

# AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE INDICADORES ENTRE BACIAS DISTINTAS NO ESTADO DA PARAÍBA

*Francisco Fonseca<sup>1</sup>; Talita Gabrielle Aragão<sup>1</sup>; Wilson Fadlo Curi<sup>3</sup> & Rosire Catão Curi<sup>4</sup>*

**RESUMO** – Neste trabalho foi realizada uma comparação entre os indicadores de desempenho; confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade; do atendimento à demandas por reservatórios em duas bacias hidrográficas no estado da Paraíba. A simulação realizada através do programa de modelagem ACQUANET, buscou mostrar que diferentes bacias, apresentam riscos bem semelhantes, mesmo estando inseridas dentro de mesorregiões distintas com diferentes condições hidrometeorológicas dentro do estado. Uma das bacias hidrográfica é de pequeno porte, localiza-se na região da mata atlântica e possui grandes demandas de água, bem diferente da segunda que possui grandes dimensões, localiza-se na região semi-árida e possui uma demanda hídrica inferior. A partir destas simulações, diversos questionamentos foram feitos e respondidos através de diversos cenários, com simulações realizadas no software. A metodologia aplicada neste trabalho contribui para o planejamento do uso dos recursos hídricos, e serve para demonstrar que a realidade do risco de escassez no estado independe da posição geográfica e condições meteorológicas.

**ABSTRACT** – In this paper a comparison of sustainability, reliability, resilience and vulnerability indexes for meeting water demands requirements, between two catchments river basin in state of Paraíba–Brazil is performed. The simulations, performed with the ACQUANET DSS software, applied to different river basins, located at different mesoregions and hydro-meteorological conditions within the state, were designed to show that they have similar risks. One river basin is small and is located within the Mata Atlantic region, besides having several water use demands, the second one is very large and is located within the semiarid region, besides having little water use demands. From the results, several questions were formulated and answered through simulation scenarios. The method applied herein is a support contribution to water resources management and shows that the water scarcity risk in Paraíba state independes of a river basin geographic position and climate conditions.

**Palavras-chave:** indicadores de desempenho, simulação, operação em reservatório.

1) Mestrandos CAPES, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, CTRN/UFCG, Av. Aprígio Veloso 882, 58109-970. Campina Grande-PB; e-mails: [eng\\_fonseca4@yahoo.com.br](mailto:eng_fonseca4@yahoo.com.br), [talitagaby@yahoo.com.br](mailto:talitagaby@yahoo.com.br)

2 )Professor adjunto do Depto de Física, CCT/UFCG, Av. Aprígio Veloso 882, 58109-970. Campina Grande – PB. E-mail: [wfcui@yahoo.com.br](mailto:wfcui@yahoo.com.br)

3 )Professora adjunta do Depto de Engenharia Civil, CTRN/UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970. Campina Grande – PB. E-mail: [rosirescuri@yahoo.com.br](mailto:rosirescuri@yahoo.com.br)

## 1- INTRODUÇÃO

Reconhecidamente, a água hoje, é tratada como sendo um recurso natural que se encontra em processo de escassez. Não só pelos problemas de poluição, que diminui a qualidade, mas também pela disponibilidade em quantidade; Além disso, a questão espacial dessa disponibilidade gera diferentes perspectivas da gestão dos recursos hídricos, criando problemas conflitantes e a disputa pelo uso da água.

As técnicas empregadas para propor soluções para os problemas de gestão de recursos hídricos são complexas e exigem a utilização de várias ferramentas para fornecer respostas aos questionamentos sobre o uso das águas. A engenharia de recursos hídricos faz uso de técnicas computacionais, utilizando *softwares* com modernos métodos de modelagens matemáticas, podendo ser aplicado a sistemas de recursos hídricos simples ou complexos. A simulação busca apontar alternativas para disponibilizar quantidades de água suficiente para todo o sistema no tempo e no espaço escolhido.

A disponibilidade espacial é fator importante para o desenvolvimento das regiões. Só há crescimento econômico, quando existe a distribuição de água de modo a satisfazer as demandas requeridas. Quando a disponibilidade de água não atende a sua demanda, a busca por água se volta para outras regiões e a solução pode ser obtida através da construção de canais, adutoras e outras estruturas que permitam o acesso de todos à água. De qualquer forma, a engenharia de recursos hídricos serve para avaliar e, possivelmente, criar meios para disponibilizar a água em localidades com concentrações humanas que tenham déficit quanto à disponibilidade de água, enquanto se adequa ao padrão espacial da demanda e oferta.

Neste trabalho é apresentada uma comparação entre os indicadores de desempenho do atendimento à demanda por reservatórios (confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade), que inclui o reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), que abastece a cidade de Campina Grande e outras cidades de pequeno porte, e o sistema que abastece a grande João Pessoa, ambos inseridos em distintas bacias hidrográficas no estado da Paraíba.

## 2 - AS BACIAS HIDROGRÁFICAS E DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS EM ESTUDO

### 2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Gramame

Localizada entre as latitudes 7°11' e 7°23' sul e as longitudes 34°48' e 35°10' oeste, na região do litoral sul do estado da Paraíba, drena uma área de 589,10 Km<sup>2</sup>, o curso do rio principal tem 54,3 km de extensão (AESAs – 2006).

