

# OPERAÇÃO PLURIANUAL E ÓTIMA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA

*Valterlin da Silva Santos<sup>1</sup>; Allan Sarmiento Vieira<sup>2</sup> & Wilson Fadlo Curi<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- Em regiões áridas e semi-áridas 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 do reservatório Epitácio Pessoa, situado na Região do Alto Curso do Rio Paraíba no cariri paraibano. O reservatório tem como finalidade o abastecimento urbano, o atendimento das demandas hídricas de um perímetro irrigado e a perenização do rio Paraíba a jusante do mesmo. 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 (cenário 2), desde que seja realizado um estudo de quais culturas agrícolas devam ser cultivadas e em qual época do ano. O reservatório não consegue atender integralmente a demanda estabelecida para a perenização do rio a jusante do mesmo.

**ABSTRACT** --- Within arid and semi-arid regions the water shortage drives the human activities and, therefore, the socio-economical development. Optimization models are tools that may provide policies and actions to better use, control and preserve water resources, as well as ways to analyze the benefits when the water resources offer and demand are compatible. This work presents a study of an optimal water resources multi-objective and multi-annual operation for the Epitácio Pessoa reservoir, which is located in the Alto Curso region of the Paraíba river basin within the Paraíba's Cariri. The reservoir water use is for human supply, irrigation and to regulate the downstream Paraíba river basin flows. Considering the reservoir natural inflows, the results have shown that agricultural activities, depending upon the culture types and time of the year they are cultivated, can be developed with the reservoir Epitácio Pessoa water without compromising nearby cities human supply (scenario 2). The reservoir water availability is not enough to fulfill all its downstream regulate flow requirement.

**PALAVRAS-CHAVES:** Otimização plurianual, operação de reservatórios.

---

<sup>1</sup>Professor Assistente da UACC/CCJS/UFCG, Rua Sinfrônio Nazaré 38, 58800-240. Sousa, PB. E-mail: valterlin@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Professor Assistente da UACC/CCJS/UFCG, Rua Sinfrônio Nazaré 38, 58800-240. Sousa, PB. E-mail: allansarmiento@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Professor associado da UAF/CCT/UFCG, Av. Aprígio Veloso 882, 58109-970. Campina Grande, PB. E-mail: wfcru@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.

Oliveira e Lanna (1997) afirmam que as causas do pouco desenvolvimento da região esta relacionado aos baixos investimentos na infra-estrutura hídrica e na ineficiência no seu aproveitamento. Curi *et al.* (2004) afirmam que para melhorar os padrões socioeconômicos é necessário promover o uso racional dos recursos naturais existentes, em especial a água e as terras aptas ao plantio.

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 gerenciamento de reservatórios envolve a alocação da água disponível para os seus diversos usos e usuários, minimizando os riscos de prejuízos que possam advir de uma escassez hídrica ou pela ocorrência de inundações eventuais, a jusante, e maximizando os benefícios originados do uso múltiplo da água (Albuquerque *et al.* 2003).

O reservatório Epitácio Pessoa apresenta problemas de escassez hídrica decorrentes do uso da água para o abastecimento urbano e para a agricultura irrigada, principal atividade econômica da região. O reservatório é responsável pelo abastecimento urbano de 18 cidades através de duas adutoras, incluindo a cidade de Campina Grande, 2ª maior cidade do Estado da Paraíba, com 385.213 habitantes (IBGE, 2010).

Rêgo *et al.* (2000) relatam que 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 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.

Constata-se que o planejamento dos recursos hídricos do reservatório torna-se imprescindível no sentido de promover o uso eficiente e racional das disponibilidades hídricas entre os múltiplos

usuários de forma integrada e otimizada. Portanto, este trabalho tem o objetivo de analisar a operação plurianual ótima e integrada do reservatório Epitácio Pessoa visando a alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos e a maximização dos benefícios sociais e financeiros oriundos do perímetro irrigado através de uma análise multiobjetivo.

## 2 – CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O reservatório Epitácio Pessoa, conhecido popularmente como açude Boqueirão, está localizado na bacia hidrográfica do rio Paraíba (Figura 1), Estado da Paraíba, nos municípios de Boqueirão, Barra de São Miguel e Cabaceiras.

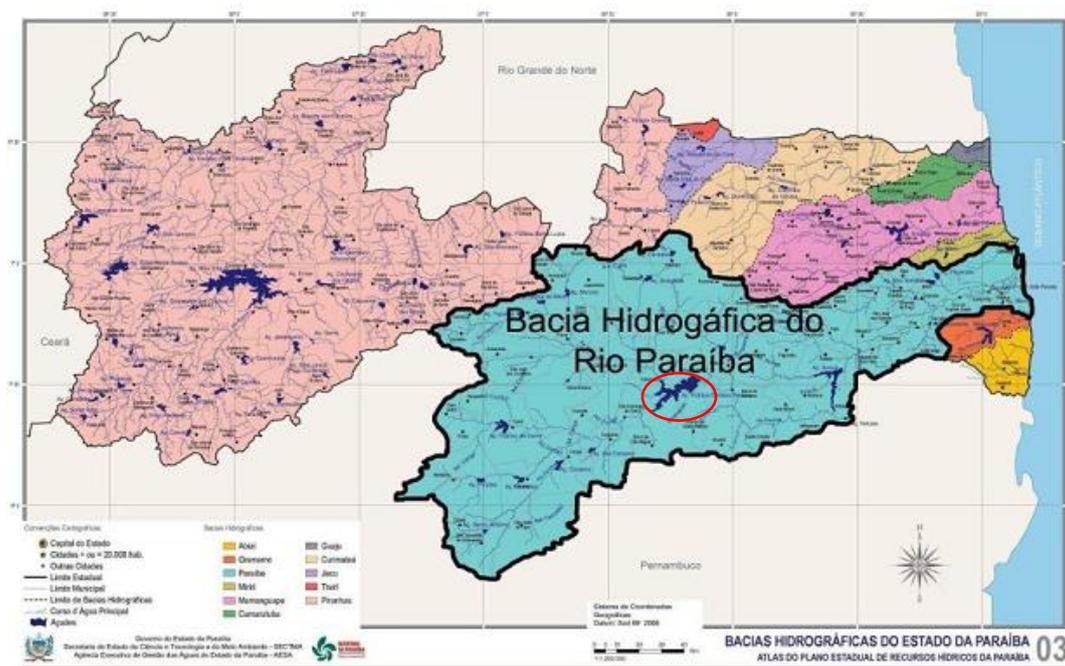


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Paraíba.

