

# A EVAPORAÇÃO EM AÇUDES NO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO DO BRASIL E A GESTÃO DAS ÁGUAS

Andrea Sousa Fontes<sup>1</sup>; João Ilton Ribeiro de Oliveira<sup>2</sup> & Yvonilde Dantas Pinto Medeiros<sup>3</sup>

**Resumo** – O semi-árido nordestino brasileiro configura um cenário crítico no que se refere à questão hídrica, necessitando de subsídios para implantação de uma gestão visando à racionalização do uso de suas águas com base nessa realidade. Este trabalho avalia a representatividade da evaporação em reservatórios do semi-árido para a gestão das águas, a partir da análise do comportamento de três reservatórios, localizados na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Ba), sob efeito de altas taxas de evaporação e baixos índices pluviométricos. A comparação entre a vazão regularizada e a vazão evaporada, devido à formação de um espelho d'água, mostra um comprometimento acentuado na disponibilidade hídrica da região, uma vez que a vazão evaporada chega a superar a vazão regularizada, além de apresentar um volume limite que a vazão regularizada diminui, mesmo com o aumento da água armazenada. Os resultados revelam que a quantificação detalhada da evaporação e análise de sua influência no comportamento de um reservatório localizado no semi-árido são critérios indispensáveis de decisão na escolha do local para construção de uma barragem, no dimensionamento de tal projeto e na adequação das regras de operação de um reservatório objetivando o manejo eficiente da água e sua conservação em qualidade e quantidade.

**Abstract** - The semi-arid area of the Brazilian Northeast configures a critical scenery in the water subject. This work evaluates the importance of the evaporation from reservoir in the semi-arid for the water resources management, through the mean climatological and hydrological data of the area and the analysis of the behavior of three reservoirs, located in the basin of Paraguaçu river (Bahia), under effect of discharges evaporation rates and low rain rates. The comparison between the regularized flow and the evaporated flow shows an influence accentuated on available water resources in semi-arid regions, once the evaporated flow gets to overcome the regularized flow, besides presenting a volume that the regularized flow decreases, even with the increase of the stored

---

<sup>1</sup>. EPUFBA. Rua Aristides Novis, nº 2, Federação. CEP 40.210-630. SSA –Ba. Tel/Fax:(71)245-9927. [asfontes@ufba.br](mailto:asfontes@ufba.br)

<sup>2</sup>. SRH-BA. Av. ACM, nº 357. CEP 41.835-000. SSA –Ba. Tel: (71)270-3255. Fax: 359-6284. [iltonr@srh.ba.gov.br](mailto:iltonr@srh.ba.gov.br)

<sup>3</sup> EPUFBA. Rua Aristides Novis, nº 2, Federação. CEP 40.210-630. SSA –Ba. Tel/Fax:(71)245-9927. [yvonild@ufba.br](mailto:yvonild@ufba.br)

water. The result of this work reveals that the detailed quantification of the evaporation and analysis of its influence in the behavior of the reservoir that should be built in semi-arid area are an indispensable criteria of decision in the choice of the place, in the elaboration of the project and in the adaptation of the operation rules, enabling thus an efficient control of water quality and its conservation.

**Palavras-Chave** – Evaporação em reservatórios, semi-árido, gestão das águas

## **INTRODUÇÃO**

A água é o insumo básico da sobrevivência de todas as espécies e indicador do desenvolvimento de uma região, sendo necessária atenção especial no seu manejo visando sua conservação em qualidade e quantidade. Isso é alcançado por meio da gestão dos recursos hídricos, que se refere aos procedimentos relativos a tentativa de equacionar e resolver as questões da água e otimizar o seu uso (ANEEL, p.60, 2001).

Assim, como a gestão da água deve partir do conhecimento do percurso que esse recurso traça no meio ambiente, o conhecimento detalhado das variáveis que compõem o ciclo hidrológico é o subsídio de uma gestão eficiente. Cabe observar que o comportamento desse ciclo se diferencia entre as várias regiões e o uso racional da água deve ocorrer com base nas suas características peculiares.

Em um país tão extenso como o Brasil deve-se ter bem definido esses conceitos, pois apresenta grande complexidade em relação aos recursos hídricos devido principalmente a: irregularidade espacial da disponibilidade de água, acentuada deterioração desses recursos e inexistência de ampla base de dados hidroclimatológicos.

Embora a disponibilidade de água no Brasil seja abundante, está distribuída de forma irregular, como mostram os dados do balanço hídrico da bacia amazônica, com escoamentos superficiais na ordem de 34,2 l/s/km<sup>2</sup> e da região semi-árida com 2,81 l/s/km<sup>2</sup> (MMA, 2000). Percebe-se, assim, a grande diversidade hidrológica do território brasileiro, sendo que, a região semi-árida configura o cenário mais crítico no que se refere à escassez hídrica, necessitando de subsídios para implantação de uma gestão que vise a racionalização do uso de suas águas com base na sua realidade hídrica.

Diante desses dados percebe-se a relevância de estudos para minimizar as perdas nos corpos d'água, dentre essas, destaca-se o entendimento da evaporação, uma variável crítica dentro do balanço hídrico de regiões semi-áridas, chegando a representar 92% do volume precipitado anual

médio. Estudos realizados no semi-árido estimam que cerca de 40% das águas acumuladas em reservatórios se perde com a evaporação (SUASSUNA, 2002)

Percebe-se então que o fenômeno da evaporação no semi-árido tem papel fundamental no dimensionamento e manejo de obras hídricas, que deve ser minuciosamente investigado para subsidiar ações de planejamento e gerenciamento na busca de um melhor aproveitamento das águas reservadas.

Essa necessidade está de acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos instituída pela Lei 9.433/97, determinando que os Planos de Recursos Hídricos devem contemplar o balanço entre as demandas e as disponibilidades de água na área de ação do plano com apropriado grau de confiabilidade.

Inserido nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo mostrar o caráter essencial do conhecimento criterioso da evaporação em reservatórios para a realização da gestão das águas no semi-árido nordestino do Brasil, considerada nas fases de dimensionamento, escolha do local de implantação e operação.

## **METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para elaboração desse trabalho consistiu de três etapas principais:

1ª etapa: pesquisa bibliográfica de forma a realizar: (i) fundamentação teórica do fenômeno da evaporação e suas formas de determinação (ii) caracterização desse fenômeno no semi-árido Nordeste; (iii) identificação do contexto da açudagem no semi-árido; (iii) definição do papel da evaporação em ações de gestão de águas armazenadas; (iv) avaliação da importância da evaporação na gestão dos recursos hídricos refletida em projetos de controle da quantidade e qualidade da água para os usos diversos.

