

AVALIAÇÃO MULTI OBJETIVA DE CENÁRIOS PARA USOS MÚLTIPLOS NOS PEQUENOS AÇUDES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE DE SUMÉ-PB

Renato Santiago Costa¹; Rosires Catão Curi²; Wilson Fadlo Curi³

RESUMO: No semiárido da Paraíba, o problema da escassez é evidenciado por suas características climáticas e por características geológicas que não favorecem o armazenamento da água e dificultam a manutenção de sua qualidade. Para contornar esses problemas é imprescindível lançar mão de tecnologias adequadas ao clima da região a fim de promover o uso racional dos recursos hídricos e efetuar ações de planejamento para atender as demandas integrando e otimizando o sistema hídrico. Neste contexto, o presente estudo realizou uma análise multiobjetivo de 20 pequenos açudes integrantes da bacia hidrográfica do açude de Sumé/PB com o intuito de maximizar os ganhos socioeconômicos na região. Através do modelo de otimização ORNAP (*Optimal Reservoir Network Analysis Program*), otimizou-se os múltiplos usos do sistema de reservatórios em três cenários distintos. Os resultados demonstraram que o sistema hídrico formado pelos pequenos açudes na bacia de Sumé não estão sendo utilizados adequadamente e que os gestores e a população dispõem de alternativas mais eficientes para o uso da água, conforme proposto nos Cenários 2 e 3, cujos benefícios a médio e longo prazo compensam indubitavelmente a mudança dos paradigmas existentes e os investimentos no planejamento e operação dos reservatórios.

ABSTRACT: In the Paraíba semiarid region, the shortage is evidenced by climatic characteristics and geological features that do not favor water storage and difficult to keep its quality. To eliminate these problems, one must make use of technologies appropriate to the climate of the region to promote the rational use of water resources planning and performing actions to meet the demands, by the integrating and optimizing the system. In this context, the present study conducted an multiobjective analysis of 20 small reservoirs members of the Sumé/PB basin in order to maximize the socio-economic improvement in the region. Through the optimization model ORNAP (*Optimal Reservoir Network Analysis Program*), optimized to the multiple uses of the reservoir system in three different scenarios. The results showed that the water system formed by small reservoirs in the Sume basin are not being used properly and that the managers and system users have more efficient alternative to the use of water as proposed in Scenarios 3 and 4, whose benefits in the medium and long term outweigh undoubtedly the change of paradigms and investment in the planning and operation of the reservoirs.

Palavras-chave: Análise multiobjetivo; pequenos açudes; bacia de Sumé/PB

¹ Aluno nível mestrado do PPGECA – UFCG: renatoscpb@uol.com.br

² Professora titular UFCG, CTRN, Av. Aprígio Veloso s/n, 58100-900 Campina Grande. PPGECA: rosirescuri@yahoo.com.br

³ Professor titular UFCG, CTRN, Av. Aprígio Veloso s/n, 58100-900 Campina Grande. PPGECA: wfcuri@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

No estado da Paraíba, as características climáticas e geológicas favorecem a diminuição na oferta e contribuem com o incremento nas disputas pela água, gerando uma série de conflitos. Por suas características geológicas, a capacidade de armazenamento de água subterrânea fica restrita a zonas fraturadas do embasamento cristalino que não propiciam um ambiente adequado para manutenção de sua qualidade. O regime pluviométrico, marcado por extrema irregularidade temporal e espacial de chuvas, prefigura um forte embargo ao desenvolvimento das economias locais, máxime as economias baseadas na agricultura, piscicultura e pecuária, o que, em última instância, termina por expor as populações a risco em sua própria subsistência.

Diversos pequenos açudes foram construídos com o objetivo de minimizar os efeitos da escassez hídrica da região nordestina, sob o escopo de atenuar a variabilidade espacial e temporal das vazões, armazenando água nos períodos chuvosos para utilizá-la nos períodos de seca. Porém, a maioria desses açudes foi mal dimensionada, fazendo com que eles não apresentassem sustentabilidade hídrica nem eficiência. Por outro lado, a falta de planejamento e gerenciamento técnico para a operação dos reservatórios, culminou com processos e técnicas não otimizadas para a utilização eficiente dos açudes.

Curi *et al.* (2005) sustentam que para proporcionar melhorias no padrão econômico e social e, por conseguinte, na qualidade de vida da população, é imprescindível lançar mão de tecnologias adequadas ao clima da região para promover o uso racional dos recursos naturais existentes.

Portanto, através de modelagens matemáticas utilizando programação linear, procurou-se avaliar as formas de melhor aproveitar os recursos hídricos dos açudes de pequeno porte na bacia do açude de Sumé/PB para maximizar os ganhos socioeconômicos na região, ao mesmo tempo em que se identificaram problemas relacionados aos usos hodiernos. A finalidade deste trabalho foi a de analisar de forma multiobjetiva a operação dos reservatórios para fornecer critérios de escolha para os gestores, garantindo um uso inteligente dos recursos hídricos e priorizando as vocações econômicas e socioculturais da região.

SISTEMA HÍDRICO EM ESTUDO

A bacia hidrográfica do açude de Sumé (figura 1) está localizada na região do Sertão do Cariri paraibano e é completamente envolvida pelas cidades de Sumé, Monteiro, Prata, Ouro Velho e Amparo. Ela está inserida na bacia hidrográfica do rio Paraíba/Sucuru, no estado da Paraíba, situando-se a, aproximadamente, 250 km da Costa Atlântica.

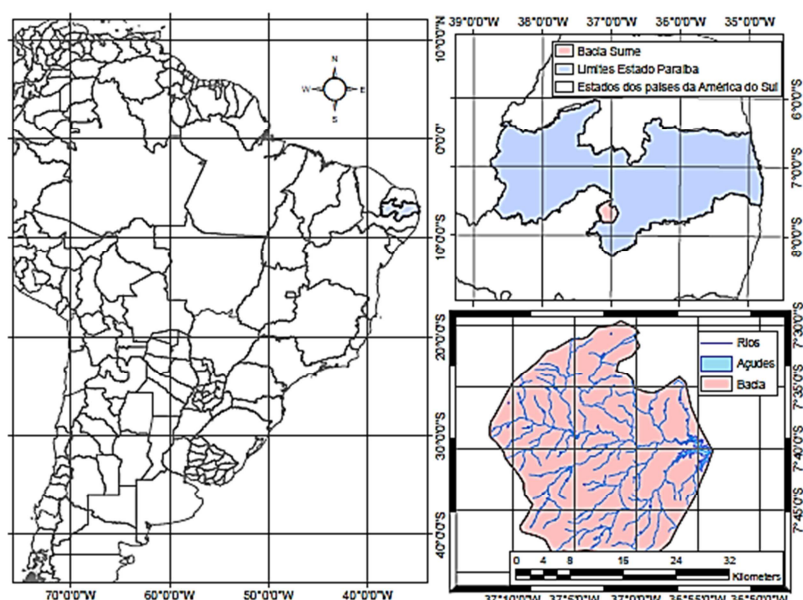


Figura 1 – Localização da Bacia do Açude de Sumé/PB
Fonte: SILANS *et al.*, 2009.

