

# **OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO MULTIOBJETIVO**

**CASO DE ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO GRAMAME, PARAÍBA, BRASIL**

**WANESSA DUNGA DE ASSIS**

**ÉRICA CRISTINE MEDEIROS MACHADO**

EDITORA AMPLLA

 AMPLLAEDITORA

 [www.ampllaeditora.com.br](http://www.ampllaeditora.com.br)



# **OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO MULTIOBJETIVO**

**CASO DE ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO GRAMAME, PARAÍBA, BRASIL**

**WANESSA DUNGA DE ASSIS**

**ÉRICA CRISTINE MEDEIROS MACHADO**

EDITORA AMPLLA

 AMPLLAEDITORA

 [www.ampllaeditora.com.br](http://www.ampllaeditora.com.br)



**2020 - Editora Amplla**  
**Copyright © Editora Amplla**  
**Copyright do Texto © 2020 Wanessa Dunga de Assis**  
**Copyright da Edição © 2020 Editora Amplla**  
**Editor Chefe:** Leonardo Pereira Tavares  
**Diagramação:** Higor Costa de Brito  
**Edição de Arte:** Higor Costa de Brito  
**Revisão:** Wanessa Dunga de Assis

OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO MULTIOBJETIVO: CASO DE ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME, PARAÍBA, BRASIL por Wanessa Dunga de Assis e Érica Cristine Medeiros Machado está licenciado sob CC BY 4.0.



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

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

### Conselho Editorial

Bergson Rodrigo Siqueira de Melo - Universidade Estadual do Ceará  
Carla Caroline Alves Carvalho - Universidade Federal de Campina Grande  
Cícero Batista do Nascimento Filho - Universidade Federal do Ceará  
Clécio Danilo Dias da Silva - Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Daniela de Freitas Lima - Universidade Federal de Campina Grande  
Denise Barguil Nepomuceno - Universidade Federal de Minas Gerais  
Dylan Ávila Alves - Instituto Federal Goiano  
Érica Rios de Carvalho - Universidade Católica do Salvador  
Gilberto de Melo Junior - Universidade Federal de Goiás  
Higor Costa de Brito - Universidade Federal de Campina Grande  
Italan Carneiro Bezerra - Instituto Federal da Paraíba  
Ivo Batista Conde - Universidade Estadual do Ceará  
João Henriques de Sousa Júnior - Universidade Federal de Santa Catarina  
João Vitor Andrade - Universidade de São Paulo  
Joilson Silva de Sousa - Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
José Cândido Rodrigues Neto - Universidade Estadual da Paraíba  
Jose Henrique de Lacerda Furtado - Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Josenita Luiz da Silva - Faculdade Frassinetti do Recife  
Lúís Paulo Souza e Souza - Universidade Federal do Amazonas  
Luiza Catarina Sobreira de Souza - Faculdade de Ciências Humanas do Sertão Central

Manoel Mariano Neto da Silva - Universidade Federal de Campina Grande  
Marcus Vinicius Peralva Santos - Universidade Federal da Bahia  
Marina Magalhães de Morais - Universidade Federal de Campina Grande  
Natan Galves Santana - Universidade Paranaense  
Nathalia Bezerra da Silva Ferreira - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte  
Neide Kazue Sakugawa Shinohara - Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Ricardo Leoni Gonçalves Bastos - Universidade Federal do Ceará  
Rodrigo da Rosa Pereira - Universidade Federal do Rio Grande  
Sabryna Brito Oliveira - Universidade Federal de Minas Gerais  
Samuel Miranda Mattos - Universidade Estadual do Ceará  
Tatiana Paschoalette Rodrigues Bachur - Universidade Estadual do Ceará  
Telma Regina Stroparo - Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Virginia Tomaz Machado - Faculdade Santa Maria de Cajazeiras  
Walmir Fernandes Pereira - Miami University of Science and Technology  
Wanessa Dunga de Assis - Universidade Federal de Campina Grande  
Wellington Alves Silva - Universidade Estadual de Roraima  
Yáscara Maia Araújo de Brito - Universidade Federal de Campina Grande  
Yuciara Barbosa Costa Ferreira - Universidade Federal de Campina Grande

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

**OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA EM SITUAÇÕES DE ESCASSEZ HÍDRICA  
ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO MULTI OBJETIVO:  
CASO DE ESTUDO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME, PARAÍBA, BRASIL**

**2020 - Editora Ampla**

**Copyright** © Editora Ampla

**Copyright do Texto** © 2020 Wanessa Dunga de Assis

**Copyright da Edição** © 2020 Editora Ampla

**Editor Chefe:** Leonardo Pereira Tavares

**Diagramação:** Higor Costa de Brito

**Edição de Arte:** Higor Costa de Brito

**Revisão:** Wanessa Dunga de Assis

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

Assis, Wanessa Dunga de

Otimização da alocação de água em situações de escassez hídrica através da utilização de algoritmo evolucionário multiobjectivo [livro eletrônico]: caso de estudo da bacia hidrográfica do rio Gramame, Paraíba, Brasil / Wanessa Dunga de Assis, Érica Cristine Medeiros Machado. - Campina Grande : Editora Ampla, 2020.

58 p.

Formato: PDF

ISBN: 978-65-88332-04-7

1. Recursos hídricos - Rio Gramame 2. Bacia hidrográfica - Gramame, Rio 3. Gestão de recursos hídricos 4. Planejamento de recursos hídricos I. Machado, Érica Cristine Medeiros  
II. Título

CDD-333.91

**Índice para catálogo sistemático:**

1. Recursos hídricos 333.91

## APRESENTAÇÃO

A disponibilidade hídrica mundial é amplamente discutida e o Brasil, que embora apresente uma posição privilegiada no que se refere à quantidade de água disponível, registra graves problemas de escassez hídrica, tendo em vista a má distribuição espaço-temporal deste recurso. Aliado a isso, a problemática da gestão dos recursos hídricos brasileiros, em alguns casos, ocasiona conflitos pelo uso da água entre os múltiplos usuários das bacias hidrográficas.

Este livro objetiva apresentar os resultados de otimização da alocação da água em situações de escassez hídrica através da utilização de um algoritmo evolucionário multiobjetivo e utiliza como estudo de caso a Bacia Hidrográfica do rio Gramame, no estado da Paraíba, nordeste brasileiro.

A metodologia adotada avaliou variações nas prioridades de uso adotadas para cada categoria de usuários da bacia do rio Gramame, e também no volume inicial do reservatório Gramame-Mamuaba no algoritmo Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2. Os resultados obtidos ratificaram a existência de conflitos pelo uso da água na bacia do rio Gramame, principalmente entre usuários de abastecimento e de lançamento de efluentes, além do mais, pode-se observar que em situações de escassez hídrica, a estrutura hídrica atual não é capaz de atender às demandas requeridas pelos usuários, sendo necessária a adoção de regimes de racionamento, principalmente nos pontos mais conflitantes.

Espero que você aprecie a leitura e possa ampliar seus conhecimentos sobre a temática aqui abordada.

Wanessa Dunga de Assis

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.1 CONFLITOS EM RECURSOS HÍDRICOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2 SITUAÇÕES DE ESCASSEZ DE ÁGUA .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 A OTIMIZAÇÃO COMO MODELO DE APOIO À DECISÃO NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO III - CASO DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 ESTIMATIVAS DE OFERTA E DEMANDA .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 SÉRIES HISTÓRICAS DE PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO MÉDIA MENSAL .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 O RESERVATÓRIO GRAMAME-MAMUABA.....</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO IV - METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>
<b>SOBRE AS AUTORAS .....</b>	<b>56</b>

A água é um recurso natural renovável e limitado, essencial para a sobrevivência e manutenção da vida no planeta terra, e fundamental para o desenvolvimento social, econômico e ambiental de uma região. É considerado o recurso natural mais importante, que participa e dinamiza com todos os ciclos ecológicos. Com o crescimento da população e o desenvolvimento econômico, a demanda por água cresce ainda mais, o que cria problemas na gestão desse recurso. Se não forem tomadas medidas adequadas para melhorar a eficiência do uso de água e conservar este recurso escasso, alcançar a segurança da água se tornará cada vez mais difícil (CAP-NET, 2008).

Os conflitos surgem entre usos e usuários da água, a qual passa a ser escassa e, então, precisa ser aferida como um bem econômico, devendo ser-lhe atribuído o justo valor (SETTI *et al.*, 2001). Para que as atividades humanas ocorram de forma harmoniosa, a disponibilidade dos recursos hídricos deve exceder significativamente as demandas, caso contrário, a probabilidade do surgimento de conflitos vai aumentando, bem como o surgimento de estresse ambiental vai se tornando mais acentuado (MIERZWA, 2002).

A principal fonte desses conflitos ocorre entre os usos da água para atendimento humano e a água necessária para manter uma vazão ecológica no próprio rio, que seja capaz de garantir o transporte de sedimentos, a sua morfologia e para satisfazer requerimentos ecológicos (CAP-NET, 2008). As retiradas permanentes de água para diversas finalidades têm diminuído consideravelmente a disponibilidade de água e produzido inúmeros problemas de escassez em muitas regiões, especialmente as semiáridas, onde há índices elevados de estresse hídrico (TUNDISI, 2011).

Nas últimas décadas tem-se constatado aumento de conflitos resultantes da disputa pelo uso da água, provocados principalmente pelo aumento progressivo da demanda por este recurso pela crescente poluição em um cenário de escassez cada vez mais evidente, bem como um esforço crescente dos órgãos gestores para promover o uso múltiplo da água ao mesmo tempo em que garantem a sustentabilidade ambiental e minimizam os conflitos (ASSIS *et al.*, 2013).

No Brasil, um exemplo de potencial fonte de conflitos em bacias hidrográficas, decorre dos critérios restritivos de determinação da vazão outorgável, que provoca descontentamentos entre os usuários. Majoritariamente, as vazões naturais nos rios ou as regularizadas pelos reservatórios são superiores às vazões de referência e, como o que é



outorgado corresponde a uma fração delas, o que ocorre, na prática, são vazões outorgadas bem maiores ao longo do ano (SILVA & MONTEIRO, 2004). Conflitos assim são mais intensos em anos de escassez hídrica ou de baixa precipitação, o que pode provocar a necessidade de situações de racionamento de água.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, os conflitos mais comuns estão relacionados com a água que é utilizada para o abastecimento público de cidades que estão além dos limites geográficos da bacia (principalmente, Bayeux, Cabedelo e região metropolitana de João Pessoa), de forma que os demais usuários (irrigantes, da indústria e da pesca), que buscam o direito de utilizar as águas para as suas atividades, estão em oposição ao Estado, através da Companhia de Águas e Esgoto da Paraíba - CAGEPA, que em situações de escassez hídrica proíbe esse uso, para evitar o racionamento dos sistemas de abastecimento público, quando a capacidade dos reservatórios está comprometida (CUNHA *et al.*, 2012).

Os conflitos ocorrem tanto a montante quanto a jusante do reservatório Gramame/Mamuaba. A montante, os usuários querem maiores quantidades de água para irrigação e a jusante é necessário compatibilizar a preservação dos ecossistemas com as descargas dos efluentes industriais provindos dos usuários de diluição de efluentes (SANTOS, 2009).

Batista & Gomes (2013) ressaltam que diante da importância dos recursos hídricos, há uma preocupação mundial com relação à sua proteção, e, para tal, tem-se como ferramenta indispensável, a gestão de recursos hídricos. A gestão integrada dos recursos hídricos considera os interesses sociais, econômicos e ambientais, tomando as decisões de alocação e levando em conta as restrições relevantes e os objetivos da sociedade (CAP-NET, 2008).

O planejamento do uso dos recursos hídricos, por sua vez, pode proporcionar um melhor aproveitamento, controle e conservação de suas águas, porém, o grande desafio deste planejamento está em ser capaz de atender as demandas de forma integrada e otimizada para todo o sistema. Tendo em vista que a sustentabilidade de um sistema hídrico depende de um planejamento integrado eficiente e racional da alocação das disponibilidades hídricas entre os seus múltiplos usos (SANTOS, 2007).

A água é um bem escasso e dotado de valor econômico. Esta conformidade deve estar presente em todas as etapas do planejamento, seja econômico, político ou social, uma vez que, os conflitos de interesse com relação ao uso da água evidenciam a



necessidade da articulação interinstitucional para a adoção de política da gestão integrada de recursos hídricos (SCHARDONG, 2011).

Aos poucos têm sido incorporados em vários países, inclusive no Brasil, processos mais democráticos de tomada de decisão e de gerenciamento dos recursos naturais às políticas públicas e ao planejamento, dentro de um processo mais amplo de descentralização e de abertura à participação da sociedade (RIBEIRO, 2008). A participação da sociedade no processo de gestão objetiva dentre outras ações a mediação dos conflitos pelo uso da água (OLIVEIRA & LUNA, 2013).

A crescente complexidade dos problemas enfrentados pela gestão dos recursos hídricos torna necessária a adoção de novas tecnologias, de forma que a maioria dos aspectos de uma bacia hidrográfica seja considerada e representada com o mínimo de simplificações. Atualmente, as ferramentas computacionais são de extrema importância para o planejamento estratégico do setor hídrico.

Dentro desse contexto, os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são essenciais, uma vez que possibilitam a integração de diversas ferramentas e técnicas em um único sistema, auxiliando na escolha da alternativa que melhor se adapte aos interesses dos usuários e da sociedade em geral (MAUAD & LIMA, 2003), possibilitando avanços significativos ao entendimento do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica e das alterações provocadas por fatores naturais e antrópicos, auxiliando também na solução de conflitos atuais ou potenciais (SILVA & MONTEIRO, 2004).

Porém, desenvolver um SSD para alocação da vazão em situações de escassez hídrica, considerando todas as variáveis envolvidas, não é tarefa fácil. Esta complexidade advém, dentre outros fatores, da necessidade de se prever a própria vazão a ser alocada, com antecedência, envolvendo os mínimos riscos possíveis, através da utilização de métodos de previsão da precipitação e de chuva-vazão.

Neste trabalho se propõe a utilização de um algoritmo evolucionário multiobjetivo para otimização da alocação da vazão superficial de bacias hidrográficas em situações de escassez hídrica, no qual são inseridos adaptações e operadores de reprodução específicos para incorporar as restrições do problema e contornar os obstáculos apresentados. A Bacia Hidrográfica do rio Gramame, no estado da Paraíba, foi selecionada como caso de estudo.

Esse trabalho se justifica pela necessidade de se otimizar a alocação de águas na bacia, em situações de escassez hídrica, tendo em vista que o Plano Diretor da Bacia

Hidrográfica do rio Gramame (SEMARH, 2000) já apontava a ocorrência de conflitos pelo uso da água na região, caracterizados entre a demanda requisitada para irrigação e a exportação de água para abastecimento de cidades localizadas além dos limites geográficos da bacia, especificamente as cidades de Bayeux, Cabedelo e parte de João Pessoa, e que persistem até os dias atuais.

Felinto (2013) também identificou a ocorrência desses conflitos através da análise da oferta e demanda de água da bacia do rio Gramame, ratificando que o órgão gestor não adota critérios restritivos na emissão de outorgas, visto que os atuais valores outorgados já estão superiores aos outorgáveis.

