compromete os esforços para alcançar, por exemplo, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Diante da demanda crescente por água, a prática de reúso tem ganhado espaço, apresentando-se como uma nova fonte hídrica para diversos fins (LAZAROVA *et al*., 2001; WWAP, 2017).

Segundo Hespanhol (2015), a política de importar água de bacias cada vez mais distantes para satisfazer o crescimento da demanda ainda persiste, resolvendo, precariamente, o problema de abastecimento de água de uma região. As soluções mais modernas em termos de gestão de recursos hídricos, consistem em tratar e reutilizar os esgotos tratados já disponíveis nas próprias áreas urbanas para complementar o abastecimento público.

Diante da preocupação com a disponibilidade de água, entidades governamentais têm dado maior atenção ao reúso de águas. Os Estados Unidos, por exemplo, elevam sua taxa de reutilização de água em 15% ao ano (TRAN; SCHWABE; JASSBY, 2016). Já a Europa implementou mais de 200 projetos de reúso com uma vazão total de aproximadamente 23,8 m^3/s, ainda abaixo do total instalado nos Estados Unidos de aproximadamente 122,1 m^3/s (ANGELAKIS; GIKAS, 2014).

Israel, atualmente, é o país que mais utiliza água de reúso no mundo, principalmente para viabilizar a agricultura nas regiões mais áridas. As tecnologias israelenses de tratamento de efluentes e de irrigação, contribuíram para um aumento de 1600% na produção agrícola nos últimos 65 anos. A sua taxa de reutilização de cerca de 86% dos esgotos tratados, fornecem 50% da necessidade de água para irrigação no país, utilizando técnicas de gotejamento e tecnologias próprias (TAL, 2016).

Os efluentes tratados representam uma importante fonte de água, principalmente para uso em irrigação pela presença de nutrientes. A compreensão de que o reúso de água é uma prática importante na gestão de recursos hídricos pode ser evidenciada na literatura especializada, mas sua adoção ainda é incipiente no Brasil, e sua regulamentação ainda é incompleta em escala nacional e estadual (SCHAER-BARBOSA; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabeleceu na sua Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005, as modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Algumas classificações importantes sobre a prática de reúso são definidas nesta norma, como por exemplo, as suas modalidades: 1 - Reúso para fins urbanos (utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana); 2 - Reúso para fins agrícolas e florestais (aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas); 3 - Reúso para fins ambientais (utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente); 4 - Reúso para fins industriais (utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais); 5 - Reúso na aquicultura (utilização de água de reúso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos) (BRASIL, 2006a).

Uma classificação comum adotada no meio técnico é a de reúso direto e indireto. O reúso direto possui definição na própria Resolução nº 54/2005 do CNRH (BRASIL, 2005), conceituado como o uso planejado de água de reúso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos. Já o reúso indireto é definido como a água já usada, que é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas, e depois utilizada a jusante, de forma diluída (WHO, 1973; MORUZZI, 2008; HESPANHOL, 2015). Essas e outras definições relativas à potabilidade e forma de uso foram inicialmente conceituadas pela Organização Mundial de Saúde (Tabela 3) em 1973 (WHO, 1973).

Tabela 3 – Definições da OMS relativas à reúso de águas

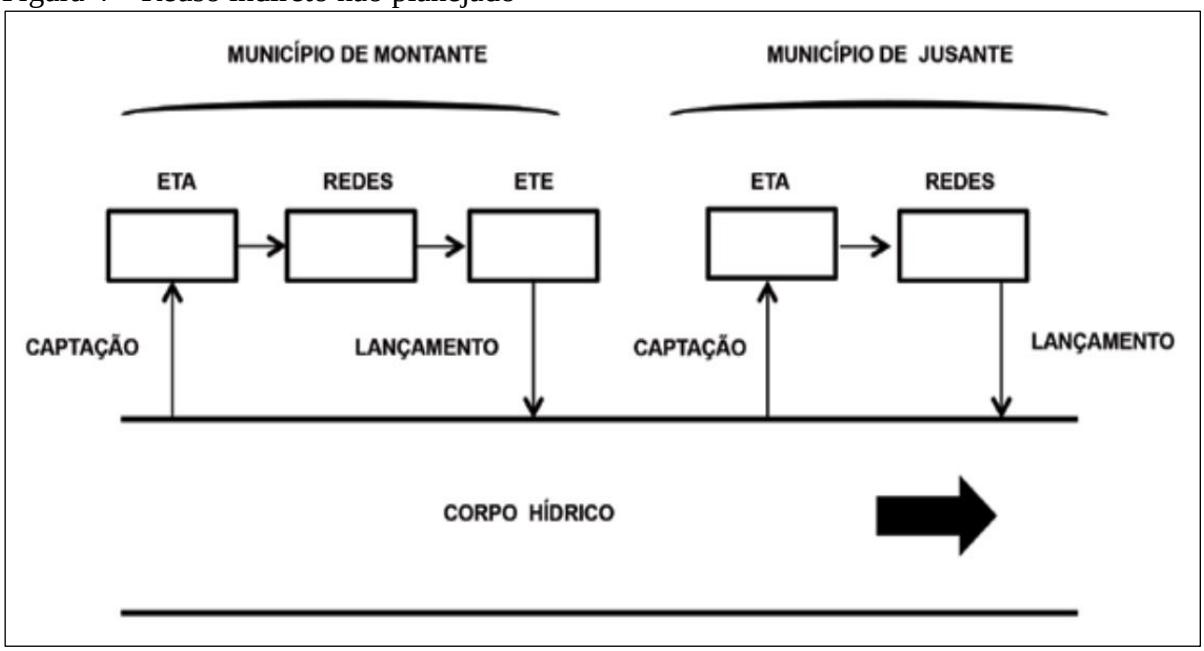
Termo	Definição
Reúso direto	Uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável. Exige a concepção e implantação de tecnologias apropriadas de tratamento para adequação da qualidade do efluente à estação à qualidade definida pelo uso requerido,
Reúso indireto	Ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída.
Reciclagem Interna	Reúso da água internamente as instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição. É constituído por um sistema em ciclo fechado onde a reposição de água de outra fonte deve-se às perdas e ao consumo de água para manutenção dos processos e operações de tratamento.
Reúso potável Direto	Ocorre quando o esgoto recuperado através de tratamento avançado é diretamente reutilizado no sistema de água potável.
Reúso Potável Indireto	Caso em que o esgoto, após tratamento, é disposto em águas superficiais ou subterrâneas para diluição, purificação natural e subsequente captação, tratamento e finalmente utilização como água potável.

Fonte: WHO (1973).

Além destas definições, é comum classificar o reúso como planejado e não planejado. O primeiro caso consiste no reúso direto ou indireto de forma controlada e monitorada, garantindo a sua qualidade e segurança no seu manejo e utilização. Já o segundo caso, normalmente relacionado ao reúso indireto, ocorre com pouco ou nenhum controle de quantidade, qualidade, e de seus efeitos a jusante.

O reúso indireto não planejado (Figura 4) ocorre de forma sistemática no Brasil. A regulamentação do reúso de águas, significaria, neste caso, corrigir uma prática existente realizada de forma indiscriminada que traria importantes resultados para o semiárido brasileiro (SCHAER-BARBOSA; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Figura 4 – Reúso indireto não planejado



Fonte: Hespanhol (2015).

O reúso indireto possui forte relação com o retorno das águas residuárias ao meio ambiente, variando sua magnitude de acordo com a taxa de retorno de cada tipo de uso. A Confederação Nacional das Indústrias, por exemplo, fez um esforço de fornecer referências de coeficientes técnicos da água aplicadas à indústria (CNI, 2013), onde se pode extrair algumas taxas de retorno pela razão entre a vazão de efluente e a vazão consumida para diversos tipos de atividade industrial. Já o Operador Nacional do Setor Elétrico (ONS, 2005), realizou amplo estudo de estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN, que resultou na adoção das seguintes taxas de retorno: abastecimento urbano – 0,80; abastecimento rural – 0,5; abastecimento industrial – 0,8; irrigação – 0,2 e criação de animais – 0,2.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, na ausência de estudos específicos, recomenda-se adotar o coeficiente de retorno de 0,8 (ABNT, 1986). Já Coelho (2017) constatou em seu estudo que o coeficiente de retorno usual de 80% não condiz com a realidade das comunidades rurais do semiárido brasileiro, variando de 3% a 26%.

Coeficientes técnicos para irrigação foram quantificados por estudo do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2011b) para diferentes tipos de cultura, apresentando coeficientes de retorno médios mensais na ordem de 20%.

O reúso direto não potável, segundo Hespanhol (2015), já é uma prática consagrada, ao contrário do reúso direto potável para abastecimento público, apesar de existirem exemplos bem sucedidos nos Estados Unidos, na África do Sul, Austrália, Bélgica, Namíbia e Singapura, por meio de sistemas de tratamento avançados e diluição parcial com água superficial ou subterrânea. O autor aponta o fator cultural e a falta de comunicação como empecilhos para implementação desta prática.

Segundo Almeida (2011), não existe normativo federal que regulamente o reúso de águas residuárias, devendo este fato à falta de tradição quanto à aplicação desta prática. A Resolução CONAMA nº 357/2005, por exemplo, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições padrões de lançamento de efluentes, não contemplou o reúso.

O estado do Ceará, diante das graves das consequências da estiagem, implementou uma nova política de reúso constituída pela Lei nº 16.033, que estabelece critérios para o reúso de água não potável, e pela Lei nº 16.034, que concede isenção do ICMS nas operações internas e de importação de máquinas, aparelhos e equipamentos, suas partes e peças, destinados à instalação de estações de tratamento de água de reúso e estações elevatórias de uso exclusivo para água de reúso, ambas de 20 de junho de 2016 (CEARÁ, 2016a; CEARÁ, 2016b). Além deste normativo, uma nova resolução estadual nº. 02 de 2017 do COEMA, estabeleceu padrões de lançamento e reúso de efluentes para fins urbanos, agrícolas, florestais, ambientais, industriais e aquícolas (CEARÁ, 2017a).

3.1.4 As perdas em trânsito no semiárido

Perda de água em trânsito em rios e canais é um componente importante no planejamento de recursos hídricos, principalmente em ambientes semiáridos e áridos, pois são responsáveis por importantes reduções de deflúvio e recarga de aquíferos (GU; DEUTSCHMAN, 2001; COSTA *et al*., 2013b).

Segundo Jarihani *et al*. (2015), as terras áridas e semiáridas cobrem aproximadamente 1/3 da superfície terrestre e abriga cerca de 40% da população do planeta, sendo tal área caracterizada pelos recursos hídricos limitados e rios efêmeros com extrema variabilidade de regime de fluxo e elevada perda de conectividade, que ocorrem pela evaporação e infiltração da água no solo ou, no sentido inverso, pelo afloramento de água subterrânea armazenada após os eventos de precipitação. Esses fenômenos típicos de regiões áridas e semiáridas, ainda são pouco conhecidos pela escassez de dados e pela dificuldade de quantifica-los.

Alguns estudos de perda em trânsito foram desenvolvidos no semiárido nordestino, como por exemplo, o projeto coordenado por Carvalho Jr. (2002), apoiado pela COGERH, intitulado “Avaliação das perdas d'água em trânsito em rios perenizados do semiárido”, utilizando uma abordagem físico-experimental para o tratamento do problema de perdas contínuas de água no vale perenizado do Rio Juazeiro, em Coreaú-CE, resultando na quantificação da perda na ordem de 2,3% a cada km.

Costa *et al*. (2013b) modelaram e avaliaram as perdas em trânsito em um trecho de 30 km do Rio Jaguaribe, Ceará, Brasil, a partir de dados de vazão de rio, lençol subterrâneo e imagens multitemporais da extensão superficial do deflúvio no rio. Também, foi desenvolvido um modelo para simular a propagação de escoamentos em rios e suas perdas em trânsito sobre diferentes controles climáticos e hidrogeológicos encontrados em regiões semiáridas e áridas (COSTA; BRONSTERT; DE ARAÚJO, 2012).

Lima, Frischkorn e Burte (2007) avaliaram a interação rio-aquífero do Rio Forquilha usando dados experimentais e modelos analíticos. Constataram que o fluxo rio-aquífero se inverteu após 226 horas, passando o aquífero a contribuir para o escoamento superficial. A perda em trânsito, nas primeiras horas, alcançou um máximo de 36 $m^{3}{\cdot}h^{-1}.km^{-1}$ (4,17 %/km), reduzindo para 1,16%/km ao final 24 horas. Após 400 h, o aquífero passou a aflorar como escoamento superficial com uma vazão de 4 $m^{3}{\cdot}h^{-1}.km^{-1}$ (0,46%/km).

Nem todo método de quantificação de perda em trânsito utilizado em rios perenes são apropriados para rios efêmeros ou intermitentes. As técnicas disponíveis para estudo de sistemas efêmeros podem ser divididos em três grupos: 1- Monitoramento da infiltração do leito do rio, que inclui experimentos controlados, monitoramento da quantidade de água ou uso do calor como traçador; 2 – Quantificação do fluxo durante o evento, que pode incluir técnicas de balanço hídrico e estudo de ondas de cheia; 3 – Medições da água subterrânea subjacente ao leito do rio, podendo estar associados à processos de datação (SHANAFIELD; COOK, 2014).

Os parâmetros mais sensíveis à conectividade de rios efêmeros em bacias semiáridas são, em ordem decrescente, a condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), a rugosidade, a cobertura vegetal e a interceptação (PACHECO-GUERRERO *et al*., 2017).

3.2 Sistemas de suporte à decisão (SSD) aplicados aos recursos hídricos

Os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) ou Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são ferramentas computacionais de apoio à tomada de decisões que utiliza, de forma amigável, intensa bases de dados e modelos matemáticos, facilitando o diálogo entre o usuário e o computador (ANDRADE, 2012; GWP, 2013; MARQUES, 2015).

A adoção de SSD no gerenciamento de recursos hídricos tem se tornado cada vez mais comum pela capacidade de agregar técnicas matemáticas de simulação e otimização, bem como de organizar e facilitar a entrada de parâmetros e variáveis do problema (GIUPPONI; SGOBBI, 2013; KAYSER, 2014). A determinação de vazões de referência e limites outorgáveis, a comparação entre demanda e disponibilidade de água, e, a alocação ótima de água são exemplos de rotinas comuns de sistemas de suporte à decisão (KAYSER, 2014).

Pode-se destacar algumas iniciativas importantes no Brasil de desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão como o caso do Acquanet, desenvolvido pelo LABSID/USP; o ORNAP (*Optimal Reservoir Network Analysis Program*) e o CISDERGO (*Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Operation*), desenvolvidos pelo GOTA – Grupo de Otimização Total da Água; e o SIGA – Sistema e Informações para Gerenciamento da Alocação de Água, desenvolvido pela FUNCEME com o apoio de diversos pesquisadores e instituições de pesquisa (LABSID, 2013; LOURENÇO, 2015; VIEIRA; CURI, 2016; PEREIRA; CAVALCANTI, 2016). Estes modelos se diferenciam pelos métodos de simulação e/ou otimização, pelos algoritmos utilizados e pelo uso de recursos gráficos, tais como o SIG e mapas, seja para extrair parâmetros ou para uma apresentação final mais amigável.

O SSD possui especial utilidade na gestão de recursos hídricos de regiões semiáridas pela necessidade de otimizar os recursos escassos, principalmente a alocação de água do ponto de vista quantitativo e qualitativo. Diversos estudos têm sido desenvolvidos nesta área para o semiárido nordestino, utilizando diferentes modelos, ferramentas e algoritmos. Alguns deles estão citados na Tabela 4.

Tabela 4 – Pesquisas com SSDs no semiárido nordestino

Autor(es)	**Título da Pesquisa**	**Ferramentas, Modelos e Algoritmos**
Lerner (2006)	Estudo de impactos na geração hidroelétrica ao longo do rio São Francisco devido à transposição de suas águas utilizando o modelo matemático de fluxos em rede Acquanet	Acquanet
Bacalhau (2015)	Simulação da disponibilidade hídrica e operação de reservatórios de abastecimento em relação à variabilidade climática: bacia do rio Pirapama em Pernambuco	SMAP, Acquanet
Aragão (2008)	Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do Rio Paraíba: Uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo Acquanet	Acquanet
Andrade (2006)	Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do Rio Capibaribe, PE	ORNAP, Acquanet
Feitosa (2013)	Otimização do uso das águas da barragem Santa Cruz-RN	Acquanet
Carvalho *et al*. (2009)	Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação	IrrigaLS (Acquanet)
Vieira (2011)	Modelo de simulação quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento integrado dos sistemas de recursos hídricos	MATLAB, PL Sequencial e Método por Aproximações Lineares
Moraes *et al*. (2006)	Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos	UFPE
Germano, Moraes e Ramos (2010)	Custos de oportunidade para alocação de efluentes nas áreas plantadas de cana na bacia do Rio Pirapama	GAMS
Freitas (1998)	Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas	RAI, BMDI, HSI, LRDI
UFBA (2004)	Gerenciamento dos recursos hídricos do semi-árido do estado da Bahia - Vol. III: Sistema de apoio à decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraguaçu.	SAUA
Santos (2013)	Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do Rio Mundaú	HEC-RAS, HEC-HMS
Alves et al. (2006)	Implantação dos Módulos de Calibração Automática de Modelos Hidrológicos e de Modelagem de Poluição Difusa no Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água-SIGA	SIGA, GWLF, MOPSO, SMAP
Barros *et al*. (2013)	The Development and application of information system for water management and allocation (SIGA) to a negotiable water allocation process in Brazil	SIGA

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Segundo Vieira e Curi (2016), não existe um método adequado para todas as situações, pois há muitos fatores que interferem na eficiência de um modelo, dentre os quais: a configuração do sistema, os objetivos de uso dos recursos hídricos e a eficiência computacional, podendo inclusive adotar somente técnicas de simulação ou de otimização, ou a combinação das duas.

3.2.1 Métodos de otimização aplicados aos recursos hídricos

Otimização é o ato de obter o melhor resultado sob condições previamente especificadas. Na visão da engenharia, é o processo de procura por uma solução de um problema que forneça o máximo benefício, segundo algum critério. Matematicamente, significa encontrar o valor mínimo ou máximo de uma função de *n* variáveis (função objetivo), onde *n* pode ser qualquer inteiro maior que zero, podendo a função ser irrestrita ou estar sujeita a certas restrições (BAZZO; PEREIRA, 2006; RODELLA, 2014; MARQUES, 2015).

Utiliza-se frequentemente os termos "variáveis de decisão", "função objetivo" e "restrições" em modelos de otimização. As variáveis de decisão são aquelas que tem influência na solução do problema de otimização. A função objetivo é aquela que representa matematicamente o problema, devendo ser maximizada ou minimizada pelas variáveis de decisão. As restrições representam as limitações dos recursos disponíveis ou exigências específicas sobre as variáveis (VIEIRA, 2007; MARQUES, 2015).

Conforme Sarker e Newton (2008), a estrutura geral de um modelo de otimização pode ser representado pelas Equações 1, 2 e 3.

Encontre x para:

Maximizar ou Minimizar *f(x)* sujeita a:

$$g_i(x) \leq gb_i, i = 1,...,m \tag{1}$$

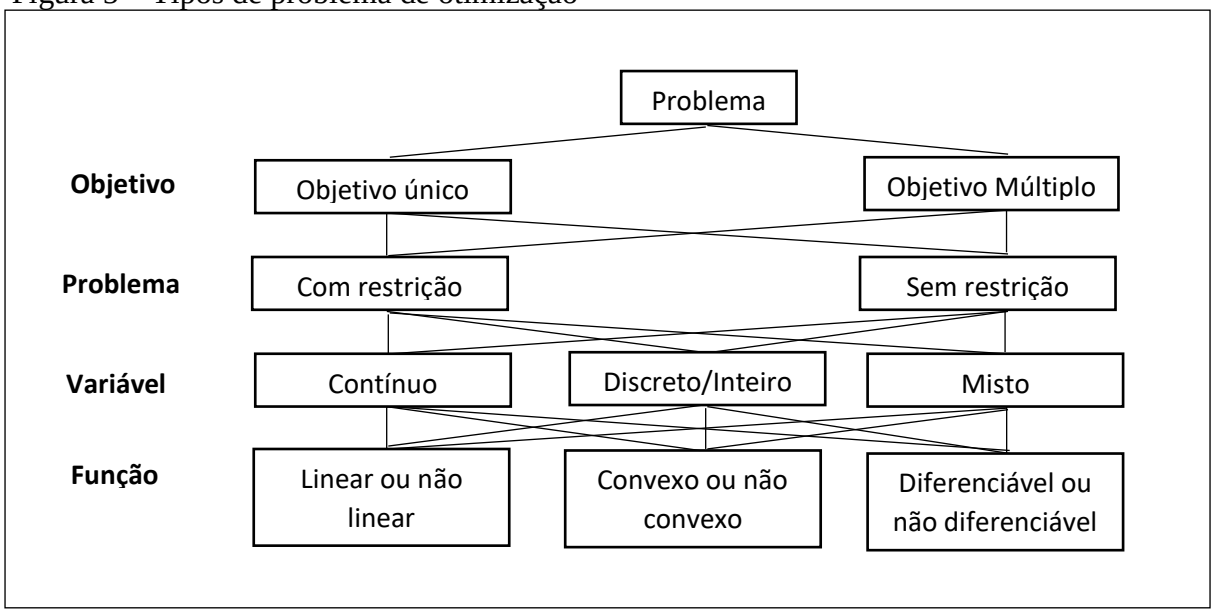
$$h_i(x) = hb_j, j = 1,..., p \tag{2}$$

$$x \geq 0 \tag{3}$$

A função objetivo *f* é uma função de *x* e g_i e h_i são as funções de restrição. Já gb_i e hb_j são as constantes do problema. A restrição de não negatividade $x \geq 0$ é comum em diversos problemas práticos. Outras estruturas podem variar do problema básico supramencionado, podendo aceitar variáveis negativas e a utilização de múltiplas variáveis. Em problemas de otimização de custos, as restrições representam a escassez de recursos (RODELLA, 2014).

Os modelos de otimização podem ser classificados pelo seu objetivo, problema, variável e função. Uma de suas classificações está apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de problema de otimização



Fonte: Adaptada de Sarker e Newton (2008).

Os problemas de otimização com variáveis inteiras ou discretas são também chamados de problemas combinatórios. Para cada tipo de função há diferentes propriedades matemáticas as serem consideradas. Se as funções objetivo e de restrição forem lineares, o modelo é chamado de programação linear (PL). Se uma ou mais funções não for linear, é chamado de programação não linear (PNL). Este último é considerado de resolução mais complexa, principalmente pelas incertezas na obtenção de um ótimo global. A convexidade tem um importante papel nas funções não lineares, pois quando a função objetiva é convexa, não há distinção entre o ótimo local e global (SARKER; NEWTON, 2008; BERTSEKAS, 2016).

Os altos custos associados à construção e operação de sistemas de distribuição de água tem motivado o desenvolvimento de diversas técnicas de pesquisa operacional, viabilizando modelagens mais adequadas de problemas reais (BOUZON; COELHO; RODRIGUEZ, 2013).

Para sistemas de recursos hídricos, uma grande quantidade de técnicas de otimização não linear foi utilizada nas últimas décadas para otimização de dimensionamento e operação de sistemas de água. Basicamente, os modelos de otimização adotam algoritmos clássicos, baseados em gradientes da função objetivo, ou em algoritmos heurísticos e metaheurísticos baseados em inteligência artificial e nos fenômenos que ocorrem na natureza (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014). Estes últimos tem sido empregados em problemas não lineares para minimizar os riscos de obtenção de um ótimo local, fornecendo soluções razoáveis em um tempo razoável (MARQUES, 2015).

Os algoritmos clássicos aplicados a recursos hídricos, compreendem: programação linear (PL), programação não linear (PNL), programação não linear inteira (PNLI) e programação dinâmica (PD). O grupo dos algoritmos heurísticos envolvem os algoritmos genéticos (AG) e evolucionários (AE). Entretanto, outras técnicas também têm sido desenvolvidas para aprimoramento dos resultados, como: lógica fuzzy (*fuzzy logic*), redes neurais artificiais (*artificial neural network*), arrefecimento simulado (*simulated annealing*), algoritmo de colônia de formigas (*ant colony algorithms*), algoritmo guloso adaptativo e aleatório (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure - GRASP*), busca tabu (*tabu search*) e nuvem de partículas (*Particle Swarm Optimisation – PSO*) (COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, 2014; MARQUES, 2015).

Diversos estudos recentes de otimização têm sido aplicados no Brasil voltados não só a um uso mais racional dos recursos hídricos, mas também à minimização dos impactos ambientais. Marques (2015) desenvolveu um sistema de apoio à decisão para alocação de água em uma microbacia para fins de irrigação para atendimento da agricultura familiar. Já Garcia (2011) e Andrade (2012) desenvolveram modelos matemáticos de otimização para auxiliar a implementação dos instrumentos de outorga de diluição de efluentes e enquadramento dos corpos d'água. Rodella (2014) construiu uma plataforma de otimização para determinação de vazões de água para abastecimento da Região Metropolitana de Recife, minimizando custos de energia elétrica e de tratamento, e também os custos de oportunidade dos sistemas de tratamento que não operam na solução ótima. Bouzon, Coelho e Rodriguez (2013) desenvolveram um modelo de otimização em Programação Linear (PL) para determinar o padrão ótimo de operação de um sistema de distribuição de água de uma cidade no interior do Estado de São Paulo, minimizando o seu custo energético. Feitosa (2013) elaborou um modelo de otimização baseado em rede de fluxo para alocação ótima de água da Barragem de Santa Cruz na bacia hidrográfica do Rio Apodi em Mossoró.

Segundo Vieira e Curi (2016) os modelos de otimização se aplicam aos casos em que interessa saber qual é o ponto ótimo de um sistema por meio de algoritmos que buscam soluções ótimas, procurando satisfazer uma função objetivo e restrições operacionais. Não existe, porém, um método de otimização que possa resolver eficientemente qualquer tipo de problema.

3.2.2 Métodos de simulação aplicados aos recursos hídricos

Um modelo de simulação pode ser compreendido como uma representação de um sistema físico, com o objetivo de prever seu comportamento dentro de certo conjunto de condições. Dessa forma, a simulação pode ser considerada como uma técnica de modelagem usada para representar o comportamento de um sistema, no tempo e no espaço, por meio de equações matemáticas (SANTOS, 2011; BACALHAU, 2015). Para Maia (2009), os modelos de simulação são expressões matemáticas estruturadas em sequência lógica que descrevem a operação de um sistema no espaço e no tempo. Tem como objetivo principal representar e prever o comportamento de um sistema, sob determinadas condições.

A principal vantagem da técnica de simulação está no fato de ser aplicável à sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrições, ao contrário dos modelos de otimização. A solução é encontrada iterativamente por meio de diversas simulações, sendo o critério de parada, geralmente, dependente da experiência e sensibilidade do usuário (BACALHAU, 2015).

Os modelos de simulação em recursos hídricos envolvem normalmente procedimentos de cálculo de balanço de massa em um sistema de rios e reservatórios. Nesse sentido, diversas abordagens podem ser encontradas quanto ao desenvolvimento destes modelos, como, por exemplo, a forma de obtenção das séries de vazões afluentes aos reservatórios, e a possibilidade de representação do modelo em uma plataforma gráfica, associada ou não a um sistema de informações geográficas (KAYSER, 2014).

Estudos de simulação, aplicados à recursos hídricos, tem sido cada vez mais comum no Brasil, combinado ou não com métodos de otimização. Vieira (2007) aplicou método de programação linear sequencial para obtenção de operação ótima dos reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB; Aragão (2008) avaliou a sustentabilidade hídrica da transposição do Rio São Francisco para a bacia do Rio Paraíba; Pessôa (2013) desenvolveu modelo de simulação para avaliar os efeitos de ações de saneamento básico na qualidade da água do Rio Salitre; Kayser (2014) analisou a outorga no Rio Bacia do Rio Quaraí e seus efeitos; Silva (2015) adotou modelo de simulação para proposição de compensação financeira como mecanismo de gestão de risco na alocação de água; Bacalhau (2015) simulou a operação de reservatórios da bacia do rio Pirapama.

Alguns modelos de simulação aplicados aos recursos hídricos já estão bastante difundidos como por exemplo: o MIKE BASIN, capaz de representar matematicamente um sistema de recursos para simular a hidrologia de uma bacia no espaço e no tempo, submetidos

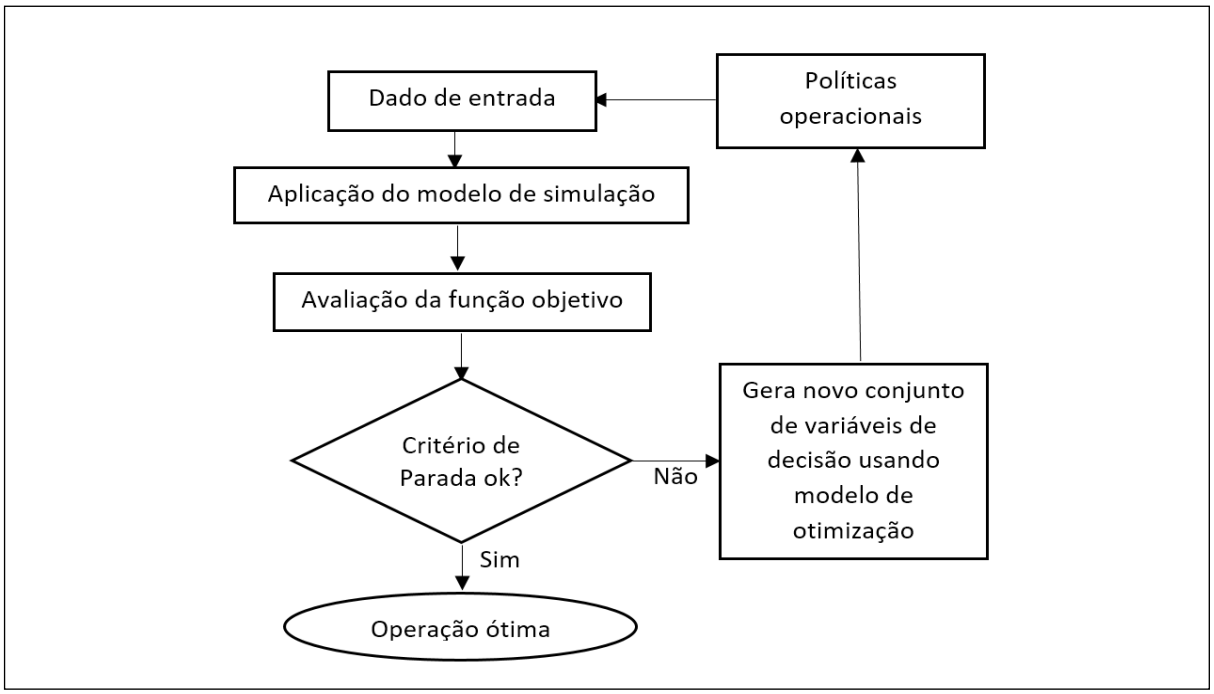
a várias situações de demanda de água; o HEC-5, desenvolvido para fornecer subsídios no dimensionamento e operação de sistema de reservatórios, e o IRAS, voltado para alocação de água em diversas situações (MAIA, 2009).

3.2.3 A combinação de otimização e simulação

O uso da otimização integrada à simulação é uma pratica recente. Porém, com o surgimento de programas práticos que utilizam a combinação da simulação com a otimização, a adoção de métodos integrados passou a ser cada vez mais comum. O uso desses softwares se inicia com a otimização para a configuração inicial do sistema, partindo para a simulação. O resultado da simulação realimenta a otimização até que o critério de parada seja atendido (FU, 2002; RODRIGUES, 2015). Para Vieira *et al*. (2012) a combinação de técnicas de simulação e otimização em sistemas de recursos hídricos, vem sendo difundida em programas computacionais e ganhou força devido à diversas vantagens desta integração.

De acordo com Singh (2014), a gestão ótima de recursos hídricos só pode ser alcançada pela aplicação combinada da simulação e otimização, com potencial de atender à problemas complexos de alocação de água. A combinação dos dois modelos tem sido usada inclusive em soluções de problemas multiobjetivo. Fayaed, El-shafie e Jaafar (2013), em seu trabalho de revisão de técnicas de otimização de reservatórios, apresentaram um esquema básico de integração entre modelos de simulação e otimização, reproduzido na Figura 6.

Figura 6 – Esquema básico de integração entre modelo de simulação e otimização



Fonte: Adaptado de Fayaed, El-shafie e Jaafar (2013).

Diversos modelos, que utilizam as técnicas combinadas de simulação e otimização, têm sido adotados em problemas de recursos hídricos. O MODSIM (LABADIE, 2004) e o Acquanet (ROBERTO *et al*., 2007), adaptado do MODSIM pelo LABSID/USP, são exemplos desta integração. Ambos utilizam técnicas de rede de fluxo baseados no algoritmo *out-of-kilter*, onde permite o desenho de redes com grande número de reservatórios, demandas e *links*. Outros exemplos são o MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute*; HEC-PRM desenvolvido pelo USACE *Hydrologic Engineering Center*; RESOP-II, SIMYLD-II, AL-V e SIM-V, desenvolvidos pelo *Texas Water Development Board;* e o ARSP, desenvolvido pelo *Acres International Corporation* (VIEIRA, 2007; VIEIRA, 2011; VIEIRA *et al*., 2012; VIEIRA; CURI, 2016). O SIGA - Sistema e Informações para Gerenciamento da Alocação de Água, desenvolvido pela FUNCEME, também utiliza técnicas de rede de fluxo e possui módulos de simulação e otimização para diferentes situações operacionais e de planejamento (CEARÁ, 2015a; PEREIRA; CAVALCANTI, 2016).

Um levantamento do estado da arte de modelos de simulação e combinação aplicados à recursos hídricos foi desenvolvido por Vieira e Curi (2016), utilizando técnicas documentais e exploratórias. O autor fez um comparativo das características de diversos modelos, tais como: a escala de tempo, as regras de operação de reservatórios, as técnicas e linguagens de programação, utilização de SIG, tipos de demanda, artifícios de linearização, processos hidrológicos e componentes dos reservatórios (Tabela 5).

Tabela 5 – Modelos de simulação e otimização aplicados a recursos hídricos.

Modelo	Ano	Tipo	Módulo de qualidade	Processos hidro-lógicos	Escala de tempo	Técnica progra-mação	SIG	Lingua-gem	Linea-rização
HEC-3	1985	MSO	-	E,P,I,Q	M,D,E	PNL	Não	Fortran	Não
HEC-5	1985	MSO	OD	E,P,I,Q	M,D,E	PNL	Não	Fortran	Não
HEC-ResSIM	1991	MSO	-	E,P,I,Q	M,D,E	PNL	Não	Java	Não
IRIS	1990	MSO	DBO, OD	E,P,Q	M,D	PNL	Não	-	Não
IRAS	1994	MSO	DBO, OD	E,P,I,Q	M,D	PNL	Não	-	Não
AQUATOOL	1996	MSO	-	E,P,I,Q	M	PL,PNL	Não	C++	Sim
WATERWARE	1996	MSO	DBO, OD	E,P,I,Q	D,E	PNL	Sim	Java	Sim
QUAL2E	1970	MSO	DBO, OD, FT, NT, CF	Q	M	PNL	Não	Fortran	Não
HEC-PRM	1991	RF	-	E,P,Q	M,D	PNL	Não	Basic	Sim
AQUARIUS	2000	SOM	-	E,P,Q	M	PL,PNL	Não	C++	Não
WEAP21	1988	RF	-	E,P,I,Q	M	PL,PNL	Não	-	Sim
MIKE BASIN	2005	RF	DBO, OD	E,P,I,Q	M,D	PL,PNL	Sim	Basic	Sim
RIVERWARE	1998	MSO	DBO, OD	E,P,Q	M,D,E	PL,PNL	Não	C++	Sim
MODSIM DDS	1984	RF	DBO, OD	E,Q	M,D,E	PL,PNL	Sim	C++	Sim
ACQUANET	1986	RF	DBO, OD, NT, PT, E.Coli, ST	E	M,D,H	PL,PNL	Sim	CSharp	Sim
RIVERHELP	2007	RF	DBO, OD	E,P,I,Q	M,D	PL,PNL	Sim	Basic	Sim
CALSIM	2000	SOM	-	E,Q	M	PL	Não	Java	Sim

Fonte: Adaptado de Vieira e Curi (2016).

Legenda: MSO – Modelo de Simulação e Otimização; RF – Rede de Fluxo; SOM – Simulação com otimização mensal; Módulo de Qualidade: DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; OD – Oxigênio Dissolvido; FT – Fósforo Total; NT – Nitrogênio Total; PT – Fósforo Total; ST – Sólidos Totais; E. Coli – *Escherichia Coli*; CF – Coliformes Fecais; Processos Hidrológicos: E – Evaporação; P – Precipitação; I – Infiltração; Q – Vazão Afluente;

Escala de Tempo: M – Mensal; D – Diário; E – Eventual; H – horário; Técnica de Programação: PL – Programação Linear; PNL – Programação Não Linear.

3.3 Modelos adotados na pesquisa

3.3.1 VYELAS (Volume-Yield Elasticity)

A disponibilidade de água e os riscos associados ao fornecimento de água são as preocupações mais importantes na gestão de recursos hídricos, especialmente na região semiárida (ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006).

Um dos modelos utilizados para o cálculo do rendimento dos reservatórios em função de sua forma geométrica é o VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*), desenvolvido por Araújo, Güntner e Bronstert (2006), que utiliza técnicas de modelagem estocástica para calcular a garantia e a eficiência dos reservatórios utilizando o balanço hídrico, conforme Equação 4 (DAGGENVOORDE, 2015).

$$\frac{dV}{dt} = \left(Q_A + Q_H + Q_{gW}\right) - \left(Q_{E,W} + Q_{E,D} + Q_S + Q_I + Q_G\right) \tag{4}$$

Onde:

V – Volume
t – Tempo
Q_A – Vazão afluente de escoamento superficial
Q_H – Vazão afluente diretamente da precipitação na lâmina d'agua
Q_{gW} – Vazão afluente proveniente de água subterrânea
$Q_{E,W}$ – Vazão de evaporação no período úmido
$Q_{E,D}$ – Vazão de evaporação no período seco
Q_S – Vazão vertida pelo sangradouro
Q_I – Vazão de infiltração
Q_G – Vazão regularizada liberada com garantia G

O modelo assume ainda algumas simplificações possíveis para climas semiáridos (Equações 5 e 6), resultando na forma simplificada do balanço hídrico apresentada na Equação 7 (DAGGENVOORDE, 2015).

$$Q_E = Q_{E,W} + Q_{E,D} \tag{5}$$

$$Q_H + Q_G \approx Q_{E,W} + Q_l \tag{6}$$

$$\frac{dV}{dt} = (Q_A) - \left(Q_{E,D} + Q_S + Q_G\right) \tag{7}$$

Outras simplificações viáveis para a região semiárida são adotadas, como por exemplo, considerar que toda a vazão afluente de escoamento superficial (Q_A) ocorre no período úmido. O modelo também adota a premissa que quando a capacidade máxima do reservatório é alcançada, toda vazão afluente incremental é convertida em vazão vertida pelo sangradouro (Q_S) e que não há retiradas de água o período úmido. Para o período úmido, as Equações 8 e 9 são ainda adotadas. (DAGGENVOORDE, 2015).

$$V_w = \max[(V_i + Q_A \Delta t_w), (V_{max})] \tag{8}$$

$$Q_s = \max[(0), (V_i + Q_A - V_{max})] \tag{9}$$

Onde:

V_w – Volume do reservatório ao final da estação úmida
V_i – Volume do reservatório no início da estação úmida
Δt_w – Duração da estação úmida
V_{max} – Capacidade máxima do reservatório
Q_S – Vazão vertida pelo sangradouro
Q_A – Vazão afluente de escoamento superficial

O modelo VYELAS é capaz de calcular a garantia relacionada a uma vazão de retirada. Para isso, utiliza vários dados de entrada: contribuição anual afluente ao reservatório determinado estocasticamente, volume inicial do reservatório, capacidade do reservatório, fator de forma (α), a evaporação em período seco, volume operacional mínimo, vazões anuais de retirada mínima e máxima, passo temporal e número de simulações (DAGGENVOORDE, 2015).

