

ANÁLISE DOS RESERVATÓRIOS VÁRZEA DO UNA E DUAS UNAS NO ATENDIMENTO DAS DEMANDAS DA BACIA DO RIO CAPIBARIBE

Valterlin da Silva Santos¹, Dayse Luna Barbosa², Rosires Catão Curi³ & Wilson Fadlo Curi⁴

RESUMO – O sistema de reservatórios Tapacurá, Jucazinho, Carpina e Várzea do Una na bacia do rio Capibaribe e Duas Unas na bacia do rio Jaboatão– PE são responsáveis pelo abastecimento de quinze cidades do Agreste, além das cidades Camaragibe, São Lourenço da Mata e parte da Região Metropolitana de Recife - RMR; para irrigação de áreas agrícolas próximas aos reservatórios e perenização do rio Capibaribe. Como cogita-se a exclusão dos reservatórios Várzea do Una e Duas Unas do sistema de abastecimento da cidade de Recife, este trabalho tem o objetivo de avaliar o seu impacto no atendimento das demandas, através de um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação linear, desenvolvido por Santos *et al.* (2011), analisando o sistema para um período de tempo de 10 anos consecutivos. Os resultados mostraram que a exclusão dos reservatórios não interferirá no abastecimento da RMR, entretanto a vazão regularizada no rio Capibaribe será comprometido e haverá redução da área utilizada nos perímetros irrigados.

ABSTRACT – The Tapacurá, Jucazinho, Carpina and Várzea do Una reservoir system within the Capibaribe river basin and Duas Unas within the Jaboatão river basin, located in Pernambuco, are responsible for the water supply of fifteen towns in the Agreste region, besides the cities of Camaragibe, São Lourenço da Mata and part of Metropolitan region of Recife - RMR; for irrigation in areas nearby the reservoir and to regulate water flow in Capibaribe river. As it has been considered the exclusion of the Várzea do Una and Duas Unas from the Tapacurá water supply system of the city of Recife, this work has the objective of analyzing its impact over the water demands through a multiobjective optimization model, based on successive linear programming, developed by Santos *et al.* (2011), over a 10 consecutive years period of time. The results have shown that the reservoirs exclusion do not compromise the water supply to RMR, although the regulated water flow in Capibaribe river, as well as the irrigated areas, will be reduced.

Palavras-chave: Otimização, reservatórios, múltiplos usos.

¹Professor Adjunto da UACC/CCJS/UFCG. Rua Sifrônio Nazaré 38. Sousa, PB. CEP 58.800-340. E-mail: valterlin@yahoo.com.br

²Professora Adjunta da UAEC/CTRN/UFCG. Av. Aprígio Veloso 882. Campina Grande, PB. CEP 58109-970. E-mail: dayseluna@yahoo.com.br

³Professora Associada da UAEC/CTRN/UFCG. Aprígio Veloso 882. Campina Grande, PB. CEP 58109-970. E-mail: rosirescuri@pesquisador.cnpq.br

⁴Professor Associado da UAF/CCT/UFCG. Aprígio Veloso 882. Campina Grande, PB. CEP 58109-970. E-mail: wfcuri@pesquisador.cnpq.br

1 - INTRODUÇÃO

De acordo com Tucci (1998), dentre os recursos naturais, um dos que apresenta os mais variados, legítimos e correntes usos, é indubitavelmente a água. Nos dias atuais, em função dos progressos sociais e industriais que vem atravessando a humanidade, pode-se enumerar, entre outros, os seguintes usos múltiplos: abastecimento urbano, irrigação, piscicultura, geração de energia elétrica, controle de cheias, regularização de vazão, diluição de esgotos e preservação da flora e fauna (fonte protéica).

A garantia do uso da água para gerações futuras depende do gerenciamento da mesma no presente. De acordo com Braga *et al.* (1998), o desenvolvimento sustentável é um processo que propicia o aumento do potencial de atender as necessidades e aspirações humanas do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades. Neste contexto é preciso que as bacias hidrográficas recebam atenção especial, com estudos de planejamento e gerenciamento que crescem juntamente com a evolução das técnicas de análises de sistemas e avanços computacionais. Principalmente em regiões semiáridas, como o Nordeste brasileiro, onde a gestão otimizada da água torna-se indispensável devido às chuvas irregulares em termos de distribuição espaço-temporal e a alta taxa de evaporação.

A bacia do rio Capibaribe, no estado de Pernambuco, é de grande importância sócio-econômica, devido aos usos diversos da água como abastecimento humano, dessedentação de animais, uso industrial, irrigação, piscicultura, contenção de cheias, além de receptora de despejos. A bacia é composta por 43 municípios com população de quase 3,5 milhões de pessoas. A oferta hídrica provida pelo sistema público é sustentada basicamente pelos reservatórios superficiais.

A bacia sofreu cheias catastróficas e excepcionais que ocorreram em anos passados gerando a necessidade da construção das barragens Tapacurá, Goitá e Carpina. Evitando assim que as águas excessivas do rio Capibaribe e de seus afluentes atinjam ao mesmo tempo o trecho mais baixo da bacia hidrográfica, onde se localizam áreas urbanas do Recife e de outros municípios. A barragem de Jucazinho foi construída com a finalidade de controlar as cheias da parte alta da bacia do rio Capibaribe.

Além disso, a região passou por períodos de secas, os quais provocaram um racionamento rigoroso no ano de 1999, chegando a proporção de nove dias sem água para um dia com água na cidade do Recife; e de quatro dias de fornecimento de água para vinte e seis dias sem água, dentro de um esquema de distribuição por zoneamento de bairros no município de Caruaru.

A região compreendida pelas sub-bacias de Jucazinho, Carpina, Goitá, Tapacurá e Várzea do Una é responsável pelo abastecimento de quinze cidades do Agreste, além das cidades Camaragibe,

São Lourenço da Mata e parte da Região Metropolitana de Recife (RMR). Sendo também utilizado para irrigação sem o racional controle da água e a perenização do rio Capibaribe.