A região da bacia do açude de Sumé tem clima seco com pluviometria fraca e irregular, com média interanual entre 550 e 600 mm (Jacon, 1982, *apud* Cadier, 1994). A estação chuvosa inicia-se em geral entre janeiro e março, terminando em maio. A temperatura média anual é de 24°C, atingindo as máximas em novembro e dezembro e mínimas em julho e agosto. A evaporação anual é de 2800 mm em tanque classe A.

Essa bacia está totalmente situada sobre embasamento cristalino pré-cambriano. Seu subsolo é impermeável e não existe aquífero generalizado. Podem-se encontrar lençóis confinados nas falhas ou nas formações aluviais superficiais, normalmente perto dos rios.

A caatinga é a vegetação nativa da região, embora exista a presença de vegetação antrópica: pastagens, plantações de feijão, milho, tomate e de palma para alimentação do rebanho. A economia local gira em torno da agricultura, pecuária, caprinocultura e cultura de subsistência (Cadier, 1994).

O volume potencial estimado de armazenamento de água da bacia hidrográfica de Sumé é de 78 milhões de m³, sendo sua maior parte, cerca de 56 milhões de m³ correspondentes aos quatro açudes monitorados pela AESA. Portanto, 30% do volume total dessa água está armazenado nos pequenos reservatórios (Santos *et al.* 2009).

A bacia do açude de Sumé é formada por 631 pequenos açudes que estão espalhados em 769 km², sendo que 620 açudes tem área inferior a 20 ha. Em um levantamento realizado em 2008, através de imagens de satélite Landsat5 foram encontrados nesta mesma região 631 espelhos de água (Silva *et al.*, 2009).

Os açudes da bacia açude público de Sumé estão distribuídos com uma densidade de aproximadamente um açude por km², superior à densidade que Molle e Cadier (1992) consideram aceitável, de um açude para cada 1,5 km².

Dos 631 pequenos açudes integrantes da bacia hidrográfica de Sumé, somente 42 foram objeto de levantamento de campo realizado pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB em 2008, dentro do projeto DISPAB-SA – Metodologias para definição da disponibilidade hídrica em pequenos açudes e pequenas bacias hidrográficas da região Semiárida do Brasil, financiado pelo MCT/FINEP/CT-HIDRO (edital IGRH 01/2007).

Entretanto, para o presente trabalho apenas 20 açudes foram escolhidos por possuírem volumetria variando entre 100 mil e 1 milhão de metros cúbicos de água, classificando-se como pequenos açudes, segundo a definição de Molle e Cadier (1992). Estes açudes estão relacionados na tabela 1, adiante:

Tabela 1 – Pequenos açudes da bacia de Sumé utilizados no estudo

CÓDIGO	NOME DO AÇUDE	MUNICÍPIO	CAPACIDADE (m³) (ano de 2009)	CAPACIDADE MÁXIMA (m³)
3	Leonardo	Sumé	322.379,90	479.858,72
71	Ministro Aposentado	Prata	535.917,40	636.465,96
72	Raminho	Prata	273.196,90	434.815,48
73	Amparinho	Prata	143.063,50	197.466,38
44	Lindalva	Sumé	104.206,90	138.570,50
75	Paulo Leite	Prata	100.086,40	137.338,32
184	Jatobá	Monteiro	415.975,70	610.511,08
144	Juraci	Monteiro	190.670,00	251.329,71
51	Marmeleiro	Sumé	246.276,40	291.428,30
181	Uruçu	Monteiro	1.044.782,10	1.656.129,28
132		Sumé	169.876,40	206.062,89
191	Salgadinho	Monteiro	101.596,40	125.049,71
248	Matarina	Prata	285.145,20	367.142,12
255	Mujiqui	Prata	153.099,20	174.811,71
238	Pé da Serra	Prata	366.862,40	555.926,57
277	São Francisco	Prata	121.315,90	151.682,58
438	Quarteirão	Ouro Velho	221.440,90	291.406,68
401	Bethânia	Ouro Velho	125.206,40	171.833,49
433	Dom Pedro II	Ouro Velho	107.002,10	148.503,27
628	Braço do São Paulo	Ouro Velho	209.186,90	287.950,18

Fonte: SILANS *et al.*, 2009

As principais demandas do sistema são para uso doméstico, piscicultura, irrigação, dessedentação de animais, plantio de jusante e de vazante. Quanto aos usos não consuntivos, não foram verificados no sistema (SILANS *et al.*, 2009).

Com relação à utilização econômica dos pequenos açudes, observa-se que em quase 60% dos pequenos açudes a água é aproveitada para o plantio de vazante, enquanto em quase metade deles existem plantações de jusante, indicando a presença de infiltrações nesses açudes, cujas águas são sabidamente explotadas (Silva *et al.*, 2009).

A piscicultura é a atividade mais explorada na região, sendo praticada por 85% dos habitantes da região. A piscicultura extensiva responde por cerca de 60% do total, sendo seguida pela pesca tradicional em aproximadamente 40%. As técnicas de piscicultura semi-intensiva e intensiva não foram observadas em nenhum dos açudes (Silva *et al*, 2009). Portanto, depreende-se que a piscicultura não é tratada como uma atividade financeira, mas tão somente como meio de subsistência ou atividade recreativa, indicando subutilização do potencial econômico da região em estudo.

Quanto à irrigação, foi a forma de utilização dos açudes menos expressiva, com menos de 30%. Mais uma vez, parece ser um indicativo de que a água não está sendo utilizada para potencializar as vocações econômicas da região.