O clima da região, 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 umidade relativa do ar 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. 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.

O solo Bruno não Cálcico de pouca espessura é predominante nas bacias. Quanto ao relevo a Sub-bacia do rio Taperoá apresenta setores ondulados, forte ondulados e montanhosos. A Região do Alto Curso do rio Paraíba apresenta relevo ondulado, forte ondulado e, em algumas áreas, também montanhoso. A vegetação natural predominante é a Caatinga hiperxerófila, hipoxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia.

Outras características gerais da região podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da Região Hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba e da sub-bacia do rio Taperoá.

Característica	Sub-bacia/Região hidrográfica	
	Rio Taperoá	Alto Paraíba
Área (km <sup>2</sup> )	5.666,38	6.717,39
Precipitação (mm/ano)	400 e 600	350 a 600
Período de concentração da precipitação	Fev - mai	Fev - mai
Evaporação (mm/ano)	2500 a 3000	2500 a 3000

Fonte: Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH/PB (AESAs, 2010)

A bacia hidrográfica do reservatório tem 12.400 km<sup>2</sup>, sendo as principais afluições provenientes da Região do Alto Curso do Rio Paraíba e da Sub-bacia do Rio Taperoá.

A capacidade de armazenamento do reservatório é de 411 milhões de metros cúbicos (maior reservatório da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e o 2º maior do Estado) sendo suas águas utilizadas para o abastecimento público de diversos municípios da Sub-bacia do rio Taperoá, e das Regiões do Médio e do Alto Curso do rio Paraíba; para a perenização do trecho do rio Paraíba a jusante do reservatório; para o abastecimento rural das propriedades situadas nas margens do açude, para a dessedentação animal; para a irrigação praticada por concessionários do DNOCS e particulares nas margens do açude; para a prática de piscicultura extensiva e intensiva; para o turismo e o lazer (DNOCS, 2007, apud Vieira, 2008)

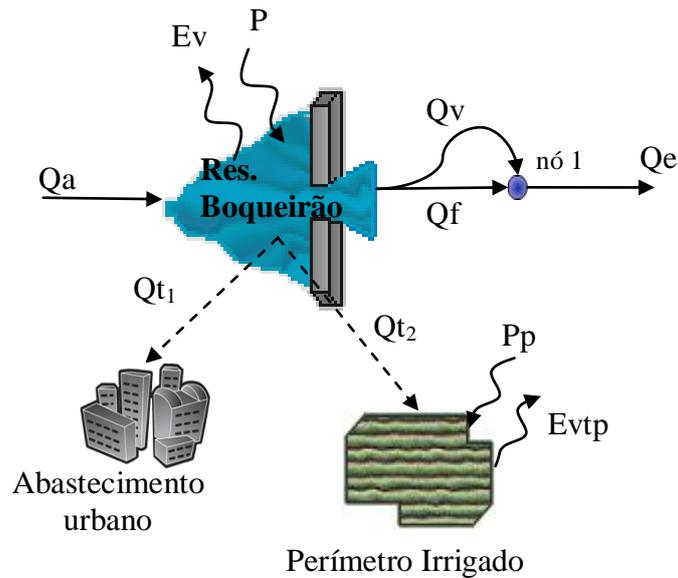
### 3 – METODOLOGIA

#### 3.1 – Dados do sistema

##### 3.1.1 – Demandas hídricas

As demandas hídricas consideradas no reservatório dizem respeito ao abastecimento urbano de 18 cidades através das adutoras, irrigação de uma área de 1020 hectares nas margens do reservatório e a perenização do rio Paraíba a jusante do reservatório. A Figura 3 apresenta o layout do sistema estudado.

O abastecimento urbano das 18 cidades é realizado através dos sistemas adutores Boqueirão e Cariri (Figura 4).



- Trecho de rio  
 - - - Adutora  
 Reservató  
 Nó
- onde:  $Q_a$  = vazão afluyente ao reservatório;  $Q_t$  = vazão de tomada d'água;  $E_v$  = volume evaporado no reservatório;  $P$  = volume precipitado no reservatório;  $Q_f$  = vazão por descarga de fundo;  $Q_v$  = vazão vertida;  $Q_e$  = vazão defluente;  $P_p$  = precipitação no perímetro irrigado;  $E_{vtp}$  = evapotranspiração no perímetro irrigado.

Figura 3 – Layout do sistema estudado.