O volume do reservatório, no período seco, é reduzido devido à evaporação ($Q_{E,D}$) e as retiradas (Q_G). O balanço de água no período seco pode ser definido pela Equação 10 e reescrito pela Equação 11 evidenciando a área superficial (A) e o nível da água (h). Para considerar a influência da forma do reservatório, o fator de forma (α) também é considerado no modelo, conforme Equações 12, 13 e 14. Multiplicando-se a Equação 11 com dt, integrando-a pela duração do período seco (Δt_S) e substituindo a área (A) pela área média (Equação 15), obtêm-se a escrita final da Equação do balanço hídrico no período seco (Equação 16) (DAGGENVOORDE, 2015).

$$\frac{dV}{dt_d} = -\left(Q_{E,d} + Q_G\right) \tag{10}$$

$$A\frac{dh}{dt} = -A\frac{dE_d}{dt} - Q_G \tag{11}$$

$$\propto = \frac{\sum V_i}{\sum h_i^3} \tag{12}$$

$$V = \propto . h^3 \tag{13}$$

$$A = 3 \propto . h^2 \tag{14}$$

$$\bar{A} = \frac{3}{2}\alpha(h_t^2 + h_{t+\Delta t_d}^2) \tag{15}$$

$$h_{t+\Delta t_d}^3 + \frac{3}{2} h_{t+\Delta t_d}^2 . E = h_t^3 - \frac{3}{2} h_t^2 . E - \frac{Q_G}{\propto} \Delta t_d \tag{16}$$

Com base em todas as equações apresentadas (08 a 16) é possível calcular o volume da água no reservatório no período úmido e seco, bem como todas as vazões de entrada e saída. Além disso, dado o valor de vazão de retirada (Q_G), o modelo VYELAS permite o cálculo da garantia do reservatório (G) que é conceituado pela Equação 17.

Onde:

$$G = 1 - \frac{N_F}{N} \tag{17}$$

N_F - Número de unidade de tempo com falha
N – Número total de unidades de tempo

O procedimento estocástico adotado permite a geração sintética de vazões anuais afluentes utilizando o método de Monte Carlo (DE ARAÚJO; MEDEIROS, 2008; COSTA *et al*., 2009).

O Modelo VYELAS utiliza como dado de entrada as seguintes variáveis: vazão afluente média anual, coeficiente de variação do deflúvio afluente, fator de forma do reservatório, evaporação no período seco, capacidade de armazenamento, volume mínimo operacional, volume no início da simulação, valores máximo e mínimo de vazões regularizáveis simuladas, número de vazões regularizáveis simuladas, número de simulações do procedimento estocástico (COSTA *et al*., 2009). Os dados são montados em um arquivo de texto conforme estrutura apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada do modelo VYELAS

Parâmetros de entrada	Unidade
Vazão afluente média anual	hm^3/ano
Coeficiente de variação anual afluente	Adimensional
Fator de forma do reservatório	Adimensional
Evaporação no período seco	m/ano
Capacidade do reservatório	hm^3
Volume mínimo operacional	hm^3
Volume inicial no primeiro ano	hm^3
Nº de passos de vazão regularizada	Unidade
Vazão regularizada mínima	hm^3/ano
Vazão regularizada máxima	hm^3/ano
Nº de simulações do procedimento estocástico	Unidade

Fonte: Adaptado de Lopes e Araújo (2015).

3.3.2 WASA – Water availability in semi-arid environments

O modelo hidrológico WASA, abreviatura para o termo em inglês *Water Availability in Semi-Arid Environments* foi desenvolvido no âmbito do Projeto WAVES (*Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the North-East of Brazil)*, por meio de uma cooperação de pesquisadores da Universidade de Potsdam (Alemanha) e da Universidade Federal do Ceará (Brasil). Trata-se de um modelo físico, determinístico, semidistribuído, com calibração dispensável, voltado para o balanço hídrico de unidades de drenagem, capaz de representar os processos hidrológicos dominantes em paisagens áridas e semiáridas (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004; GÜNTNER *et al.*, 2004; MAMEDE, 2008; MÜLLER *et al.*, 2008; FRANCKE, 2009; MEDEIROS, 2009; MUELLER *et al.*, 2009; COSTA, A. C., 2012; COSTA, C. A. G., 2012; KLEINE, 2012; MALVEIRA; ARAÚJO; GÜNTNER, 2012; COSTA, A. C. *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2013; BRONSTERT *et al.*, 2014; SANTIAGO *et al.*, 2015; PILZ; FRANCKE; BRONSTERT, 2017).

O WASA foi inicialmente aplicado nos estados do Piauí e Ceará, totalizando uma área de aproximadamente 400.000 m^2 (GÜNTNER, 2002; COSTA, C. A. G., 2012). Güntner (2002) aplicou o WASA para os dados do estado do Ceará, considerando todos os processos hidrológicos representativos para o semiárido, conforme apresentado por Costa (2012): interceptação, utilizando o modelo de balanço hídrico simplificado de Güntner (2002); a evapotranspiração, baseado no modelo de duas camadas de Shuttleworth e Wallace (1985); evaporação de reservatórios superficiais baseado no modelo de Penman (1948) e Monteith (1965); a infiltração, utilizando o modelo de Green-Ampt (1911); a percolação entre horizontes de solo (ARNOLD *et al*., 1990); escoamento subsuperficial utilizando a relação simplificada para fluxo saturado baseada na equação de Darcy; e armazenamento subterrâneo utilizando uma modelagem simplificada com base em um modelo linear de armazenamento.

Diversos estudos utilizando o WASA têm sido aplicados no semiárido nordestino, em especial no Estado do Ceará. Resumidamente, os principais estudos adotados no semiárido estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais estudos no semiárido nordestino utilizando o modelo WASA

Autor(es)	**Título da Pesquisa**
Güntner (2002)	Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil.
Güntner *et al*. (2004)	Simple water balance modeling of surface reservoir systems in a large data-scarce semi-arid region
Güntner e Bronstert (2004)	Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas
Mamede (2008)	Reservoir sedimentation in dryland catchments:modelling and management
Malveira (2009)	Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: Estudo de caso da bacia do açude Orós
Francke (2009)	Measurement and modelling of water and sediment fluxes in meso-scale dryland catchments
Medeiros (2009)	Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas
Bronstert *et al*. (2009)	Integrated modelling of runoff and sediment fluxes across scales
Mueller *et al*. (2010)	Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model
Medeiros *et al*. (2010)	Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model
Krol et al. (2011)	Sustainability of small reservoirs and large-scale water availability under current conditions and climate change
Lima Neto, Wiegand, de Araújo (2011)	Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin
Malveira, Araújo e Güntner (2012)	Hydrological impact of a high-density reservoir network in semiarid Northeastern Brazil
Costa C. A. G. (2012)	Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona de raízes em condições naturais de caatinga conservada
Kleine (2012)	Monitoring of seasonal changes in water surface areas with TerraSAR-X in a semi-arid catchment
Araújo (2012)	Estimativa do assoreamento de um pequeno reservatório do semiárido rural através do estudo dos solos e de fontes de sedimento
Costa *et al*. (2013)	Regionalização de modelagem hidrológica semidistribuída para todo o estado do Ceará
Noronha *et al*. (2013)	Paralelização de um algoritmo de calibração multiobjetivo para a previsão operacional de vazão de rios
Souza *et al*. (2013)	Geração automatizada de dados de entrada para o modelo WASA-SED
Bronstert *et al*. (2014)	Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments
Medeiros, Araújo e Andrello (2014)	Uncertainties of the 137 Cs technique for validation of soil redistribution modelling in a semiarid meso-scale watershed
Medeiros *et al*. (2014)	Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe basin, Brazil
Santiago *et al*. (2015)	Validação de um modelo hidrológico regional para grandes bacias no Estado do Ceará
Lopes e Araújo (2015)	Escassez hídrica e assoreamento em reservatório do semiárido
Araújo, Bronstert e Medeiros (2016)	Rainfall-gauge density and performance of a process-oriented model in a semi-arid basin

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

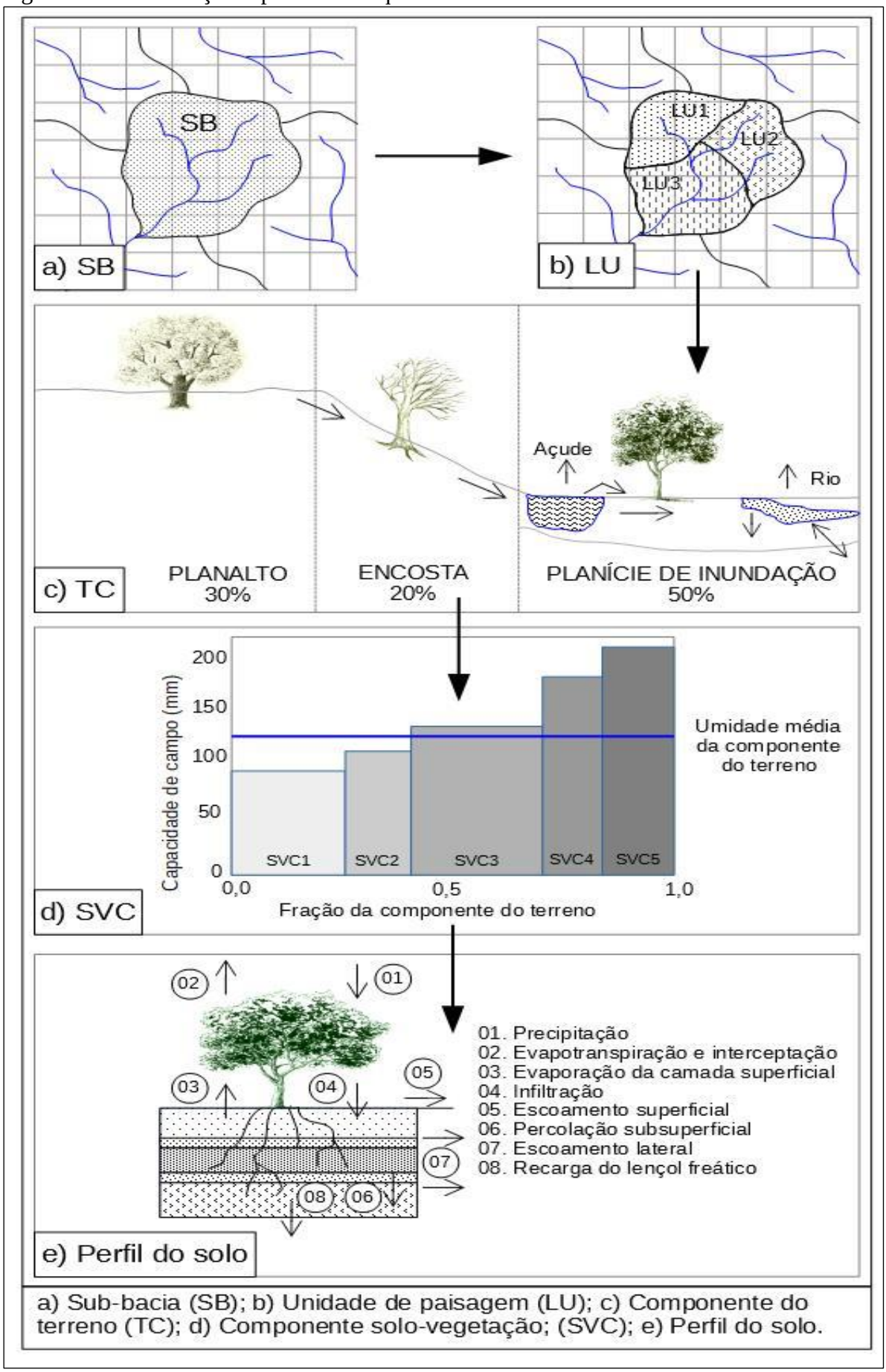
O modelo WASA é voltado principalmente para representar o processo chuva-deflúvio e balanço hídrico diário, iniciando com o cálculo da umidade do solo, influenciado pelas trocas hídricas entre solo, vegetação e atmosfera. A forma do terreno, a litologia e a estrutura das camadas de solo constituem as bases do modelo de escoamento que, quando submetidas aos eventos de precipitação, geram os fluxos verticais, laterais superficiais e subsuperficiais (COSTA, C. A. G., 2012).

O modelo WASA, posteriormente evoluiu para o WASA-SED (*Water Availability in Semi-arid Areas with Sediment Dynamics Component*) , versão que inclui o modelo de erosão de encostas, transporte, distribuição e deposição de sedimentos baseado na Equação Universal de Perda de Solo Modificada (*MUSLE*) apresentado por Williams (1975). O WASA-SED tem sido utilizado para estimar o aporte de nutrientes em reservatórios (MAMEDE, 2008; MEDEIROS, 2009; MUELLER *et al.*, 2009; COSTA, C. A. G., 2012; BRONSTERT *et al.*, 2014).

A representação da variabilidade espacial de uma área no WASA é realizada por meio de uma discretização espacial hierarquizada em cinco níveis de escala (Figura 7): 1 - Sub-bacia (área de estudo); 2 - Unidade de Paisagem (LU); 3 - Componentes do Terreno (TC); 4 - Componente Solo-Vegetação (SVC); 5 – Perfil do solo. (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004; MAMEDE, 2008; FRANCKE, 2009; COSTA, C. A. G., 2012; SOUZA *et al.*, 2013; BRONSTERT *et al.*, 2014; SANTIAGO *et al.*, 2015).

Conforme descrito por Güntner (2002), o primeiro nível de discretização (SB) é representado pela área de estudo delimitada a partir de um exutório (reservatório ou seção de um rio). A decomposição direta deste nível em unidades de paisagem (LU) representa segundo nível de discretização, agrupando componentes semelhantes de solo, vegetação, relevo e litologia. O terceiro nível de discretização consiste em frações das unidades de paisagem com semelhantes características de gradiente de declividade, solo e vegetação, nomeadas de componentes de terreno (TC). O quarto nível é chamado de componente solo-vegetação (SVC) e representa frações do nível anterior a partir de subtipos do solo, vegetação e cobertura do solo. O quinto e último nível é caracterizado pelo perfil do componente solo-vegetação, sendo importante o conhecimento das suas diferentes camadas, zonas de raízes e profundidade do solo.

Figura 7 – Discretização espacial hierarquizada no WASA



Fonte: adaptado de Güntner (2002).

A sequência temporal do modelo WASA foi apresentada de forma detalhada por Güntner (2002), conforme resumo na Tabela 8.

Tabela 8 – Sequência temporal do modelo WASA

Passo	Procedimento
1	Iniciar com o TC na maior cota topográfica dentro da LU e executar os passos 2 a 10 para todos os SVCs do TC.
2	Atualizar a umidade do solo de todos os horizontes devido ao escoamento subsuperficial lateral, produzido no passo anterior, dos TCs a montante e dos SVCs do mesmo TC. Se, devido a este escoamento, o conteúdo de água no solo de um perfil exceder sua capacidade de suporte, o escoamento lateral excedente se tornará escoamento superficial.
3	Determinar a retenção da precipitação na forma de interceptação e calcular a evaporação da parcela interceptada
4	Determinar o excedente na forma de escoamento superficial gerado pela precipitação ou pelo escoamento superficial lateral, produzido no passo anterior, dos TCs a montante para uma fração saturada do SVC, conforme determinado no passo anterior.
5	Calcular a infiltração a partir da precipitação e escoamento superficial lateral do TC a montante e de outros SVCs do mesmo TC. Em paralelo, a rotina de infiltração determinará o escoamento superficial ocasionado pelo excesso de infiltração e saturação, se o perfil do solo se tornar saturado neste passo.
6	Atualizar a umidade do solo dos horizontes mais altos e possivelmente mais profundos pela quantidade de água infiltrada.
7	Calcular a transpiração e evaporação das plantas na superfície do solo, ambos também como função da umidade do solo atual e atualizar novamente a umidade do solo de todos os horizontes.
8	Calcular, para cada horizonte de solo, o fluxo de água vertical para o próximo horizonte mais profundo ou para águas subterrâneas profundas e determinar os escoamentos subsuperficiais para SVCs adjacentes e para TCs a jusante ou para os rios. Atualizar a umidade do solo novamente para todos os horizontes.
9	Determinar a fração saturada do SVC como função da umidade do solo atual de seu perfil representativo de solo.
10	Adicionar os escoamentos de saída de todos os SVCs do TC atual (escoamento superficial e subsuperficial) e distribuir entre escoamento para o rio e para TCs a jusante.
11	Repetir os passos 2 a 10 para todos os SVCs do próximo TC a jusante.

Fonte: Güntner (2002).

3.3.3 SIGA - Sistema de informações para gerenciamento da alocação de água

O SIGA (Sistema e Informações para Gerenciamento da Alocação de Água) é um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), com a participação de vários pesquisadores e especialistas, com o intuito de apoiar o planejamento de recursos hídricos e a tomada de decisão. A plataforma computacional possui modelos e ferramentas compostos por módulos integrados, concebidos com base em programação orientada a objeto (BARROS *et al.*, 2013; CEARÁ, 2015; PEREIRA; CAVALCANTI, 2016). Desde 2005, suas atualizações periódicas, para atender as demandas de gestores públicos, tem aprimorado suas funcionalidades, sendo possível o estudo de diversos cenários de otimização e simulação.

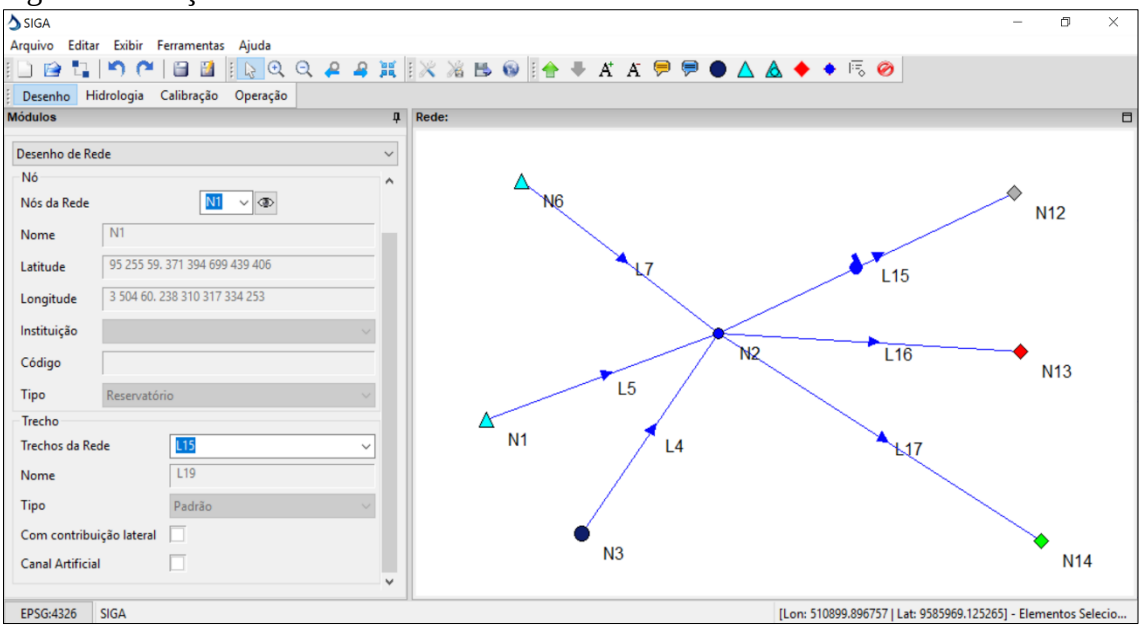
O SIGA foi concebido com cinco módulos distintos: Desenho de Rede, Hidrologia, Calibração, Operação de Sistemas e Resultados (PEREIRA; CAVALCANTI, 2016). O funcionamento de cada módulo está descrito nos subitens a seguir.

3.3.3.1 Módulo Desenho de Rede

O primeiro contato do usuário com a ferramenta ocorre no módulo "Desenho de Rede". Este ambiente possibilita a representação visual da rede de fluxo do sistema hídrico por meio de *links* (trechos naturais ou artificiais) e nós (demandas, fontes hídricas e junções de *links*). O traçado da rede de fluxo pode ser feito de forma esquemática, sem a necessidade de georreferenciamento dos pontos. Porém, a ferramenta possui interface SIG que permite a inserção de *shapefiles* e *rasters* facilitando o posicionamento dos nós e traçado da rede (Figura 8) de forma mais realista e amigável (CEARÁ, 2015; PEREIRA; CAVALCANTI, 2016).

A partir da topologia da rede, são definidas as relações entre seus componentes, permitindo a representação dos diversos percursos da água em um sistema hídrico. Cada componente da rede possui propriedades específicas que irão influenciar a modelagem, como por exemplo, dados de cotas, áreas e direção de fluxo. O usuário pode ainda escolher diferentes tipos de elementos de fornecimento de água (reservatórios, lagos naturais e bacias hidrográficas), de demanda (consumo humano, animal, industrial e irrigação) e de transporte (*links* naturais e artificiais, com ou sem bombeamento, com ou sem contribuição lateral, com ou sem propagação de onda) (CEARÁ, 2015).

Figura 8 – Traçado da rede de fluxo no SIGA



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O ambiente de desenho de rede também utiliza uma simbologia para caracterizar cada entidade. O triângulo azul se refere ao reservatório, o ponto azul a junção de *links*, o ponto preto uma bacia e o losango a demanda. As diferentes cores dos losangos representam o tipo de demanda que podem ser: abastecimento humano, industrial, agrícola e animal. Há ainda diferentes cores para trechos naturais (*link* azul) e artificiais (*link* preto).

3.3.3.2 Módulo Hidrologia

O módulo de hidrologia do SIGA permite ao usuário a modelagem de processos físicos do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica, tais como a precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e de base. As vazões afluentes de uma bacia ou sub-bacia estão diretamente ligados aos modelos hidrológicos incorporados neste módulo, que são: SACR (*Sacramento Model*), também conhecido como SAC-SMA *(Sacramento Soil Moisture Accounting Model)*; WASA *(Water Availability in Semi-arid Environments)*; SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*); GWLF (*Generalized Watershed Loading Functions*); HYMOD (*Hydrological Model)* e CN3S (*Curve Number with Three Step Antecedent Precipitation*) (CEARÁ, 2015).

Os modelos hidrológicos incorporados ao SIGA podem ser configurados com passos temporais horários, diários ou mensais. A descrição resumida de cada modelo com suas respectivas discretizações temporais estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Modelos hidrológicos incorporados ao SIGA

Modelo	**Descrição**	**Passo temporal**
SACR ou SAC-SMA	Modelo espacialmente concentrado com ênfase na umidade do solo para quantificação do escoamento superficial por meio da representação do solo na forma de dois reservatórios: o superior, onde ocorre os processos de evaporação, escoamento superficial e subsuperficial e percolação; e o inferior, onde ocorre os processos de recarga do aquífero e escoamento de base.	horário, diário e mensal
WASA	Modelo semidistribuído e determinístico, baseado em processos físicos do clima semiárido. Utiliza parâmetros extraídos de características fisiográficas da bacia por meio de uma discretização hierárquica espacial.	horário, diário e mensal
SMAP	Modelo concentrado que representa o armazenamento e os fluxos de água na bacia por meio de reservatórios lineares fictícios. Utiliza a precipitação diária e evaporação potencial como dados de entrada e seis parâmetros que precisam ser calibrados.	horário, diário e mensal
GWLF	Modelo semidistribuído adaptado da abordagem “número de curva” (CN: *Curve Number*), especificada pelo Serviço de Conservação do Solo dos EUA. As equações são aplicadas para cada área fonte com características homogêneas com relação ao uso e tipo de solo, obtendo-se o escoamento superficial por sub-bacia.	diário

Modelo	Descrição	Passo temporal
HYMOD	Modelo probabilístico baseado na formação de escoamento superficial a partir do excesso de infiltração calculado. A variabilidade espacial da capacidade de armazenamento de água na bacia é representada por uma função de distribuição cumulativa.	diário e mensal
CN3S	Modelo determinístico baseado na abordagem "número de curva" (CN: *Curve Number*), especificada pelo Serviço de Conservação do Solo dos EUA. Possui seis parâmetros que precisam ser calibrados para a determinação das vazões.	mensal

Fonte: adaptado de Ceará (2015).

3.3.3.3 Módulo Calibração

A calibração é uma etapa do processo de modelagem para ajuste dos parâmetros do modelo, com a finalidade de obter uma representação mais realista possível dos fenômenos estudados. Tal tarefa é muitas vezes complexa devido a quantidade de parâmetros exigidos por certos modelos ou pelos inúmeros passos para tratamento dos dados e para a realização dos cálculos. O SIGA possui um módulo de calibração automática para os modelos hidrológicos SMAP (passo diário e mensal), HYMOD (passo diário) e CN3S (passo mensal) (CEARÁ, 2015).

Os métodos utilizados pelo SIGA para calibração dos parâmetros são baseados em dois algoritmos evolucionários multiobjetivos de otimização: MOPSO (*Multiobjective Particle Swarm Optimization*), adaptado de sua versão uniobjetivo (PSO), baseado em Nuvem de Partículas; e o MOHBMO (*Multiobjective Honey-bee Mating Optimization*), adaptado de sua versão uniobjetivo (HBMO), baseado no comportamento de acasalamento de abelhas. O algoritmo MOPSO se baseia no comportamento social de animais dispersos em um ambiente, mas que se agrupam para formar seu ninho ou buscar alimento. Já o MOHBMO segue o comportamento de uma colmeia, gerando um conjunto de soluções aleatórias (população inicial), que resultando em novas soluções em um processo iterativo (CEARÁ, 2015).

O SIGA permite que se escolha a Equação do Coeficiente Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e do erro quadrático médio como a função objetivo para calibração dos modelos, para diferentes tipos de série de dados: série completa, curva de permanência, valores de pico, volumes mensais, volumes anuais e para valores acima ou abaixo da mediana.

O WASA, sendo um modelo físico, não necessita da etapa de calibração de parâmetros, podendo ser estimados a partir de dados fisiográficos (GÜNTNER; BRONSTERT, 2004; COSTA, C. A. G., 2012; MALVEIRA; ARAÚJO; GÜNTNER, 2012).

3.3.3.4 Módulo Operação

O módulo de operação compreende 4 modalidades de simulação e otimização: simulador (regras), simulador (janela), otimizador (regras) e otimizador (prioridades).

As duas modalidades de simulação (regras e janela) utilizam método iterativo de convergência para atender às restrições da equação do balanço hídrico (volumes superiores ao mínimo e inferiores ao máximo e não negatividade) (CEARÁ, 2015). A diferença principal entre as duas modalidades é que a simulação do tipo "janela" permite a fixação de uma janela temporal de análise dos dados, permitindo uma interpretação diferenciada dos resultados.

Para a simulação, a ferramenta requisita pré-estabelecimento de regras de alocação (rateio entre demandas) e de liberação, que poderá ser um valor constante ou variável, uma garantia ou um valor vinculado a um gatilho de volume mínimo.

O método de simulação do SIGA requer diversos dados de entrada para reservatórios, links, demandas e sub-bacias (Tabela 10), podendo ser inseridos em bloco ou individualmente.

Tabela 10 – Dados de entrada do SIGA para o método de simulação

Entidade	Dados de entrada
Reservatório	Série de vazão afluente, série de precipitação, série de evaporação, volume inicial, volume mínimo, volume máximo, vazão máxima liberada, curva cota-área-volume (CAV), regra de liberação (vazões periódicas, dependente de armazenamento, constante, baseado em garantia, série de vazões), regras de alocação (rateio de liberação em diferentes situações).
Demanda	Série de vazões de demanda, série de vazão afluente (não obrigatório), retorno de vazão não-consuntiva (não obrigatório).
Link	Perda em trânsito (não obrigatório), Capacidade mínima e máxima (não obrigatório), vazão afluente (não obrigatório).
Bacia	Série de vazão afluente, regras de liberação (não obrigatório), regras de alocação (não obrigatório).
Junção	Regras de alocação (não obrigatório).

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Já as duas modalidades de otimização (regras e prioridades), além de compreender etapas já comentadas das modalidades de simulação, também agrega rotinas de otimização. No caso da modalidade "regras", utiliza-se uma função multiobjetivo para maximizar ou minimizar diferentes objetivos configuráveis: perdas por evaporação, custo de bombeamento, número de falhas, garantia de atendimento, volume não atendido, benefício e volume vertido. A otimização pode ser realizada por dois diferentes algoritmos evolucionários: MOPSO (*Multiobjective Particle Swarm Optimization*) e SMPSO (*Speed-constrained Multiobjective PSO)*. Já a

otimização do tipo “prioridade”, é baseada no modelo de rede de fluxo e utiliza o algoritmo de programação linear primal-dual *Out-of-Kilter*. Neste modelo, a operação do sistema segue uma hierarquia de prioridades estabelecida pelo usuário, para os reservatórios e demandas.

3.3.3.5 Módulo Resultados

O módulo de resultados permite a visualização de forma gráfica e tabulada dos resultados de simulação e/ou otimização dos cenários montados. Segundo Pereira e Cavalcanti (2016), a visualização dos resultados pode ser feita de duas formas:

- Individualizada – O usuário pode visualizar os resultados individualmente de cada entidade da rede (reservatório, demanda, junção, *link* ou bacia) bastando selecionar o objeto desejado e acessando o botão resultados;
- Geral – O usuário acessa, através do módulo de resultados, todas as entidades em conjunto. Dessa forma, é possível cruzar resultados distintos, tais como atendimento, escassez, liberações, volumes evaporados e precipitados e o número de falhas de atendimento.

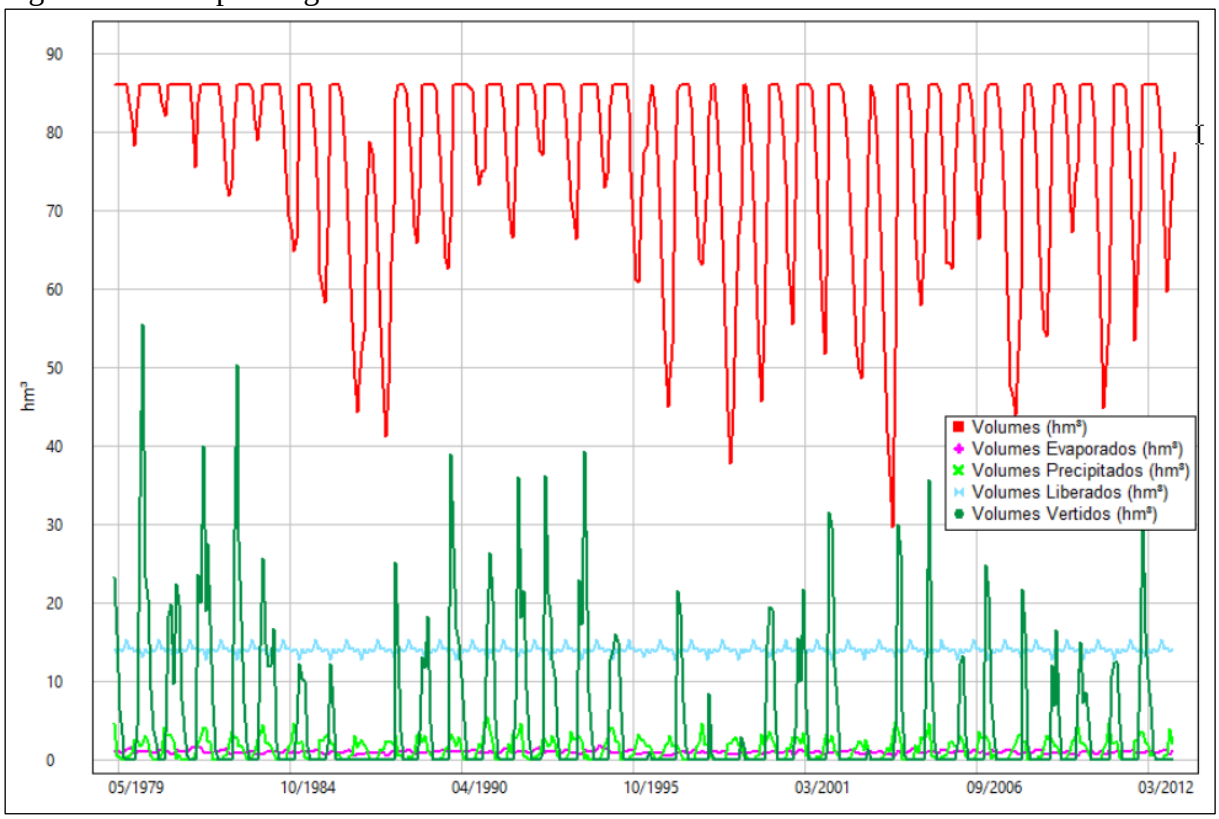
O módulo de resultados fornece, para os diversos cenários montados, os resultados do balanço hídrico com a determinação de suas principais variáveis (Tabela 11), tanto na forma de gráfico (Figura 9) quanto na forma de tabela exportável. Com base no balanço hídrico é possível determinar indicadores importantes, tais como a garantia do reservatório para a vazão liberada, a vazão regularizada, quantas vezes o reservatório atingiu o nível mínimo ou verteu, quantas vezes a demanda não foi atendida ou foi abastecida em excesso.

Tabela 11 – Resultados obtidos pelo modelo SIGA por tipo de entidade de rede

Entidade	Resultados
Reservatório	Volumes: inicial, final, útil, % do volume total, não controlado a montante, controlado a montante, vertido, liberado, evaporado, precipitado; vazões: afluente, controlada a montante, vertida, liberada; outras grandezas: área e cota.
Demanda	Vazão afluente, demanda-meta, demanda atendida, escassez da oferta, vazão efluente e excesso de atendimento.
Link	Vazão afluente, vazão efluente e perda em trânsito.
Bacia	Não há resultados para esta entidade.
Junção	Vazão afluente e efluente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 9 – Exemplo de gráfico do módulo de resultados do SIGA



Fonte: Pereira e Cavalcanti (2016).

3.3.3.6 Acoplamento do WASA ao SIGA

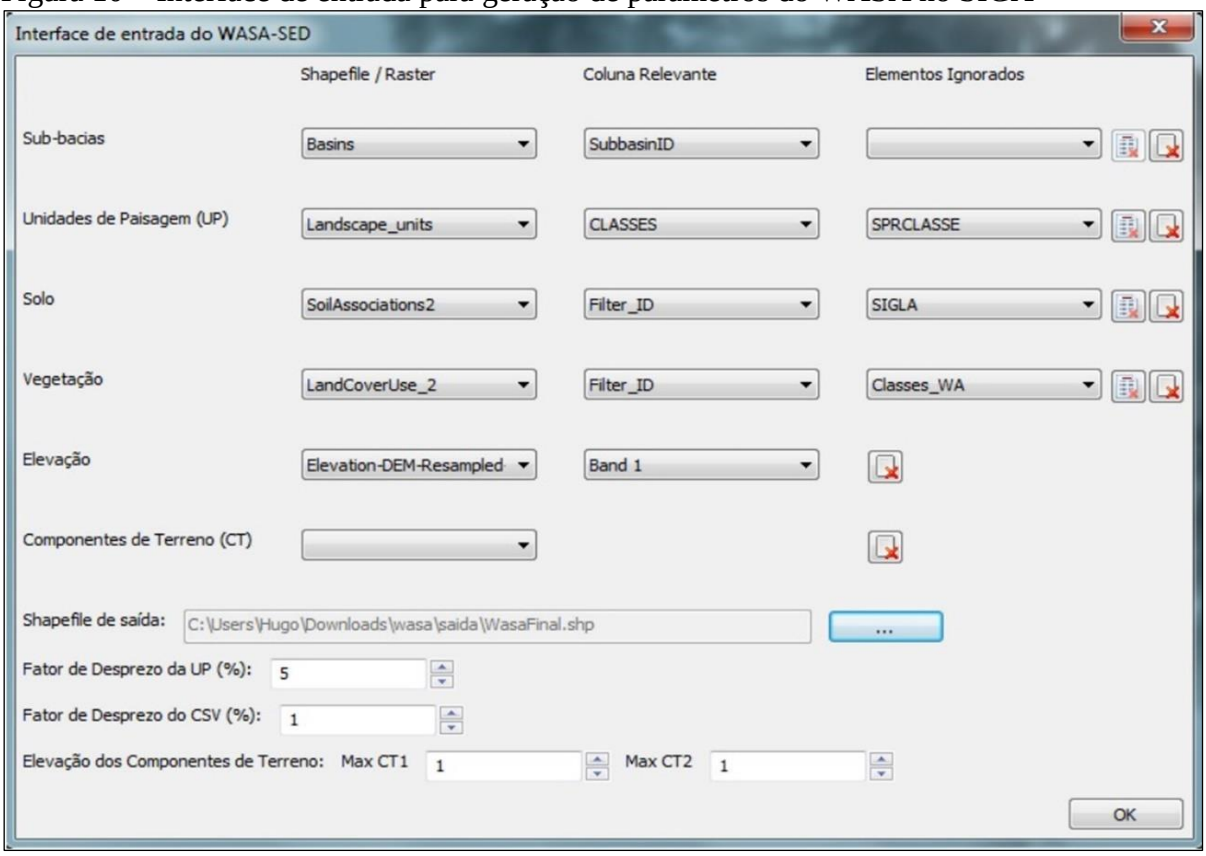
O WASA é um dos modelos hidrológicos incorporados ao SIGA sendo bastante utilizado por ser um modelo físico cujos parâmetros podem ser extraídos a partir de características fisiográficas da área de estudo. Essa peculiaridade permitiu que os parâmetros do WASA fossem obtidos a partir de arquivos *shapefiles* e *rasters* manipulados dentro da abordagem de discretização hierarquizada imposta pelo modelo.

Por meio de uma plataforma gráfica baseada em SIG (Sistema de Informação Geográfica) e uso de bibliotecas GDAL/OGR (*Geospatial Data Abstraction Library*), o SIGA obtém os parâmetros do modelo de forma automática. Os dados de entrada (*shapefiles* e *raster*) são inseridos em uma interface para a geração dos parâmetros do WASA no SIGA conforme apresentado na Figura 10 (SOUZA *et al*., 2013).

Seguindo a discretização hierarquizada do modelo WASA, o SIGA inicialmente executa a intersecção entre os polígonos das sub-bacias e os das unidades de paisagem, gerando um shapefile de unidade de paisagem LU2 (*Landscape Unit 2*). Sequencialmente, o *raster* correspondente à elevação é confrontado com cada polígono de unidade de paisagem (LU2), resultando em um novo *raster*, com seus *pixels* classificados em: *lowland, midland e highland*, sendo depois convertido em *shapefile* do tipo polígono nomeado de preTC. O processo de

discretização prossegue com a intersecção do polígono preTC com LU2, gerando os componentes de terreno (TC) (SOUZA *et al*., 2013).

Figura 10 – Interface de entrada para geração de parâmetros do WASA no SIGA

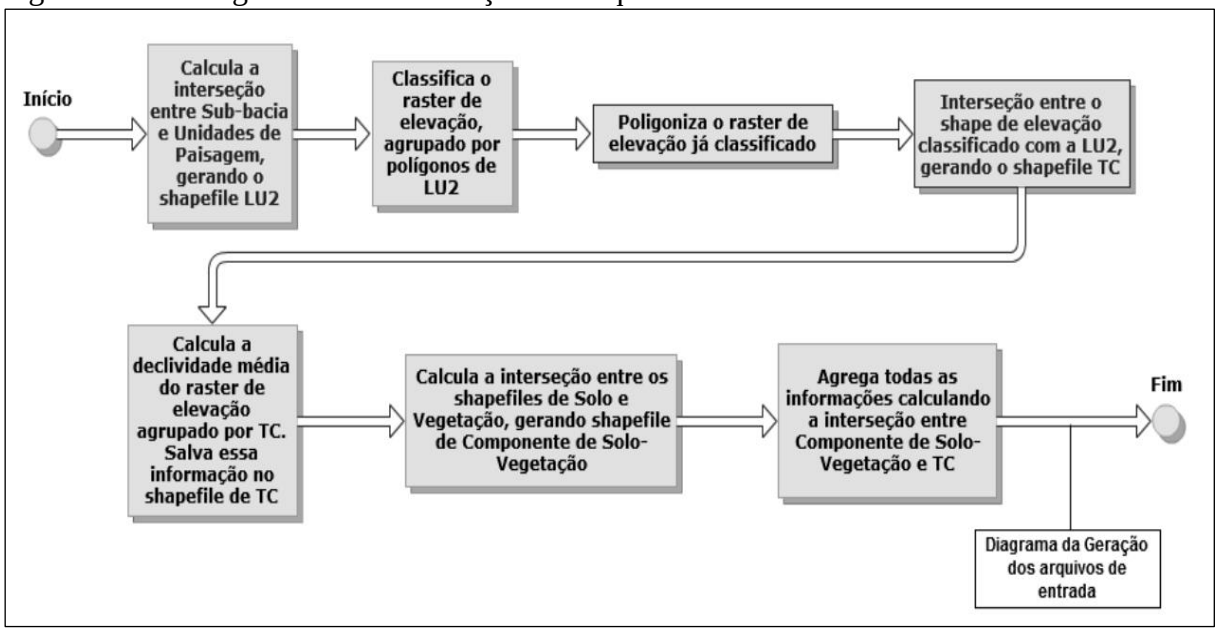


Fonte: Souza *et al* (2013).