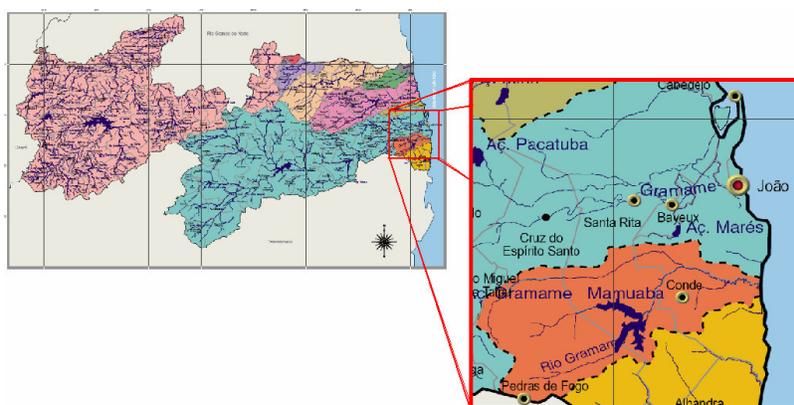


Figura 1-Localização da Bacia do Rio Gramame (AESAs, 2006)

Tem as nascentes dos principais rios que fazem a recarga do rio principal, localizada na sua grande maioria a sudoeste da bacia. As características do solo dão à bacia uma condição diferenciada da maior parte das bacias hidrográficas restantes do estado, sendo do tipo Podzólico Hidromórfico, um solo arenoso, com taxas de infiltrações altas e troca constante entre as águas subterrâneas e superficiais. Outro tipo de solo, o Podzólico Fragipân, com permeabilidade razoável também pode ser encontrado, este último tipo de solo, garante um bom escoamento subsuperficial ao longo de quase toda a bacia. Desta forma, o aquífero é o grande responsável pela recarga da bacia, as águas precipitadas são conduzidas facilmente para a calha dos rios.

O uso do solo é um dos maiores problemas da bacia, a vegetação nativa foi retirada para atender as demandas de empresas mineradoras para exploração do subsolo, das olarias e das panificadoras com seus fornos a lenha, a especulação imobiliária com a venda dos lotes, e finalmente para as atividades agrícolas com o cultivo de abacaxi, coco, mandioca inhame e principalmente a cana-de-açúcar. A mata atlântica ocupa apenas 6,5% da bacia, as ações antrópicas ficam na proporção de 87,1% (Santos *et al.*, 1998). A agricultura na região, que ocupa 96,5% da área da bacia, é significativamente baseada nas águas do açude Gramame-Mamuaba. Para o ano de 2007 está previsto uma retirada média de 2,61 m<sup>3</sup>/s (AESAs-2007) distribuída ao longo do meses, 11,32% dessas vazões outorgadas são retiradas antes mesmo de chegar ao reservatório.

A precipitação média anual varia entre 800 a 1.800 mm, tendo a maior parte concentrada nas áreas próximas ao oceano, diminuindo seu gradiente no sentido leste-oeste. Para este estudo foram utilizados 15 postos pluviométricos operados pela companhia de águas do estado, CAGEPA, com observações de 1972 a 1989.

Mesmo estando inserida na região litorânea do estado, em condições favoráveis para a recarga da bacia, entre os anos de 1997 e 1999, ocorreu uma crise no abastecimento d'água para a grande João Pessoa. A CAGEPA, deu solução ao problema de abastecimento através da exploração das águas subterrâneas, 900 l/s de água foram extraídos de 32 poços na Grande João Pessoa. Segundo

dados da companhia desde 2003 os poços são responsáveis por 10% do abastecimento anual. Um dos problemas da avaliação e espacialização das características dos poços foi à falta de dados cadastrais e estudos mais aprofundados sobre os aquíferos subterrâneos.

### 2.1.1 *Reservatório de Gramame-Mamuaba*

O sistema de reservatórios interligados Gramame-Mamuaba é considerado estratégico, pois é responsável por atender as demandas (de abastecimento e industrial) da chamada Grande João Pessoa, composta pelos municípios de João Pessoa, Bayeux, Cabedelo e o distrito de Várzea Nova no município de Santa Rita.

O sistema de reservatórios tem capacidade para 56.937 hm<sup>3</sup>. A bacia é considerada de médio porte com 589,1 km<sup>2</sup> e o principal curso d'água é o rio Gramame, com extensão de 54,3 km, sendo seus principais afluentes os rios Mumbaba, Mamuaba e Água Boa. Uma grande parte da contribuição é proveniente das águas subterrâneas, boa parte do solo da bacia são solos predominantemente Podzol Hidromórfico, que são solos arenosos e profundos com taxas de infiltração elevada e baixa retenção de água.

O sistema de reservatórios é operado para efetuar, também, uma transposição de águas para o açude de Marés, que fica localizado na bacia do rio Paraíba, e é responsável, em conjunto, pelo abastecimento da Grande João Pessoa, tanto para as demandas de abastecimento humano, como para as demandas da indústria. Essa transposição interbacias é uma regra de operação para o abastecimento de outras cidades circunvizinhas. Portanto, o estudo aqui realizado é efetuado considerando a bacia hidrográfica como um todo, incluindo as sub-bacias do açude Gramame-Mamuaba, a sub-bacia do rio Mumbaba e a sub-bacia do rio Marés, sendo que todas juntas são responsáveis pelo abastecimento da Grande João Pessoa.

## **2.2 Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba**

As características físicas da Bacia do Rio Paraíba marcam a extensão da região que abrange: desde o litoral paraibano até o planalto da Borborema (região semi-árida). Trata-se de uma bacia estadual (toda rede de drenagem pertencente ao Estado). A Bacia integra as mesorregiões da Borborema, Agreste Paraibano e Litoral Paraibano.

As nascentes do rio principal (rio Paraíba) ficam na mesorregião da Borborema, microrregião do Cariri Ocidental, nas proximidades do município de Sumé, no ponto de confluência dos rios do Meio e Sucurú. A desembocadura no Oceano Atlântico situa-se na altura do município de Cabedelo, próximo a João Pessoa.

A Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, com uma área de 20.071,83 km<sup>2</sup>, compreendida ente as latitudes 6°51'31" e 8°26'21" Sul e as longitudes 34°48'35" e 37°2'15" Oeste de Greenwich, é a

segunda maior do Estado da Paraíba, pois abrange 38% do seu território, abrigando 1.734.470 habitantes, que corresponde a 52% da sua população total. Além da grande densidade demográfica, nela estão incluídas as cidades de João Pessoa, capital do Estado e Campina Grande, seu segundo maior centro urbano (SEMARH, 2004).