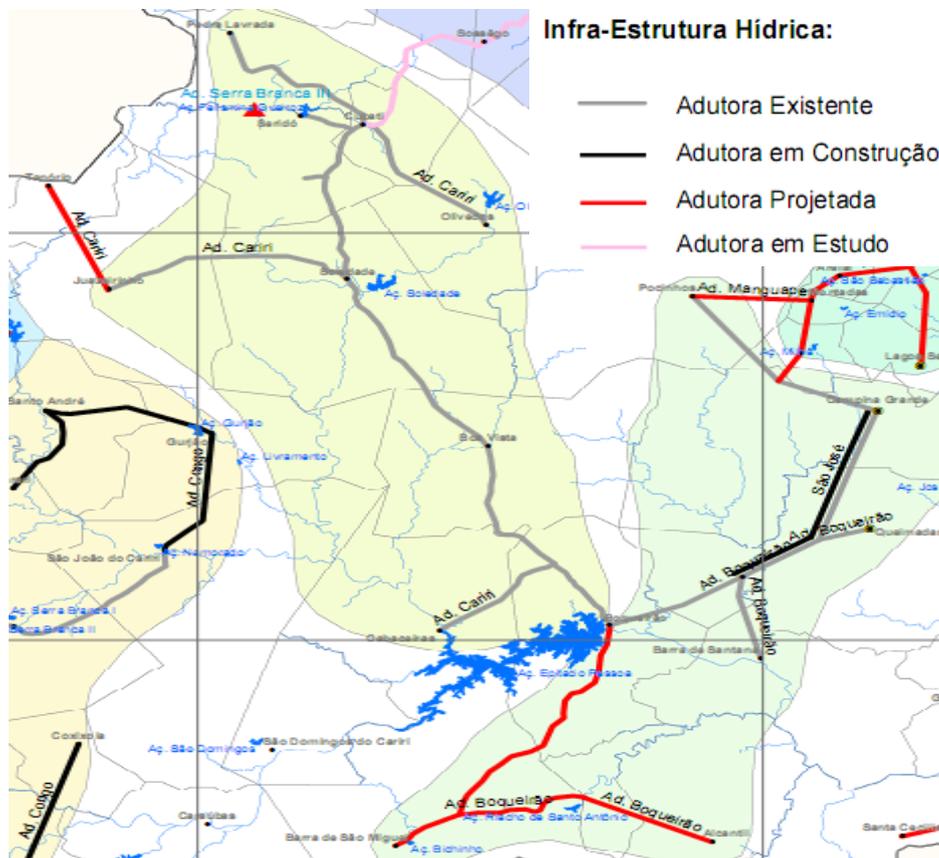


Figura 4 – Cidades atendidas pelas adutoras do reservatório Epitácio Pessoa. (Fonte: AESA, 2010)

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, com base nos dados dos censos de 1980, 1991, 1996, 2000 e 2007 realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (IBGE, 2009).

A estimativa da demanda média da j-ésima adutora ( $Qd_{j,n}$ ) foi calculada pela seguinte equação:

$$Qd_{j,n} = \sum_i Pop_{i(j),n} \cdot QPC_j \quad (1)$$

sendo  $Pop_{i(j),n}$  a população da i-ésima cidade atendida pela adutora j no ano n,  $QPC_j$  a quota per capita de água da adutora j.

A quota per capita de água 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 incluídos o consumo para a lavagem dos filtros, retiradas por caminhões pipas, e as perdas por distribuição (ARAGÃO, 2008).

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

OBS: \*projeção de atendimento.

Segundo 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: mamão, banana, goiaba e limão.

O plano de cultivo do perímetro e seus respectivos coeficientes de cultivo (kc) são mostrados na Tabela 3. Os valores de kc para as culturas agrícolas perenes foram considerados na fase de produção.

Na Tabela 4 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 ( $\Delta H$ ) 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 3 – Distribuição dos coeficientes mensais de cultivo das culturas (kc).

Culturas	Meses do ano hidrológico											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
<b>Sazonais</b>		<b>Safra</b>						<b>Entressafra</b>				
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	
<b>Perenes</b>												
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

Tabela 4 – Dados característicos das culturas.

Culturas agrícolas	Prod (kg/ha/ano)	Prc (R\$/kg)	Cprod (R\$/ha/ano)	Hdc (diárias/ha/ano)	Sistema de irrigação	$\Delta H$ (mca)	Eap
<b>Sazonais</b>							
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					
<b>Perenes</b>							
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 m<sup>3</sup> de água segundo estudos do Plano Estadual dos Recursos Hídricos do Estado da Paraíba - PERH/PB (AESA, 2010) 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 5),

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 5 – Áreas máximas das culturas agrícolas.

<b>Culturas agrícolas</b>	<b>Área máxima (ha)</b>
Tomate, pimentão, feijão, repolho	150
Alface, cebola, mamão e goiaba	100
Banana	350

A vazão mínima a ser liberada pelo reservatório para a perenização do trecho do rio Paraíba a jusante do mesmo, segundo informações da AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, é de cerca 1 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2.2 – Precipitação

Para o cálculo da precipitação direta no reservatório e da precipitação efetiva nos perímetros irrigados foram utilizados valores precipitados nos postos pluviométricos (Tabela 6) mais próximos dos reservatórios e o perímetro irrigado.

Tabela 6 – Postos pluviométricos utilizados.

	<b>Posto Utilizado</b>			
	<b>Nome</b>	<b>Código</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>
Res. Boqueirão	Boqueirão	00736023	36°07'W	07°29'S
Perímetro Irrigado	Cabaceiras	00736022	36°17'W	07°36'S

Fonte: SUDENE (1990)

A média mensal dos valores da precipitação nos postos pluviométricos pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 – Precipitação média mensal dos postos utilizados.

<b>Posto</b>	<b>Precipitação mensal (mm)</b>											
	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
Boqueirão	27,9	53,0	79,2	96,1	51,2	55,9	56,4	23,6	12,8	5,4	5,4	17,0
Cabaceiras	15,1	37,8	58,2	79,6	38,8	39,0	35,7	13,4	4,6	2,8	2,9	9,7

Fonte: SUDENE (1990)

### 3.2.3 – Vazões afluentes

Os dados de vazões afluentes ao reservatório 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).

### 3.2.4 – Evaporação

Os dados de evaporação no reservatório e no perímetro irrigado foram obtidos a partir de dados observados do tanque “Classe A” do posto climatológico de São João do Cariri. Os valores mensais do coeficiente de tanque kt foram estimados por Oliveira et al. (2005) para a região do cariri paraibano. Os dados de evaporação média mensal de cada posto e do coeficiente tanque kt podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados de evaporação média mensal do tanque “Classe A” e do coeficiente kt.

Posto Climatológico	Evaporação média mensal (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
São J. do Cariri	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 <sup>3</sup>	0.78	0.80	0.78	0.89	0.93	0.92	0.87	0.82	0.76	0.79	0.80	0.80

Fonte: Aragão (2008); <sup>3</sup>Oliveira et. al. (2005)

### 3.2.5 – Dados dos reservatórios estudados

Os dados das curvas cota-área-volume do reservatório Boqueirão foram obtidos do levantamento batimétrico da bacia hidráulica do mesmo (SEMARH, 2004, apud Alencar, 2009).

A Tabela 10 mostra a capacidade máxima de armazenamento (volume máximo) do reservatório fornecido pela AESA e o volume morto considerado como sendo 11% da capacidade de armazenamento.

Tabela 10 – Dados volumétricos do reservatório Epitácio Pessoa.

Reservatório	Volume (hm <sup>3</sup> )	
	Máximo	Morto
Epitácio Pessoa	411,69	45,93

A vazão vertida máxima projetada para o vertedouro do reservatório, fornecida pela AESA, é de 2610 m<sup>3</sup>/s.