Estima-se que o volume total de água no planeta seja de aproximadamente 1,39 bilhão de  $\text{km}^3$ , dos quais 97% se encontram contidas nos oceanos, correspondendo às águas salgadas. Desse restante, apenas 3% corresponde a água doce. Entretanto, aproximadamente 75% dessa água doce estão sob a forma de gelo e neve permanente na Antártica, no Ártico, e nas regiões montanhosas, e cerca de 22% correspondem às águas subterrâneas. Em números aproximados, apenas 3% do total de água doce está concentrada em locais de fácil acesso, nos lagos, rios e outros reservatórios (NUNES *et al*, 2009). Somente 15% dos 3% de água doce estão disponíveis para uso direto, e o suprimento global de água tem-se reduzido com o aumento da população e dos usos múltiplos, e com a perda dos mecanismos de retenção de água, ou seja, a remoção de áreas alagadas, desmatamento, perda de volume por sedimentação de lagos e represas (TUNDISI, 2011).

O Brasil tem posição privilegiada no mundo, em relação à disponibilidade de água doce, tanto superficial quanto subterrânea. A vazão média anual dos rios em território brasileiro é de cerca de 180 mil metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), o que corresponde a aproximadamente 12% da disponibilidade mundial de recursos hídricos. Se forem levadas em conta as vazões oriundas de território estrangeiro e que ingressam no país (Amazônica, 86.321 mil  $\text{m}^3/\text{s}$ ; Uruguai, 878  $\text{m}^3/\text{s}$  e Paraguai, 595  $\text{m}^3/\text{s}$ ), a vazão média total atinge valores da ordem de 267 mil  $\text{m}^3/\text{s}$  (ou seja, cerca de 18% da disponibilidade mundial) (PNUMA, 2007). Em contraposto, cerca de 70% deste volume está localizado na região amazônica, que abriga apenas 7% da população brasileira, a região Nordeste e os grandes centros urbanos registram escassez de água, absoluta e relativa, agravados também pela ausência ou ineficiência de políticas públicas que permitam a adoção de um sistema de coleta, tratamento e distribuição de água (MACHADO & TORRES, 2012).

Dados atuais estimam que pelo menos 11% da população mundial, ou seja, 783 milhões de pessoas não tem acesso a um suprimento de água potável adequado e mais de 2,5 bilhões continuam sem ter acesso a serviços sanitários adequados (UNICEF, 2013). Estima-se ainda que, até 2020 o uso da água aumentará em 40% e que será necessário um adicional de 17% de água para a produção de alimentos, a fim de satisfazer as necessidades da população em crescimento. Previsões indicam que até esse período, dois

terços da população global estarão vivendo em países com estresse hídrico (PNUMA, 2004).

Embora dependam da água para a sobrevivência e para o desenvolvimento econômico, as sociedades humanas, através da complexidade dos usos múltiplos da água, poluem e degradam esse recurso, tanto as águas superficiais quanto as subterrâneas (TUNDISI, 2011). Essa diversificação dos usos múltiplos dos recursos hídricos depende do grau de concentração da população humana, do estágio de desenvolvimento econômico e da intensidade das atividades nas bacias hidrográficas. No Brasil, aproximadamente, 90% dos recursos hídricos são utilizados para produção agrícola, produção industrial e consumo humano (TUCCI, 2000).

## 2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), constituindo assim um marco regulatório no planejamento e gestão dos recursos hídricos no Brasil, ao estabelecer em seu Capítulo I, Art. 1º, incisos I, V e VI, que a água é um bem de domínio público, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do SINGREH e que a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

A promulgação desta lei trouxe para o cenário da gestão das águas brasileiras as perspectivas do paradigma da sustentabilidade, que influencia a difusão de uma visão menos utilitarista dos recursos hídricos, fruto das discussões iniciadas na escala internacional. Este novo paradigma fortalece a aceitação da água como um bem que apesar de renovável deve ser gerido no interesse dos diferentes usos e usuários, presentes e futuros (SANTOS & GUSMÃO, 2013).

Ao se adotar a bacia hidrográfica como unidade regional de planejamento e gerenciamento das águas, promove-se a delimitação de Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos, cujos órgãos consultivos e deliberativos de gerenciamento são denominados Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs). O sistema desses comitês está baseado na descentralização, participação e integração, com ênfase nos aspectos de qualidade e de quantidade das águas através de ações que promovam os usos múltiplos dos recursos hídricos e definam uma política participativa e um processo decisório aberto

a todos os envolvidos, nos quais se reveem as atribuições do Estado, o papel dos usuários e o próprio uso da água (JACOBI & BARBI, 2007).

O sistema de gestão das águas objetiva coordenar a gestão integrada das águas, arbitrar, no âmbito administrativo, os conflitos relacionados com os recursos hídricos, e planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos. Esse sistema engloba organismos, agências e instituições governamentais, como o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Agência Nacional das Águas (ANA), os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal, os Comitês de Bacia Hidrográfica, os órgãos dos poderes públicos federal, estadual, do Distrito Federal e municipal cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos e as agências de águas (CAROLO, 2007).

Os comitês de bacia devem gerenciar as bacias hidrográficas adequadamente e utilizar um modelo de gestão descentralizada, com ênfase ao desenvolvimento sustentável, disseminando um consumo consciente, de modo a garantir a qualidade e quantidade adequadas de água, na tentativa de reduzir situações propensas a conflitos pelo uso da água (LUNARDI, 2005). Porém, para a eficiência institucional destes comitês, e, por conseguinte, da gestão dos recursos hídricos em uma bacia, é necessário o estabelecimento de mecanismos que garantam a efetiva participação e representatividade (da sociedade civil e dos usuários) visando à tomada de decisão e ao debate das questões relacionadas aos conflitos existentes na bacia (MACHADO, 2011).

Rufino *et al.* (2006) ressaltam que a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas se reveste de complexidade, na medida em que, além das questões peculiares à gestão hídrica, devem ser consideradas as divergências de interesses entre as unidades políticas usuárias desses recursos. Enquanto o processo de negociação surge como uma das melhores formas de evitar ou minimizar potenciais conflitos interestaduais, necessária se faz a utilização de ferramentas de resolução de conflitos, que possam apoiar a tomada de decisão.

Tucci (2000) relaciona essa complexidade com a diminuição da disponibilidade de água pela deterioração da sua qualidade, o que acaba refletindo uma maior dificuldade no gerenciamento desses recursos, e tende a proporcionar situações propensas a conflitos. Esses conflitos não devem ser tratados de forma isolada e dissociadas das questões globais do meio ambiente e as políticas de gestão da água devem ser articuladas e

integradas com as políticas ambientais que tratam dos demais recursos ambientais (PEIXINHO, 2010).

A Gestão das Águas é uma atividade analítica e criativa voltada à formulação de princípios e diretrizes, ao preparo de documentos orientadores e normativos, à estruturação de sistemas gerenciais e à tomada de decisões que têm por objetivo final promover o inventário, uso, controle e proteção dos recursos hídricos (LANNA, 2000), seguindo alguns requisitos que são necessários para a construção de um modelo de gestão eficiente, tais como: consistência com a realidade local, política e financeira; harmonia com as demais funções desempenhadas em outros segmentos da Administração Pública; e a inserção no modelo nacional (CAMPOS, 2001).

No Brasil, os vários instrumentos legais que detalham e disciplinam as atividades da gestão de recursos hídricos, são provenientes de um modelo de gerenciamento das águas orientados por tipos de uso, o que estabelece frequentemente conflitos, superposições e a desarticulação da legislação, exigindo, portanto, aperfeiçoamentos (SETTI *et al.*, 2001).

A preservação dos usos múltiplos das águas, um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, norteia a implementação da outorga e o seu objetivo é inserir, na medida do possível, o conceito de isonomia no contexto da gestão dos recursos hídricos, assegurando a todos os usuários de recursos hídricos condições de acesso ao bem. No entanto, quando se instala um cenário de conflitos pelo uso da água ou de sua escassez, verificamos a impossibilidade de permitir acesso em condições igualitárias a todos os usuários (CAROLO, 2007), tendo em vista que a gestão de recursos hídricos faz-se em um ambiente de múltiplos usuários e de conflitos de uso, requerendo complexos sistemas tecnológicos e gerenciais de regulação e uma base legal adequada a lhe dar suporte (NASCIMENTO & HELLER, 2004).

Segundo Nascimento & Heller (2004) as ações de gestão dos recursos hídricos devem assegurar a adequada alocação de água segundo critérios econômicos, de igualdade entre usuários, e de proteção das águas e do meio ambiente como um todo. Bem como, promover a redução de riscos decorrentes da aleatoriedade dos processos naturais (riscos de inundação, de escassez prolongada de água, de poluição e dos riscos à saúde), frequentemente agravados por impactos de atividades antrópicas ou de falhas em sistemas de uso e controle de recursos hídricos. Para Silva & Monteiro (2004) em um cenário político-legal-institucional da gestão hídrica, é necessário associar a outorga de

direito de uso da água como um instrumento de alocação de água entre os diversos usos da bacia hidrográfica, a qual deve buscar uma distribuição da água de modo a atender as necessidades ambientais, econômicas e sociais, reduzir ou eliminar os conflitos entre usuários e possibilitar o atendimento das demandas futuras.

### **2.1.1 CONFLITOS EM RECURSOS HÍDRICOS**

Os conflitos de maneira geral podem ser conceituados como qualquer desencontro de vontades, divergência de opiniões ou objetivos (ALEMAR, 2006). Os conflitos em recursos hídricos podem ser definidos como situações nas quais as demandas da sociedade, essenciais ao aproveitamento e/ou controle dos recursos hídricos não são atendidos (SUDENE, 1980) e estão diretamente ligados a não disponibilidade de água para todos os propósitos requeridos, seja essa escassez provocada pela distribuição espacial e temporal homogênea (climas áridos e semiáridos, secas periódicas) da água, ou pelas atividades humanas em geral (demandas crescentes, padrões inadequados de uso, poluição) que impactam os recursos hídricos (VIEIRA, 2008). Porém, Bouguerra (2004, p. 24) afirma que *“é difícil provar que a água é a causa de um conflito, pois, muitas vezes, as causas são múltiplas”*.

Geralmente, os conflitos em recursos hídricos, ocorrem quando a demanda é maior que a oferta da água, resultado da intensificação do desenvolvimento econômico, do aumento populacional, da elevação das taxas de consumo e do crescimento desordenado de grandes centros urbanos (CAROLO, 2007). Ohlsson (2000) considera que a escassez de água pode ser considerada como a fonte de conflitos em recursos hídricos, seja essa escassez de primeira ordem, que resulta de condições hidrológicas e/ou do crescimento da demanda de uso da água, ou de segunda ordem, que resulta da escassez de recursos sociais, ou seja, da incapacidade da sociedade em encontrar ferramentas sociais adequadas para lidar com as consequências sociais da escassez de primeira ordem.

De acordo com Cordeiro Neto (2005) os conflitos pelo uso dos recursos hídricos podem ocorrer, dentre outros, entre usuários de mesma categoria, entre usos distintos, entre uso produtivo e gestão ambiental ou entre unidades diferentes. Os conflitos gerados devido à escassez da água, denominados conflitos de primeira ordem, são os mais comuns. Mas, existem ainda os conflitos resultantes de medidas e ações da gestão hídrica quando não bem planejadas ou executadas, denominados conflitos de segunda ordem. Isso ocorre porque o processo de gestão hídrica é muito complexo, exigindo uma abordagem



interdisciplinar e o envolvimento de diversos atores para o atendimento de múltiplos objetivos, entre eles, a minimização dos conflitos e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Tal distinção conceitual enfatiza que, mesmo com um nível relativamente alto de disponibilidade de água, pode-se ter uma escassez de segunda ordem (por exemplo, induzida pela falta de capacidade institucional para fazer com que a água disponível, através da construção de barragens e da estrutura hidráulica relacionada, seja armazenada e distribuída para o consumidor final), potencializando desta forma a ocorrência de conflitos (VIEIRA, 2008).

Em síntese, um provável conflito pelo uso da água pode ocorrer por diferentes motivos: regime de domínio, aproveitamento e nível de contaminação hídricos, escassez abaixo dos níveis suportáveis pelo ser humano, pela fauna e pela flora, carência de instituições jurídicas e políticas (ALEMAR, 2006), ou seja, destinação de uso, disponibilidade quantitativa e qualitativa (CAROLO, 2007).

A destinação dos usos é determinada pelos planos de bacias, quando dispõem sobre as prioridades de uso para a outorga e pela análise do pedido de outorga pelo Poder Público que insere neste contexto o princípio do uso múltiplo. A disponibilidade quantitativa, por sua vez, é inversamente proporcional à demanda pelo uso da água, ou seja, quanto maior a demanda pelo consumo, menor sua disponibilidade de oferta. Já a disponibilidade qualitativa está diretamente associada aos lançamentos excessivos de efluentes, que comprometem a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos, assim como intensificam os processos erosivos e transporte de sedimentos (CAROLO, 2007).

Diante desses motivos, Setti *et al.* (2001) classificam os conflitos de uso da água em: conflitos de destinação de uso, que ocorrem quando a água é desviada da destinação pré-estabelecida nos planos de bacias para outras destinações; conflitos de disponibilidade quantitativa, que decorrem da utilização intensiva dos recursos hídricos, diminuindo a disponibilidade de oferta; e, conflitos de disponibilidade qualitativa, que decorrem do uso de água em fontes poluídas, onde o consumo excessivo dessa água reduz a vazão de estiagem, deteriorando a qualidade desta que já estão comprometidas pelo lançamento de poluentes, tornando a água ainda mais inadequada para utilização e reduzindo a disponibilidade hídrica.

Um exemplo desses conflitos está demonstrado no trabalho de Pereira (2012), onde foi realizada a análise de conflitos pelo uso da água relacionados à oferta e demanda

na bacia do rio Piracicaba – MG, verificando que quando utilizado o critério atual para a concessão de outorgas de 30% da  $Q_{7,10}$  (vazão com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos) anual, parte dos trechos da hidrografia com outorgas a montante apresentam o somatório das vazões demandadas maior que a vazão outorgável. Desta forma, o autor recomendou o uso do critério de outorga de 70% da  $Q_{95}$  (vazão associada à permanência de 95%), seguidos pelos critérios 50% da  $Q_{7,10}$  e 30% da  $Q_{7,10}$ , para proporcionar um menor número de trechos em conflito.

Também é possível identificar os conflitos originados em reflexos das mudanças ambientais encaixando esses conceitos em conflitos de recursos hídricos, classificando-os em: conflito de escassez simples, que se originam diretamente da competição por um recurso natural escasso, em função de dois fatores: se o recurso que se encontra escasso é essencial à sobrevivência, e se este recurso pode ser fisicamente tomado ou controlado; conflito de identidade, que aparecem quando vários grupos com características distintas estão sob condições de escassez e estresse de um recurso que seja essencial à sua sobrevivência, procuram assim ressaltar a sua própria identidade como uma forma de adicionar ao grupo, hostilizando os demais grupos; e, conflitos de privação relativa, que aparece quando a população encontra-se insatisfeita com relação ao nível econômico em que vive, levando em consideração a existência de um melhor padrão de vida e que são desfavorecidas na injusta distribuição de recursos (HOMER-DIXON, 1991 *apud* VIEIRA, 2008).

Ao se reconciliar os indivíduos ou grupos com objetivos e interesses conflitantes em relação à gestão hídrica, se obtém uma solução politicamente aceita, através do consenso dos participantes, para a resolução de conflitos relacionados a recursos hídricos (LUND, 2001 *apud*, VIEIRA & RIBEIRO, 2005). Vale salientar, que a imprevisibilidade hidrológica, sempre presente nos conflitos em usos de água, pode tornar necessária à renegociação do acordo. Quando instalada uma situação de escassez hídrica, os acordos realizados deverão ser renegociados em virtude dessa nova situação, para que assim, os conflitos não voltem a ser intensificados (CAMPOS & STUART, 2003).