As demandas crescentes e a insuficiência de disponibilidade hídrica fazem da região uma das de maior conflito de uso das águas do estado de Pernambuco. No reservatório de Jucazinho, os conflitos de uso da água estão representados, por um lado, pela existência de fortes pressões políticas no sentido de incluir novas comunidades no seu sistema adutor, ainda em construção; do outro lado, estão os anseios sociais pelo uso intensivo da água para a irrigação de manchas de terras agricultáveis situadas a montante e a jusante do empreendimento, o que pode comprometer a disponibilidade hídrica para o consumo humano, particularmente, por se tratar de uma região de clima semiárido. No sistema Tapacurá, localizado na parte baixa da bacia, os conflitos estão caracterizados por interesses da população em ampliar as funções dos reservatórios Carpina e Goitá, originalmente projetados pelo Governo Federal para controle de cheias, no sentido de que estas barragens de contenção passem a operar, também, como reservatórios de regularização (Andrade, 2006).

Não obstante, cogita-se a condição de exclusão dos reservatórios Várzea do Una e Duas Unas do sistema Tapacurá. Deste modo, este trabalho tem o objetivo de avaliar o impacto no atendimento das demandas causado pela exclusão dos reservatórios Várzea do Una e Duas Unas no sistema Tapacurá, através de um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em programação linear, desenvolvido por Santos *et al.* (2011), analisando o sistema para um período de tempo de 10 anos consecutivos.

2 – DESCRIÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe (Figura 1), localizada na porção Nordeste da Mesoregião geográfica do Agreste do estado de Pernambuco no Nordeste brasileiro, possui uma área total de 7.557,4 km². Está compreendida entre as latitudes 70 41' e 80 19' S e 340 51' e 360 42' W Gr. Limita-se ao Norte com a bacia do rio Goiana e o estado da Paraíba; ao Sul com a bacia do rio Ipojuca; à Leste com o Oceano Atlântico; à Oeste com a bacia hidrográfica do rio Ipojuca e o estado da Paraíba.

Dividido em Alto, Médio e Baixo Capibaribe, da nascente à foz, o rio corre pelo Agreste e Zona da Mata, cortando também a Região Metropolitana do Recife (RMR), em aproximadamente 240 quilômetros de percurso, com 75% de sua bacia situada dentro do chamado polígono das secas. O rio Capibaribe é intermitente no seu alto e médio cursos. A partir do município de Limoeiro, no seu baixo curso, torna-se perene.

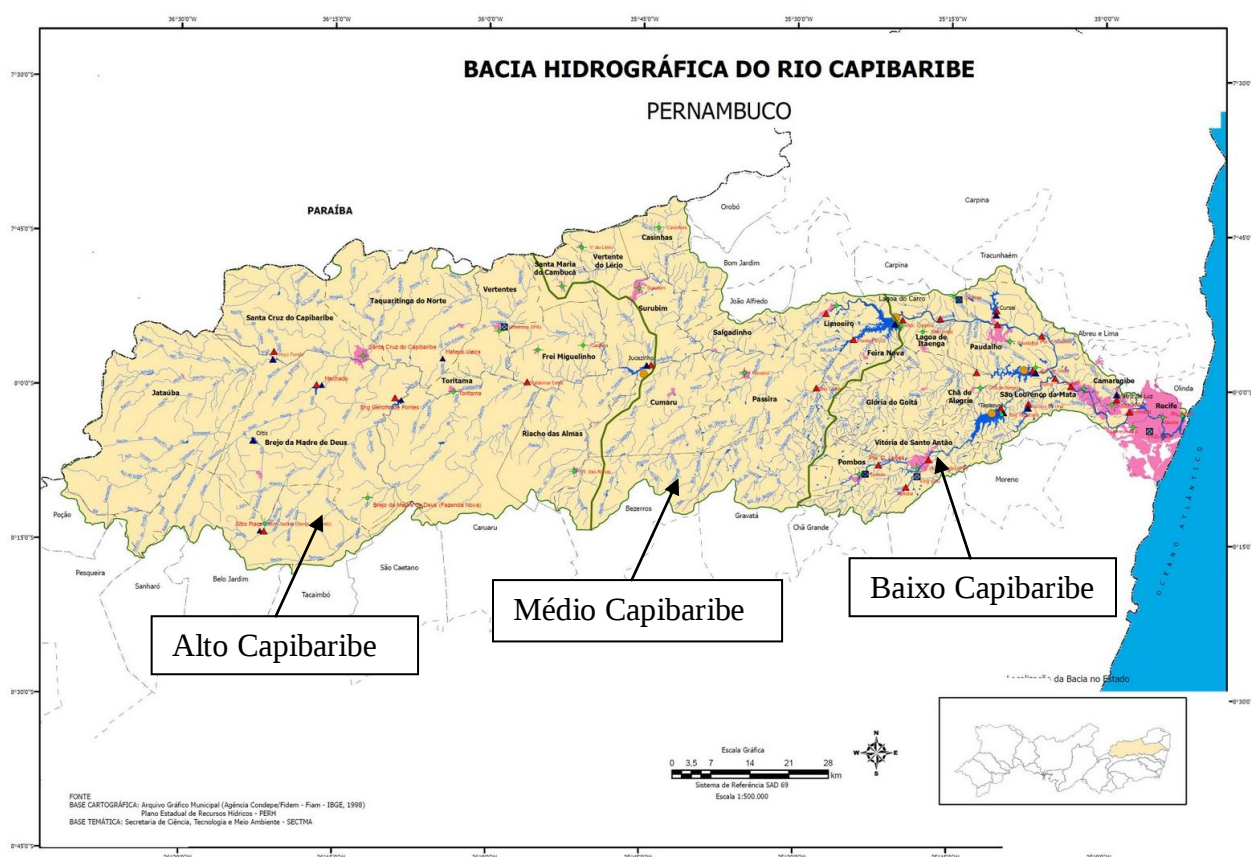


Figura 1 - Bacia do rio Capibaribe no Estado de Pernambuco.

A classificação climática na bacia, segundo a metodologia de Thornthwaite, é variada. Em Recife e São Lourenço da Mata o clima é do tipo úmido. Entre Glória do Goitá e Paudalho o clima varia do tipo semi-árido para seco e sub-úmido em Carpina. Já a partir da cidade de Limoeiro o clima é semi-árido. A precipitação média anual nas partes Alta e Média da bacia é inferior a 700 mm. Na parte Baixa a precipitação oscila entre 1000 e 2400 mm.

O relevo é acidentado em terrenos cristalinos no Alto e Médio Capibaribe. No Baixo Capibaribe predomina o relevo ondulado. A diversidade da vegetação é bastante significativa, refletindo o impacto da ação antrópica sobre a bacia, ao longo dos séculos de ocupação. Destacando a vegetação arbórea fechada/mata na porção oeste da bacia, a vegetação arbustiva arbórea aberta, concentrando-se de forma mais representativa na região de desenvolvimento do Agreste Central e os manguezais, que foram aterrados de forma significativa, restando apenas remanescentes nas margens do rio Capibaribe.