Os habitantes dessa região apresentam grau de escolaridade muito baixo o que, aliado à sua cultura e ligação com a terra, dificulta sua inserção em outros mercados de trabalho como, *e.g.*, empregos urbanos ou até mesmo atividades especializadas no campo. Dessa maneira, é fácil notar a importância não só econômica, mas também social dos pequenos açudes para a região abastecida pela bacia hidrográfica aqui examinada.

MODELO ADOTADO NO ESTUDO – ORNAP

O modelo de otimização adotado nesse estudo foi desenvolvido por Curi e Curi (1997) sendo baseado, originalmente, em programação não-linear. Batizado de ORNAP (*Optimal Reservoir Network Analysis Program*), o modelo foi posteriormente adaptado por Santos (2007) para trabalhar com programação linear e utiliza o *Toolbox Optimization* do software MATLAB 6.5 com o Método do Ponto Interior para a busca da solução ótima.

O ORNAP otimiza os múltiplos usos de um sistema de reservatórios implantando ou melhorando a operação de um ou mais perímetros irrigados. Ele trabalha com variáveis relacionadas aos elementos naturais, como fatores hidroclimáticos e hidroagrícolas, além de outras, como demandas hídricas e características físicas dos componentes. O modelo é então abastecido com as informações necessárias para seu funcionamento através dos dados dos reservatórios, das demandas, perímetros irrigados, calhas dos rios e características das culturas.

A operação dos reservatórios e dos “nós”, ponto representativo da conexão com os elementos hidráulicos, é fundamentada na equação do balanço hídrico destes, inobstante trabalhar-se com demandas fixas e/ou variáveis. A demanda hídrica dos perímetros irrigados é estabelecida através do balanço hídrico no solo para as culturas selecionadas, todavia com área plantada limitada pelos usos que lhe sejam mais prioritários.

O modelo também leva em conta os diferentes tipos de sistemas de irrigação e suas necessidades de pressão e vazão, as áreas a serem irrigadas para cada cultura, os custos de produção e outros aspectos econômicos, bem como as fontes de bombeamento e suas vazões de sucção.

Como o problema em estudo exige uma otimização multiobjetivo, o modelo trabalha com o Método das Ponderações, que normaliza cada função objetivo e onde são atribuídos pesos para definir as prioridades de atendimento.

INDICADORES UTILIZADOS

Indicadores de Desempenho

Hashimoto *et al.* (1982) estabeleceram os indicadores *confiabilidade*, *resiliência* e *vulnerabilidade* para análise de desempenho de sistemas, que podem perfeitamente ser adequados à sistemas de recursos hídricos.

Confiabilidade

O indicador Confiabilidade expressa a percentagem de tempo em que o sistema permanece funcionando sem apresentar falhas. Em outras palavras, é a probabilidade de funcionamento sem falhas de atendimento às demandas.

$$Conf = \frac{N_s}{N} \quad (\text{HASHIMOTO } et al., 1982) \quad (1)$$

Onde:

N_s = Número de sucessos;

N = Número de período de tempos simulados.

Resiliência

A resiliência, também chamada de elasticidade, avalia a média da velocidade em que o sistema retorna a um estado satisfatório de atendimento às demandas.

É definido como o número de vezes em que o sistema saiu de uma falha e o número de falhas ocorridas no período (HASHIMOTO *et al.*, 1982).

$$Res = \frac{\text{Número de vezes que sai de uma falha}}{\text{Número total de falhas}} \quad (2)$$

Vulnerabilidade

O indicador Vulnerabilidade mede a severidade média das falhas, caso estas tenham ocorrido. Pode ser definido como a média percentual do déficit hídrico do conjunto de todos os valores insatisfatórios de atendimento das demandas (HASHIMOTO *et al.*, 1982).

$$Vul = \frac{\sum \text{Percentual da Falha } i \text{ no atendimento a demanda}}{\text{Número total de falhas}} \quad (3)$$

Indicadores de Sustentabilidade e Eficiência

Índice de Ativação da Potencialidade – IAP

Vieira (1996) define o IAP como a razão entre a disponibilidade e a potencialidade:

$$IAP = \frac{\text{Disponibilidade}}{\text{Potencialidade}} \quad (4)$$

Índice de Utilização da Disponibilidade – IUD

O IUD é definido como a razão entre a demanda e a disponibilidade. Os valores de IUD superiores à unidade são uma preocupação em termos de alocação da água, pois nos anos com pouca pluviometria, a pressão por disponibilidades para usos consuntivos, advinda de interesses econômicos e políticos será certamente geradora de conflitos de uso (Curi e Curi, 2004).

$$IUD = \frac{\text{Demanda}}{\text{Disponibilidade}} \quad (5)$$

Índice de Utilização da Potencialidade – IUP

É definido como a razão entre a demanda e a potencialidade. Também pode ser obtido com o produto de IAP e IUD (Curi e Curi, 2004).

$$IUP = \frac{\text{Demanda}}{\text{Potencialidade}} \quad (6)$$

η_E - Estabelece a eficiência quanto ao armazenamento da água, pois corresponde a relação entre a evaporação total da superfície do reservatório e o volume total afluente. Pode fornecer informações sobre a relação entre a área de espelho d'água e a profundidade do reservatório (Curi e Curi, 2004).

$$\eta_E = \Sigma Et / (\Sigma Qat + \Sigma Pt) \quad (7)$$

η_V - Estabelece a eficiência quanto ao armazenamento da água ou capacidade relativa do reservatório. Indica quanto o reservatório desperdiça da água afluente por vertimento (Curi e Curi, 2004).

$$\eta_V = \Sigma Qvt / (\Sigma Qat + \Sigma Pt) \quad (8)$$

η_U . É a relação entre o volume total de água utilizado (descarregadores, tomadas d'água) e o volume total afluente. Estabelece a eficiência quanto ao uso da água. Altos valores do η_u indicam que existem poucos desperdícios no sistema (Curi e Curi, 2004).

$$\eta_u = \Sigma Q_{ut} / (\Sigma Q_{at} + \Sigma P_t) \quad (9)$$

DADOS DE ENTRADA NO ORNAP

Precipitação

A tabela 2 apresenta os dados de precipitação direta média mensal nos reservatórios estudados para os 09 anos.