A Tabela 11 apresenta os dados do coeficiente de vazão de descarga de fundo (Cf), diâmetro da seção transversal (Df), da cota de jusante da geratriz inferior (Hfs) e da cota de entrada (Hfe) do tubo de descarga de fundo do reservatório.

Tabela 11 – Características físicas do tubo de descarga de fundo do reservatório Epitácio Pessoa.

Reservatório	Cf <sup>1</sup>	Df <sup>2</sup> (m)	Hfs (m)	Hfe (m)
Epitácio Pessoa	0,60	0,75	361	361

Fonte: <sup>1</sup>DAEE (2005), <sup>2</sup>AESA

## 3.2 – Modelo de Otimização multiobjetivo

O modelo de otimização utilizado foi desenvolvido por Santos (2007) 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 Seqüencial.

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 foram a minimização do déficit das demandas de abastecimento urbano nas tomadas d'águas, maximização da receita líquida e da mão-de-obra oriunda do perímetro irrigado e o atendimento do volume meta do reservatório.

### 3.3 – Análise dos recursos hídricos do sistema

Foram idealizados três cenários para a análise dos recursos hídricos do reservatório:

**Cenário 1:** O único uso das águas do reservatório será para o abastecimento urbano através das adutoras;

**Cenário 2:** É considerado, além do abastecimento urbano (1ª prioridade), o uso das águas para a agricultura irrigada (2ª prioridade).

**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 do reservatório (3ª prioridade)

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 do perímetro irrigado, perenização do rio a jusante do reservatório e volume meta dos reservatórios.

Os critérios operacionais idealizados para os reservatórios, em 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 do reservatório foi de 238,29 hm<sup>3</sup> (58% da capacidade de acumulação), que correspondente a média dos últimos 16 anos para o mês de janeiro.
- O volume do reservatório, ao final do período de estudo de otimização, deve ser maior ou igual ao volume inicial, garantindo a sustentabilidade hídrica;
- O volume meta do reservatório em todos os meses será igual à capacidade do mesmo;
- As capacidades das tomadas d'água destinada 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 perímetro irrigado é mantido invariável em todos os cenários estudados; as culturas agrícolas permanentes estão consideradas em plena capacidade de produção;
- Quanto a capacidade do sistema adutor para o perímetro irrigado considerou-se um sistema formado de 5 bombas com uma vazão de 1 m<sup>3</sup>/s trabalhando 20 horas por dia.
- No cálculo das demandas de irrigação, adotando-se lâminas de rega fixas, considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas;

## **4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 – Cenário 1**

A demanda estabelecida para o abastecimento urbano, no cenário 1, foi atendida sem apresentar falha, como mostra a Figura 5.

A Figura 6 mostra o comportamento do volume de água do reservatório Epitácio Pessoa 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 no 5º e 6º ano chegando ao valor de 195,4 hm<sup>3</sup> (47% da capacidade de acumulação do reservatório) por causa da pouca afluência nesse período (Figura 7).

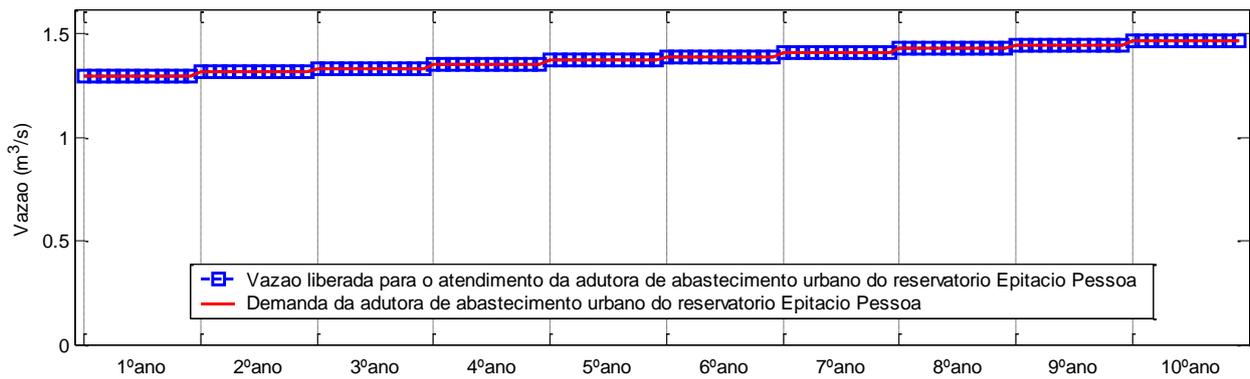


Figura 5 – Atendimento das demandas de abastecimento urbano para o cenário 1.

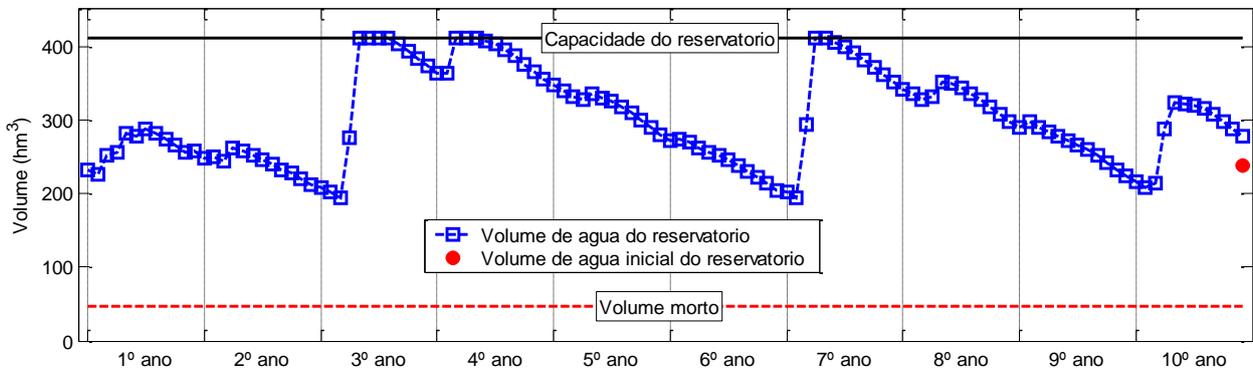


Figura 6 – Volume de água do reservatório Epitácio Pessoa para o cenário 1.

