

OPERAÇÃO PLURIANUAL E ÓTIMA DOS RECURSOS HÍDRICOS DOS RESERVATÓRIOS BOQUEIRÃO E ACAUÃ NO ESTADO DA PARAÍBA

Valterlin da Silva Santos¹ & Wilson Fadlo Curi²

RESUMO --- Em regiões semiáridas a escassez hídrica condiciona as atividades humanas e o desenvolvimento socioeconômico da região. Os modelos de otimização são ferramentas que podem estabelecer diretrizes e ações para um melhor aproveitamento, controle e conservação dos recursos hídricos, bem como analisar os benefícios oriundos da compatibilização entre a oferta e a demanda. Este trabalho apresenta um estudo da operação ótima multiobjetivo e plurianual dos recursos hídricos dos reservatórios Boqueirão e Acauã, situado na bacia do Rio Paraíba - PB. Os reservatórios tem como finalidade o abastecimento urbano, o atendimento das demandas hídricas de uma área irrigada e a perenização do rio Paraíba a jusante dos mesmos. Considerando suas afluições naturais, os resultados demonstram que a atividade agrícola pode ser desenvolvida no reservatório Epitácio Pessoa sem comprometer a demanda de abastecimento humano nas cidades desde que seja realizado um estudo de quais culturas agrícolas devam ser cultivadas e em qual época do ano. O reservatório Boqueirão não consegue atender integralmente a demanda estabelecida para a perenização do rio a jusante do mesmo. O reservatório Acauã não utiliza toda a sua disponibilidade hídrica, podendo utilizá-la para o cultivo de culturas agrícolas e a prática da piscicultura intensiva e/ou extensiva.

ABSTRACT --- The water shortage in semiarid regions conditions the type of human activities and, therefore, the social and economic development of the region. Optimization models are tools that can be used to establish actions and policies to improve the conservation, control and take advantage of water resources as well to analyze the benefits from the adjustment of water supply to its demand. This work presents a multi-annual monthly based multi-objective optimal operation for the water resources of Boqueirão and Acauã reservoirs, located in the Paraíba river basin. They are responsible for urban water supply, irrigation and downstream Paraíba's river flow regulation. Considering their natural inflows, the results have shown that, depending upon the selection of types of cultures and season of cropping, agricultural activities can be performed with the waters of Boqueirão reservoir without compromising its required urban supply, although it does not completely meet the established requirement of the downstream regulated flow. The Acauã reservoir does not make use of all water availability, which could be used for intensive or extensive fishing and agricultural purposes.

PALAVRAS-CHAVES: Otimização plurianual, operação de reservatórios.

¹Professor Adjunto da UACC/CCJS/UFPG, Rua Sinfrônio Nazaré 38, 58800-240. Sousa, PB. E-mail: valterlin@yahoo.com.br

²Professor Associado da UAF/CCT/UFPG, Av. Aprígio Veloso 882, 58109-970. Campina Grande, PB. E-mail: wfcuri@pesquisador.cnpq.br

1 – INTRODUÇÃO

Na região semi-árida do Nordeste brasileiro, o desenvolvimento socioeconômico, e consequentemente a qualidade de vida da população, é fortemente relacionado à disponibilidade hídrica da região. A região apresenta chuvas bastante irregulares a nível espaço-temporal, índices pluviométricos baixos e com perdas evaporativas nos reservatórios muito altas quando comparadas a outras regiões do Brasil.

Os reservatórios constituem-se nos mais importantes elementos que compõem os sistemas de aproveitamento de recursos hídricos de superfície dessa região. Porém precisam ser gerenciados eficientemente a fim de possibilitar a atenuação do desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, possibilitando o desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos que usam a água como insumo básico.

O reservatório Epitácio Pessoa (mais conhecido como Boqueirão) está localizado no limite entre as Regiões do Alto e do Médio Curso do rio Paraíba. Com uma capacidade de armazenamento de 411 milhões de metros cúbicos (2º maior do Estado da Paraíba) suas águas são utilizadas para o abastecimento público de diversos municípios, incluindo a cidade de Campina Grande, 2ª maior cidade do Estado da Paraíba; para a perenização do trecho do rio Paraíba a jusante do reservatório; para o abastecimento rural e dessedentação animal das propriedades situadas nas margens do açude; para a irrigação praticada por concessionários do DNOCS e particulares nas margens do açude (DNOCS, 2007 apud VIEIRA, 2008).

Nos últimos anos tem-se observado problemas de escassez hídrica decorrentes do uso da água para o abastecimento urbano e para a agricultura irrigada, principal atividade econômica da região. Durante a ocorrência da seca de 1997-1999, diante da ameaça de colapso total do abastecimento urbano, representado pelo baixo nível a que ficou reduzido o volume d'água acumulado no reservatório, foi necessário a implantação de um regime de racionamento da distribuição de água, que teve início no segundo semestre de 1998 e prolongou-se até os primeiros meses do ano 2000. Ao racionamento seguiu-se a suspensão, por medida judicial, da irrigação que vinha sendo praticada, sem nenhum controle técnico, nas margens do açude (Rêgo *et al.*, 2000) e o fechamento da comporta de descarga de fundo. Porém, depois de sucessivas cheias, a partir do ano de 2004, há uma pressão para o retorno das atividades agrícolas em torno do açude.

O reservatório Argemiro Figueiredo (conhecido como Acauã), localizado no limite entre as Regiões do Médio e do Baixo Curso do rio Paraíba e com uma capacidade de armazenamento de 253 milhões de metros cúbicos (3º maior do Estado da Paraíba), foi construído para gerar uma nova fonte de abastecimento para a cidade de Campina Grande e diversos municípios da região, além de outros usos, como piscicultura intensiva, perenização do rio Paraíba a jusante do reservatório, para

Tabela 1 – Características das regiões hidrográficas do rio Paraíba e da sub-bacia do rio Taperoá.

| Característica | Sub-bacia/Região hidrográfica | | | |
|---|-------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | Rio Taperoá | Alto Paraíba | Médio Paraíba | Baixo Paraíba |
| Área (km ²) | 5.666,38 | 6.717,39 | 3.760,65 | 3.925,40 |
| Precipitação (mm/ano) | 400 e 600 | 350 a 600 | 600 e 1.100 | 1.200 e 1.700 |
| Período de concentração da precipitação | Fev - mai | Fev - mai | Abr - ago | - |
| Evaporação (mm/ano) | 2500 a 3000 | 2500 a 3000 | 1.600 e 3.000 | 1.200 e 1.700 |

Fonte: PERH/PB (AESAs, 2010a)

Segundo informações do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESAs, 2010a) o clima na região em estudo, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSw'h', isto é, semi-árido quente, com temperaturas médias mínimas e máximas, respectivamente, variando entre 18 a 22°C e 28 a 31°C. A insolação na bacia apresenta variações nos valores médios mensais de janeiro a julho, cuja duração efetiva do dia é de 7 a 8 horas diária, e de agosto a dezembro, da ordem de 8 a 9 horas diária. A umidade relativa do ar na Sub-bacia do rio Taperoá e na Região do Alto Curso do rio Paraíba varia entre 60% a 75% observando-se que os valores máximos ocorrem, geralmente, no mês de junho e os mínimos no mês de novembro a dezembro. Nas regiões do Médio Curso do rio Paraíba a umidade relativa varia de 68% a 85%, com os valores máximos ocorrendo entre os meses de junho a agosto, e os mínimos, de novembro a janeiro.

3 – METODOLOGIA

3.1 – Dados do sistema

3.1.1 – Demandas hídricas

As demandas hídricas consideradas nos reservatórios dizem respeito ao abastecimento urbano de 27 cidades através das adutoras, irrigação de uma área de 1020 hectares nas margens do reservatório Boqueirão e a perenização do rio Paraíba a jusante dos reservatórios. A Figura 2 apresenta o layout do sistema estudado.

O abastecimento urbano das 27 cidades é realizado através dos sistemas adutores Boqueirão e Cariri no reservatório Boqueirão e das adutoras Acauã – ramal norte, Acauã – ramal leste e Acauã – ramal oeste no reservatório Acauã.

Para a estimativa das demandas das adutoras consideradas, foi realizado um estudo, através de análise de regressão, do crescimento populacional das cidades atendidas e com previsão de atendimento pelas adutoras (Tabela 2), com base nos dados dos censos de 1980, 1991, 1996, 2000 e 2007 realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2009). O valor da demanda das adutoras foi obtido pelo produto da quota per capita de água da adutora pela população das cidades atendida pela adutora.