2.1 – Infraestrutura Hídrica

As fontes hídricas dos sistemas de abastecimento d'água da Bacia do Capibaribe são predominantemente de superfície, visto que todas as sedes municipais atendidas utilizam açudes ou cursos d'água, e apenas três destas (Jataúba, Recife e Vitória do Santo Antão) utilizam poços como

fonte hídrica complementar. Quanto às fontes hídricas subterrâneas utilizadas para o abastecimento de Recife, os poços posicionados no território da Bacia do Capibaribe estão em sua maioria vinculados a proprietários privados (condomínios residenciais e indústrias) não sendo operados, nem monitorados pela COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento).

Para o nosso estudo será considerado o sistema Jucazinho-Carpina, composto pelos reservatórios Jucazinho e Carpina e o sistema Tapacurá, composto pelos reservatórios Tapacurá, Várzea do Una e Duas Unas, as captações a fio d'água no rio Capibaribe, denominadas de Tiúma e Castelo e o reservatório Goitá, como mostra a Figura 2.

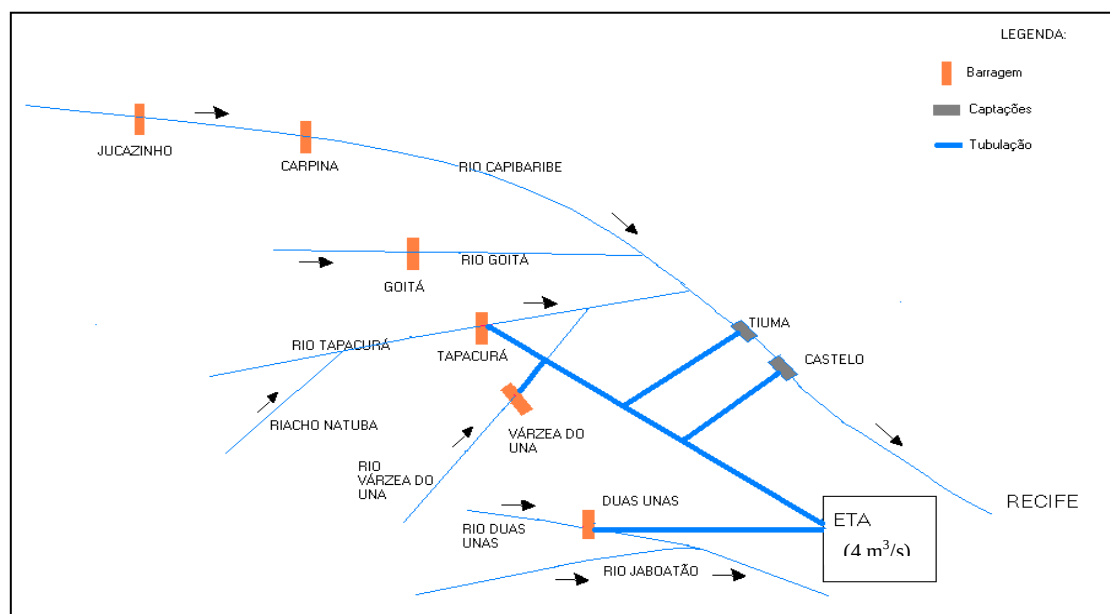


Figura 2 – Sistema Jucazinho-Carpina e o Sistema Tapacurá.

A seguir serão descritos os reservatórios e as captações do sistema que compõem a bacia do Capibaribe neste estudo.

2.1.1 - Barragem Jucazinho

O reservatório Jucazinho, situado na região agreste da bacia, foi construído em 1998 pelo Governo Federal com o objetivo de complementar o programa de controle de enchentes da bacia, além de permitir outros usos, como o abastecimento humano, irrigação, produção de pescado, perenização de vazão. No seu papel de controle de enchentes foram beneficiadas com sensíveis reduções do risco de inundações as cidades de Salgadinho e Limoeiro.

O reservatório Jucazinho pode conferir ainda um aumento do fator de segurança relativo à proteção da cidade de Recife contra enchentes de grande magnitude, podendo concorrer para o alívio do compromisso que tem o reservatório Carpina em atuar, exclusivamente, como um reservatório de controle de cheias, conforme o seu projeto original.

2.1.2 - Barragem Carpina

Segundo Andrade (2000) o reservatório Carpina, concluído no ano de 1978, foi projetado para controle de cheias do rio Capibaribe, fazendo parte de um conjunto de obras hidráulicas destinado a defender de inundações a cidade do Recife. Tem acumulado água apenas nas cheias periódicas, liberando-a sob controle até esgotar essas reservas eventuais. A seca registrada nos anos de 1998 e 1999, provocando severa escassez e até indisponibilidades de oferta de água para o abastecimento de várias localidades da região, incluindo a cidade do Recife, levantou interesses no sentido de mudar a destinação original da função do reservatório Carpina, cogitando-se o seu aproveitamento para atender o abastecimento urbano, na área de influência, e o suprimento de demandas hídricas insatisfeitas representadas por irrigações praticadas em terras do entorno da bacia hidráulica.

2.1.3 - Barragem Tapacurá

Conforme os dados do Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica - PQA/PE – Relatório nº 7 (1997), o reservatório Tapacurá localizado no município de São Lourenço da Mata, a cerca de 30 km do centro do Recife, foi construído com o objetivo de abastecimento d'água das cidades de Camaragibe, Jaboatão dos Guararapes, Recife e São Lourenço da Mata, e controle de cheias no Baixo Capibaribe, como parte do esquema de proteção do Recife contra as enchentes, laminando uma vazão máxima do rio Tapacurá, afluente do Capibaribe, em $150 \text{ m}^3/\text{s}$, ao mesmo tempo em que as águas nela represadas deveriam servir para o suprimento hídrico desta Capital e outras localidades sob sua área de influência na RMR. Teve sua exploração iniciada no ano de 1977.

Em 1987 a capacidade volumétrica aumentou de 70,7 para 98,7 milhões de metros cúbicos depois da cota da soleira do vertedor central ser elevada de 100 para 103 metros, proporcionando um aumento de descarga regularizada em $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Logo, a vazão explorável em Tapacurá passou a ser de $2,70 \text{ m}^3/\text{s}$. Além da redução do déficit, outras fontes foram mobilizadas para incorporação ao sistema, seja para permitir seu funcionamento a plena capacidade, ou para a geração de excedentes que poderiam atender zonas próximas.