A importância da negociação na fase de planejamento decorre do fato de que o uso e a proteção das águas são promovidos por muitas entidades, públicas e privadas, com distintos graus de poder. Quando a apropriação da água atinge nível próximo do esgotamento de sua disponibilidade qualitativa ou quantitativa, surgem os conflitos. A situação mais comum é que não haja condição de se adotar a solução mais adequada,

permanecendo os conflitos como se o tempo pudesse solucioná-los sozinho. Diante disso se faz necessária à criação de comitês de bacia que promovam uma permanente negociação para os interessados, além de exigir a participação efetiva do poder público, para que assuma a propriedade das águas e estabeleça o controle sobre seu uso, como determina a Constituição Federal, porém a gestão de recursos hídricos, pela sua complexidade, deve ser descentralizada para permitir a interveniência dos diversos interessados (BORSOI & TORRES, 1997).

Tal descentralização dá espaço para que os usuários da água se organizem e participam ativamente dos comitês, defendendo seus interesses quanto aos preços a serem cobrados pelo uso, assim como sobre a aplicação dos recursos arrecadados e sobre a concessão justa das outorgas dos direitos de uso (JACOBI & BARBI, 2007). Entretanto, para o processo de otimização ser efetivo e as perdas dos usuários serem minimizadas, é preciso o conhecimento do impacto causado pelas diversas alternativas e os benefícios associados às mesmas (LANNA *et al.*, 1997).

Do ponto de vista institucional e de gerenciamento, é necessário o desenvolvimento de procedimentos, métodos e indicadores que deem suporte à decisão sobre os usos de recursos hídricos e de outros recursos naturais, que promovam a cooperação, a solução de conflitos e facilitem a harmonização de políticas a serem desenvolvidas em diferentes escalas territoriais e dependentes da ação de diferentes atores, com interesses diversos (NASCIMENTO & HELLER, 2004).

### **2.1.2 SITUAÇÕES DE ESCASSEZ DE ÁGUA**

A Lei nº 9.433/1997 também já estabelecia medidas a serem tomadas quando instaladas situações de escassez hídrica em seu Capítulo I, Art. 1º, inciso III que “*em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais*”. O problema de escassez é um dos graves problemas hídricos atuais enfrentados pelo Brasil, especialmente pelo Nordeste brasileiro.

Se tratando de disponibilidade hídrica podem ser consideradas quatro situações distintas: **situação normal**, onde a vazão que flui no corpo d’água está acima de um valor considerado normal para a seção, identificada como vazão mínima média; **situação de atenção**, quando a vazão, supondo-se decrescente, ultrapassa a vazão mínima média, e atinge uma situação de atenção, de forma que, embora todos os usos outorgados possam ainda ser atendidos, os valores de vazão estão abaixo do esperado; **situação restritiva**,

onde, se apesar dos esforços, as vazões continuam decrescendo, identificada como aquela em que as disponibilidades hídricas não são suficientes para atender a todos os usos outorgados. Nesta situação pode ser adotado um regime de racionamento, mas o corpo hídrico ainda possui vazão suficiente para atender aos usos prioritários; e, **situação crítica**, onde o racionamento é indispensável para garantir o atendimento dos usos prioritários (SUDERHSA, 2006).

Uma das diretrizes apontadas no relatório do PNUMA (2007) para a problemática da escassez de recursos hídricos é “*flexibilizar a outorga para a curta duração e sujeitá-la a regimes de racionamento*” para que dessa forma haja a adequação desse instrumento de gestão às peculiaridades da região afetada, realocando a água da bacia, seguindo-se os critérios da escassez hídrica.

Ao se estabelecer uma situação de escassez hídrica, o critério de outorga deve ser deixado de lado, partindo-se então para a utilização de critérios de natureza social, ambiental e econômica de forma a racionar a água restante do manancial (SILVA & MONTEIRO, 2004). A alocação de água entre os demais usos deverá ser definida por critérios elaborados pelo Comitê de Bacia ou pelo poder outorgante, no caso de ausência do primeiro (THOMAZ, 2002).

Uma situação similar ocorreu na bacia hidrográfica do rio Gramame, entre nos anos de 1998 e 1999, devido aos problemas de escassez hídrica da época, quando o Açude Gramame/Mamuaba esteve sobe júdice, proibindo o uso da água por parte dos demais usuários, só podendo ser utilizado para abastecimento público humano, deixando-se de lado os critérios de outorgas (CUNHA *et al.*, 2012).

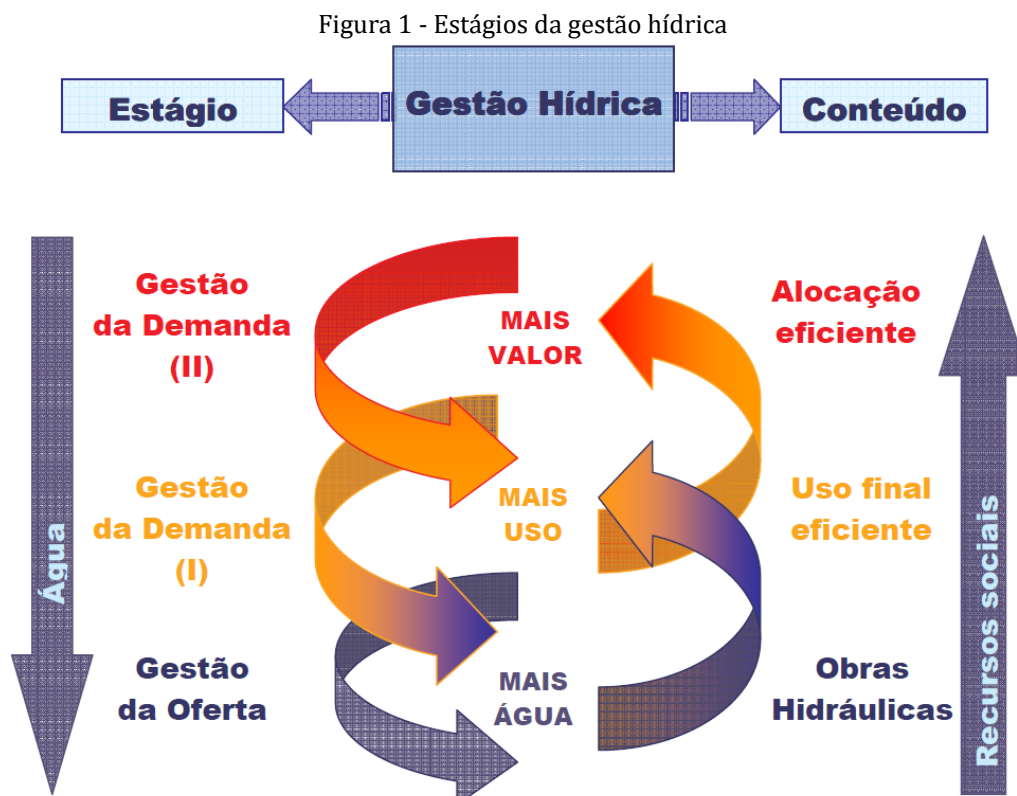
Em situações de escassez hídrica, o poder concedente tem que reduzir o volume de outorga no percentual adequado à magnitude do racionamento. Uma redução uniforme entre usuários resultaria numa alocação subótima da água da bacia, dado que o racionamento não privilegiaria os usuários de maior produtividade ou utilidade marginal da água (MOTTA, 1998).

No processo de partilha da água, quando existem usos conflitantes resultantes da escassez hídrica, uma metodologia que pode ser empregada é a alocação negociada de água. Esta metodologia tem como pressuposto a discussão do processo de divisão do recurso e sua negociação, onde as partes têm o poder de decidir sobre a vazão a ser liberada e outras questões, apoiada por um suporte técnico que embasa as possíveis

decisões a serem tomadas e por uma terceira parte que contribui na construção da solução de compromisso (OLIVEIRA & LUNA, 2013).

No caso brasileiro, a titularidade da água é pública, ou seja, o poder público outorga direitos de uso da água aos usuários. Os critérios de utilização para essa alocação são claros no sentido de privilegiar o uso humano (MOTTA, 1998). Em situações de escassez hídrica, os conflitos pelo uso da água já existentes na região são agravados, devido ao estabelecimento desses usos prioritários, tendo em vista que a água disponível após o atendimento dos usos prioritários e da manutenção do manancial não atende todos os valores outorgados nem todos os usuários com outorga.

Ohlsson (2000) *apud* Vieira (2008) apresenta três estágios de gestão hídrica, em situações de escassez hídrica, como pode ser demonstrada na Figura 1.



Fonte: Vieira (2008) baseado em Ohlsson (2000).

O primeiro estágio (gestão da oferta) envolve uma missão hidráulica voltada para a criação de uma infraestrutura hidráulica de larga escala com o objetivo de se obter mais água; depois, quando os déficits hídricos crescem e o aumento da oferta se torna (física e/ou financeiramente) inviável, inicia-se o segundo estágio (gestão da demanda, primeira fase), onde o objetivo é a eficiência no uso da água, propiciando uso mais eficiente para a água disponível; no terceiro estágio (gestão da demanda, segunda fase), ocorre quando as

medidas do segundo estágio se tornam insuficientes, onde é buscada a alocação eficiente dos recursos hídricos entre os usuários, permitindo que se atribua mais valor à água disponível (VIEIRA, 2008)..

A alocação de água geralmente está associada a um cenário de escassez relativa dos recursos hídricos, quando a oferta é insuficiente para atender toda a demanda requerida. O mecanismo mais simples de alocação de água em situações de escassez hídrica é o regime de livre acesso entre os usuários, o que leva a geração de conflitos. Porém, deve haver a intervenção do Estado, através da regulação e fiscalização do valor que pode ser alocado por cada agente e das condições ambientais que devem ser atendidas para a manutenção do corpo hídrico. No entanto, essa regulação do Estado também pode ser tratada de forma indireta, através dos instrumentos de gestão, que induzem a um consumo mais racional dos recursos hídricos (MACHADO, 2011).

Neste trabalho, objetiva-se desenvolver uma metodologia para a gestão da demanda, na segunda fase, através da alocação eficiente da água superficial da bacia hidrográfica. E, com isso, reduzir a incidência de conflitos pelo uso da água na bacia em estudo.

Oliveira & Luna (2013) analisaram os conflitos pelo uso da água do Açude Santo Antônio de Aracatiaçu na Bacia do Litoral – CE, resultantes de situações de escassez hídrica, avaliando o processo de Alocação Negociada de água como estratégia de mediação na resolução de conflitos traçando um paralelo com os procedimentos da Mediação de Conflitos.

Os resultados obtidos mostraram que no caso do conflito resultante de escassez hídrica, o processo de Alocação Negociada de água utilizado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH, mantém o conflito sobre controle por determinados períodos, ao estabelecer regras claras para o uso da água, definidas com forte participação dos interessados, e ao diagnosticar preliminarmente o conflito. Com a identificação dos interesses e posições dos atores envolvidos e com esclarecimento do papel de mediador no processo como facilitador de alternativas de solução do conflito, se obtém um certo grau de confiança e segurança para todas as partes e para as outras etapas utilizadas na mediação de conflitos. Assim, o risco de escassez é reduzido – e também a possibilidade de conflitos, com o atendimento mínimo a todos os usuários e a abertura de canais de negociação entre eles.

## 2.2 A OTIMIZAÇÃO COMO MODELO DE APOIO À DECISÃO NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A implementação de um processo de gestão integrada, preditiva e no âmbito de bacia hidrográfica pressupõe que, além de uma organização legal e institucional adequada, seja necessário um suporte tecnológico para promover avanços consolidados, uma vez que, para que essa gestão seja mais eficiente e otimize os usos múltiplos da água e sua conservação é fundamental uma integração entre o conhecimento científico e o gerenciamento (TUNDISI, 2006).

A tomada de decisões em relação aos sistemas hídricos envolve diversos fatores e atualmente deve ser realizada com a participação de vários setores da sociedade, tornando-se tarefa cada vez mais complexa. Para auxiliar no processo decisório são necessários planejamentos estratégicos que identifiquem as melhores alternativas de desenvolvimento dos recursos hídricos, considerando a distribuição equitativa, o uso racional, a maximização do desenvolvimento econômico e social, a minimização dos impactos ambientais, entre outros. Em razão de aspectos como complexidade dos sistemas hídricos, as incertezas futuras, a existência de conflitos e a necessidade de investimentos de grande porte, as decisões devem ser estudadas e suas consequências devem ser simuladas, a fim de que o melhor plano de ação seja escolhido (MAUAD & LIMA, 2003).

O planejamento estratégico tem por principal objetivo orientar as decisões futuras. Essa técnica envolve a definição de objetivos e prioridades e o estudo das diversas consequências de determinado plano de ação, enfatizando a importância de antecipar possíveis acontecimentos por meio de técnicas de análise e formulação de cenários (MAUAD & LIMA, 2003). Embora existam muitas variações, Webster & Le-Huu (2003) caracterizam o planejamento estratégico seguindo os princípios de que: os recursos são direcionados a atingir uma meta específica, frequentemente dentro de cenários bem definidos e realísticos, de forma que objetivos fora da realidade sejam descartados; a meta é baseada em problemas identificados em conjunto pelos principais responsáveis; e, a ação é enfatizada e centralizada nos pontos do sistema onde pode ser alcançada máxima vantagem em relação aos recursos empregados.

Os sistemas de suporte à decisão se mostram como ferramentas computacionais de extrema importância para o planejamento estratégico do setor hídrico. Consistem em um sistema computacional interativo que ajuda os tomadores de decisão a utilizar



informações e modelos para resolver problemas complexos ainda não estruturados, integrando os seguintes subsistemas: base de modelos; banco de dados; e, módulo de diálogo para comunicação entre usuário e sistema (SPRAGUE & CARLSON, 1982 *apud*, MAUAD & LIMA, 2003). Uma de suas principais características é a capacidade de integrar diversas ferramentas e técnicas. Na área de recursos hídricos, a análise multiobjetivo possui um grande potencial para solução de conflitos entre setores usuários de água, visando encontrar soluções que atendam aos interesses de todos os setores envolvidos no conflito (MAUAD & LIMA, 2003).

O processo de otimização se baseia na procura pela melhor solução possível de um problema, respeitando um conjunto de limitações ou restrições (MACHADO, 2011). Nas técnicas de otimização para análise de problemas com objetivo único, os algoritmos de solução buscam um valor ótimo global único dentro do espaço de busca definido pelas restrições dos problemas. Já as técnicas de análise multiobjetivo geram um conjunto de soluções, e por este motivo o conceito de ótimo global não faz mais sentido. Em geral este conjunto de soluções é conhecido como conjunto de soluções não nominadas. Uma solução é dita dominada quando não pode ser melhorada em detrimento de outra solução do conjunto tido como ótimo (SCHARDONG, 2011).

Em um problema de otimização multiobjetivo, duas metas devem ser atingidas para que o conjunto de solução não-dominadas encontrado seja considerado satisfatório: que sua solução esteja tão próxima quanto possível da fronteira de Pareto e que suas soluções sejam tão diversificadas o possível (MACHADO, 2011). Técnicas tradicionais de análise multiobjetivo utilizam programação matemática para gerar o conjunto de soluções não dominadas. Para isso, existem vários métodos onde o problema multiobjetivo é transformado em um problema de objetivo único e resolvido sucessivamente até que o conjunto de soluções não dominadas seja determinado, dentre essas técnicas se destaca o Algoritmo Evolucionário (SCHARDONG, 2011).