Tabela 2 – Precipitação média mensal para a área estudada

Ano	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Prec. Média (mm)	57,68	35,76	53,13	47,11	70,39	49,85	52,32	38,24	71,50

Evaporação

Tabela 3 – Evaporação média mensal em mm para a estação meteorológica de Monteiro, representativa da região.

Mês	Jan	Fev	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Evap	232,8	117,7	156,4	116,4	114,6	127,0	156,4	205,7	238,9	263	266,1	272,5

Vazões Afluentes Mensais

As vazões afluentes foram calculadas através do modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), desenvolvido por Lopes et al. (1981), que é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão.

Demanda Humana e Animal

As demandas para o consumo humano e animal dos pequenos açudes foram estimadas a partir do cálculo da densidade da população rural e do consumo médio diário por cada indivíduo. Os dados de população animal e humana foram retirados do censo de produção pecuária 2009 e do censo demográfico 2010, respectivamente, ambos realizados pelo IBGE.

A densidade populacional rural foi calculada para cada pequeno açude considerando que: para açudes com capacidade volumétrica variando entre 100.000m³ e 300.000m³, a área de influência destes açudes seria para um raio de 3km; para açudes com capacidade entre 300.000m³ e 500.000m³, a área de influência seria de 6km e; para açudes com capacidade entre 500.000m³ e 1.000.000m³, a área de influência seria para um raio de 10km. Essa estimativa levou em consideração um percurso razoável de locomoção para transporte de água em latas ou vasilhames.

Quanto ao consumo *per capita*, Gleick (1996) *apud* Matos (2007) indica que 50L/pessoa/dia são suficientes para suprir as necessidades básicas de ingestão, higiene, serviços sanitários e preparo dos alimentos e recomenda que esse acesso seja garantido independente do status político, social ou econômico do indivíduo. A Agenda 21 propõe um fornecimento de 40 litros de água tratada por dia, por pessoa para ambientes urbanos (CNUMAD, 1992 *apud* MATOS, 2007).

Nesta pesquisa, adotou-se o valor de 50l/habitante/dia.

Adiante, seguem os dados do censo demográfico 2010 e de produção pecuária 2009 do IBGE:

Tabela 4 – População humana e animal na área de estudo

	Município			
	Monteiro	Ouro Velho	Prata	Sumé
Pop. Rural (hab)	10591	881	1410	3824
Bovinos (cabeças)	20740	3644	3334	8940
Caprinos (cabeças)	30240	2078	7536	19200
Ovinos (cabeças)	12020	1200	6155	7700

Fonte de dados: IBGE: disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat>. Acesso em: 08.11.11

As demandas para dessedentação animal, determinadas pela lei 9.433/1997 como de uso prioritário, foram estabelecidas para rebanhos de criação extensiva ou familiar, ou seja, criações de baixa produtividade, com baixo requerimento de água, sem utilização de agricultura especializada. Conforme Curi e Curi (2004) a quantidade de água para dessedentação dos animais considerados na Tabela 4 é de 50l/cabeça/dia para vacas leiteiras e bovinos e entre 5 e 10l/cabeça/dia para caprinos e ovinos (considerou-se 8l/cabeça/dia).

Dados dos Reservatórios

Os dados dos reservatórios foram levantados pela equipe do projeto DISPAB-UFPB/AESA, em 2009. O levantamento da área foi realizado através da coleta em campo do perímetro atual do açude e da estimativa deste perímetro em épocas de cheias. A profundidade mais atual (ano de 2009) foi medida através de levantamento *in loco* com auxílio de GPS, barco e trena. A profundidade máxima que o açude alcança em épocas de cheia foi estimada observando-se marcas deixadas pela água na parede da barragem ou ao redor do açude (Silva *et al.*, 2009)

Dados de Piscicultura

Os dados sobre *piscicultura extensiva* foram obtidos de Barbosa (2008). Segundo a autora, entre as vantagens da piscicultura extensiva estão: a possibilidade de ser praticada em áreas impróprias para agricultura; por seu caráter pouco consuntivo não interfere em demasiado nos outros usos; não necessita de fontes de energia artificiais; pode ser praticada mesmo em

reservatórios salinizados; funciona ainda que em períodos de estiagem e; é aproveitada em regiões com escassez crônica de alimentos e em locais de agricultura frágil, como é o caso do semiárido nordestino.

A piscicultura extensiva é um dos usos múltiplos considerados neste estudo e caracteriza-se pela promoção de uma modificação mínima do ambiente natural. Nessa modalidade, o fundo do viveiro é irregular e, corriqueiramente, não existe controle sobre as espécies cultivadas, número de animais, disponibilidade de alimento natural ou adubação, fluxo de água, entre outros. O que se observa nos açudes públicos é apenas o povoamento com espécies de peixes muitas vezes de raças não amigáveis, ou seja, onde uma é predadora da outra ou retira uma quantidade de alimentos do ambiente tal que inviabiliza a manutenção das demais espécies.

Esse tipo de piscicultura está presente no cenário proposto, que será apresentado posteriormente. Os dados necessários à otimização foram:

- Custo de alevinagem = R\$ 100,00/ha/ano;
- Produtividade média de pescado = 500 kg/ha/ano;
- Preço médio de venda do pescado = R\$ 5,00/kg (valor atualizado para o ano de 2010);
- Despesa média anual por pescador = 1.500 kg/pescador/ano.

Dados de Agricultura Irrigada

Os dados de agricultura irrigada foram obtidos de Barros (2010) e serão apresentados adiante. Para o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP), em mm/mês, das culturas selecionadas para este trabalho, foram adotados os coeficientes de cultivo k_c , de acordo com o ciclo fenológico de cada uma delas.

Os dados dos sistemas de irrigação aplicados às culturas são expostos na tabela adiante:

Tabela 5 – Dados das culturas e dos sistemas de irrigação

	Cultura	Prod	Prc	Cprod	Hdc
Safr	Tomate	1800	2,1	1597	61
	Pimentão	8000	0,55	1539	66
	Feijão	25000	0,4	3632	115
	Repolho	15000	1	5122	137
	Alface	30000	1,15	6787	235
	Cebola	15000	0,7	5676	211
Entressafr	Tomate	1800	1,6	1597	61
	Pimentão	8000	0,48	1539	66
	Feijão	25000	0,35	3632	115
	Repolho	15000	0,6	5122	137
	Alface	30000	0,65	6787	235
	Cebola	15000	0,4	5676	211
	Banana (perene)	40000	0,9	4691	213

Goiaba (perene)	16000	0,8	3861	115
-----------------	-------	-----	------	-----

Fonte: Barros (2010)

Onde,

Prod – Produtividade anual da cultura em kg/ha/cultura;

Prc – Preço médio unitário da cultura em R\$/kg/cultura;

Cprod – Custo médio de produção anual da cultura em R\$/kg/cultura (mão de obra, energia, insumos, etc);

Hdc – Trabalho médio requerido por cultura por ano (homens/ano/cultura/ha).