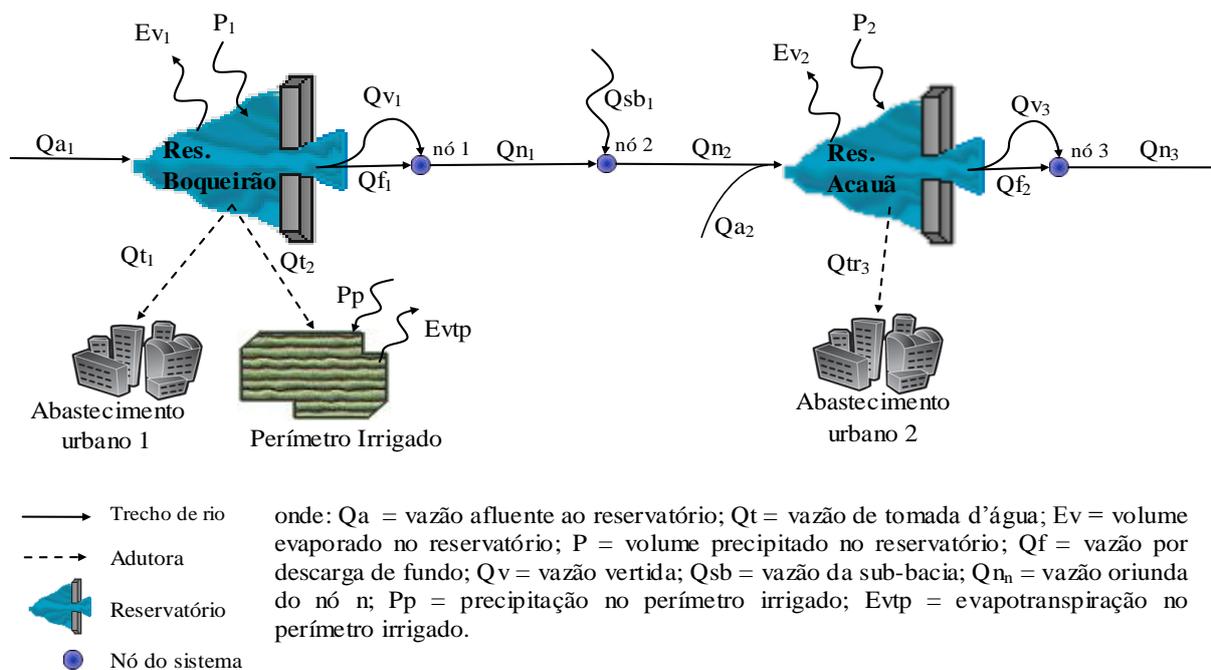


Figura 2 – Layout do sistema estudado.

Tabela 2 – Sistemas adutores do sistema estudado.

| Sistema Adutor | Cidades atendidas | Quota per capita (l/had/dia) |
|---------------------|--|------------------------------|
| Boqueirão | Campina Grande, Queimadas, Caturité, Pocinhos, Barra de Santana, Riacho de Santo Antônio, Barra de São Miguel, Alcantil. | 236,7 |
| Cariri | Boqueirão, Cabaceiras, Boa Vista, Soledade, Seridó, Olivedos, Juazeirinho, Cubati, Pedra Lavrada, Tenório. | 217,5 |
| Acauã – ramal norte | Itatuba, Fagundes, Ingá, Juarez Tavorá, Mogeiro, Riachão do Bacamarte | 192,0 |
| Acauã – ramal leste | Itabaiana, Juripiranga, Salgado de São Felix, Pilar, São Miguel de Taipu. | 193,0 |
| Acauã – ramal oeste | Gado Bravo, Aroeiras | 200,0 |

A quota per capita das Adutoras de Boqueirão e do Cariri foi determinada através dos dados fornecidos pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA), através da Gerencia da Divisão de Controle Operacional, Regional Borborema considerando as demandas do ano de 2007, sendo incluindo o consumo para a lavagem dos filtros, retiradas por caminhões pipas e as perdas por distribuição (Aragão, 2008). Para as adutoras Acauã – ramal norte, Acauã – ramal leste e Acauã – ramal oeste a quota per capita de água foi obtida do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESAs, 2010a).

Os valores das demandas das adutoras para um horizonte de 10 (dez) anos se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 - Demandas das adutoras do sistema para um horizonte de 10 anos.

| Sistema adutor | Demanda (m³/s) | | | | | | | | | |
|---------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| Boqueirão | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| Cariri | 1,17 | 1,18 | 1,20 | 1,22 | 1,23 | 1,25 | 1,26 | 1,28 | 1,30 | 1,31 |
| TOTAL | 1,30 | 1,32 | 1,33 | 1,35 | 1,37 | 1,39 | 1,41 | 1,43 | 1,45 | 1,47 |
| Acauã – ramal norte | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Acauã – ramal leste | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Acauã – ramal oeste | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| TOTAL | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,26 |

Para a perenização do trecho do rio Paraíba a jusante dos reservatórios a vazão mínima a ser liberada pelos mesmos, segundo informações da AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, deve ser de 1 m³/s.

Segundo a Associação dos Irrigantes do Açude Boqueirão – AIAB (ALENCAR, 2009), as culturas agrícolas previstas a serem cultivadas na safra e entressafra são: tomate, pimentão, feijão, repolho, alface e cebola; no ano todo: banana, goiaba e limão. O plano de cultivo do perímetro e seus respectivos coeficientes de cultivo (kc) são mostrados na Tabela 4. Os valores de kc para as culturas agrícolas perenes foram considerados na fase de produção.

Tabela 4 – Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas agrícolas (kc).

| Culturas | Meses do ano hidrológico | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------|--------------|------|------|------|------|------|--------------------|------|------|------|------|
| | Jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | nov | dez |
| Sazonais | | Safra | | | | | | Entressafra | | | | |
| Tomate | | 0,45 | 0,84 | 1,15 | 0,95 | | | 0,45 | 0,84 | 1,15 | 0,95 | |
| Pimentão | | 0,80 | 0,80 | 1,00 | 0,96 | | | 0,80 | 0,80 | 1,00 | 0,96 | |
| Feijão | | 0,58 | 1,10 | 0,57 | | | | 0,58 | 1,10 | 0,57 | | |
| Repolho | | 0,55 | 0,84 | 0,95 | | | | 0,55 | 0,84 | 0,95 | | |
| Alface | | 0,48 | 0,60 | 0,98 | | | | 0,48 | 0,60 | 0,98 | | |
| Cebola | | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 0,72 | | | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 0,72 | |
| Perenes | | | | | | | | | | | | |
| Banana | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,85 | 1,00 | 1,10 | 1,10 | 0,90 | 0,80 | 0,80 |
| Mamão | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 1,16 | 1,16 | 1,16 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 0,92 |
| Goiaba | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Limão | 0,83 | 0,83 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,78 | 0,78 | 0,78 |

Na Tabela 5 são apresentados dados característicos das culturas agrícolas adotados neste estudo. Os valores da produtividade das culturas agrícolas (Prod), custo de produção (Cprod) e mão-de-obra requerida (Hdc) foram retirados Manual de Orçamento Agropecuário do Banco do Nordeste S/A (2006). O preço médio de comercialização (Prc) foi obtido da Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas – EMPASA (EMPASA, 2010) para o ano de 2009. Os requerimentos de pressão (ΔH) referentes ao sistema de irrigação estão de acordo com Doorenbos e Kassam (2000) e Gomes (1999). A eficiência de aplicação (Eap) segue a disposta na Resolução nº 687 da Agência Nacional de Águas (ANA, 2004).