O algoritmo evolucionário consiste em uma técnica de busca extremamente eficiente no seu objetivo de varrer o espaço de soluções e encontrar soluções próximas da solução ótima, quase sem necessitar de interferência humana, eles utilizam modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas (LINDEN, 2006) e se destacam na análise multiobjetivo porque trabalham com famílias de soluções, também denominadas populações, e por este motivo são capazes de gerar várias soluções não dominadas em uma única geração, sendo extremamente

flexíveis quanto à formulação do problema, no que diz respeito às funções objetivo e restrições (SCHARDONG, 2011).

Os algoritmos evolucionários codificam cada possível solução de um problema em uma estrutura (*cromossomo*), que é composta por uma cadeia de bits ou símbolos. Estes *cromossomos* representam *indivíduos*, que são evoluídos ao longo de várias gerações, de forma similar aos seres vivos, de acordo com os princípios de seleção natural e sobrevivência dos mais aptos descrito por Charles Darwin (GUIMARÃES, 2005).

Os indivíduos são submetidos a um processo evolucionário que envolve as etapas de avaliação, seleção, recombinação (*crossover*) e mutação. Nesse ciclo são geradas aleatoriamente um conjunto de soluções (*população*) candidatas, aplicando-se então uma função para se medir o valor de aptidão (*fitness*), atribuído a cada *indivíduo*, indicando assim quanto a solução representada por este *indivíduo* é boa em relação às outras soluções da *população*. O valor de *fitness* serve de base para se escolher as melhores soluções (*pais*) para se originar uma nova *população*, onde os operadores de recombinação e/ou mutação são aplicados, avaliando as novas soluções (*filhos*) com base no valor de *fitness*, competindo com as soluções da geração anterior, gerando a nova *população*. Aos *indivíduos* mais adaptados é dada uma probabilidade maior de se reproduzirem mediante cruzamentos com outros *indivíduos* da *população*, produzindo descendentes com características de ambas as partes (GUIMARÃES, 2005; EIBEN & SMITH, 2003).

Um grande número de algoritmos está sendo proposto, dentre os mais citados estão *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 - SPEA2* (ZITZLER *et al.*, 2001), onde uma *população* inicial é gerada, um arquivo externo vazio é criado e o valor do *fitness* da *população* é calculado (MILOCA *et al.*, 2012). Os arquivos externos contem soluções não-dominadas, de forma que a cada geração, as soluções não-dominadas previamente encontradas são armazenadas nesse arquivo, substituindo as antigas. Para cada *indivíduo* nesse arquivo, um valor de *strength* é calculado, esse valor corresponde à quantidade de *indivíduos*  $j$  pertencentes ao arquivo e à população  $i$ , é proporcional ao número de soluções que um determinado *indivíduo* domina e é utilizado durante o processo de seleção. O *fitness* de uma solução é a soma desses valores de *strength* de todas as soluções dominadas por  $i$ , tanto do arquivo externo como da *população* regular (ASSUNÇÃO *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2009).

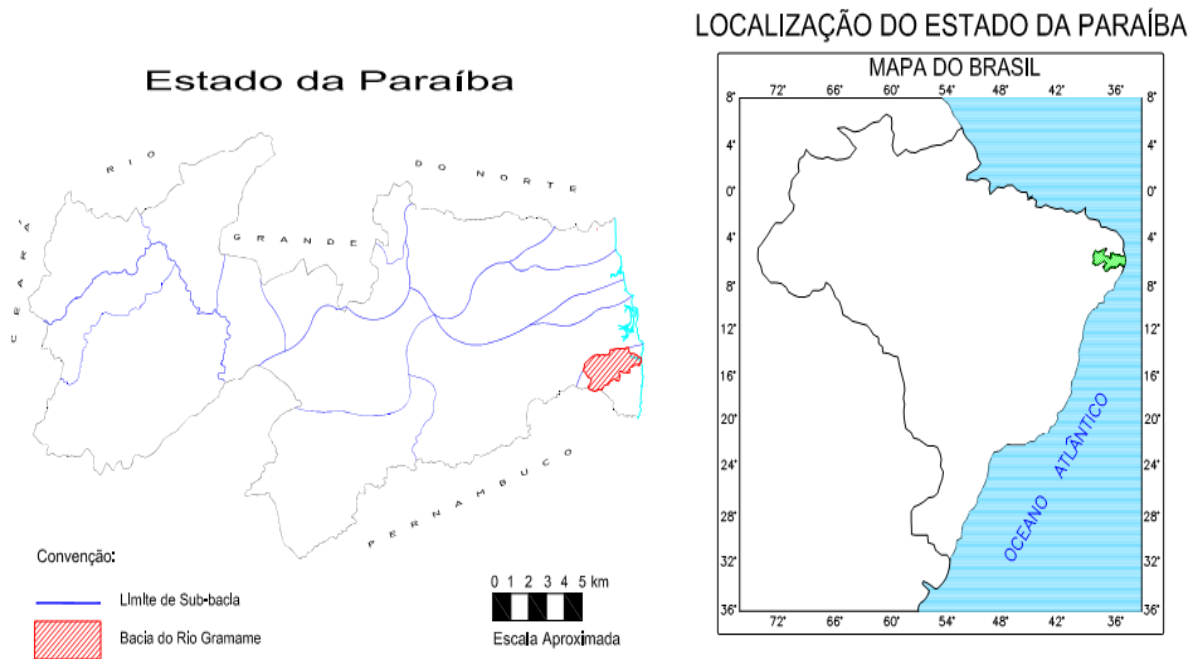
Machado (2011) utilizou, na bacia do rio Gramame, um algoritmo evolucionário multiobjetivo para otimizar a alocação interanual da vazão excedente, analisando também a aplicabilidade do modelo em situações de racionamento da vazão outorgada. Os resultados apresentados indicaram boas perspectivas na utilização do algoritmo desenvolvido, no entanto, a autora recomendou como estudos futuros, entre outros: a utilização de outros modelos associados ao algoritmo evolucionário, com o intuito de melhorar a representação dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica.

De forma similar, Schardong (2011) estudou a aplicação de algoritmos evolucionários na análise multiobjetivo para a gestão integrada de recursos hídricos, bem como a sua integração aos sistemas de suporte a decisão. A análise foi realizada comparando duas funções objetivo envolvendo custos de energia elétrica, uma minimizando o déficit no atendimento às demandas e outra minimizando o desvio da qualidade da água em relação à classe de enquadramento dos corpos d'água estudados. Os resultados apontaram que os algoritmos evolucionários multiobjetivos são aptos para aplicação na análise integrada de sistemas de recursos hídricos e representam uma boa alternativa pelas suas características peculiares.

## CASO DE ESTUDO: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME

A Bacia Hidrográfica do rio Gramame pertence à Sub-Bacia 39 da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, e se situa na região litorânea sul do Estado da Paraíba, próxima à capital João Pessoa, entre as latitudes  $7^{\circ}11'$  e  $7^{\circ}23'$ , Sul e as longitudes  $34^{\circ}48'$  e  $35^{\circ}10'$ , Oeste (SEMARH, 2000). Sua localização pode ser observada na Figura 2.

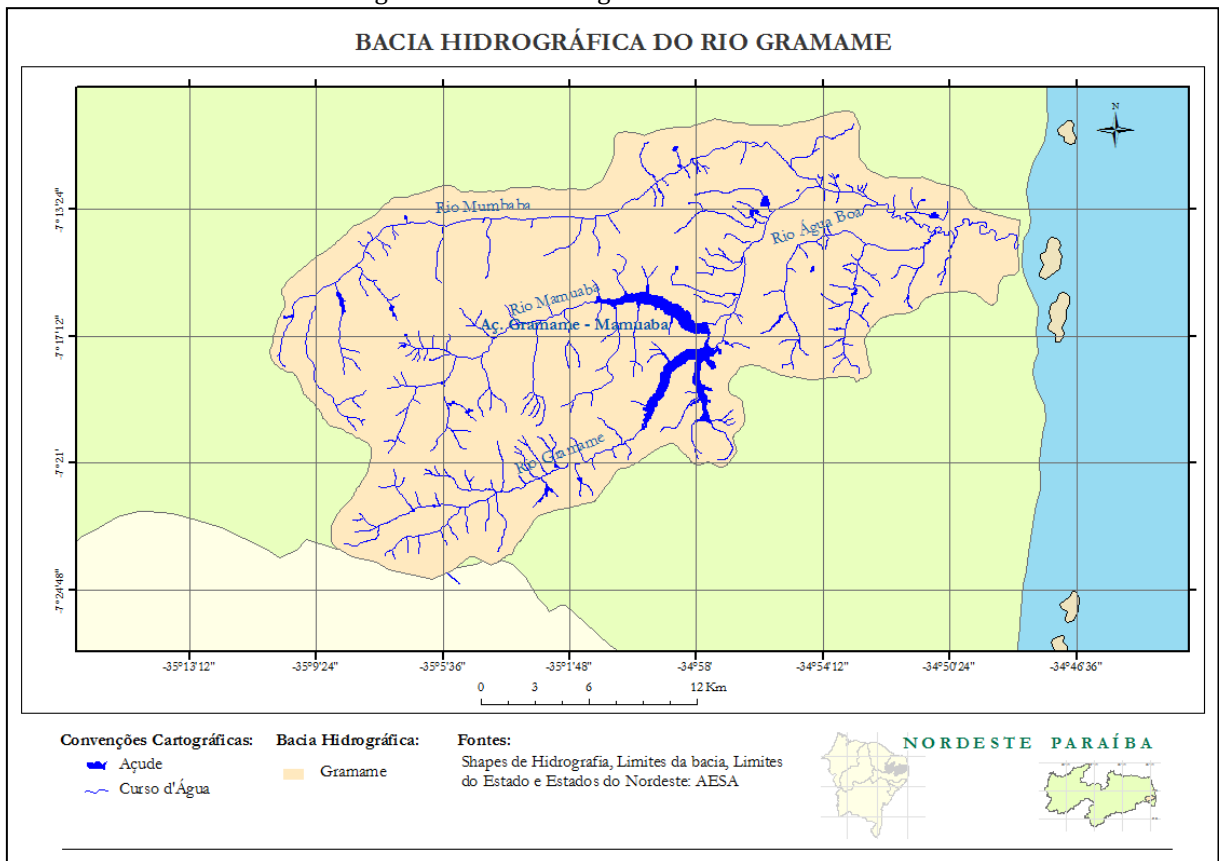
Figura 2 - Localização da Bacia hidrográfica do rio Gramame



Fonte: SEMARH, 2000.

A área da bacia do rio Gramame (Figura 3), delimitada a partir das cartas digitalizadas da SUDENE em escala 1:25.000 é de 589,1 km<sup>2</sup>. O seu perímetro, comprimento da linha do divisor de águas que a delimita, medido na mesma base cartográfica é de 123,3 km. O comprimento do curso d'água principal, o Rio Gramame, é de 54,3 km, desde a sua nascente na região do Oratório, município de Pedras de Fogo até a praia de Barra de Gramame, onde limita os municípios de João Pessoa e Conde. Seus principais cursos d'água, além do principal (o Gramame) são os afluentes Mumbaba, Mamuaba e Água Boa, todos perenes. O principal reservatório fluvial da região litorânea do Estado, o Gramame-Mamuaba, localiza-se na bacia (SEMARH, 2000).

Figura 3 - Bacia hidrográfica do rio Gramame



Fonte: MACHADO, 2011.

Em relação aos usos de água na bacia, destacam-se os usos consuntivos para abastecimento da população humana urbana e rural, às necessidades de água para indústrias, ao abastecimento dos animais e à água necessária à irrigação, além do lançamento de efluentes (SIMÕES, 2012). A exportação da água da bacia para a cidade de João Pessoa constitui o uso mais significativo da bacia, em torno de 48%, seguido da irrigação, com 41 % da demanda total. Para o abastecimento da Grande João Pessoa, as principais contribuições são retiradas do rio Mumbaba, conduzidos por adutora até a barragem do rio Marés; e a jusante do reservatório Gramame-Mamuaba, no rio Gramame, pela transposição das águas para a bacia hidrográfica do rio Marés ou através da adutora de Gramame (SEMARH, 2000).

A captação de água do rio Mumbaba para o abastecimento da cidade de João Pessoa, através do sistema de Marés, não ocorre em regime permanente. Quando ocorre o aumento das vazões nos rios em períodos de disponibilidade hídrica, essa retirada é suspensa para não sobrecarregar o sistema de Marés. Todavia, durante o período de estiagem, a suspensão da recarga dos mananciais e os altos índices de evaporação favorecem uma substancial redução nas vazões dos cursos d'água, sendo necessário

voltar com a retirada da água do rio Mumbaba, através do sistema de Marés (SANTOS, 2009). Além disso, a exploração agrícola, também demanda um consumo de água para irrigação maior nos períodos de estiagem, visto que, em períodos de chuva, a própria precipitação já é suficiente, na maioria dos casos, para irrigar as culturas (MACHADO, 2011).

A bacia hidrográfica do rio Gramame é considerada estratégica para o estado da Paraíba por constituir-se na principal provedora de água para o conglomerado urbano formador da Grande João Pessoa, da população residente no seu espaço geográfico, e das outras atividades que encontram sustentabilidade através dos recursos naturais na bacia (SEMARH, 2000). Porém, já apresenta evidências de esgotamento das vazões outorgáveis. O Índice de Utilização da Disponibilidade Atual (IUDA) da bacia aponta para uma demanda superior à sua disponibilidade, apresentando evidências de esgotamento das vazões outorgáveis (AESAS, 2006).

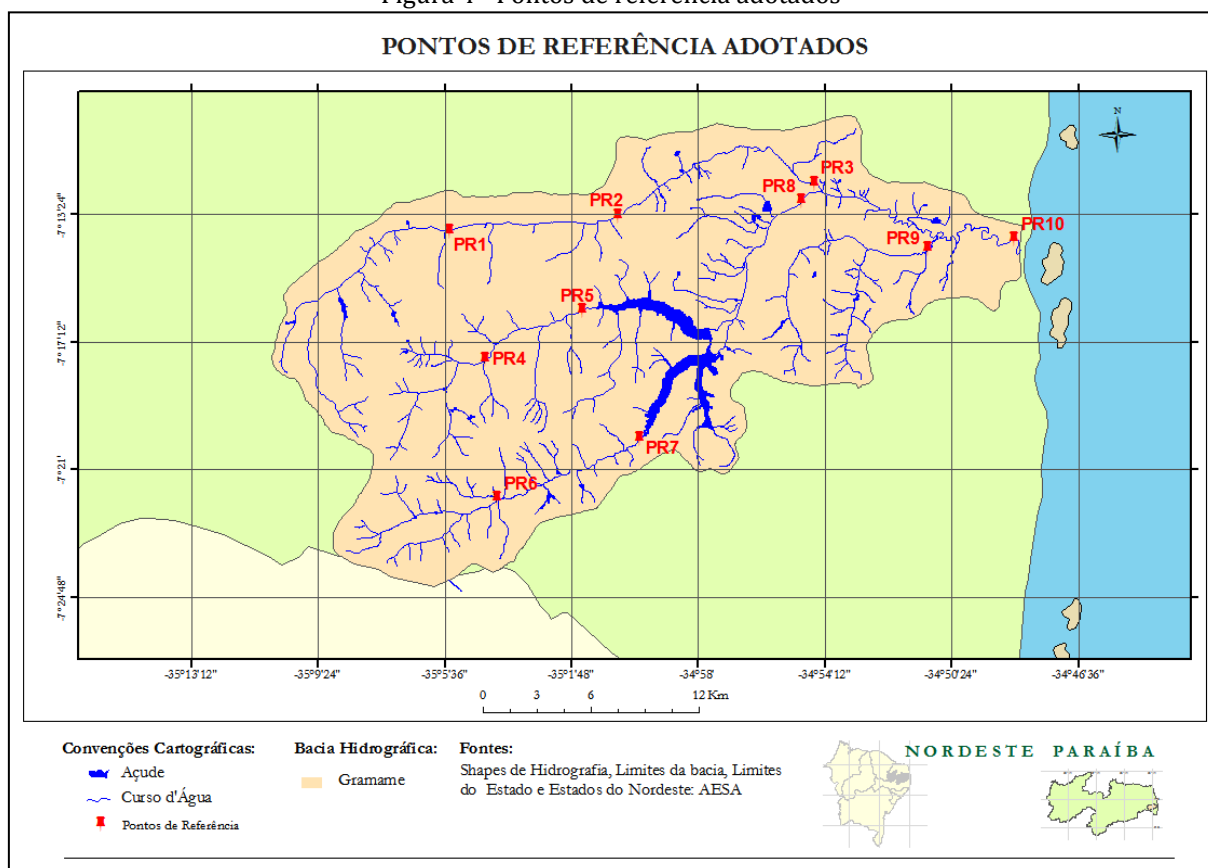
Essa pouca disponibilidade hídrica da bacia para atendimento dos múltiplos usos tem resultado, na maioria das vezes, em conflitos pelo uso da água, como o que ocorreu entre 1998 e 1999, quando os usuários de irrigação se mostraram insatisfeitos com o abastecimento urbano de cidades localizadas além dos limites geográficos da bacia (SANTOS, 2009). Além do mais, outra fonte de conflitos está relacionada com a degradação sócio ambiental. Seus rios convivem com elevado índice de assoreamento, uso inadequado de agrotóxico, irrigação sem nenhum planejamento e desmatamento da vegetação ciliar (AESAS, 2004).