O arquivo *raster* de elevação também possui uma função de gerar um *raster* de declividade, que, após ser convertido em polígono, incorpora os valores de declividade para os componentes de terreno (TC). Essa rotina é possível com o auxílio da ferramenta GDALDEM da biblioteca GDAL. Dessa forma, o *shapefile* de componente de terreno (TC) passa a ter, além da classificação (*lowland, midland e highland*), informações de declividade média (SOUZA *et al*., 2013).

A última etapa de discretização no SIGA, utiliza os *shapefiles* do tipo polígono contendo informações de vegetação, gerando um novo *shapefile* chamado de componente solo-vegetação (CSV). Uma última intersecção é feita entre os polígonos do *shapefile* CSV e os polígonos de componentes de terreno (TC), gerando o *shapefile* final (SOUZA *et al*., 2013). O fluxograma do processo de discretização hierárquica do WASA no SIGA é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma de discretização hierárquica do WASA no SIGA



Fonte: Souza *et al* (2013).

Estudos de calibração automática do WASA utilizando ambiente SIG, para sua regionalização, tem sido desenvolvidos no Ceará, como por exemplo o de Costa *et al.* (2013). Os pesquisadores utilizaram o algoritmo multiobjetivo MOPSO e o coeficiente de Nash-Sutcliff (NS) como função objetivo, obtendo valores de 0,75 para validação e de 0,80 para calibração entre os anos de 2000 e 2010.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Justificativa da escolha da área de estudo

Optou-se por adotar a bacia hidrográfica como área do estudo por se tratar de uma unidade de planejamento de aceitação mundial, com contorno geográfico bem definido, de fácil reconhecimento e caracterização.

A área escolhida para o estudo foi a bacia do rio Acaraú, devido as suas características ambientais heterogêneas que reforçam sua representatividade. Tais características estão descritas a seguir:

- Representa, tanto os fatores ambientais do semiárido, quanto do litoral cearense;
- Possui 15 açudes monitorados pela COGERH para usos múltiplos (abastecimento humano, industrial e agrícola).
- Possui 20 Estações de Tratamento de Água (ETA) e sete Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), que afetam e são afetadas pelo sistema hídrico;
- Possui municípios heterogêneos quanto ao porte, com destaque para Sobral que é a quinta cidade mais populosa do Ceará, com mais de 200.000 habitantes;
- Possui relevante área de drenagem, com 14.423 km^2, correspondendo a aproximadamente 10% do território cearense, drenando as águas de 28 municípios, sendo 11 de forma integral;
- É a bacia cearense com maior amplitude altimétrica, variando do nível do mar a 1.145 m, a máxima do Estado, no Pico do Oeste, Serra das Matas;
- Possui densa rede de drenagem fluvial, tendo como rio principal o Acaraú, com extensão de 315 Km no sentido sul-norte, com afluentes importantes, como o Rio Groaíras, Jacurutu, Macacos e Jaibaras;
- Tem comportamento heterogêneo quanto à precipitação, quando se compara a região sul da bacia, detentora de regimes mais regulares e picos pluviométricos superiores a 1000mm, com a região norte da bacia;
- A maioria dos reservatórios estão em estado eutróficos ou hipereutróficos, inclusive o açude Araras (891 hm^3) responsável por mais de 60% da capacidade de acumulação da bacia;
- A bacia possui vasto sistema de transferência com 15 adutoras e mais de 300 km de rio perenizado;

- Existem 10 açudes capazes de acumular água em determinado ano e guardar parte do volume acumulado para anos subsequentes;
- A bacia possui diferentes tipos de demandantes de água e geradores de efluentes: sedes municipais, indústrias e perímetros irrigados.

Com base nas razões supramencionadas, a bacia do rio Acaraú possui diversas variáveis ambientais que justificam o desenvolvimento de um modelo de operação que auxilie o gestor a respeitar as garantias mínimas dos seus reservatórios e a atender as suas múltiplas demandas.

4.2 Resumo metodológico

A metodologia da pesquisa consistiu inicialmente na caracterização da bacia do rio Acaraú com informações de localização, população, hidrografia, reservatórios, clima, geologia, hidrogeologia, relevo, solo, vegetação, saneamento básico, agricultura e pecuária. Essa caracterização geral permitiu uma melhor compreensão das variáveis mais relevantes do estudo, como por exemplo, a identificação dos reservatórios estratégicos, os tipos e magnitudes de demanda, o tipo de aquífero e sua influência na modelagem de água de superfície, as possibilidades de reúso de águas residuárias como fonte hídrica alternativa, e a interconexões entre rios, reservatórios e demandas.

Baseado nesta caracterização, foi elaborado um SIG (Sistema de Informação Geográfica) em formato *shapefile*, com as principais informações fisiográficas da bacia, utilizando o Software QGIS versão 2.18, para auxiliar na montagem da rede de fluxo no SIGA.

A etapa seguinte consistiu na construção gráfica do sistema hídrico da bacia do rio Acaraú no Software SIGA (Sistema e Informações para Gerenciamento da Alocação de Água), composto basicamente de reservatórios (fontes), *links* (rios, canais e tubulações), e demandas (população a ser abastecida, polos industriais, perímetros irrigados e demandas difusas). A partir da rede desenhada, procedeu-se com a obtenção de dados de entrada requeridos pelo SIGA (Tabela 12).

Tabela 12 – Principais dados de entrada do SIGA e suas fontes

Fonte	Período	Dados de entrada
FUNCEME	01/01/1980 a 31/08/2017	Série diária de vazões afluentes gerada pelo WASA e precipitações de cada sub-bacia
INMET	01/01/1980 a 31/08/2017	Série diária de evaporação a partir de três estações meteorológicas
COGERH	2011 a 2017	Curva cota-área-volume (CAV), volumes mínimos, máximos e iniciais (01/01/2018) dos reservatórios, vazões liberadas praticadas pela COGERH e demandas de água bruta (abastecimento humano, perímetros irrigados, indústrias)
CAGECE/SAAE	2010, 2016	Dados de demandas de abastecimento humano, consumo *per capita* de água, perdas no tratamento e distribuição
Própria (dados calculados)	-	Vazão máxima outorgável (90% do Q_{90}), estimativa de perda em trânsito estimada, série de evaporação ajustada (com preenchimento de falhas)

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Foram ainda utilizados dados de população, projeção populacional e de crescimento do PIB industrial do Ceará, fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), entre os anos 2010 a 2017, para corrigir as vazões de demanda de abastecimento humano industrial para o ano de 2017.

Para se obter resultados mais conservadores, as demandas de abastecimento humano foram determinadas como o maior valor entre as vazões controladas pela CAGECE na entrada das ETAs (Estações de Tratamento de Água), as vazões monitoradas pela COGERH e as vazões estimadas pela população atendida, todas corrigidas para o ano de 2017.

A partir da rede desenhada, procedeu-se com a inserção dos dados de entrada requeridos pelo SIGA, como por exemplo, a série diária de precipitação e evaporação, as vazões de entrada dos reservatórios geradas pelo modelo WASA, curvas CAV (cota-área-volume) dos reservatórios, volumes mínimos, máximos e de partida das simulações, regras de liberação e de alocação de água.

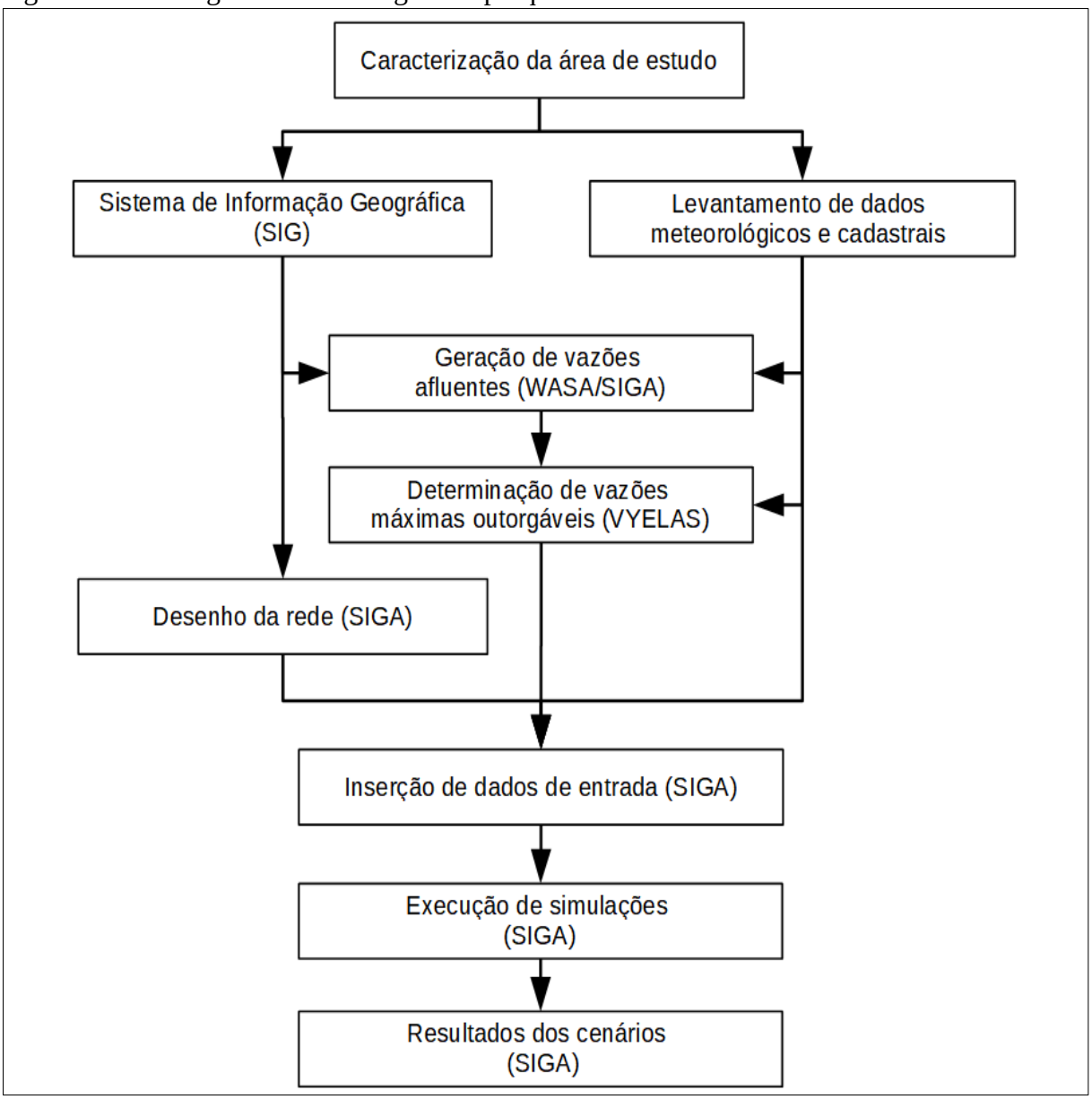
Um aspecto inovador da pesquisa foi analisar os efeitos do retorno das águas residuárias ao sistema hídrico, após o uso da água por parte das diferentes demandas. A prática comum de não considerar este aspecto em simulações de alocação de água corroboram para cenários mais pessimistas e menos realistas. O retorno de água ao sistema hídrico pode ser considerado, na prática, um reúso indireto não planejado, visto não existir um controle qualitativo e quantitativo do impacto a jusante das vazões de retorno. Outra particularidade do estudo foi avaliar os efeitos quantitativos de propostas de reúso direto não potável (indústrias e perímetros irrigados).

Optou-se por utilizar a modalidade simulador (regras) no SIGA, considerando limite de vazão a ser liberada de 90% do Q_{90}, conforme Decreto nº 31.076/2012 que regulamenta a lei nº14.844/2010 do Estado do Ceará. Como o SIGA permite a configuração de uma garantia mínima (Q_{90}) como regra de liberação, mas não o percentual de 90% deste valor

(90% do Q_{90}), tal limite foi calculado pelo modelo estocástico VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*), desenvolvido por Araújo, Güntner e Bronstert (2006).

Para um melhor entendimento das etapas da pesquisa, o estudo foi estruturado conforme fluxograma apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As simulações operacionais foram executadas em dois cenários que diferem entre si pela inclusão do reúso de águas:

— Cenário 1: Simulações operacionais sem considerar o reúso indireto e direto não potável para fins industriais e agrícolas;

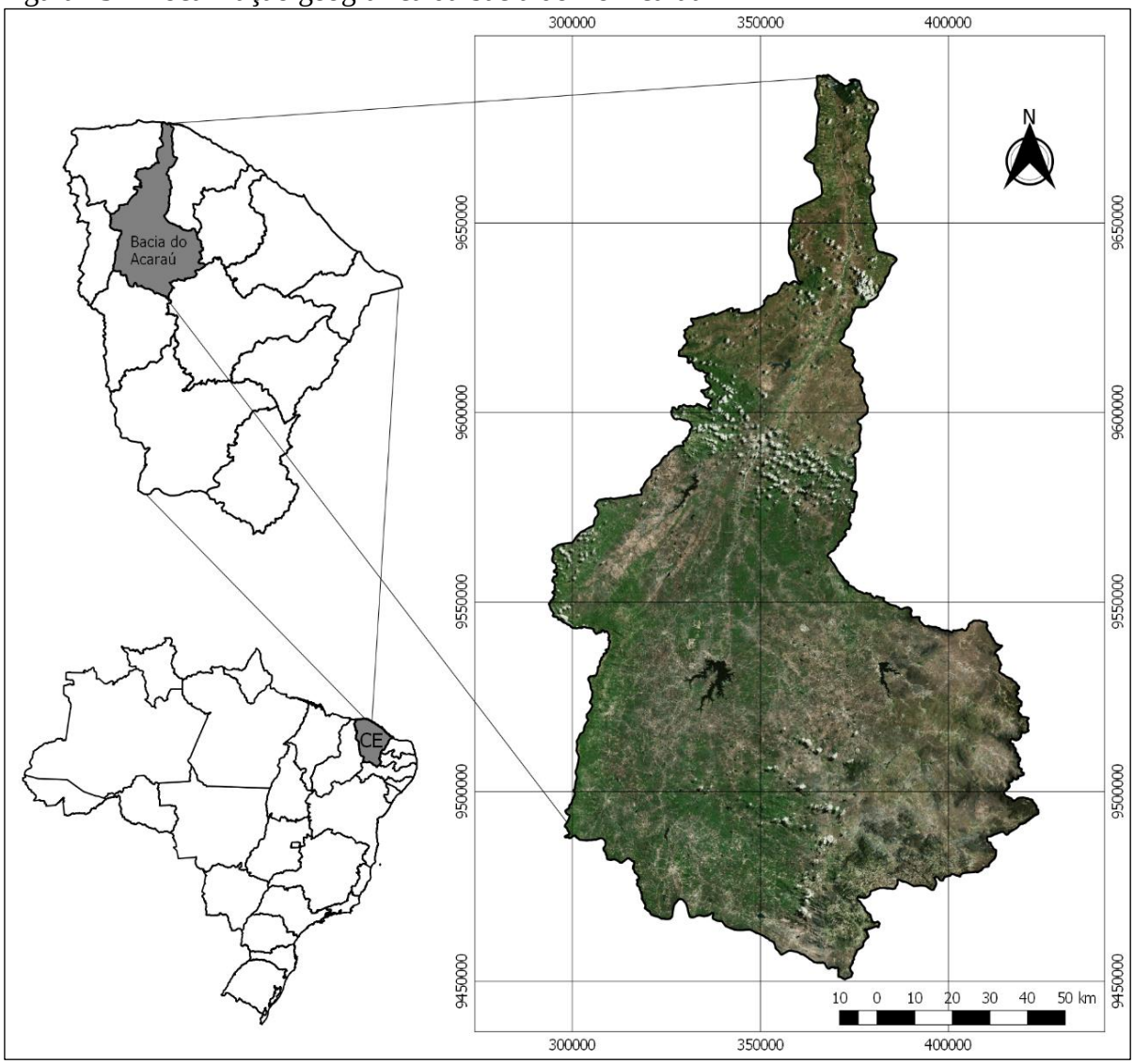
— Cenário 2: Simulações operacionais considerando o reúso indireto e direto não potável para fins industriais e agrícolas;

4.3 Caracterização da área de estudo

4.3.1 Localização

A bacia do rio Acaraú (Figura 13) se situa na porção noroeste do Estado do Ceará, localizando-se entre as coordenadas geográficas 40°54’ e 39°44’ de longitude oeste e 2°49’ e 4°59’ de latitude sul, ocupando uma área de 14.423 km² e abrangendo integralmente a área de 11 municípios e, parcialmente, a de outros 17 municípios (CEARÁ, 2010b).

Figura 13 – Localização geográfica da bacia do rio Acaraú



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os municípios que fazem parte da bacia do rio Acaraú, totalizam um quantitativo de 28, dos quais apenas 11 estão plenamente inseridos na área de drenagem. Os percentuais de cada município coincidentes com a área da bacia do rio Acaraú estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Percentuais em área dos municípios pertencentes à bacia do rio Acaraú.

Município	Área do Município pertencente à Bacia (%)
Acaraú	27,85
Alcântaras	19,48
Bela Cruz	23,73
Cariré	100,00
Catunda	100,00
Cruz	13,11
Forquilha	100,00
Graça	100,00
Groaíras	100,00
Hidrolândia	100,00
Ibiapina	2,10
Ipu	90,91
Ipueiras	31,04
Marco	48,32
Massapê	100,00
Meruoca	83,84
Monsenhor Tabosa	13,80
Morrinhos	53,00
Mucambo	71,38
Nova Russas	92,40
Pacujá	100,00
Pires Ferreira	100,00
Reriutaba	100,00
Santa Quitéria	96,84
Santana do Acaraú	69,71
Sobral	45,01
Tamboril	35,19
Varjota	100,00

Fonte: CEARÁ (2009).

4.3.2 População

A bacia do rio Acaraú está inserida totalmente em 11 e parcialmente em 17 municípios cearenses, abrangendo uma área de 14.423 km^2. A população total dos 28 municípios apresentados na Tabela 14 totalizam, de acordo com o Censo 2010 do IBGE, 814.034 habitantes, e na projeção feita pelo mesmo órgão para julho de 2017, um total de 860.064 habitantes.

Considerando a falta de dados populacionais específicos para a bacia do rio Acaraú, sua grandeza pode ser estimada a partir das populações, das projeções populacionais realizadas

pelo IBGE para cada município, no ano de 2017, e dos percentuais das áreas de cada município, conforme Equações 18 e 19.

$$PB_{2017} = \frac{Pus_{2010}}{Pt_{2010}} Pt_{2017} + \left[\left(\frac{Pu_{2010}}{Pt_{2010}} Pt_{2017} - \frac{Pus_{2010}}{Pt_{2010}} Pt_{2017} \right) + \frac{\mathrm{Pr}_{2010}}{Pt_{2010}} Pt_{2017} \right] .Pa \qquad (18)$$

com $\frac{Pus_{2010}}{Pt_{2010}} Pt_{2017} = 0$ quando a sede do município estiver fora da bacia (19)

sendo:

PB_{2017} – População da bacia no ano 2017
Pt_{2010} – População total no ano 2010
Pt_{2017} – População total no ano 2017
Pu_{2010} – População urbana no ano 2010
Pus_{2010} – População urbana na sede no ano 2010
Pr_{2010} – População rural no ano 2010
Pa – Percentual da área do município contida na bacia

Tabela 14 – População estimada da bacia do rio Acaraú em 2017.

Município	Percentual da área contida na Bacia (%)	Sede dentro da bacia	Censo Ano 2010 (hab)					Projeção Ano 2017 (hab)				
			Pop. Total	Pop. Urb. Sede	Pop. Urb.	Pop. Rural	Pop. Bacia	Pop. Total	Pop. Urb. Sede (1)	Pop. Urb. (1)	Pop. Rural (1)	Pop. Bacia (1)
Acaraú	27,9	Sim	57551	23529	28242	29309	**33004**	62199	25429	30523	31676	**35670**
Alcântaras	19,5	Não	10771	2994	3448	7323	**4509**	11459	3185	3668	7791	**4797**
Bela Cruz	23,7	Sim	30878	12692	12997	17881	**17008**	32278	13267	13586	18692	**17779**
Cariré	100,0	Sim	18347	6091	8301	10046	**18347**	18660	6195	8443	10217	**18660**
Catunda	100,0	Sim	9952	4913	5395	4557	**9952**	10365	5117	5619	4746	**10365**
Cruz	13,1	Sim	22479	9101	9569	12910	**10855**	23983	9710	10209	13774	**11581**
Forquilha	100,0	Sim	21786	14694	15473	6313	**21786**	24047	16219	17079	6968	**24047**
Graça	100,0	Sim	15049	4267	5815	9234	**15049**	15307	4340	5915	9392	**15307**
Groaíras	100,0	Sim	10228	6578	7076	3152	**10228**	11012	7082	7618	3394	**11012**
Hidrolândia	100,0	Sim	19325	8488	11054	8271	**19325**	20215	8879	11563	8652	**20215**
Ibiapina	2,1	Não	23808	9211	10743	13065	**9518**	24825	9604	11202	13623	**9924**
Ipu	90,9	Sim	40296	22351	25581	14715	**38665**	41576	23061	26394	15182	**39893**
Ipueiras	31,0	Sim	37862	11455	18358	19504	**19652**	37896	11465	18374	19522	**19669**
Marco	48,3	Sim	24703	12330	15435	9268	**18309**	26981	13467	16858	10123	**19997**
Massapê	100,0	Sim	35191	17125	23983	11208	**35191**	38210	18594	26040	12170	**38210**
Meruoca	83,8	Sim	13693	4217	7420	6273	**12162**	14948	4603	8100	6848	**13276**
Monsenhor Tabosa	13,8	Não	16705	8859	9362	7343	**9942**	17038	9036	9549	7489	**10140**
Morrinhos	53,0	Sim	20700	7827	9612	11088	**14650**	22222	8402	10319	11903	**15727**
Mucambo	71,4	Sim	14102	8641	9066	5036	**12539**	14377	8810	9243	5134	**12784**
Nova Russas	92,4	Sim	30965	19010	23244	7721	**30056**	32035	19667	24047	7988	**31095**
Pacujá	100,0	Sim	5986	3723	3723	2263	**5986**	6202	3857	3857	2345	**6202**
Pires Ferreira	100,0	Sim	10216	1491	3354	6862	**10216**	10784	1574	3540	7244	**10784**
Reriutaba	100,0	Sim	19455	8377	10590	8865	**19455**	18769	8082	10217	8552	**18769**
Santa Quitéria	96,8	Sim	42763	17543	22260	20503	**41966**	43360	17788	22571	20789	**42552**
Santana do Acaraú	69,7	Sim	29946	11795	15372	14574	**24448**	32023	12613	16438	15585	**26144**
Sobral	45,0	Sim	188233	147359	166310	21923	**165756**	205529	160899	181592	23937	**180987**
Tamboril	35,2	Sim	25451	7266	14202	11249	**13665**	25525	7287	14243	11282	**13705**
Varjota	100,0	Sim	17593	13515	14416	3177	**17593**	18239	14011	14945	3294	**18239**
Total							**659831**					**697529**

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).
(1) Dados calculados

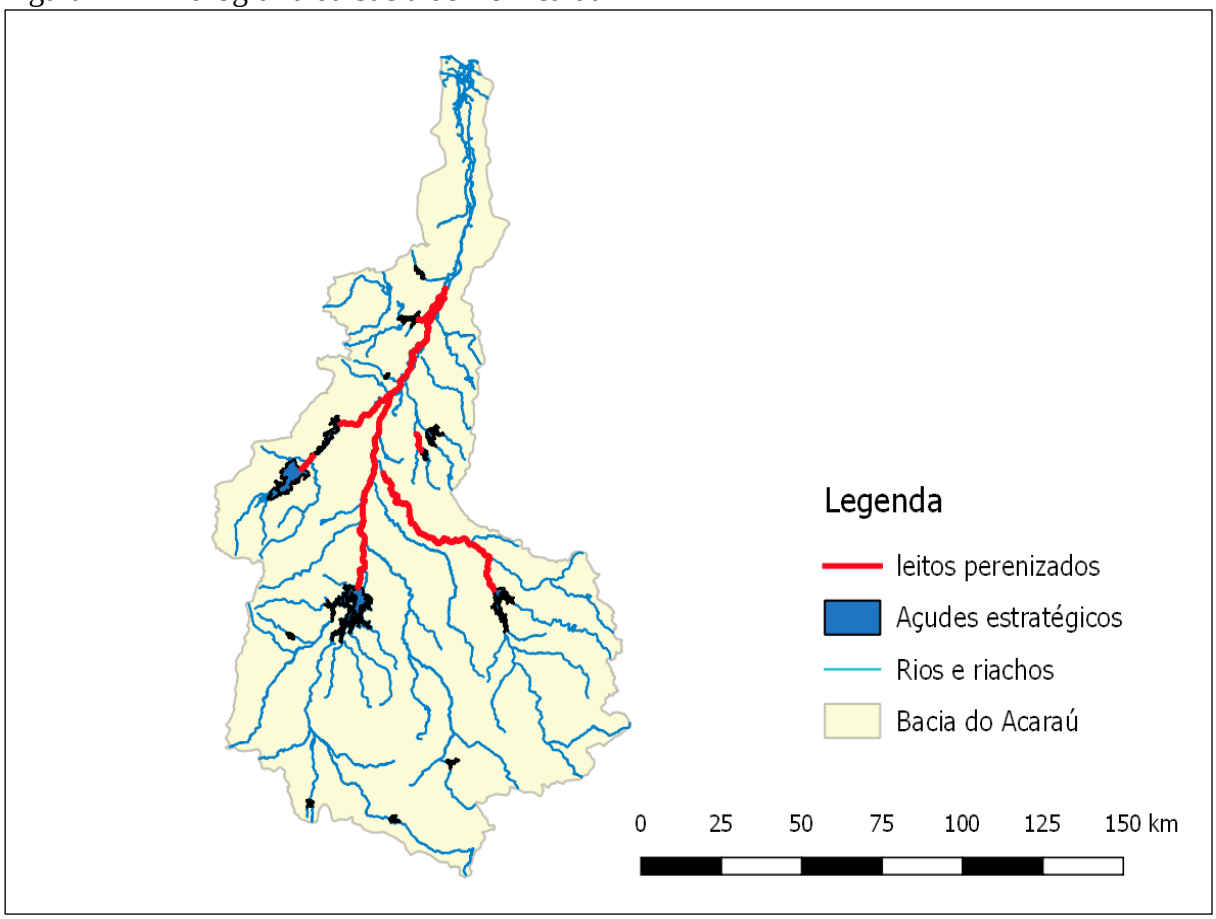
A população estimada da bacia do rio Acaraú, no ano de 2010, é de aproximadamente 659.831 habitantes, enquanto que, para o ano 2017, é de aproximadamente 697.529 habitantes, representando um crescimento estimado de 5,7% em 7 anos.

4.3.3 Hidrografia

A bacia, objeto deste estudo, tem como principal coletor de drenagem o rio Acaraú, que se desenvolve, preferencialmente, no sentido sul-norte. Os principais afluentes do rio Acaraú são os rios Groaíras, Macacos, Jacurutu e Sabonete, pela sua margem direita, e o rio Jaibaras, pela sua margem esquerda (CEARÁ, 2010b).

O rio Acaraú possui um desnível topográfico de cerca de 960 m em uma extensão aproximada de 315 km, iniciando seu traçado na Serra das Matas, até a sua foz no Oceano Atlântico, no Município de Acaraú. Conta com elevado índice de compacidade (1,85) e fator de forma reduzido (0,15) (CEARÁ, 2010b). O mapa da hidrografia da bacia do rio Acaraú está apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Hidrografia da bacia do rio Acaraú



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.4 Reservatórios

A bacia do rio Acaraú possui um total de 1.902 reservatórios. O açude mais importante da região é o Araras, responsável por mais de 60% do volume de acumulação da bacia. (CEARÁ, 2009). O somatório das capacidades de todos os açudes com volume inferior a 10 hm^3 é estimado em 40 hm^3, incluindo os açudes Sobral e Bonito, não sendo tal valor representativo em comparação com os reservatórios de maior porte, acima de 10 hm^3, que totalizam 1.707 hm^3. A reserva hídrica da bacia é propiciada por, basicamente, 11 reservatórios estratégicos, cujas características estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Característica dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú

Açude	Município	Capacidade (hm^3)	Q_{90} (m^3/s)
Acaraú Mirim	Massapê	52,00	0,72
Araras (Paulo Sarasate)	Varjota	891,00	6,14
Arrebita	Forquilha	19,60	0,17
Ayres de Sousa (Jaibaras)	Sobral	104,43	1,50
Carão	Tamboril	26,23	0,22
Carmina	Catunda	13,63	0,12
Edson Queiroz	Santa Quitéria	254,00	1,75
Farias de Souza	Nova Russas	12,23	0,11
Forquilha	Forquilha	50,13	0,45
São Vicente	Santana do Acaraú	9,84	0,12
Taquara	Cariré	274,00	-

Fonte: adaptado de CEARÁ (2009), CEARÁ (2010b) e CEARÁ (2015b).

Foram considerados neste estudo apenas os reservatórios com capacidade igual ou superior a 10 hm^3 e o açude São Vicente (9,84 hm^3) por representarem mais de 97% da capacidade de acumulação da bacia do rio Acaraú. Essa simplificação está representada na rede de fluxo desenvolvida neste estudo ao não considerar os pequenos reservatórios como fonte direta de abastecimento, e sim de seu reservatório estratégico dominante.

Os quatro maiores reservatórios, no caso, o Araras, Taquara, Edson Queiroz e Ayres de Sousa, são responsáveis pela a perenização do rio Acaraú, para atendimento das demandas difusas, perímetros irrigados e abastecimento humano a jusante, ao longo do rio Acaraú. O Açude Taquara é utilizado também como unidade de reforço do Açude Ayres de Sousa, devido a sua conexão próxima e direta.

A qualidade das águas dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú não apresenta restrição ao consumo humano no quesito salinidade, por possuírem concentração de cloretos inferior a 250 mg/L, segundo análises realizadas pela COGERH. Quanto às

características de salinidade para irrigação, as águas dos reservatórios possuem grau médio de salinidade (CEARÁ, 2009).

Estudos realizados por Feitosa *et al*. (2013), utilizando Índice de Qualidade de Água (IQA) para os Açudes Ayres de Sousa, Sobral e São Vicente, reportaram nível bom de qualidade, mas fazendo ressalvas para o Ayres de Sousa, devido à prática de piscicultura.

Segundo o inventário ambiental do Açude Edson Queiroz (CEARÁ, 2011a), o IQA médio do reservatório foi classificado como médio (pontuação 54,29), e, para aplicação na irrigação, possui baixo risco quanto à condutividade e razão de absorção de sódio (RAS). Já no inventário ambiental do Açude Ayres de Sousa (CEARÁ, 2010c), o IQA foi classificado como bom ($70 \leq IQA \leq 90$), e baixo risco para uso da água na irrigação, com base na análise de condutividade e RAS.

4.3.5 Clima

Segundo a COGERH (CEARÁ, 2010b), o clima da bacia do rio Acaraú se apresenta homogêneo, com variações climáticas associadas ao regime pluviométrico e às seguintes condições fisiográficas:

- Proximidade do litoral, quando os índices pluviométricos são mais elevados e as temperaturas mais estáveis;
- Relevo acidentado, onde ocorrem precipitações orográficas que se somam a temperaturas mais baixas em decorrência da altitude.

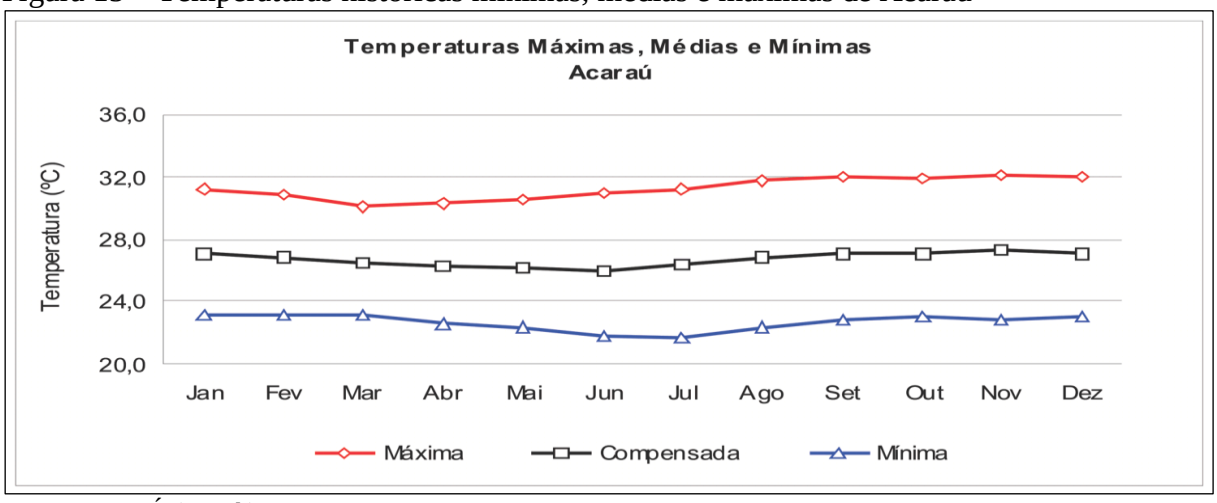
O clima predominante é quente e estável, de elevadas temperaturas e reduzidas amplitudes, com acentuada taxa de insolação, forte poder evaporante e, acima de tudo, com um regime pluviométrico irregular.

Segundo a classificação de Köppen (1931), a área da bacia apresenta três zonas climáticas:

- Aw': clima tropical chuvoso, com estação invernosa ausente e estação chuvosa concentrada no outono. Ocorre na porção norte da bacia, nas áreas com precipitações variando de 1.000 a mais de 1.600 mm anuais;
- BSw'h': clima quente e semiárido, com estação chuvosa arrasada para o outono. Ocorre na porção sul da bacia, onde as precipitações oscilam entre 700 e 1.000 mm.

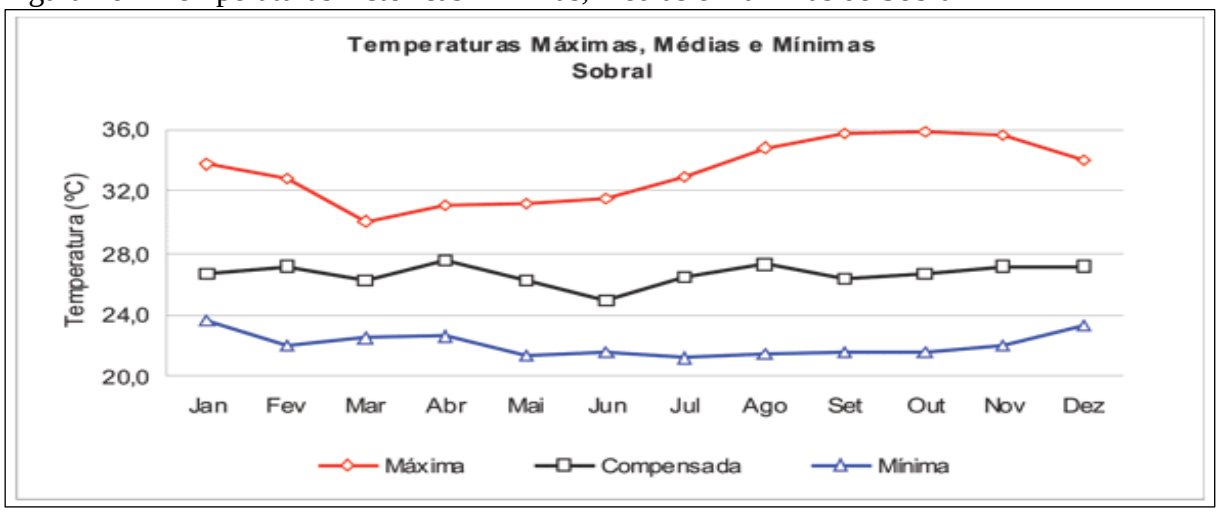
Há, portanto, algumas variações climatológicas da transição do litoral para o sertão. Tal variação é perceptível na comparação das temperaturas mínimas, médias e máximas das estações climatológicas de Acaraú (litoral) e Sobral (Semiárido), conforme apresentado nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 15 – Temperaturas históricas mínimas, médias e máximas de Acaraú



Fonte: CEARÁ (2010b).

Figura 16 – Temperaturas históricas mínimas, médias e máximas de Sobral



Fonte: CEARÁ (2010b).

A umidade média anual na bacia se situa em torno de 72%. As variações mensais estão relacionadas diretamente às irregularidades temporais do regime pluviométrico. Os meses com índices pluviométricos mais elevados (trimestre março, abril e maio), correspondem também às taxas de umidade mais altas (acima de 80%). O período menos úmido, em termos gerais, se situa no segundo semestre do ano, nos meses de agosto a novembro (CEARÁ, 2010b).

O número médio de horas de exposição ao sol da bacia, se situa em torno de 2.600 horas/ano, sendo os meses de menor insolação àqueles correspondentes ao período chuvoso, devido à presença de nebulosidade (CEARÁ, 2010b).

Os valores de velocidade dos ventos em Sobral variam de 1,7 a 3,7 m/s, com predominância na direção nordeste-sudeste. Em contrapartida, Acaraú, pela sua proximidade ao litoral, apresenta ventos fortes, com velocidades superiores a 6,0 m/s a partir de agosto, com predominância na direção leste-sudeste (CEARÁ, 2010b).

As taxas de evaporação são elevadas na bacia do rio Acaraú. A evaporação anual média é de 2.427 mm em Acaraú e 1.840 mm em Sobral. O período de estiagem de julho a dezembro responde por cerca de 65% do total evaporado anualmente, sendo os meses de setembro, outubro e novembro os mais críticos (CEARÁ, 2010b).

4.3.6 Geologia

A geologia da bacia é composta, essencialmente, por terrenos cristalinos pré-Cambrianos (94,70%), representada por gnaisses e migmatitos diversos, quartzitos e metacalcários, associados a rochas plutônicas e metaplutônicas de composição predominantemente granítica. Há ainda um pequeno percentual de rochas sedimentares (5,30%), representados por: arenitos da Formação Serra Grande; sedimentos areno-argilosos, não ou pouco litificados do Grupo Barreiras e das Coberturas Colúvio-eluviais; sedimentos eólicos constituídos de areias bem selecionadas de granulação fina a média, às vezes siltosas do Dunas/Paleodunas; e cascalhos, areias, silte e argilas, com ou sem matéria orgânica, formados em ambientes fluviais, lacustres e estuarinos recentes dos depósitos aluvionares e de mangues (CEARÁ, 2009).

O embasamento cristalino presente na bacia do rio Acaraú, constituído por rochas metamórficas e ígneas, é a cobertura predominante da região e ocorre em todo o território, a exceção do extremo norte da bacia, no baixo curso do rio Acaraú. Esta estrutura geológica predominante, apresenta, em geral, comportamento mais resistente, favorecendo o escoamento superficial das águas. As coberturas sedimentares, dos Cenozóico e Paleozóico, ocorrem notadamente na porção norte da bacia, próximo a foz do rio Acaraú. Apresentam baixa resistência mecânica, porém quando cimentadas passam a apresentar maior coerência e resistência (CEARÁ, 2010b).

4.3.7 Hidrogeologia

São classificados onze sistemas hidrogeológicos na bacia do rio Acaraú: Aluviões, Dunas/Paleodunas, Barreiras, Serra Grande, Pacujá, Frecheiras, Covão, Camocim, Coreaú e Massapê, que representam o Domínio Hidrogeológico Poroso, e as rochas do Embasamento Precambriano que representa o Domínio Hidrogeológico Fissural (Rochas ígneas e metamórficas).

As Dunas/Paleodunas constituem um único sistema hidrogeológico em função das características litológicas e hidrodinâmicas similares, impossibilitando uma nítida distinção em nível regional, e que possui, invariavelmente, uma excelente vocação aquífera (CEARÁ, 2010b).