O plano cultural para o perímetro irrigado está indicado na tabela 6:

Tabela 6 – Plano cultural para o perímetro irrigado

	Cultura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Sistema de Irrigação
Safr	Tomate													gotejamento
	Pimentão													gotejamento
	Feijão													sulco
	Repolho													gotejamento
	Alface													sulco
	Cebola													gotejamento
Entressafr	Tomate													gotejamento
	Pimentão													gotejamento
	Feijão													sulco
	Repolho													gotejamento
	Alface													sulco
	Cebola													gotejamento
	Banana (perene)													microaspersão
	Goiaba (perene)													microaspersão

METODOLOGIA APLICADA

Generalidades

A primeira etapa metodológica foi a definição de cenários que contemplassem diversos usos a serem aplicados nos açudes para em seguida verificar o comportamento do modelo de otimização proposto para cada um desses cenários.

Descrição dos Cenários

- *Cenário 1*

O Cenário 1 caracteriza-se por atender apenas as demandas de abastecimento humano e animal, prioritárias segundo a Lei 9.433/1997 como já aludido. Como seus usos são prioritários em detrimento dos outros, este é o cenário padrão e serve como base para comparação com os demais.

Este cenário é o mais conservador e guarda maior identidade com a cultura do semiárido, qual seja a de preservar ao máximo a água para os períodos de seca, retirando dos açudes apenas o mínimo para a sobrevivência. Os reservatórios são utilizados amplamente para consumo humano, atividades domésticas e para dessedentação de animais que, inclusive, bebem diretamente no espelho d'água. Outras atividades, como piscicultura e irrigação são praticadas de maneira muito incipiente e não profissional, ou seja, são apenas meios de subsistência familiar.

O objetivo deste cenário, além de servir como base para comparação com os outros, é verificar o desempenho atual do sistema e identificar as perdas por vertimento e evaporação que possivelmente estejam ocorrendo.

- *Cenário 2*

Com este cenário se pretende averiguar o comportamento do sistema para a inclusão de mais dois usos, além dos já permitidos para o cenário anterior. Desta forma, o Cenário 2 caracteriza-se por atender às demandas de *abastecimento humano e animal, irrigação e piscicultura extensiva*, nesta respectiva ordem de prioridade.

Neste cenário a agricultura irrigada é a atividade que exerce maior pressão sobre o sistema hídrico, devendo ser praticada apenas quando o abastecimento humano e animal já estejam garantidos para o restante do período analisado. Se ainda assim houver água sobressalente nos açudes, então é permitida a prática da piscicultura extensiva. Dessa forma, é possível que o sistema (ou alguns de seus reservatórios) consiga auferir renda da agricultura irrigada, cuja receita líquida e alocação de mão-de-obra são sabidamente mais elevadas, e da piscicultura extensiva, menos rentável.

Aqui o objetivo é investigar a quantidade de água que pode ser alocada para cada um desses usos, obter informações sobre a área irrigada, a receita líquida obtida com a exploração econômica dos reservatórios, o número de postos de trabalho que podem surgir e a produção agrícola.

- *Cenário 3*

Para este cenário foi proposta uma alteração na ordem de prioridade de atendimento do Cenário 2. Logo, o Cenário 3 caracteriza-se por atender, na seguinte ordem de prioridade, os usos para abastecimento humano e animal, a piscicultura extensiva e a irrigação. Com essa alteração na prioridade de atendimento é possível utilizar os reservatórios de forma mais conservadora, pois a piscicultura extensiva requer uma vazão bem menor do que a agricultura irrigada.

O Cenário 3 objetiva trabalhar com os usos efetivamente existentes na bacia hidrográfica do açude de Sumé, mas de forma a preservar uma maior segurança para o atendimento à demanda de abastecimento humano e animal, na medida em que só será liberada água para agricultura irrigada quando os outros usos forem satisfeitos.

RESULTADOS E ANÁLISES

Resultados e Análises para o Cenário 1

As demandas para esse Cenário foram plenamente atendidas para o período considerado. Não houve falhas no atendimento às vazões requeridas nos 108 meses escolhidos para o estudo. Os indicadores de sustentabilidade fornecidos pelo modelo de otimização demonstram que os reservatórios são plenamente capazes de abastecer a população humana e animal dentro de seus raios de influência, determinados anteriormente.

O indicador Confiabilidade foi de 100% para todos os açudes estudados o que aponta que o sistema manteve-se funcionando durante todo o período investigado sem apresentar falhas. A resiliência foi de 100% para todos os reservatórios e a Vulnerabilidade foi de 0%.

Todos os reservatórios atenderam a condição de sustentabilidade hídrica, denotando que os açudes apresentaram, ao final do período estudado, volume final maior que o volume inicial.

O ORNAP também calculou, para os 20 reservatórios estudados, os valores dos indicadores de eficiência para o período de nove anos. Os indicadores de eficiência avaliam se os reservatórios estão trabalhando com desperdícios e indicam onde estão ocorrendo as perdas mais importantes.

Os valores do Índice de Ativação da Potencialidade (IAP) variaram de 0,01 no açude de Código 628 a 0,48, no de Código 238. Certamente esses valores, por serem muito baixos, acarretarão em um aumento nas perdas, conforme será visto mais à frente.

Os Índices de Utilização da Disponibilidade (IUD) dos reservatórios também foram bem próximos de zero, embora em alguns açudes estejam um pouco melhores, a exemplo dos açudes 71 e 238, cujos valores são 0,79 e 0,71, respectivamente. Valores baixos do IUD indicam que as demandas não estão utilizando plenamente a água disponibilizada, pois este índice representa a relação entre demanda e disponibilidade.