2ª etapa: avaliação da representatividade das perdas por evaporação em três reservatórios da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu por meio da aplicação de programa computacional (CASCATA), considerando três cenários: (i) reservatório com garantia de 100% no atendimento da vazão regularizada; (ii) reservatório com garantia de 90% no atendimento da vazão regularizada (definição de projeto); (ii) reservatório submetido a taxa de evaporação com valor 10% menor do apresentado nos cenários anteriores com garantia de 100% no atendimento da vazão regularizada.

3ª etapa: Discussão dos resultados obtidos, comparação do comportamento dos três reservatórios em função do volume evaporado e avaliação da representatividade do fenômeno evaporação para a gestão das águas no semi-árido.

## A EVAPORAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO

O clima semi-árido é caracterizado pela insuficiência de precipitações com extrema irregularidade quanto à sua distribuição temporal, concentradas em uma estação de 3 a 5 meses de duração e uma variação em torno de 30% dos totais pluviométricos anuais, chegando a 50% em pontos mais críticos (IICA, 2002).

Aliado a característica regional de deficiência hídrica, deve-se observar a variabilidade temporal das vazões agravando esse cenário. Desse modo, para garantir o atendimento das demandas de água nos períodos de seca, aproveitando-se a água excedente dos meses úmidos, se faz necessária a construção de reservatórios. Assim, reserva-se água para que haja oferta quando não houver chuva por um determinado tempo.

O semi-árido engloba cerca de 70 mil açudes de pequeno porte, os quais, de acordo com Suassuna (2002), são caracterizados por volumes entre 10.000 e 200.000 m<sup>3</sup> e representam 80% dos corpos d'água nos estados do nordeste.

Aliada a essa escassez, apresenta-se também, restrições relativas à qualidade da água nos açudes, principalmente quanto à salinização das águas acumuladas, o que gera prejuízo nas culturas e nos terrenos a jusante, além de comprometer o consumo humano. Estima-se que um terço dos açudes do Departamento Nacional de Obras de Combate à Seca (DNOCS) apresente esse problema em seus perímetros irrigados (SUASSUNA, 2002).

Esse quadro é agravado, ainda, pelo fenômeno da evaporação, que provoca perdas significativas nessa qualidade e quantidade. A evaporação varia de 1000 mm/ano no litoral da Bahia a Recife, atingindo 2000 mm/ano no interior, sendo que na área de Petrolina (Pernambuco) chega a 3000 mm/ano (IICA, 2002). Esses dados estão confirmados por Molle (1989) em pesquisa realizada com base em dados de 11 postos distribuídos no semi-árido e séries variando entre 8 a 25 anos, na qual a evaporação medida em tanque classe A a média anual se aproxima de 3 metros, variando entre 2.700 a 3.300 mm, sendo que os valores mais elevados ocorrem nos meses de outubro a dezembro e mínimos de abril a junho.

As altas taxas de evaporação, aplicadas a superfícies livres de água, representam uma perda significativa na disponibilidade hídrica de uma região e como a presença de açudes é um cenário constante no semi-árido, o conhecimento das perdas por evaporação é a base para se determinar qual o volume potencial disponível, informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos da região.

Para se dimensionar um reservatório deve-se estabelecer um meio termo entre o custo da construção de sua estrutura e o custo que a falta de água pode acarretar. Então, relaciona-se, para cada volume armazenado, a demanda garantida pela vazão regularizada, utilizando-se para a

determinação da capacidade do reservatório: o balanço hídrico e a topografia da área a ser inundada, representada pela curva cota-área-volume.

A região semi-árida necessita de investigação criteriosa desse balanço para que os açudes cumpram a função para a qual foram projetados. Essa questão merece atenção a partir da verificação que, segundo o Projeto Áridas (IICA, 2002), estes foram construídos sem planejamento e critérios de dimensionamentos adequados, gerando o não sangramento de inúmeros desses aproveitamentos e, conseqüente, problema com a qualidade da água que não se renova, apenas evapora.

O déficit hídrico no semi-árido nordestino é visto, quase sempre, considerando apenas o seu aspecto quantitativo sem analisar a qualidade da água disponível. Esta visão conduz a “soluções” que priorizam a acumulação de água, como se a presença deste bem fosse suficiente para dirimir todos os problemas causados pela sua escassez. Daí a construção indiscriminada de barragens na região. No entanto, continua havendo sede no semi-árido, estando-se próximo ou afastado do espelho d’água.

O gerenciamento dos recursos hídricos não deve ser realizado dissociando os aspectos quantitativos e qualitativos, para que se possa permitir uma visão mais ampla, conduzindo a soluções mais apropriadas.

O processo de salinização que ocorre em corpos d’água pode ter como origem razões geológicas milenares ou ações antrópicas recentes, no entanto, para o presente estudo, será dada atenção aos efeitos provocados pelos fatores climáticos sobre a salinização.

A região semi-árida apresenta chuvas que podem ocorrer em um único dia até 60% da chuva anual, lixiviando a superfície e subsuperfície do solo.

Estas características da pluviometria que ocorrem no semi-árido lhe atribui papel múltiplo no processo da salinização, agindo como transportador-concentrador à medida que lixivia o solo e transporta em um único evento os sais que encontravam-se na superfície e subsuperfície da bacia de contribuição para o reservatório mais próximo, agindo como diluidor quando aumenta o volume dos corpos d’água e reduzindo assim a concentração de sais nos mesmos.

A evaporação tem um desempenho relevante no processo de salinização como agente facilitador, por contribuir para a extração dos sais que são encontrados no solo pelo processo da exudação e como concentrador ao passo que retira apenas a água dos reservatórios aumentando a concentração dos sais (SUASSUNA, 1996).

Segundo Audry (1995) os grandes açudes, devido a seus volumes de água, possuem maior inércia e menor amplitude de variação sazonal de salinidade. Ao contrário, os açudes pequenos e médios são reservatórios de inércia geralmente muito reduzida, nestes tipos observam-se excessivas amplitudes da variação sazonal de salinidade, baixas no período das cheias e altas no período de

seca, tornando a sazonalidade um fator importante na decisão sobre a possibilidade e a maneira de gerenciar o uso das suas águas, haja vista que, no período de seca, quando a demanda aumenta, é quando a qualidade da água encontra-se mais comprometida.

Diante disto percebe-se o papel preponderante da evaporação também quanto a qualidade da água devendo ser observada na gestão deste bem.