Tabela 5 – Dados característicos das culturas agrícolas.

| Culturas agrícolas | Prod (kg/ha/ano) | Prc (R\$/kg) | Cprod (R\$/ha/ano) | Hdc (diárias/ha/ano) | Sistema de irrigação | ΔH (mca) | Eap |
|--------------------|------------------|--------------|--------------------|----------------------|----------------------|------------------|------|
| Sazonais | | | | | | | |
| Tomate (s) | 50.000 | 1,83 | 10.631,00 | 367 | Gotejamento | 10 | 0,90 |
| Tomate (es) | | 0,47 | | | | | |
| Pimentão (s) | 20.000 | 0,70 | 7.162,00 | 192 | Gotejamento | 10 | 0,90 |
| Pimentão (es) | | 0,42 | | | | | |
| Feijão(s) | 1.800 | 1,20 | 2.408,00 | 61 | Sulco | 0 | 0,50 |
| Feijão (es) | | 1,17 | | | | | |
| Repolho (s) | 25.000 | 0,88 | 4.984,00 | 142 | Gotejamento | 10 | 0,90 |
| Repolho (es) | | 0,35 | | | | | |
| Alface (s) | 14.5000 | 0,42 | 5.482,00 | 196 | Sulco | 0 | 0,50 |
| Alface (es) | | 0,21 | | | | | |
| Cebola (s) | 15.000 | 1,16 | 6.394,00 | 211 | Gotejamento | 10 | 0,90 |
| Cebola (es) | | 1,16 | | | | | |
| Perenes | | | | | | | |
| Banana | 40.000 | 0,49 | 4.909,00 | 213 | Microaspersão | 15 | 0,85 |
| Goiaba | 16.000 | 0,87 | 4.276,00 | 155 | Microaspersão | 15 | 0,85 |
| Mamão | 15.000 | 0,68 | 5.735,00 | 192 | Microaspersão | 15 | 0,85 |
| Limão | 30.000 | 0,96 | 4.082,00 | 146 | Microaspersão | 15 | 0,85 |

s – safra; es – entressafra

Assumiu-se que o preço da água bruta para irrigação é de R\$ 5/1.000 m³ de água segundo estudos do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESAs, 2010a) e o preço de energia elétrica de R\$ 0,12664/kWh, considerado fora de ponta segundo dados da concessionária local (ENERGISA, 2010). Estima-se que o sistema de bombeamento tenha uma eficiência de 75%. Para cada uma das culturas agrícolas foi designada uma área máxima (Tabela 6), não sendo estabelecidas áreas mínimas para as culturas agrícolas, de forma que as que não dessem um retorno financeiro adequado pudessem ser excluídas da solução ótima.

Tabela 6 – Áreas máximas das culturas agrícolas.

| Culturas agrícolas | Área máxima (ha) |
|-----------------------------------|------------------|
| Tomate, pimentão, feijão, repolho | 150 |
| Alface, cebola, mamão e goiaba | 100 |
| Banana | 350 |

3.1.2 – Precipitação

Para o cálculo da precipitação direta no reservatório e da precipitação efetiva nos perímetros irrigados foram utilizados valores precipitados nos postos pluviométricos (Tabela 7) mais próximos dos reservatórios e o perímetro irrigado.

Tabela 7 – Postos pluviométricos utilizados.

| | Posto Utilizado | | | |
|--------------------|-----------------|----------|-----------|----------|
| | Nome | Código | Longitude | Latitude |
| Res. Boqueirão | Boqueirão | 00736023 | 36°07'W | 07°29'S |
| Res. Acauã | Aroeiras | 00735029 | 35°41'W | 07°31'S |
| Perímetro Irrigado | Cabaceiras | 00736022 | 36°17'W | 07°36'S |

Fonte: SUDENE (1990)

3.1.3 – Vazões afluentes

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios foram fornecidos pela AESA. A série sintética de vazões médias mensais foi gerada pelo o modelo hidrológico chuva×vazão MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável), calibrado no posto fluviométrico Poço de Pedras, a partir de dados de precipitação totais diários, com extensão de 59 anos (1933 a 1991).

3.1.4 – Evaporação

A evaporação nos reservatórios e na área irrigada foi obtida a partir de dados observados do tanque “Classe A” (Tabela 8) dos postos climatológicos de Campina Grande (para o reservatório Acauã) e São João do Cariri (para o reservatório Boqueirão e a área irrigada). Os valores mensais do coeficiente de tanque Kt para os reservatórios foram estimados por Oliveira *et al.* (2005) para a região do cariri paraibano. Os valores mensais do coeficiente do tanque Kp para a área irrigada foram estimados de acordo com a metodologia de Doorenbos e Pruitt (1976 apud Gomes, 1999) considerando os dados mensais da velocidade do vento e da umidade relativa do ar da estação climatológica de São João do Cariri.

Tabela 8 – Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente Kt e Kp.

| Posto Climatológico | Evaporação média mensal (mm) | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
| Campina Grande ¹ | 147,1 | 132,5 | 108,1 | 88,3 | 102,5 | 64,9 | 73,0 | 105,1 | 126,1 | 153,6 | 151,2 | 165,0 |
| São J. do Cariri ² | 228,5 | 202,4 | 200,1 | 174,2 | 153,6 | 119,4 | 128,8 | 159,6 | 197,2 | 250,5 | 238,6 | 238,0 |
| Kt | 0,78 | 0,80 | 0,78 | 0,89 | 0,93 | 0,92 | 0,87 | 0,82 | 0,76 | 0,79 | 0,80 | 0,80 |
| Kp | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |

Fonte: ¹Normais climatológicas (BRASIL, 1992); ²Aragão (2008).

3.1.5 – Dados dos reservatórios estudados

A Tabela 9 mostra a capacidade máxima de armazenamento (volume máximo) e a vazão vertida máxima projetada para os vertedouros de cada reservatório fornecidos pela AESA. O volume morto foi considerado como sendo 11% da capacidade de armazenamento

Tabela 9 – Dados volumétricos e a vazão vertida máxima dos reservatórios.

| Reservatório | Volume (hm ³) | | Vazão vertida máxima projetada (m ³ /s) |
|--------------|---------------------------|-------|--|
| | Máximo | Morto | |
| Boqueirão | 411,69 | 45,93 | 2610,0 |
| Acauã | 253,10 | 27,50 | 4000,0 |

Os dados da curva cota-área-volume do reservatório Boqueirão foram obtidos do levantamento batimétrico da bacia hidráulica do mesmo (SEMARH, 2004, apud Alencar, 2009). Os dados da curva cota-área-volume do reservatório Acauã foram fornecidos pela AESA.

A Tabela 10 apresenta os dados do coeficiente de vazão de descarga de fundo (C_f), diâmetro da seção transversal (D_f), da cota de jusante da geratriz inferior (H_{fs}) e da cota de entrada (H_{fe}) do tubo de descarga de fundo de cada reservatório utilizado neste estudo.

Tabela 10 – Características físicas do tubo de descarga de fundo dos reservatórios estudados.

| Reservatório | C_f^1 | D_f^2 (m) | H_{fs}^2 (m) | H_{fe}^2 (m) |
|--------------|---------|-------------|----------------|----------------|
| Boqueirão | 0,60 | 0,75 | 361 | 361 |
| Acauã | 0,60 | 2,00 | 108 | 108 |

Fonte: ¹DAEE (2005), ²AESA

3.2 – Operação dos recursos hídricos do sistema

Para a análise dos recursos hídricos dos reservatórios foram idealizados três cenários de operação para o sistema:

Cenário 1: O único uso das águas dos reservatórios será para o abastecimento urbano através das adutoras. Os reservatórios só podem liberar água para o rio a sua jusante por vertimento. Esse cenário procura retratar as regras de operações atuais da maioria dos reservatórios do nordeste, que devido ao temor de enfrentar situações de escassez hídrica devido às incertezas hidrológicas, procura-se armazenar água para atendimentos às demandas.

Cenário 2: É considerado, além do abastecimento urbano (1ª prioridade), o uso das águas para a agricultura irrigada (2ª prioridade) no reservatório Epitácio Pessoa. Os reservatórios só podem liberar água para o rio a sua jusante por vertimento.

Cenário 3: É considerado, além do abastecimento urbano (1ª prioridade) e da agricultura irrigada (2ª prioridade), o uso das águas para a perenização do rio a jusante dos reservatórios (3ª prioridade).

Os critérios operacionais idealizados para todos os cenários observaram os seguintes pressupostos:

- O período de estudo corresponde a 10 (dez) anos, iniciando o processo de otimização no mês de janeiro.
- O volume inicial dos reservatórios Boqueirão e Acauã foram estabelecidos como sendo 58% e 81%, respectivamente, da capacidade dos mesmos, correspondente à média histórica do dia 1 de janeiro da série histórica dos volumes de água dos reservatórios fornecida pela AESA;
- O volume do reservatório, ao final do período de estudo, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo a sustentabilidade hídrica das atividades econômicas;
- O volume meta dos reservatórios, em todos os meses, foi considerado igual à capacidade dos mesmos;

- As capacidades das tomadas d'água destinadas ao abastecimento humano foram consideradas iguais as suas respectivas demandas.