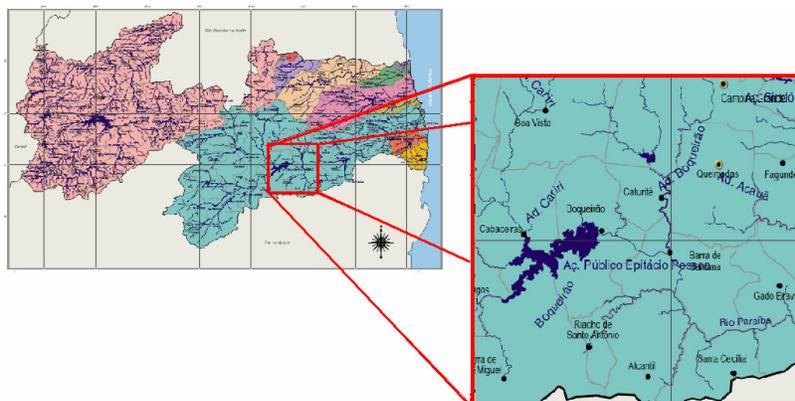


Figura 2-Localização da Bacia do Rio Paraíba – Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) (AESA, 2006)

Em razão da grande extensão geográfica e das diversidades de clima e das características físicas, sua caracterização é feita através das subdivisões: sub-bacia do rio Taperoá e as regiões correspondentes ao alto, médio e baixo cursos do rio Paraíba.

No médio curso existe o açude Epitácio Pessoa, o qual é estudado neste trabalho, localizado no município de Boqueirão, responsável pelo abastecimento de diversas cidades da região, inclusive o da segunda maior cidade do estado, Campina Grande.

Os solos predominantes na bacia do Alto Paraíba - PB são do tipo Bruno Não-Cálcico, que cobrem todo o cristalino existente na área da bacia. Este tipo de solo se caracteriza por ser pouco espesso, pedregoso e com permeabilidade moderada.

A vegetação predominante na região da bacia é a do tipo Caatinga. As espécies dominantes são: Caroá-Catingueira, Coroa de Frade, Faveleiro, Umburana, Umbuzeiro, Juazeiro, Jurema, Macambira, Marmeleiro, Mimosa, Mofumbo, Oiticica, Pinhão Bravo, Velame, e Xiquexique. Nas áreas desmatadas e utilizadas na agricultura, predomina as culturas de palma forrageira, agave, algodão, além e feijão.

### 2.2.1 Reservatório de Epitácio Pessoa (Boqueirão)

A bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa encontra-se geograficamente localizada no centro de uma região cercada por uma cordilheira fragmentada entre as coordenadas 07°28'04" e 07°33'32" de latitude sul e 36°08'23" e 36°16'51" de longitude oeste, a 420 m de altitude.

A contribuição dos afluxos para Boqueirão vem, principalmente, das sub-bacias do Alto Paraíba e do Taperoá. Os cursos de águas naturais que cortam a região em estudo e que beneficiam, de alguma forma, o solo e a produção agropecuária da região são os seguintes: Rio Paraíba, Riacho do Marinho Velho, Riacho da Perna, Riacho dos Canudos, Riacho da Ramada, Riacho da Relva e Riacho do Feijão.

A capacidade de acumulação deste açude vem diminuindo ao longo do tempo devido ao assoreamento de sua bacia hidráulica. A sua bacia de contribuição cobre uma área de 12.410 km<sup>2</sup>. Este tem como finalidade a perenização do rio Paraíba e o abastecimento d'água dos seguintes Sistemas Adutores: Sistema Campina Grande, Sistema Adutor do Cariri e Sistema Canudos (desativo atualmente).

### **3- DADOS DE ENTRADA DO MODELO**

#### **3.1 Sistema de reservatórios Gramame-Mamuaba**

##### *3.1.1 Vazões Afluentes ao Reservatório*

A contribuição dos afluxos para o açude Gramame-Mamuaba vem da sua rede hidrográfica formada pelo rio principal Gramame e seus afluentes na margem direita: rio Utinga, rio Pau Brasil, riacho Pitanga, riacho Ibura, riacho Piabuçu, rio Água Boa; e na margem esquerda: riacho Santa Cruz, riacho da Quizada, riacho do Bezerra, riacho do Angelim, riacho Botamonte, riacho Mamuaba, rio Camaço e rio Mumbaba.

Os dados fluviométricos utilizados nesse estudo foram obtidos do estudo de Sustentabilidade Hídrica do Açude Gramame-Mamuaba (AESAs, 2007), referente ao período de 1962-1991.

##### *3.1.2 Evaporação no Reservatório*

Os dados de evaporações médias mensais foram obtidos do banco de dados da AESA e corrigidos através do coeficiente mensal do tanque classe A para a região do Gramame-Mamuaba. A Tabela 1 apresenta o coeficiente mensal.

Tabela 1- Evaporação média mensal e coeficiente mensal do tanque classe A  
Evaporação (mm)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
158.9	139.5	118.0	89.2	86.8	94.8	95.2	68.2	152.3	149.0	91.0	70.1

#### **3.2 Reservatório Epitácio Pessoa**

##### *3.2.1 Vazões Afluentes ao Reservatório*

A contribuição dos afluxos para o açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) vem, principalmente, das sub-bacias do Alto Paraíba e do Taperoá.

Os dados fluviométricos utilizados nesse estudo foram obtidos do estudo de Sustentabilidade Hídrica do Açude Epitácio Pessoa (AAGISA, 2004), referente ao período de 1963-2002. A Tabela 2 apresenta os postos fluviométricos e sua área de contribuição.

Tabela 2 – Postos fluviométricos

Seção Transversal	Postos fluviométricos	Área de contribuição
Rio Paraíba	Caraúbas	5.092 km <sup>2</sup>
Rio Taperoá	Poços de Pedras	3.144 km <sup>2</sup>

### 3.2.1 Evaporação no Reservatório

Os dados de evaporações médias mensais foram obtidos da estação Climatológica da Bacia Escola, localizada em São João do Cariri-PB, para o período de 1987-2006, e corrigidos através do coeficiente mensal do tanque classe A para a região de Boqueirão, segundo Oliveira et al.(2005). A Tabela 3 apresenta os coeficientes mensais do tanque classe A, para o período de abril de 2002 a março de 2003 e a evaporação média mensal em S. J. do Cariri.