A gestão das águas consiste na articulação do conjunto de ações dos diferentes agentes sociais, econômicos e políticos objetivando compatibilizar o uso, o controle e a proteção desse recurso, disciplinando as ações antrópicas de acordo com a política estabelecida para a mesma, de modo a se atingir o desenvolvimento sustentável (SILVA, 2000)

A gestão das águas tem base na legislação vigente, destacando-se a Lei Federal Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e. Essa lei traz os Planos de Recursos Hídricos como instrumentos de gestão, definidos como planos para fundamentar e orientar a implementação dessa política, sendo determinado ainda que seu conteúdo mínimo deve contemplar o diagnóstico atual, o balanço contemplando os aspectos de qualidade e quantidade, entre disponibilidades e demandas atual e futura, a identificação de conflitos potenciais e proposição de medidas para o aumento da oferta hídrica.

Na Bahia, destaca-se a Lei Estadual Nº 6.855 de 12 de maio de 1995, definindo que o Plano Estadual de Recursos Hídricos deve conter dispositivos sobre o gerenciamento de recursos hídricos objetivando compatibilizar a oferta e a demanda de água e minimizar efeitos adversos. Percebe-se diante do entendimento do papel da evaporação na disponibilidade hídrica do semi-árido, a completa convergência entre a gestão das águas e a avaliação desse fenômeno.

Os aspectos abordados nas referidas leis, assim como a orientação de medidas preventivas para assegurar a qualidade da água e controle quantitativo e qualitativo do uso da água, devem considerar esse fenômeno como demanda de água a ser computada e gerenciada de forma a cumprir os preceitos de vazão ecológica e prevenção em relação à degradação ambiental.

O estudo da operação dos reservatórios apresenta relevância neste cenário por influenciar diretamente a garantia de atendimento a demanda, principalmente, no que se refere a projeções futuras. O estudo de séries históricas de dados hidroclimáticos representa um fator significativo nessa avaliação, por tornar possível analisar o comportamento do reservatório, verificando a necessidade de reter ou liberar as águas acumuladas como respostas a determinados períodos característicos na região semi-árida, chamadas de regras de operação.

No semi-árido um problema comum é o superdimensionamento dos aproveitamentos hidráulicos ocasionando o não vertimento de inúmeros reservatórios, devido a projetos inadequados ou a falta destes, o que representa um grande mal para a qualidade da água represada. Isso é fruto da cultura local que considera o vertimento como perda de água.

Outro aspecto é a quantidade de açudes construídos dentro de uma mesma bacia hidrográfica, podendo acarretar a sua exaustão hídrica e como consequência direta criação de espelhos d'água sujeitos à evaporação, com a maioria deles sem uso devido à má qualidade da água.

Uma avaliação importante para a gestão das águas, no que se refere à construção de reservatórios, é a comparação entre a eficiência dos pequenos e grandes lagos quanto às perdas por evaporação para dar subsídio a escolha do tamanho adequado do reservatório a ser construído. Essa questão é abordada por Campos (2002) na análise da influencia da evaporação em 40 reservatórios superficiais no Ceará. Os resultados desse estudo mostram que os grandes reservatórios apresentaram uma evaporação média de 7% do volume médio afluente anual, enquanto que os pequenos, apresentaram 18%. Desse modo o autor conclui que existe uma tendência dos grandes açudes serem mais eficiente do que os pequenos nesse contexto.

Para a determinação da evaporação em reservatório, grande importância deve ser dada na escolha do método a ser utilizado, já que a aplicação de métodos inadequados gera valores sub ou super estimados, informando erroneamente aos gestores da água, técnicos e comunidade.

Em estudo comparativo entre os métodos existentes para se estimar a evaporação, para avaliação das informações constantes no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará, Souza (1998) mostra que existem variações dos resultados destes na ordem de 26% e 36% entre os métodos analisados, usualmente utilizados. Isso destaca as incertezas que estão sendo embutidas nas estimativas desse fenômeno.

## **ESTUDO DE CASO**

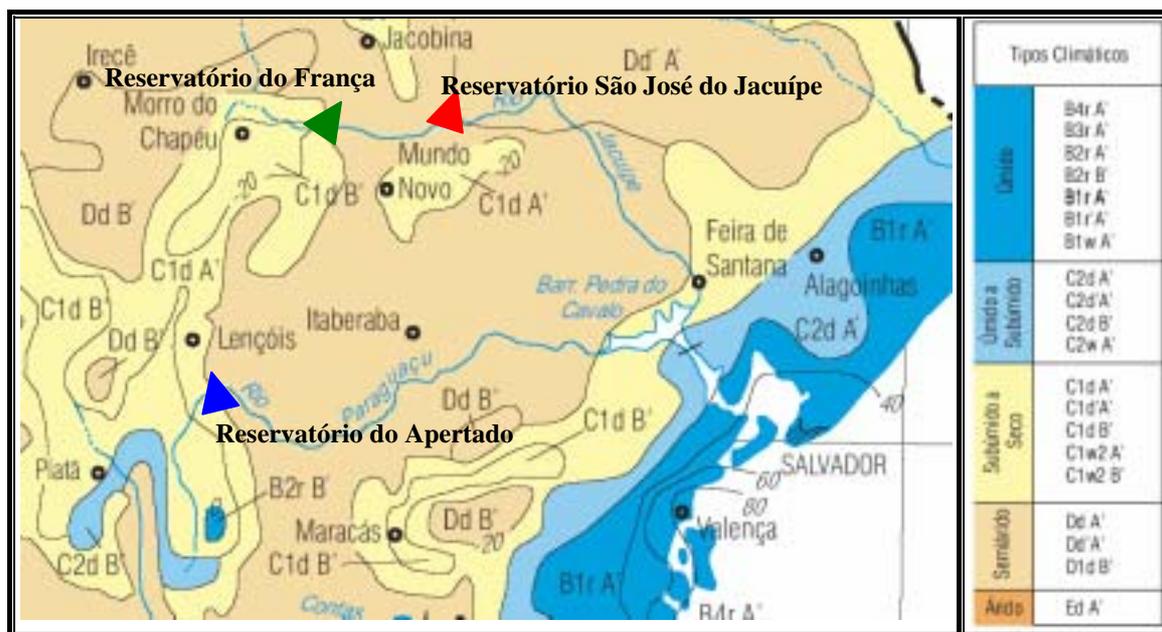
O presente trabalho para discussão da representatividade da evaporação em reservatório do semi-árido para a gestão das águas, analisa o comportamento de três reservatórios, localizados na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Ba), sob efeito de altas taxas de evaporação e baixos índices pluviométricos.