Para a operação do perímetro irrigado foram observados os seguintes pressupostos:

- O calendário agrícola estabelecido para o perímetro irrigado é mantido invariável para todos os cenários estudados e as culturas agrícolas permanentes estão em plena capacidade de produção;
- No cálculo das demandas de irrigação considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas;

3.3 – Modelo de Otimização Multiobjetivo

O modelo de otimização utilizado foi desenvolvido por Santos *et al.* (2011) baseado em programação linear, onde foi utilizado o *Toolbox Optimization* do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima. Para tanto, linearizações apropriadas das não-linearidades intrínsecas aos processos de cada um de seus componentes tiveram que ser pesquisadas e implementadas através do uso combinado do Artificio de Linearização por Segmentos e da Programação Linear Sequencial.

O modelo se destina a otimizar os múltiplos usos de um sistema de reservatórios, com a implantação ou melhoramento da operação de um ou mais perímetros irrigados. O mesmo trabalha com variáveis relacionadas aos elementos naturais, tais como: hidroclimáticos e hidroagrícolas, como também outras variáveis (demandas hídricas, características físicas dos componentes, etc.) identificadas no estudo do sistema hídrico. Para estes elementos são definidas as informações necessárias para a entrada de dados no modelo, envolvendo: os reservatórios, as demandas, calhas dos rios e perímetros irrigados. A operação do reservatório e dos nós é fundamentada na equação do balanço hídrico destes, mesmo quando se faz uso de demandas fixas e variáveis. A demanda hídrica de um perímetro irrigado é determinada com base na necessidade suplementar líquida de irrigação, estabelecidas através do balanço hídrico no solo para as culturas selecionadas, estando a área a ser plantada limitada pelos demais usos do reservatório. O modelo também leva em consideração os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de altura manométrica, as áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura, os custos de água e de produção, os aspectos econômicos e a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água captada.

A função objetivo do modelo é uma escalarização das (múltiplas) funções objetivo do problema, utilizando o Método das Ponderações na qual cada função objetivo é normalizada, sendo atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento (quando o peso for nulo a função objetivo não será considerada no processo de otimização).

Neste trabalho os objetivos considerados e as prioridades (em ordem crescente) de atendimento, em todos os cenários, são: atendimento da demanda de abastecimento urbano;

maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da área irrigada, perenização do rio a jusante dos reservatórios e o atendimento do volume meta dos reservatórios.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Cenário 1

A Figura 3 apresenta o atendimento das demandas estabelecidas para o abastecimento urbano através das adutoras nos reservatórios. Observa-se que as demandas foram atendidas sem apresentarem falhas ao longo dos 10 anos de operação.

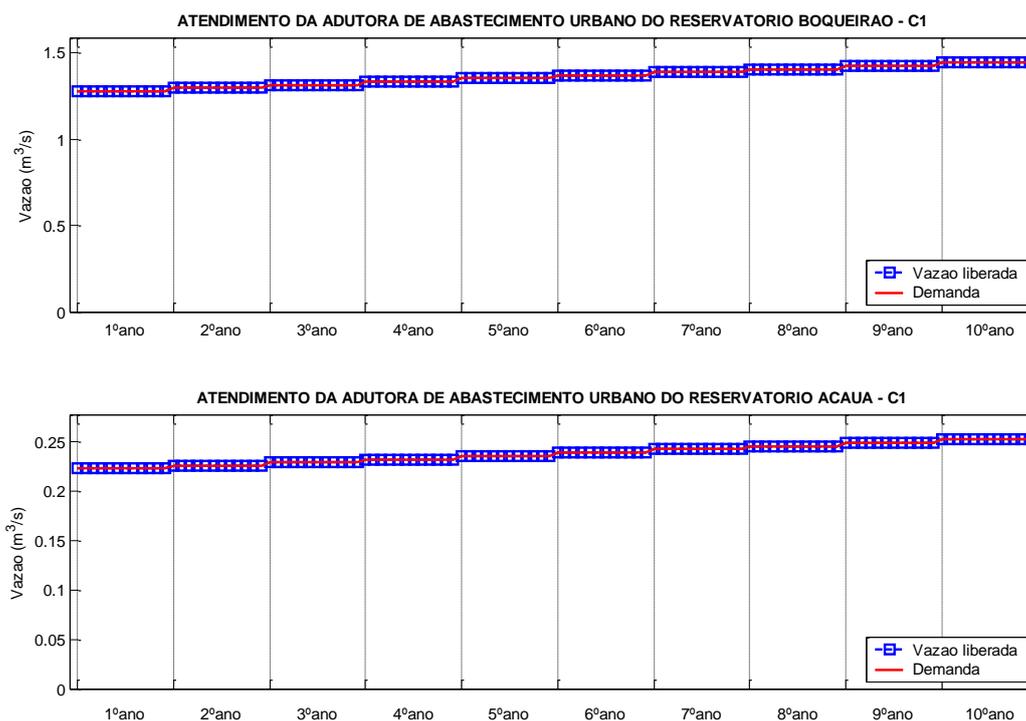


Figura 3 – Atendimento das demandas de abastecimento urbano para o cenário 1.

A Figura 4 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios nos 10 anos estudados para o cenário 1. Este comportamento é característico da região, diminui entre agosto a janeiro (meses com menores vazões afluentes) e aumenta na estação chuvosa (entre abril a maio). O volume final do reservatório é maior que o volume inicial proposto garantindo assim a sustentabilidade hídrica do reservatório para o período estudado.

Observa-se uma queda acentuada do volume de água do reservatório Boqueirão no 5º e 6º ano chegando ao valor de 196,8 hm³ (48% da capacidade de acumulação do reservatório) por causa da pouca afluência nesse período (Figura 5). Tem-se que o volume de água do reservatório Acauã, a partir do 2º ano, está sempre acima de 90% da sua capacidade de acumulação. A precipitação direta ao reservatório Boqueirão representa cerca de 11% (1,37 hm³/mês) de toda a afluência. No reservatório Acauã a precipitação direta representa cerca de 6% (0,7 hm³/mês) de toda a afluência.

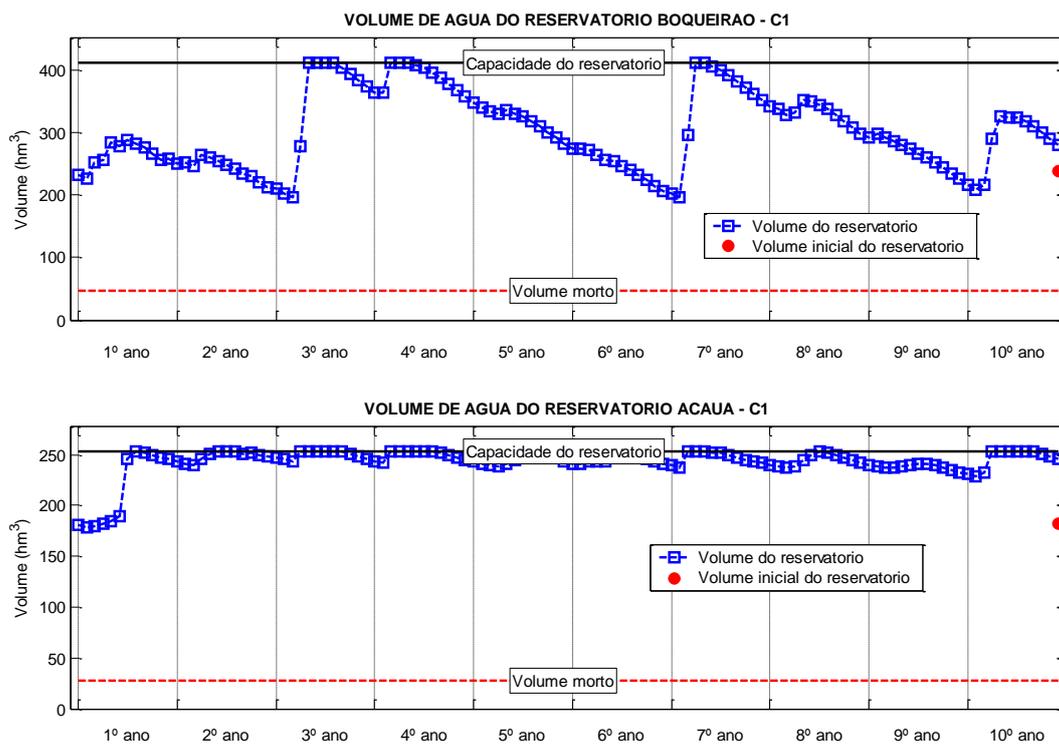


Figura 4 – Volume de água dos reservatórios para o cenário 1.