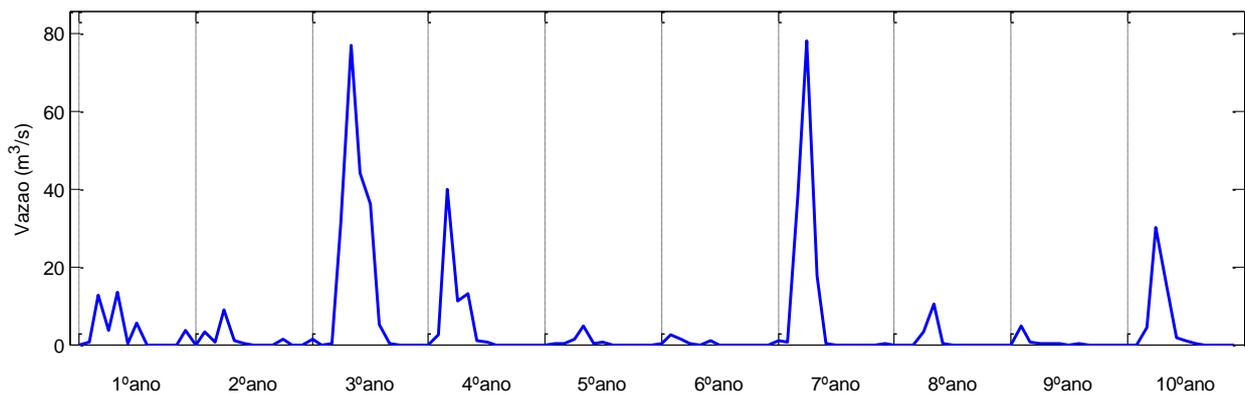


Figura 7 – Vazão afluente ao reservatório Epitácio Pessoa.

Observa-se na Figura 8 que ocorreram vertimento apenas no 3º, 4º e 7º ano, anos estes que apresentam as maiores afluências ao reservatório. Os vertimento ocorreram entre os meses de março e junho. A média dos vertimento foi de 20,66 m<sup>3</sup>/s.

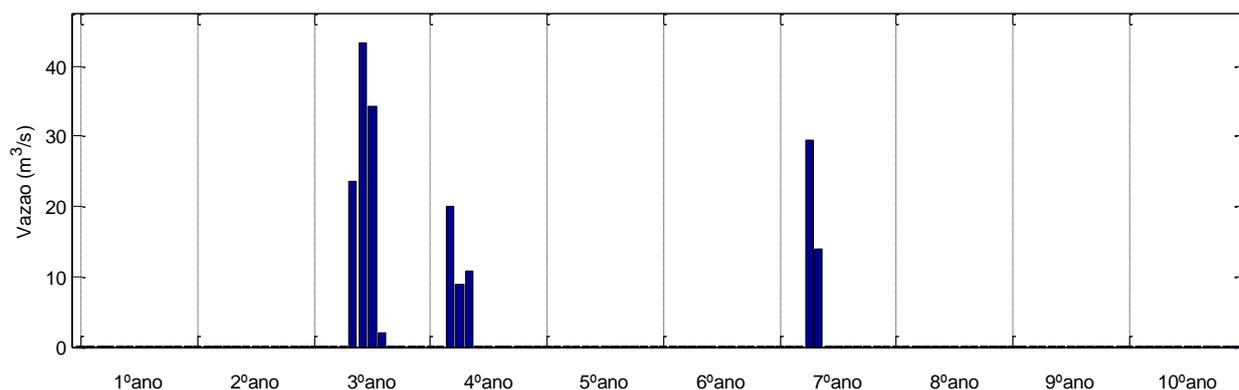


Figura 8 – Vazão vertida do reservatório Epitácio Pessoa no cenário 1.

A Tabela 12 mostra os volumes evaporados médios mensais do reservatório no cenário 1. Tem-se que os maiores volumes evaporados ocorrem entre os meses de outubro a dezembro.

Tabela 12 – Volume evaporado médio mensal do reservatório Epitácio Pessoa no cenário 1

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
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

## 4.2 – Cenário 2

A demanda estabelecida para o abastecimento urbano, no cenário 2, foi atendida sem apresentar falha.

A Tabela 13 mostra os valores médios anuais das áreas cultivadas de cada cultura agrícola e suas respectivas receitas líquidas, mão-de-obra e consumo hídrico para o perímetro irrigado no cenário estudado. Tem-se que se aloca mais áreas para culturas agrícolas sazonais no perímetro (cerca de 1165 ha/ano, em média) devido principalmente ao menor consumo hídrico (cerca de 38% do consumo hídrico total do perímetro). Tais culturas agrícolas sazonais representam mais de 80% de toda receita líquida oriunda da atividade agrícola e mais de 77% de toda mão de obra empregada no perímetro irrigado, com destaque para a cultura agrícola do tomate que representa mais de 40% e de 30% de toda receita líquida e da mão de obra do perímetro irrigado, respectivamente. Entre as culturas agrícolas perenes destaca-se o cultivo da banana, que apesar de consumir mais de 49% de toda vazão destinada ao perímetro, emprega mais 19% da mão de obra total. Não foram alocadas áreas para as culturas agrícolas do feijão, mamão e goiaba.

A Figura 9 mostra que vazão destinada ao suprimento hídrico do perímetro irrigado é variável, podendo chegar a 1,1 m<sup>3</sup>/s em períodos secos (setembro a novembro). A área utilizada anualmente no perímetro irrigado representa cerca 76 % da área máxima considerada, atingindo sua capacidade máxima sempre no período entre fevereiro e abril, na safra, e no período entre agosto e outubro, na entressafra, com exceção do 8º, 9º e 10º ano devido a disponibilidade hídrica do

reservatório Epitácio Pessoa que, foi o fator limitante para o cultivo das culturas agrícolas neste cenário.

Tabela 13 – Valores médios anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada no perímetro irrigado para o cenário 2.