A bacia hidrográfica do Paraguaçu é de domínio inteiramente estadual, está localizada na região centro-leste do Estado da Bahia, ocupando uma área de 55.317 km<sup>2</sup>, que corresponde a aproximadamente 10,14% do território baiano, delimitada pelas coordenadas 11°17' e 13°36' de latitude sul e 38°50' e 42°01' de longitude oeste (SRH, 1996).

Geograficamente, esta bacia encontra-se numa porção territorial particularmente complexa devido à dinâmica climatológica da região e fatores orográficos. Desta forma a bacia apresenta diferentes tipologias climáticas, sendo no trecho alto da bacia de subúmido a seco, trecho médio semiárido e no litoral úmido (SEI, 2002). A evaporação média anual dentro da bacia é de 1.520,8 mm, os meses de verão são os que apresentam maiores médias, que vão diminuindo à medida que

começa o outono. O menor valor é registrado em junho e o maior em dezembro e janeiro (SRH,1996).

Selecionou-se para análise dois reservatórios localizados na região semi-árida (França e São José do Jacuípe) e um na região sub-úmida a seco (Apertado) com o objetivo de comparação quanto aos aspectos da evaporação. A Figura 1 apresenta a localização dos reservatórios estudados inseridos na tipologia climática da região.

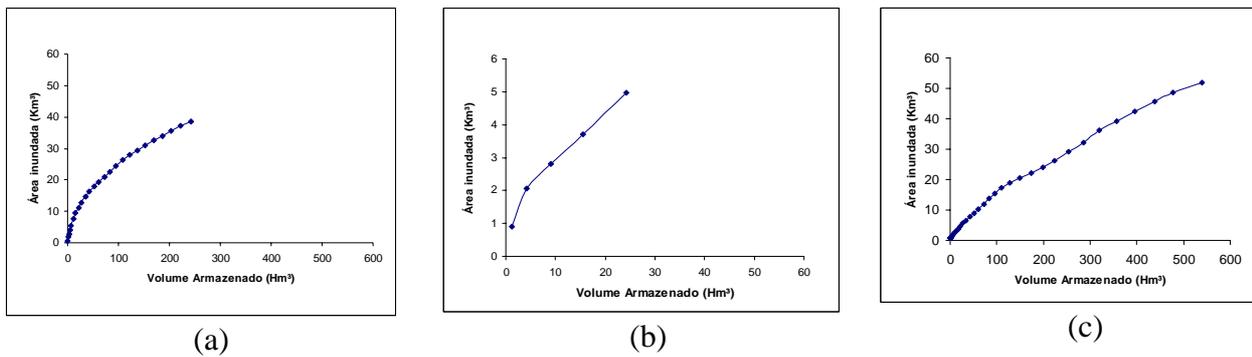


**Figura 1:** Detalhe da tipologia climática e localização dos reservatórios analisados  
(Fonte: SEI, 1997)

A seleção destes reservatórios deveu-se, principalmente, a disponibilidade de dados, a localização e por serem suficientes à elaboração das discussões pertinentes ao escopo deste trabalho. As Figuras 2 e 3 apresentam as características dos reservatórios.

Características Físicas	Reservatórios		
	Apertado	França	São José do Jacuípe
Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	1.166	1.895	4.922,98
Volume Armazenado (hm <sup>3</sup> )	108	24,20	355
Espelho D'água Max. (km <sup>2</sup> )	26,32	4,97	39,13

**Figura 2:** Características físicas dos reservatórios analisados



**Figura 3** – Curva área x volume dos reservatório: (a) Reservatório de Apertado; (b) Reservatório de França; e (c) Reservatório de São José do Jacuípe.

### Determinação dos volumes evaporados nos reservatórios

Para a análise prática das considerações feitas nesse trabalho, foi aplicado um programa computacional de operação de reservatório – CASCATA – Sagbah 2000, desenvolvido para o Ministério do Meio Ambiente pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS, Faculdade de Engenharia Agrícola (FEA) – UFPEL e Núcleo de Informática Aplicada (NIA) – UFPEL, possibilitando a análise da interferência e representatividade da vazão evaporada na vazão regularizada. Este aplicativo determina a função que relaciona a capacidade de armazenamento de um açude com a vazão garantida anual, ao longo de uma amplitude de valores que vai da vazão mínima que pode ser garantida sem açude (capacidade de armazenamento mínima ou aproveitamento ao fio de água) até a máxima vazão que pode ser garantida, igual à média das vazões subtraída da evaporação e de vertimentos eventuais inevitáveis. Este limite superior é geralmente substituído pela vazão obtida com a capacidade máxima de acumulação, derivada de condições topográficas da seção de barramento. Essa topografia é representada por uma tabela que relaciona o volume armazenado e a área inundada para cada cota, quando apresentada graficamente (curva cota x área x volume).

Os dados necessários para execução do programa são: série de chuva em posto mais próximo do açude, vazões afluentes médias mensais, evaporação mensal do lago, polinômio que ajusta a função área da superfície do lago versus o volume armazenado e dados do açude (armazenamento máximo e mínimo). O programa apresenta como resultado diversos valores de capacidade, menores que a máxima especificada, relacionados com a produção anual, a evaporação efetiva média anual, ou seja, a evaporação descontada da chuva direta sobre o reservatório, e o vertimento médio anual. Em seguida apresenta-se o percentual obtido de falhas e o armazenamento mínimo verificado.

## Aplicação do programa CASCATA nos reservatórios

O programa CASCATA foi aplicado para cada reservatório utilizando os dados de chuva do posto pluviométrico mais próximo. A seguir são apresentadas as estações pluviométricas e fluviométricas mantidas pela Agência Nacional de Águas (ANA), utilizadas como dados de entrada no programa CASCATA, conforme período apresentado da Figura 4.

Reservatório	Período de Dados
Apertado	1985 a 1998
França	1973 a 1990
São José do Jacuípe	1985 a 1998

**Figura 4** – Período de análise por reservatório

Os dados de vazões afluentes aos reservatórios foram calculados por transposição das vazões observadas na estação fluviométrica para o eixo da barragem, pelo método de correlação de área utilizando o posto fluviométrico mais próximo, devido a falta de monitoramento logo a montante dos reservatórios e dados de um período coincidente entre os dados de chuva e vazão.