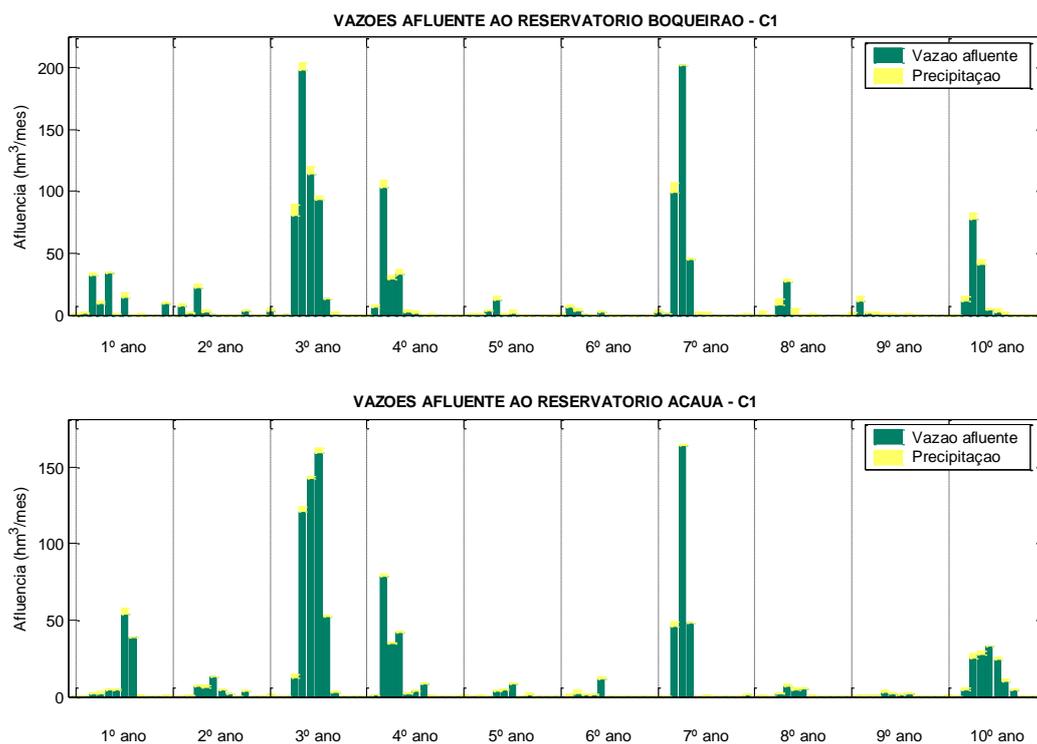


Figura 5 – Vazão afluente aos reservatórios.

Os maiores volumes evaporado no cenário 1 (Tabela 11) ocorrem entre os meses de outubro a dezembro. Devido à maior área do espelho d'água o reservatório Boqueirão apresenta um maior volume evaporado do que o reservatório Acauã.

Tabela 11 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 1

| Reservatório | Evaporação média mensal (hm ³ /mês) | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média |
| Boqueirão | 5,4 | 4,9 | 4,8 | 5,0 | 4,8 | 3,8 | 3,8 | 4,4 | 5,0 | 6,4 | 6,1 | 6,0 | 5,0 |
| Acauã | 1,9 | 1,7 | 1,4 | 1,3 | 1,6 | 1,0 | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 1,6 |

Observa-se na Figura 6 que ocorreram vertimento no reservatório Boqueirão apenas no 3º, 4º e 7º ano, anos estes que apresentam as maiores afluências ao reservatório. No reservatório Acauã não ocorrem vertimento apenas no 5º, 6º, 8º e 9º ano, ano estes que apresentam as menores afluências ao reservatório. A média mensal dos vertimento foi de 20,83 m³/s para o reservatório Boqueirão e de 14, 65 m³/s para o reservatório Acauã.

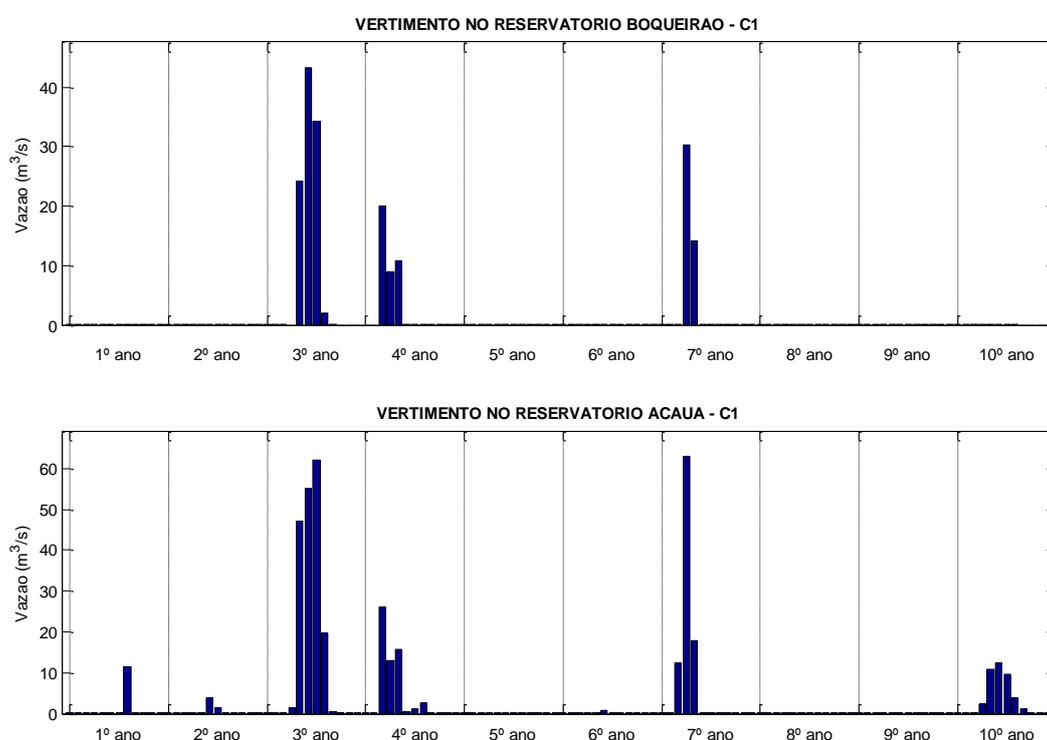


Figura 6 – Vazão vertida dos reservatórios no cenário 1.

4.2 – Cenário 2

Neste cenário considerou-se a demanda hídrica da área irrigada em torno do reservatório Boqueirão. Tem-se que a inclusão dessa demanda não afetou o atendimento da demanda estabelecida para o abastecimento urbano, que foi atendida sem apresentar falhas.

Na Tabela 12 encontram-se os valores médios anuais das áreas cultivadas de cada cultura agrícola e suas respectivas receitas líquidas, mão de obra e consumo hídrico para a área irrigada no cenário estudado. Tem-se que as culturas agrícolas sazonais são às mais alocadas (1200 ha/ano) devido principalmente ao menor consumo hídrico (45% do consumo hídrico total do perímetro). Tais culturas agrícolas representam mais de 80% de toda receita líquida oriunda da atividade

agrícola e mais de 77% de toda mão de obra na área irrigada. Não foram alocadas áreas para as culturas agrícolas do feijão e goiaba.