O Plano Diretor da bacia hidrográfica do rio Gramame já apontava no ano de 2000, que a infraestrutura hídrica da bacia hidrográfica não é suficiente para atender às demandas do sistema, sugerindo, inclusive, aperfeiçoamento desta infraestrutura, como: a construção de um reservatório de 41 milhões de m<sup>3</sup> no rio Mumbaba, com capacidade de fornecer de modo constante uma vazão de 1.000 l/s para servir de reforço para o sistema de Marés no atendimento às demandas requeridas para abastecimento de água da Região Metropolitana de João Pessoa e contribuir para o suprimento de água para irrigação; a construção de um reservatório de 8 milhões de m<sup>3</sup> no alto curso do rio Gramame, com a finalidade de mitigar conflitos entre os irrigantes e a exportação de água para a região da Grande João Pessoa, bem como contribuir para o abastecimento de água da cidade de Pedras de Fogo e no suprimento de água da Empresa Agroindustrial GIASA; e a possibilidade de importação de águas para a bacia (MACHADO, 2011).

### 3.1 ESTIMATIVAS DE OFERTA E DEMANDA

No Estado da Paraíba a outorga de direito de uso de água é regulamentada pelo Decreto Estadual nº 19.260, de 31 de outubro de 1997, o qual estabelece, entre outros, que a soma dos volumes de água outorgados numa determinada bacia não poderá exceder 90% da vazão regularizada com 90% de garantia ( $0,9Q_{90}$ ). Para esse estudo foram utilizadas as dez regiões definidas por Machado (2011), considerando alguns dos pontos de cálculo definidos pelo Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia (SEMARH, 2000), conforme apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Pontos de referência adotados



Fonte: Machado, 2011

Em relação a oferta de água, foi utilizada a estimativa feita por Machado (2011) e apontada na Tabela 1, onde apresenta as vazões de referência nos dez pontos considerados. Para os pontos PR1 a PR7 e o PR9, estas vazões foram estimadas pelo PDRH da bacia nos pontos de cálculo correspondentes; para o PR8, a jusante do reservatório Gramame-Mamuaba baseou-se o seu valor na vazão regularizada pelo reservatório com 98% de garantia estimada pelo PDRH da bacia; enfim, para o PR10, exutório da bacia,



estimou-se o somatório das vazões de referência dos pontos PR3, PR8 e PR9. O valor máximo outorgável em cada ponto de referência seguiu os preceitos legais contidos no Decreto Estadual nº 19.260, de 31 de outubro de 1997. Por fim, a vazão ecológica foi considerada como 10% da vazão de referência.

Tabela 1 - Vazões características dos pontos de referência adotados

Ponto de referência	Descrição	Vazão de referência (l/s)	Vazão outorgável (l/s)	Vazão Ecológica (l/s)
PR1	Captação Mumbaba 1	150,0	135,0	15,0
PR2	Captação Mumbaba 2	250,0	225,0	25,0
PR3	Exutório Mumbaba	580,0	522,0	58,0
PR4	Captação Mamuaba	150,0	135,0	15,0
PR5	Exutório Mamuaba	430,0	387,0	43,0
PR6	Captação CAGEPA (Pedras de Fogo)	55,0	49,5	5,5
PR7	Exutório Gramame	300,0	270,0	30,0
PR8	Vazão regularizada do Reservatório	3.130,0	2.817,0	313,0
PR9	Exutório Água Boa	250,0	225,0	25,0
PR10	Exutório da Bacia	3.960,0	3.564,0	396,0

Fonte: MACHADO, 2011

Nos dez pontos de referência foram considerados 28 usuários, sendo 22 usuários de irrigação, 2 usuários industriais de captação, 2 usuários industriais de lançamento de efluentes (ambos no trecho 3), e 1 usuário de captação de água para abastecimento urbano, em dois trechos distintos, tal como em Machado (2011). A descrição destes usuários está apresentada na Tabela 2, bem como cada ponto de referência no qual esse usuário está relacionado, o tipo de uso de água e sua descrição em relação a finalidade do uso da água.

Tabela 2 - Descrição dos usuários adotados em cada ponto de referência

PR	Usuário	Tipo de Uso	Observação
PR1	U1	Agricultura	Cultura de macaxeira com aspersão convencional móvel
	U2	Agricultura	Cultura de feijão com aspersão convencional móvel
	U3	Agricultura	Cultura de inhame com aspersão convencional móvel
	U4	Agricultura	Cultura de Batata-doce com aspersão convencional móvel
	U5	Agricultura	Cultura de Batata-doce com aspersão convencional móvel
	U6	Agricultura	Cultura de Batata-doce com aspersão convencional móvel
PR2	U7	Agricultura	Cultura de abacaxi com pivô central
PR3	U8	Agricultura	Cultura de feijão com aspersão convencional móvel
	U9	Agricultura	Cultura de cana-de-açúcar com pivô central
	U10	Agricultura	Cultura de cana-de-açúcar com pivô central
	U11	Abastecimento	Abastecimento urbano para João Pessoa
	U12	Diluição	Indústria de papel. DBO <sub>5</sub> do lançamento: 150 mg/l
	U13	Diluição	Indústria têxtil. DBO <sub>5</sub> do lançamento: 100 mg/l
PR4	U14	Agricultura	Cultura de cana-de-açúcar com aspersão com mini canhão
PR5	U15	Agricultura	Cultura de abacaxi com pivô central
	U16	Agricultura	Cultura de abacaxi com pivô central
PR6	U17	Agricultura	Cultura de cana-de-açúcar com aspersão com mini canhão
	U18	Agricultura	Cultura de batata doce com aspersão convencional móvel
	U19	Agricultura	Cultura de batata doce com aspersão convencional móvel
PR7	U20	Agricultura	Cultura de cana-de-açúcar com aspersão com canhão gigante
	U21	Industrial	Captação para uso industrial
PR8	U22	Abastecimento	Abastecimento urbano para João Pessoa
PR9	U23	Agricultura	Cultura de mamão com aspersão convencional móvel
	U24	Agricultura	Cultura de capim com aspersão convencional móvel
	U25	Agricultura	Cultura de mamão com aspersão convencional móvel
	U26	Agricultura	Cultura de mamão com aspersão convencional móvel
	U27	Agricultura	Cultura de abacaxi com aspersão convencional móvel
PR10	U28	Industrial	Captação para uso industrial

Fonte: Machado, 2011.

### 3.2 SÉRIES HISTÓRICAS DE PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO MÉDIA MENSAL

A série histórica de precipitação média mensal foram obtidas por meio do método dos Polígonos de Thiessen aplicado em nove postos pluviométricos localizados na bacia e em sua vizinhança, conforme descritas na Tabela 3, utilizando as séries históricas de precipitação dos postos do plano diretor da bacia, no período de 1972 a 1989.

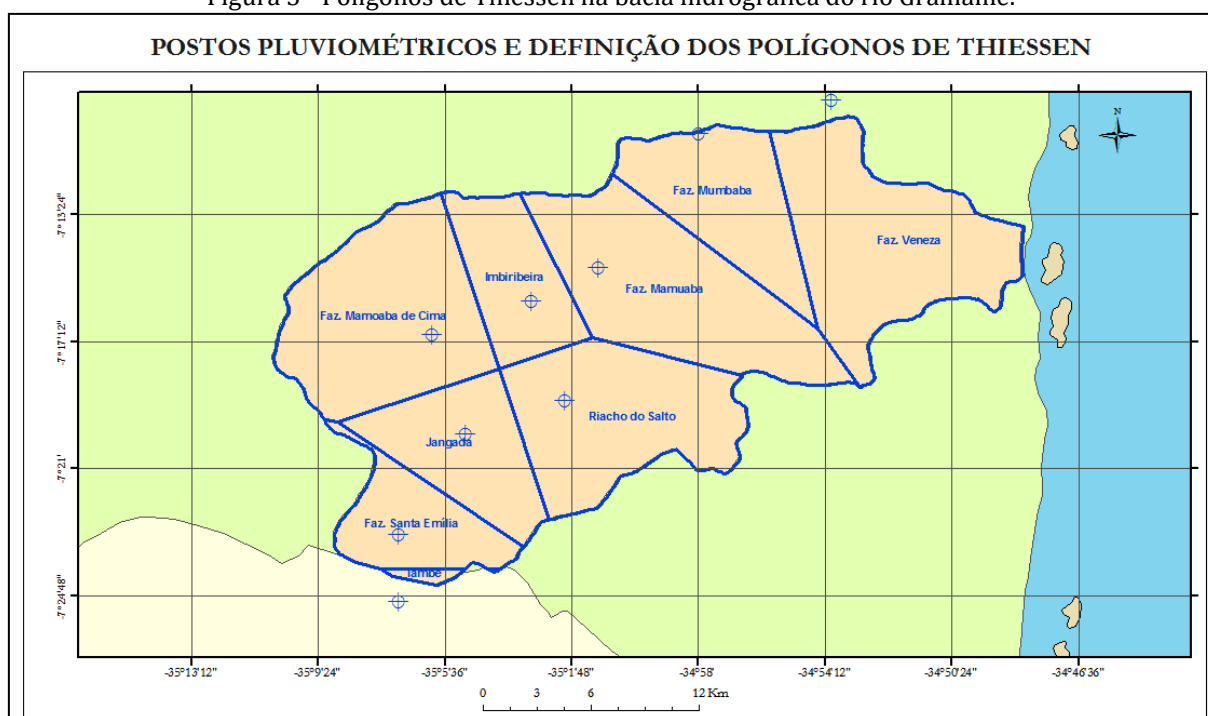
Tabela 3 - Postos pluviométricos do plano diretor da bacia.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Entidade</b>
1735132	Fazenda Mamuaba de Cima	136	Cagepa
1734025	Fazenda Mamuaba	71	Cagepa
1734026	Fazenda Mumbaba	89	Cagepa
1735133	Fazenda Santa Emília	139	Cagepa
1734029	Fazenda Veneza	55	Cagepa
1735136	Imbiribeira	101	Cagepa
1735127	Jangada	125	Cagepa
1735135	Riacho do Salto	110	Cagepa
3849878	També	190	Sudene

Fonte: Machado, 2011.

O traçado dos polígonos de Thiessen, na Figura 5 e os resultados estão apresentados na Tabela 4 (MACHADO, 2011).

Figura 5 - Polígonos de Thiessen na bacia hidrográfica do rio Gramame.



Fonte: Machado, 2011.

Tabela 4 - Séries históricas de precipitação média na bacia do rio Gramame

Ano	Precipitação (mm)												
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	ANUAL
1972	42,03	95,98	119,46	284,09	340,77	296,46	159,43	238,40	95,44	28,69	5,92	76,61	1783,29
1973	81,52	88,60	116,39	296,67	210,68	447,65	183,32	90,37	119,20	31,31	16,10	27,90	1709,71
1974	102,06	124,90	228,10	240,84	296,00	177,54	282,05	106,33	136,52	17,75	30,48	48,45	1791,03
1975	53,90	41,09	80,39	63,39	248,88	242,04	375,55	100,72	58,10	22,56	28,46	106,22	1421,29
1976	30,40	108,72	382,17	162,38	220,64	164,59	250,96	66,43	23,39	118,58	31,32	75,49	1635,07
1977	132,84	96,96	95,33	170,80	245,14	306,30	258,32	83,27	45,35	44,51	47,29	30,94	1557,05
1978	11,08	150,38	156,36	369,03	222,32	178,01	384,95	132,67	168,95	58,68	81,33	71,54	1985,30
1979	51,50	113,55	123,21	143,36	259,73	196,00	107,49	84,62	179,15	17,20	46,56	25,33	1347,70
1980	101,22	123,69	268,41	85,84	144,50	279,87	101,93	87,80	51,56	59,98	34,17	59,82	1398,79
1981	78,87	106,53	237,18	74,07	232,28	121,86	116,47	54,71	140,02	18,66	34,50	120,02	1335,18
1982	43,34	112,94	74,24	193,84	299,58	186,03	237,24	222,59	162,41	16,52	64,34	21,10	1634,17
1983	41,06	139,91	172,38	75,44	153,31	108,89	72,93	86,25	48,67	46,46	6,77	16,85	968,90
1984	109,57	54,61	106,01	257,46	375,63	156,77	226,88	177,23	44,49	70,58	40,23	3,13	1622,58
1985	102,61	137,32	309,29	267,41	212,66	346,61	420,06	163,79	98,16	7,57	25,92	44,16	2135,56
1986	115,84	89,44	274,60	212,52	264,69	271,31	228,57	185,63	155,57	67,48	114,97	35,71	2016,31
1987	46,40	134,90	260,19	257,08	102,03	304,63	305,02	108,97	47,30	30,56	13,63	7,85	1618,57
1988	68,33	52,23	221,54	224,31	220,45	270,87	360,77	148,62	35,86	12,01	39,81	47,59	1702,39

Fonte: Machado, 2011.

Com relação à evaporação da lamina d'água do reservatório, foram considerados os valores médios da estação climatológica de João Pessoa (Tabela 5). As vazões médias históricas de cada ponto de referência foram obtidas do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia, tomadas como aquelas definidas para os pontos de cálculos correspondentes (Tabela 6) (MACHADO, 2011).