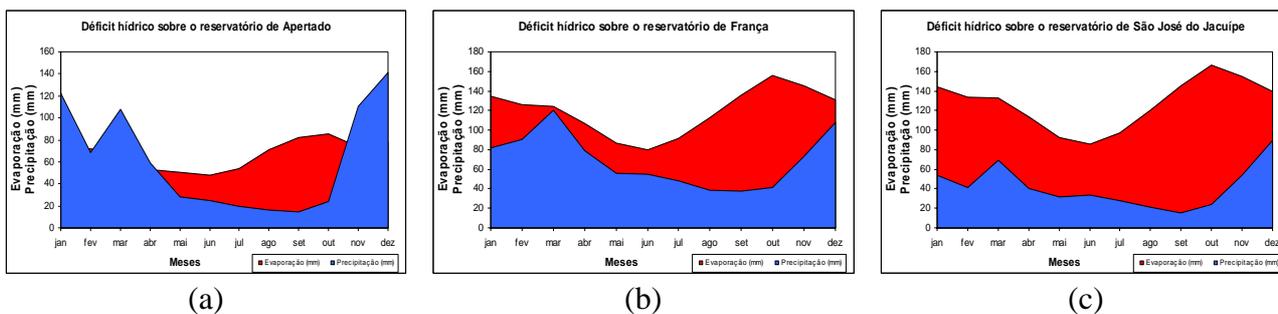
A partir da série de vazão foi determinada a vazão mínima que deve ser mantida a jusante da barragem para preservação dos ecossistemas, definida como 20% da vazão com 90% de permanência, obtida da Curva de Permanência. Para Apertado o valor obtido foi de 0,16 m<sup>3</sup>/s, para França de 0,008 m<sup>3</sup>/s e para São José do Jacuípe de 0,014 m<sup>3</sup>/s.

Para o reservatório de Apertado foram utilizadas as taxas de evaporação da estação meteorológica de Lençóis (Ba) por ser a mais próxima com disponibilidade de dados e por ter sido utilizada no projeto desse reservatório. A fator de correção adotado para fazer face ao "efeito tanque" foi de 70% já que o reservatório está localizado em região de temperaturas mais amenas. (CERB, 1996a).

Para os reservatórios de França e São José do Jacuípe foi utilizada uma série de evaporações médias mensais obtida a partir das evaporações de tanque Classe A da Estação de Morro do Chapéu, corrigidas pela proporção entre as Evapotranspirações Potenciais médias estimadas em Jacobina e Morro do Chapéu, indicada em projeto.

Os valores de evaporação de tanque classe A foram corrigidos, adotando-se percentuais de 75 % e 80 % para França e São Jose do Jacuípe, respectivamente, justificando o valor maior para o segundo açude pela existência de um aumento das temperaturas para jusante da bacia do Rio Jacuípe.

A Figura 5 apresenta a relação da evaporação e precipitação sobre os reservatórios estudados.



**Figura 5** – Relação precipitação versus evaporação sobre: (a) Reservatório de Apertado; (b) reservatório de França; e (c) Reservatório de São José do Jacuípe

Para análise proposta nesse trabalho foram considerados os seguintes cenários:

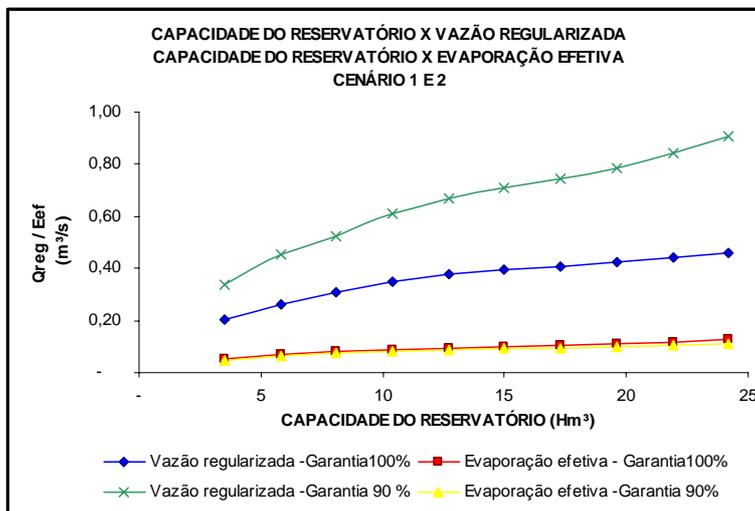
- Cenário 1 – Determinação do volume efetivo evaporado utilizando os dados de evaporação constantes do projeto para uma garantia de 100% no atendimento da demanda.
- Cenário 2 – Determinação do volume efetivo evaporado utilizando os dados de evaporação constantes do projeto para uma garantia de 90% no atendimento da demanda.
- Cenário 3 – Determinação do volume efetivo evaporado utilizando os dados de evaporação 10% menores que os dados constantes do projeto para uma garantia de 100% no atendimento da demanda.

A definição dos cenários propostos tem como motivação discutir: (i) a influência da evaporação no dimensionamento do reservatório para o atendimento integral da demanda e para a tolerância de 10% de falha nesse atendimento, já que este é assumido como critério de dimensionamento dos reservatórios utilizados para análise; (ii) a sensibilidade do sistema no que diz respeito a confiabilidade do dado utilizado, já que muitas vezes utiliza-se para o dimensionamento dados de estação mais próxima e dados médios podendo não refletir a realidade local; e (iii) a influência da localização e topografia na ação da evaporação.

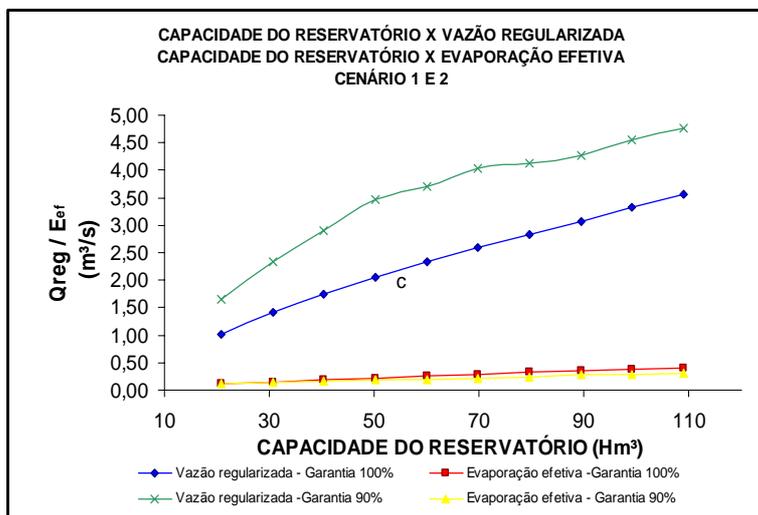
Um ponto a ser comentado na aplicação do CASCATA é a definição do volume inicial do reservatório a ser considerado. Esse valor influencia os resultados, aumentando a fração da água evaporada para o volume inicial maior, ou seja, a simulação iniciada com o reservatório no nível máximo apresenta o cenário mais crítico para a ação da evaporação. Dessa forma foi adotado um volume inicial para todos os reservatórios de 100% do volume máximo, revelando a amplitude da influência da evaporação na definição do volume de um reservatório.