Tabela 3 – Evaporação média mensal e coeficiente mensal do tanque classe A

Mês	Tanque classe A	Evap. Média mensal (mm) S. J. Cariri	Evaporação Potencial (mm) Boqueirão
Jan	0,78	228,54	178,26
Fev	0,80	202,38	161,90
Mar	0,78	200,12	156,09
Abr	0,89	174,24	155,07
Mai	0,93	153,57	142,82
Jun	0,92	119,40	109,85
Jul	0,87	128,84	112,09
Ago	0,82	159,60	130,87
Set	0,76	197,16	149,85
Out	0,79	250,53	197,92
Nov	0,80	238,64	190,91
Dez	0,80	238,01	190,40
Anual		2291,03	1876,05

## 4- PROBLEMÁTICA E METODOLOGIA

### 4.1 Problemática

A bacia do rio Gramame é a terceira menor bacia hidrográfica do estado, possui 243,87 hm<sup>3</sup>/ano de disponibilidade máxima com garantia de 100% e suas demandas para o ano de 2008, segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos, são de 209,99 hm<sup>3</sup>/ano. Uma análise simples desses dados já aponta para a possibilidade de uma nova crise no abastecimento num futuro não muito distante, já que há uma utilização de 86,11% da disponibilidade.

A bacia do Paraíba é a segunda maior bacia hidrográfica do estado, possui 669,87 hm<sup>3</sup>/ano de disponibilidade máxima com garantia de 100% e suas demandas para o ano de 2008, segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos, são de 343,47 hm<sup>3</sup>/ano (PERH-2006). Há uma utilização de 51,27% da disponibilidade, o que deixa uma margem satisfatória para exploração.

A bacia hidrográfica é a unidade adequada para a análise das disponibilidades dos recursos hídricos e, em sua comparação com as demandas requeridas, leva a necessidade de um planejamento para o melhor uso e distribuição equitativa da água. Isso porque as atividades humanas dependem dessa disponibilidade e só há desenvolvimento se o abastecimento for garantido. Logo a água é um fator de necessidade para a expansão econômica e social.

Segundo Campos (2003), a gestão da alocação das disponibilidades entre as demandas deve ser compreendida e analisada sob perspectivas diversas, do uso individual aos interesses coletivos. Historicamente é possível verificar a existência de conflitos causados pelas necessidades demandadas, mas não atendidas, pelos usuários e a busca continua por novos locais de exploração de água. O índice de crescimento da população da Paraíba é de apenas 2,75% entre 1991 e 2000, segundo dados do PERH. No período de 1995 a 1997 o crescimento econômico na microrregião de João Pessoa foi de 69,4%, e o de Campina Grande 19,5%, segundo dados mais atuais do IBGE de 2004, esses crescimentos passaram a ser, respectivamente, 53,7% e 13,8%. Isso evidencia que, após a crise no fornecimento de água durante os anos de 1998 e 1999, o crescimento foi reduzido e pouco foi feito em termos de evitar uma nova crise. O planejamento da gestão dos recursos hídricos em termos de oferta-demanda deve ter horizonte de planejamento curtos entre 2 e 20 anos, deve-se evitar soluções com altos custos de investimento e partir do princípio que a água deve ter um valor, não apenas simbólico, mas um valor significativo para que os usuários façam o melhor uso possível.

Os instrumentos para a gestão da demanda podem ser classificadas em três tipos, segundo Studart (2003): **medidas conjunturais, incentivos e intervenção direta**. As **medidas conjunturais** nada mais são do que o estabelecimento de regras básicas para o uso da água, leis formais e informais, de modo que o usuário passe a agir de forma mais racional quanto ao uso. Os **incentivos** são feitos na busca de um entendimento sobre a conservação e a realocação da água. As **intervenções diretas** é a parte que cabe ao poder público no sentido de manter a eficiência da rede de distribuição, seja com ampliação, melhoramento, reciclagem, reuso e diminuição da poluição e do desperdício.

Como base nessa explanação das disponibilidades, demandas, crescimento sócio-econômico e gestão das demandas, são feitas as avaliações de destas duas bacias hidrográfica no estado da Paraíba, que apresentam características bem distintas, com tamanhos e usos de diferentes proporções. Neste sentido, procurar-se-á estabelecer índices de sustentabilidade, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade como forma de avaliar a necessidade de se observar e analisar estes

recursos hídricos de uma forma integrada, ou seja, estabelecendo-se indicadores para verificar o requerimento de soluções de medidas conjunturais, incentivos e intervenção direta e verificar possíveis similaridades em bacias hidrográficas diferentes.

## 4.2 Metodologia

Para estabelecer os índices de sustentabilidade, metodologia desenvolvida neste trabalho, fez-se uso do ACQUANET, um software, baseado em programação linear via de rede de fluxo, para realizar simulações de cenários de demanda atuais e futuras, conforme serão definidos posteriormente neste artigo.

Foram utilizados dados de entrada como séries históricas de vazão, dados de evaporação das bacias, demandas atuais, de acordo com informações da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), e dados de demandas disponibilizados pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA). Os cenários de demandas futuras foram obtidos através dos planos diretores das bacias e, para o reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), foram estimadas a partir de modelos matemáticos de previsão de população de crescimento populacional selecionados por localidades, disponível no estudo de Sustentabilidade Hídrica do Açude Epitácio Pessoa (AAGISA 2004).

De posse dos resultados da simulação gerada, determinou-se os indicadores de desempenho do atendimento à demanda pelos reservatórios. Os resultados dos dois sistemas foram confrontados e pode-se inferir algumas idéias sobre uma análise dos instrumentos de gestão da demanda como: medidas conjunturais, incentivos e intervenção direta foi analisada.

## 4.3 O modelo ACQUANET

O modelo de rede de fluxo ACQUANET foi desenvolvido para simulação e análise de fluxo de água em bacias hidrográficas, com vistas à resolução de problemas de alocação de água em bacias complexas. O modelo se baseia em um algoritmo que tem como base o balanço hídrico para a simulação do sistema, efetuando-se otimizações da alocação de água entre as demandas para cada mês, segundo Albano (2004). O modelo permite ainda, que o usuário monte redes com um grande número de reservatórios, acrescente as demandas necessárias com seus respectivos canais de ligação e integração, de acordo com a análise a ser representada através do esquema montado.