Cultura	Área (ha/ano)	Receita Líquida (R\$/ano)	Mão-de-obra (diárias/ano)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Tomate (s)	150,0	12.102.140,1	55.050,0	0,21
Pimentão (s)	150,0	991.374,8	28.800,0	0,26
Feijão (s)	0,0	0,0	0,0	0,00
Repolho (s)	100,0	1.688.611,1	14.200,0	0,10
Alface (s)	100,0	5.539.781,5	19.600,0	0,16
Cebola (s)	100,0	1.079.687,7	21.100,0	0,16
Tomate (es)	150,0	1.880.766,5	55.050,0	0,21
Pimentão (es)	115,3	99.114,4	22.128,6	0,26
Feijão (es)	0,0	0,0	0,0	0,00
Repolho (es)	100,0	355.692,7	14.200,0	0,10
Alface (es)	100,0	2.493.330,7	19.600,0	0,16
Cebola (es)	100,0	1.065.728,5	21.100,0	0,16
Mamão	0,0	0,0	0,0	0,00
Banana	320,0	4.263.224,8	68.160,0	2,28
Limão	100,0	2.362.521,0	14.600,0	0,57
Goiaba	0,0	0,0	0,0	0,00
<b>Total</b>	<b>1585,3</b>	<b>33.921.973,6</b>	<b>353.588,6</b>	<b>4,62</b>

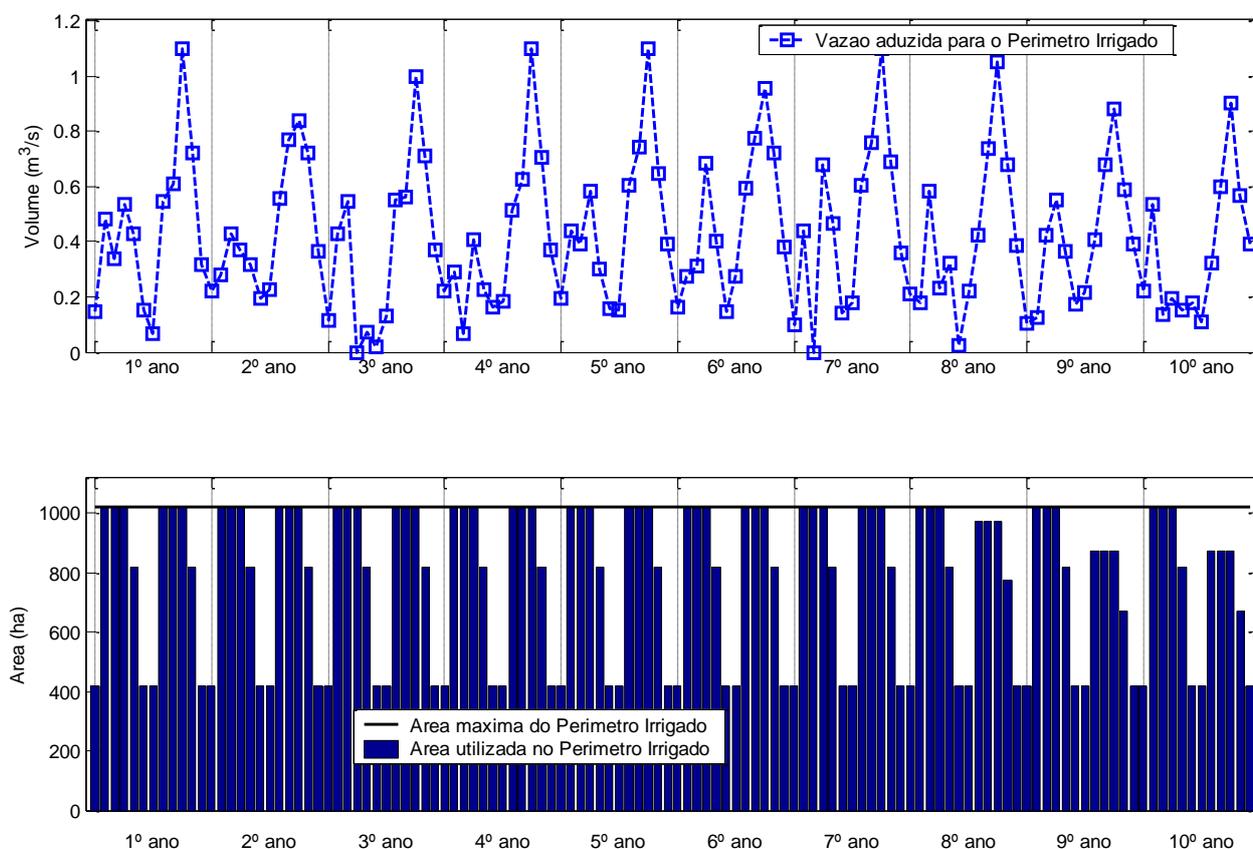


Figura 9 – Vazões aduzida e área utilizada no perímetro irrigado para o cenário 2.

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

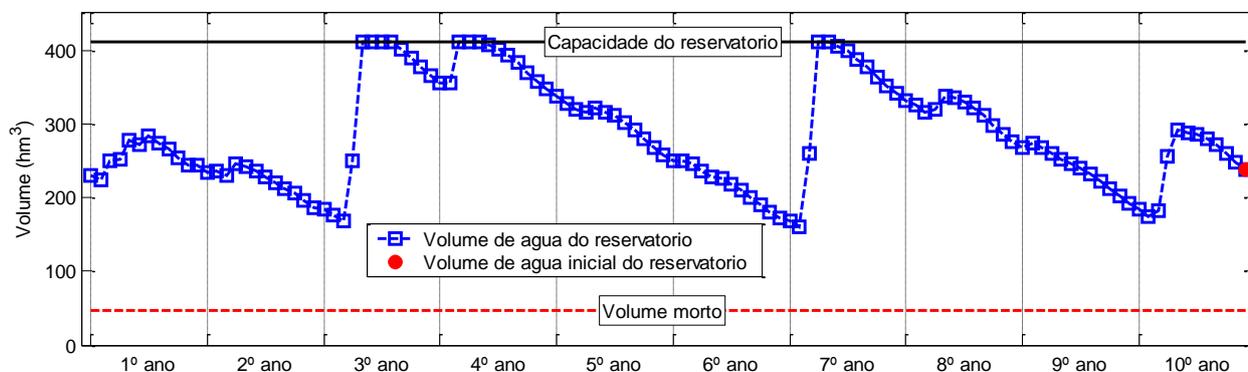


Figura 10 – Volume de água do reservatório Epitácio Pessoa para o cenário 2.