As Figuras 6, 7 e 8 permitem visualizar os resultados obtidos com a aplicação do programa para cada reservatório seguindo os cenários predefinidos e a relação entre a vazão regularizada ( $Q_{reg}$ ) e a evaporação efetiva ( $E_{ef}$ ). Optou-se por nomear o fluxo da água em  $m^3/s$  de evaporação efetiva já que o resultados obtido desconta da taxa de evaporação aplicada ao espelho d'água do

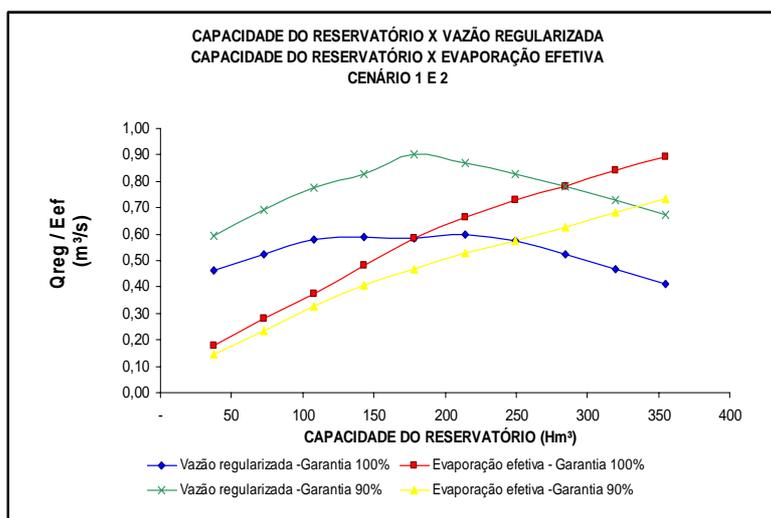
reservatório, a contribuição da chuva nessa mesma área. Essas figuras apresentam a comparação entre a evaporação efetiva e a vazão regularizada para cada capacidade dos reservatórios nos diversos cenários, assim como a relação destas com o volume armazenado (capacidade do reservatório).



**Figura 6:** Representação dos resultados da aplicação do CASCATA para o reservatório do Apertado



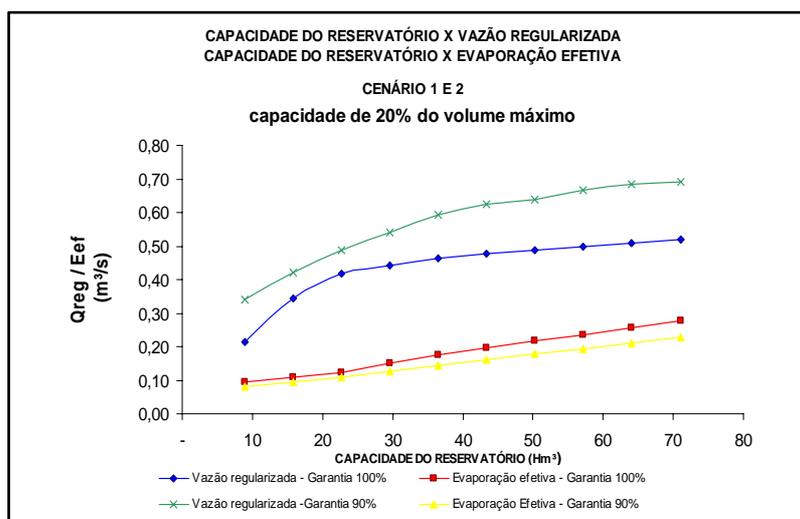
**Figura 7:** Representação dos resultados da aplicação do CASCATA para o reservatório do França



**Figura 8:** Representação dos resultados da aplicação do CASCATA para o reservatório do São José do Jacuípe

Como o reservatório de São José do Jacuípe apresentou o quadro mais crítico e com ineficiência acentuada, prosseguiu-se a avaliação da influência da evaporação criando um cenário complementar na busca de uma capacidade do reservatório que otimize a eficiência do sistema. Constatou-se então, que para 20% da capacidade de armazenamento, o reservatório regulariza a mesma vazão que a capacidade máxima real, devido a redução das perdas por evaporação, concluindo-se que o reservatório está superdimensionado.

Cabe observar que para análise do Cenário 3 no reservatório de São José optou-se por utilizar os resultados da simulação para capacidade de 20% da máxima real, de forma a retirar a influência do superdimensionamento do reservatório na análise da sensibilidade do sistema a precisão dos dados de evaporação utilizados (Figura 9).



**Figura 9:** Representação dos resultados da aplicação do CASCATA para o reservatório do São José do Jacuípe– 20% do volume máximo real

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos confirmam a importância de se analisar a influência da evaporação para definir o comportamento e a eficiência de um reservatório na região semi-árida.

No período analisado o reservatório do Apertado recebeu uma contribuição média anual de 736mm de precipitação e evaporou 809mm indicando taxas mais amenas de evaporação e contribuição mais efetiva da precipitação na superfície líquida (espelho d'água). Desse modo, não ocorre um quadro de déficit hídrico acentuado no sistema, quando comparado com os demais.

Já na região do reservatório do França a precipitação média anual do período analisado foi de 830mm estando sujeito a uma evaporação no lago de 1.730mm apresentando, conseqüentemente, uma retirada efetiva de 900mm de água para a atmosfera. Nesse contexto, a evaporação efetiva varia de 37 a 50% da vazão regularizada com garantia de 100% nos diversos níveis de água do lago, ou seja, aproximadamente um terço de um dado volume do reservatório é evaporado por ano.

O maior déficit hídrico ocorre em São José do Jacuípe com uma média anual de 502mm de precipitação e evaporação de 1846mm, apresentando uma evaporação efetiva de até 215% da vazão regularizada com 100% de garantia e 109% para 90% de garantia no atendimento às demandas para a capacidade máxima de armazenamento de reservatório, indicando que a relação chuva/evaporação é um fator importante na definição de vulnerabilidade dos reservatórios do semi-árido, isso pode ser notado uma vez que o reservatório de São José, apesar de possuir o dobro da capacidade volumétrica do reservatório do Apertado, esse consegue regularizar uma vazão mais representativa que o primeiro.