Os limites restritivos em cada arco do sistema e os atendimentos desejados para o equilíbrio das massas, são representados na rede de fluxo. O ACQUANET é capaz de armazenar todos os dados e apresentar os resultados através de um bando de dados do *Microsoft Access* permitindo o aproveitamento da estrutura e a funcionalidade da utilização dos arquivos neste formato.

As características do ACQUANET são de realizar simulação de rede de fluxo de volumes armazenados em represas e da distribuição de vazões em um sistema complexo de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica, inclusive a operação de represas em intervalos de tempo semanal ou mensal; inclui a capacidade de otimizar a operação de sistemas mediante a utilização de um algoritmo desenvolvido especificamente para a solução eficiente de problemas de minimização de custos em redes de fluxo. Os custos, nesse caso, não precisam ser monetários, podendo representar fatores hierárquicos ou de ponderação que sirvam para colocar as alternativas operacionais em ordem de prioridade; o modelo pode ser usado para formulação de diretrizes operacionais de curto prazo (semanal) ou em longo prazo (sazonal ou plurianual). A otimização da rede, para atender as metas operacionais, é executada semanal ou mensalmente de forma seqüencial, e não por um processo que contabilize todo o período de tempo.

Os sistemas de recursos hídricos podem ser representados como rede de fluxo, onde existem os nós de volume, onde são armazenados os volumes de água; os nós de passagem, onde são feitas as distribuições de demanda, perda, influxos, vazões e infiltrações; existem, também, os elos de ligação, por onde segue o fluxo de massa com sentido unidirecional. Então, todos os nós e elos quem compõe o sistema são dotados de limites, deixando que suas capacidades mudem ao longo do tempo. Quando maior for o número de nós existente na rede, maior é a precisão da simulação executada.

Foi utilizado o modelo em simulação contínua, onde o usuário define um volume inicial para cada represa, a partir daí, a rede é simulada continuamente ano após ano até o último mês da série.

Como se trata de um modelo composto de elos e nós, o inconveniente do modelo é que ele considera a otimização a cada mês, ao invés da série inteira, isso pode levar o modelo a apresentar níveis do reservatório com valor zero em determinados intervalos de tempo. Isso pode ocorrer quando o volume operacional real da represa for utilizado, logo deve ser interpretado que o nível d'água mínimo operacional foi atingido, restando ainda o volume morto acrescido do volume de referencia mínimo.

#### **4.4 Cenários avaliados**

Para a realização da simulação foram escolhidos dois cenários de demandas: cenário 1 e cenário2.

##### *4.4.1 Cenário 1 – Demandas atuais*

Este cenário visa avaliar os desempenhos dos sistemas com as demandas atuais de abastecimento e irrigação, tanto para a Grande de João Pessoa, como também para o compartimento do Cariri e Campina Grande, utilizando toda a série de dados hidrológicos disponível para cada

reservatório. Os dados de irrigação para os reservatórios foram extraídos do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PERH-PB).

#### 4.4.2 Cenário 2 – Projeção populacional para o ano de 2020

Este cenário visa avaliar o comportamento dos sistemas para o ano de 2020.

As demandas para o abastecimento, irrigação e indústria do sistema da Grande João Pessoa, foram obtidas através do Plano de Bacia do rio Gramame (AESAs – 2006).

As demandas de abastecimento para o reservatório de Boqueirão foram retiradas de um estudo de sustentabilidade hídrica do reservatório (AAGISA 2004). Para demandas de irrigação, o estudo anteriormente mencionado aponta um valor de aproximadamente 450 l/s para adoção de um regime único de exploração, associado a um nível de alerta.

### 4.5 Indicadores de desempenho

Os sistemas foram avaliados através da análise dos índices de desempenho: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Esses índices foram propostos por Hashimoto et al. (1982) e fornecem formas de avaliar os efeitos das regras de operação e auxilia na avaliação de futuros projetos a serem implantados (Vianna e Lanna, 2002).

Segundo Srinivasan et al (1999) *apud* Celeste (2006), as falhas em operação de sistemas de reservatório de abastecimento de água são frequentemente inevitáveis durante períodos hidrológicos críticos. As falhas que caracterizam cada sistema podem ser representadas pelos indicadores de desempenhos: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Esses três indicadores de desempenho, juntos, são responsáveis por caracterizar o “risco” para operação e planejamento de reservatório.

Seja  $D_{i,l}$  a  $i$ -ésima demanda do reservatório  $l$  e  $Q_{t,i,l}$  os volumes fornecidos pelo reservatório  $l$  para o atendimento da demanda  $D_{i,l}$  no horizonte de  $t = 1, \dots, NT$ . Separam-se os valores satisfatórios  $S$  dos insatisfatórios  $I$  de modo que uma falha ocorra quando  $Q_{t,i,l} < D_{t,i,l}$ . Seja  $NF_{i,l}$  o número total de intervalos de tempo no qual  $Q_{t,i,l} < D_{t,i,l}$  e seja  $d_{i,l,j}$  a duração  $j$ -ésimo evento de falhas,  $j = 1, \dots, M_{i,l}$ , onde  $M_{i,l}$  é o número de eventos insatisfatórios da  $i$ -ésima demanda do reservatório  $l$ .

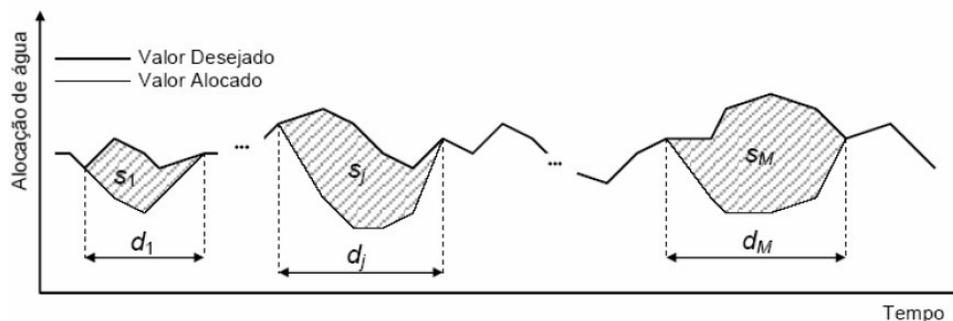


Figura 3-Duração e volume de déficit em período de falha (Santos, 2006)