2.1.4 - Barragem Goitá

Conforme a COMPANHIA INTEGRADA DE SERVIÇOS AGROPECUÁRIOS DE PERNAMBUCO - CISAGRO (1990), a barragem Goitá foi construída entre o final dos anos 1976 e 78 como parte do sistema de controle de cheias. Permite laminar uma vazão efluente máxima de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, fazendo diminuir a probabilidade de enchentes na RMR. Situa-se no Município de Paudalho distante 27,8 km do Recife.

2.1.5 - Barragem Várzea do Una

De acordo com o PQA/PE (1997), a barragem Várzea do Una situa-se próxima à do Tapacurá, sendo a distância entre ambas da ordem dos 5 km. A situação geográfica deste manancial facilita sua integração ao Sistema Tapacurá, embora possa vir a ser explorado isoladamente, fornecendo água para o suprimento de São Lourenço da Mata e Camaragibe, comunidades estas localizadas em sua área de influência.

O estudo hidrológico feito pelo PQA/PE (1997) para avaliação da capacidade de regularização da represa levou em conta várias hipóteses de acumulação, aplicando-se, para cada uma delas, um modelo de simulação da operação do respectivo reservatório, utilizando-se uma série gerada de deflúvios de 47 anos (1937-1984). Para a alternativa adotada ($V = 11,6 \text{ Hm}^3$), a vazão regularizada obtida foi de $0,54 \text{ m}^3/\text{s}$, sem riscos de falhas ou necessidade de racionamento. Para uma descarga de $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ a possibilidade de falhas ocorre em 2 anos do período estudado, com colapsos de 28 dias em cada ano, caso não seja adotado racionamento. Considera-se a vazão regularizada de $0,54 \text{ m}^3/\text{s}$ como disponibilidade hídrica segura do manancial. A exploração das águas da barragem Várzea do Una teve início em abril de 1994, ainda em regime emergencial.

2.1.6 - Barragem Duas Unas

A barragem de Duas Unas, situada a cerca de 180 m a montante da travessia do rio Duas Unas. Segundo o PQA/PE (1997) o valor da descarga é de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para o abastecimento público. A garantia dessa vazão foi um dos condicionantes do dimensionamento da ETA Marechal Castelo Branco, conforme já referido quando dos comentários sobre a barragem do Tapacurá. O início da exploração deste manancial era previsto para o ano de 1985. No entanto, falhas no sistema Tapacurá anteciparam a implantação e operação das obras para 1978.

2.1.7 - Captações

Conforme PQA/PE (1997), o suprimento do sistema Tapacurá, visando o abastecimento da RMR, retira água do reservatório da barragem Tapacurá, complementando as necessidades através da mistura da água do rio Capibaribe aduzida de dois pontos:

- Tiúma, situada a montante de uma barragem de nível sob a ponte daquela localidade, com capacidade inicial de 250 l/s e ampliada posteriormente para permitir uma exploração de 500 l/s e
- Castelo, localizada a montante de São Lourenço da Mata, no trecho contíguo à fábrica de rações PURINA, constituída de duas elevatórias com capacidade para recalcar, cada uma delas, 500 l/s .

O sistema de adução de Tiúma foi concebido após a seca de 1992-94, inicialmente para substituir de forma emergencial o manancial de Tapacurá, que chegou a secar. Mais recentemente,

representa um reforço ao sistema. O Capibaribe foi regularizado através da operação conjunta dos reservatórios de Carpina, no próprio rio Capibaribe, e de Goitá, no afluente de mesmo nome. Assim, Carpina e Goitá, juntas, asseguram uma descarga mínima correspondente à soma da capacidade instalada das captações existentes.

A captação de Castelo teve sua operação iniciada em outubro de 1993.

O PQA/PE (1997) afirma que as descargas naturais no trecho do rio onde estão instaladas as captações referem-se às contribuições das parcelas da bacia não dominadas por barragens de acumulação. Entre a barragem do Carpina e a ponte Bicopeba, próximo a Tiúma, excluindo-se a bacia do Cursai, cujas águas são represadas para o abastecimento de várias comunidades, tem-se uma área de bacia remanescente de 260 km². A partir disto, em estudo realizado objetivando o aproveitamento múltiplo da barragem de Carpina (CISAGRO, 1991), a acumulação desta sub-bacia, correspondente a uma estiagem decenal, foi estimada em 500 l/s. O que significa que esta vazão seria suficiente para fazer operar apenas uma das captações implantadas.

2.2 – ÁREAS IRRIGÁVEIS

No reservatório Jucazinho, conforme estudos do DNOCS (1992 apud ANDRADE, 2006), situa-se o Perímetro Trapiá, com área estimada de 4.500 ha. A jusante do Reservatório Jucazinho, numa extensão de quase 52 km até o reservatório Carpina, encontra-se o Perímetro Várzeas/Passira, com área aproximada de 6.750 ha. No reservatório Carpina, conforme estudos feitos pela CISAGRO (1991 apud ANDRADE, 2006), encontra-se uma área de 1.800 ha situada no entorno da represa, denominada de Perímetro Carpina, formado de terras arrendadas a colonos pelo DNOCS, desde 1986.

Na região de influência direta dos reservatórios Tapacurá, Goitá e Várzea do Una, baseando-se em consulta ao trabalho Levantamento Exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, Volume I (1973 apud ANDRADE, 2006), do Ministério da Agricultura, definiu-se, para fins do estudo, a exploração de três perímetros irrigados, cada um com área de 4.000 hectares. Os três perímetros de irrigação são denominados de Perímetro Tapacurá, Perímetro Goitá e Perímetro Várzea do Una.

3 – METODOLOGIA

3.1 – Cenários Estudados

Com o intuito de avaliar o impacto da exclusão dos reservatórios Várzea do Una e Duas Unas do sistema em estudo foram propostos 3 (três) cenários de operação:

Cenário 1: Considerado padrão, será analisado a capacidade da infraestrutura hídrica atual em atender as demandas. São consideradas as demandas de abastecimento urbano, de irrigação das áreas agrícolas e as demandas para regularização dos rios.

Cenário 2: Neste cenário o sistema é testado para a condição de exclusão do reservatório Duas Unas do sistema Tapacurá. O reservatório Duas Unas faz parte do sistema Tapacurá, mas pertence à outra bacia hidrográfica.