A combinação entre os baixos valores do IAP e do IUD refletem no Índice de Utilização da Potencialidade (IUP) que, de forma similar, ficaram próximos de zero em todos os reservatórios analisados. Este índice reflete a parcela da potencialidade que está sendo consumida (utilizada) pelas demandas.

Percebe-se também que o sistema está trabalhando neste cenário com uma quantidade muito grande de desperdícios. Foi possível identificar que a principal causa está na quantidade de água perdida por vertimento, representada pelos índices η_v dos açudes que estão muito próximos da unidade. Outra fonte de perdas é a alta taxa de evaporação na superfície dos reservatórios, retratada pelo índice η_e , chegando, no açude 238, a 36% do volume total afluente. Nos demais, os valores do η_e são bastante elevados, mas com grande variabilidade, sendo um indicativo de que os açudes

possuem uma grande diversidade na relação entre a área do espelho d'água, a profundidade e o tempo de residência da água no reservatório.

Assim, é possível dizer, após as análises para o Cenário 1, que estão ocorrendo muitas perdas em todos os açudes, principalmente em decorrência do excesso de vertimento e das altas taxas de evaporação. A potencialidade dos reservatórios não está sendo utilizada de maneira adequada e não existem riscos aparentes de ocorrerem falhas no atendimento às demandas.

Neste cenário, não é possível deixar de considerar a implantação de novos usos para melhor aproveitar o potencial hídrico do sistema ou simplesmente aumentar às vazões liberadas para as demandas já existentes.

Resultados e Análises para o Cenário 2

O segundo Cenário é composto pela demanda prioritária de abastecimento humano e dessedentação animal, mais as demandas de irrigação e piscicultura extensiva, nesta respectiva ordem de prioridade.

O ORNAP calculou os indicadores de desempenho para os açudes estudados, onde percebeu-se que, com exceção do açude 72, todos os demais tiveram suas demandas plenamente atendidas. A Confiabilidade do açude Raminho (Código 72), localizado no município Prata, foi de 97%, com apenas 3 falhas no atendimento às demandas durante todo o período analisado.

Por outro lado, o índice Resiliência para o açude que apresentou falhas foi de 33%, valor este muito alto e que manifesta uma demora relativamente grande para o sistema se recuperar. Neste caso específico, isto representa que as três falhas ocorreram em meses consecutivos, o que pode ser bastante prejudicial para as atividades desenvolvidas no açude, conforme se observa na Figura 1.

A Vulnerabilidade, que é a razão entre a soma dos déficits percentuais de falhas no atendimento à demanda e o número total de falhas, foi de 25% para o açude 72 e inexistente para os demais. Isto quer dizer que, em média, quando da ocorrência de uma falha, as demandas foram atendidas em 75% da demanda requerida do açude Raminho.

Todos os reservatórios chegaram a secar em algum mês dos nove anos da série, em geral nos meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro, que coincidem com o período sem chuva na região. Não obstante, eles conseguiram atender às suas demandas plenamente, exceto o reservatório 72, como já mencionado.

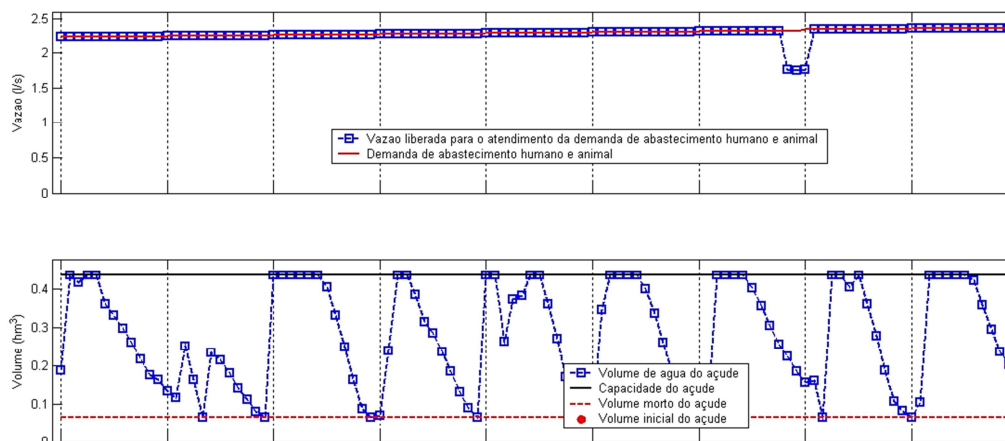


Figura 2 - Gráficos das vazões liberadas para atender as demandas e do volume mensal de água do açude Raminho (Código 72) – Cenário 2

O Índice de Ativação da Potencialidade melhorou consideravelmente neste cenário com relação ao anterior. Em média, obteve-se um aumento de 343% no IAP com relação ao Cenário 1, denotando que uma parcela bem maior da potencialidade dos reservatórios foi ativada. O motivo para tal incremento foi, obviamente, a inclusão da demanda de irrigação no sistema.

Também foi considerável a melhora no Índice de Utilização da Disponibilidade, atingindo 85% em média. Isto implica em uma forte relação entre a demanda e a disponibilidade, mostrando que a agricultura irrigada gerou uma maior utilização da água disponibilizada.

Os Índices de Utilização da Potencialidade, embora tenham aumentado, ainda estão muito aquém do ponto máximo, ficando em média em 32% para os 20 açudes, sendo que nos açudes de códigos 72 e 628 não chegaram a 10%. Mas isto já representa um excelente resultado em comparação ao Cenário anterior, onde a média para os 20 reservatórios ficou em torno de 7%.

A eficiência do sistema, medida pelo indicador η_U , melhorou significativamente, saindo de uma média de 7%, no Cenário 2, para 32%, no terceiro cenário. O principal motivo para tanto foi a redução nos desperdícios por vertimento e por evaporação. O índice η_V , que mede o vertimento com relação à vazão afluente, apresentou grande variabilidade entre os açudes, ficando entre 6% e 86%, porém com uma média de 54% contra 76% do Cenário 2. Ainda é uma perda muito considerável, mas já representa um cuidado maior com a utilização deste recurso. Os índices η_E também diminuíram e revelaram uma diminuição nas perdas por evaporação, resultado da utilização mais racional da água neste cenário.

Quanto às áreas irrigadas, percebeu-se que as maiores vazões aduzidas coincidiram com os meses de maior volume precipitado (de março a junho) o que, por conseguinte, acarretou em maior área irrigada para as culturas sazonais no período de safra. No sentido inverso, na entressafra, as vazões aduzidas reduziram consideravelmente e diminuíram a área irrigada.