Observa-se, na Figura 11, que o vertimento ocorreu nos mesmos anos e meses do cenário 1, porém com menor intensidade no 7º ano. A média dos vertimento nesse cenário foi de 17,40 m³/s, menor do que no cenário 1.

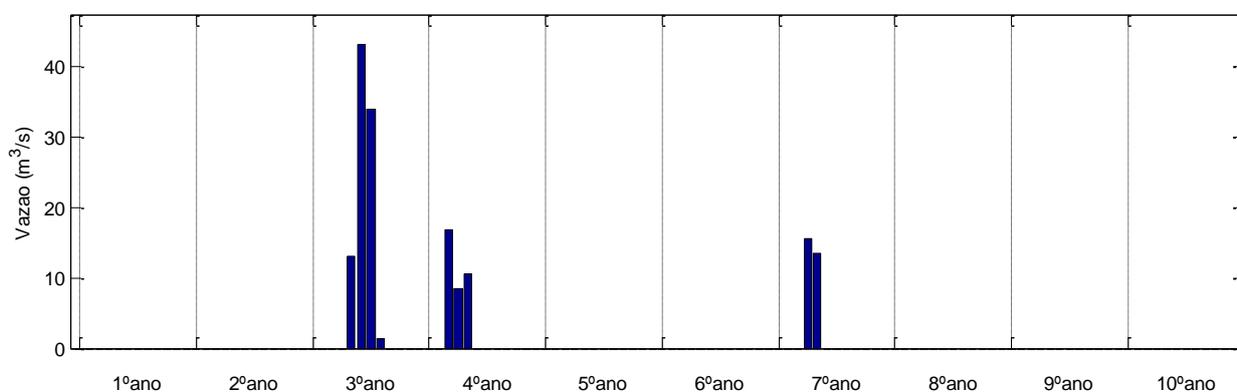


Figura 11 – Vazão vertida do reservatório Epitácio Pessoa no cenário 2.

A Tabela 14 mostra os volume evaporados médios mensais do reservatório no cenário 1. 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 (em torno de 4%, em media) devido ao maior consumo das águas para o atendimento das demandas propostas.

Tabela 14 – Volume evaporado médio mensal do reservatório Epitácio Pessoa no cenário 1

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
5,2	4,6	4,5	4,8	4,7	3,7	3,7	4,3	4,8	6,2	5,8	5,6	4,8

### 4.3 – Cenário 3

Neste cenário a demanda estabelecida para o abastecimento urbano foi atendida sem apresentar falhas.

Com incremento da vazão para a perenização do rio a jusante do reservatório reduziu o suprimento hídrico para as culturas e houve diminuição da área cultivada da banana (Tabela 15). o que permitiu cultivar o feijão na safra e o mamão, não ocorrendo mudanças significativas na mão de obra empregada, na receita líquida e no consumo hídrico do perímetro irrigado.

Tabela 15 – Valores médios anuais da área cultivada, receita líquida auferida, mão-de-obra e vazão requerida de cada cultura agrícola cultivada no perímetro irrigado para o cenário 3.

Cultura	Área (ha/ano)	Receita Líquida (R\$/ano)	Mão-de-obra (diárias/ano)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Tomate (s)	150,0	12.102.140,1	55.050,0	0,21
Pimentão (s)	150,0	991.374,8	28.800,0	0,26
Feijão (s)	0,1	30,1	6,9	0,00
Repolho (s)	100,0	1.688.611,1	14.200,0	0,10
Alface (s)	100,0	5.539.781,5	19.600,0	0,16
Cebola (s)	100,0	1.079.687,7	21.100,0	0,16
Tomate (es)	150,0	1.880.766,5	55.050,0	0,21
Pimentão (es)	116,4	100.068,2	22.342,8	0,26
Feijão (es)	0,0	0,0	0,0	0,00
Repolho (es)	100,0	355.692,7	14.200,0	0,10
Alface (es)	100,0	2.493.330,7	19.600,0	0,16
Cebola (es)	100,0	1.065.728,5	21.100,0	0,16
Mamão	0,7	4.122,8	131,0	0,01
Banana	318,9	4.248.101,6	67.918,2	2,27
Limão	100,0	2.362.521,0	14.600,0	0,57
Goiaba	0,0	0,0	0,0	0,00
<b>Total</b>	<b>1.586,0</b>	<b>33.911.957,2</b>	<b>353.698,9</b>	<b>4,62</b>

A Figura 12 apresenta a vazão defluente liberada pelo reservatório para a perenização do rio a jusante do reservatório. Tem-se que a partir do 7º ano tal demanda não é atendida devido a disponibilidade hídrica do reservatório.

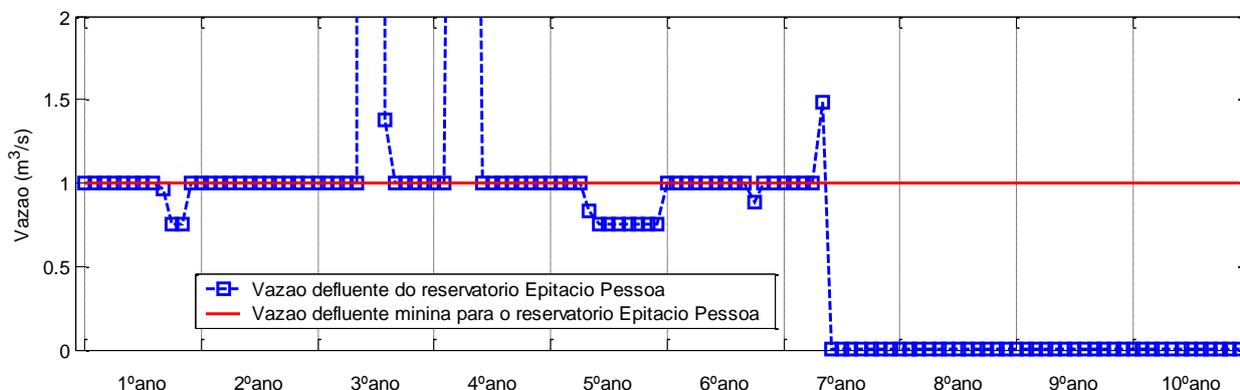


Figura 12 – Vazão defluente do reservatório Eptácio Pessoa no cenário 3.