#### 4.5.1 Confiabilidade

A Confiabilidade ( $Conf_{i,l}$ ) do atendimento à demanda  $i$  pelo reservatório  $l$  é a probabilidade da série temporal permanecer em estado satisfatório  $S$  durante o horizonte de operação, ou seja, a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas:

$$Conf_{i,l} = prob\{Q_{t,i,l} \in S\} = prob\{Q_{t,i,l} = D_{t,i,l}\} = 1 - \frac{NF_{i,l}}{NT} \quad (1)$$

Simplificadamente, a confiabilidade pode ser definida também como:

$$Conf = \frac{n^\circ \text{ de valores simulados na zona satisfatória}}{n^\circ \text{ de períodos simulados}} \quad (2)$$

#### 4.5.2 Resiliência

A resiliência avalia a média do quão rapidamente o sistema retorna a um estado satisfatório de atendimento a demanda, uma vez que a falha tenha ocorrido. A Resiliência ( $Res_{i,l}$ ) da demanda  $i$  do reservatório  $l$  é a probabilidade de haver um estado satisfatório no período  $t+1$  dado um valor insatisfatório no período  $t$ :

$$res_{i,l} = prob\{Q_{t+1,i,l} \in S | Q_{t,i,l} \in I\} = prob\{Q_{t,i,l} = D_{t,i,l} | Q_{t,i,l} < D_{t,i,l}\} \quad (3)$$

A Resiliência, também, é definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório.

$$res_{i,l} = \frac{1}{E\{d_{i,l,j}\}} = \left[ \frac{1}{M_{i,l}} \sum_{j=1}^{M_{i,l}} d_{i,l,j} \right]^{-1} \quad (4)$$

E ainda, a resiliência pode, simplificadamente ser definida como:

$$res = \frac{n^\circ \text{ de valores simul. na zona insatisfatória seguidos de valores satisfatório}}{n^\circ \text{ de períodos simulados na zona insatisfatória}} \quad (5)$$

Um sistema que tenha muitas falhas, mas tende a se recuperar rapidamente é, em alguns casos, preferível a um sistema com poucas falhas, mas o qual as se recuperem lentamente (Vianna e Lanna, 2002).

#### 4.5.3 Vulnerabilidade

A Vulnerabilidade ( $Vul_{i,l}$ ) do atendimento à demanda  $i$  pelo reservatório  $l$  mede a magnitude das falhas a que o sistema está sujeito. Ela pode ser definida como a média do percentual de déficits do conjunto de todos os valores insatisfatórios.

$$Vul_{i,l} = \frac{1}{NF_{i,l}} \sum_{t=1}^{NT} \left| \frac{D_{t,i,l} - Q_{t,i,l}}{D_{t,i,l}} \right| \quad (6)$$

Será analisado o déficit máximo ( $defmax_{i,l}$ ) ocorrido para cada demanda  $i$  de cada reservatório  $l$ .

#### 4.5.4 Sustentabilidade

Loucks (1997) *apud* Kjeldsen e Rosbjerg (2001) propuseram um índice de sustentabilidade geral definido por:

$$Sust_{i,l} = Conf_{i,l} \cdot res_{i,l} \cdot [1 - Vul_{i,l}] \quad (7)$$

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse dos dados, foi utilizado o modelo de simulação ACQUANET para uma série fluviométrica de 40 anos para o reservatório de Boqueirão, e de 30 anos para o reservatório de Gramame-Mamuaba e Marés, a fim de verificar o comportamento de cada um deles em atender as demandas hídricas relativa a cada cenário.

A Tabela-4 apresenta os resultados da simulação, ou seja, os estados em que os atendimentos às demandas de cada reservatório se mantiveram durante os meses simulados. Esses estados são definidos como: estado satisfatório, aquele onde o reservatório atende na íntegra as demandas solicitadas e estado de falha, aquele onde o reservatório não supre na íntegra as demandas solicitadas.

### 5.1 Cenário 1 – Demandas atuais

Tabela 4 – Resultados da simulação dos reservatórios para o cenário 1

Resultados da simulação do reservatório de Boqueirão para as respectivas demandas			
	Adutora de Campina Grande	Adutora do Cariri	Irrigação
$M_s$	480	480	480
$M_f$	0	0	0
$M_{f-s}$	0	0	0
Déficit Hídrico total (hm <sup>3</sup> )	0	0	0
Resultados da simulação do reservatório de Gramame-Mamuaba para as respectivas demandas			
	Demanda da Grande João Pessoa	Demanda de Indústria	Irrigação
$M_s$	360	360	360
$M_f$	0	0	0
$M_{f-s}$	0	0	0
Déficit Hídrico total (hm <sup>3</sup> )	0	0	0

$M_s$  – Quantidade de meses em que o sistema se encontrou em estado satisfatório

$M_f$  – Quantidade de meses em que o sistema se encontrou em estado de falha

$M_{f-s}$  – Quantidade de meses que o sistema estando em estado de falha, entra no mês seguinte em estado satisfatório.

## 5.2 Cenário 2 – Demandas projetadas para o ano de 2020

Tabela 5 – Resultados da simulação dos reservatórios para o cenário 2  
Resultados da simulação do reservatório de Boqueirão para as respectivas demandas

	Adutora de Campina Grande	Adutora do Cariri	Demanda da Irrigação
$M_s$	463	462	462
$M_f$	17	18	18
$M_{f-s}$	4	4	4
Déficit Hídrico total (hm <sup>3</sup> )	53,87	7,02	21,29

	Demanda da Grande João Pessoa	Demanda de Indústria	Demanda da Irrigação
$M_s$	283	242	263
$M_f$	77	118	97
$M_{f-s}$	18	20	22
Déficit Hídrico total (hm <sup>3</sup> )	281,93	251,71	308,95

$M_s$  – Quantidade de meses em que o sistema se encontrou em estado satisfatório

$M_f$  – Quantidade de meses em que o sistema se encontrou em estado de falha

$M_{f-s}$  – Quantidade de meses que o sistema estando em estado de falha, entra no mês seguinte em estado satisfatório.