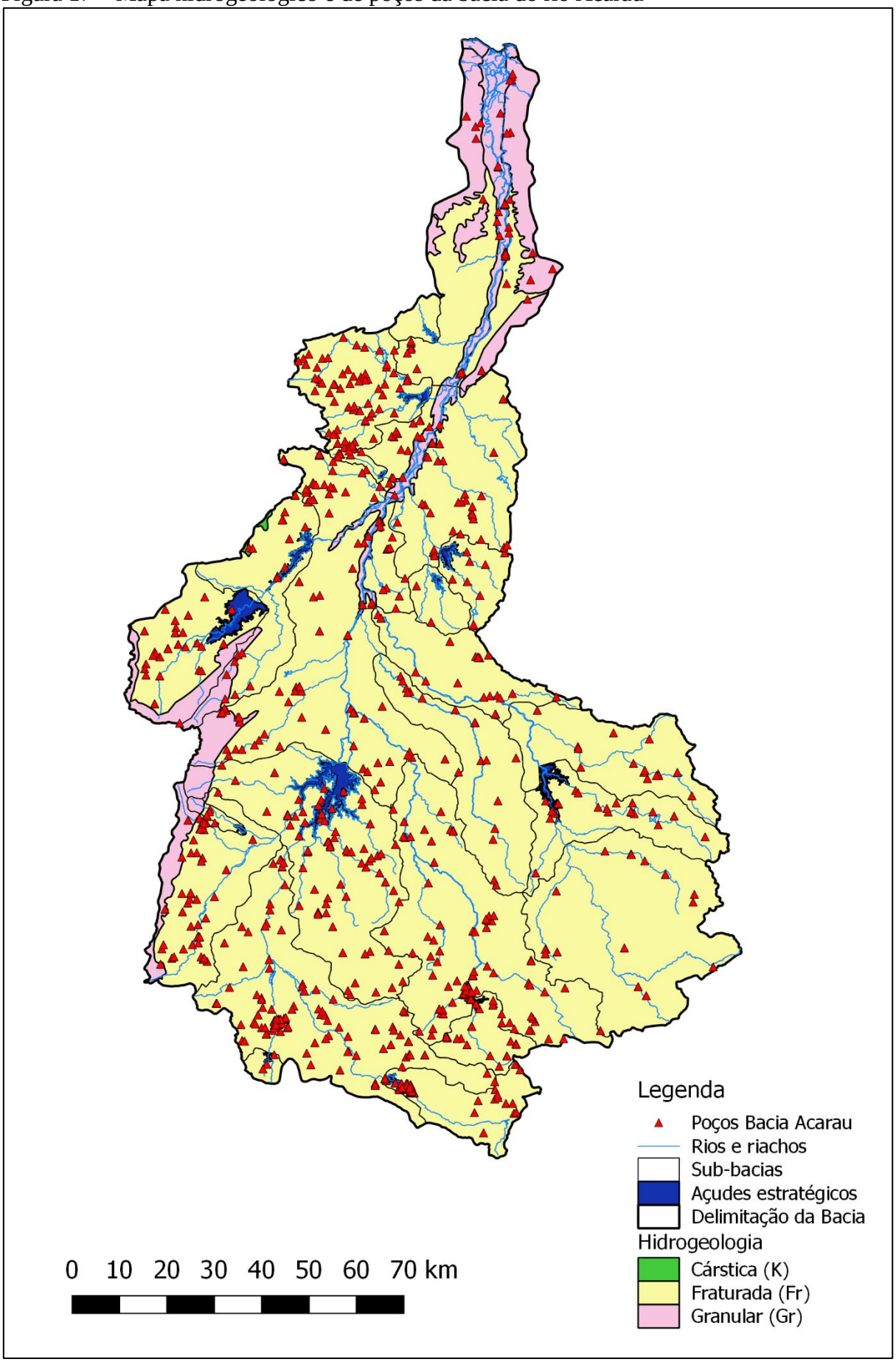
A maioria dos poços tubulares existentes na bacia do rio Acaraú (76,5%) foram construídos a partir de 1980. Os mais de 2000 poços tubulares existentes estão distribuídos por toda bacia e captam água dos seguintes aquíferos: porosos (12,46%), aluviais (6,94%) e fissurais (80,60%) totalizando uma disponibilidade efetiva de água subterrânea de 16,5 milhões de m^3/ano (CEARÁ, 2009; CEARÁ, 2010b).

Os dados referentes a profundidade dos poços mostram que existe uma predominância do intervalo de 21,0 a 80,0m (84,1%) com predominância da construção de poços tubulares profundos no Domínio Cristalino Fissural (>50,0m) (68,7%). Quanto à vazão, para o Cristalino, há uma média de 1,7 m^3/h, valor bem inferior quando comparado com a vazão média, em meio sedimentar, de 6,0 m^3/h. (CEARÁ, 2010b).

Somando a vazão de poços disponível de 16,5 milhões de m^3/ano (aproximadamente 0,5 m^3/s), com a vazão total regularizada dos reservatórios estratégicos (Tabela 15) resultante do estoque de 1700 hm^3, a bacia do rio Acaraú possui uma vazão total disponível de aproximadamente 11,8 m^3/s.

É possível constatar pela Figura 17 que, ao longo do rio Acaraú, na porção central, iniciando nas proximidades da sede de Groaíras até a sua foz, predomina-se o domínio hidrogeológico granular, havendo uma maior dinâmica entre a água de superfície e subterrânea. Essa observação é importante para o estudo no que concerne a influência das perenizações na recarga de aquíferos ao longo do rio Acaraú que são, posteriormente, utilizados pelos municípios circunvizinhos por meio de poços.

Figura 17 – Mapa hidrogeológico e de poços da bacia do rio Acaraú



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.3.8 Vegetação

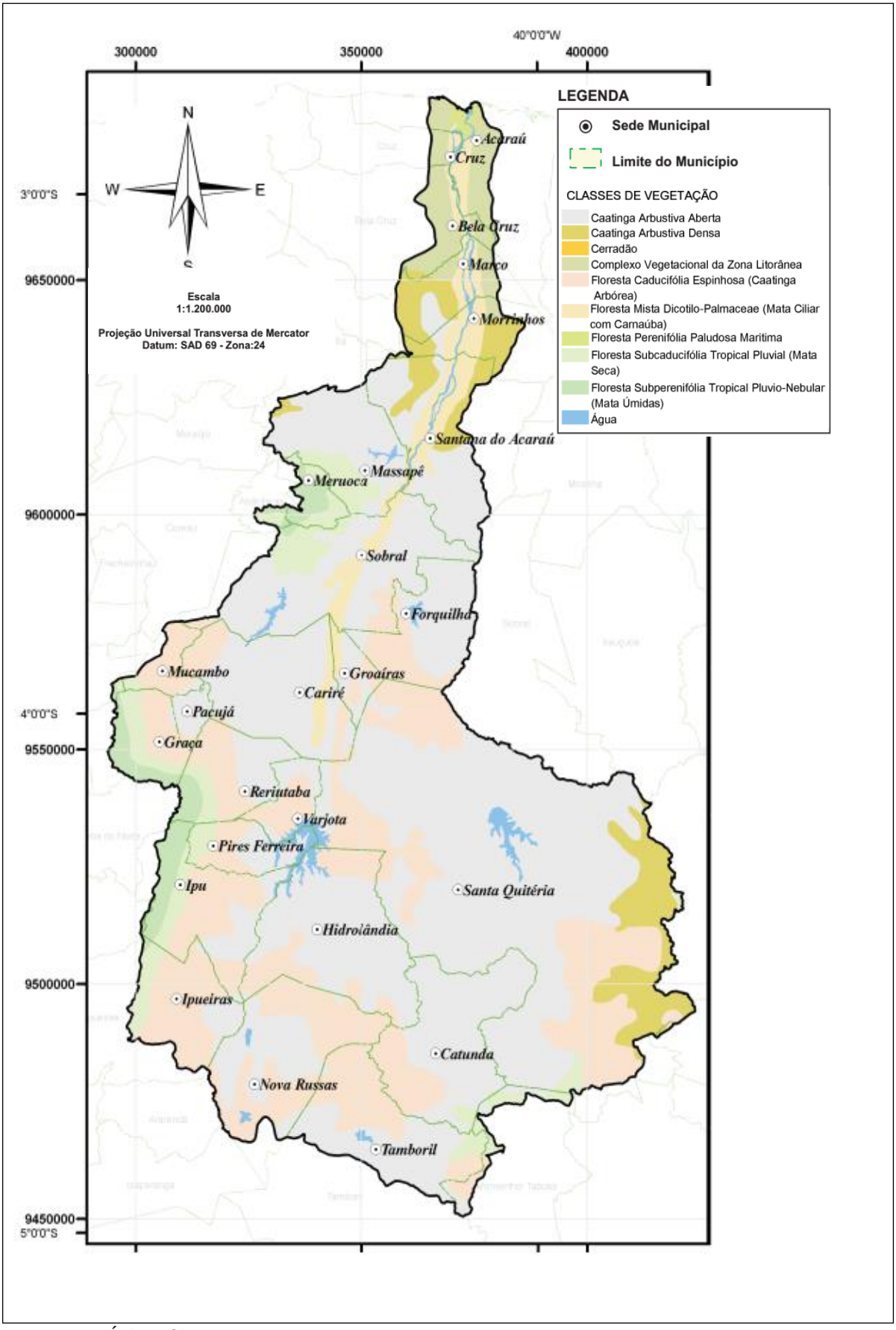
Segundo estudos da COGERH (CEARÁ, 2010b), registram-se oito unidades fitoecológicas diferentes na bacia do rio Acaraú:

- Complexo Vegetacional da Zona Litorânea;
- Floresta Subperenifólia Tropical Pluvio-Nebular (Matas Úmidas);
- Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (Matas Secas);
- Floresta Caducifólia Espinhosa (Caatinga Arbórea);
- Caatinga Arbustiva Densa;
- Caatinga Arbustiva Aberta;
- Floresta Perenifólia Paludosa Marítima;
- Floresta Mista Dicotilo-Palmacea (Mata Ciliar com carnaúba).

Segundo Mota e Valladares (2011), que elaboraram um mapa de vulnerabilidade de vegetação na bacia do rio Acaraú, a Floresta Caducifólia Espinhosa (Caatinga Arbórea), juntamente com a caatinga arbustiva aberta e a caatinga arbustiva densa, são as unidades fitoecológicas que se apresentam em maior proporção na área e com maior grau de vulnerabilidade.

As unidades fitoecológicas da bacia do rio Acaraú são resultantes da evolução dos *stocks* antigos da vegetação, da flora que se encontrava nesta região, e do ambiente físico global, cujas modificações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e, especialmente climáticas, tiveram importância fundamental no estabelecimento e na distribuição da vida vegetal e na florística (CEARÁ, 2010b). É possível constatar pela Figura 18 a predominância de caatinga arbustiva aberta e arbórea na região centro-sul, e complexo vegetacional de zona litorânea no norte da bacia, na região do Baixo-Acaraú.

Figura 18 – Classes de vegetação da bacia do rio Acaraú



Fonte: CEARÁ (2010b).

4.3.9 Relevo

O relevo da bacia do rio Acaraú é representado, basicamente, por cinco domínios geomorfológicos: Planície Litorânea, Glacis Pré-Litorâneos dissecados em interflúvios tabulares, Depressão Sertaneja, Maciços Residuais e Planalto da Ibiapaba, cujos limites são estabelecidos com base na homogeneidade das formas de relevo, no posicionamento altimétrico, na estrutura geológica, na atividade tectônica, bem como nas características do solo e vegetação (CEARÁ, 2010b).

A Depressão Sertaneja é o domínio geomorfológico que ocupa maior extensão de área da bacia do rio Acaraú. Corresponde a uma superfície de aplainamento, desenvolvida sobre as rochas cristalinas, onde o trabalho erosivo truncou indistintamente variados tipos litológicos. A morfologia da Depressão Sertaneja é representada por extensas rampas pedimentadas, que se iniciam na base dos maciços residuais e se inclinam suavemente em direção aos fundos de vales e ao litoral (CEARÁ, 2010b).

4.3.10 Solos

Devido a sua grande dimensão e sua dinâmica ambiental, a bacia do rio Acaraú possui 12 classes de solos. As classes dominantes são os Luvissolos, seguidos pelos Argissolos (NASCIMENTO; CUNHA, S. B.; ROSA, 2006).

Já a COGERH (CEARÁ, 2010b), em seu Plano de Gerenciamento das Águas do Bacia do rio Acaraú, detalhou a morfo-pedologia da bacia com base em 10 classes de solo: Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico e Distrófico, Podzólico Vermelho-Amarelo, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, Solos Aluviais, Areias Quartzosas Distróficas Marinhas, Bruno Não Cálcico, Planossolo Solódico, Solonchak Solonético, Solos Litólicos Eutróficos e Distróficos e Regossolos Eutróficos e Distróficos.

4.3.11 Serviços de água e esgoto

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS de 2016 (BRASIL, 2018a), apontam para um nível de atendimento médio urbano de água nos municípios da bacia do rio Acaraú entre 80 e 90%. Já em relação à coleta de esgoto, este índice se encontra na faixa de 20 a 40%. Outros indicadores médios para o Ceará são apresentados no diagnóstico de 2016, como o consumo médio *per capita* de água de 125 L/hab/dia, e o índice

de perda de água na distribuição da CAGECE de 41,6%, acima da média nacional de 38,1%, mas abaixo da média da Região Nordeste de 46,3% (BRASIL, 2018a).

Conforme indicadores desagregados do diagnóstico do SNIS 2016 (Tabela 16), os municípios da bacia do rio Acaraú possuem índice de atendimento urbano de água variando entre 49,55% (Meruoca) e 100% (Sobral), e média de 78,92%. Esses índices caem significativamente quando se avalia o índice de atendimento total de água, pela falta de abastecimento em distritos e áreas rurais. Quanto aos índices de coleta e tratamento de esgoto, apenas 8 municípios dos 28 declararam possuir estas infraestruturas. Dentre os 8 municípios equipados com coleta de esgoto, o maior índice é o de Sobral, com 50,33%, e o menor é o de Graça, com 11,81%. O índice de tratamento de esgoto declarado para todos os 8 municípios foi de 100%, ou seja, todo esgoto coletado é totalmente tratado.

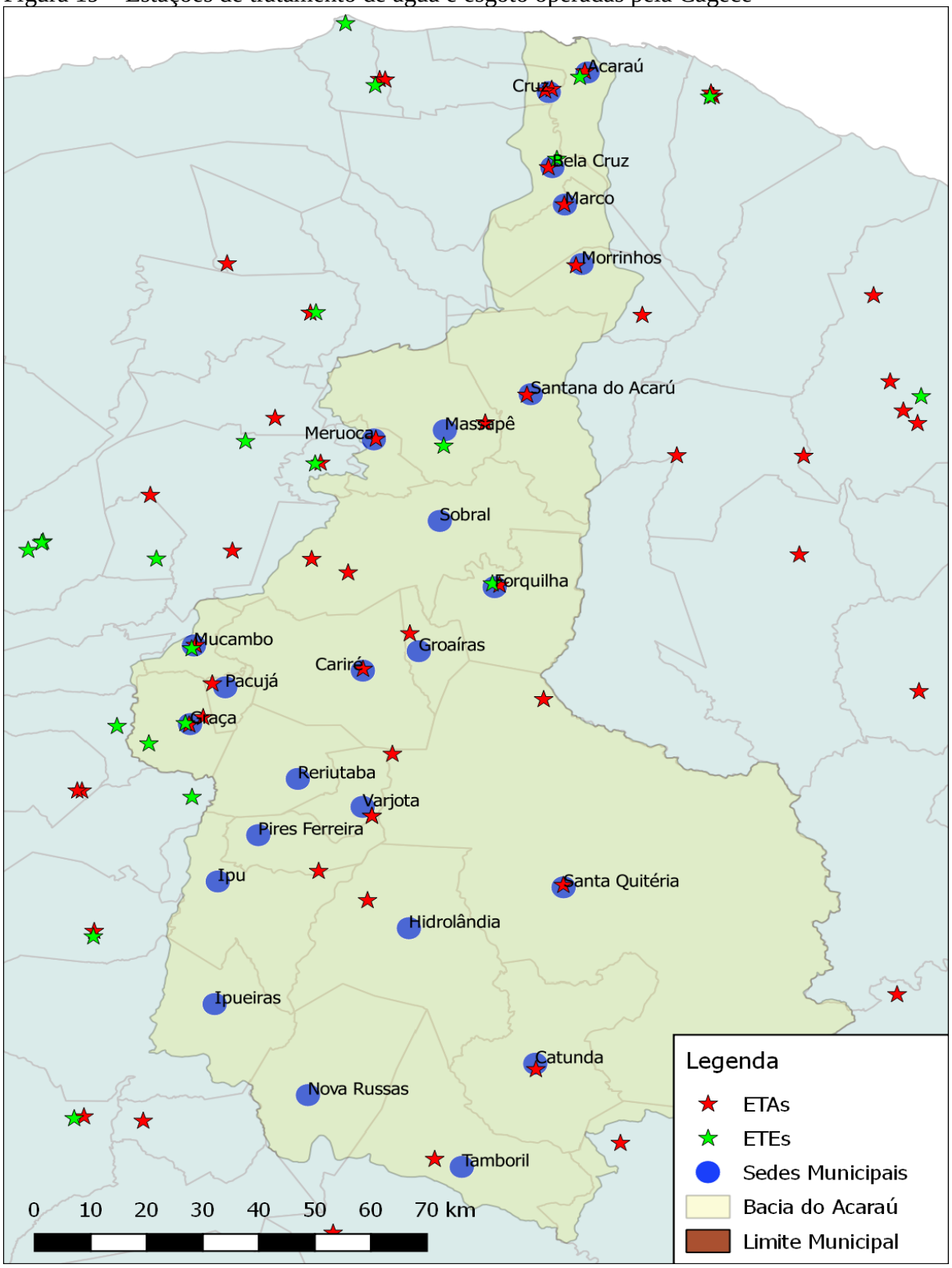
Tabela 16 – Índices de água e esgoto nos municípios da bacia do rio Acaraú

Município	**Tipo de serviço**	**Índice de atendimento total de água**	**Índice de atendimento urbano de água**	**Índice de coleta de esgoto**	**Índice de tratamento de esgoto**
Acaraú	Água e Esgotos	32,46	66,14	11,94	100,00
Alcântaras	Água e Esgotos	24,18	75,53	38,86	100,00
Bela Cruz	Água e Esgotos	27,93	66,35	48,07	100,00
Cariré	Água	38,07	84,15	-	-
Catunda	Água	49,91	92,07	-	-
Cruz	Água	31,86	74,84	-	-
Forquilha	Água e Esgotos	62,57	88,10	26,45	100,00
Graça	Água e Esgotos	35,19	91,07	11,81	100,00
Groaíras	Água	66,74	96,47	-	-
Hidrolândia	Água	52,11	91,10	-	-
Ibiapina	Água	39,82	88,26	-	-
Ipu	Sem informação	-	-	-	-
Ipueiras	Água	95,00	95,00	-	-
Marco	Água	45,88	73,43	-	-
Massapê	Água e Esgotos	51,12	75,02	19,88	100,00
Meruoca	Água	26,85	49,55	-	-
Monsenhor Tabosa	Água	44,65	79,68	-	-
Morrinhos	Água	39,52	85,10	-	-
Mucambo	Água e Esgotos	59,10	91,93	13,64	100,00
Nova Russas	Sem informação	-	-	-	-
Pacujá	Água	52,80	84,90	-	-
Pires Ferreira	Água	20,71	63,07	-	-
Reriutaba	Água	36,40	66,86	-	-
Santa Quitéria	Água	43,08	82,76	-	-
Santana do Acaraú	Água	36,99	72,06	-	-
Sobral	Água e Esgoto	100,00	100,00	50,33	100,00
Tamboril	Água	38,54	69,07	-	-
Varjota	Água	61,73	75,33		

Fonte: adaptado de BRASIL (2018).

Considerando apenas as unidades operadas pela concessionária estadual de água e esgoto (CAGECE), a bacia do rio Acaraú possui 26 estações de tratamento de água (ETA) e 7 estações de tratamento de esgoto (ETE), conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Estações de tratamento de água e esgoto operadas pela Cagece



Fonte: Elaborado pelo autor (2018). Cadastro fornecido pela Cagece.

4.3.12 Agricultura

Segundo levantamento de Pontes e Aragão (2013), existem 14 perímetros irrigados federais e 16 estaduais no estado do Ceará. Os perímetros irrigados federais possuem uma área total de aproximadamente 113,5 mil hectares. Os dois maiores perímetros, em área irrigável, o Baixo Acaraú e Tabuleiro de Russas, somam 44% da área irrigável dos perímetros irrigados federais (Tabela 17).

Tabela 17 – Perímetros irrigados federais no Ceará

Perímetro Irrigado	Município	Início de Operação	Área (ha)	Área Sequeiro (ha)	Área Irrigável (ha)
Araras Norte	Varjota e Reriutaba	1988	6.407,39	3.182,39	3.225,00
Ayres de Sousa	Sobral	1977	8.942,80	7.784,80	1.158,00
Baixo-Acaraú	Acaraú, Bela Cruz e Marco	2001	9.612,72	-	8.335,00
Curú-Paraipaba	Paraipaba	1975	12.374,00	4.347,00	8.000,00
Curú-Pentecoste	Pentecoste e São Luiz do Curú	1975	5.016,00	3.836,00	1.180,00
Ema	Iracema	1973	352,03	310,03	42,00
Forquilha	Forquilha	1979	3.327,13	3.066,13	261,00
Icó-Lima Campos	Icó	1973	10.583,18	6.320,18	4.263,00
Jaguaribe-Apodi	Limoeiro do Norte	1989	13.229,20	7.836,20	5.393,00
Jaguaruana	Jaguaruana	1977	343,08	141,08	202,00
Morada Nova	Morada Nova	1970	11.025,12	6.692,12	4.333,00
Quixabinha	Mauriti	1972	530,35	237,35	293,00
Tabuleiro de Russas	Russas, Lim. do Norte e M. Nova	2003	18.915,00	3.148,70	14.508,00
Várzea do Boi	Tauá	1975	12.878,71	12.248,71	630,00

Fonte: Pontes e Aragão (2013).

Os perímetros irrigados existentes na bacia do rio Acaraú são o Araras Norte (DIPAN), Ayres de Sousa, Baixo Acaraú (DIBAU) e Forquilha. O Perímetro irrigado Araras Norte (DIPAN) está localizado nos municípios de Varjota e Reriutaba. As suas coordenadas geográficas são: 4° 09’ de latitude Sul e 40° 32’ de longitude Oeste. O acesso ao perímetro irrigado é feito pela Rodovia Federal BR–222, de Fortaleza a Sobral, e, em seguida, pela Rodovia CE–183, até a cidade de Varjota, em um percurso de 300 Km, aproximadamente. A implantação do perímetro irrigado foi iniciada em 1987, e os serviços de administração, operação e manutenção da infraestrutura de uso comum, tiveram início no ano de 1998 (BRASIL, 2018b).

Já o Perímetro Irrigado Ayres de Sousa está localizado no município de Sobral, à margem esquerda do Rio Jaibaras. A implantação do perímetro irrigado foi iniciada no ano de 1974, e a sua conclusão ocorreu em 1978. Os serviços de administração, operação e manutenção da infraestrutura de uso comum foram iniciados no ano de 1977 (CEARÁ, 2011b).

O Perímetro Irrigado Baixo Acaraú está localizado próximo ao litoral da região norte do Estado do Ceará, no trecho final da bacia do rio Acaraú, abrangendo áreas dos municípios de Acaraú, Bela Cruz e Marco. O acesso ao perímetro irrigado é feito pela BR-222 até a cidade de Umirim, e, em seguida, pela Rodovia CE–016 e CE-085. A implantação do perímetro irrigado foi iniciada em 1983, enquanto os serviços de administração, operação e manutenção da infraestrutura de uso comum, tiveram início no ano de 2001 (CEARÁ, 2011b).

O Perímetro Irrigado Forquilha está localizado no município homônimo, no Estado do Ceará, a 208 km de Fortaleza. As suas coordenadas geográficas são: 3° 46’ de latitude Sul e 40° 17’ de longitude Oeste (BRASIL, 2018b).

A agricultura dos municípios da bacia do rio Acaraú tem sido duramente castigada pelos problemas climáticos e pelo apoio insuficiente ao produtor rural, fazendo com que esta atividade apresente índices descendentes de produção e produtividade. Os municípios situados na serra da Ibiapaba são os que contribuem mais para a geração de renda dos produtores rurais, destacando-se o município de Ibiapina por ter condições climáticas favoráveis e situação menos desigual de posse da terra. (CEARÁ, 2010b).

Os principais produtos agrícolas, nos municípios da bacia do rio Acaraú, são a cana-de-açúcar e mandioca, em termos de quantidade produzida. Entretanto, a cana-de-açúcar não é cultivada em toda a extensão da bacia, sendo basicamente explorada no município de Ibiapina. Entre as culturas permanentes, destacam-se: o côco-da-baía, que tem como principal produtor o município de Acaraú; a banana, que ocorre principalmente nas regiões serranas de Ipu e Ibiapina; e a castanha de caju, que tem como principal produtor o município de Bela Cruz. Quanto à agricultura temporária, observa-se uma dispersão, com destaque para o feijão e milho nos municípios de Santa Quitéria e Tamboril, e mandioca nos municípios de Acaraú, Cruz e Bela Cruz (CEARÁ, 2010b).

Quanto à demanda hídrica de irrigação, a bacia do rio Acaraú consome cerca de 196 hm^3/ano proveniente de áreas públicas e privadas, o que corresponde a 21% do total da demanda de irrigação do Estado (CEARÁ, 2010b).

Conforme estudos desenvolvidos por Andrade *et al*. (2006) sobre a vulnerabilidade da bacia do rio Acaraú, decorrentes da sodicidade da água empregada na irrigação, 80% da área total da bacia apresenta risco crescente de problemas com a infiltração em decorrência da sodicidade da água, com maior gravidade na margem esquerda do rio Acaraú.

4.3.13 Pecuária

A pecuária constitui-se numa atividade que se sobressaiu satisfatoriamente na formação da renda da população residente na bacia do rio Acaraú, destacando-se o município de Santa Quitéria, com os maiores rebanhos dentre os municípios analisados. Na região, a pecuária se fundamenta principalmente na criação extensiva de bovinos para corte. Os animais de pequeno e médio porte (caprinos, ovinos, suínos) se destinam basicamente à subsistência própria, contrariamente ao rebanho bovino, que é criado nas médias e grandes propriedades e tem uma significativa parcela da produção comercializada (CEARÁ, 2010b).

A pecuária é uma importante fonte geradora de nutrientes em áreas rurais para águas superficiais. Estima-se que 20 a 35% do nitrogênio e de 35 a 60% do fósforo presentes nos dejetos dos animais alcançam as águas superficiais, seguindo para a região estuarina e costeira (CEARÁ, 2010b).

4.3.14 Indústria

Segundo a CNI, o Estado do Ceará possui PIB industrial de R$ 22,4 bilhões, o equivalente a 1,9% da indústria nacional. É o décimo segundo maior PIB do Brasil, com R$ 114,6 bilhões. Com 9,0 milhões de habitantes, é o 8º estado mais populoso do País.

Com relação à distribuição espacial das indústrias cearenses, Fortaleza é o município de maior peso, concentrando 60,74% da atividade industrial do estado. O segundo maior município quanto à expressividade industrial é Sobral, ao norte do estado, com participação produtiva de 9,52%. Na sequência, têm-se as regiões do Cariri (6,97%), Pacajus (6,46%), Baixo Jaguaribe (3,17%) e Cascavel (2,18%). As demais microrregiões apresentam percentuais inferiores a 2% (PAIVA; CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2009). Destaca-se , na região de Sobral, as indústria de calçados, alimentos, bebidas e minerais não-metálicos (PAIVA; CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2009).

O Quociente Locacional (QL) indica a atividade em que uma determinada região se destaca quando comparada à estrutura industrial do estado. Revela, portanto, em qual setor a região tem maior importância para o estado. Valores do indicador superiores à unidade (QL>1) representam os setores de destaque. Com relação à região de Sobral, a indústria de calçados possui um Quociente locacional (QL) de 3,459, demonstrando sua significante especialização para este setor. Esse número confirma o peso da indústria calçadista para a sua

economia local, percebido também pela forte participação dessa atividade na estrutura industrial da região (PAIVA; CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2009).

O consumo de água na indústria depende de diversos fatores como a atividade industrial, produção, nível de industrialização, práticas sustentáveis, utilização de água de reúso. A Confederação Nacional das Indústrias (CNI, 2013), parametrizou taxas de consumo típicos de água para atividades industriais mais comuns. Algumas delas estão destacadas na Tabela 18 conforme as principais atividades industriais da região de Sobral.

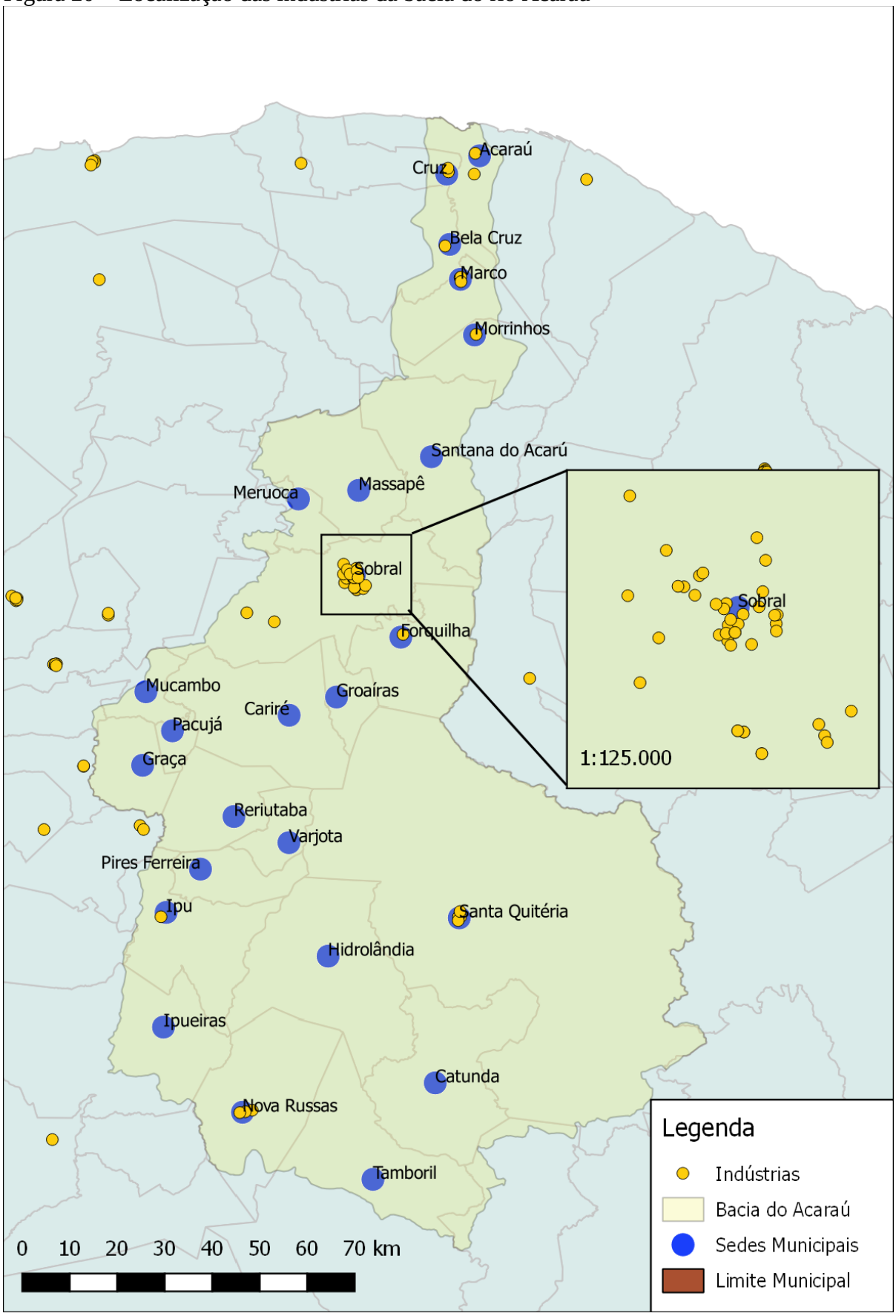
Tabela 18 – Consumo de água por atividade industrial

Divisão	Grupo	Unidade	Coeficientes técnicos de uso da Água (m^3/unidade)		
			Retirada	Consumo	Efluente
Preparação de couros e fabricação de artefatos de couro, artigos para viagem e calçados	Fabricação de calçados	Par de calçados	0,0021	0,0004	0,0017
	Fabricação de partes para calçados, de qualquer material	Par de calçados	0,0038	0,0008	0,0030
	Curtimento e outras preparações de couro	Pele processada	0,47-1,0	-	0,47-1,0
Fabricação de produtos alimentícios	Abate de reses, exceto suínos	t animal vivo	2,00	0,25	1,75
	Abate de suínos, aves e outros pequenos animais	t animal vivo	4,0-12,0	0,5-1,5	3,5-10,5
	Fabricação de produtos de carne	t produzida	12,0	1,5	10,5
	Preservação do pescado e fabricação de produtos do pescado	t produzida	12,5	2,5	10,0
	Fabricação de conservas de frutas, legumes e outros vegetais	t matéria-prima	18,75	3,75	15,00
	Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	t matéria-prima	0,2-14	-	0,2-14
	Laticínios(1)	m^3 de leite	1,1-2,0		1,6-2,2
	Moagem, fabricação de produtos amiláceos e de alimentos para animais	t produzida	1,7-3,0	0,3-1,2	1,4-1,8
	Fabricação e refino de açúcar	t produzida	17,0	17,0	-
	Fabricação de outros produtos alimentícios	t produzida	4,72	0,95	3,78
Fabricação de bebidas	Fabricação de aguardentes e outras bebidas destiladas	m^3 produzido	1,24	0,47	0,77
	Fabricação de vinho	t uva	2,5	0,5	2,0
	Fabricação de malte, cervejas e chopes	m^3 produzido	4,0-5,4	0,8-1,2	3,2-4,3
	Fabricação de bebidas não-alcoólicas	m^3 produzido	1,4-3,0	0,9	0,5-2,1
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	Fabricação de vidro e de produtos do vidro	t produzida	0,3-10	0,1	0,2-9,9
	Fabricação de cimento	t produzida	0,08-0,4	0,08-0,4	-
	Fabricação de artefatos de concreto, cimento, fibrocimento, gesso e materiais semelhantes	m^3 concreto	0,25	0,25	-
	Fabricação de produtos cerâmicos	Louça sanitária	0,0471	0,01	0,0371
	Aparelhamento de pedras e fabricação de outros produtos de minerais não-metálicos	t produzida	0,41-7,27	0,08-1,45	0,33-5,82

Fonte: CNI (2013).
(1) Produção do efluente superior à retirada devido à produção de soro

A maior parte das indústrias estão localizadas na região de Sobral (Figura 20) em comparação com outros municípios de Maracanaú.

Figura 20 – Localização das indústrias da bacia do rio Acaraú



Fonte: Elaborado pelo autor (2018). Endereços fornecidos pela FIEC (2014).

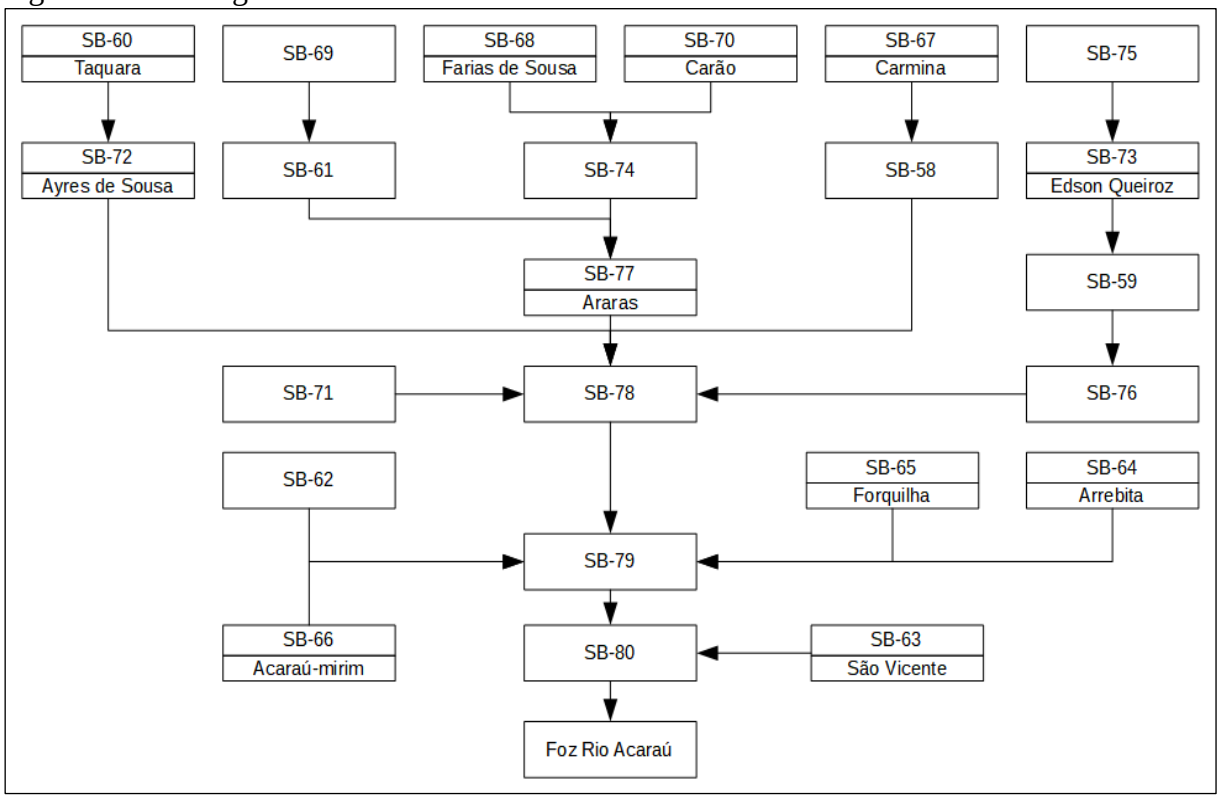
4.4 Sistema de informação geográfica (SIG)

Após a caracterização da área de estudo, procedeu-se com a montagem de um sistema de informações geográficas (SIG) da bacia do rio Acaraú utilizando o software QGIS, agregando as seguintes informações em formato *shapefile* no *datum* SIRGAS 2000:

- Delimitação do território cearense, de seus municípios e localização das sedes municipais;
- Delimitação da bacia do rio Acaraú e suas sub-bacias;
- Delimitação dos perímetros irrigados existentes;
- Traçado da malha hídrica e localização de seus principais reservatórios (Figura 14);
- Mapa hidrogeológico do Estado do Ceará (Figura 17);
- Localização das estações de tratamento de água (ETA) e esgoto (ETE) (Figura 19);
- Localização das indústrias com base no Guia da FIEC 2014 (Figura 20).

O traçado da malha dos principais rios permitiu a identificação dos fluxos e a interdependência entre as sub-bacias, conforme apresentado na Figura 21.

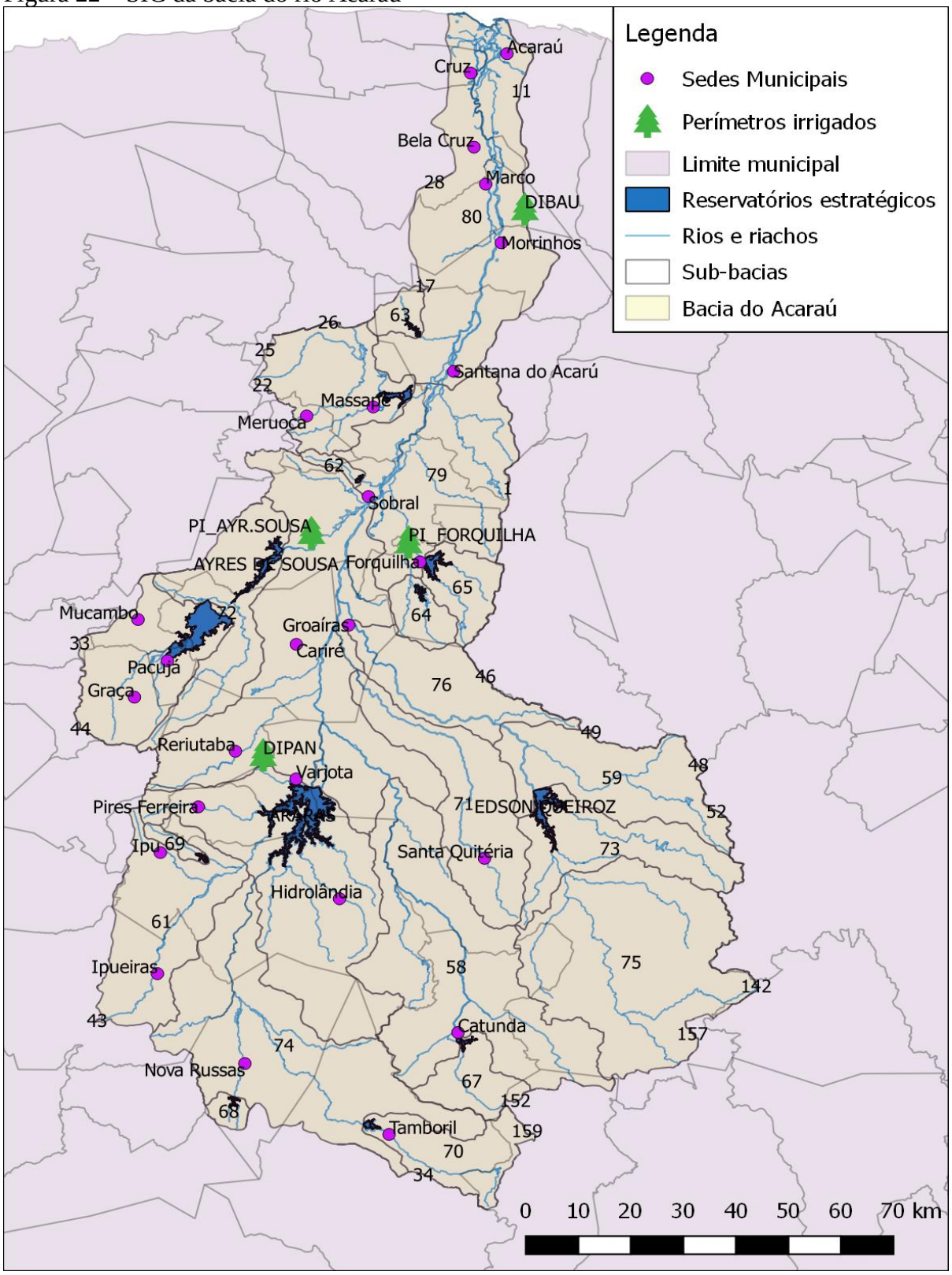
Figura 21 – Fluxograma hídrico das sub-bacias da bacia do rio Acaraú



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Foi montado um SIG com informações básicas, tais como: hidrografia principal, 23 sub-bacias, 11 reservatórios estratégicos, perímetros irrigados, indústrias, limites e sedes municipais, e os principais rios da bacia do rio Acaraú. O SIG está apresentado na Figura 22.