O ORNAP otimizou a relação entre alocação de água e os benefícios socioeconômicos em cada um dos reservatórios do sistema hídrico para cada mês. Isto quer dizer que a água só será fornecida para as culturas mais vantajosas e apenas nos meses com disponibilidade, ou seja, se sobrar da demanda prioritária.

Com o acréscimo da irrigação no Cenário 3, foi possível auferir uma receita líquida de, aproximadamente, R\$ 220.500.000,00 (duzentos e vinte milhões e quinhentos mil reais) gerando, três milhões e quinhentos mil postos de trabalho (diárias) nos 108 meses do recorte temporal analisado.

Nos nove anos, a soma das áreas irrigadas foi de 23.000 (vinte e três mil hectares) e o volume total liberado para irrigação foi de 81 milhões de metros cúbicos.

A prática da piscicultura extensiva no Cenário 3, como teve menor prioridade que a agricultura irrigada, apresentou um rendimento menos expressivo do que no Cenário 2, gerando uma Receita Líquida de quase 2 milhões de reais. A mão de obra requerida para esta atividade foi de trezentos e quarenta e três diárias e a produção foi de 589 toneladas.

O quadro seguinte resume a receita líquida e a mão de obra obtidos com a otimização dos pequenos açudes no presente cenário:

Quadro 1 – Resultados da receita líquida e mão de obra para o Cenário 2 – totais para 09 anos

Cenário 2	Receita Líquida (R\$)	Mão de Obra (diárias)
Agricultura Irrigada	220.500.000,00	3.500.000
Piscicultura Extensiva	1.943734,78	393
TOTAIS	222.443.734,78	3.500.393,00

Como foi visto, quando se acrescentou ao cenário anterior a agricultura irrigada e a piscicultura extensiva, os ganhos socioeconômicos foram abundantemente ampliados, demonstrando que os desperdícios diminuíram através da utilização otimizada dos reservatórios.

Resultados e Análises para o Cenário 3

Ao contrário do Cenário 2, nem um dos açudes sofreu interrupção no fornecimento de água, ou seja, não houve falhas no atendimento das demandas. Como corolário, o índice Resiliência foi 100% e o índice Vulnerabilidade foi de 0% para todos os reservatórios.

A Confiabilidade dos reservatórios foi de 100%, significando que todas as demandas foram plenamente atendidas durante todo o período estudado. A condição de sustentabilidade hídrica foi atendida em todos os reservatórios, o que representa que os volumes finais foram maiores que os iniciais, no recorte de tempo considerado.

Ao contrário do ocorrido no Cenário 2, apenas o reservatório 71 atingiu a cota do volume morto (e somente uma vez) em todo o período trabalhado. Já é possível adiantar que com esse comportamento, as perdas por vertimento certamente serão maiores, pois quase todos os açudes passam vários meses trabalhando com a lâmina máxima durante o ano.

Os Índices de Ativação da Potencialidade diminuíram, comparando-se este cenário com o Cenário 2. Todos os reservatórios apresentaram queda no IAP, o que significa que houve diminuição na parcela da potencialidade ativada.

Embora num percentil menor, também o Índice de Utilização da Disponibilidade sofreu redução em todos os açudes. A média geral, para todo o período considerado, foi de 12% de diminuição no IUD, todavia ainda guardando boa relação entre a demanda e a disponibilidade, pois a média no IUD do Cenário 2 foi de 74,40%. É sinal de que as demandas estão consumindo bem a disponibilidade dos reservatórios.

No mesmo diapasão segue o Índice de Utilização da Potencialidade que, além de ter atingido uma média para todo o sistema muito baixa (19,10%), sofreu redução de 39,84% com relação ao cenário antecedente. Os valores do IUP no cenário presente oscilaram entre 4% e 48%, contra 9% e 65% do Cenário 2, percebendo-se uma queda bem considerável para valores que já não eram tão bons. Certamente os valores do IUP sofreram queda, influenciados pela depressão nos IAP e IUD.

Neste terceiro cenário o índice η_U diminuiu em quase 40% relativamente ao cenário precedente. A média do índice η_U foi de 19,10% e isto representa uma piora na relação entre o volume que sai para atender as demandas e o volume afluente. Como consequência, o volume não utilizado foi perdido por evaporação ou vertimento. O índice η_V variou entre 15% e 91% no Cenário 3, com média de 64,20% na relação entre vazão vertida e vazão afluente para todos os açudes no período estudado. No Cenário 2, esse mesmo índice variou entre 6% e 86% e obteve média bem menor, de 54%. Quanto às perdas por evaporação, avaliadas através do índice η_E , houve aumento de 18,21% comparativamente ao terceiro cenário. A média para todos os açudes foi de 16,55% de água desperdiçada por evaporação.

Como ocorrido no Cenário 2, algumas culturas não recebem água nos períodos de entressafra, pois trazem mais problemas do que vantagens para o sistema hídrico e para a região como, por exemplo, aumentar o risco de secar os reservatórios, prejudicando o abastecimento humano. Igualmente, a água alocada para as duas culturas perenes em todos os açudes é tão próxima de zero que elas não tem área associada, podendo ser considerado inexistente o plantio dessas culturas para o Cenário 3.

A receita líquida advinda da agricultura foi de R\$ 170.800.000,00 (cento e setenta milhões e oitocentos mil reais) neste cenário, criando dois milhões e quinhentos mil postos de trabalho, aproximadamente, no período de 09 anos, para os 20 açudes. Porém, este cenário apresentou

desempenho para receita líquida 22,5% menor que o terceiro cenário. Quanto à mão de obra alocada, a redução foi de 28,5%. O volume total liberado para agricultura irrigada foi de 60 milhões de metros cúbicos e a área total irrigada foi de 17.538 ha, números bastante inferiores ao Cenário anterior.

No tocante à piscicultura extensiva, seus resultados foram mais expressivos neste cenário, com uma receita líquida total de mais de três milhões e quinhentos mil reais, utilizando setecentos e dezessete diárias, com uma produção de mil e setenta e cinco toneladas de peixes.