### 5.3 Indicadores de desempenho

Com o resultado da simulação para cada reservatório, foi possível calcular os indicadores de desempenho (Confiabilidade, Resiliência, Vulnerabilidade e Índice de Sustentabilidade Geral) do atendimento às demandas por cada reservatório, como um todo e com as demandas separadamente, que se encontram discriminadas na tabela abaixo.

#### 5.3.1 Cenário 1 – Demandas atuais

Tabela 6 – Indicadores de Desempenho dos reservatórios para o cenário 1

Indicadores do reservatório de Boqueirão			
	Demanda de Campina Grande	Demanda da Adutora do Cariri	Demanda da Irrigação
Confiabilidade	100%	100%	100%
Resiliência	-	-	-
Vulnerabilidade	-	-	-
Ind. Sustentabilidade do reservatório	-	-	-

Indicadores do reservatório do sistema Gramame-Mamuaba			
	Demanda da Grande João Pessoa	Demanda da Indústria	Demanda da Irrigação
Confiabilidade	100%	100%	100%
Resiliência	-	-	-
Vulnerabilidade	-	-	-
Ind. Sustentabilidade do reservatório	-	-	-

O reservatório de Boqueirão e o sistema Gramame-Mamuaba obtiveram 100% de confiabilidade no atendimento as suas demandas, logo não há necessidade de se calcular os demais

índices, tendo em vista que o sistema não falhou. Pela simulação realizada, os resultados retratam o comportamento do sistema, no seu estado atual, sem falhas, atendendo as demandas, conforme o modelo de operação da CAGEPA.

A simulação para o cenário atual considerou o sistema de Boqueirão sem liberação de descarga de fundo, pois esta decisão foi tomada após o colapso hídrico existente entre 1998 à 2003, que, por ordem judicial, foi fechada a comporta pela qual liberava-se água sem controle algum para regularizar o rio Paraíba. Pode-se observar que sem essa liberação de água o reservatório obteve condições de atender a todas as demandas inclusive a irrigação que é, atualmente, uma demanda judicialmente proibida.

A crise no abastecimento d'água em 1998, também resultou em ações judiciais para o lacre de bombas para irrigação a montante do reservatório do sistema Gramame-Mamuaba, a simulação foi realizada sem considerar as retiradas à montante, o que fatalmente levará o sistema ao colapso.

### 5.3.2 Cenário 2 – Demandas projetadas para o ano de 2020

Tabela 7 – Indicadores de Desempenho dos reservatórios para o cenário 2

Indicadores de desempenho do reservatório de Boqueirão			
	Demanda de Campina Grande	Demanda da Adutora do Cariri	Demanda de Irrigação
Confiabilidade	96,46%	96,25%	96,25%
Resiliência	23,53%	22,22%	22,22%
Vulnerabilidade	86,09%	98,88%	100%
Índice Sustentabilidade Geral	3,16%	0,24%	0,00%
Indicadores de desempenho do reservatório do sistema Gramame-Mamuaba			
	Demanda da Grande João Pessoa	Demanda da Indústria	Demanda da Irrigação
Confiabilidade	78,61%	73,06%	67,22%
Resiliência	23,37%	22,68%	16,95%
Vulnerabilidade	36,57%	92,46%	91,00%
Índice Sustentabilidade Geral	11,65%	1,24%	1,03%

Para o cenário 2, observou-se que o atendimento as demandas pelo reservatório de Boqueirão, obteve um elevado indicador de confiabilidade (96,46%) para a demanda de Campina Grande e o mesmo valor para a demanda da adutora do Cariri e a irrigação (96,25%). O atendimento às demandas pelo reservatório ainda apresentou baixos valores dos indicadores de resiliência, (23,53% para a demanda de Campina Grande e 22,22% para as demais). Observou-se, ainda que o sistema demora muito para se recuperar quando entra num estado de falha, já que este indicador representa o quão rapidamente o sistema retorna de uma falha caso essa tenha ocorrido. O atendimento às demandas pelo reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), apresenta uma alta vulnerabilidade, ou seja, quando ocorrem falhas, estas são bastante severas (86,09% para demanda de Campina Grande,

98,88% e 100% para a demanda da adutora do Cariri e irrigação, respectivamente), mesmo com sua grande capacidade de acumulação que chega a 411.686.000 m<sup>3</sup>, caracterizando-o como um açude de grande porte, segundo a classificação do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba – PDRH-PB. Isso significa que os afluxos de montante do reservatório são insuficientes para o aumento das retiradas de água. Logo, com relação aos índices de sustentabilidade do sistema, para o cenário 2, obteve-se resultados realmente preocupantes: o índice para o atendimento à demanda de Campina Grande apresentou apenas 3,16%, o compartimento do Cariri, onde há vários municípios, apresentou sustentabilidade 0,24%. Em caso de colapso do sistema, as demandas para irrigação seriam descartadas para manter as demandas para abastecimento humano.

O sistema de Gramame-Mamuaba obteve um razoável indicador de confiabilidade (78,61%) para a demanda da Grande João Pessoa, o valor para o atendimento à demanda da indústria (73,06%) é também razoável, indicando-se permitir sua expansão. Para a demanda de irrigação a situação apresenta-se com menor confiabilidade (67,22%). O sistema apresentou baixos valores nos indicadores de resiliência: 23,37% para a demanda de abastecimento humano da Grande João Pessoa, 22,68% para a indústria e apenas 16,95%, baixa capacidade de recuperação, para irrigação. É possível observar que há uma demora na recuperação do reservatório ao atendimento a demanda, com períodos de mais de 12 meses em estado de falha.

A vulnerabilidade apresentou na maioria valores altos, ou seja, sérias crises de atendimento às demandas no caso de falhas demonstram que o reservatório é muito vulnerável: 36,57% para abastecimento humano da Grande João Pessoa, a indústria apresentou 92,46% e a irrigação foi de 91,00%.

Em conclusão, a existências de baixos índices de sustentabilidade para o sistema é decorrente dos resultados insatisfatórios dos indicadores de resiliência e vulnerabilidade, ou seja: para a demanda de abastecimento humano 11,65%, demanda para irrigação 1,03% e para a indústria 1,24%.