O critério de avaliação da eficiência do sistema deu-se a partir da comparação entre o volume de água que o reservatório pode regularizar e o volume que ele perde por evaporação para atingir tal objetivo. Considera-se ineficiente o sistema que apresenta volume evaporado superior ao volume regularizado.

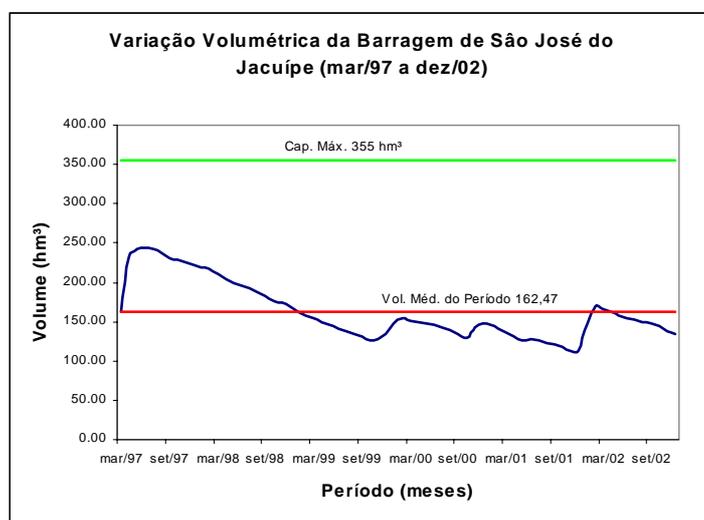
Dessa forma, pode-se constatar que o reservatório de São José passa a ser ineficiente quando atinge volumes igual e superiores a 178,50hm<sup>3</sup> para uma garantia de 100%. Para uma garantia de 90% a ineficiência é observada na capacidade máxima deste aproveitamento hidráulico.

Notou-se ainda no Cenário 2, que a partir do volume 178,50hm<sup>3</sup>, a vazão regularizada começa a diminuir à medida que o volume aumenta, isto ocorre devido ao acréscimo do espelho d'água, proporcionando maior evaporação.

Pode-se perceber, comparando-se a Tabela 3 com a Tabela 4, que um barramento sob as mesmas condições climáticas e topográficas pode regularizar a mesma vazão para volumes diferentes. No caso de São José do Jacuípe observou-se que para um volume de 71hm<sup>3</sup> regulariza-se a mesma vazão que o volume de 355hm<sup>3</sup>, cinco vezes maior que o anterior, evidenciando a influência que a evaporação pode ter em um reservatório localizado no semi-árido.

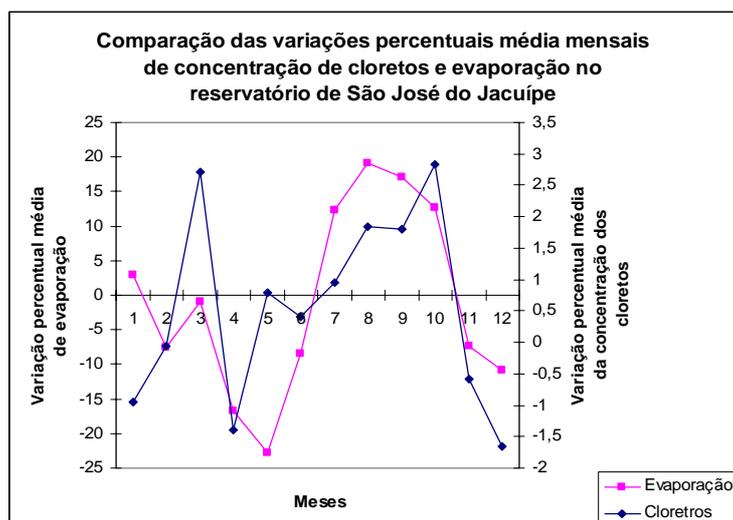
Isto leva a concluir que a falta de análise que considere a evaporação de modo mais relevante, geralmente, colabora para a ineficiência de operação dos reservatórios, bem como para o seu superdimensionamento, situação comum no semi-árido, conforme citado por Suassuna (2002) e IICA (2002).

No entanto, cabe ressaltar que a operação do reservatório de São José do Jacuípe encontra-se na prática dentro da faixa de eficiência, considerando os valores observados na Figura 8. Isto pode ser evidenciado através da série histórica da variação volumétrica mensal verificada no reservatório no período de março de 1997 a dezembro de 2002 (Figura 10), haja vista que o volume médio no período é de 162,47hm<sup>3</sup>. Esse valor proporciona a maior vazão regularizada simulada pelo CASCATA no Cenário 2, elaborado para representar os critérios de projeto.



**Figura 10:** Variação volumétrica do reservatório de São José do Jacuípe. Fonte: SRH, (2003)

Outro fator relevante é a observação da variação média mensal da concentração dos cloretos ao longo dos anos (1985 a 2001 – dados da EMBASA), comparada com a variação média mensal da evaporação, onde verifica-se uma tendência similar no comportamento dessas duas variáveis, confirmando ser a evaporação um fator relevante para qualidade das águas dos reservatórios, conforme apresentado na Figura 11.



**Figura 11:** Comparação da variação percentuais médias da evaporação e concentração de cloretos para o reservatório de São José do Jacuípe

Percebe-se, também, que a geometria do reservatório é outro fator bastante relevante na análise da influência da evaporação, haja vista que os reservatórios de França e Apertado demonstram maior ou a mesma eficiência para níveis d'água mais elevados, enquanto o São José do Jacuípe tem sua eficiência comprometida nesta situação.

Esse comportamento é explicado com a análise das curvas área x volume dos reservatórios (Figura 3). A curva do reservatório de Apertado apresenta uma maior taxa de crescimento para menores volumes acumulados, essa taxa diminui gradativamente para volumes maiores. No que se refere ao reservatório de França, apesar dos poucos dados disponíveis para elaboração da relação volume x área, pode-se perceber uma tendência, principalmente nos três primeiros pontos (volume armazenado menor), igual ao comportamento de Apertado, passando depois para uma tendência linear.

Já o reservatório São José do Jacuípe apresenta uma relação entre volume e área inundada mais linear com uma leve curvatura nos valores de volume próximo a capacidade máxima. Essa curvatura ao contrário de Apertado mostra uma tendência com maior taxa de crescimento da área inundada para o aumento no volume armazenado, justificando assim o comportamento das perdas de evaporação para os diversos níveis desse reservatório.

Desta forma confirma-se a importância da escolha adequada do local de implantação deste tipo de empreendimento, visando a minimização das perdas de água por evaporação.