Tabela 12 – Valores médios anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada na área irrigada para o cenário 1.

| Cultura | Área (ha/ano) | Receita Líquida (R\$/ano) | Mão-de-obra (diárias/ano) | Vazão (m³/s/ano) |
|----------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Tomate (s) | 150,0 | 12.111.327,8 | 55.050,0 | 0,14 |
| Pimentão (s) | 150,0 | 1.004.594,5 | 28.800,0 | 0,16 |
| Feijão (s) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| Repolho (s) | 100,0 | 1.692.414,2 | 14.200,0 | 0,07 |
| Alface (s) | 100,0 | 5.540.404,3 | 19.600,0 | 0,11 |
| Cebola (s) | 100,0 | 1.086.285,0 | 21.100,0 | 0,11 |
| Tomate (es) | 150,0 | 1.892.937,6 | 55.050,0 | 0,28 |
| Pimentão (es) | 150,0 | 147.392,4 | 28.800,0 | 0,29 |
| Feijão (es) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| Repolho (es) | 100,0 | 360.718,0 | 14.200,0 | 0,12 |
| Alface (es) | 100,0 | 2.494.181,5 | 19.600,0 | 0,20 |
| Cebola (es) | 100,0 | 1.074.345,7 | 21.100,0 | 0,20 |
| Banana | 320,0 | 4.386.942,2 | 68.160,0 | 1,64 |
| Limão | 100,0 | 2.392.133,1 | 14.600,0 | 0,42 |
| Goiaba | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| Total | 1620,0 | 34.183.676,2 | 360.260,0 | 3,73 |

Apesar de a banana ser a cultura agrícola mais cultivada, consumindo 44% de toda vazão destinada a área irrigada e empregando 19% de toda mão de obra da área irrigada, as culturas agrícolas do tomate e da alface, ambos cultivado na safra, são as mais rentáveis representando, ambas, mais de 50% da receita líquida oriunda da área irrigada.

Tem-se que a área utilizada anualmente na área irrigada (Figura 7) corresponde a 77 % da área máxima considerada, atingindo o valor máximo nos meses entre fevereiro e abril, na safra, e nos meses entre agosto e outubro, na entressafra. Observa-se que a vazão destinada ao suprimento hídrico da área irrigada é variável ao longo do tempo, tendo um comportamento típico, com os menores valores na estação chuvosa (fevereiro a abril) e os maiores na estação seca (setembro a novembro), ultrapassando o valor de 0,8 m³/s, valor este próximo ao valor demandado ao reservatório Boqueirão para o abastecimento urbano.

A Figura 8 apresenta o volume de água dos reservatórios no cenário 2. Observa-se o mesmo comportamento característico ocorrido no cenário 1, com diferença apenas no 10º ano no reservatório Boqueirão, no qual o volume final do reservatório é próximo ao volume inicial proposto garantindo, também, a sustentabilidade hídrica do reservatório para o período estudado.

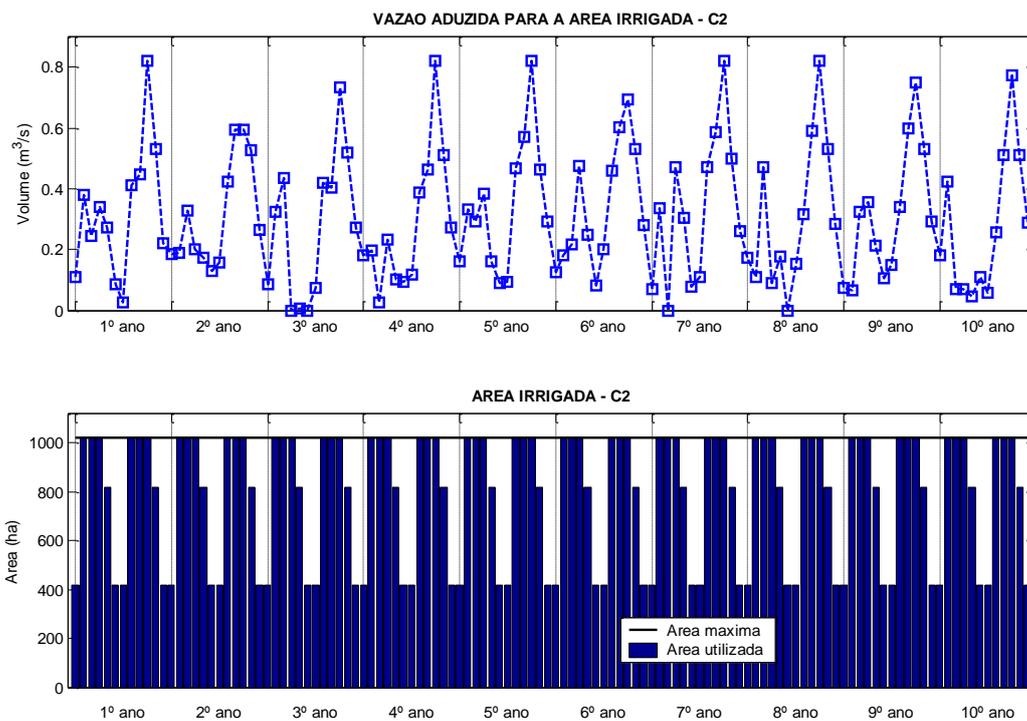


Figura 7 – Vazões aduzidas e a área utilizada na área irrigada no cenário 2.

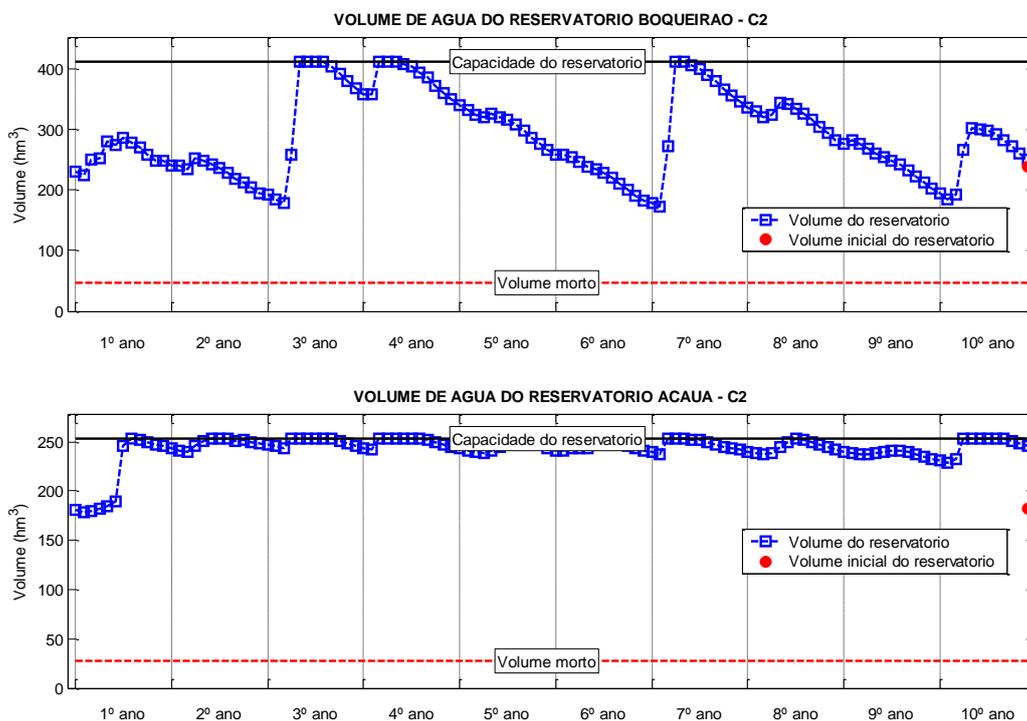


Figura 8 – Volume de água dos reservatórios no cenário 2.

Observa-se, na Figura 9, que os vertimentos ocorreram nos mesmos anos e meses do cenário 1, porém com menor intensidade no 7º ano. A média mensal dos vertimento foi de 18,50 m³/s para o reservatório Boqueirão e de 13,88 m³/s para o reservatório Acauã.