Tabela 5 - Evaporação média mensal adotada para o reservatório Gramame-Mamuaba

Evaporação (mm)											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
155,78	137,20	141,05	118,50	100,75	86,25	91,45	105,40	123,00	144,93	148,50	154,23

Fonte: Machado, 2011

Tabela 6 - Vazões médias históricas em cada ponto de referência

PR	Vazão (m <sup>3</sup> /s)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	Ago	set	out	nov	dez
1	102,65	156,78	351,59	557,29	1731,19	865,66	1082,1	543,72	453,61	147,4	91,21	98,76
2	394,73	579,1	1131,85	1626,05	3111,03	2580,24	2993,26	1698,38	1268,62	472,29	394,77	359
3	638,31	915,83	1786,76	2501,21	4178,76	4081,24	4785,25	2652,06	1978,56	674,43	593,91	549,28
4	184,1	291,16	607,69	803,18	2077,56	1390,94	1490,32	812,16	646,03	223,66	179,06	162,19
5	538,08	830,76	1616,07	2067,03	3756,35	3542,29	3905,84	2220,56	1649,82	586,08	516,15	471,76
6	54,45	91,91	217,48	287,18	1375,27	461,96	567,68	287,7	233,37	67,47	63,29	50,48
7	344,56	545,51	1176,23	1495,06	2807,09	2546,99	2833,11	1486,28	1187,98	404,35	371,63	282,24
8	1237,15	1915,54	3856,75	4940,74	7414,47	8661,65	9563,06	5330,18	3986,32	1376,59	1235,77	1071,46
9	197,87	287,42	530,84	659,57	1944,26	1207,18	1276,59	735,9	554,5	180,37	154,44	159,54
10	2937	4440,12	8841,41	11350,71	15932,82	20263,65	21500,65	11919,47	9076,24	3020,18	2531,89	2371,86

Fonte: Machado, 2011

### 3.3 O RESERVATÓRIO GRAMAME-MAMUABA

O complexo de Gramame-Mamuaba é constituído de duas barragens, sendo uma no rio Gramame e outra no rio Mamuaba, que se comunicam através de um canal, podendo ser operados simultaneamente ou separadamente através de válvulas dispersores com tomadas de água. A construção do complexo foi finalizada em 1990, sendo que os açudes começaram a acumular água em Agosto de 1988 (SEMARH, 2000). A Tabela 7 apresenta os valores de cota x área x volume do reservatório Gramame-Mamuaba, obtidos do PDRH da bacia.

Tabela 7 - Cota x área x volume do sistema Gramame-Mamuaba.

Cota (m)	Área inundada (m <sup>2</sup> )	Volume acumulado (m <sup>3</sup> )
17	0,00	0
18	4000,00	2000
19	90298,53	85000
20	306693,12	299000
21	501184,38	722000
22	917083,06	1442000
23	1282838,41	2537000
24	1834940,40	4048000
25	2354544,33	6122000
26	2677196,83	8945000
27	3142410,55	11964000
28	3738567,81	15454000
29	4274800,46	19721000
30	4939971,91	23305000
31	5543434,34	28646000
32	6274232,12	34651000
33	6941868,43	41248000
34	7735512,26	48492000
35	8464784,93	56937000

Fonte: Machado, 2011, baseado em SEMARH, 2000.

O algoritmo evolucionário multiobjetivo utilizado neste trabalho é SPEA2 modificado por Machado (2011) para otimizar a alocação interanual da vazão excedente na Bacia do Rio Gramame, montado no ambiente do software Matlab. A principal modificação incorporada foi a consideração dos conceitos de dominância e de densidade de vizinhança em conjunto com o conceito de viabilidade das soluções, de forma que as soluções sejam categorizadas em viáveis, quando não ocorrer nenhuma violação das restrições impostas, e inviáveis, adotando-se para essa categoria o conceito de ponto de falha (o mês em que ocorre a primeira violação da restrição). As restrições foram classificadas em três níveis: de baixa severidade; de média severidade e de alta severidade (MACHADO, 2011).

Outra modificação realizada está na submissão de apenas uma parte da população à sequência de operações do Crossover Média (no qual cada gene do filho gerado é obtido através da média aritmética dos respectivos genes dos indivíduos pais) e Mutação Uniforme (substituição de um gene por um número aleatório); a outra parte da população é submetida ao Crossover Média Direcionado (a cada par de pais submetido a este operador, é observada a viabilidade e o ponto de falha de primeira ocorrência entre os dois) e, outra, à Mutação Direcionada (quando o indivíduo filho não viola nenhuma restrição, ele é tomado como uma réplica do indivíduo pai, caso haja a violação, é observado o ponto de falha e o tipo de restrição violada) (MACHADO, 2011).

As funções objetivo utilizadas por Machado (2011) foram modificadas de modo a atender a alocação de água em situações de escassez hídrica. A Função objetivo 1 é de ordem técnico-econômica, caracterizada como uma função de maximização da satisfação do usuário, por tentar aproximar o volume alocado o tanto mais próximo quanto possível do requerido.

$$FO1_{MAX} = \frac{\sum_{c=1}^{nPR} \left[ \frac{\sum_{u=INI_c}^{uFIM_c} \left( \frac{\sum_{m=1}^{nm} \frac{Va_{u,m} Pu}{Vr_{u,m}} \right)}{nm} \right]}{nPC}$$

Onde:

nPR é o número de pontos de referência de captação na bacia;

nuc é o número de usuários vinculados ao ponto de referência de captação c;

uINic é o índice do usuário inicial do ponto de referência de captação c;

uFIMc é o índice do usuário final do ponto de referência de captação c;

Vau,m é o volume adicional alocado para o usuário u no mês m [m<sup>3</sup>];

Vru,m é o volume adicional requerido pelo usuário u no mês m [m<sup>3</sup>];

nm é número de meses do período da análise;

Pu é o coeficiente de priorização do uso da água, valor variável de 0 a 1, onde 1 consiste no uso mais prioritário e 0 ao uso menos prioritário.

A Função objetivo 2 é de ordem ambiental e busca a minimização da emissão de poluentes, através da maximização da aproximação da concentração resultante da mistura com a concentração máxima admissível. O parâmetro DBO<sub>5,20</sub> foi selecionado<sup>1</sup> para avaliação da concentração de efluentes do Ponto de Referência 3 da bacia, onde estão localizados os usuários de diluição de efluentes (U12 e U13). Considerou-se o valor máximo permitido para cursos de água classe 3, de 10mg/l de DBO<sub>5,20</sub>, classe desse trecho do corpo hídrico (MACHADO, 2011).

$$FO2_{MAX} = \begin{cases} se, Cres_{pl,m} > Cadm_{pl,m}: \frac{\sum_{pl=1}^{nPl} \left[ \frac{\left( \sum_{m=1}^{nm} \frac{Cadm_{pl,m}}{Cres_{pl,m}} \right)}{nm} \right]}{nPl} \\ se, Cadm_{pl,m} \geq Cres_{pl,m}: \frac{\sum_{pl=1}^{nPl} \left[ \frac{\left( \sum_{m=1}^{nm} \frac{Cres_{pl,m}}{Cadm_{pl,m}} + 1 \right)}{nm} \right]}{nPl} \end{cases}$$

Onde:

nPl é o número de pontos de referência de lançamento de efluentes na bacia hidrográfica;

Crespl,m é a concentração resultante do poluente no ponto de referência de lançamento pl [mg/l];

Cadmpl,m é a concentração admissível do poluente no ponto de referência de lançamento pl [mg/l].

As situações de conflitos também estão representadas nas restrições da otimização, definidas como um conjunto de funções que define o espaço de busca viável do cenário otimizado e que impõe limites nos parâmetros analisados. Neste projeto foram utilizadas restrições relacionadas à operação do reservatório, onde se concentram uma

<sup>1</sup> A Resolução n° 08 de 01/03/2010 do CERH, que estabelece critérios de metas progressivas obrigatórias de melhoria da qualidade da água para fins de outorga de diluição em cursos d'água de domínio do Estado da Paraíba, indica a Demanda Bioquímica de Oxigênio como parâmetro de avaliação.



boa parte das outorgas de captação, e ao lançamento de poluentes em cursos d'água, de modo a incluir, no processo de alocação, também as outorgas de diluição, conforme descrição (MACHADO, 2011). As restrições consideradas são as seguintes:

- Sustentabilidade da operação no reservatório: Definida através da comparação entre o nível final e o inicial do reservatório, não podendo ser menor que 10% do nível inicial;
- Nível de reserva no reservatório: Manutenção de um nível de reserva no reservatório para absorver as incertezas envolvidas e garantir os usos prioritários (se for menor que 40% sofre uma redução no volume a ser outorgado); e,
- Concentração admissível dos poluentes: Para usuários de lançamento de efluentes, a carga lançada deve ser diluída na vazão disponível presente no trecho, sem alteração da concentração admissível. Soluções que violem a concentração admissível são consideradas inviáveis.

Para determinação da vazão a ser alocada em situações de escassez hídrica, considerou-se como dado de entrada a informação das previsões probabilísticas de precipitação para um ano de planejamento classificado como seco, considerando-se as seguintes probabilidades de chuva: precipitação característica de ano seco ( $P_s$ ) de 70%; precipitação característica de ano normal ( $P_n$ ) de 20% e precipitação característica de ano chuvoso ( $P_{ch}$ ) de 10%. Uma vez previstas as vazões, os experimentos foram conduzidos de forma a avaliar variações nas prioridades de uso adotadas para cada grupo de usuário da bacia do rio Gramame, através de variações no coeficiente  $P_u$  da Função objetivo 1, e também no volume inicial do reservatório Gramame-Mamuaba, na forma de quatro cenários (Tabela 8).

Tabela 8 - Descrição dos cenários

Cenário	Prioridade de uso	Volume inicial do reservatório
1	Abastecimento ( $P_u = 1,0$ ), demais usos ( $P_u = 0,5$ )	50%
2	Abastecimento ( $P_u = 1,0$ ), demais usos ( $P_u = 0,5$ )	90%
3	Abastecimento ( $P_u = 1,0$ ), demais usos de captação ( $P_u = 0,6$ ), usos de lançamento ( $P_u = 0,3$ )	50%
4	Abastecimento ( $P_u = 1,0$ ), demais usos de captação ( $P_u = 0,6$ ), usos de lançamento ( $P_u = 0,3$ )	90%

A variação do volume inicial do reservatório teve o propósito de verificar a variação da otimização da distribuição da água em um mesmo ano seco, em situações nas

quais o reservatório principal da bacia inicia o período com maiores ou menores volumes acumulados. E, a variação das prioridades de uso teve o propósito de avaliar a importância e o comportamento desse parâmetro na otimização da alocação de água, mediante a priorização do usuário de abastecimento, conforme determina o inciso III, Artigo 1º, Capítulo I, da Lei nº 9.433/1997, e variação de prioridade entre os demais usuários da bacia, nos cenários 1 e 2, e entre os usuários de captação e os usuários de diluição de efluentes, nos cenários 3 e 4.

Adotou-se para cada ponto de referência um valor outorgado igual a zero, ou seja, os valores outorgados segundo dados da AESA, relativo ao mês de abril de 2010, foram transformados em valores requeridos e distribuídos entre os usuários de cada ponto de referência de modo proporcional à sua vazão média requerida (Tabela 9).

Tabela 9 - Vazão requerida pelos usuários

Ponto de Referência	Usuário	Vazão requerida (l/s)
PR1	U1	0,44
	U2	1,3
	U3	0,89
	U4	2,33
	U5	0,78
	U6	0,26
PR2	U7	91,67
PR3	U8	27,48
	U9	27,36
	U10	29,46
	U11	451,01
	U12	105,24
	U13	1127,53
PR4	U14	8,22
PR5	U15	190,62
	U16	266,93
PR6	U17	51,48
	U18	25,17
	U19	12,57
PR7	U20	630,12
	U21	441,39
PR8	U22	2668,06
PR9	U23	31,91
	U24	38,11
	U25	53,29
	U26	53,29
	U27	205,55
PR10	U28	10,83

Foram mantidos invariáveis os parâmetros de controle do algoritmo evolucionário, os quais foram: tamanho da população (200 indivíduos); dimensão da

população externa (50% da população); probabilidade de crossover médio aleatório (CM 80%); probabilidade de crossover médio direcionado (CMD 80%); probabilidade de mutação direcionada (MD 30%); e o número de gerações (300 gerações).

Foram realizadas três execuções de otimização para cada cenário descrito, sendo selecionada da população de resultados, em cada execução, a solução viável de melhor aptidão, ou seja, melhor valor de fitness. No caso de ausência de soluções viáveis, aquela em que o alarme ocorre mais tardiamente. Das três soluções selecionadas de cada execução, escolheu-se aquela com o melhor atendimento na alocação de vazão às demandas requeridas e menor ocorrência de alarmes para apresentação e discussão dos resultados.

Ao final das execuções, através da solução selecionada, constatou-se que no cenário 1, a solução encontrada não é viável, devido à presença de falhas no reservatório nos meses de fevereiro a maio, e nos cenários 1, 2 e 3, devido as altas concentrações de DBO5, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização da melhor solução em cada cenário

Cenário	DBO		Reservatório			
	Valor máximo (mg/l)	Alarme concentração admissível	Cota mínima (m)	Cota máxima (m)	Alarme nível de reserva	Alarme sustentabilidade
1	16,34	Setembro a Dezembro	29,09 (fevereiro)	33,95 (agosto)	Fevereiro a Maio	-
2	15,62	Outubro a Dezembro	31,76 (dezembro)	34,95 (julho)	-	-
3	72,16	Abril a Dezembro	29,09 (fevereiro)	33,61 (julho)	-	-
4	8,61	-	31,88 (dezembro)	35 (julho e agosto)	-	-

Em relação à concentração admissível de DBO a situação mais crítica foi encontrada no Cenário 3, cuja concentração é ultrapassada a partir do mês de abril e atinge o valor máximo acumulado de 72,16 mg/l DBO. Essa alta concentração de DBO no cenário 3 ocorreu porque, mesmo tendo imposto uma menor prioridade de uso para os usuários de lançamento de efluentes, o usuário U12 obteve, nesta solução, um atendimento de 35,7% do seu valor outorgado, sendo que, nos demais cenários, lhe foi imposta uma alta taxa de racionamento, resultando em um atendimento de menos de 7% do seu valor outorgado.

O complexo Gramame-Mamuaba atinge cotas mais baixas nos Cenários 1 e 3, cujo volume inicial do mesmo foi de 50% do total, e cotas mais altas nos Cenários 2 e 4, cujo volume inicial foi de 90% do total, inclusive provocando extravasamento do reservatório na solução do Cenário 4, nos meses de julho a agosto. Contudo, apenas são provocados alarmes de nível de reserva no reservatório Gramame-Mamuaba na solução otimizada do Cenário 1 e nenhum alarme de sustentabilidade é acionado em nenhum dos cenários.