## **6- CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As incertezas da gestão dos recursos hídricos causadas pela aleatoriedade dos eventos hidrológicos, associadas às componentes de desenvolvimento sócio-ambiental que podem interferir na velocidade das ações a serem adotadas na gestão das demandas, geram os riscos da gestão hídrica. O risco pode ser compreendido como sendo a probabilidade de um evento indesejado ocorrer, no nosso em estudo trata-se do não atendimento as demandas futuras.

O gerenciamento do risco torna o uso dos recursos hídricos mais eficientes. No entanto, é necessário verificar a intensidade desse risco e tomar decisões para implantar medidas preventivas

para que as demandas sejam atendidas com o nível de garantia aceitável. Dentro deste contexto, foi determinado, neste trabalho, os índices de confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade e sustentabilidade para o atendimento às demandas pelos sistemas envolvendo os reservatórios Epitácio Pessoa, na bacia do rio Paraíba, e Gramame-Mamuaba, na bacia do rio Gramame.

O indicador de confiabilidade para o sistema Gramame-Mamuaba apresentou ser razoável (o maior foi de 78,61%), enquanto para o sistema envolvendo o reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão) foi muito satisfatório (superior a 96%), indicando que Boqueirão venha a falhar menos do que o sistema Gramame-Mamuaba.

Os índices de resiliência, de ambos os reservatórios, apresentaram ser numericamente iguais, principalmente no atendimento as demandas de abastecimento humano das duas principais cidades do estado. Esse indicador apresenta valores semelhantes devido às características hidrológicas e de demandas em cada bacia. A bacia do Gramame-Mamuaba tem pequeno porte, um alto valor de afluxos e, no entanto, apresenta grandes demandas para abastecimento humano e industrial. A bacia do Boqueirão tem grande porte, baixos afluxos e demandas modestas para abastecimento humano.

A disparidade da vulnerabilidade entre os sistemas ocorre devido aos fatores hidrológicos das regiões que distinguem o litoral do sertão. Os altos índices de precipitação no litoral permitem diminuir a vulnerabilidade do sistema Gramame-Mamuaba, o contrário é verificado no sistema do reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), no qual devido aos períodos de estiagem mais longos, chega-se a índices de até 100% de vulnerabilidade para a irrigação.

A gestão da oferta-demanda para a realidade paraibana aponta para a realização de uma gestão integrada. Medidas conjunturais, como a realocação de água, que vem ganhando importância rapidamente no cenário mundial, podem ser aplicadas de forma a atender os requerimentos hídricos das duas bacias. Observa-se que, na medida em que há aumento nas demandas e as atividades econômicas se expandem, o suprimento de água, limitado em sua disponibilidade, se torna insuficiente. Uma possível solução, através de medidas não estruturais, seria a realocação do uso da água através da transferência de outorga de direito de uso que contemplasse, no seu bojo, critérios de eficiência de seu uso.

Tanto na bacia do sistema Gramame-Mamuaba quanto na bacia do rio Paraíba, os usos da água, para outros fins que não o abastecimento humano, apresentaram altos valores de vulnerabilidade de atendimento à demanda, o que permite sugerir a transferência de outorgas de direito de uso, onde as alocações de água para irrigação e indústria podem ser transferidas, a partir da sanção governamental. Atualmente o veto governamental ocorre por meio de ações judiciais, que impedem o uso da água bruta captada a montante dos reservatórios.

Medidas de incentivos já foram adotadas em anos anteriores, principalmente no período de estiagem, através do racionamento de água e rodízio de distribuição por bairros. Esse tipo de gestão

de demandas funciona como um caráter “punitivo” pelo mau uso e desperdício da água em períodos de chuvosos. No entanto, em períodos de estiagem é uma medida eficiente para manter o reservatório com níveis consideráveis de água. Uma das medidas de gestão da demanda pouco utilizada é o investimento maciço e efetivo em campanhas educativas, ressaltando e conscientizando a população que a água é um bem econômico e não facilmente renovável.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, pela a realização deste trabalho.

## **BIBLIOGRAFIAS**

AAGISA (2004). Sustentabilidade Hídrica do Açude Epitácio Pessoa. João Pessoa: Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba – PB.

AESA (2007). Agência Executiva de Gestão das Água. *Análise da influência das captações à montante na operação do sistema Gramame-Mamuaba*, João Pessoa, 7p.

ALBANO, G.D (2004). *Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (ACQUANET) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1) estudo de caso: represa Jaquari-Jacareí – Sistema Cantareira*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 230p.

CAMPOS, N. e STUDART, T.M.C.(2003). *Gestão das águas: princípios e práticas*, 2ª ed. Porto Alegre: ABRH Editores.

HASHIMOTO, T.; STENDINGER, J.R.; LOUCKS, D.P.(1982). *Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*. Water Resources. Res., 18(1), pp 14-20.

OLIVEIRA, G.M.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; GALVÃO, C. O e LEITÃO, T.J.V. (2005). Estimativa da Evaporação e Análise do Uso do Coeficiente (Kp) do tanque “CLASSE A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 10, n.4 p.73-83.

PERH-PB (2006). Plano Estadual de Recursos Hídricos (2006). “*Resumo Executivo & Atlas*. Brasília: Governo do Estado da Paraíba; Secretária de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, SECTMA.

SANTOS, J. B.(1998). *Análise de áreas para preservação e conservação dos cursos d’água da bacia do rio Gramame*. – Universidade Federal da Paraíba- UFPB.

SEMARH (2004). Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba – PERH/PB. Relatório Parcial da Consolidação de Informações e Regionalização. Resumo Executivo. João Pessoa: Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH..

SRINIVASAN, K., NEELAKANTAN, T.R.; NARAYAN P.S., NAGARAJUKUMAR, C. (1999). Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n.5, p. 298-301. Set/out. *Apud CELESTE, A.B. (2006). Determinação e análise de indicadores de desempenho e de sustentabilidade de seis açudes na bacia do rio Piancó-PB e de suas potenciais demandas*. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, área de concentração: Recursos Hídricos, UFCG, Campina Grande-PB, p. 119.

VIANNA, W.P., Jr.; LANNA, A.E.L. *Simulação e otimização de um sistema de reservatórios: bacia do rio Curu*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(3), pp 63-83.