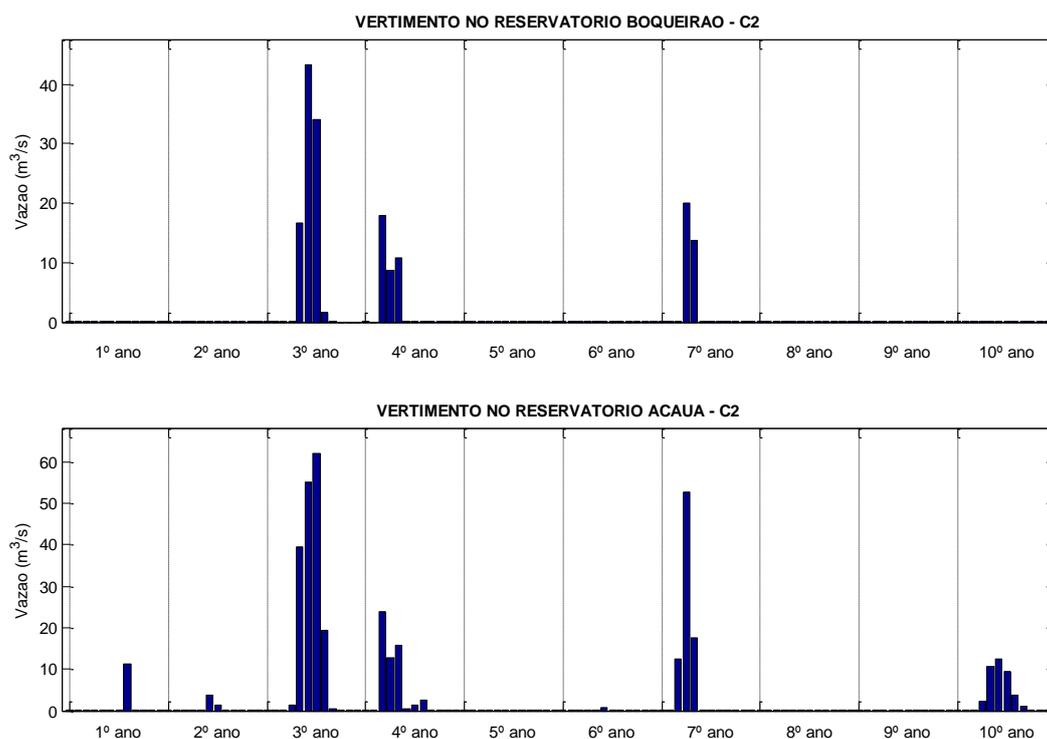


Figura 9 – Vazão vertida dos reservatórios no cenário 2.

A Tabela 13 mostra os volume evaporados médios mensais dos reservatórios no cenário 2. Assim como no cenário 1, os maiores volumes evaporados ocorrem entre os meses de outubro a dezembro. Observa-se que houve uma diminuição no volume evaporado do reservatório Boqueirão (em torno de 3%, em média) devido ao maior consumo das águas para o atendimento das demandas propostas.

Tabela 13 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 2.

| Reservatório | Evaporação média mensal (hm³/mês) | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | Média |
| Boqueirão | 5,3 | 4,7 | 4,6 | 4,9 | 4,7 | 3,7 | 3,7 | 4,3 | 4,9 | 6,3 | 5,9 | 5,7 | 4,9 |
| Acauã | 1,9 | 1,7 | 1,4 | 1,3 | 1,6 | 1,0 | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 1,6 |

4.3 – Cenário 3

Neste cenário considerou-se, além da demanda hídrica da área irrigada em torno do reservatório Boqueirão, a perenização do rio Paraíba a jusante dos reservatórios. Tem-se que a inclusão dessa demanda não afetou o atendimento da demanda estabelecida para o abastecimento urbano, que foi atendida sem apresentar falhas. Devido a maximização da receita líquida e da mão de obra oriunda da área irrigada ser a 2ª prioridade de atendimento, não houve, também, mudança nas áreas alocadas para as culturas agrícolas na área irrigada com relação ao cenário 2, resultando, assim, nos mesmos valores de receita líquida, mão de obra e consumo hídrico do cenário 2 ao longo dos 10 anos estudados.

A Figura 10 apresenta a vazão defluente liberada pelos reservatórios para a perenização do rio a jusante dos reservatórios. Tem-se que a partir do 7º ano vazão estabelecida para a perenização do rio Paraíba a jusante do reservatório Boqueirão não é atendida devido à disponibilidade hídrica do reservatório. Tal vazão é atendida plenamente pelo reservatório Acauã.

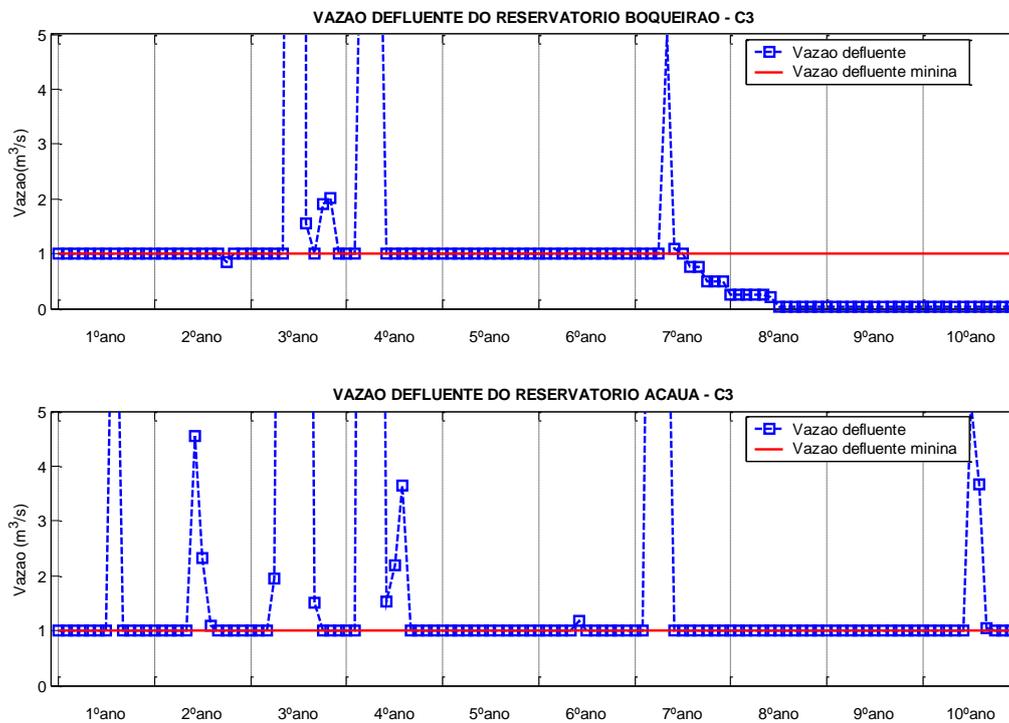


Figura 10 – Vazão defluente dos reservatórios no cenário 3.

A Figura 11 mostra o comportamento do volume de água dos reservatórios neste cenário. Observa-se o comportamento similar ao ocorrido no cenário 2, com diferença no menor volume de água registrado nos reservatórios Boqueirão (103,16 hm³, que corresponde a 25% da capacidade de acumulação do reservatório) e Acauã (162,58 hm³, que corresponde a 64% da capacidade de acumulação do reservatório) por causa do aumento das demandas estabelecidas nesse cenário.

A Tabela 14 apresenta os volume evaporados médios mensais do reservatório no cenário 3. Observa-se comportamento similar ao cenário 1 e 2, com os maiores volumes evaporados ocorrendo entre os meses de outubro a dezembro. Observa-se que houve uma diminuição no volume evaporado do reservatório (em torno de 9%, em média em comparação com o cenário 1) devido ao maior consumo das águas para o atendimento das demandas propostas.

Tabela 14 – Volume evaporado médio mensal dos reservatórios no cenário 3.

| Reservatório | Evaporação média mensal (hm ³ /mês) | | | | | | | | | | | | Média |
|--------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | |
| Boqueirão | 4,8 | 4,3 | 4,2 | 4,5 | 4,5 | 3,5 | 3,6 | 4,1 | 4,6 | 5,9 | 5,5 | 5,3 | 4,6 |
| Acauã | 1,8 | 1,7 | 1,3 | 1,3 | 1,5 | 1,0 | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 2,0 | 2,0 | 2,2 | 1,6 |