Cenário 3: Neste cenário o sistema é testado para a condição de exclusão do reservatório Várzea do Una e Duas Unas do sistema Tapacurá. Conforme a COMPESA (2007) o reservatório Várzea do Una, isolado do sistema Tapacurá, abastecerá os municípios de São Lourenço da Mata e Camaragibe.

3.2 - Dados do Sistema

A configuração do sistema estudado com as adutoras e as áreas irrigáveis é apresentada na Figura 3 abaixo.

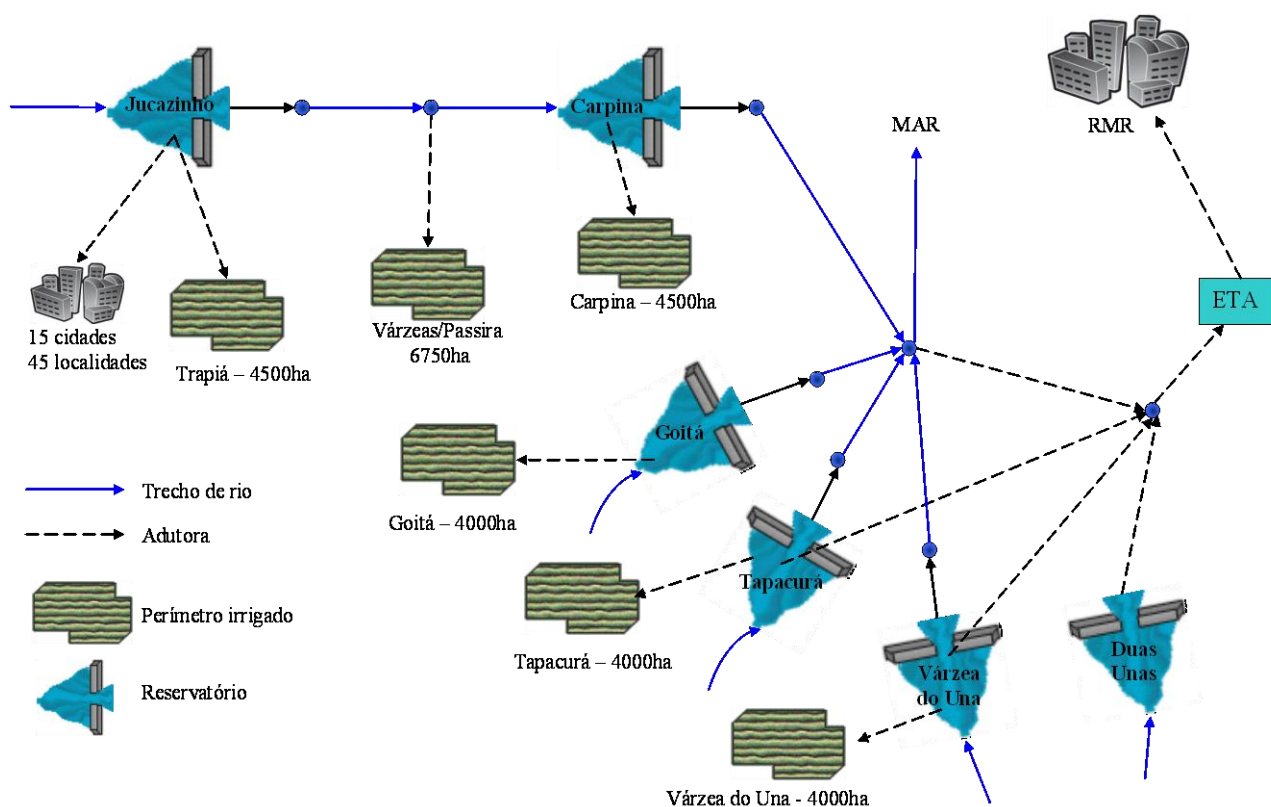


Figura 3 - Configuração do sistema estudado.

Os dados utilizados, para o modelo de otimização, sua obtenção e métodos de tratamento empregados foram obtidos nos trabalhos de Barbosa (2008), Andrade (2006) e Barbosa (2001).

As precipitações sobre os reservatórios estão referidas a valores homogêneos de precipitações médias mensais obtidas pelo Método de Thiessen.

A estimativa das vazões mensais afluentes para o reservatório Jucazinho e Carpina foi obtida a partir das séries de vazões mensais observadas nas estações Toritama e Limoeiro. Para o reservatório Goitá, as vazões afluentes foram consideradas pela série fluviométrica da estação Sítio Engenho (código 39155000). As vazões afluentes ao reservatório Tapacurá foram obtidas a partir das vazões mensais observadas da estação Vitória de Santo Antão (código 39170000), situada a montante do reservatório. As vazões afluentes ao reservatório Várzea do Una foram geradas a partir do uso do modelo chuva-vazão SMAP, utilizando parâmetros obtidos de calibração do modelo para vazões da bacia do rio Tapacurá, considerada hidrologicamente homogênea em relação à de Várzea do Una.

O volume evaporado, a cada mês, é calculado no processo de otimização com base na área do espelho d'água e dos valores das lâminas corrigidas de evaporação média mensal da estação meteorológica de Curado para os reservatórios Goitá, Tapacurá e Várzea do Una, da estação meteorológica de Surubim para os reservatórios Jucazinho e da estação meteorológica de Carpina para o reservatório Carpina.

A retirada de $1,80 \text{ m}^3/\text{s}$ do reservatório Jucazinho atende o abastecimento humano e industrial. A demanda de abastecimento humano a ser atendida pelo Sistema Tapacurá correspondendo à vazão de $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ para ETA. Essa demanda diz respeito ao abastecimento de Camaragibe, São Lourenço da Mata e parte da Região Metropolitana de Recife. A demanda dos municípios de São Lourenço da Mata e Camaragibe, que será atendida pela adutora do reservatório Várzea do Una separada do Sistema Tapacurá é de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

De acordo com Andrade (2006) e Barbosa (2001) foram considerados seis perímetros irrigados, com área total mensal a ser plantada de 4800 ha para Trapiá, 6750 ha para Várzeas de Passira, 1800 ha para Carpina, 4000 ha para Goitá, 4000 ha para Tapacurá e 4000 ha para Várzea do Una.

A vazão para regularização dos trechos dos rios a jusante dos reservatórios foi considerada fixa com o valor de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ nos meses de setembro a fevereiro, de acordo com os estudos do DNOCS, citados em Andrade (2006).