Figura 22 – SIG da bacia do rio Acaraú



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.5 Dados meteorológicos

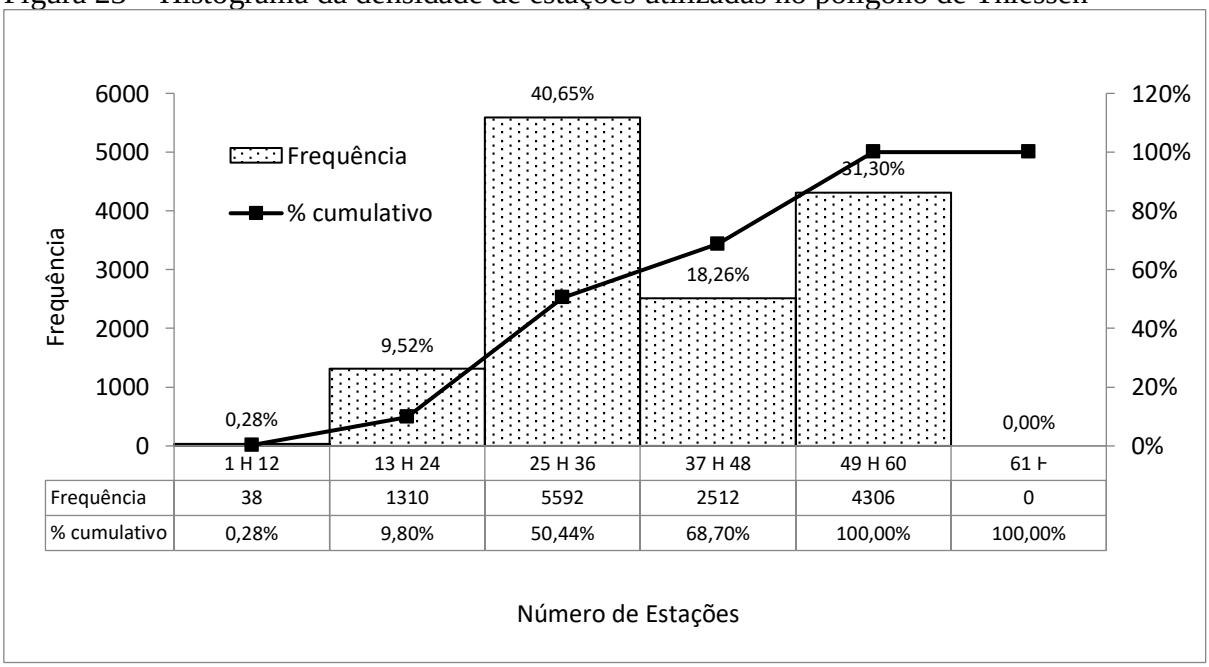
Foram levantados dados meteorológicos para sua utilização, tanto no modelo VYELAS, para determinação das vazões máximas outorgáveis (90% do Q_{90}), quanto no modelo SIGA, para as simulações de balanço hídrico e alocação de água. Os dados meteorológicos levantados foram as séries de precipitação e evaporação diária.

4.5.1 Precipitação diária

Foi fornecida pela FUNCEME, a série de precipitações diárias das 23 sub-bacias da bacia do rio Acaraú (SB-58 a SB-80), compreendendo o período de 01/01/1980 a 31/08/2017. A fim de evitar lacunas de informações na série de precipitação diária, a FUNCEME desenvolveu uma rotina computacional que gera o polígono de Thiessen, para cada dia da série, utilizando os dados diários disponíveis nas suas estações meteorológicas do Estado e do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Portanto, não foi necessário realizar nenhum procedimento de preenchimento de falha de dados.

Para avaliar a representatividade do número diário de postos meteorológicos utilizados nos 13758 polígonos de Thiessen (número de dias do período) para a geração da série de precipitação diária sem falhas, a densidade de pontos foi analisada na forma de histograma conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Histograma da densidade de estações utilizadas no polígono de Thiessen



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

De acordo com o Manual de Práticas Hidrológicas da Organização Meteorológica Mundial (WMO), a densidade mínima de estações meteorológicas em uma área depende de suas características fisiográficas. Para regiões planas ou montanhosas mais afastadas da costa a densidade mínima é 575 km^2 por estação, e para regiões próximas da costa, 900 km^2 por estação (WMO, 2008).

Considerando que a área costeira da bacia do rio Acaraú, de acordo com o mapa de geodiversidade do Brasil da CPRM (BRASIL, 2006b), representa apenas 0,2% de sua área total, podendo-se adotar a densidade mínima de postos de 575 km^2 por estação, o que implica na recomendação de pelo menos 25 estações meteorológicas para a área da bacia do rio Acaraú de 14.432 km^2. Analisando o gráfico da Figura 22, constata-se que 90,2% dos dados de precipitação diária foram gerados a partir de, pelo menos, 25 estações meteorológicas pelo método de Thiessen, confirmando a consistência da série.

Com base nos dados da FUNCEME, a precipitação média histórica da bacia do rio Acaraú é de 800 mm/ano, sendo os meses de janeiro a abril responsáveis por 80% da precipitação anual.

4.5.2 Evaporação diária

Os dados de evaporação diária da bacia do rio Acaraú foram obtidos a partir da série histórica diária de evaporação das estações meteorológicas do INMET nos municípios de Acaraú, Sobral e Crateús (Tabela 19). Apesar de Crateús não fazer parte da área de estudo, sua estação meteorológica foi utilizada devido à sua proximidade com o limite sul da bacia do rio Acaraú.

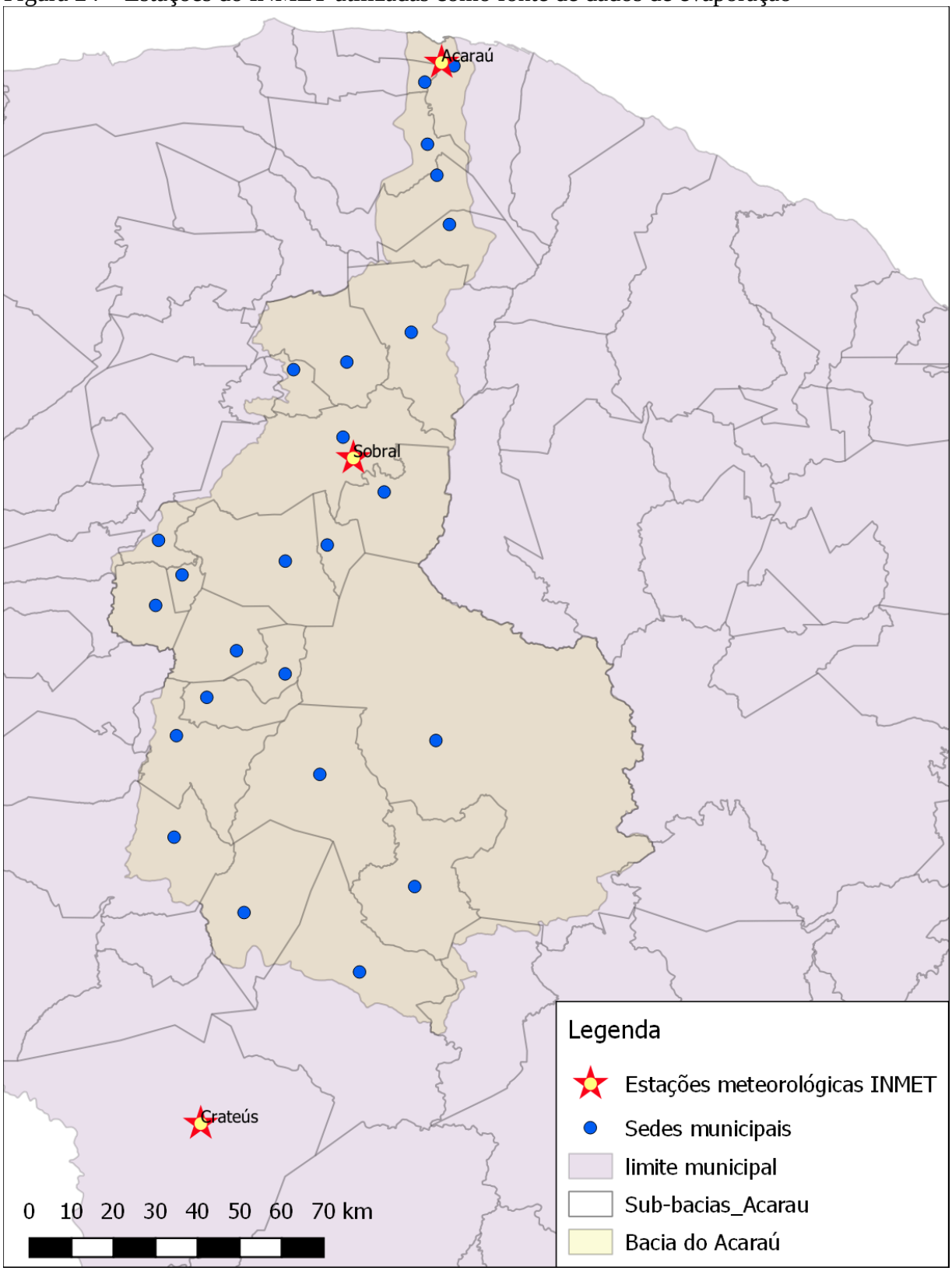
Tabela 19 – Estações meteorológicas utilizadas na pesquisa

Estação	Município	Latitude	Longitude	Altitude	Início de operação
82294	Acaraú	-2,88	-40,14	16,50	01/01/1923
82392	Sobral	-3,73	-40,33	109,62	01/07/1919
82583	Crateús	-5,16	-40,66	296,82	01/12/1962

Fonte: INMET (2018).

A localização geográfica das três estações meteorológicas está apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Estações do INMET utilizadas como fonte de dados de evaporação

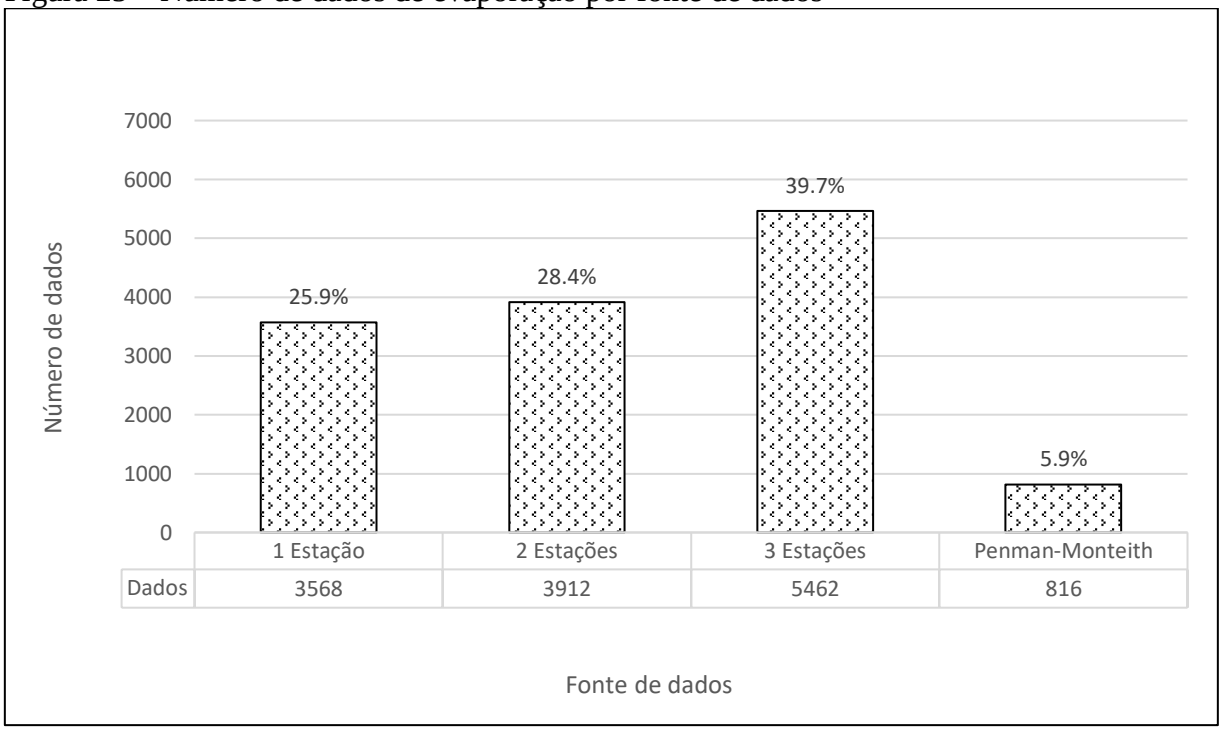


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Devido a existências de falhas na série histórica diária das três estações meteorológicas, um procedimento de preenchimento de falhas foi implementado, adotando-se o valor médio de evaporação dos dados disponíveis para as três estações meteorológicas do

INMET (Acaraú, Sobral e Crateús). No caso de ausência dos três dados para um dia específico, foi adotado o valor de evapotranspiração de referência calculado pelo método de Penman (1948) e Monteith (1965). Conforme histograma da Figura 25, apenas 5,9% dos dados foram gerados a partir do método de Penman (1948) e Monteith (1965). Portanto, dos 13.758 dados da série histórica diária de evaporação, 94,1% (12.942) são provenientes de medições em pelo menos uma estação meteorológica (Acaraú, Sobral ou Crateús).

Figura 25 – Número de dados de evaporação por fonte de dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para o cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman (1948) e Monteith (1965), utilizou-se o procedimento FAO-56, cujo passo-a-passo foi detalhado por Zotarelli *et al.* (2015). O referido procedimento leva em consideração as variáveis climáticas: velocidade do vento a 2 m de altura, umidade relativa do ar, temperaturas mínimas e máximas e radiação solar, que foram obtidos do INMET, para as três estações do estudo, entre 01 de janeiro de 1980 e 31 de agosto de 2017.

Para superar o problema de falhas destas variáveis diárias pela ausência de dados nas três estações meteorológicas, optou-se por preenche-las com suas médias mensais, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 –Variáveis usadas no preenchimento de falhas da série de evaporação

Mês	Radiação Solar (W/m^2)	Temperatura Média (ºC)	Velocidade do vento a 2m (m/s)	Umidade relativa	Evapotranspiração Calculada (mm/d)
Janeiro	208,33	28,1	2,8	0,69	7,4
Fevereiro	210,83	27,5	2,4	0,76	7,0
Março	203,75	27,2	2,0	0,82	6,4
Abril	190,56	26,9	1,8	0,83	5,9
Maio	213,06	27,1	2,2	0,78	6,8
Junho	205,69	27,0	2,5	0,70	7,0
Julho	231,53	27,2	2,8	0,62	8,3
Agosto	254,58	28,0	3,4	0,56	9,6
Setembro	252,64	28,6	3,9	0,55	9,9
Outubro	262,50	29,0	3,9	0,55	10,1
Novembro	254,31	29,0	3,7	0,57	9,8
Dezembro	237,64	29,0	3,5	0,64	8,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Adotou-se ainda, para o cálculo da evapotranspiração, a altitude de Sobral (70m) que implica em uma pressão atmosférica de 100,48 kPa e uma constante psicrométrica de 0,06682 KPa.ºC^{-1}.

4.6 Dados dimensionais dos reservatórios

Os dados dimensionais dos reservatórios são necessários para configuração dos dados de entrada do modelo VYELAS, notadamente o fator de forma (α) e os volumes mínimo e máximo. O modelo SIGA também requer os limites de volume do reservatório, além do volume de partida, curva cota-área-volume (CAV) e características do vertedouro (apenas na versão de escala diária).

4.6.1 Volumes mínimo, máximo e inicial dos reservatórios

Os valores de volume mínimo e máximo dos reservatórios requeridos pelos modelos VYELAS e SIGA foram obtidos de fichas técnicas fornecidas pela COGERH. Foram considerados como volume máximo e mínimo, respectivamente, a capacidade e o volume morto dos reservatórios. Foi adotado como volume inicial ou de partida de cada reservatório o maior valor entre o volume disponível no dia 01 de janeiro de 2018 (obtido no Portal Hidrológico da COGERH) e o volume morto. Essa abordagem foi necessária pelo fato de os modelos não aceitarem volumes de partida inferiores ao volume mínimo. Vale ressaltar que, o número elevado de eventos de simulação, reduz a sensibilidade dos resultados em relação ao volume de partida, fato conhecido nas técnicas de modelagem como “perda de memória”. Os dados de volume mínimo, máximo e inicial estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Volumes mínimo, máximo e de partida dos reservatórios

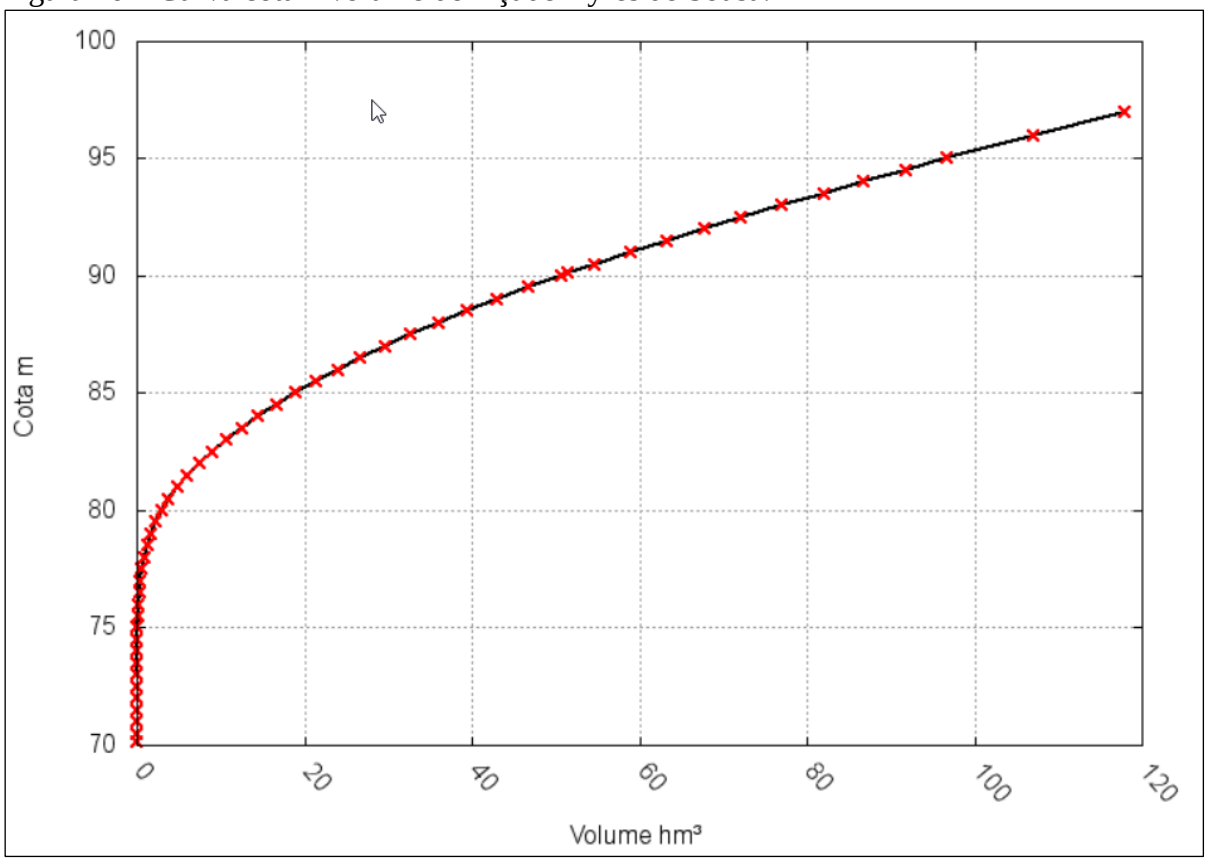
Reservatório	Volume Mínimo (hm^3)	Volume Máximo (hm^3)	Volume Inicial 01/01/2018 (hm^3)	Volume Inicial adotado (hm^3)
Acaraú Mirim	9,50	52,00	26,73	26,73
Araras	17,76	891,00	66,84	66,84
Arrebita	0,29	19,60	4,05	4,05
Ayres de Sousa	7,42	96,80	47,46	47,46
Carão	1,27	26,23	0,00	1,27
Carmina	0,06	13,63	0,00	0,06
Edson Queiroz	32,51	254,00	59,29	59,29
Farias de Souza	1,09	12,23	0,00	1,09
Forquilha	8,83	50,13	5,75	8,83
São Vicente	0,76	9,84	6,61	6,61
Taquara	16,08	320,78	72,64	72,64

Fonte: CEARÁ (2018c).

4.6.2 Curvas Cota-Área-Volume (CAV) dos reservatórios

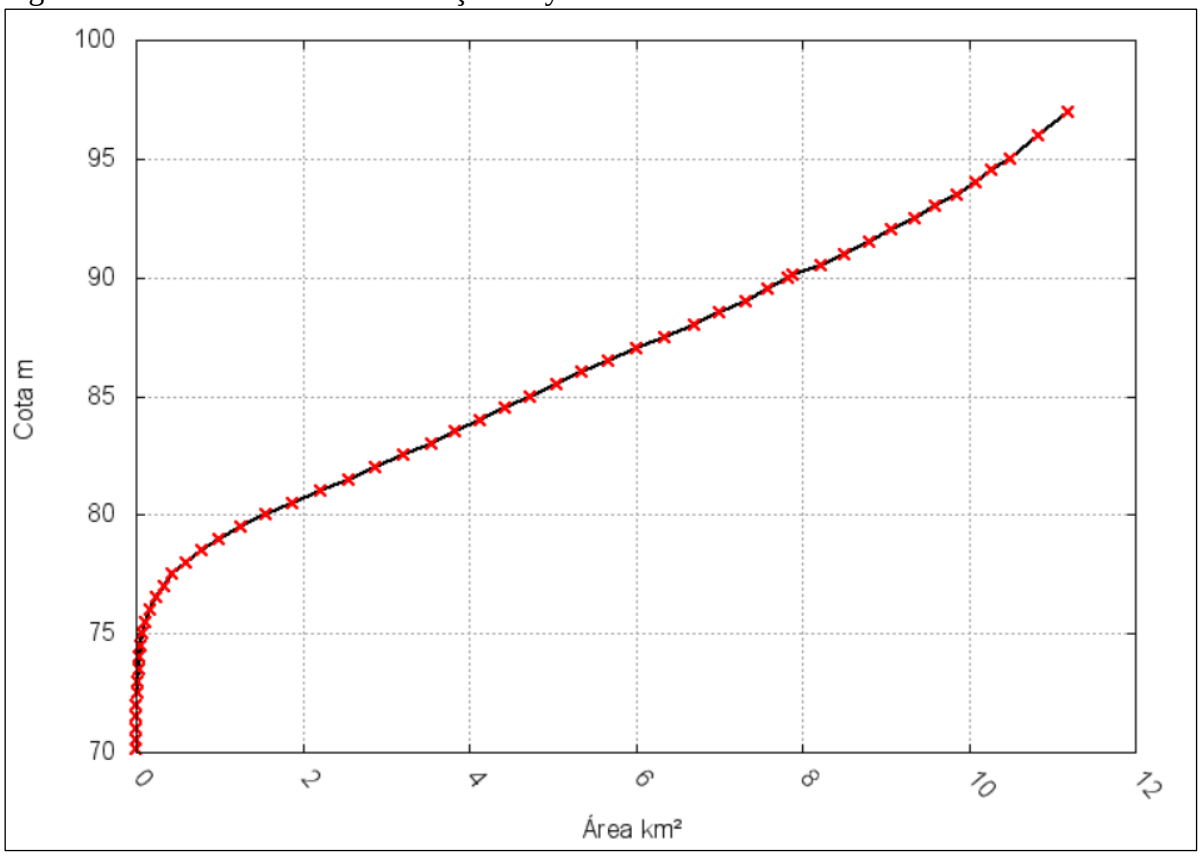
A curva cota-área-volume (CAV) de cada reservatório foi inserida diretamente no SIGA a partir de uma rotina do programa que acessa o banco de dados da FUNCEME. O sistema armazena duas curvas: cota x volume (Figura 26) e cota x área (Figura 27).

Figura 26 – Curva cota x volume do Açude Ayres de Sousa.



Fonte: SIGA versão 1.5.2.8 rev RC 20180328.

Figura 27 – Curva cota x área do Açude Ayres de Sousa.



Fonte: SIGA v1.5.2.8 rev RC 20180328.

É possível ainda configurar no SIGA regressões não-lineares do tipo polinomial e potência ou uma linearização entre pontos para uso de dados interpolados nas rotinas de cálculo do balanço hídrico. Neste caso, foi adotada a opção “linear por pontos” para a interpolação de dados de cota, área e volume. Uma exigência da ferramenta é que os valores de área e volume da primeira cota sejam zero.

4.6.3 Características dos vertedouros

O vertedouro tem por finalidade assegurar a descarga da cheia do reservatório, podendo ser de soleira livre ou controlado por comportas (BRASIL, 2015).

Para as simulações de otimizações de escala temporal diária, é requerido como dado de entrada no SIGA dois parâmetros específicos do vertedouro de cada reservatório: comprimento da soleira e o coeficiente de descarga (Cd) (Tabela 22). Este último representa o coeficiente na forma simplificada da Equação 20.

$$Q = Cd.L.H^{3/2} \tag{20}$$

sendo:

Q – Vazão descarregada (m^3/s)
Cd – Coeficiente de descarga ($m^{1/2}.s^{-1}$)
L – Largura do vertedor (m)
H – Altura da lâmina no vertedor (m)

Tabela 22 – Parâmetros de entrada dos vertedores

Açude	Comprimento da Soleira (m)	Coeficiente de descarga ($m^{1/2}.s^{-1}$)
Acaraú Mirim	60,00	1,60
Araras (Paulo Sarasate)	265,00	2,00
Arrebita	70,00	1,60
Ayres de Sousa (Jaibaras)	106,05	2,00
Carão	192,90	1,60
Carmina	65,00	1,60
Edson Queiroz	250,75	2,00
Farias de Souza	80,00	1,60
Forquilha	50,00	1,60
São Vicente	53,00	1,60
Taquara[(a)]	200,00	1,60

Fonte: Adaptado de FUNCEME (2017) e Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará (CEARÁ, 2018d).

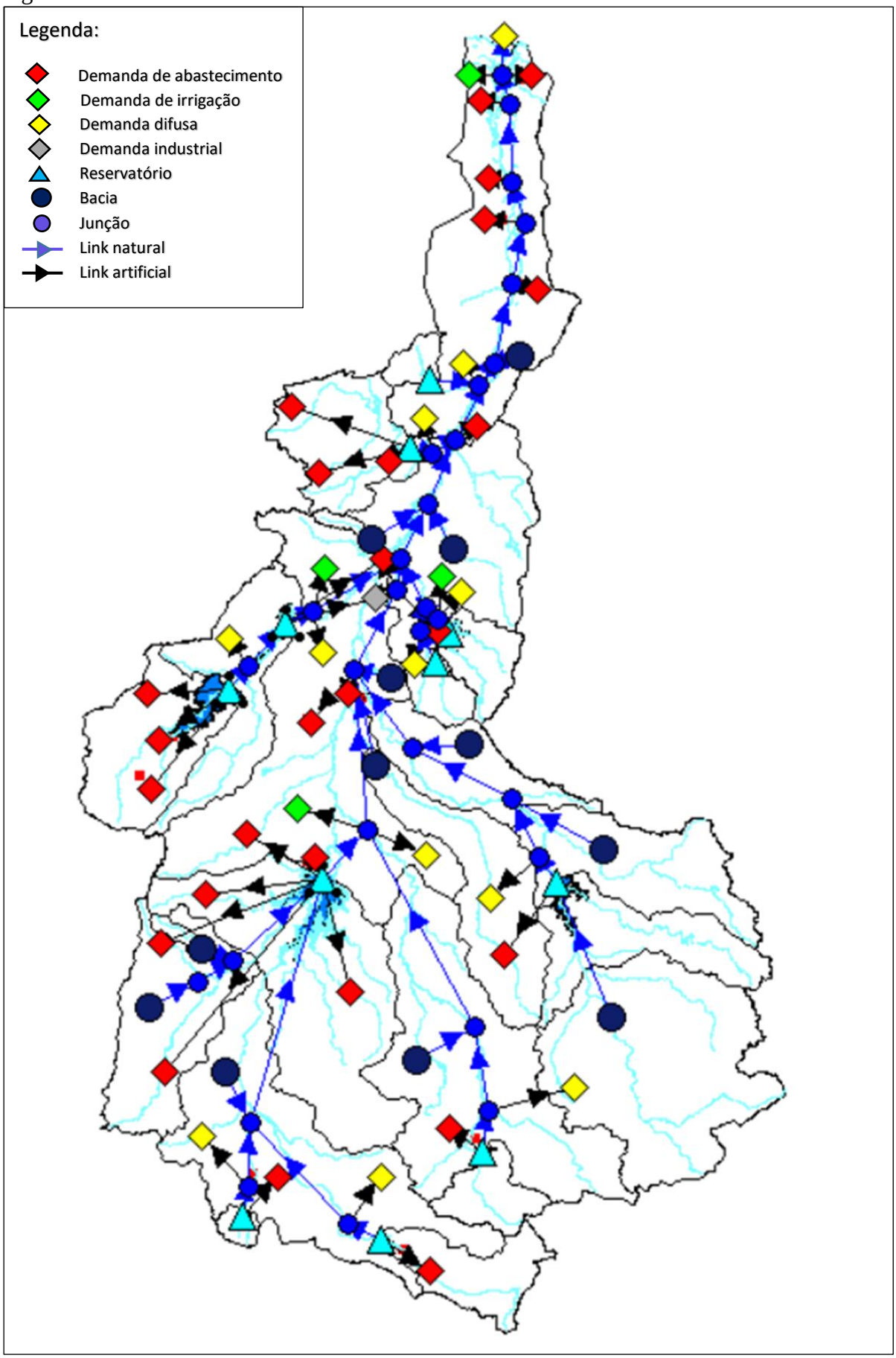
Como as simulações foram feitas com passo mensal, não foi necessário adotar os coeficientes de descarga para os 11 reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú.

4.7 Desenho da rede no SIGA

Utilizando como pano de fundo os *shapefiles* de delimitação da bacia do rio Acaraú, das sub-bacias, dos reservatórios, rios e das sedes municipais compreendidas dentro da área de estudo, a rede de fluxo foi desenhada no SIGA considerando suas fontes (reservatórios), demandas de abastecimento (sedes municipais), demandas industriais (polo industrial da região de Sobral), demandas agrícolas (perímetros irrigados) e *links* (interconexões naturais e artificiais), obtendo-se uma topologia da rede com escala aproximada (Figura 28).

O traçado é feito de forma amigável usando o ambiente SIG do SIGA utilizando o padrão de símbolos para reservatórios, demandas, junções, bacias e links. A ferramenta permite diferenciação de cores para demandas e links para destacar o tipo de demanda ou se o link é do tipo natural ou artificial. Há ainda a possibilidade de customizar tamanhos dos símbolos, exibição de rótulos e camadas, e outras funções gráficas.

Figura 28 – Rede de fluxo da bacia do rio Acaraú no SIGA

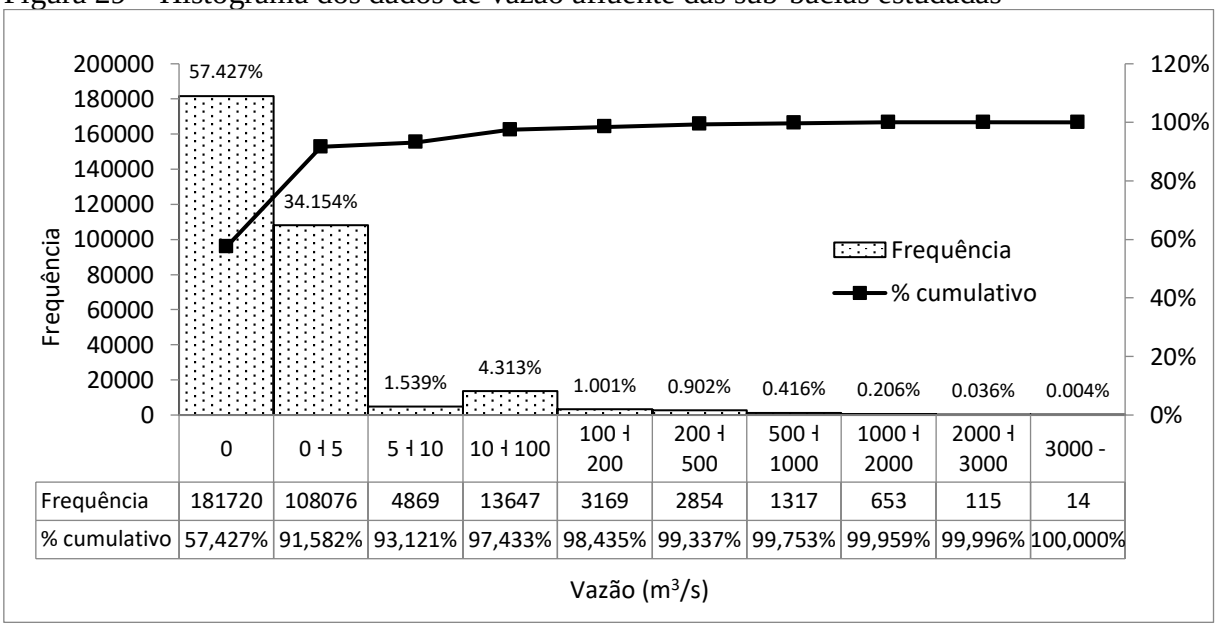


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.8 Geração de vazões no modelo WASA

As vazões diárias afluentes relativas às 23 sub-bacias do estudo foram geradas, com o apoio da FUNCEME, utilizando o modelo hidrológico WASA para o período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de agosto de 2018. Com o intuito de avaliar a frequência e a magnitude do escoamento superficial gerado pelo modelo WASA, no período considerado de 13.758 dias, um histograma dos dados de vazão afluente das 23 (vinte e três) sub-bacias da bacia do rio Acaraú foi construído, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Histograma dos dados de vazão afluente das sub-bacias estudadas



	0	0 ⊣ 5	5 ⊣ 10	10 ⊣ 100	100 ⊣ 200	200 ⊣ 500	500 ⊣ 1000	1000 ⊣ 2000	2000 ⊣ 3000	3000 -
Frequência	181720	108076	4869	13647	3169	2854	1317	653	115	14
% cumulativo	57,427%	91,582%	93,121%	97,433%	98,435%	99,337%	99,753%	99,959%	99,996%	100,000%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Dos 316.434 dados de vazão gerados (13.758 dias x 23 sub-bacias), 57,4% possuem valor zero, ou seja, de acordo com o modelo hidrológico, na maior parte do período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de agosto de 2017, não houve escoamento superficial. A maioria dos dados diferentes de zero se encontram no intervalo de 0 a 5 m^3/s (34,15%) que quando somados ao grupo de dados de valor zero, representam juntos 91,6% dos dados.

As séries de vazões afluentes geradas pelo modelo WASA, para as 23 sub-bacias da bacia do rio Acaraú, foram importadas como dado de entrada dos reservatórios no modelo SIGA. A vazão média afluente anual de cada sub-bacia foi determinada para utilização como dado de entrada no modelo VYELAS.

4.9 Vazões máximas outorgáveis

As vazões máximas liberadas em cada reservatório foram consideradas neste estudo como as vazões máximas outorgáveis, ou seja, 90% do $Q_{90,}$ conforme o Decreto nº 31.076/2012 que regulamenta a lei nº14.844/2010 do Estado do Ceará. O cálculo foi realizado no Modelo VYELAS, desenvolvido por Araújo, Güntner e Bronstert (2006), e, posteriormente, foi utilizado como vazão limite constante no SIGA. Um resumo dos dados de entrada do VYELAS está apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados de entrada do Modelo VYELAS

Parâmetro	AM	AR	AT	AS	CR	CM	EQ	FS	FQ	SV	TQ
Vazão afluente média anual (hm^3/ano)	165,22	1117,27	29,12	193,91	26,00	23,61	387,39	8,03	26,57	21,61	67,26
Coeficiente de variação anual afluente	0,806	0,993	1,180	0,850	1,246	1,231	1,279	0,932	1,100	0,816	0,704
Fator de forma do reservatório	15989	19715	5006	6109	12764	3516	14947	2920	16427	3252	15603
Evaporação no período seco (m/ano)	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
Capacidade do reservatório (hm^3)	52,00	891,00	19,60	96,80	26,23	13,63	254,00	12,23	50,13	9,84	274,00
Volume mínimo operacional (hm^3)	9,50	17,76	0,29	7,42	1,27	0,06	32,51	1,09	8,83	0,76	16,08
Volume inicial no primeiro ano (hm^3)	26,73	66,84	4,05	49,03	1,27	0,06	59,29	1,09	11,47	6,61	72,64
No de passos de vazão regularizada	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Vazão regularizada mínima (hm^3/ano)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Vazão regularizada máxima (hm^3/ano)	30,00	450,00	10,00	60,00	7,00	5,00	100,00	3,00	5,00	6,00	500
Nº de simulações do procedimento estocástico	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).
Legenda: AM – Acaraú-mirim; AR – Araras; AT – Arrebita; AS – Ayres de Sousa; CR – Carão; CM – Carmina; EQ – Edson Queiroz; FS – Farias de Souza; FQ – Forquilha; SV – São Vicente; TQ – Taquara.

Considerando a alta sensibilidade do modelo VYELAS à elevados valores de coeficiente de variação de deflúvio anual, optou-se por limitar o coeficiente de variação anual à 1,250. Apenas dois reservatórios apresentaram valores superiores a este limite, no caso, o Forquilha com 1,392, e o Arrebita com 2,008. Para estes reservatórios, foram utilizados valores de coeficientes adotados em outros trabalhos técnico-científicos: 1,100 para Forquilha,

conforme inventário ambiental da COGERH (CEARÁ, 2007); e 1,180 para Arrebita, valor atribuído à estação fluviométrica da ANA mais próxima (Fazenda Bela Vista) que monitora o Riacho Conceição (CEARÁ, 2010d).

Para a determinação da evaporação anual no período seco, foi utilizada a média da série de evaporação, considerando apenas os valores dos meses de junho a janeiro.

4.10 Vazões liberadas dos reservatórios

A alocação de água na bacia do rio Acaraú é negociada em reuniões dos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH), órgão colegiado de caráter consultivo e deliberativo, que compõe o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SIGERH. O CBH do rio Acaraú foi criado pelo decreto nº 27.647 de 08 de junho de 2006 e conta com uma diretoria colegiada, membros do poder público municipal, estadual e federal, usuários da água e sociedade civil.