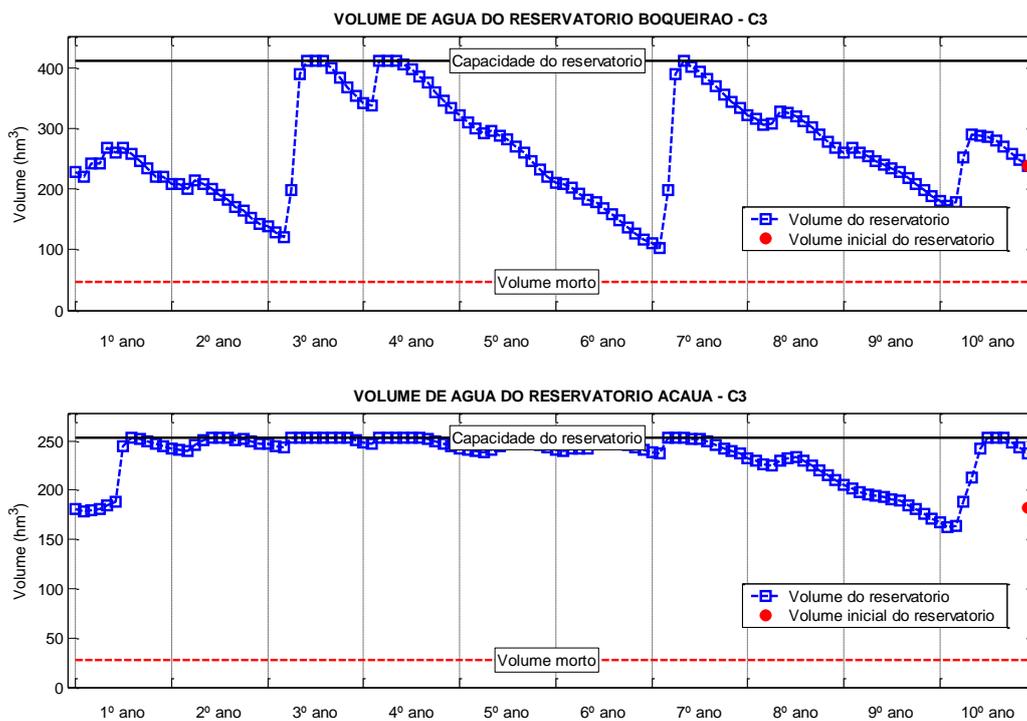


Figura 11 – Volume de água dos reservatórios no cenário 3.

Observa-se na Figura 12 a diminuição do volume vertido nos reservatórios. A média mensal dos vertimento nesse cenário foi de 13,73 m³/s para o reservatório Boqueirão e de 8,23 m³/s para o reservatório Acauã, bem menores do que o observado no cenário 2.

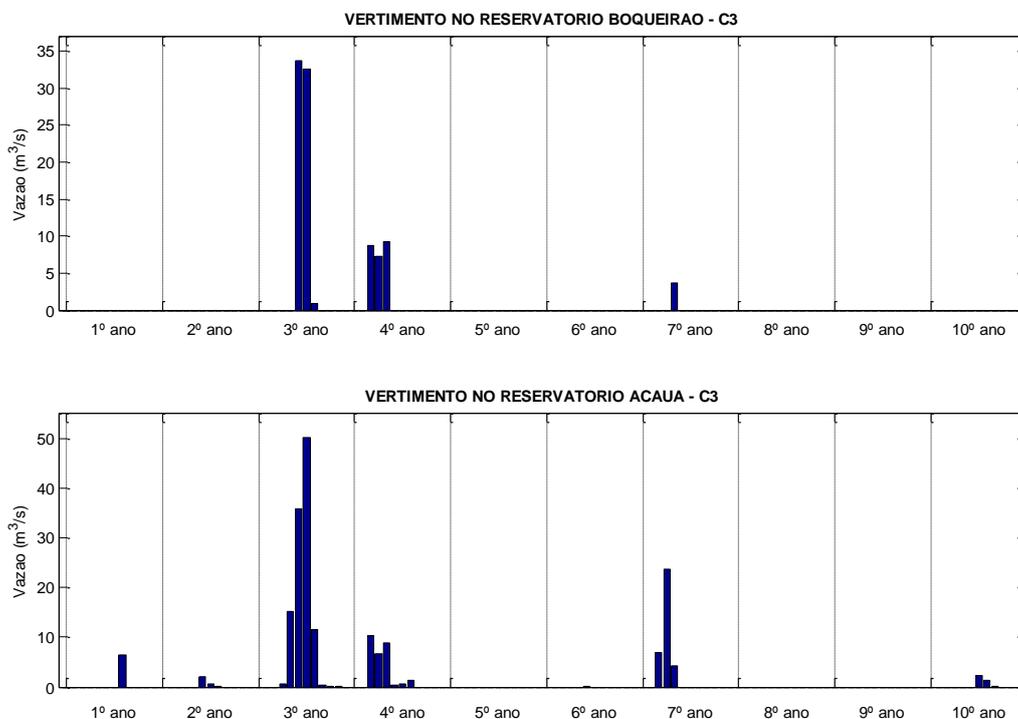


Figura 12 – Vazão vertida dos reservatórios no cenário 3.

5 – CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o estudo da operação ótima, multiobjetiva, plurianual e integrada das disponibilidades e usos dos recursos hídricos dos reservatórios Boqueirão e Acauã. Os resultados mostram que as demandas de abastecimento urbano são atendidas com 100% de garantia, em todos os cenários operacionais propostos para os 10 anos estudados.

A atividade agrícola pode ser desenvolvida no reservatório Boqueirão, considerando a afluência natural, sem comprometer a demanda de abastecimento urbano das cidades (cenário 2), desde que seja realizado um estudo de quais culturas agrícolas devem ser cultivadas e em qual época do ano. Tal estudo deve considerar os diversos interesses dos agentes envolvidos, a aptidão do solo e dos agricultores com determinada cultura agrícola, variabilidade hidroclimática ao longo do tempo.

Entretanto, considerando as afluências naturais, a demanda proposta pelo órgão gestor das águas do estado da Paraíba (AESAs) para a perenização do rio a jusante ao reservatório Boqueirão não é sustentável, podendo não ser atendida por três anos consecutivos.

Tem-se que o reservatório Acauã não utiliza toda a sua disponibilidade hídrica (o volume de água do reservatório é maior que 65% da sua capacidade de armazenamento em todos os cenários), podendo utilizá-la para o cultivo de culturas agrícolas perenes e/ou sazonais e a prática da piscicultura intensiva e/ou extensiva.

A inclusão de demandas aos reservatórios diminui as perdas por evaporação e vertimento.

BIBLIOGRAFIA

- AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. (2010a). *Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Relatório Final. João Pessoa*. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>>. Data da consulta: 12 fev. 2010
- AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA - AESA. (2010b). *Bacia Hidrografia do Rio Paraíba*. João Pessoa. Figura. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/comites/paraiba/imagens/mapap.jpg>>. Data da consulta: 15 mar. 2010.
- ALENCAR, V. C. (2009). *“Análises multiobjetivo, baseada em programação linear, e comparativas para agriculturas de manejo convencional e orgânico”*. Campina Grande: UFCG – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. 374p. Tese de Doutorado.
- ANA (2004). Resolução nº 687, de 03 de Dezembro de 2004. Agência Nacional de Águas.
- ARAGÃO, T. G. (2008) *“Transposição das Águas do Rio São Francisco para a Bacia do Rio Paraíba: Uma Avaliação da Sinergia e Sustentabilidade Hídrica Utilizando o Modelo de Rede de Fluxo Acquanet”*. Campina grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 131p. Dissertação de Mestrado.

- BANCO DO NORDESTE S/A (2006). *“Manual de Orçamentos Agropecuários”*. Campina Grande – PB.
- DAEE (2005). *“Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas”*. São Paulo. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 116p.
- DOORENBOS, J. e KASSAM, A. H. (2000). Tradução de H. R. Gheyi, A. A. de Sousa, F. A. V. Damasceno, J. F. de Medeiros. *“Efeito da Água no Rendimento das Culturas”*. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, v. 33, UFPB, Campina Grande.
- EMPASA (2010). Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas. Disponível em: <http://www.empasa.pb.gov.br/cotacoes.php>. Data da consulta: 20 de dezembro de 2010.
- ENERGISA (2010). Energisa Paraíba - Distribuidora de Energia S/A. Disponível em: <http://www.paraiba.energisa.com.br/Default.aspx?tabid=1118>. Data da consulta: 15 de maio de 2010.
- GOMES, H. P. (1999). *“Engenharia de Irrigação Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento”*. Editora Universitária – UFPB, Campina Grande-PB, 3ª Edição. 412 p.
- IBGE (2009) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>. Data da consulta: 18 de julho de 2009.
- OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. H. V. (2005). *“Estimativa da Evaporação e Análise de Uso do Coeficiente (kp) do Tanque “Classe A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (10-4), pp. 73-83.
- REGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R. (2000). *“Uma Análise da Crise de 1998-2000 no Abastecimento D’água de Campina Grande – PB”*. Anais do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal, (CD-ROM).
- SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. (2011). *“Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.16, n. 4, p.49 – 60.
- SUDENE (1990). *“Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado da Paraíba. Série pluviométrica 5”*. Recife – PE. Brasil.
- VIEIRA, Z. M. C. L. (2008). *“Metodologia de análise de conflitos na implantação de medidas de gestão da demanda de água”*. Campina Grande: UFCG - Doutorado Temático em Recursos Naturais. 255p. Tese de Doutorado.