A Figura 13 apresenta o volume de água no reservatório para o cenário 3. Observa-se o comportamento similar ao ocorrido no cenário 2, com diferença no menor volume de água registrado no período 94,96 hm<sup>3</sup> (23% da capacidade de acumulação do reservatório) por causa do atendimento das demandas estabelecidas nesse cenário.

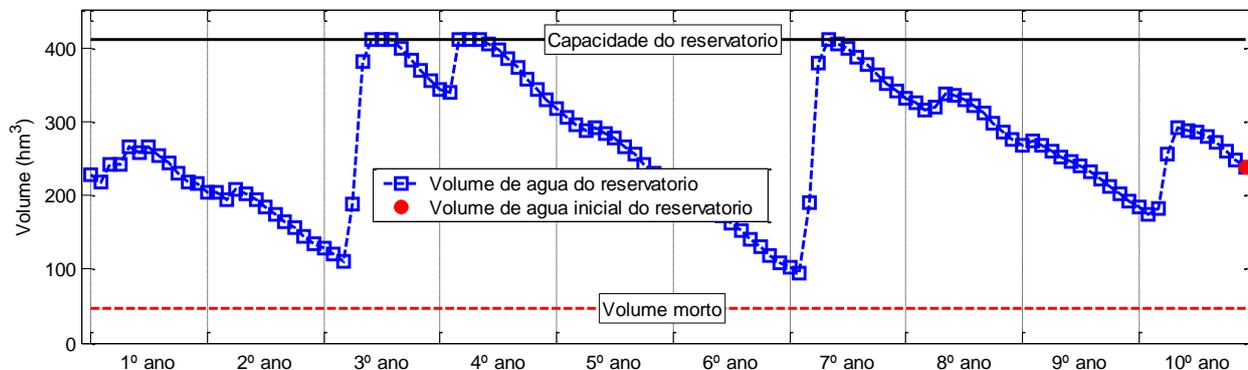


Figura 13 – Volume de água do reservatório Epitácio Pessoa para o cenário 3.

Observa-se na Figura 14 a diminuição do volume vertido. A média dos vertimento nesse cenário foi de 12,84 m<sup>3</sup>/s, bem menor do que no cenário 2.

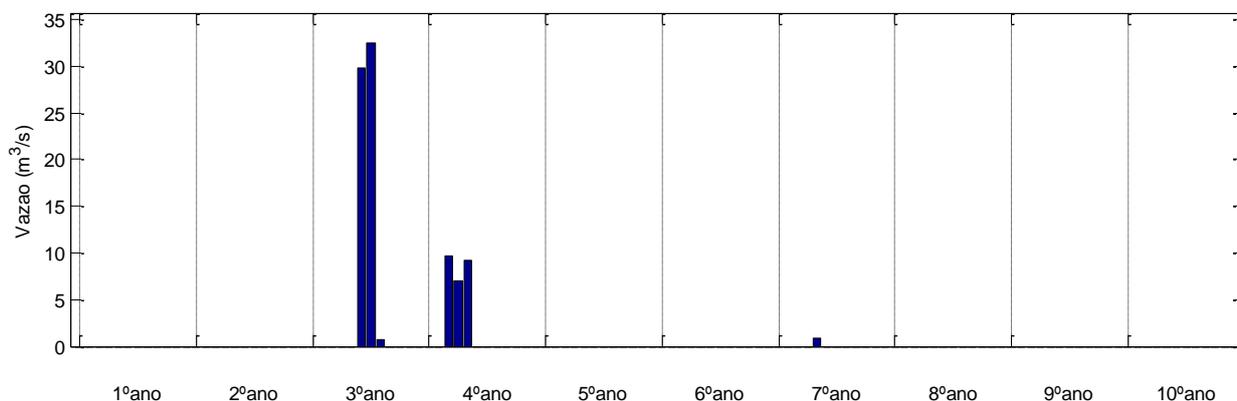


Figura 14 – Vazão vertida do reservatório Epitácio Pessoa no cenário 3.

A Tabela 16 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 10%, em média em comparação com o cenário 1) devido ao maior consumo das águas para o atendimento das demandas propostas.

Tabela 16 – Volume evaporado médio mensal do reservatório Epitácio Pessoa no cenário 1

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
4,8	4,3	4,2	4,5	4,5	3,5	3,6	4,1	4,6	5,8	5,4	5,3	4,5

## 5 – CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o estudo da operação ótima, multiobjetiva, plurianual e integrada das disponibilidades e usos dos recursos hídricos do reservatório Epitácio Pessoa.

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 Epitácio Pessoa, 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 não é sustentável, podendo não ser atendida por três anos consecutivos.

A inclusão de demandas ao reservatório diminui as perdas por evaporação e vertimento.

## BIBLIOGRAFIA

AESA (2010). Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Plano Estadual dos Recursos Hídricos. Relatório Final. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/perh/>. . Data da consulta: 15 de março de 2010.

ALBUQUERQUE, A. S. O.; ANDRADE, P. R. G. S.; CURI, R. C.; CURI, W. F. (2003). “Uma Análise da Operação de um Sistema de Cinco Reservatórios do Alto Capibaribe, Pernambuco” in: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, (CD-ROM).

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. Dissertação de mestrado. Campina grande.

BANCO DO NORDESTE S/A (2006). Manual de Orçamentos Agropecuários. Campina Grande – PB.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A. (2004). “Análise de Alterações na Receita Líquida de um Perímetro Irrigado no Semi-Árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (9-3), pp. 39-53.

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 (2010) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: [http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados\\_do\\_censo2010.php](http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados_do_censo2010.php). Data da consulta: 15 de março de 2010.

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, J. A.; LANNA, A. E. L. (1997). “Otimização de um Sistema de Reservatórios Atendendo a Múltiplos Usos no Nordeste Brasileiro”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (2-2), pp. 123-141.

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. (2007). Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 146p. Dissertação de Mestrado.

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.