As propostas de alocação de água são normalmente apresentadas na forma de cenários, com seus riscos associados, para deliberação do comitê. As vazões a serem liberadas são definidas procurando atender à todas as demandas de abastecimento humano, de irrigação, industriais e difusas, considerando as perdas em trânsito e a possibilidade de retiradas não autorizadas. As vazões liberadas dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, em situação de normalidade hídrica, estão apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Vazões liberadas dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú

Açude	Município	Vazões liberadas (m^3/s)
Acaraú Mirim	Massapê	0,250
Araras (Paulo Sarasate)	Varjota	5,400
Arrebita	Forquilha	0,070
Ayres de Sousa (Jaibaras)	Sobral	1,100
Carão	Tamboril	0,025
Carmina	Catunda	0,020
Edson Queiroz	Santa Quitéria	1,100
Farias de Souza	Nova Russas	0,045
Forquilha	Forquilha	0,220
São Vicente	Santana do Acaraú	0,130
Taquara	Cariré	1,100

Fonte: COGERH (2017).

4.10.1 Regras de liberação

As regras de liberação de água dos reservatórios são configuráveis no SIGA, baseadas em 5 (cinco) tipos de gatilho:

- Periódica: São estabelecidos valores fixos mensais de liberação;
- Dependente do armazenamento: São estabelecidas faixas de vazão a serem liberadas para diferentes percentuais de volume armazenado do próprio reservatório ou de outro;
- Constante: É estabelecido um valor constante de vazão a ser liberada;
- Garantia de demanda: É estabelecida uma garantia mínima do reservatório a partir do qual passa a liberar água;
- Série: São estabelecidos valores variados em qualquer escala temporal (diário, mensal, anual) para um período pré-estabelecido;

Para os reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, foram definidas regras de liberação praticadas pela COGERH (Tabela 25), no caso, a do tipo constante, utilizando os valores de vazão apresentados na Tabela 24, com exceção do Açude Taquara que utiliza a regra de dependência de armazenamento, liberando a vazão de 1,1 m^3/s apenas quando o Açude Ayres de Sousa atingir o volume armazenado de 15%. Essa regra excepcional ocorre pelo fato do Açude Taquara possuir a função dupla de abastecer suas demandas e reforçar o aporte de água do Açude Ayres de Sousa.

Tabela 25 – Regras de liberação de água dos reservatórios

Açude	Regra de liberação
Acaraú Mirim	Constante
Araras (Paulo Sarasate)	Constante
Arrebita	Constante
Ayres de Sousa (Jaibaras)	Constante
Carão	Constante
Carmina	Constante
Edson Queiroz	Constante
Farias de Souza	Constante
Forquilha	Constante
São Vicente	Constante
Taquara	Dependente do armazenamento

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.11 Estudo de demandas

4.11.1 Caracterização da demanda

Segundo o PLANERH (2005), os principais demandantes de água da bacia do rio Acaraú são, na ordem, a agricultura (84%), o abastecimento humano (15%), e o industrial (1%) (CEARÁ, 2009).

Quanto à agricultura, o maior demandante é o DIBAU, devido a sua importante extensão de 8,3 mil hectares de área irrigável (Tabela 17) e por estar localizado próximo à foz do rio Acaraú, elevando as perdas em trânsito.

O segundo maior demandante, a própria população residente, representa uma população de aproximadamente 700.000 habitantes (Tabela 14). O município mais populoso é Sobral com aproximadamente 206 mil habitantes, sendo 181 mil dentro da bacia (Tabela 14).

Quanto à indústria, verificam-se três polos de desenvolvimento na bacia, um formado pelos municípios de Sobral e Santa Quitéria, outro pelos municípios de Marco e Bela Cruz, e um terceiro, pelos municípios de Nova Russas, Ipu e Ipueiras, sendo o mais relevante, do ponto de vista de demanda hídrica, o polo da região de Sobral (CEARÁ, 2009), com participação produtiva cearense de 9,52%.

Foram considerados, neste estudo, quatro tipos de demandas: abastecimento humano, irrigação, industrial e difusa. A demanda de abastecimento humano compreende o fornecimento de água para as áreas urbanas dos municípios pertencentes à bacia do rio Acaraú. A demanda de irrigação consiste no fornecimento de água para 4 perímetros irrigados: DIPAN (Distrito do Perímetro Irrigado Araras Norte), DIBAU (Distrito do Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú), Forquilha e Ayres de Sousa. Já a demanda industrial consiste do abastecimento de água ao polo industrial de Sobral, o mais representativo da área de estudo. A demanda difusa representa o somatório de todo tipo de demanda de menor porte, tais como o abastecimento humano de pequenos distritos, localidades e zonas rurais, o provimento à pequenas áreas agrícolas e pecuaristas e aporte de pequenos açudes, tendo cada reservatório sua demanda difusa específica.

4.11.2 Demanda de abastecimento humano

Mantendo o caráter conservador da pesquisa, as demandas de abastecimento humano foram calculadas assumindo o maior dos seguintes valores (Tabela 26):

- Vazões controladas nas ETAs operadas pela Cagece em 2010;
- Vazões controladas nas ETAs operadas pela Cagece em 2016;
- Vazões monitoradas pela COGERH no ano de 2014;
- Vazões calculadas a partir da população do IBGE projetada para 2017;

A utilização de dois anos diferentes para as vazões controladas pela Cagece se deve ao cuidado de considerar o cenário de normalidade, representada pelo ano de 2010, e de escassez hídrica, representada pelo ano de 2016, reduzindo distorções de comportamento de

consumo e decorrência da seca prolongada. A adoção do último método de cálculo que utiliza dados do IBGE dá maior segurança na assunção da demanda real, visto a possibilidade, em alguns casos, de imprecisão de dados de vazão medidos por medidores do tipo proporcional ou similares. Por se tratar de anos diferentes, todas as vazões foram corrigidas para 2017 utilizando as taxas de crescimento adotadas nas projeções populacionais do IBGE.

Os sistemas de abastecimento de água das sedes de Ipu, Ipueiras, Nova Russas e Sobral são operados e mantidos pelo próprio Município (SAAE), não havendo, portanto, registro de dados na Concessionária Estadual (CAGECE). Já os Municípios de Ibiapina e Nova Russas não foram considerados no estudo por terem suas áreas urbanas abastecidas por mananciais fora da bacia do rio Acaraú, no caso, respectivamente, pelo o Açude Jaburu I, pertencente à bacia da Serra da Ibiapaba, e pelo Açude Monsenhor Tabosa, pertencente à bacia do Banabuiú. O resumo das demandas de abastecimento humano está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Demandas de abastecimento humano adotadas no estudo

	Demandas de abastecimento humano corrigidas para o ano 2017 (m^3/s)				
Município	**Método 1 Fonte CAGECE ano 2010**	**Método 2 Fonte CAGECE ano 2016**	**Método 3 Fonte COGERH ano 2014**	**Método 4 Fonte IBGE/CAGECE ano 2017**	**Demanda adotada ano 2017 (m^3/s)**
Acaraú	0,0297	0,0335	0,0614	0,0411	0,0614
Alcântaras	0,0052	0,0042	-	0,0052	0,0052
Bela Cruz	0,0178	0,0212	0,0182	0,0222	0,0222
Cariré	0,0131	0,0144	0,0138	0,0162	0,0162
Catunda	0,0081	0,0057	0,0091	0,0082	0,0091
Cruz	0,0129	0,0187	0,0145	0,0180	0,0187
Forquilha	0,0359	0,0312	0,0449	0,0314	0,0449
Graça	0,0059	0,0018	0,0054	0,0099	0,0099
Groaíras	0,0138	0,0139	0,0161	0,0151	0,0161
Hidrolândia	0,0190	0,0126	0,0162	0,0201	0,0201
Ibiapina	-	-	-	-	-
Ipu	-	-	0,0358	0,0443(a)	0,0443
Ipueiras	-	-	0,0127	0,0485(a)	0,0485
Marco	0,0214	0,0197	0,0226	0,0240	0,0240
Massapê	0,0480	0,0533	0,0557	0,0520	0,0557
Meruoca	0,0114	0,0070	0,0078	0,0099	0,0114
Monsenhor Tabosa	-	-	-	-	-
Morrinhos	0,0112	0,0144	0,0170	0,0248	0,0248
Mucambo	0,0042	0,0108	-	0,0221	0,0221
Nova Russas	-	-	0,0507	-	0,0507
Pacujá	0,0087	0,0170	0,0103	0,0103	0,0170
Pires Ferreira	0,0075	0,0062	0,0161	0,0090	0,0161
Reriutaba	0,0202	0,0312	0,0211	0,0263	0,0312
Santa Quitéria	0,0465	0,0371	0,0435	0,0535	0,0535
Santana do Acaraú	0,0231	0,0191	0,0185	0,0235	0,0235
Sobral	-	-	0,5261	-	0,5261
Tamboril	0,0192	0,0141	0,0215	0,0215	0,0215
Varjota	0,0291	0,0181	0,0233	0,0378	0,0378

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).
(a) Vazões calculadas a partir de dados do SNIS 2016 (BRASIL, 2018a) e assumindo perda no tratamento de 10%.

4.11.3 Demanda de irrigação

As demandas de irrigação mais relevantes para a bacia do rio Acaraú, correspondem aos seus perímetros irrigados: DIPAN (Distrito do Perímetro Irrigado Araras Norte), DIBAU (Distrito do Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú), Forquilha e Ayres de Sousa. As vazões de demanda foram fornecidas pela COGERH, considerando situação de normalidade hídrica (Tabela 27).

Tabela 27 – Demanda de água dos perímetros irrigados da bacia do rio Acaraú

Perímetro Irrigado	Localização	Demanda de água (m^3/s)
Araras Norte (DIPAN)	Varjota e Reriutaba	0,80
Ayres de Sousa	Sobral	0,11
Baixo-Acaraú (DIBAU)	Acaraú, Bela Cruz e Marco	2,10
Forquilha	Forquilha	0,13

Fonte: COGERH (2017).

4.11.4 Demanda industrial

Os municípios de Sobral e Forquilha são os mais representativos da bacia do rio Acaraú em produção industrial e, consequentemente, são os maiores demandantes de água para esta finalidade. A maior vocação da região de Sobral é para a Indústria de transformação, de acordo com o IPECE (CEARÁ, 2016c), com 595 unidades (88,4%), destacando-se o setor calçadista (PAIVA; CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2009).

De acordo com a COGERH, a demanda de água industrial da região é de 25,7 L/s (0,00257 m^3/s).

4.11.5 Demanda difusa

As demandas difusas são compostas pelas pequenas demandas de abastecimento humano (localidades e comunidades rurais), irrigação de pequenas áreas agrícolas, alimentação de balneários e aporte de pequenos reservatórios. A demanda difusa, neste estudo, foi conceituada como a diferença entre a vazão liberada e todas as outras demandas, somadas às vazões de perenização e de perdas em trânsito, conforme demonstrado na Equação 21.

$$Ddif = Qlib - (Qabh + Qirr + Qind + Qper + Qptr) \quad (21)$$

Sendo:

Ddif – Demanda difusa/perenização local
Qlib – Vazão liberada do reservatório
Qabh – Demanda de abastecimento humano
Qirr – Demanda de irrigação
Qind – Demanda industrial
Qper – Demanda de perenização regional do rio Acaraú
Qptr – Vazão de perda em trânsito

Considerando que as vazões liberadas (Qlib), demandas de abastecimento (Qabh), demandas de irrigação (Qirr) e industrial (Qind) são dadas, a demanda difusa (Ddif) foi calculada após a determinação da demanda de perenização regional (Qper) e da vazão de perda em trânsito (Qptr).

Vale ressaltar que, neste estudo, foram considerados dois tipos de perenização: o local e o regional. O primeiro pode ser considerado equivalente à demanda difusa, tratando-se da parcela de vazão necessária para perenizar uma região menor, logo a jusante da tomada d'água, não havendo, neste caso, o propósito de perenizar o rio Acaraú. Já o segundo tipo, não se confunde com a demanda difusa por tratar-se de vazões maiores com a intenção de perenizar o rio Acaraú para abastecer os municípios mais a jusante e o DIBAU. Os açudes que possuem a função de perenizar, de forma regional, o rio Acaraú são o Ayres de Sousa, Edson Queiroz e Araras.

Para a determinação da vazão de perenização regional, adotou-se a simplificação de que seu valor é equivalente ao total de demandas captadas no rio Acaraú (Tabela 28), no caso, 2.440 L/s referente ao abastecimento humano de Cariré, Groaíras, Sobral (20%), Forquilha (50%), Santana do Acaraú, Morrinhos, Marco, Bela Cruz e Acaraú, além das demandas das indústrias de Sobral (20%) e do DIBAU.

A taxa de perda em trânsito foi obtida utilizando a função "atingir meta" do Microsoft Excel©, obtendo-se o valor de 1,18 %/km, compatível com os resultados obtidos por Lima, Frischkorn e Burte (2007) que avaliou a interação rio-aquífero do Rio Forquilha usando dados experimentais e modelos analíticos, encontrando taxa 1,16%/km após 24h.

As vazões de perda em trânsito foram calculadas utilizando distâncias estimadas dos rios e riachos (Tabela 28) extraídas do SIG montado da bacia do rio Acaraú (Figura 22). Considerando o mapa hidrogeológico da bacia do rio Acaraú (Figura 17), assumiu-se que no trecho do rio Acaraú, entre Groaíras e a sua foz, não há perda em trânsito devido às características do de solo granular no leito do rio, mantendo a conectividade direta da água superficial com a subterrânea por meio de poços.

Não foi considerada nenhuma perda em trânsito para os Açudes Carão, Carmina e Farias de Souza pelo fato das retiradas serem feitas praticamente de forma direta nos reservatórios, com seu uso predominante para o abastecimento humano.

Tabela 28 – Vazões de perenização e perda em trânsito da bacia do rio Acaraú

Açude	Vazão de Perenização Regional (L/s)	Vazão liberada (L/s) (1)	Distância (km)	Taxa (km^{-1})	Perda (%)	Vazão de perda em trânsito (L/s)
Acaraú Mirim	-	177,7	8,0	0,0118	9,4%	16,7
Araras (Paulo Sarasate)	1931,6	5203,2	36,0	0,0118	42,3%	2201,6
Arrebita	-	70,0	24,0	0,0118	28,2%	19,8
Carão	-	-	-	-	-	-
Carmina	-	-	-	-	-	-
Edson Queiroz	192,7	1049,3	65,0	0,0118	76,4%	801,6
Farias de Souza	-	-	-	-	-	-
Forquilha	-	197,6	18,0	0,0118	21,2%	41,8
Ayres de Sousa (Jaibaras)	315,6	658,6	23,0	0,0118	27,0%	178,0
São Vicente	-	130,0	9,0	0,0118	10,6%	13,8
Taquara	-	1051,1	8,0	0,0118	9,4%	98,8
Total	2439,8	8537,4	191,0	-	-	3372,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).
(1) Desconsidera as demandas de abastecimento humano devido à sua captação direto no espelho d'água

Obtendo-se todas as variáveis da Equação 21, é possível realizar o cálculo da demanda difusa, cujos resultados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Demandas difusas dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú

Açude	Demanda difusa	
	(L/s)	(m^3/s)
Acaraú Mirim	161,0	0,1610
Araras (Paulo Sarasate)	270,0	0,2700
Arrebita	50,3	0,0503
Ayres de Sousa (Jaibaras)	55,0	0,0550
Carão	6,7	0,0067
Carmina	11,0	0,0110
Edson Queiroz	55,0	0,0550
Farias de Souza	4,5	0,0045
Forquilha	25,8	0,0258
São Vicente	116,3	0,1163
Taquara	52,2	0,0522

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.11.6 Balanço geral entre oferta e demanda

Utilizando o SIG montado para a bacia do rio Acaraú, determinou-se as interdependências entre os reservatórios estratégicos e as demandas de abastecimento humano,

irrigação, industrial, difusa e a quantificação de suas respectivas vazões de perenização regional e de perda em trânsito.

A determinação dos valores das vazões liberadas dos reservatórios e das demandas já foram apresentadas nos itens 4.10 e 4.11. Algumas demandas não dependem diretamente dos reservatórios estratégicos por fazerem sua captação diretamente no rio Acaraú. É o caso dos municípios de Cariré, Groaíras, parte de Sobral (20%), parte de Forquilha (50%), Santana do Acaraú, Morrinhos, Marco, Bela Cruz, Cruz, Acaraú e o Perímetro Irrigado Baixo-Acaraú. A relação entre as fontes de água e as demandas está apresentada na Tabela 30.

Tabela 30 – Reservatórios estratégicos e demandas hídricas da bacia do rio Acaraú

Açude / Rio Acaraú	Vazão liberada (L/s)	Demanda de abastecimento humano (L/s)		Demanda difusa (L/s)	Demanda irrigação (L/s)	Demanda Industrial (L/s)	Vazão de perenização (L/s)	Vazão perda em trânsito (L/s)
Acaraú Mirim	250	Total	72,3	161,0	-	-	-	16,7
		Alcântaras	5,2					
		Massapê	55,7					
		Meruoca	11,4					
Araras (Paulo Sarasate)	5.400	Total	196,8	270,0	800,0	-	1931,6	2201,6
		Hidrolândia	20,1					
		Ipu	44,3					
		Pires Ferreira	11,1					
		Reriutaba	31,2					
		Varjota	36,2					
		Ipueiras	53,9					
Arrebita	70	-	-	50,3	-	-	-	19,8
Carão	25	Total	18,3	6,7	-	-	-	-
		Tamboril	18,3(a)					
Carmina	20	Total	9,1	11,0	-	-	-	-
		Catunda	9,1					
Edson Queiroz	1.100	Total	50,7	55,0	-	-	192,7	801,6
		Santa Quitéria	50,7					
Farias de Souza	45	Total	40,5	4,5	-	-	-	-
		Nova Russas	40,5(b)					
Forquilha	220	Total	22,4	25,8	130,0	-	-	41,8
		Forquilha	22,4(g)					
Ayres de Sousa (Jaibaras)	1.100	Total	420,9	55,0	110,0	20,5	315,6	178,0
		Sobral	420,9(c)			20,5(d)		
São Vicente	130	-	-	116,3	-	-	-	13,8
Taquara	1.100	Total	949,0	52,2	-	-	-	98,8
		Graça	9,9					
		Mucambo	22,1					
		Pacujá	17,0					
		Aporte Ayres de Sousa	900,0					
Rio Acaraú (Não dependente diretamente de reservatório)	2.440	Total	334,7	-	2100,0	5,1	-	-
		Cariré	16,2					
		Groaíras	16,1					
		Sobral	105,2(e)			5,1(f)		
		Forquilha	22,4(g)					
		Santana do Acaraú	23,5					
		Morrinhos	24,8					
		Marco	24,0					
		Bela Cruz	22,2					
		Cruz	18,7					
		Acaraú	61,4					
		DIBAU	-	-	2100,0	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

(a) 85% da demanda de abastecimento humano de Tamboril (15% é captado via poços); (b) 80% da demanda de abastecimento humano de Nova Russas (20% é captado via poços); (c) 80% da demanda de abastecimento humano de Sobral; (d) 80% da demanda industrial de Sobral; (e) 20% da demanda de abastecimento humano de Sobral; (f) 20% da demanda industrial de Sobral; (g) 50% da demanda de Forquilha.

4.11.7 Prioridade das demandas

A Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) adotou a seguinte ordem de prioridade de fornecimento de água, do mais para o menos importante:

1) abastecimento doméstico e dessedentação animal;
2) abastecimento coletivo especial (hospitais, quartéis, presídios e colégios);
3) outros abastecimentos coletivos não residenciais;
4) indústria, comércio e prestação de serviços;
5) fins agropecuários

Considerando os tipos de demanda adotados no estudo, adotou-se uma ordem de prioridade buscando atender aos requisitos do PERH, conforme apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 – Ordem de prioridade de fornecimento de água bruta para as demandas

Prioridade	Demanda do estudo	Justificativa
1	Abastecimento humano	Demanda urbana, com sua maior parcela para atender ao abastecimento doméstico. Normalmente, a única fonte hídrica relevante é a água de superfície, sendo insuficiente a utilização de poços emergenciais para abastecimento humano.
2	Demanda difusa	Demanda com característica rural, com grande diversidade de uso da água, mas com parcela ainda relevante de abastecimento humano e dessedentação de animais. Na ausência de água de superfície, é comum a utilização de poços em áreas isoladas para atender ao abastecimento humano de pequenas comunidades.
3	Demanda industrial	Demanda para uso industrial, neste estudo, representada pela região de Sobral.
4	Demanda de irrigação	Demanda para atendimento dos Perímetros Irrigados do Baixo-Acaraú (DIBAU), Araras Norte (DIPAN), Ayres de Sousa e Forquilha.
5	Demandas da Perenização	Vazão liberada ao rio Acaraú para atendimento de demandas diversas a jusante

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As demandas de perenizações provenientes dos Açudes Araras, Edson Queiroz e Ayres de Sousa foram adotadas como as menos prioritárias pelo fato de estarem a jusante das outras demandas, sendo invariavelmente as primeiras afetadas por uma restrição.

4.11.8 Regras de alocação das demandas

A ordem de prioridade apresentada na Tabela 31 foi utilizada para definir as regras de alocação, que, na prática, funcionam como regras de rateio de abastecimento para situações de normalidade, excesso e escassez de água de cada reservatório (Figura 30). Em caso de

escassez, por exemplo, as regras de alocação são utilizadas para o rateio proporcional de água. Em situação de excesso de água, pode-se definir, para qual *link*, o excedente será escoado. Quando o valor da vazão liberada se encontra entre dois valores pré-estabelecidos o SIGA realiza a interpolação.

Figura 30 – Tela de regras de alocação de água no SIGA

	Alocação - SB-72 (Ayres de Souza) Release m^3/s	Alocação - SB-72 (Ayres de Souza) L1539 m^3/s	Alocação - SB-72 (Ayres de Souza) L1538 m^3/s	Alocação - SB-72 (Ayres de Souza) L1534 m^3/s
1	1.100	0.421	0.020	0.659
2	1.000	0.421	0.020	0.559
3	0.900	0.421	0.020	0.459
4	0.800	0.421	0.020	0.359
5	0.700	0.421	0.020	0.259
6	0.600	0.421	0.020	0.159
7	0.500	0.421	0.020	0.059
8	0.400	0.400	0.000	0.000
9	0.300	0.300	0.000	0.000
10	0.200	0.200	0.000	0.000
11	0.100	0.100	0.000	0.000

Fonte: SIGA versão 1.5.2.8 rev RC 20180328

4.11.9 Coeficiente de retorno das demandas

Para as simulações do Cenário 2, que considera o reúso indireto de águas, foram adotados os coeficientes de retorno utilizados no estudo da ONS (2005) de estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN, no caso:

- Abastecimento urbano: 0,80 (adotado para abastecimento humano);
- Abastecimento rural: 0,50 (adotado para demanda difusa);
- Abastecimento industrial: 0,80 (adotado para demanda industrial);
- Irrigação: 0,20 (adotado para demanda agrícola).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Vazões máximas outorgáveis obtidas no modelo VYELAS

O modelo VYELAS foi executado para cada reservatório para obtenção das vazões máximas outorgáveis (Tabela 32), que depois foram comparadas com os valores do PERH (1992) e PLANERH (2005).

Tabela 32 – Vazões máximas outorgáveis determinadas pelo modelo VYELAS

Açude	Q_{90} (L/s) PERH (1992)[(a)]	Q_{90} (L/s) PLANERH (2005)[(a)]	Q_{90} (L/s) VYELAS	90% Q_{90} (L/s) VYELAS	Vazão máxima outorgável (L/s)
Acaraú-mirim	680,0	720,0	793,4	714,1	714,0
Araras (Paulo Sarasate)	9270,0	6140,0	11886,5	10697,8	10700,0
Arrebita	-	170,0	181,8	163,6	164,0
Ayres de Sousa (Jaibaras)	1920,0	1500,0	1499,3	1349,4	1350,0
Carão	150,0	220,0	124,9	112,4	112,0
Carmina	-	120,0	134,0	120,6	120,0
Edson Queiroz	1750,0	1750,0	2330,8	2097,7	2100,0
Farias de Souza	110,0	110,0	75,4	67,9	68,0
Forquilha	380,0	450,0	99,7	89,7	90,0
São Vicente	100,0	120,0	138,4	124,6	125,0
Taquara	-	-	1155,9	1040,3	1040,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).
[(a)] CEARÁ, (2010b).

Observa-se que os valores de $Q_{90,}$ determinados pelo VYELAS, para os açudes Acaraú-mirim, Arrebita, Ayres de Sousa, Carmina e São Vicente, estão bastante próximos dos valores adotados no Plano Estadual de Recursos Hídricos (2005), referência adotada pela COGERH, variando entre -0,05% (Ayres de Sousa) e +15,34% (São Vicente). Um segundo grupo de açudes apresentou uma diferença um pouco maior: Farias de Souza (-31,45%), Edson Queiroz (+33,19%) e Carão (-43,24%). Destaca-se ainda a diferença importante para os açudes Araras (+93,59%) e Forquilha (+77,85%). Não há valores do PLANERH para o açude Taquara, visto o mesmo ter sido construído em 2012.

Diversas hipóteses podem ser apresentadas para explicar a diferença entre os valores calculados pelo VYELAS e os adotados no PLANERH, tais como:

- A adoção de diferentes modelos chuva-deflúvio e parâmetros hidrológicos, podendo haver tendência de majorar ou minorar a série como um todo ou os picos de vazão afluente;
- Sensibilidade do modelo VYELAS a elevados valores de coeficiente de variação de deflúvio anual (CV), sendo comum no semiárido a constatação de valores acima de 1,0;
- Nível de qualidade de dados, escala temporal adotada (diária, mensal ou anual), amplitude do período estudado e diferenças entre métodos estatísticos dos modelos (determinísticos ou estocásticos).

Comparando os resultados obtidos pelo VYELAS com as vazões do estudo feito pela ANA (BRASIL, 2017b), constatam-se as seguintes vazões Q90 e diferenças percentuais: Acaraú-mirim (1,10 m^3/s e +27,9%); Araras (9,25 m^3/s e -28,5%); Arrebita (0,18 m^3/s e -1,0%); Ayres de Sousa (1,63 m^3/s e +8,0%); Carão (0,08 m^3/s e -56,1%); Carmina (0,15 m^3/s e +10,6%); Edson Queiroz (1,19 m^3/s e -95,9%); Farias de Souza (0,06 m^3/s e -25,6%); Forquilha (0,34 m^3/s e +70,7%) e São Vicente (0,17 m^3/s e +18,6%).

Essas imprecisões inerentes a modelos hidrológicos também ficam evidentes ao analisar os dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH de 1992, anterior ao PLANERH, que determinou, por exemplo, o Q_{90} para o açude Araras com valor de 9.270 L/s, representando uma variação de 28,23% em relação ao calculado pelo VYELAS. Constatam-se tais diferenças ao analisar os dados da ANA (BRASIL, 2017b).

5.2 Revisão das vazões liberadas dos reservatórios e suas demandas

Os valores de vazão liberada dos açudes Forquilha, São Vicente e Taquara tiveram que ser revisados por serem maiores que suas vazões máximas outorgáveis. Dentre os três açudes citados, a maior restrição foi a do açude Forquilha, reduzindo a vazão liberada de 220 L/s para 90 L/s (59,1%). Essas reduções nas liberações repercutiram na alteração de algumas vazões, conforme apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – Alterações de vazões decorrentes da revisão das vazões liberadas

Açude	Vazão liberada (L/s)	Vazão máxima outorgável (L/s)	Vazão liberada ajustada (L/s)	Perda em Trânsito (L/s)	Demanda difusa (L/s)	Perímetro Irrigado Forquilha (L/s)	Aporte Ayres de Sousa (L/s)
Forquilha	220,0	90,0	90,0	14,3	-	27,8	-
São Vicente	130,0	125,0	125,0	13,2	111,8	-	-
Taquara	1100,0	1040,0	1040,0	93,2	-	-	845,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As reduções de perda em trânsito são decorrentes das reduções das vazões liberadas. A redução da vazão liberada do açude São Vicente repercutiu na redução de 3,8% da sua demanda difusa (116,3 para 111,8 L/s), única demanda do sistema. A assunção desse novo valor não gera prejuízos aos demandantes por ser uma redução discreta e compensável por outras fontes locais. Já a redução da vazão destinada ao Perímetro Irrigado de Forquilha sofreu séria restrição de 130 para 27,8 L/s resultando em duas opções de adaptação:

- Redução das áreas produtivas compatíveis com a nova vazão destinada à irrigação do perímetro;
- Aporte complementar proveniente de novas fontes hídricas, como o reúso de água.

A redução da vazão liberada do açude Taquara resultou em redução do Aporte Ayres de Sousa de 900 para 845,6 L/s (6%). A redução foi imputada ao aporte deste reservatório pelo fato de ser a última demanda em série no percurso entre os dois açudes. Todas as outras restrições decorrentes da revisão da0s vazões liberadas foram imputadas às demandas menos prioritárias, seguindo a ordem de prioridade apresentada na Tabela 31.

5.3 Cenário 1 – Simulação sem reúso direto e indireto

Foi realizada a simulação operacional desconsiderando o reuso indireto e quaisquer proposições de reúso direto não potável. O cenário foi executado utilizando passo temporal mensal. Os resultados estão apresentados nos subitens seguintes.

5.3.1 Comportamento dos volumes dos reservatórios

Foram obtidos os resultados mensais da simulação do balanço hídrico dos 11 reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú. Os principais resultados de vazão e volume estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Vazões e volumes dos reservatórios

Açude	Vazões Liberadas (m^3/s)	Vazão média afluente (m^3/s)	Vertimento médio (m^3/s)	Frequência de vertimento (%)	Tempo abaixo do vol. min. (%)	Tempo vazio (%)
Acaraú-mirim	0,250	5,21	4,66	27,0	1,8	0,0
Araras	5,400	42,21	26,48	14,8	1,6	0,0
Arrebita	0,070	0,91	0,72	11,3	5,5	0,0
Ayres de Sousa	1,100	6,63	5,08	21,2	0,0	0,0
Carão	0,025	0,81	0,55	9,1	0,4	0,0
Carmina	0,020	0,74	0,59	13,1	0,2	0,0
Edson Queiroz	1,100	12,36	10,19	15,0	7,1	0,0
Farias de Souza	0,045	0,25	0,09	5,3	31,4	9,7
Forquilha	0,090	0,83	0,43	6,4	22,1	0,0
São Vicente	0,125	0,68	0,51	19,5	8,9	0,0
Taquara	1,040	2,12	0,53	6,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As maiores vazões médias afluentes são dos açudes Araras (42,21 m^3/s) e Edson Queiroz (12,23 m^3/s) compatíveis com o porte do reservatório e com sua área de drenagem.

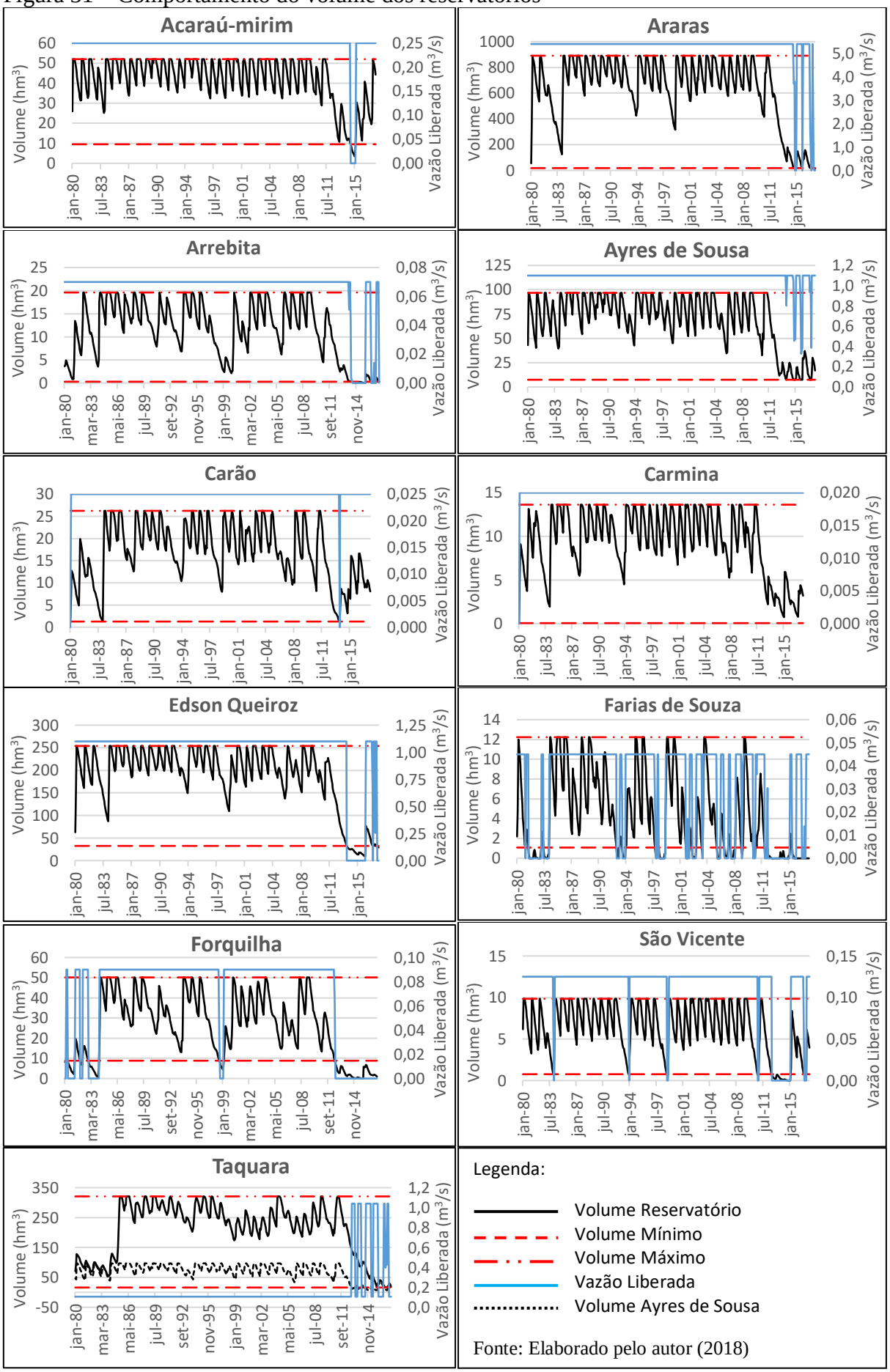
Dentre os reservatórios estudados, os açudes Acaraú-mirim e Ayres de Sousa apresentaram elevada frequência de vertimento, acima de 20%, e no outro polo, destacam-se os açudes Farias de Souza, Forquilha e Taquara com frequência de vertimento abaixo de 7%.

Os reservatórios Ayres de Sousa e Taquara foram os únicos que não apresentaram nenhum nível operacional abaixo do mínimo. A adoção da regra de liberação do Taquara do tipo “dependência de reservatório”, utilizando o gatilho de 15% do volume do Ayres de Sousa, contribuiu para um melhor equilíbrio de armazenamento.

O Açude Farias de Souza foi o único que apresentou esvaziamento total em 9,7% do tempo, com menor frequência de vertimento (5,3%). Esse comportamento é compatível com o histórico do açude, construído em 1983, que sangrou apenas em 1989 e 2009.

O comportamento do volume de cada reservatório e seu efeito na liberação de água está apresentado na Figura 31. É possível notar em todos os gráficos o baixo volume dos reservatórios no período das secas históricas do Ceará, a partir de 1980, no caso a de 1980-84, 1993, 1998-99, 2001, 2010 e 2012-17. É provável que tenha havido superestimação das vazões afluentes geradas pelo WASA pelo fato de 7 açudes dos 11 apresentarem falha de abastecimento somente na seca de 2012-17. Esta hipótese é corroborada também pelo comportamento do Açude Taquara que só liberou água para o Ayres de Sousa no último período de estiagem.

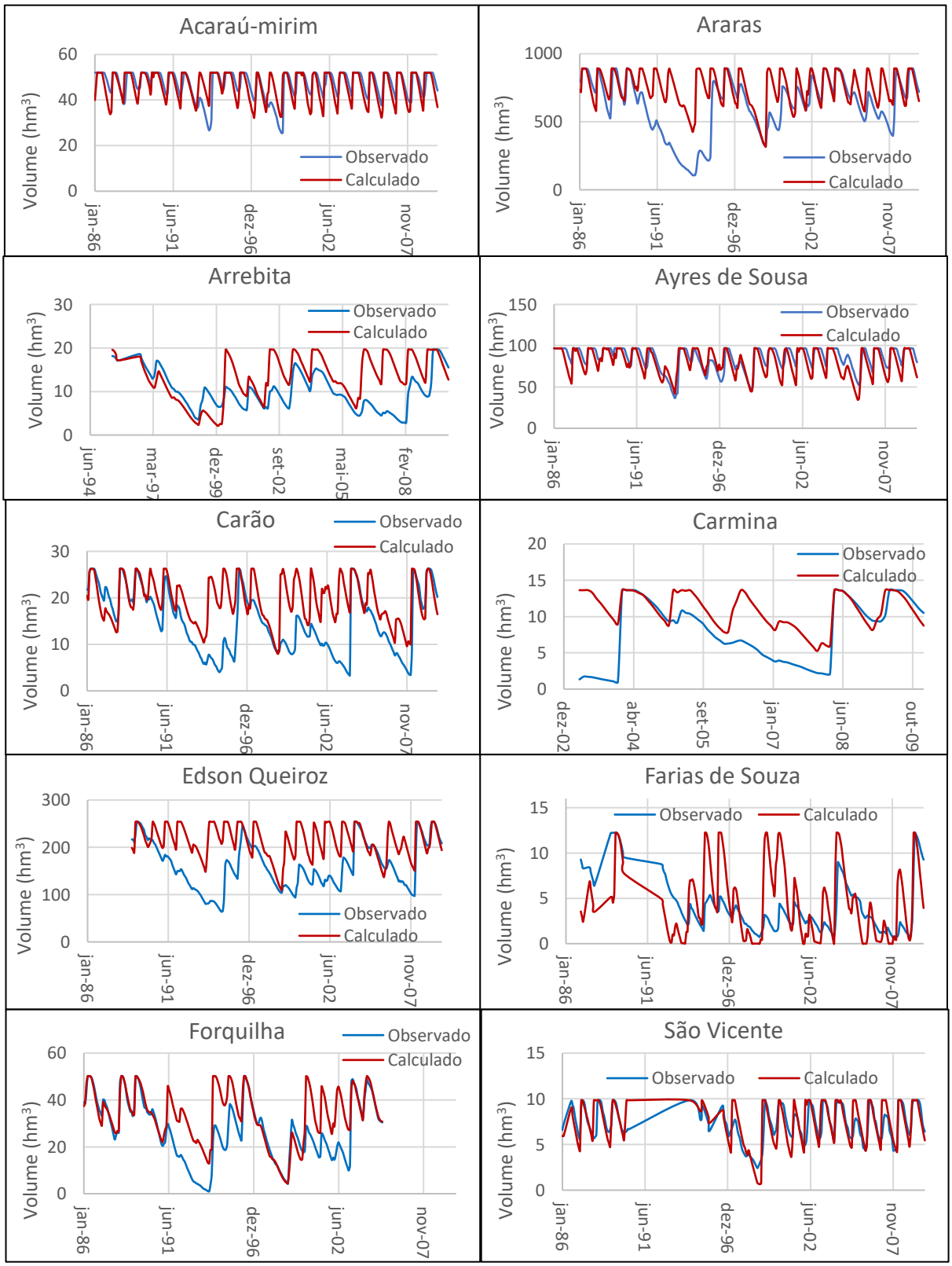
Figura 31 – Comportamento do volume dos reservatórios



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para uma melhor avaliação da eficiência do modelo, os resultados dos volumes calculados foram comparados com os observados pela COGERH entre os anos de 1986 e 2009 e apresentados na Figura 32.

Figura 32 – Comparação entre os volumes observados e calculados



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

É possível constatar na Figura 32 que o comportamento geral dos volumes calculados possui certa semelhança com os volumes observados, mas com tendência de superestimar os extremos. Também se observa que há tendência de os valores calculados serem maiores que os observados, sugerindo mais uma vez a superestimação das vazões geradas pelo WASA. Uma análise mais minuciosa da eficiência do modelo SIGA foi realizada utilizando o coeficiente Nash-Sutcliffe (1970) (Tabela 35). Devido a possibilidade de deslocamento temporal entre as séries mensais observadas e calculadas, o Coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) foi calculado para médias móveis de 3, 4 e 5 meses, obtendo-se o melhor ajuste para 5 meses.