A Tabela 1 apresenta os volumes máximos e mínimos operacionais, a nível mensal para os reservatórios.

Tabela 1 - Volumes máximos e mínimos dos reservatórios

Reservatório	Jucazinho	Carpina	Goitá	Tapacurá	Várzea do Una
Volume máximo – m^3	327.035.812	270.000.000	53.000.000	98.700.000	11.600.000
Volume mínimo – m^3	16.811.807	1.509.000	810.000	2.200.000	671.000

Fonte: Andrade (2006) e Barbosa (2001)

Para o cálculo de vazões mensais aduzidas pelas tomadas d'água para abastecimento e irrigação foram considerados os dados indicados na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta os dados dos tubos de descarga de fundo dos reservatórios. Os dados dos vertedores dos reservatórios podem ser observados na Tabela 4. A Tabela 5 apresenta os dados da adutora dos reservatórios Tapacurá e Várzea do Una para a ETA.

Tabela 2 – Dados das tomadas d'água para os reservatórios

Reservatórios	Jucazinho	Carpina	Goitá	Tapacurá	Várzea do Una
Cota mínima para abastecimento (m)	256	90	55	84	84,5
Cota mínima para irrigação (m)	256	90	55	84	84,5
Capacidade do sistema adutor de abastecimento humano (m ³ /s)	2,0	-	-	3,0	0,9
Capacidade do sistema adutor para irrigação (m ³ /s)	4,0	4,0	1,5	3,0	0,9

Fonte: Andrade (2006) e Barbosa (2001)

Tabela 3 - Dados dos tubos de descarga de fundo para os reservatórios

Reservatórios	Jucazinho	Carpina	Goitá	Tapacurá	Várzea do Una
Coeficiente de vazão da descarga de fundo	0,80	0,48	0,61	0,61	0,70
Área da seção transversal do tubo de descarga de fundo (m ²)	3,142	15,90	9,82	9,82	0,78
Cota do nível d'água a jusante da descarga de fundo (m)	251,0	83,3	51,0	51,0	83,0

Fonte: COMPESA (2007)

Tabela 4 - Dados dos vertedores para os reservatórios

Reservatórios	Jucazinho	Carpina	Goitá	Tapacurá	Várzea do Una
Coeficiente de descarga	0,492	1,6	1,95	1,95 (Central) 1,95 (Lateral)	1,95
Largura do vertedor (m)	170,0 (Principal) 57,0 (2 Auxiliares)	400,0	55,0	6,0 (Central) 12,0 (2 Laterais)	50,0
Cota de crista do vertedor (m)	292,0 (Principal) 295,0 (2 Auxiliares)	118,0	70,0	103,0 (Central) 105,0 (2 Laterais)	104,0
Lâmina d'água vertente máxima no extravasor (m)	6,0 (Principal) 3,0 (2 Auxiliares)	3,0	6,75	7,0 (Central) 5,0 (2 Laterais)	2,0

Fonte: COMPESA (2007)

Tabela 5 - Dados das adutoras para ETA

Reservatórios	Tapacurá	Várzea do Una
Coeficiente de vazão da descarga de fundo	0,61	0,70
Área da seção transversal do tubo de descarga de fundo (m ²)	3,14	0,28
Cota do nível d'água a jusante da descarga de fundo (m)	84,0	84,5

A vazão máxima a ser liberada pelo reservatório Jucazinho e Carpina, que não provoque inundações a jusante é de 1.000 m³/s e 300,00 m³/s, respectivamente (Andrade, 2006).

Considerou-se para as captações de Tiúma e Castelo as vazões mensais mínimas de regularização iguais a zero e as vazões mensais máximas iguais a 1,5 m³/s, pois a capacidade das tubulações nesta calha é de apenas 1,5 m³/s (COMPESA, 2007).

Considerou-se que o reservatório Duas Unas abastece regularmente a ETA com uma vazão de 1 m³/s (COMPESA, 2007).

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

- Considerou-se o volume inicial dos reservatórios como sendo os valores observados pela Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco no final de dezembro de 2006:
 - 83% do volume máximo para o reservatório Jucazinho;
 - 29% do volume máximo para o reservatório Carpina;
 - 48% do volume máximo para o reservatório Goitá;
 - 69% do volume máximo para o reservatório Tapacurá;
 - 87% do volume máximo para o reservatório Várzea do Una.
- O processo de otimização está definido para um período de dez anos (120 meses);
- O mês em que se iniciou o processo de otimização foi 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 do reservatório;
- O volume meta dos reservatórios em todos os meses será de 100% do volume máximo dos mesmos; com exceção apenas para o reservatório Carpina, sendo o volume meta igual a 80.000.000 m³, conforme COMPESA (2007).

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 permanentes estão consideradas como culturas em plena capacidade de produção;
- No cálculo das demandas de irrigação, adotando-se lâminas de rega fixas, considerou-se não existir dotação por capilaridade na zona radicular das plantas e nem reserva de água no solo no princípio de cada mês.

Consideraram-se as perdas por evaporação e a infiltração nas calhas dos rios em torno de 5% do valor da vazão no trecho do rio.

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 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, e outras variáveis (demandas hídricas, características físicas dos componentes, etc.) identificadas no estudo do sistema hídrico. Para estes elementos são definidas as informações necessárias, como entrada de dados ao 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. 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 pela disponibilidade hídrica, que é função dos demais usos do reservatório. O modelo para a agricultura irrigada também leva em consideração os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de altura manométrica, as limitações para as áreas a serem irrigadas para cada tipo de cultura, os aspectos financeiros (custos de água e de produção e lucratividade), a combinação ou variação nas fontes de bombeamento e a quantidade de água captada.

Como se trata de uma otimização multiobjetivo, utilizou-se o Método das Ponderações na qual cada função objetivo é normalizada, sendo atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento.

Neste estudo foram considerados os seguintes objetivos:

- Abastecimento humano – 1ª prioridade
- Vazão regularizada dos rios – 2ª prioridade
- Receita líquida e mão de obra oriunda da agricultura irrigada dos perímetros irrigados – 3ª prioridade;
- Volume meta dos reservatórios – 4ª prioridade.

O coeficiente de ponderação para cada objetivo dependerá da prioridade de atendimento dos mesmos. Arbitrou-se para a 1ª prioridade: $\omega = 10^6$; 2ª prioridade: $\omega = 10^4$; 3ª prioridade: $\omega = 10^3$ e 4ª prioridade: $\omega = 10^0$.