No Cenário 1 apenas os usuários (U1, U3 e U5) do ponto de referência 1 e o usuário U14 do ponto de referência 4 obtiveram 100% da sua outorga atendida, contrapondo com alguns usuários do ponto de referência 3, especialmente aos usuários de abastecimento urbano para a região metropolitana de João Pessoa (U11) e para os usuários de diluição

(U12 e U13), que apresentaram baixíssimos índices de atendimento, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Porcentagem de atendimento no Cenário 1 na solução de melhor aptidão

PR		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média
PR1	U1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	U2	99,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9
	U3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	U4	79,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	84,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,0
	U5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	29,5	100,0	94,1
	U6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PR2	U7	94,4	100,0	98,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4
PR3	U8	66,8	20,3	22,7	12,6	1,6	12,4	3,9	0,1	20,9	11,1	2,00	62,3	19,7
	U9	55,4	21,0	24,5	5,7	18,1	14,8	39,3	1,8	22,1	19,0	0,0	93,4	26,2
	U10	35,30	12,2	8,8	0,1	7,1	5,7	34,2	2,1	7,6	21,4	1,6	91,8	19,0
	U11	4,29	1,7	1,1	0,3	0,2	1,1	22,5	0,8	5,4	0,7	0,14	5,3	3,6
	U12	2,6	4,4	4,4	3,2	2,0	6,4	44,2	0,1	1,8	5,2	0,1	1,6	6,3
	U13	0,71	0,4	0,8	0,0	0,3	0,1	2,6	0,0	3,7	0,3	0,04	0,6	0,8
PR4	U14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PR5	U15	6,5	100,0	100,0	99,9	100,0	95,0	100,0	60,5	96,7	82,5	52,7	79,4	81,1
	U16	100,0	46,3	32,3	100,0	100,0	1,4	52,7	4,6	16,5	56,2	69,3	1,2	48,4
PR6	U17	2,5	6,5	14,0	17,0	36,0	85,6	29,0	1,8	4,0	1,7	2,8	1,9	16,9
	U18	11,5	12,8	55,1	18,9	75,5	13,2	72,4	16,9	0,8	1,8	3,3	2,5	23,7
	U19	21,2	39,6	44,9	100,0	58,1	75,5	46,3	21,9	39,2	5,9	4,8	1,0	38,2
PR7	U20	17,7	0,1	2,6	12,4	28,5	6,0	11,3	100,0	13,4	4,8	17,6	4,5	18,3
	U21	8,5	16,3	14,4	16,5	53,8	19,7	8,1	70,3	15,3	4,8	3,8	2,7	19,5
PR8	U22	16,9	9,3	9,3	28,4	38,3	42,6	51,6	36,3	51,6	16,9	54,9	51,6	34,0
PR9	U23	87,2	100,0	81,8	100,0	100,0	100,0	79,9	84,6	67,8	54,6	48,2	61,9	80,5
	U24	68,6	49,3	47,2	100,0	100,0	100,0	98,1	89,2	70,1	45,9	78,1	81,9	77,4
	U25	47,3	29,8	74,7	100,0	100,0	100,0	67,3	57,0	51,4	42,1	38,4	54,1	63,5
	U26	53,6	90,1	88,1	100,0	100,0	100,0	74,7	80,8	92,2	58,8	23,3	42,8	75,4
	U27	0,7	29,4	19,0	4,9	0,8	63,6	29,1	14,5	17,2	7,2	10,1	4,2	16,7
PR10	U28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	93,9	100,0	99,5
<b>Total Médio</b>														<b>55,7</b>

No Cenário 2, mesmo iniciando a otimização com o reservatório com 90% de sua capacidade, os resultados foram semelhantes aos do Cenário 1 em termos de atendimento do valor outorgado, contudo, destaca-se a situação total da vazão outorgada do usuário U22 no mês de novembro, o que é preocupante, pois o U22 que corresponde ao usuário de abastecimento urbano para a região metropolitana de João Pessoa, que apresentou baixo atendimento, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Porcentagem de atendimento no Cenário 2 na solução de melhor aptidão

PR		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média
PR1	U1	100,0	100,0	93,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4
	U2	100,0	100,0	75,4	100,0	96,9	97,7	100,0	93,8	100,0	90,8	90,8	100,0	95,4
	U3	100,0	98,9	100,0	100,0	100,0	92,1	100,0	100,0	100,0	56,2	100,0	100,0	95,6
	U4	100,0	94,0	92,3	100,0	65,2	84,1	63,5	95,3	100,0	97,9	97,9	91,0	90,1
	U5	19,2	98,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,4	100,0	100,0	100,0	100,0	92,9
	U6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PR2	U7	100,0	96,2	96,0	97,6	98,6	96,3	100,0	98,0	98,7	99,3	100,0	100,0	98,4
PR3	U8	9,6	18,7	11,0	19,9	11,9	4,5	7,9	4,8	8,1	20,9	5,53	13,6	11,4
	U9	9,2	39,3	8,6	19,8	4,2	4,1	16,7	12,1	6,3	21,1	9,9	25,9	14,7
	U10	8,01	3,3	13,4	22,6	8,2	3,9	16,9	11,1	4,4	20,0	11,1	19,5	11,9
	U11	0,65	1,6	0,9	1,0	0,6	0,4	0,8	1,0	0,5	1,1	1,26	1,9	1,0
	U12	1,0	5,4	2,8	2,2	1,7	1,0	3,3	2,3	1,5	8,5	2,2	3,6	3,0
	U13	0,18	0,7	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,8	0,57	0,9	0,4
PR4	U14	98,8	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	99,8	99,9
PR5	U15	81,5	78,2	83,1	73,5	42,2	74,0	57,5	56,5	53,9	53,1	45,0	64,4	63,6
	U16	35,5	18,6	29,3	6,5	20,0	43,3	29,1	55,8	44,9	7,7	55,9	50,1	33,1
PR6	U17	6,3	7,5	4,5	4,4	12,8	0,7	11,3	13,9	11,1	6,8	12,3	3,8	7,9
	U18	49,7	30,2	7,8	3,9	16,9	1,8	17,8	2,9	3,0	19,2	19,8	19,0	16,0
	U19	100,0	65,3	11,0	9,0	39,7	4,7	49,9	20,5	21,3	57,1	46,8	21,1	37,2
PR7	U20	0,4	1,7	8,0	32,1	5,6	15,7	6,9	3,0	8,7	1,4	0,7	13,0	8,1
	U21	3,1	42,5	10,0	6,1	13,0	20,0	3,8	9,4	14,1	4,0	1,0	26,2	12,8
PR8	U22	65,1	28,3	53,4	58,2	51,8	23,7	43,1	27,0	26,4	27,7	0,0	9,0	34,5
PR9	U23	100,0	93,0	59,9	79,9	45,9	74,6	61,5	38,3	87,9	70,3	74,9	84,4	72,6
	U24	100,0	63,9	47,7	74,9	66,9	70,3	63,6	65,3	64,8	59,8	68,1	73,0	68,2
	U25	58,3	68,4	37,4	47,2	58,1	29,5	57,3	50,0	45,3	52,6	46,9	67,9	51,6
	U26	46,1	38,3	29,2	38,9	67,4	53,3	72,0	32,7	67,2	41,7	43,9	71,6	50,2
	U27	10,3	13,2	10,3	14,4	13,4	7,1	18,4	15,2	20,6	13,2	12,1	14,7	13,6
PR10	U28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Total Médio</b>														<b>49,4</b>

Nos cenários 3 (Tabela 13) e 4 (Tabela 14), ao se modificar os coeficientes de prioridade do demais usos, atribuindo o coeficiente de prioridade de uso para os demais usuários de captação de 0,6 e para os usuários de lançamento de 0,3, houve uma ligeira melhora no índice de atendimento do valor outorgado, atingindo médias totais superiores aos 60%, porém o usuário 28, localizado no exutório da bacia apresentou índices de racionamento em alguns meses, principalmente o mês de novembro.

Tabela 13 - Porcentagem de atendimento no Cenário 3 na solução de melhor aptidão

PR		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média
PR1	U1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,7	100,0	100,0	100,0	99,8
	U2	62,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,4	66,2	100,0	93,7
	U3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,9	97,8	100,0	100,0	99,7
	U4	78,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	91,8	100,0	100,0	97,5
	U5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7	100,0	100,0	99,9
	U6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PR2	U7	100,0	100,0	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,6	100,0	99,1	98,9	99,6
PR3	U8	15,6	9,2	100,0	28,5	55,1	100,0	100,0	17,0	100,0	1,6	14,30	100,0	53,4
	U9	11,2	22,4	54,2	100,0	43,7	100,0	96,5	12,0	100,0	2,6	11,6	100,0	54,5
	U10	18,84	19,8	78,9	100,0	41,1	100,0	100,0	13,6	100,0	2,2	21,8	100,0	58,0
	U11	0,39	0,5	8,0	5,6	3,7	100,0	14,4	1,2	68,9	0,1	2,17	11,7	18,1
	U12	2,3	2,8	25,8	26,1	16,7	100,0	100,0	3,3	100,0	0,3	9,7	41,7	35,7
	U13	0,20	0,3	0,5	2,3	2,2	88,2	5,6	0,6	15,7	0,0	0,23	3,2	9,9
PR4	U14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0
PR5	U15	81,8	100,0	99,2	90,2	99,6	100,0	99,6	82,7	93,5	88,2	85,2	18,5	86,5
	U16	20,7	97,8	31,8	9,0	37,0	100,0	45,9	11,3	100,0	18,3	12,7	64,5	45,8
PR6	U17	29,7	14,1	100,0	22,1	100,0	49,4	39,6	8,1	53,8	4,3	6,5	0,5	35,7
	U18	16,3	7,3	72,9	43,3	100,0	100,0	39,4	17,7	100,0	14,5	11,3	17,6	45,0
	U19	67,5	22,6	26,5	39,6	100,0	100,0	33,8	8,8	100,0	25,2	11,5	31,1	47,2
PR7	U20	8,6	8,9	15,4	17,6	32,8	46,5	37,1	6,0	38,1	6,3	8,2	4,6	19,2
	U21	21,4	11,4	11,3	7,8	34,1	11,4	58,0	11,9	54,2	2,5	8,6	3,1	19,6
PR8	U22	93,1	30,8	37,0	48,2	51,2	65,1	73,0	93,1	67,4	93,1	67,4	63,9	65,3
PR9	U23	57,2	100,0	100,0	98,2	100,0	54,2	100,0	100,0	100,0	60,5	79,1	35,6	82,1
	U24	50,5	72,9	100,0	79,6	100,0	71,0	100,0	100,0	100,0	51,2	56,5	32,7	76,2
	U25	29,0	100,0	18,0	87,6	100,0	95,5	100,0	27,9	100,0	23,4	42,8	37,5	63,5
	U26	24,9	47,3	100,0	86,6	100,0	96,7	100,0	100,0	100,0	25,9	26,7	52,7	71,7
	U27	13,5	18,8	39,8	29,1	100,0	44,7	91,6	88,6	27,5	7,9	13,1	8,7	40,3
PR10	U28	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	100,0	75,0
<b>Total Médio</b>														<b>64,0</b>

Tabela 14 - Porcentagem de atendimento no Cenário 4 na solução de melhor aptidão

PR		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média
PR1	U1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	U2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	U3	100,0	7,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	57,3	100,0	100,0	88,8
	U4	100,0	100,0	9,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	73,4	90,3
	U5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	U6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PR2	U7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,8	100,0	99,9
PR3	U8	11,3	1,3	29,2	7,2	42,5	12,2	28,9	10,8	0,1	4,1	2,66	1,2	12,6
	U9	1,8	0,0	24,2	17,9	15,3	7,2	15,8	16,5	0,2	2,3	10,0	4,1	9,6
	U10	1,39	0,9	3,9	14,9	23,9	21,6	40,3	25,0	0,8	5,1	5,2	2,1	12,1
	U11	0,36	0,0	0,2	2,2	0,5	2,0	1,4	0,4	0,2	0,2	0,61	0,0	0,7
	U12	2,5	0,3	7,5	2,2	8,9	14,2	11,4	6,3	0,9	1,2	2,2	0,4	4,8
	U13	0,16	0,0	0,2	0,5	0,9	0,8	0,3	0,0	0,1	0,2	0,16	0,1	0,3
PR4	U14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PR5	U15	74,0	26,3	100,0	100,0	100,0	74,4	100,0	100,0	100,0	10,2	29,2	100,0	76,2
	U16	100,0	16,4	100,0	100,0	100,0	93,4	100,0	100,0	100,0	44,4	21,1	61,5	78,1
PR6	U17	66,5	65,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	61,6	48,9	36,8	23,3	36,7	69,9
	U18	34,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	18,0	100,0	63,4	35,7	97,7	49,3	74,8
	U19	55,8	92,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	43,8	100,0	91,0
PR7	U20	2,5	29,7	94,8	42,5	13,5	10,8	40,4	12,0	2,8	3,4	4,1	1,3	21,5
	U21	3,9	71,9	66,7	43,6	8,7	33,6	48,9	99,0	19,6	3,3	1,2	2,9	33,6
PR8	U22	77,8	73,9	84,8	84,8	77,8	71,6	70,0	93,3	71,8	70,0	77,8	70,0	77,0
PR9	U23	48,9	81,3	48,3	86,0	100,0	100,0	26,7	100,0	48,2	23,5	13,2	17,9	57,8
	U24	0,3	91,0	100,0	50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	86,4	100,0	1,9	15,4	70,4
	U25	25,8	94,1	38,9	34,3	100,0	20,3	30,2	44,9	100,0	75,1	1,8	13,8	48,3
	U26	12,6	95,8	100,0	49,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	31,8	3,5	4,8	66,5
	U27	5,2	0,5	19,6	13,5	45,6	14,2	5,2	55,6	23,9	14,6	0,9	3,4	16,8
PR10	U28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	100,0	91,7
<b>Total Médio</b>														<b>60,5</b>

Em relação à distribuição mensal nos valores outorgados, não percebe-se uma variação evidenciada entre meses, tendo em vista que os valores requeridos foram considerados constante em todos os meses do ano simulado, para que se pudesse avaliar um possível racionamento no valor de outorga dos usuários. A distribuição média mensal de atendimento dos valores outorgados em cada cenário estudado, está demonstrada na Tabela 15.



Tabela 15 - Média mensal de atendimento

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
<b>Cenário 1</b>	52,87	53,20	55,14	61,43	65,01	62,26	62,57	55,11	53,49	47,89	44,09	55,17	<b>55,69</b>
<b>Cenário 2</b>	53,68	53,78	45,90	50,45	47,90	46,54	50,05	46,66	49,59	47,54	48,09	52,65	<b>49,40</b>
<b>Cenário 3</b>	46,55	56,68	68,55	65,06	75,61	86,52	79,81	57,28	86,17	43,28	44,80	58,09	<b>64,03</b>
<b>Cenário 4</b>	50,88	58,92	68,87	66,03	72,77	67,01	65,62	72,34	63,11	50,69	40,68	48,51	<b>60,45</b>

Com relação ao índice de racionamento, a Tabela 16 apresenta os resultados da porcentagem de atendimento do valor outorgado da solução otimizada de melhor aptidão obtida em cada cenário. Quanto maior a porcentagem de atendimento do valor outorgado, menores serão os índices de racionamento impostos aos usuários do ponto de referência.

Tabela 16 - Percentual de atendimento da outorga requerida

Ponto de referência	Outorga atual atendida (%)				MÉDIA
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	
PR1	98,5	95,6	98,4	96,5	97,2
PR2	99,4	98,4	99,6	99,9	99,3
PR3	12,6	7,0	38,3	6,7	16,1
PR4	100,0	99,9	100,0	100,0	99,9
PR5	64,7	48,3	66,1	77,1	64,0
PR6	26,3	20,4	42,6	78,6	41,9
PR7	18,9	10,4	19,4	27,6	19,0
PR8	34,0	34,5	65,3	77,0	52,7
PR9	62,7	51,2	66,8	52,0	58,1
PR10	99,5	100,0	75,0	91,7	91,5
<b>MÉDIA</b>	<b>61,7</b>	<b>56,6</b>	<b>67,2</b>	<b>70,7</b>	<b>64,0</b>

Ao proceder a análise do percentual de atendimento por Ponto de referência, ao invés de mensalmente por usuário, observa-se que o cenário 1 e 2 apresentaram índices de atendimento global ligeiramente maiores que os da análise anterior, respectivamente 61,7% e 56,8%, contudo, os cenários 3 e 4 continuam apresentando os índices mais satisfatórios. Tais cenários, como já mencionado, impõem uma prioridade de uso menor aos usuários de lançamento de efluentes, demonstrando a grande pressão exercida por esses usuários na bacia.