Tabela 35 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS)

Açude	Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS)
Acaraú-mirim	0,29
Araras	-0,17
Arrebita	-1,06
Ayres de Sousa	0,38
Carão	0,80
Carmina	0,76
Edson Queiroz	0,83
Farias de Souza	0,57
Forquilha	0,86
São Vicente	0,98
Taquara (*)	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018). (*) Não existia no período avaliado.

O modelo SIGA funcionou satisfatoriamente para 8 reservatórios dos 10 analisados com NS mediano de 0,66 e média de 0,42. Destacam-se positivamente os reservatórios Carão, Carmina, Edson Queiroz, Forquilha e São Vicente com excelentes resultados de NS acima de 0,75.

Já para os açudes Araras e Arrebita, o modelo SIGA foi insatisfatório devido aos seus respectivos valores negativos de NS, ou seja, de acordo com o valor do coeficiente, o valor médio calculado representaria melhor o volume observado do que os gerados pelo modelo. É possível perceber erros grosseiros do modelo SIGA para o Araras entre os anos de 1991 e 1995 e no ano de 2007 e para o Arrebita entre os anos de 2006 e 2008 com comportamentos opostos.

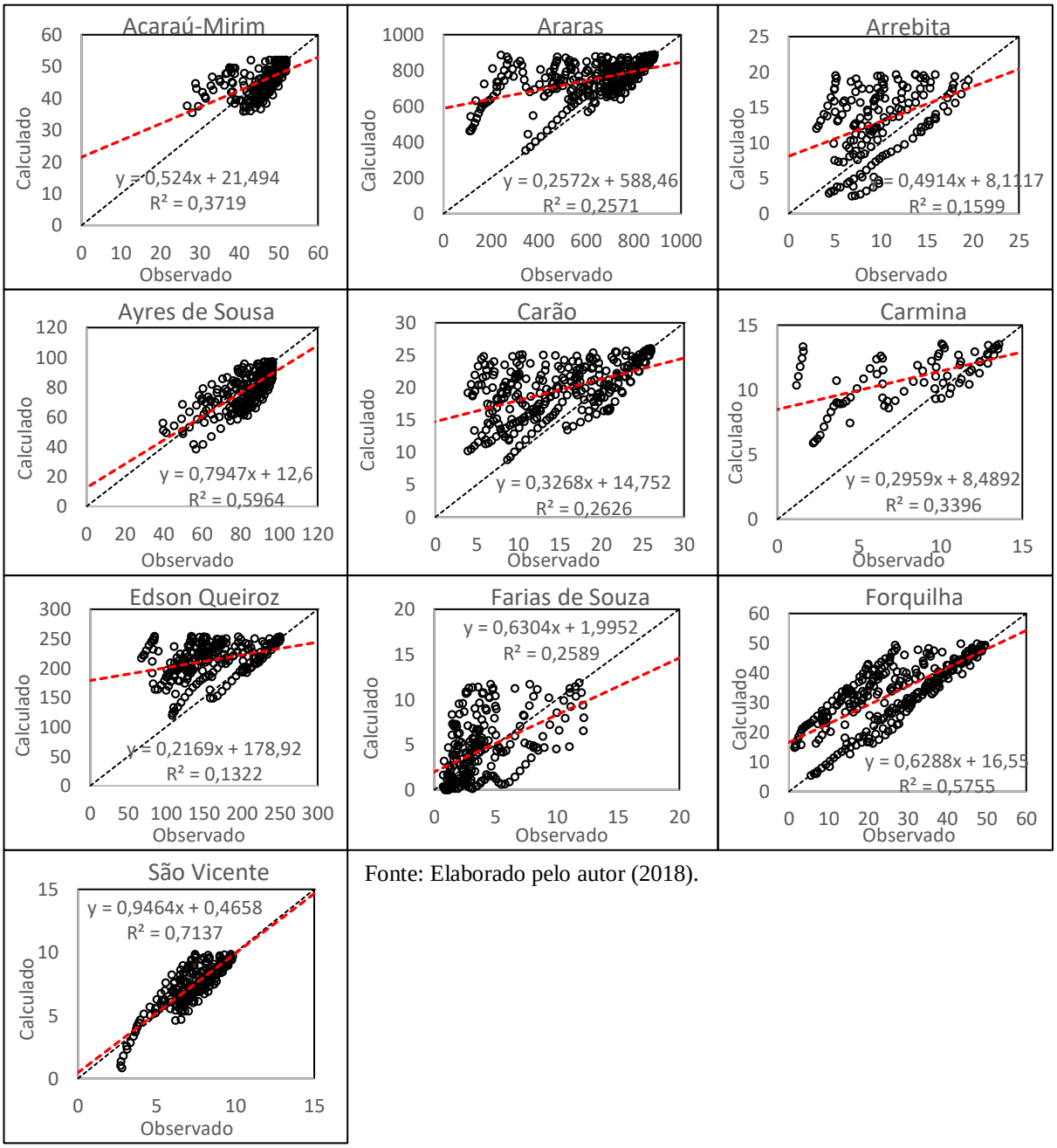
A explicação mais plausível, para estes erros mais significativos, é a de superestimação do escoamento de base, visto tal fenômeno ocorrer com maior raridade no semiárido nordestino pelas suas características climáticas e geológicas.

Especificamente sobre o Açude Araras, a superestimação do escoamento de base pode ter sido intensificada pelo fato do reservatório armazenar, além do deflúvio da sua bacia de captação com área de 1.263 km^2, também a contribuição de sub-bacias a montante com uma área de 1.939 km^2, totalizando uma área efetiva de captação de 3.202 km^2.

Krause, Boyle e Bäse (2005) constataram ainda que o Coeficiente de Nash-Sutcliffe possui elevada sensibilidade à picos de vazão e baixa sensibilidade a vazões pequenas, ou seja, uma convergência satisfatória entre valores elevados, calculados e observados, tendem a superestimar o valor de NS, quando comparados com a mesma situação, mas para valores baixos de vazão. Essas distorções do método de cálculo do NS podem explicar, em parte, o valor insatisfatório do coeficiente para o Açude Arrebita, diante de sua baixa dinâmica em relação aos outros reservatórios.

Outra análise gráfica foi utilizada para compreender melhor o nível de dispersão dos valores observados e calculados (Figura 33).

Figura 33 – Gráfico de dispersão entre valores observados e calculados



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Percebe-se, pelos gráficos da Figura 33, que realmente há uma tendência de superestimação das vazões afluentes geradas pelo WASA e, consequentemente, do volume armazenado calculado pelo SIGA. A tendência de convergência para volumes maiores é explicada pela cota máxima dos açudes que provoca efeito artificial de amortecimento de picos de vazão pelo vertimento do volume excedente.

5.3.2 Análise de garantias

Dos 11 reservatórios estratégicos, 2 apresentaram garantias abaixo de 90%, no caso, Farias de Souza (66,4%) e Forquilha (77,4%), mesmo adotando como ponto de partida vazões liberadas iguais ou inferiores à 90% do $Q_{90,}$ determinado pelo VYELAS. Uma comparação dos valores das garantias para as vazões liberadas adotadas está apresentada na Figura 36.

Tabela 36 – Comparação de garantias calculadas pelo SIGA e VYELAS

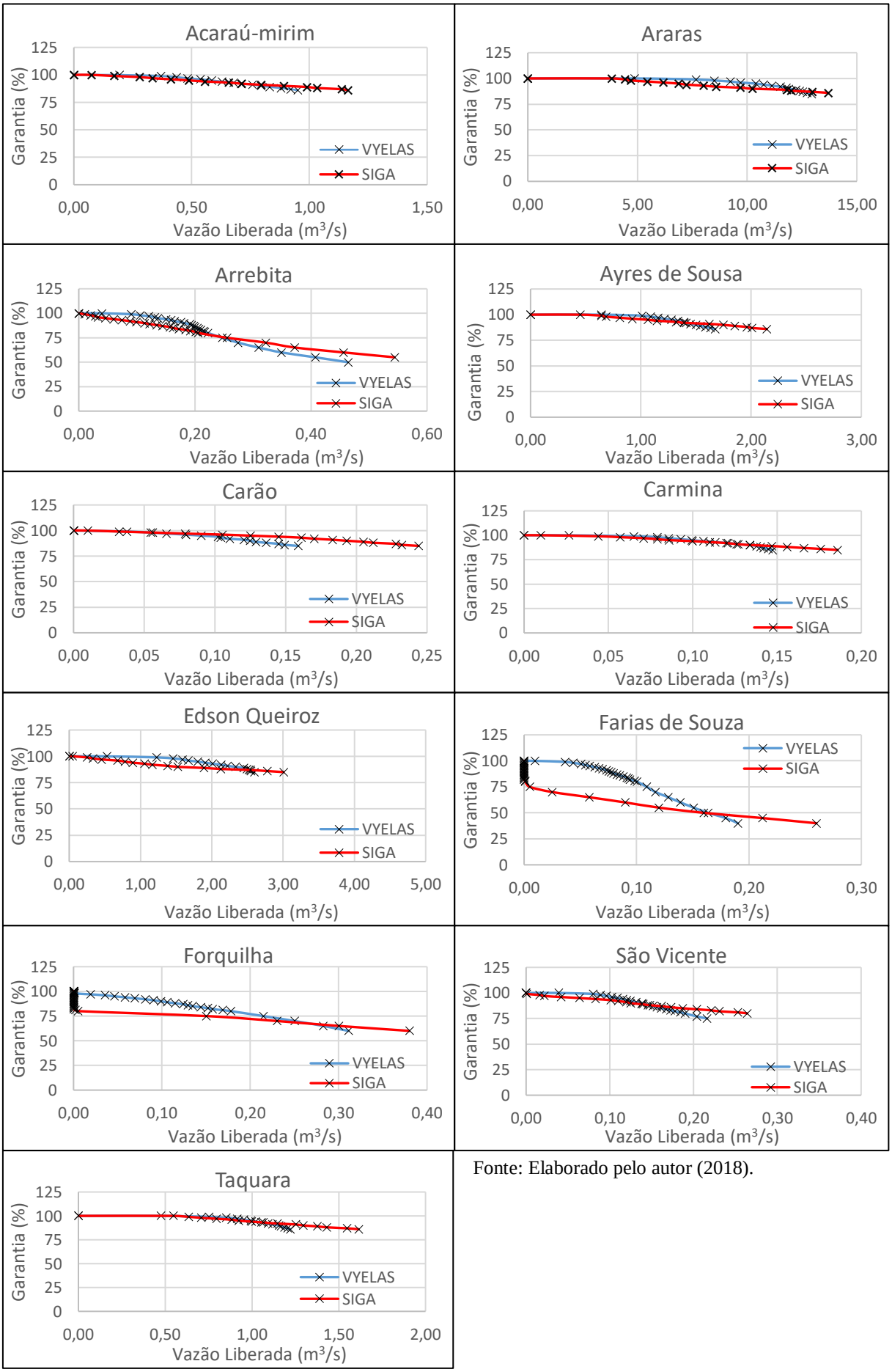
Açude	Vazões Liberadas (m^3/s)	Garantia SIGA (%)	Garantia VYELAS(%)	Diferença (%)
Acaraú-mirim	0,250	98,2	99,9	1,7%
Araras	5,400	96,9	99,9	3,0%
Arrebita	0,070	92,9	99,7	6,8%
Ayres de Sousa	1,100	97,4	98,1	0,8%
Carão	0,025	99,6	99,5	-0,1%
Carmina	0,020	99,8	100,0	0,2%
Edson Queiroz	1,100	92,5	99,4	7,0%
Farias de Souza	0,045	66,4	98,3	32,5%
Forquilha	0,090	77,4	91,1	15,0%
São Vicente	0,125	90,5	91,9	1,5%
Taquara	1,040	99,3	93,4	-6,4%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As garantias obtidas pelos dois modelos apresentaram baixa diferença percentual média de 5,6% e mediana de 1,7%. As garantias calculadas pelo SIGA, na maioria dos casos, foram mais baixas do que o VYELAS. Isso ocorreu provavelmente pela diferença de escala temporal, que no SIGA é mensal e no VYELAS é anual. Em uma escala anual há chance de compensação de falhas entre meses resultando em maior probabilidade de uma maior garantia. Portanto, do ponto de vista operacional, as garantias calculadas por ferramentas de planejamento tendem a ser ligeiramente superestimadas em relação às ferramentas de simulação operacional com escala mensal.

Para entender melhor o comportamento da garantia em função da vazão liberada em uma ferramenta de simulação operacional (SIGA) comparada com uma de planejamento (VYELAS), foram elaborados os gráficos apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Comportamento das garantias no SIGA e VYELAS



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

É possível constatar similaridade de comportamento da garantia em função da vazão liberada pelos dois modelos. Os modelos tendem a convergir para as situações de vazões mais baixas e mais altas, sendo maior a diferença na sua porção média. Isso ocorre pelo efeito da escala temporal entre os modelos. Quando a vazão liberada é muito alta as falhas mensais se elevam havendo menos chance de haver compensações que resultem em sucesso na escala anual. Essa convergência também ocorre para vazões mais baixas, mas pelo motivo oposto. As falhas mensais diminuem e se aproximam do resultado mais otimista da escala anual.

Visualmente, diferenças mais acentuadas podem ser constatadas para dois açudes dos 11 analisados, no caso, os açudes Farias de Souza e Forquilha. Para confirmar estatisticamente divergência entre os modelos, o teste t-Student foi executado para testar a diferença estatística entre as médias (Tabela 37).

Tabela 37 – Teste-T Student para as garantias geradas pelo VYELAS e SIGA

Açude	**Valor-P**
Acaraú-mirim	0,97
Araras	0,17
Arrebita	0,29
Ayres de Sousa	0,90
Carão	0,05
Carmina	0,99
Edson Queiroz	0,04
Farias de Souza	0,00
Forquilha	0,01
São Vicente	0,78
Taquara	0,62

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Constata-se pelos valores-P do teste-t Student que, apenas 3 açudes (Edson Queiroz, Farias de Souza e Forquilha) dos 11 avaliados, tiveram diferenças estatísticas entre médias dos valores dois modelos (valor-P < 0,05), sendo tal diferença, para o açude Edson Queiroz, bem mais discreta quando comparada com os outros dois. Este resultado está coerente com o comportamento verificado nos gráficos da Figura 34.

5.3.3 Atendimento das demandas

As demandas de água, para diferentes atividades, foram supridas seguindo as prioridades definidas no item 4.11.6. Os resultados de nível de atendimento estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Nível de atendimento das demandas sem reúso

Açude / Rio Acaraú	Vazão liberada (L/s)	Demanda total (L/s)	Demanda detalhada (L/s)		Eventos de sucesso	Eventos de falha	Nível de atendimento (%)
Acaraú Mirim	250,00	250,00	Alcântaras	5,2	444	8	98,2
			Massapê	55,7	444	8	98,2
			Meruoca	11,4	444	8	98,2
			Demanda difusa	161,0	444	8	98,2
			Perda em trânsito	16,7	-	-	-
Araras (Paulo Sarasate)	5.400,00	5.400,00	Hidrolândia	20,1	444	8	98,2
			Ipu	44,3	444	8	98,2
			Pires Ferreira	11,1	444	8	98,2
			Reriutaba	31,2	444	8	98,2
			Varjota	36,2	444	8	98,2
			Ipueiras	53,9	444	8	98,2
			Demanda difusa	270,0	444	8	98,2
			DIPAN	800,0	440	12	97,4
			Perenização	1931,6	-	-	-
			Perda em trânsito	2201,6	-	-	-
Arrebita	70,00	70,00	Demanda difusa	50,3	420	32	92,9
			Perda em trânsito	19,7	-	-	-
Ayres de Sousa (Jaibaras)	1.100	1.100	Sobral	420,9(a)	443	9	98,0
			Demanda difusa	55,0	445	7	98,5
			P. Irr. Ayres de Sousa	110,0	440	12	97,4
			Industrias de Sobral	20,5(a)	442	10	97,8
			Perenização	315,6	-	-	-
			Perda em trânsito	178,0	-	-	-
Carão	25	25	Tamboril	18,3(b)	450	2	99,6
			Demanda difusa	6,7	450	2	99,6
Carmina	20	20	Catunda	9,1	451	1	99,8
			Demanda difusa	10,9	451	1	99,8
Edson Queiroz	1.100	1.100	Santa Quitéria	50,7	420	32	92,9
			Demanda difusa	55,0	419	33	92,7
			Perenização	192,7	-	-	-
			Perda em trânsito	801,6	-	-	-
Farias de Souza	45	45	Nova Russas	40,5(c)	300	152	66,4
			Demanda difusa	4,5	300	152	66,4
Forquilha	90	220	Forquilha	22,4(d)	341	111	75,4
			Demanda difusa	25,8	351	101	77,7
			P. Irr. Forquilha	130,0	0	452	0,0
			Perda em trânsito	41,8	-	-	-
São Vicente	125	125	Demanda difusa	111,8	409	43	90,5
			Perda em trânsito	13,2	-	-	-
Taquara	1.040	1.040	Graça	9,8	452	0	1,0
			Mucambo	22,1	452	0	1,0
			Pacujá	17,0	452	0	1,0
			Aporte Ayres de Sousa	845,7	-	-	-
			Demanda difusa	52,2	452	0	1,0
			Perda em trânsito	93,2	-	-	-
Rio Acaraú (Não dependente diretamente de reservatório)	2.440	2.440	Sobral	105,2(e)	-	-	-
			Indústrias de Sobral	5,1(e)	-	-	-
			Forquilha	22,4	-	-	-
			Cariré	16,2	447	5	98,9
			Groaíras	16,1	448	4	99,1
			Santana do Acaraú	23,5	425	27	94,0
			Morrinhos	24,8	450	2	99,6
			Marco	24,0	450	2	99,6
			Bela Cruz	22,2	435	17	96,2
			Cruz	18,7	450	2	99,6
			Acaraú	61,4	425	27	94,0
			DIBAU	2100,0	433	19	95,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2018). (a) 80% da demanda de abastecimento humano e industrial de Sobral; (b) 85% da demanda de abastecimento humano de Tamboril (15% é captado via poços); (c) 80% da demanda de abastecimento humano de Nova Russas (20% é captado via poços); (d) 50% da demanda de Forquilha. (e) 20% da demanda de abastecimento humano e industrial de Sobral.

Os níveis de atendimento foram satisfatórios para a grande maioria das demandas, com valor médio de 93,3% e mediana de 98,2%. Os resultados insatisfatórios para as demandas

dos Açudes Farias de Souza e Forquilha já eram esperados devido às baixas garantias apresentadas no subitem anterior. A vazão liberada do Açude Forquilha foi ainda reduzida de 220 L/s para 90 L/s devido ao limite outorgável, baseado no modelo VYELAS, o que contribuiu para os níveis baixos de atendimento das demandas vinculadas. Para este caso, o demandante mais penalizado foi o Perímetro Irrigado Forquilha, que ficou sem abastecimento por ser menos prioritário do que a demanda de abastecimento humano e difusa. Excetuando-se as demandas dos dois açudes supramencionados, os níveis de atendimento variaram entre 90,5% (São Vicente) e 100% (demandas do Taquara).

5.4 Cenário 2 – Simulação com reúso direto e indireto

Foram analisados os resultados das garantias dos reservatórios com o suporte do reúso direto não potável e indireto na rede de fluxo. A magnitude do retorno das águas residuárias a partir das demandas foram calculadas utilizando coeficientes de retorno adaptados dos estudos aplicados no Sistema Integrado Nacional (SIN) do setor elétrico já apresentado no item 4.11.8.

A posição geográfica das demandas, em relação ao seu reservatório-fonte (montante ou jusante), é um aspecto importante no modelo para o reúso indireto. As vazões de retorno das demandas a montante retornaram para seu reservatório-fonte e foram somadas as vazões afluentes. Já as contribuições de demandas a jusante, foram somadas às vazões do rio Acaraú ou, no caso específico do Açude Taquara, incrementou as vazões afluentes do Ayres de Sousa.

As possibilidades aventadas de reúso direto não potável para fins agrícolas e industriais foram concebidas considerando a proximidade entre fonte e demanda. Os projetos propostos estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Projetos propostos de reúso direto não potável

Projeto	Consumidores	Reservatório impactado	Valor da demanda (L/s)	Fontes	Vazão de retorno (L/s)	Nível de reúso
1	DIPAN	Araras	800,0	Varjota Reriutaba Total	29,0 25,0 54,0	6,8%
2	Perímetro Irrigado Ayres de Sousa	Ayres de Sousa	110,0	Sobral	110,0 (26,1% da vazão de retorno)	100%
	Perímetro Irrigado Forquilha	Forquilha	130,0	Sobral	130,0 (30,9% da vazão de retorno)	100%
	Indústrias de Sobral	Ayres de Sousa	25,7	Sobral	25,7 (6,1% da vazão de retorno)	100%
3	DIBAU	-	2.100,0	Marco Bela Cruz Cruz Acaraú Total	19,2 17,7 15,0 49,1 101,0	4,81%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tanto para o reúso direto como indireto, foram consideradas as falhas no abastecimento de água da demanda refletindo em falhas na geração de vazão de retorno, ou seja, no mês em que não houve abastecimento, não houve incremento de água de reúso.

5.4.1 Análise das garantias

Foram comparados os ganhos na garantia dos reservatórios com e sem reúso (direto e indireto). Os resultados estão apresentados na e indireto estão apresentadas na Tabela 40.

Tabela 40 – Garantias do SIGA com suporte do reúso direto e indireto

Açude	**Garantia (%)**			
	Sem Reúso (SR)	**Com Reúso Indireto (RI)**	**Com Reúso Direto (RD) + Indireto (RI)**	**Impacto total na Garantia**
Acaraú-mirim	98,2	98,7	-	0,5%
Araras	96,9	97,1	97,4	0,5%
Arrebita	92,9	-	-	-
Ayres de Sousa	97,4	98,2	99,1	1,7%
Carão	99,6	99,8	-	0,2%
Carmina	99,8	-	-	-
Edson Queiroz	92,5	-	-	-
Farias de Souza	66,4	66,4	-	-
Forquilha	77,4	-	78,5	1,1%
São Vicente	90,5	-	-	-
Taquara	99,3	99,8	-	0,5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os únicos reservatórios que elevaram sua garantia com reúso indireto foram o Acaraú-mirim (0,4%), Araras (0,2%), Ayres de Sousa (0,9%), Carão (0,2%) e Taquara (0,4%). Os outros reservatórios permaneceram com a mesma garantia por não possuírem demandas geradoras de vazão de retorno a montante. Os aumentos de garantia apresentados com a introdução do reúso direto e indireto combinados, são também pouco representativos, com maior impacto para o Açude Forquilha (1,1%). Estes aumentos discretos de garantia se devem ao fato da magnitude das vazões de reúso direto e indireto serem bem menores do que as vazões naturais afluentes aos reservatórios. Outra observação importante é que a garantia, para essas faixas de vazão liberada, possui baixa sensibilidade, havendo comportamento assintótico.

5.4.2 Atendimento das demandas

O nível de atendimento das demandas foi avaliado, individualmente, considerando o reúso direto não potável e o indireto. Os resultados estão apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Nível de atendimento das demandas com reúso direto e indireto

Demanda detalhada (L/s)		Cenário 1 – Sem Reúso			Cenário 2 – Com Reúso Direto e Indireto			Impacto (%)
		Eventos de sucesso	Eventos de falha	Nível de atendimento (%)	Eventos de sucesso	Eventos de falha	Nível de atendimento (%)	
Alcântaras	5,2	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Massapê	55,7	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Meruoca	11,4	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Demanda difusa	161,0	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Perda em trânsito	16,7	-	-	-	-	-	-	-
Hidrolândia	20,1	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Ipu	44,3	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Pires Ferreira	11,1	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Reriutaba	31,2	444	8	98,2	446	6	98,7	0,4
Varjota	36,2	444	8	98,2	446	6	98,2	0,0
Ipueiras	53,9	444	8	98,2	446	6	98,2	0,0
Demanda difusa	270,0	444	8	98,2	445	7	98,5	0,2
DIPAN	800,0	440	12	97,4	442	10	97,8	0,4
Perenização	1931,6	-	-	-	-	-	-	-
Perda em trânsito	2201,6	-	-	-	-	-	-	-
Demanda difusa	50,3	420	32	92,9	420	32	92,9	0,0
Perda em trânsito	19,7	-	-	-	-	-	-	-
Sobral	420,9(a)	443	9	98,0	446	6	98,7	0,7
Demanda difusa	55,0	445	7	98,5	450	2	99,6	1,1
P. Irr. Ayres de Sousa	110,0	440	12	97,4	446	6	98,7	1,3
Industrias de Sobral	20,5(a)	442	10	97,8	452	0	1,0	2,2
Perenização	315,6	-	-	-	-	-	-	-
Perda em trânsito	178,0	-	-	-	-	-	-	-
Tamboril	18,3(b)	450	2	99,6	451	1	99,8	0,2
Demanda difusa	6,7	450	2	99,6	451	1	99,8	0,2
Catunda	9,1	451	1	99,8	451	1	99,8	0,0
Demanda difusa	10,9	451	1	99,8	451	1	99,8	0,0
Santa Quitéria	50,7	420	32	92,9	420	32	92,9	0,0
Demanda difusa	55,0	419	33	92,7	419	33	92,7	0,0
Perenização	192,7	-	-	-	-	-	-	-
Perda em trânsito	801,6	-	-	-	-	-	-	-
Nova Russas	40,5(c)	300	152	66,4	300	152	66,4	0,0
Demanda difusa	4,5	300	152	66,4	300	152	66,4	0,0
Forquilha	22,4(d)	341	111	75,4	355	97	78,5	3,1
Demanda difusa	25,8	351	101	77,7	355	97	78,5	0,9
P. Irr. Forquilha	130,0	0	452	0,0	446	6	98,7	98,7
Perda em trânsito	41,8	-	-	-	-	-	-	-
Demanda difusa	111,8	409	43	90,5	409	43	90,5	0,0
Perda em trânsito	13,2	-	-	-	-	-	-	-
Graça	9,8	452	0	100,0	452	0	100,0	0,0
Mucambo	22,1	452	0	100,0	452	0	100,0	0,0
Pacujá	17,0	452	0	100,0	452	0	100,0	0,0
Aporte Ayres de Sousa	845,7	-	-	-	-	-	-	-
Demanda difusa	52,2	452	0	100,0	452	0	100,0	0,0
Perda em trânsito	93,2	-	-	-	-	-	-	-
Sobral	105,2(e)	-	-	-	-	-	-	-
Indústrias de Sobral	5,1(e)	-	-	-	-	-	-	-
Forquilha	22,4	-	-	-	-	-	-	-
Cariré	16,2	447	5	98,9	447	5	98,9	0,0
Groaíras	16,1	448	4	99,1	448	4	99,1	0,0
Santana do Acaraú	23,5	425	27	94,0	427	25	94,5	0,4
Morrinhos	24,8	450	2	99,6	452	0	100,0	0,4
Marco	24,0	450	2	99,6	452	0	100,0	0,4
Bela Cruz	22,2	435	17	96,2	452	0	100,0	3,8
Cruz	18,7	450	2	99,6	452	0	100,0	0,4
Acaraú	61,4	425	27	94,0	452	0	100,0	6,0
DIBAU	2100,0	433	19	95,8	446	6	98,7	2,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

(a) 80% da demanda de abastecimento humano e industrial de Sobral; (b) 85% da demanda de abastecimento humano de Tamboril (15% é captado via poços); (c) 80% da demanda de abastecimento humano de Nova Russas (20% é captado via poços); (d) 50% da demanda de Forquilha. (e) 20% da demanda de abastecimento humano e industrial de Sobral.

Todos os níveis de atendimento, ou permaneceram iguais ou aumentaram discretamente. O baixo impacto do reúso direto e indireto, no nível de atendimento das demandas, é coerente com os ganhos discretos das garantias dos reservatórios.

Constata-se, no entanto, que o reúso direto foi impactante para o Perímetro Irrigado Forquilha, que não foi abastecida no Cenário 1 pela restrição da vazão máxima outorgável, passando a um nível de atendimento de 98,7%. A vazão de retorno do Município de Sobral (420,9 L/s), considerando a situação de universalização da cobertura de esgoto, seria suficiente para suprir, não só o Perímetro Irrigado de Forquilha (130 L/s), mas também o Ayres de Sousa (110 L/s) e a demanda industrial da região (25,7 L/s), consumindo aproximadamente 63% da vazão gerada. Considerando a cobertura de esgoto atual de Sobral de 48,35% (BRASIL, 2018a), a vazão de retorno de 203,5 L/s poderia suprir 76,6% das demandas não potáveis supramencionadas.

5.4.3 Impacto do reúso direto e indireto em período de seca

O impacto do reúso direto e indireto também foi verificado para o último período de seca de 2012 a 2017, com o intuito de avaliar a sua parcela de contribuição no estoque mensal dos reservatórios da bacia do rio Acaraú. Os resultados estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Parcela de reúso no estoque dos reservatórios - ano 2012-17

	Contribuição RI (%)		**Contribuição RI+RD (%)**		**Observação**
Reservatório	**Média**	**Máxima**	**Média**	**Máxima**	
Acaraú-Mirim	9,6%	21,7%	9,6%	21,7%	Sem RD
Araras	6,9%	43,3%	7,9%	43,3%	
Arrebita	0%	0%	0%	0%	Sem RI e RD
Ayres de Sousa	2,8%	10,6%	14,2%	33,6%	
Carão	18,0%	71,2%	18,0%	71,2%	Sem RD
Carmina	0%	0%	0%	0%	Sem RI e RD
Edson Queiroz	0%	0%	0%	0%	Sem RI e RD
Farias de Souza	0%	0%	0%	0%	Sem RI e RD
Forquilha	0%	0%	0%	0%	Sem RI e RD
São Vicente	0%	0%	0%	0%	Sem RI e RD
Taquara	3,3%	9,2%	9,4%	32,4%	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).
Legenda: RI – Reúso Indireto; RD – Reúso Direto.

Constata-se que o impacto do reúso direto e indireto se torna relevante ao se analisar a janela temporal de seca entre 2012 a 2017, ao contrário do que se verificou nas garantias dos reservatórios no período total de 1980 a 2017. O peso médio do reúso no estoque dos reservatórios variou de 2,8 a 18% para o reúso indireto, alcançando percentuais máximos entre

9,2 e 71,2% nos meses mais críticos. Ao acrescentar os efeitos dos reúsos diretos propostos, a parcela média de contribuição volumétrica desta fonte variou de 7,9 a 18%, atingindo patamares entre 21,7% e 71,2% nos meses mais escassos. Portanto, o reúso indireto de águas possui importante papel no aporte dos reservatórios em período de seca, fato que ficou pouco visível na análise de impacto de suas garantias (Tabela 40) ao considerar o período total de 38 (trinta e oito) anos de simulação, retratando não só os períodos de seca, como também de normalidade hídrica. Ao acrescentar o reúso direto dos projetos propostos, os reservatórios Araras, Ayres de Sousa e Taquara tiveram seu estoque mais elevado no período avaliado.

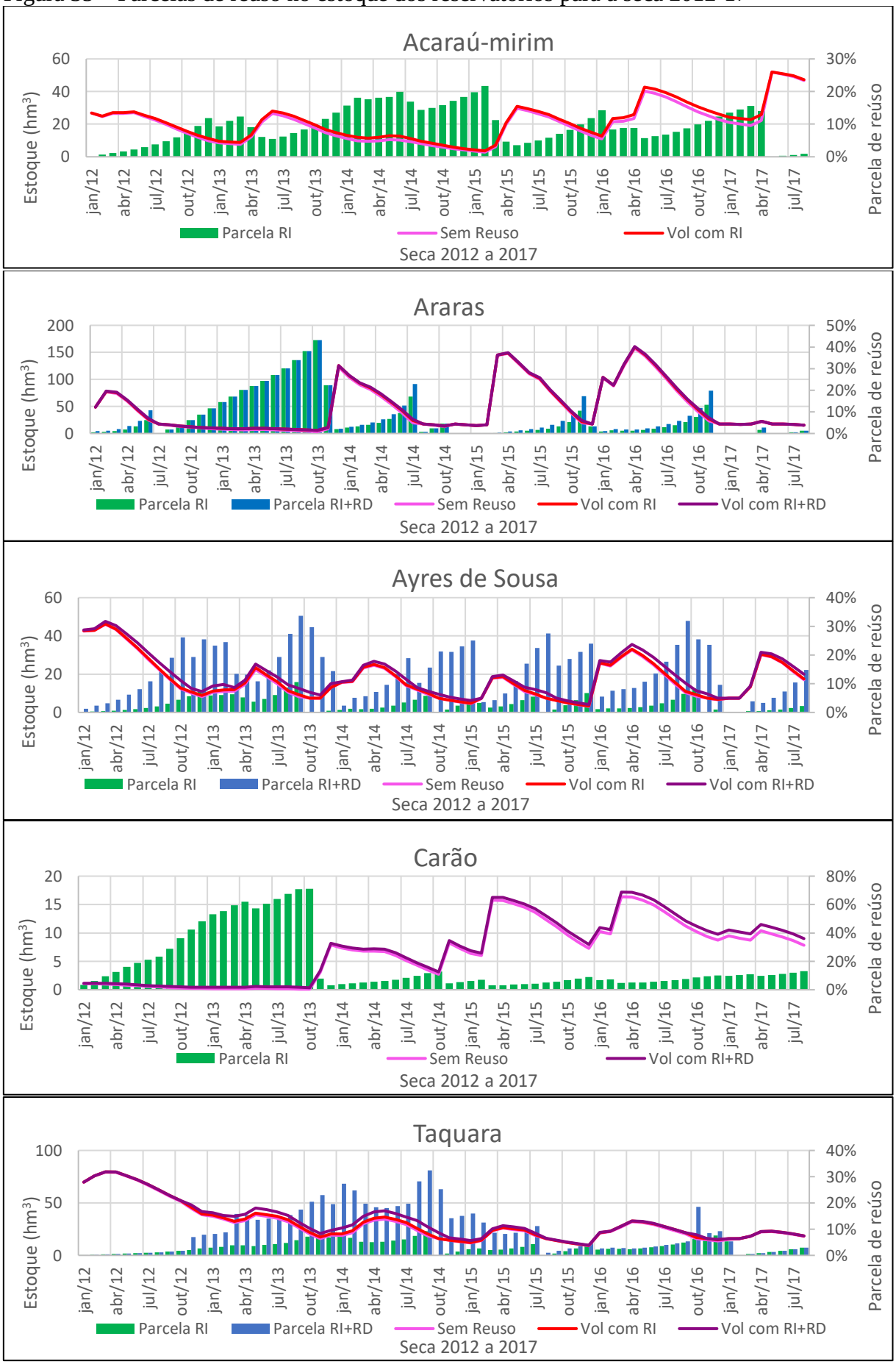
Os percentuais apresentados na Tabela 42 variaram bastante em função da existência ou não de municípios à montante dos açudes, proximidade entre oferta e demanda que viabilizaram o reúso direto não potável, porte dos reservatórios e magnitude das vazões naturais afluentes em decorrência da sua área de drenagem. A maior contribuição do reúso ocorreu para o Açude Carão, por se tratar de um açude de pequeno porte que atingiu, na simulação do mês de outubro/13, um volume mínimo de 0,10 hm^3, recebendo o incremento de 0,36 hm^3 a partir do reúso indireto proveniente do Município de Tamboril.

Apenas os reservatórios Acaraú-mirim, Araras, Ayres de Sousa, Carão e Taquara tiveram aporte proveniente de reúso indireto por possuírem municípios a montantes produtores de vazão de retorno.

Os comportamentos das parcelas mensais de reúso no estoque dos reservatórios, estão apresentados na Figura 35, para a seca de 2012 a 2017. É possível constatar o aumento da parcela do reúso com a tendência de queda de estoque dos reservatórios, principalmente quando o seu volume atinge níveis críticos, elevando a disponibilidade de água nos períodos de seca.

O efeito positivo no estoque ocasionado pelo reúso direto ocorreu pelo fato da água de reúso ter sido direcionada para o uso não potável de demandas industriais e agrícolas, aumentando a disponibilidade de água para fins mais nobres, no caso o abastecimento humano.

Figura 35 – Parcelas de reúso no estoque dos reservatórios para a seca 2012-17



Fonte: Elaborado pelo autor (2018). Legenda: RI – Reúso Indireto; RD – Reúso Direto

5.4.4 Viabilidade dos projetos de reúso direto não potável

A viabilidade de projetos de reúso direto de águas deve ser analisado caso a caso, podendo existir diferentes concepções de engenharia e arranjos institucionais para cada particularidade regional. Concernente aos aspectos de engenharia, é importante analisar os seguintes pontos:

- Proximidade entre a fonte e a demanda;
- Aspectos topográficos que impactam no custo de energia;
- Aspectos geológicos que impactam no custo de movimento de terra;
- Porte do sistema de tratamento e transporte para obtenção de ganhos de escala;
- Boa cobertura de esgoto para captação de vazões mais elevadas;
- Existência de sistemas de tratamento por parte das concessionárias, reduzindo o custo do projeto, sendo necessário, neste caso, apenas um pós-tratamento para polimento do efluente;
- Frequência e magnitude de uso da água de reúso em decorrência do período de chuvas.

Quanto aos aspectos legais e ambientais, a legislação cearense avançou com a definição de parâmetros de qualidade, constantes na Resolução nº 02/2017 do COEMA, mas ainda não há um marco regulatório delineie as diretrizes básicas do reúso de águas no Brasil. A falta de uma lei federal que norteie a prática de reúso gera diversas dúvidas relacionadas aos tipos de uso autorizados e seus padrões de qualidade, ao licenciamento ambiental e outorga, à comercialização ou doação de água de reúso e da formação de arranjos institucionais. A Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA, do Ministério da Cidades, já iniciou uma discussão em âmbito nacional para construção de uma Política Nacional de Reúso. Os principais pontos a serem avaliados em um projeto de reúso, do ponto de vista legal, ambiental e institucional, são:

- Atendimento aos padrões legais e/ou recomendações de órgãos internacionais (Ex: OMS);
- Nível de monitoramento da água e do solo (no caso de reúso agrícola e florestal);
- Cuidados de saúde ocupacional no manejo da água de reúso;

- Adoção de sistemas de aspersão que minimizem o contato da água de reúso (no caso de reúso agrícola e florestal);
- Requisitos de licenciamento ambiental e outorga;
- Criação de arranjos institucionais sustentáveis que garantam a qualidade do projeto, da implantação e da operação e manutenção das infraestruturas, e que atendam à todos os dispositivos legais inerentes à convênios, acordos de cooperação e contratos entre interessados, principalmente com as Concessionárias de Água e Esgoto;

O pilar econômico-financeiro em projetos de reúso é também um desafio. Apesar do reúso ser uma prática desejada, o custo da água bruta ainda é muito baixo, principalmente para uso agrícola. O Estado de Ceará, em seu último Decreto nº 32.160 de 24/02/2017, definiu que a tarifa de água bruta varia de R$ 1,56 a R$ 23,05 por 1000 m^3 para irrigação, praticados pela COGERH. O maior valor cobrado, de aproximadamente R$ 0,02/m^3, dificilmente seria maior que o custo por m^3 de água de reúso, reduzindo a atratividade deste tipo de projeto. Portanto, é importante que se adote políticas públicas para incentivar a prática de reúso, seja por subsídio governamental, seja por equilíbrio tarifário que permita uma maior competitividade. Portanto, para viabilizar projetos de reúso, recomenda-se a adoção de políticas públicas para:

- Definir as diretrizes básicas legais e ambientais da prática do reúso, facilitando a formação de arranjos institucionais;
- Criar mecanismos de incentivo ao reúso por meio de subsídios governamentais, dando preferência ao consumo de água de reúso para fins não potáveis, mesmo no período de normalidade hídrica;
- Equilibrar as tarifas de água bruta de forma a aumentar a competitividade de projetos de reúso de água, principalmente para fins agrícolas.

Considerando a sua relevância em comparação com os Projetos 1 e 3 apresentados na Tabela 39, apenas os custos do Projeto 2 será detalhado para conhecimento e exemplificação dos custos estimados para implementação deste projeto de reúso agrícola e industrial.

5.4.5 Estimativas de custo para o reúso direto

Considerando a possibilidade de implementação de um projeto de reúso agrícola e industrial em Sobral, alguns custos parametrizados foram pesquisados para a estimativa de implementação da infraestrutura de tratamento e transporte das águas residuárias aos Perímetros Irrigados Ayres de Sousa e Forquilha e para o polo industrial de Sobral.

Adotando-se a premissa da necessidade de um tratamento mais sofisticado, levou-se em consideração, para a estimativa de custo, um novo tratamento de nível secundário, adequado para o reúso agrícola pela sua capacidade de remover de forma eficiente a matéria orgânica e patógenos, mas com a manutenção dos nutrientes, e também para o reúso industrial, por gerar uma qualidade de efluente tratado próxima à da água bruta, ficando cada indústria responsável pelo seu polimento de acordo com cada atividade industrial.