4 – INDICADORES DE DESEMPENHO

Para avaliar o atendimento das demandas pelo sistema, foram calculados os indicadores de desempenho propostos por Hashimoto *et al.* (1982), os quais auxiliam na avaliação da operação do sistema hídrico e na análise de futuros projetos a serem implantados.

Considerando a Figura 4, seja V_t os possíveis valores do volume liberado do reservatório no tempo t , que pode estar contido em dois conjuntos: S, o conjunto de todos os valores satisfatórios, ou seja, quando o volume liberado do reservatório é igual ao volume necessário para atender à demanda e F o conjunto de todos os valores insatisfatórios, i.e, quando o volume liberado é menor do que o volume necessário para atender à demanda, portanto:

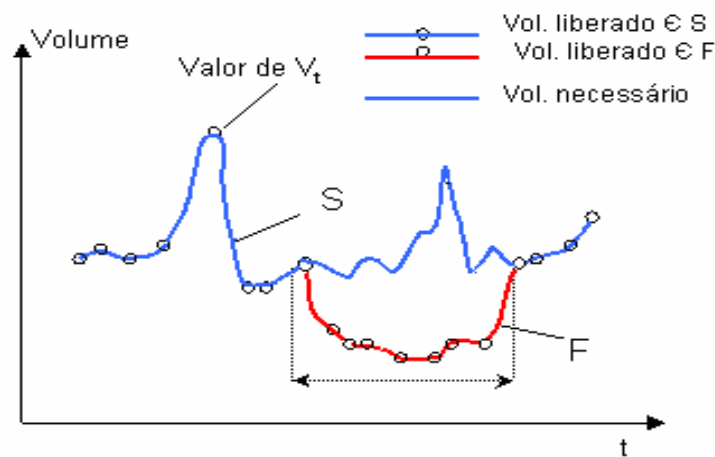


Figura 4 – Exemplo fictício de descargas de reservatórios.

A Confiabilidade (Conf) mede a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas. Segundo a Figura 4 é a probabilidade de V_t pertencer ao conjunto S, isto é:

$$\text{Conf} = \text{Prob}(V_t \in S) \quad (1)$$

A Resiliência (Res) mede a forma como o sistema retorna de uma falha caso esta tenha ocorrido. Baseado na Figura 2, ela é definida como a relação entre probabilidade de $V_t \in F$ e $V_{t+1} \in S$ e a probabilidade de $V_t \in F$, ou seja:

$$\text{Res} = \frac{\text{Prob}(V_t \in F \text{ e } V_{t+1} \in S)}{\text{Prob}(V_t \in F)} = \text{Prob}\{V_{t+1} \in S \mid V_t \in F\} \quad (2)$$

O inverso da Resiliência indica quanto tempo o sistema permanecerá em estado de falha.

A vulnerabilidade (Vul) mede a magnitude das falhas se esta tenha ocorrido. Ela pode ser definida como a média do percentual de déficit hídrico do conjunto de todos os valores insatisfatórios, ou seja, o conjunto F da Figura 4. Matematicamente, tem-se que:

$$Vul = \frac{1}{n_f} \sum \left| \frac{V_t - V_d}{V_d} \right| \quad (3)$$

sendo n_f o número de eventos de falha e V_d a demanda necessária no tempo t .

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 6 apresenta os indicadores de desempenho de cada reservatório para as demandas de abastecimento humano e de regularização dos rios a jusante dos reservatórios.

Tabela 6 – Indicadores de desempenho do atendimento das demandas.

Demandas	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3		
	Conf (%)	Res (%)	Vul (%)	Conf (%)	Res (%)	Vul (%)	Conf (%)	Res (%)	Vul (%)
Abastecimento humano Jucazinho	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Abastecimento humano ETA	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Vazão regularizada Jucazinho	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Vazão regularizada Carpina	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Vazão regularizada Goitá	100	-	-	100	-	-	100	-	-
Vazão regularizada Tapacurá	100	-	-	100	-	-	90	33	82
Vazão regularizada Várzea do Una	98	50	74	98	50	74	57	17	100

Os resultados visualizados nos indicadores de desempenho obtidos com a otimização permitem avaliar que a condição de exclusão dos reservatórios não prejudicou o abastecimento da RMR, uma vez que o reservatório Tapacurá e as captações a fio d'água Tiúma e Castelo supriram a demanda requerida pela ETA. Entretanto a Figura 5 mostra que o reservatório Várzea do Una não consegue atender plenamente a demanda de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ das cidades de Camaragibe e São Lourenço da Mata, apresentando variações de $0,3$ a $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

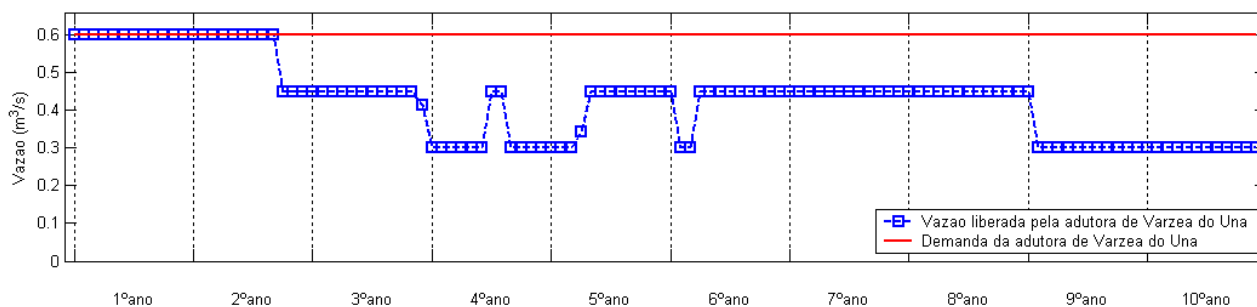


Figura 5 – Desempenho da adutora Várzea do Una para o abastecimento das cidades de Camaragibe e São Lourenço da Mata – cenário 3.

Com relação à demanda para a regularização dos rios a jusante dos reservatórios, observa-se que o reservatório Várzea do Una não consegue atender integralmente o valor de 0,5 m³/s, de setembro a fevereiro. Sendo que no cenário 3 a garantia do sistema em atender essa demanda é de apenas 57%, contra 98% dos outros cenários, ficando o sistema em estado de falha por pelo menos 5 meses, contra 2 meses dos outros cenários. Além do mais, no cenário 3, espera-se que a magnitude da falha dessa demanda seja de 100% do valor previsto, ou seja, nos meses que ocorrerem as falhas não haverá vazão liberada para o atendimento dessa demanda. A vazão regularizada pelo o reservatório Tapacurá só apresenta falhas no cenário 3.