De um modo geral, percebe-se ainda que os usuários dos Pontos de referência 1, 2 e 4 são os mais privilegiados, em todos os cenários, com atendimento dos 90% do valor outorgado em todos os cenários, ou seja, não seriam submetidos a nenhum índice de racionamento. Os maiores índices de racionamento seriam impostos aos usuários do

ponto de referência 3, trecho que abriga os usuários de lançamento e de captação para abastecimento que apresentaram em média apenas 16,5% do valor outorgado atendido, bem como os usuários do ponto de referência 7, no trecho do rio Gramame à montante do reservatório da bacia, que apresentou em média apenas 19% do valor outorgado atendido.

Pode-se destacar também, que mesmo se colocando valores superiores para o abastecimento público na prioridade de uso, a alocação de água para esse usuário não foi garantida. E, por isso, se faz necessária a adoção de critérios complementares para se garantir 100% de atendimento na alocação de água para abastecimento, tendo em vista ser uso prioritário em situações de escassez hídrica, conforme a PNRH.

Ao término deste trabalho constatou-se que, em períodos de escassez hídrica, a infraestrutura atual que compreende a Bacia Hidrográfica do Rio Gramame não é capaz de atender as demandas necessárias para os usuários outorgados, sendo clara a necessidade de se instalar uma situação de racionamento na bacia em períodos de escassez, principalmente para os usuários dos pontos de referência 3 e 7.

O ponto de referência 3 apresenta resultados ainda piores, por abranger os usuários de diluição de efluentes (U12 e U13) que causam alarmes no sistema ao ultrapassar o limite de concentração admissível de DBO, prejudicando os demais usuários do ponto 3, em especial o usuário de abastecimento da cidade de João Pessoa (U11), que mesmo ao se atribuir um coeficiente de prioridade de uso superior ao demais usos da bacia, em consonância com a Lei nº 9.433/1997, não tem sua vazão requerida atendida, ocasionando conflitos entre os diversos usuários.

Os conflitos encontrados na bacia do rio Gramame podem ser classificados como conflitos de primeira ordem, motivados por destinação de uso, disponibilidade quantitativa e qualitativa, existentes entre usuários da mesma bacia, como ocorre no ponto de referência 3, e entre usos distintos, como ocorre entre os usuários de irrigação e abastecimento.

Algumas possibilidades vêm sendo propostas, para reduzir os problemas de conflitos entre os usuários da água, existentes durante períodos de estresse hídrico, como a construção de um reservatório de 41 hm<sup>3</sup> no rio Mumbaba, outro de 8hm<sup>3</sup> no alto Gramame, próximo a cidade de Pedras de Fogo, e a transposição de água da bacia Abiaí-Papocas para a bacia do rio Gramame (SEMARH, 2000). Esses cenários, dentre outros, foram estudados por Santos (2009) em uma análise multiobjetivo e multicriterial, com objetivo de se obter a melhor decisão a ser tomada para a ampliação da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Gramame. Essas intervenções na infraestrutura da bacia contribuiriam para o atendimento dos valores outorgados, bem como para o aumento de demanda previsto para os próximos anos.

Sem a construção dessas obras hidráulicas, uma medida que poderia auxiliar na distribuição de água para o ponto de referência 3 seria a adoção de critérios mais rígidos de controle de lançamento de efluente pelos usuários de diluição, de forma a minimizar

os danos causados na qualidade da água do manancial, contribuindo para uma redução significativa na quantidade de água outorgada para esses usuários.

Em relação à questão dos conflitos entre os irrigantes e a exportação de água para abastecimento de água para cidades além dos limites geográficos da bacia, pode ser proposto a utilização de mananciais subterrâneos para auxiliar na demanda requisitada pelo usuário de abastecimento, de forma a minimizar os conflitos existentes. Outra forma de minimizar esses conflitos seria a alocação da vazão excedente em anos com disponibilidade hídrica suficiente.

Ao decorrer do trabalho, limitações foram identificadas, principalmente, no que se refere a não consideração dos valores de oferta e demanda dos mananciais subterrâneos, estudos futuros poderiam ser realizados através da consideração integrada das vazões superficiais e subterrâneas, analisando assim o potencial hídrico da bacia do rio Gramame. Também sugere-se que seja analisada a inclusão de outros critérios para se promover o atendimento prioritário dos usuários de abastecimento humano e a atualização dos valores para simulações mais recentes.

Outro problema encontrado está no fato de existirem pontos de referência na bacia com valores outorgados superiores aos outorgáveis, decorrentes da adoção de critérios restritivos na emissão de outorgas pelo órgão gestor, principalmente em setores onde já existe a ocorrência de conflitos. Uma tentativa para a solução desse problema poderia estar na execução de projetos para repactuar a outorga existente, mediante critérios de outorgas mais adequados à situação real da bacia.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba. João Pessoa – PB: AESA, 2006.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Proposta de instituição do Comitê das Bacias Hidrográficas do Litoral Sul, conforme Resolução nº 1, de 31 de agosto de 2003, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba. João Pessoa – PB: AESA, 2004.

ALEMAR, A. Geopolítica das águas: o Brasil e o direito internacional fluvial. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, 2006.

ASSIS, W. D.; RIBEIRO, S. N.; COSTA, F. F.; MACHADO, E. C. M. N. Gestão de conflitos pelo uso da água em uma bacia Hidrográfica através da otimização da alocação da vazão excedente. João Pessoa – PB: Anais do SINGA, 2013.

ASSUNÇÃO, W. K. G.; COLANZI, T. E.; POZO, A. T. R.; VERGILIO, S. R. Reduzindo o custo do teste de integração com algoritmos evolutivos multiobjetivos e diferentes medidas de acoplamento. Natal – RN: Anais do VIII Encontro Nacional de Inteligência Artificial, 2012.

BATISTA, V. M.; GOMES, V. L. Análise de conflitos no processo decisório da cobrança no sistema de gestão hídrica do Estado da Paraíba. Bento Gonçalves – RS: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

BORSOI, Z. M. F.; TORRES, S. D. A. A política de recursos hídricos no Brasil. São Paulo: Revista BNDS, 1997.

BOUGUERRA, M. L. As batalhas da água: por um bem comum da humanidade. Tradução de João Batista Kreuch. Petrópolis, RJ: Vozes, 2004.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/19433.htm)> Acesso em 15 de outubro de 2013.

CAMPOS, N. O modelo institucional. In: CAMPOS, N.; STUDART, T. Gestão das águas: princípios e práticas. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

CAMPOS, N.; STUDART, T. Gestão das águas: princípios e práticas. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.

CAP-NET - INTERNATIONAL NETWORK FOR CAPACITY BUILDING IN INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT. Conflict Resolution and Negotiation Skills for Integrated Water Resources Management. 2008.

CAROLO, F. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: instrumento para o desenvolvimento sustentável? Estudos das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Brasília – DF: 2007.

CORDEIRO NETO, O. Conflitos no uso da água. I curso de especialização em gerenciamento socioambiental. Recife: UFPE/CHESF, 2005.

CUNHA, T. S.; LINHARES, F. M.; SANTOS, J. Y. G.; VIANNA, P. C. G. Mapeamento e tipologia dos conflitos pela gestão e controle das águas no Estado da Paraíba. Maringá – PR: Boletim de Geografia, 2012.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. Introduction to Evolutionary Computing. Spring, 2003.

FELINTO, C. M. R. Geoprocessamento como ferramenta no diagnóstico entre oferta e demanda hídrica na bacia do rio Gramame – PB. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2013.

GUIMARÃES, T. S. M. Apoio à síntese de modelos estruturais de software orientado a objetos utilizando algoritmos genéticos co-evolucionários, Tese de Doutorado, Programa

de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2005.

JACOBI, P. R.; BARBI, F. Democracia e participação na gestão dos recursos hídricos no Brasil. Florianópolis: Revista Katál, 2007.

LANNA, A. E. Inserção da gestão das águas na gestão ambiental. In: MUÑOZ, H. R. Interfaces da gestão de recursos hídricos: desafios da lei de águas de 1997. Brasília, Secretaria de Recursos Hídricos, 2000.

LANNA, A. E.; PEREIRA, J. S.; SILVA, L. M. Análise de critérios de outorga de direitos de uso da água. São Paulo: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1997.

LINDEN, R. Algoritmos genéticos: Teoria e Implementação. 2ª ed. São Paulo – SP: Brasport, 2006.

LUNARDI, G. M. A bacia hidrográfica do rio Tubarão e complexo Lagunar: educação ambiental e sustentabilidade sob a ótica de alunos e professores do ensino médio. Criciúma, 2005.

MACHADO, E. C. M. N. Metodologia multiobjetivo para alocação de vazão excedente em bacias hidrográficas. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2011.

MACHADO, P. J. O.; TORRES, F. T. P. Introdução à hidrogeografia. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MAUAD, F. F.; LIMA, G. Planejamento estratégico de Sistemas Hídricos. In: MARTINS, R. C.; VALÊNCIO, N. F. L. S. (Org). Uso e gestão dos recursos hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais. São Paulo: RiMa, v. I, p. 99-126, 2003.



MIERZWA, J. A. O uso racional e o reuso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria: Estudo de caso da Kodak brasileira. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2002.

MILOCA, S. M.; FARIA, T. M. B.; VOLPI, N. M. P. Aplicação de algoritmo genético multiobjetivo em otimização de portfólios. Rio de Janeiro – RJ: Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012.

MOTTA, R. S. Utilização de critérios econômicos para a valorização da água no Brasil. Rio de Janeiro – RJ: IPEA: 1998.

NASCIMENTO, N. O.; HELLER, L. Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. Rio de Janeiro: Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004.

NUNES, L.; FERNANDES, J.; CARDOSO, J.; PARENTE, J.; ALMEIDA, P.; BETTENCOUT, T. Disponibilidade de água doce no planeta: Existe água doce suficiente para satisfazer as necessidades do planeta? Lisboa, Portugal: Universidade do Porto, 2009.

OHLSSON, L. Environment, Scarcity and Conflict – A study of Malthusian concerns. Tese de Pós-Doutorado. Departamento de paz e desenvolvimento da pesquisa, Universidade de Göteborg, 2000.

OLIVEIRA, M. J. L.; LUNA, R. M. O papel da alocação negociada de água na solução de conflitos em recursos hídricos: o caso do conflito pelo uso da água do Açude Santo Antônio de Aracatiaçu – CE. Bento Gonçalves – RS: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

PARAÍBA. Decreto nº 19.260, de 31 de outubro de 1997. Disponível em:< [http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/decretos/estadual/19260\\_97\\_outorga\\_agua.pdf](http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/decretos/estadual/19260_97_outorga_agua.pdf)> Acesso em 19 de outubro de 2013.

PEIXINHO, F. C. Recursos hídricos, desenvolvimento sustentável, modelo de gestão. São Luiz – MA: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2010.

PEREIRA, E. M. Análise de conflitos pelo uso da água relacionados à oferta e demanda: bacia do rio Piracicaba – MG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. Perspectivas do meio ambiente mundial – GEO 3. Tradução de Sofia Shellard e Neila B. Corrêa. Brasília: IBAMA/Universidade Livre da Mata Atlântica – UMA, 2004.

PNUMA – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. GEO Brasil: recursos hídricos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/Agência Nacional de Águas, 2007.

RIBEIRO, W. C. Geografia política da água. Coleção Cidadania e Meio Ambiente. São Paulo: Annablume, 2008.

RUFINO, A. C. S.; VIEIRA, Z. M. C. L.; RIBEIRO, M. M. R. Análise de conflitos em bacias interestaduais. Revista brasileira de recursos hídricos, volume 3, n. 1, p. 45-56, 2006.

SANTOS, B. B. M.; GUSMÃO, P. P. Ampliando o debate sobre a lei das águas: uma consideração sobre os conflitos socioambientais. Bento Gonçalves – RS: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

SANTOS, J. J. S.; SILVA, C. J.; WANNER, E. F. Sintonia de parâmetros de algoritmos genéticos multiobjetivos para solução do treinamento de máquina de vetor suporte transdutivo. Ouro Preto – SP: Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 2009.

SANTOS, R. B. Avaliação de intervenções hidráulicas na bacia do rio Gramame-PB com o uso das técnicas de análise multiobjetivo e multicriterial. Tese de doutorado. Programa

de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2009.

SANTOS, V. S. Modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2011.

SANTOS, V. S. Um modelo de otimização quali-quantitativo multiobjetivo para o planejamento dos recursos hídricos superficiais, com aplicação à bacia do rio Paraíba. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2007.

SCHARDONG, A. Aplicação de algoritmos evolucionários à gestão integrada de sistemas de recursos hídricos. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2011.

SEMARH – SECRETARIA EXTRAORDINÁRIA DO MEIO AMBIENTE, DOS RECURSOS HÍDRICOS E MINERAIS DA PARAÍBA. Plano diretor de recursos hídricos da Bacia do rio Gramame. João Pessoa – PB: Governo do Estado da Paraíba, SEMARH, 2000.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento dos recursos hídricos. 2ª ed., Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2001.

SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R. A. Outorga de direito de uso de recurso hídricos: uma das possíveis abordagens. In: Machado, C. J. S. (Org): Gestão de Águas Doces. 1ª edição, Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, p. 134-178. 2004.

SIMÕES, M. S. Potencial poluidor das indústrias na Bacia do Rio Gramame – Riacho Mussuré. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. João Pessoa – PB: Universidade Federal da Paraíba, 2012.

SUDENE – SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. Plano de aproveitamento integrado dos recursos hídricos do nordeste do Brasil – Fase I: Conflitos inerentes aos aproveitamentos. v. 13, cap. 2. Recife – PE: SUDENE, 1980.

SUDERHSA – SUPERINTENDENCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual técnico de outorgas. Revisão 01. Disponível em: <[http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/manual\\_outorgas.pdf](http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/manual_outorgas.pdf)> Acesso em 13 de outubro de 2013, 2006.

THOMAZ, P. T. Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água vinculada à escassez. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2ª ed. Porto Alegre – RS: Editora da UFRGS, ABRH, 2000.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Recursos Hídricos no século XXI. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão dos recursos hídricos. São Paulo: Revista USP, 2006.

UNICEF – UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. Progress on sanitation and drinking-water. Genebra – Suíça: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2013.

VIEIRA, Z. M. C. L. Metodologia de análise de conflitos na implantação de medidas de gestão da demanda de água. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

VIEIRA, Z. M. C. L.; RIBEIRO, M. M. R. Análise de conflitos: Apoio à decisão no gerenciamento de demanda urbana de água. Revista brasileira de recursos hídricos, volume 10, n. 3, 2005.

WEBSTER, D.; LE-HUU, T. I. DRAFT – Guidelines on strategic planning and management of water resources. Water Resources Section, UNESCAP, 2003.

ZITZLER, E.; LAUMANN, M.; THIELE, L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Technical report 103, Zürich, Switzerland: Computer Engineering and Network Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2001.

**Wanessa Dunga de Assis** é Engenheira Ambiental, formada na Universidade Federal de Campina Grande (2014). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (2016) e Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental pela mesma universidade, na área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Atua como pesquisadora na área de recursos hídricos, especialmente na Gestão e Governança das Águas.

**Érica Cristine Medeiros Machado** é Professora Associada I do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, atuando nos cursos de Engenharia Civil e Engenharia Ambiental na Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental. Possui graduação em Engenharia Civil (2004), mestrado em Engenharia Civil e Ambiental (2006) e Doutorado em Recursos Naturais (2011) também pela Universidade Federal de Campina Grande. Atualmente realiza estágio pós-doutoral na Universidade Federal do ABC, na área de Planejamento e Gestão do Território.