Quanto ao transporte, foram adotadas 3 (três) estações elevatórias e linhas de recalque individuais para cada usuário da água de reúso. O rateio da vazão disponível seguiu a seguinte ordem de prioridade: 1 – Perímetro Irrigado Forquilha, devido à restrição hídrica imposta pela vazão máxima outorgável de 90 L/s; 2 – Indústrias de Sobral, pelo fato de estarem mais próximas da zona urbana; e 3 – Perímetro Irrigado Ayres de Sousa, por já possuir fonte hídrica tradicional com elevada garantia.

Para a estimativa de custo do tratamento (ETE) e do bombeamento (EE), foram utilizadas as equações 22, 23 e 24 de um estudo específico da CAGECE, realizado por consultores contratados pelo BNDES (CONSÓRCIO ACQUA, 2017), com custos unitários corrigidos pelo IGPM para 2017, de várias concessionárias do Brasil.

$$CustoETE = 330739{,}645.\,vazão^{0{,}8351} \tag{22}$$

$$CustoEE = 128248{,}5429.\,Pot^{0{,}6080} \tag{23}$$

$$CustoLR = 47{,}85.\,e^{0.007.D} \tag{24}$$

Sendo:
CustoETE – Custo da Estação de Tratamento de Esgoto em R$
Vazão – Vazão de tratamento em L/s
CustoEE – Custo da Estação Elevatória em R$
Pot – Potência de bombeamento em CV
CustoLR – Custo unitário da linha de recalque em R$/m
D – Diâmetro da linha de recalque em mm

Para a determinação das potências das bombas das estações elevatórias de reúso (EE), necessárias para o cálculo da Equação 23, foram utilizados os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 42.

Tabela 43 – Parâmetros de cálculo da potência instalada das estações elevatórias

Parâmetros	**P.I. Ayres de Sousa**	**P.I. Forquilha**	**Indústrias de Sobral**
Vazões (L/s)	47,8	130,0	25,7
Distância de Sobral (km)	15	13	5
Diâmetro de recalque (mm)	250	400	200
Desvio Geométrico (m)	70	30	6
Perda de carga total (m)	58,0	32,4	18,2
Altura manométrica (m)	128,0	62,4	24,2
Rendimento das bombas	40%	40%	40%
Folga de potência	10%	10%	10%
Potência da EE (CV)	224,3	297,5	22,8
Potência adotada (CV)	250	300	25

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As distâncias de Sobral até cada ponto de distribuição, e seus respectivos desvios geométricos, foram estimados pelo Google Earth©, fazendo-se o traçado das linhas de recalque por vias urbanas e pela faixa de domínio de vias federais e estaduais. Devido ao fato dos usuários industriais de Sobral serem descentralizados, utilizou-se a distância do centro da cidade à BR-222 como referência. O diâmetro de recalque foi calculado pela fórmula do diâmetro econômico de Bresse, com coeficiente K =1,2, e a perda de carga utilizando a equação de Hazen-Williams.

Os custos estimados da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), Estações Elevatórias (EE) e Linhas de Recalque (LE), para o atendimento de 76,6% da demanda não potável da região de Sobral, com água de reúso, estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 44 – Custo estimado de infraestrutura para reúso na região de Sobral

Custo (R$)	**P.I. Ayres de Sousa**	**P.I. Forquilha**	**Indústrias de Sobral**
Estação Elevatória (EE)	3.681.289	4.112.843	907.820
Linha de recalque (LR)	4.130.366	10.229.393	970.207
Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	28.013.566		
Total	52.045.484		

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O atendimento pleno das demandas não potáveis por água de reúso, poderá ser alcançado quando o índice de cobertura de esgoto atingir o nível de 63,13%, gerando uma vazão de retorno de 265,7 L/s.

6 CONCLUSÃO

É possível concluir que ocorreu uma superestimação das vazões afluentes geradas pelo WASA, provavelmente ocasionada pelo escoamento de base, visto tal fenômeno ocorrer com maior raridade no semiárido nordestino pelas suas características climáticas e geológicas. Tal superestimação repercutiu em resultados de garantia muito elevada. Mesmo com a superestimação das vazões, o modelo representou bem o comportamento de secas históricas do Ceará a partir de 1980, no caso a de 1980-84, 1993, 1998-99, 2001, 2010 e 2012-17.

A predição de volumes pelo SIGA foi satisfatória. O coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) variou de 0,29 a 0,98 para oito reservatórios dos dez analisados, com mediana de 0,66 e média de 0,42, podendo-se destacar excelente eficiência de predição para os reservatórios Carão, Carmina, Edson Queiroz, Forquilha e São Vicente, com valores acima de 0,75.

A diferença média entre garantias calculadas pelo SIGA e pelo VYELAS foi baixa, na ordem de 6%. A semelhança estatística entre médias dos dois modelos foi constatada pelo teste t-Student, exceto para os Açudes Farias de Souza, Forquilha e Edson Queiroz. A diferença de escala temporal entre o SIGA (mensal) e o VYELAS (anual) tende a gerar diferenças de garantia entre os modelos. A escala anual do VYELAS permite compensação de falhas entre meses resultando em maior garantia. Portanto, o VYELAS, como ferramenta de planejamento, tende a apresentar garantias ligeiramente maiores em relação ao SIGA.

Os níveis de atendimento das demandas foram elevados, com valor médio de 93% e mediana de 98% do tempo. Alguns resultados insatisfatórios para as demandas dos Açudes Farias de Souza e Forquilha já eram esperados devido às suas baixas garantias e pela diferença entre a vazão liberada pela COGERH de 220 L/s e a vazão máxima outorgável calculada pelo VYELAS de 90 L/s para o Açude Forquilha. Para este último reservatório, o demandante mais penalizado foi o Perímetro Irrigado Forquilha, que ficou desabastecido por todo o período.

Os reservatórios que elevaram sua garantia, com a inclusão do reúso indireto, foram o Acaraú-mirim (0,4%), Araras (0,2%), Ayres de Sousa (0,9%), Carão (0,2%) e Taquara (0,4%), pelo fato de serem os únicos com demandas a montante, e, portanto, com vazão de retorno afluente aos reservatórios. Os aumentos de garantia apresentados com a introdução do reúso direto e indireto combinados, são também pouco representativos, com maior impacto para o Açude Forquilha (1,1%). Os baixos valores de garantia são explicados pelo fato de as vazões incrementais de reúso indireto serem muito pequenas em relação às vazões afluentes naturais. Além disso, as garantias, para essas faixas de vazão liberada, possuem baixa sensibilidade à variação da vazão.

Analisando apenas o período de seca de 2012 a 2017, é possível constatar que o reúso indireto e direto passa a ter papel relevante na manutenção do estoque dos reservatórios, principalmente nos meses mais críticos. O reúso indireto foi responsável, neste período, pelo aporte de 3,3 a 18% dos volumes estocados nos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, atingindo a parcela máxima de contribuição de 71,2% para o reservatório Carão, 43,3% para o Araras, 21,7% para o Acaraú-mirim, 10,6% para o Ayres de Sousa e 9,2% para o Taquara. Ao adicionar os efeitos do reúso direto para os açudes Araras, Ayres de Sousa e Taquara, obteve-se, respectivamente, um aporte médio de reúso de 7,9%, 14,2% e 9,4%. As parcelas máximas para estes reservatórios, foram, respectivamente, de 43,3%, 33,6% e 32,4%, para os seus meses mais críticos.

A implementação de projetos de reúso direto não potável são normalmente complexos e de difícil viabilização. As principais recomendações para criação de ambiente propício à projetos de reúso são: a criação de um marco regulatório de reúso que facilite a sua prática e a criação de arranjos institucionais; a criação de mecanismos de incentivo ao reúso por meio de subsídios governamentais; e o equilíbrio tarifário de água bruta para aumento da competitividade da água de reúso.

Dos três projetos propostos de reúso direto para fins agrícolas e industriais, o projeto 2 (reúso em Sobral) foi selecionado para o detalhamento de custos estimados, pela seu porte e relevância. Este projeto seria capaz de gerar significativo impacto em uma de suas demandas, no caso, o Perímetro Irrigado Forquilha, que passaria a ter nível de atendimento de 98,7%. Este aumento é explicado pelo fato desta demanda ter sido submetida à restrição hídrica, ficando desabastecida no Cenário 1 (sem reúso). Com a elevação do nível de cobertura de esgoto de Sobral de 48,35 para 63,13%, seria possível dar autonomia às suas demandas não potáveis mais próximas com água de reúso, que é de 265 L/s.

A proximidades dos Perímetros Irrigados Ayres de Sousa e Forquilha e de indústrias de porte ao Município de Sobral são um atrativo para o desenvolvimento de um projeto de reúso na região, poupando o uso de água bruta para fins mais nobres e reduzindo o aporte de nutrientes aos reservatórios a jusante. Dentre os três usuários supramencionados, o mais prioritário seria o Perímetro Irrigado Forquilha, pela existência de restrição na liberação de vazão do Açude Forquilha.

Os custos estimados da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), Estações Elevatórias (EE) e Linhas de Recalque (LE), para o atendimento de 76,6% da demanda não potável da região de Sobral, com água de reúso (203,5 L/s), totalizam aproximadamente R$ 52 milhões de reais.

Analisando as garantias, pode-se dizer que tanto o reúso indireto, como o indireto, geraram ganhos discretos aos reservatórios, mas do ponto de vista individual de cada demanda, o reúso direto não potável pode impactar significativamente no seu nível de atendimento, principalmente quando a mesma está submetida a restrições hídricas.

Os projetos de reúso, além de apresentarem ganhos de segurança hídrica, também são vetores de desenvolvimento social, econômico e principalmente ambiental, pela redução de aporte de nutrientes aos reservatórios que aceleram o processo de eutrofização. Ao mesmo tempo, a água de reúso é considerada uma água fertirrigada, reduzindo custos com nutrientes utilizados na agricultura.

7 RECOMENDAÇÕES

Alguns pontos de refinamento da pesquisa podem ser explorados, como por exemplo, o estudo de perda em trânsito e afloramento nos rios do Ceará. A interação rio-aquífero ainda é um assunto pouco explorado, mas que muito impacta na alocação de água com valores de perda na ordem de 1 a 3%/km. A importância de estudos nessa área fica ainda mais evidente com a expectativa da transposição do Rio São Francisco que traz incertezas quanto a vazão afluente efetiva que alcançará os reservatórios estratégicos do Ceará.

Outra questão ainda pouco estudada se refere aos coeficientes de retorno reais para as zonas urbanas e rurais do Ceará, ou de atividades específicas, como agricultura e indústria. Pesquisas nessa área ajudariam a calibrar melhor o retorno das águas residuárias aos reservatórios para modelagem qualitativa e quantitativa.

Alguns estudos apontam elevado impacto da pequena açudagem na garantia de reservatórios estratégico. Por se tratar de uma prática difundida no Ceará, é importante o desenvolvimento de estudos de alocação de água que considerem este aspecto.

Poucas pesquisas relacionadas à manutenção de vazões ecológicas no Ceará estão disponíveis. Recomenda-se o desenvolvimento de estudos nessa área para estabelecimento da vazão ecológica como uma demanda específica em modelos de alocação de água.

Para reduzir o problema de superestimação de vazão afluente, recomenda-se em estudos futuros identificar, calibrar e validar os parâmetros do WASA responsáveis pelo escoamento de base.

Considerando-se a desvantagem de o Coeficiente Nash-Sutcliffe de tender a supervalorizar a predição de picos de vazão e negligenciar a predição de vazões menores, sugere-se o desenvolvimento de estudos locais de análise de outros coeficientes de eficiência de modelos hidrológicos como, por exemplo, o Coeficiente de determinação (r^2), índice de concordância de Willmot (d) e versões modificadas do r^2, d e NS, como o wr^2 (regressão ponderada), d_{rel} (relativo), NSrel (relativo) e o NSln (logaritmo).

Recomenda-se ainda a realização de estudos de modelagem qualitativa da água a fim de avaliar os impactos, não só da alocação de água, como também das vazões de retorno das demandas ao meio ambiente e de propostas de reúso direto não potável, com foco principalmente na eutrofização dos reservatórios.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9649:1986** - Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

ALMEIDA, J. H. M. **Avaliação do impacto da pequena açudagem na vazão regularizada de um reservatório estratégico.** Estudo de caso: Açude Araras-CE. 2016. 389 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

ALMEIDA, R. G. Aspectos legais para a água de reúso. **Vértices**, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 13, n. 2, p. 31–43, maio/ago. 2011.

ALVES, C. M. A.; BARROS, F. V. F.; MENDONÇA, G. M. J. Implantação dos módulos de calibração automática de modelos hidrológicos e de modelagem de poluição difusa no sistema de informações para gerenciamento da alocação de água-SIGA. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 8., 2006, **Anais...** Gravatá: ABRH, 2006. p.1-20.

ANDRADE, E. M.; BATISTA, T. M.; TEIXEIRA, A. S.; MEIRELES, M. S., BEATRIZ F. S. Mapa de vulnerabilidade da bacia do Acaraú, Ceará, à qualidade das águas de irrigação, pelo emprego do GIS. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, n. 3, p. 279–286, 2006.

ANDRADE, J. A.; NUNES, M. A. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista espinhaço**, Diamantina, v. 3, n. 2, p. 28-39, 2014.

ANDRADE, L. N. **Modelo de otimização multiobjetivo para outorga de diluição de efluentes e enquadramento de corpos d´água**. 2012. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ANDRADE, P. R. G. S. **Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do rio Capibaribe, PE**. 2006. 248 f. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

ANGELAKIS, A.; GIKAS, P. Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states. **Water Utility Journal**, v. 8, p. 67–78, 2014.

ARAGÃO, F. T. A.; LOURENÇO, D. V.; MAUTA, D. S.; SILVA, F. H. O.; BEZERRA, F. M L. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Tauá – CE. *In:* JORNADA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA, 14., 2017, **Anais...** Bagé: URCAMP, 2017. p. 1-9.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo Acquanet.** 2008. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

ARAÚJO, E. M. **Investigação do processo de geração de escoamento usando análise estatística multivariada em uma grande bacia semiárida:** o caso do Orós. 87 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ARAÚJO, E. M. **Estimativa do assoreamento de um pequeno reservatório do semiárido rural através do estudo dos solos e de fontes de sedimento**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A.; MEDEIROS, P. Rainfall-gauge density and performance of a process-oriented model in a semi-arid basin. **Geophysical Research Abstracts**, v. 18, 2016.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; NICKS, A. D.; SAMMONS, N. B. SWRRB: **A basin scale simulation model for soil and water resources management.** College Station, Texas: Texas A & M University Press, 1990. 142 p.

BACALHAU, J. R. **Simulação da disponibilidade hídrica e operação de reservatórios de abastecimento em relação à variabilidade climática:** bacia do rio Pirapama em Pernambuco. 2015. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

BARROS, F. V. F.; ALVES, C. M.; MARTINS, E. S. P. R.; REIS JR., D. S. B. The development and application of information system for water management and allocation (SIGA) to a negotiable water allocation process in Brazil. *In:* WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2013, **Anais...** ASCE, 2013. p. 1308–1316.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V. **Introdução à engenharia conceitos, ferramentas e comportamentos**. Florianópolis: UFSC, 2006. 270 p.

BERTSEKAS, D. P. **Nonlinear programming.** 2.ed. Belmont: Athena Scientific,1999. 372p.
BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B (Orgs.). **Águas do Brasil:** Análises Estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. 224 p.

BOUZON, M.; COELHO, A. S.; RODRIGUEZ, C. M. T. Determinação do padrão de operação ótimo para o custo energético de um sistema de distribuição de água. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 13, n. 2, p. 500–519, 2013. Disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1108>. Acesso em: 21 dez. 2016.

BRASIL. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 09 mar. 2006a.

BRASIL. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Mapa geodiversidade do Brasil**, Brasília, DF, 2006b. 1 mapa, color. Escala 1:250.000.

BRASIL. Agencia Nacional de águas. **Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil e fiscalização dos usos de recursos hídricos no Brasil**. Brasília, DF, 2007. 166 p.

BRASIL. Agencia Nacional de Águas. **Caderno de Capacitação em Recursos Hídricos**: Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos. Brasília, DF, 2011a. 54 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil:** Relatório Técnico 6. Brasília, DF, 2011b. 265 p.

BRASIL. Agencia Nacional de Águas**. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília, DF, 2013. 252 p.

BRASIL. Agencia Nacional de Águas. **Manual do empreendedor** – Volume 5: Guia para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens. Brasília, DF, 2015. 194 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**. Brasília, DF, 2017a. 100 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro - Hidrologia, balanço hídrico e operação:** Anexo D**.** Brasília, DF, 2017b. 145 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2016. Brasília, DF, 2018a. 218 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Perímetro irrigado Araras Norte.** Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/araras_norte.html>. Acesso em: 28 mar. 2018b.

BRONSTERT, A.; BATALLA, R. J.; ARAÚJO, J. C.; FRANCKE, T.; GUNTNER, A.; TARAZON, J. L.; MAMEDE G.; MULLER, E. Integrated modelling of runoff and sediment fluxes across scales. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOOD SECURITY AND ENVIRONMENTAL, 2009, IIT-Kharagpur, India. **Anais...** FSES, 2009. p. 1 – 11.

BRONSTERT, A.; ARAÚJO, J.C.; BATALLA, R. J.; COSTA, A. C.; DELGADO, J.M.; FRANCKE, T.; FOERSTER, S.; GUENTNER, A.; TARAZÓN, J.A.L.; MAMEDE, G.L.; MEDEIROS, P.H.; MUELLER, E.; VERICAT, D. Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 12, p. 2001–2018, 2014.

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

CARVALHO, M. A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V.; SCHARDONG, A.; PORTO, R. L. L. Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 10–17, 2009.

CARVALHO JR., V. N. (Coord.). **Avaliação de perdas de água em trânsito em rios perenizados do semi-árido:** Relatório Final - Volume I. Fortaleza, 2002. 227 p.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Planejamento estratégico dos comitês de bacias hidrográficas do estado do Ceará**. Fortaleza, 2006. 120 p.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental do açude Forquilha:** Fatores Condicionantes da Qualidade das Águas. Fortaleza, 2008. 103 p.

CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. **Caderno regional da bacia do Acaraú**: Volume 1. Fortaleza, 2009. 128 p.

CEARÁ. Lei nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado do Ceará**. Poder Executivo, Fortaleza, CE, 30 dez. 2010a.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano de gerenciamento das águas da bacia do Acaraú** - Fase 1: Estudos Básicos e Diagnóstico. Relatório Final - Edição Definitiva (RFED). Fortaleza, 2010b. 553 p.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental do açude Ayres de Sousa:** Fatores Condicionantes da Qualidade das Águas. Fortaleza, 2010c. 48 p.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano de gerenciamento das águas da bacia do Acaraú**: Síntese do Relatório Final - Edição Definitiva. Fortaleza, 2010d. 117 p.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental do açude Edson Queiroz**. Fortaleza, 2011a. 105 p.

CEARÁ. Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará. **Perímetros públicos irrigados do Ceará**. Fortaleza, 2011b. 20 p.

CEARÁ. Decreto Estadual nº 31.076, de 12 de dezembro de 2012. Regulamenta os artigos 6º a 13 da lei nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010, referentes à outorga de direito de uso dos recursos hídricos e de execução de obras e serviços de interferência hídrica, cria o sistema de outorga para uso da água e de execução de obras, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado do Ceará**. Poder Executivo, Fortaleza, CE, 17 dez. 2012.

CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Manual do SIGA**. Fortaleza, 2015. 158 p.

CEARÁ. Lei nº 16.033, de 20 de junho de 2016. Dispõe sobre a Política de Reúso de Água Não Potável no Âmbito do Estado do Ceará. **Diário Oficial do Estado do Ceará**. Poder Executivo, Fortaleza, CE, 22 jun. 2016a.

CEARÁ. Lei nº 16.034, de 20 de junho de 2016. Acrescenta dispositivos à Lei nº 12.670, de 27 de dezembro de 1996, que dispõe acerca do Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e Sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação - ICMS. **Diário Oficial do Estado do Ceará**. Poder Executivo, Fortaleza, CE, 22 jun. 2016b.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil básico municipal de Sobral**. Fortaleza, 2016c. 18 p.

CEARÁ. Resolução COEMA nº. 2, de 02 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMA-CE nº 151, de 25 de novembro de 2002. **Diário Oficial do Estado do Ceará**. Poder Executivo, Fortaleza, CE, 21 fev. 2017.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Resenha diária do monitoramento – 03/03/18.** Fortaleza, 2018a. 2 p.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em mapas - Atividades econômicas**: Indústria. 2018b. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo5/52.htm>. Acesso em: 30 mar. 2018.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Portal hidrológico do Ceará**. 2018c. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 31 mar. 2018.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. **Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará**. 2018d. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/>. Acesso em: 14 fev. 2018.

CIRILO, J. A. Políticas Públicas de Recursos Hídricos para o Semi-árido. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 61–82, 2008.

CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, São Paulo, v. 106, p. 45–48, 2015.

CNI. **Uso da água no setor industrial brasileiro:** matriz de coeficientes técnicos. Brasília, 2013. 31 p.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 30, p. 59–84, 2014.

COELHO, C. F. **Eutrofização em pequenos reservatórios semiáridos:** Saneamento rural, aspectos limnológicos e sensoriamento remoto. 2017. 77 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2017.

CONSÓRCIO ACQUA. **Base para investimentos em bens de capital - CAPEX - do projeto conceitual dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário - Ceará**. São Paulo, 2017. 29 p.

COSTA, A. C.; BRONSTERT, A.; DE ARAÚJO, J. C. A channel transmission losses model for different dryland rivers. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 16, n. 4, p. 1111–1135, 2012.

COSTA, A. C.; MARTINS, E. S. P. R.; BARROS, F. V. F.; BRONSTERT, A. FRANCKE, T.; GÜNTNER, A. Regionalização de modelagem hidrológica semidistribuída para todo o estado do Ceará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013a, Bento Gonçalves. **Anais**... Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

COSTA, A. C. **Analyzing and modelling of flow transmission processes in river-systems with a focus on semi-arid conditions**. 2012. 108 f. Tese (Doutorado em Hidrologia) - Faculdade de Matemática e Ciências Naturais, Universidade de Potsdam, Potsdam, 2012.

COSTA, A. C.; BRONSTERT, A.; ARAÚJO, J. C.; FOERSTER, S. Perdas em trânsito em regiões semiáridas e áridas: análise de dados de múltiplos tipos e modelagem hidrológica semidistribuída. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013b, **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

COSTA, C. A. G.; ALEXANDRE, D. M. B.; MEDEIROS, P. H. A. ARAÚJO, J. C. Análise de sensibilidade da vazão regularizável em reservatórios de diferentes escalas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 2009, 18., **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009. p. 1-12.

COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona de raízes em condições naturais de caatinga conservada**. 2012. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, 2012.

DAGGENVOORDE, R. **The influence of change in reservoir shape on water availability.** 2015. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - University of Twente, Twente, 2015.

DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 51, n. 1, p. 157–170, 2006.

DE ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A. Water availability reduction in reservoirs for different sediment yield scenarios in a semiarid watershed. *In*: WORLD WATER CONGRESS 2008, 13., Montpellier. **Anais...** Montpellier: IWRA, 2008. p. 1-11.

FAYAED, S. S.; EL-SHAFIE, A.; JAAFAR, O. Reservoir-system simulation and optimization techniques. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Basel, v. 27, n. 7, p. 1751–1772, 2013.

FEITOSA, A. V; PEREIRA, R. F.; NUNES, A. I. V.; PAULINO, W. D. Comparação do Índice de Qualidade de Água de Açudes Localizados nas Bacias Metropolitana e Acaraú no

Estado do Ceará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013a, Bento Gonçalves. **Anais**... Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

FEITOSA, A. P. **Otimização do uso das águas da barragem Santa Cruz-RN**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

FIEC. **Guia da Indústria 2014**. Disponível em: <http://www2.sfiec.org.br/portalv3/sites/guia2014/?st=index/>. Acesso em: 31 mar. 2018.

FRANCKE, T. K. O. **Measurement and modelling of water and sediment fluxes in meso-scale dryland catchments**. 2009. 147 f. Tese (Doutorado em Geoecologia) - Faculdade de Matemática e Ciências Naturais, Universidade de Potsdam, Potsdam, 2009.

FREITAS, M. A. S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semi-áridas. **Revista Tecnologia Fortaleza**, Fortaleza, n. 19, p. 19–30, 1998.

FU, M. C. Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. **Informs Journal on Computing**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 192–215, 2002.

GARCIA, J. I. B. **Sistema de suporte a decisão para o lançamento de efluentes**. 2011. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GARJULLI, R. Os Recursos hídricos no semiárido. **Ciênc. e cult**., [s. l.], v. 55, n. 4, p. 38–39, 2003.

GERMANO, B. N.; MORAES, M. M. G. A.; RAMOS, F. S. Custos de oportunidade para alocação de efluentes nas áreas plantadas de cana na bacia do rio Pirapama. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 679–711, 2010.

GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. (Ed.) **Recursos hídricos em regiões semiáridas**: Estudos e Aplicações. Campina Grande: INSA, 2012. 258 p.

GIUPPONI, C. SGOBBI, A. Decision support systems for water resources management in developing countries: learning from experiences in Africa. **Water**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 798–818, 2013.

GRANT, S. B.; SAPHORES, J.-D.; FELDMAN, D. L.; HAMILTON, A. J.; FLETCHER, T. D.; COOK, P. L. M.; STEWARDSON, M.; SANDERS, B. F.; LEVIN, L. A.; AMBROSE, R. F.; DELETIC, A.; BROWN, R.; JIANG, S. C.; ROSSO, D.; COOPER, W. J.; MARUSIC, I. Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability. **Science**, [s. l.], v. 337, n. 6095, p. 681–686, 2012.

UFBA. **Gerenciamento dos recursos hídricos do semi-árido do estado da Bahia - Vol. I**II: Sistema de apoio à decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraguaçu. Salvador: GRH, 2004. 75 p.

GU, R.; DEUTSCHMAN, M. Hydrologic assessment of water losses in river. **Water Resources, Planning and Management**, [s. l.], v. 127, p. 6–12, 2001.

GUDE, V. G. Desalination and water reuse to address global water scarcity. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 591–609, 2017.

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil.** 2002. 148 f. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) - Faculdade de Matemática e Ciências Naturais, Universidade de Potsdam, Potsdam, 2002.

GÜNTNER, A.; KROL, M. S.; ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. Simple water balance modeling of surface reservoir systems in a large data-scarce semi- arid region. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 901–918, 2004.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 297, n. 1–4, p. 136–161, 2004.

GWP. **The role of decision support systems and models in integrated river basin management**. Estocolmo: GWP, 2013. 48 p.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics. **The Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1, 1911.

HESPANHOL, I. A inexorabilidade do reúso potável direto. **Revista DAE**, [s. l.], v. 63, n. 198, p. 63–82, 2015.

JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E. **Água e Sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções**. 1ª. ed. São Paulo: IEE-USP e Reconectta, 2017. 110 p.

JAEGER, W. K.; AMOS, A.; BIGELOW, D. P.; CHANG, H.; CONKLIN, D. R.; HAGGERTY, R.; LANGPAP, C.; MOORE, K.; MOTE, P. W.; NOLIN, A. W.; PLANTINGA, A. J.; SCHWARTZ, C. L.; TULLOS, D.; TURNER, D. P. Finding water scarcity amid abundance using human–natural system models. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 114, n. 45, p. 11884–11889, 2017.

JARIHANI, A. A.; LARSEN, J. R.; CALLOW, J. N.; MCVICAR, T. R.; JOHANSEN, K. Where does all the water go? Partitioning water transmission losses in a data-sparse, multi-channel and low-gradient dryland river system using modelling and remote sensing. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 529, p. 1511–1529, 2015.

KAHIL, M. T; DINAR, A.; ALBIAC, J. Cooperative water management and ecosystem protection under scarcity and drought in arid and semiarid regions. **Water Resources and Economics**, [s. l.], v. 13, p. 60–74, 2016.

KAYSER, R. H. B. **Metodologia de balanço hídrico e critérios de outorga em bacias hidrográficas com uso intenso de reservatórios de pequeno porte:** estudo de caso na bacia

do rio Quaraí. 2014. 150 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

KLEINE, I. E. **Monitoring of seasonal changes in water surface areas with TerraSAR-X in a semi-arid catchment**. 2012. 90 f. Monografia (Graduação em geoecologia). Instituto da Terra e Ciências Ambientais, Universidade de Potsdam, Potsdam, 2012.

KÖPPEN, W. P. **Grundriss der Klimakunde**. Berlim: W. de Gruyter, 1931. 388 p.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, [s. l.], v. 5, n. 89, p. 89–97, 2005.

KROL, M. S.; DE VRIES, M. J.; VAN OEL, P. R.; DE ARAÚJO, J. C. Sustainability of small reservoirs and large scale water availability under current conditions and climate change. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 25, n. 12, p. 3017–3026, 2011.

LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 130, n. 2, p. 93–111, 2004.

LABSID. **AcquaNet**. São Paulo, 2013. 72 p.

LAZAROVA, V.; LEVINE, B.; SACK, J.; CIRELLI, G.; JEFFREY, P.; MUNTAU, H. Role of water reuse for enhancing integrated water management in Europe and Mediterranean countries. **Water Science & Technology**, [s. l.], v. 43, n. 10, p. 25–33, 2001.

LEÃO, R. A. O.; SOARES, A. A.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA, D. D. Estimation of evaporation in the Banabuiú dam, in the state of Ceará Brazil, by different combined methods, derived from the Penman equation. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 129–144, 2013.

LERNER, G. L. S. **Estudo de impactos na geração hidroelétrica ao longo do rio São Francisco devido à transposição de suas águas utilizando o modelo matemático de fluxos em rede Acquanet**. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

LIMA, C. H. R.; FRISCHKORN, H.; BURTE, J. Evaluation of Stream-Aquifer Interaction Using Experimental Data and an Analytical Model. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 217–230, 2007.

LIMA, G.; SALES, C. **Alocação de água no semiárido**. João Pessoa, 2015. 21 p.

LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; DE ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 319–333, 2011.

LINS, S. Gerenciamento dos Recursos Hídricos no Estado do Ceará: Princípios e Práticas. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 7, n. 2, p. 349–365, 2011.

LOPES, J. W. B.; ARAÚJO, J. C. Escassez Hídrica e assoreamento em reservatório do semiárido. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSSEDIMENTOLOGIA 2015, **Anais...** Porto Alegre: IPH, 2015. p. 1-4.

LOURENÇO, A. M. G. **Arquitetura genérica para um sistema de suporte à decisão em recursos hídricos**. 2015. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

MAIA, J. L. **Técnicas para o gerenciamento quanti-qualitativo de reservatórios com usos múltiplos da água:** estudo de caso do reservatório de Barra Bonita–SP. 2009. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

MALVEIRA, V. T. C. **Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas:** Estudo de caso da bacia do açude Orós. 2009. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in semiarid northeastern brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 109–117, 2012.

MAMEDE, G. L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments:** modelling and management. 2008. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) - Faculdade de Matemática e Ciências, Universidade de Potsdam, Potsdam, 2008.

MARQUES, P. E. **Desenvolvimento de sistema de apoio à decisão para alocação de água na agricultura irrigada em nível de microbacia hidrográfica**. 2015. 282 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

MEDEIROS, P. H. A.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. L.; ARAÚJO, J. C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 636–648, 2010.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; ANDRELLO, A. C. Uncertainties of the 137 Cs technique for validation of soil redistribution modelling in a semiarid meso-scale watershed. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 222–235, 2014.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida:** modelagem distribuída e validação em diferentes escalas. 2009. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MEDEIROS, P. H. A.; DE ARAÚJO, J. C.; MAMEDE, G. L.; CREUTZFELDT, B.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, n. 12, p. 1938–1948, 2014.

MEDEIROS, P. H. A.; DE ARAÚJO, J. C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1216–1223, 2014.

MOLINOS-SENANTE, M.; DONOSO, G. Water scarcity and affordability in urban water pricing: A case study of Chile. **Utilities Policy**, [s. l.], v. 43, p. 107–116, 2016.

MOLLE, F. **Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento**. Recife: SUDENE, 1994. 193 p.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. *In*: SYMPOSIA OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., 1965, Cambridge. **Anais…** Cambridge: University Press, p. 205-234.

MORAES, M. M. G. A.; CIRILO, J. A.; SAMPAIO, Y.; ROCHA, S. P. V. Gestão de recursos hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos. **REGA**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 29–44, 2006.

MORUZZI, R. B. Reúso de água no contexto da gestão de recursos hídricos: Impacto, tecnologias e desafios. **OLAM – Ciência & Tecnologia**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 271–294, 2008.

MOTA, L. H. S. O.; VALLADARES, G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 39–50, 2011.

MUELLER, E. N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model. **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 275–291, 2010.

MUELLER, E. N.; FRANCKE, T.; BATALLA, R. J.; BRONSTERT, A. Modelling the effects of land-use change on runoff and sediment yield for a meso-scale catchment in the Southern Pyrenees. **Catena,** [s. l.], v. 79, n. 3, p. 288–296, 2009.

MÜLLER, E. N.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G.; GÜNTNER, A. **WASA-SED parameterisation manual**. Potsdam: Universidade de Potsdam, 2008. 37 p.

NASCIMENTO, F. R.; CUNHA, S. B.; ROSA, M. F. Classes de solos e unidades morfo-pedológicas na bacia hidrográfica do rio Acaraú - Ceará. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: International Association of Geomorphologists, 2006. p. 1-11.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology,** [s. l.], v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NETO, M. C. P. Perspectivas da açudagem no semiárido brasileiro e suas implicações na região do Seridó potiguar. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 285–294, 2017.

NORONHA, A. W. T.; COSTA, A. C.; MARTINS, E. S. P. R., BARROS, F. V. F.; RODRIGUES, J. M. Paralelização de um algoritmo de calibração multiobjetivo para a

previsão operacional de vazão de rios. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

ONS. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional - SIN**: Relatório Final - Metodologia e Resultados Consolidados. [s.l: s.n.]. 220 p.

PACHECO-GUERRERO, A.; GOODRICH, D. C.; GONZÁLEZ-TRINIDAD, J.; JÚNEZ-FERREIRA, H. E.; BAUTISTA-CAPETILLO, C. F. Flooding in ephemeral streams: Incorporating transmission losses. **Journal of Maps**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 350–357, 2017.

PAIVA, W. L.; CAVALCANTE, A. L.; ALBUQUERQUE, D. P. L. Padrão Locacional da Indústria Cearense: Algumas Evidências. **Revista Econômica do Nordeste**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 605–618, 2009.

PENMAN, H. L. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 193, n. 1032, p. 120–145, 1948.

PEREIRA, G.; CAVALCANTI, B. S. SIGA: O novo sistema de suporte à decisão para gestão dos recursos hídricos. *In*: FÓRUM LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE, 2., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2016, Brasília. **Anais...** Brasília: SBEA, 2016, p. 1–8.

PESSÔA, Z. B. **Efetivação do enquadramento de corpos d'água para fins de consumo humano em regiões semiáridas:** Avaliação conforme resolução CONAMA 357/2005 e portaria MS 2914/2011. 123 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

PILZ, T.; FRANCKE, T.; BRONSTERT, A. LumpR 2.0.0: An R package facilitating landscape discretisation for hillslope-based hydrological models. **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 3001–3023, 2017.

PONTES, P. A.; ARAGÃO, K. Os Perímetros irrigados do Ceará: Os grandes projetos de irrigação têm impacto sobre a renda local? *In*: ENCONTRO DA ANPAD 2013, 37., 2013, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EnANPAD, 2013. p. 1-13.

RABELO, U. P. **Segurança hídrica no Ceará: Análise de cenários e de alternativas de intervenção**. 2017. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

ROBERTO, A. N.; PORTO, R. L.; SCHARDONG, A.; NETO, H. L. O novo sistema de suporte a decisões Acquanet. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007. p. 1-20.

ROCHA, R.; SOARES, R. R. Water scarcity and birth outcomes in the brazilian semiarid. **Journal of Development Economics**, [s. l.], v. 112, p. 72–91, 2015.

RODELLA, L. M. A. **Modelo de programação linear para apoio a decisão na distribuição de água de sistemas integrados de abastecimento**. 2014. 93 f. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

RODRIGUES, R. P. **Utilização da metodologia de superfície de resposta para otimização de modelos de simulação a eventos discretos**. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

SABOIA, A. L. **Água para quem? Os meandros da gestão de recursos hídricos no Estado do Ceará**. 2015. 178 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SANTIAGO, C. T. M.; COSTA, A. C.; FRANCKE, T.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A.; MARTINS, E. S. P. R. Validação de um modelo hidrológico regional para grandes bacias no Estado do Ceará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais...** Brasília: ABRH, 2015. p. 1-8.

SANTOS, V. S. **Modelo de simulação quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento dos recursos hídricos superficiais, com a aplicação à bacia do rio Paraíba**. 2011. 170 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude.** Estudo de caso: bacia do Rio Mundaú. 2013.107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SARKER, R. A.; NEWTON, C. S. **Optimization modelling:** A practical introduction. 1ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 504 p.

SCHAER-BARBOSA, M.; SANTOS, M. E. P.; MEDEIROS, Y. D. P. Viabilidade do reúso de água como elemento mitigador dos efeitos da seca no semiárido da Bahia. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 17–32, 2014.

SHANAFIELD, M.; COOK, P. G. Transmission losses, infiltration and groundwater recharge through ephemeral and intermittent streambeds: A review of applied methods. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 511, p. 518–529, 2014.

SHUTTLEWORTH, W. J.; WALLACE, J. S. Evaporation from spare crops - an energy combination theory. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, [s. l.], v. 111, n. 469, p. 839–855, 1985.

SILVA, S. M. O. **Compensação financeira como mecanismo de gestão de risco na alocação de água**. 2015. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SINGH, A. Simulation-optimization modeling for conjunctive water use management. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 141, p. 23–29, 2014.

SOUZA, A. B.; OLIVEIRA, H. B. M.; FRANÇA, R. S.; COSTA, A. C.; SILVA, R. F. V.; MARTINS, E. S. P. R. Geração automatizada de dados de entrada para o modelo WASA-SED. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 2013, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

STUDART, T. A outorga do direito de uso da água em um cenário de incertezas: o caso do Nordeste Semi-árido. *In*: HOFMEISTER, W. (Ed.). **Água e desenvolvimento sustentável no Semi-árido**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, Série Debates n° 24, 2002. 169 p.

TAL, A. Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the drylands. **Water Research**, [s. l.], v. 90, p. 387–394, 2016.

TORRES, C. J. F.; BRAMBILLA, M.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Conflitos pelo uso da água para irrigação, geração de energia elétrica e manutenção do ecossistema aquático no baixo trecho do rio São Francisco. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [s. l.], v. 4, p. 195–210, 2015.

TRAN, Q. K.; SCHWABE, K. A.; JASSBY, D. Wastewater reuse for agriculture: Development of a regional water reuse decision-support model (RWRM) for cost-effective irrigation sources. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 50, n. 17, p. 9390–9399, 2016.

TUNDISI, J. G. (Coord.). **Recursos Hídricos no Brasil**: problemas, desafios e estratégias. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014. 76 p.

VIEIRA, A. S. **Um modelo de simulação, via programação linear sequencial, para sistema de recursos hídricos**. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

VIEIRA, A. S. **Modelo de simulação quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento integrado dos sistemas de recursos hídricos**. 2011. 275 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

VIEIRA, A. S.; CURI, R. C.; CURI, W. F.; SANTOS, V. S. Simulação, via programação linear sequencial com artifícios de linearização, para sistema de recursos hídricos Parte 1 e Parte 2: Modelo e aplicação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 33–51, 2012.

VIEIRA, A. S.; CURI, W. F. Evidenciação dos modelos de simulação e técnicas para o planejamento integrado dos sistemas hídricos. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 233–266, 2016.

WHO. **Reuse of effluents:** methods of wastewater treatment and health safeguards. Report of a WHO meeting of experts. Geneva, 1973. 64 p.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. *In*: USDA. **Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources**. ARS-S-40 ed. Oxford: USDA, 1975. 298 p.

WMO. **Guide to Hydrological Practices - Volume I** - WMO nº 168. 6 ed. Genebra: WMO, 2008. 296 p.

WWAP. **The United Nations world water development report 2017**. Wastewater: The Untapped Resource. Paris: UN WATER, 2017. 198 p.

ZOTARELLI, L.; DUKES, M. D.; ROMERO, C. C.; MIGLIACCIO, K. W.; MORGAN, K. T. **Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO-56 Method)**. [s.l]: University of Florida, 2010. 10 p.