Com relação à utilização das áreas agrícolas dos perímetros irrigados considerados (Tabela 7), observa-se que a exclusão do reservatório Duas Unas (no cenário 2) e do reservatório Várzea do Una (no cenário 3) do sistema Tapacurá não interferem na utilização da área dos perímetros irrigados de Trapiá, Várzeas/Passira, Carpina e Goitá.

Tabela 7 – Áreas cultivadas nos perímetros irrigados.

Perímetros irrigados	Área Planejada (ha/ano)	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Área utilizada (ha/ano)	%	Área utilizada (ha/ano)	%	Área utilizada (ha/ano)	%
Trapiá	7.900,00	2.430,00	31	2.430,00	31	2.430,00	31
Várzeas/Passira	8.000,00	2.374,98	30	2.374,98	30	2.374,98	30
Carpina	2.600,00	2.200,00	85	2.200,00	85	2.199,99	85
Goitá	6.000,00	5.200,00	87	5.200,00	87	5.199,99	87
Tapacurá	6.100,00	2.340,00	38	1.937,93	32	1.340,00	22
Várzea do Una	5.700,00	1.567,20	27	1.517,20	27	409,51	7
Total	36.300,00	16.112,18	44	15.660,10	43	13.954,47	38

Entretanto, a exclusão do reservatório Duas Unas acarretou numa redução de 17% da área utilizada no perímetro Tapacurá, pois, sem a adução de 1 m³/s do reservatório Duas Unas para a ETA, o reservatório Tapacurá teve que aumentar a adução para a ETA, diminuindo assim a disponibilidade hídrica para o perímetro irrigado. Fato também observado no cenário 3, onde a exclusão dos reservatórios Duas Unas e Várzea do Una ocasionará uma redução de 43% da área utilizada no perímetro Tapacurá.

Para o perímetro Várzea do Una, a exclusão do reservatório Várzea do Una do sistema Tapacurá (no cenário 3) causará uma redução de 74% da área utilizada pelo perímetro.

Verifica-se que o sistema não consegue atender 50% da área planejada para o cultivo agrícola, lembrando que a 1ª prioridade de atendimento é o abastecimento humano e a 2ª prioridade é a vazão regularizada. Os perímetros Carpina e Goitá tiveram os maiores percentuais de áreas utilizadas.

6 – CONCLUSÃO

Considerando a metodologia proposta e os dados utilizados conclui-se que:

1. A condição de exclusão dos reservatórios Várzea do Una e Duas Unas do Sistema Tapacurá não prejudicará o abastecimento da RMR;
2. O reservatório Várzea do Una não consegue atender plenamente a demanda de 0,6 m³/s das cidades de Camaragibe e São Lourenço da Mata, caso seja excluído do Sistema Tapacurá;
3. O reservatório Várzea do Una não consegue atender integralmente o valor de 0,5 m³/s, de setembro a fevereiro, para a perenização do rio a jusante do mesmo em todos os cenários estudados;
4. A exclusão dos dois reservatórios provocará falhas no atendimento da vazão regularizada do reservatório Tapacurá;
5. A condição de exclusão dos reservatórios do sistema Tapacurá não interferirá na utilização dos perímetros irrigados de Trapiá, Várzeas/Passira, Carpina e Goitá;
6. A exclusão do reservatório Duas Unas acarretará numa redução de 17% da área utilizada no perímetro Tapacurá, e de 43% caso sejam excluídos os dois reservatórios;
7. A exclusão do reservatório Várzea do Una do sistema Tapacurá causará uma redução de 74% da área utilizada pelo perímetro Várzea do Una.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, P. R. G. S. (2006). *Estudo para Alocação Ótima das Águas de um Sistema de Reservatórios em Série e em Paralelo, para Usos e Objetivos Múltiplos, na Bacia do Rio Capibaribe, PE*, Campina Grande: UFCG – Programa Institucional de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Tese de Doutorado. 227p.
- ANDRADE, P. R. G. S. (2000). *Operação integrada ótima do sistema hídrico Jucazinho-Carpina, para múltiplos usos – Rio Capibaribe-PE*, Campina Grande: UFPB – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Recursos Hídricos, Dissertação de Mestrado. 226p.
- AZEVEDO, L. G. T., PORTO, R. L. L. & ZAHED, K. F. (1997) “*Modelos de simulação e de rede de fluxo*” in *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Org. por Rubem La Laina Porto. Porto Alegre. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- BARBOSA, D. L. (2008), *A Exploração de um sistema de reservatórios: Uma análise otimizada dos usos e objetivos múltiplos na bacia do rio Capibaribe-PE*. Campina Grande: UFCG – Curso de Pós-graduação em Recursos Naturais, Tese de Doutorado. 258p.

- BARBOSA, D. L. (2001), *Otimização da operação de múltiplos reservatórios em paralelo para usos e objetivos múltiplos*. Campina Grande: UFPB – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Recursos Hídricos, Dissertação de Mestrado. 140p.
- BRAGA B., BARBOSA, P. S. F. e NAKAYAMA, P. T. (1998), “*Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos*”, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3, n 3.
- COMPANHIA INTEGRADA DE SERVIÇOS AGROPECUÁRIOS DE PERNAMBUCO – CISAGRO (1990), *Barragem do Carpina*, Relatório da 1ª Etapa.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R. & LOUCKS, D. P. (1982). “*Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*”. Water Resoucers Research, 18(1), p.14-20.
- PQA/PE (1997), Estudos de Consolidação e Complementação de Diagnóstico sobre a qualidade das águas, relativos à preparação do programa de investimentos nas bacias dos rios Beberibe, Capibaribe, Jaboatão e Ipojuca, Relatório nº 7 – *Disponibilidade e Situação dos Mananciais para o Abastecimento metropolitano*, Contécnica LTDA Construtora. Recife – PE.
- SANTOS, V. S. (2007). *Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Analise de Sistema de Recursos Hídricos*. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 146p. Dissertação de Mestrado.
- 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.
- TUCCI, C. E. M. (1998), *Hidrologia – Ciência e Aplicação* – Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS/ Associação brasileira de Recursos Hídricos.