Em seguida, o Quadro 2 fornece uma síntese da receita líquida e da mão de obra alcançada com as atividades econômicas exercidas no Cenário 3:

Quadro 2 – Resultados da receita líquida e mão de obra para o Cenário 3 – totais para 09 anos

Cenário 4	Receita Líquida (R\$)	Mão de Obra (diárias)
Agricultura Irrigada	170.803.772,5	2.501.718
Piscicultura Extensiva	3.550.502,59	717
TOTAIS	174.354.275,1	2.502.435

Ao alterar a ordem de prioridade no atendimento das demandas de piscicultura e irrigação entre os Cenários 2 e 3, logicamente ocorreu uma alteração no desempenho socioeconômico dessas atividades dentro da região estudada. Muito embora a receita líquida total auferida e a mão de obra tenham diminuído, o risco de ocorrerem falhas no atendimento às demandas foi significativamente reduzido neste cenário com relação ao terceiro. Da mesma forma, ao tempo em que as perdas aumentaram no Cenário 3 comparativamente ao Cenário 2, isto também representa uma maior “segurança” contra o possível corte no fornecimento de água.

CONCLUSÕES

O enfoque deste estudo foi a aplicação de um modelo de otimização baseado em programação linear para maximizar os ganhos socioeconômicos da região da bacia hidrográfica do açude de Sumé, verificando onde estão ocorrendo perdas no sistema e propondo mudanças na forma de se utilizar a água.

A análise multiobjetiva foi realizada nos 20 reservatórios selecionados para um recorte temporal de nove anos, permitindo identificar em qual dos cenários propostos existe maior aproveitamento das vocações econômicas e da mão de obra disponível.

O modelo adotado mostrou-se adequado para o problema proposto, contemplando os fatores hidroclimáticos, dados dos reservatórios, demandas, dados dos perímetros irrigados, características das culturas agrícolas, de forma que foi capaz de determinar uma política operacional ótima em

cada cenário para o sistema integrado de açudes dentro de um tempo computacional irrisório (cerca de 1 minuto para cada cenário).

Através da análise dos resultados fornecidos pelo modelo de otimização adotado, observou-se que o sistema hídrico formado pelos pequenos açudes na bacia de Sumé está sendo utilizado de maneira inadequada, verificando-se muitas perdas e baixo aproveitamento do potencial hídrico para a geração de riqueza e desenvolvimento social, motivados principalmente pela cultura da região que teme pela estiagem e que, por isso, utiliza a água apenas para as necessidades básicas, para dessedentação de animais e para atividades de subsistência, como piscicultura extensiva e agricultura familiar, embora de maneira muito precária. Por outro lado, o poder público ainda não estabeleceu uma política capaz de aperfeiçoar e fomentar as atividades rurais e gerar desenvolvimento socioeconômico para a região estudada.

Finalmente, este estudo forneceu subsídios para a escolha de uma alternativa de alocação dos recursos hídricos a ser implantada para os pequenos açudes, cujos benefícios poderiam ser auferidos a médio e longo prazo. Cabe ao gestor público e a população envolvida optar por um cenário mais arrojado, como é o caso do segundo, ou por um cenário mais conservador, cujos riscos são pequenos, porém com menor desempenho, como o Cenário 3.

Como recomendações para trabalhos futuros, destacam-se:

- Incorporação da análise multicriterial, destacando-se fatores econômicos, sociais, ambientais, políticos e culturais;
- Elaboração de um modelo de outorga baseado na análise multiobjetivo e multicriterial dos usos múltiplos;
- Elaboração de um modelo de cobrança baseado na análise multiobjetivo e multicriterial dos usos múltiplos;
- Avaliação dos impactos que os pequenos açudes geram nos açudes maiores à jusante;
- Ampliação do período investigado, inclusão de demandas futuras de abastecimento humano e seleção de culturas mais adaptadas à região;

BIBLIOGRAFIA

BARBOSA, R. L. (2008). *Outorga hídrica sob a ótica da análise multicriterial. Estudo de Caso: Reservatório Coremas-Mãe D'Água - PB*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.

BARROS, S.V.A. (2010). *Otimização dos usos múltiplos em pequenos açudes na bacia do açude de Sumé-PB*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.

CADIER, E (1994). *Hidrologia das pequenas bacias do nordeste semiárido – transposição*

hidrológica. SUDENE, Recife, 373 p.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A. (2005). “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. Vol. 9, n. 3, p. 39-53. São Paulo-SP.

CURI, W. F., CURI, R. C. (2004). *Notas de aula da disciplina Engenharia de Recursos Hídricos: introdução ao estudo de demandas d'água*. UFCG. Campina Grande-PB.

CURI, W. F., CURI, R. C. & BATISTA, A. C (1997). “Alocação ótima da água do reservatório Engenheiro Arco Verde para irrigação via Programação Não-Linear”. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória-ES.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P (1982). “Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation”. Water Resources Research, Vol. 18, nº1.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE Cidades. disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat>. Acesso em: 08.11.11

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR. B. P. F.; CONEJO, J. G. L. (1981). “Simulação Hidrológica: Aplicação de um Modelo Simplificado”. In: Anais do IV Simpósio de Hidrologia e Recursos Hídricos. Fortaleza

MOLLE, F.; CADIER, E. (1992). *Manual do pequeno açude*. SUDENE-DPG-PRN-DPP-WR. Recife-PE.

SANTOS, F. A.; SILANS, A. M. B. P.; PORTO, R. Q.; ALMEIDA, C. N. “Estimativa e Análise do Volume dos Pequenos Açudes através de Imagens de Satélite e Levantamento de Campo na Bacia Hidrográfica do Açude de Sumé”. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande. Disponível em: <<http://dispab.lrh.ct.ufpb.br/documents/30.html>>. Acessado em 13 de outubro de 2011.

SANTOS, V. S. (2007). *Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos*. Campina Grande: UFPB – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Recursos Hídricos, Dissertação de Mestrado. 143p.

SILANS, A. M. B. P.; QUEIROZ, R.; SANTOS, F. A.; SILVA, A. C. S. *Relatório projeto DISPAB*. UFPB/AESA, 2009. Disponível em: <<http://dispab.lrh.ct.ufpb.br>>. Acessado em 22 de setembro de 2011.

SILVA, A. C. S.; SILANS, A. M. B. P.; NETO, A. F. S.; PORTO, R. Q. (2009). “Considerações sobre os aspectos sociais e físicos da açudagem na bacia do açude de Sumé – PB”. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande-MS.