Partindo-se para análise do Cenário 3, observa-se que os resultados obtidos confirmam que quanto mais precisa for a determinação do valor real da evaporação, mais criterioso será o dimensionamento do reservatório, como pode ser observado comparando-se os resultados da utilização de dados mensais com diferença de 10% no seu valor.

A título de exemplificação, no reservatório do São José do Jacuípe para uma mesma capacidade volumétrica e reduzindo em 10% a evaporação, a vazão regularizada passa de 0,52m<sup>3</sup>/s para 0,55m<sup>3</sup>/s, sendo incrementada, portanto, em 0,03m<sup>3</sup>/s. Tal incremento seria suficiente para abastecer um município de 15.000 habitantes, considerando um consumo *per capita* de 150l/dia.

No reservatório de Apertado seria possível assegurar o abastecimento de um município de 25.000 habitantes, tendo em vista um incremento médio de 0,04 m<sup>3</sup>/s na vazão regularizada num cenário de atendimento com 100% de garantia.

Da mesma forma o abastecimento poderia estar comprometido se o projeto fosse realizado com taxas de evaporação menores que a real, ou seja, observando o exemplo do reservatório de França, caso a taxa de evaporação de projeto fosse maior em cerca de 10% da taxa real, um município de 9.000 habitantes poderia não ser abastecido sendo que no projeto esse abastecimento foi simulado com 100% de garantia. Portanto, os valores de evaporação devem ser os mais precisos na realização de estudos.

Diante do exposto, evidencia-se a importância que a evaporação tem na decisão de se construir um reservatório, presente: (i) na fase de planejamento da obra para escolha do sitio da barragem visando um reservatório mais profundo e com menor área; (ii) na elaboração do projeto da barragem, pela definição de um volume limite que garanta a eficiência do sistema; e (iii) na fase de operação com a definição de regras que minimizem essas perdas e a influência na salinização dos reservatórios.

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os fatos e considerações abordados no presente trabalho refletem a necessidade de integrar criteriosamente o conhecimento da de evaporação na implementação de políticas de gerenciamento, buscando extrair o melhor desempenho do reservatório no cumprimento de suas funções sem trazer prejuízo à região, à população ou ao meio ambiente.

Cabe ressaltar que os reservatórios não são os causadores da evaporação excessiva na região, apenas mudam a dinâmica desse processo fazendo com que a perda de água ocorra mais intensamente no local da sua implantação.

Dessa forma sua construção e operação devem priorizar as condições que minimizem os efeitos da evaporação, já que este é um custo inevitável de tal aproveitamento hidráulico indispensável para a sobrevivência no semi-árido.

Diante do cenário presente no semi-árido e da quantidade de técnicas e informações disponíveis para embasar as ações de minimização das restrições hídricas e dos conflitos, as tomadas de decisão podem ser adequadas a realidade local, sem risco de imprevistos ou necessidade

de políticas severas de racionamento da água. A gestão será realizada com base no real comportamento do ciclo hidrológico e medidas preventivas e alternativas que minimizem qualquer perda na qualidade e quantidade do insumo água.

Recomenda-se, no entanto, para uma avaliação mais precisa da evaporação em um reservatório e seus efeitos, a aplicação dos métodos de estimativas utilizando dados medidos no local de implantação ou mesmo no corpo do reservatório caso existente, uma vez que dados médios e de regiões próximas podem mascarar a real influência desse fenômeno no funcionamento do sistema.

Deve-se também avaliar a possibilidade da existência de um volume limite que a partir dele a vazão evaporada supera a vazão regularizada e outro a partir do qual devido ao aumento progressivo da vazão evaporada resultante do acréscimo significativo do espelho d'água. Observa-se dessa forma que a evaporação tem influência direta quanto à eficiência do reservatório, tendo em vista a relação entre a vazão regularizada e a evaporada.

Outro ponto importante é o acompanhamento da salinização dos reservatórios do semi-árido intensificado pelas altas taxas de evaporação.

È necessário, então, se entender o fenômeno da evaporação para se conviver com ele, já que seus efeitos não se evitam, mas se gerenciam.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS.

Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2a ed. Arnaldo Augusto Setti; Jorge Enoch Furquim Werneck Lima; Adriana Goretti de Miranda Chaves; Isabella de Castro Pereira. Brasília, 2001. 328 p;

AUDRY, P.; SUASSUNA, J. A qualidade da Água na Irrigação do Trópico Semi-árido: um estudo de caso, In: Seminário Franco-Brasileiro de Pequena Irrigação, Pesquisa e Desenvolvimento, Anais do Encontro, SUDENE e Embaixada da França, Recife, 11 a 13 de dezembro de 1990.

CAMPOS, J.N.B et al. Sobre a eficiência de pequenos e grandes reservatórios. Disponível em: <[http://www.deha.ufc.br/Nilson/trab\\_pub.html](http://www.deha.ufc.br/Nilson/trab_pub.html)> Acesso em 10 ago. 2002.

CERB (1996a). Barragem Apertado, Município Mucugê – Elaboração de Projeto Executivo da Barragem de Acumulação e suas Obras Complementares. Volume I – Relatório do Projeto. Tomo B.1 – Concepção e Estudos Básicos – Texto. 156p.

CERB (1996b). Barragem de França. Projeto Detalhado da Barragem e Estruturas Anexas

- GOMES, R.M.; FILHO, T.B.O. Proposta de manejo hídrico e de operação em reservatórios de estiagem no nordeste brasileiro visando o aumento das vazões regularizadas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14.,2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. 1 CD.
- INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA AGRICULTURA. Projeto Áridas. Disponível em: <<http://www.iica.org.br/2001/projaridas/>> Acesso em 10 ago. 2002.
- LANNA, A.E. Análise Sistêmica de Recursos Hídricos - Capítulo 3 - Simulação Iterativa. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da UFRGS. Disponível em: <<http://www.iph.ufrgs.br/posgrad/disciplinas/hip64/3SimIter.PDF>> Acesso em 10 ago. 2002 .
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Agenda 21 brasileira – Bases para discussão. Brasília, 2000. 196 p;
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília. p.43 a 57. 2002.
- MOLLE, F. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Série Brasil. SUDENE.Hidrologia. Recife, série.25, 1989. p. 11 A 70.
- SILVA, D.D. da; PRUSKI, F.F. Gestão de Recursos Hídricos. Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais.Brasília. Ed. Secretaria de Recursos Hídricos, DF, Universidade Federal de Viçosa, ABRH, 2000. 659p.
- SILVA, T.J.A. da et al. Avaliação comparativa da evaporação em dois açudes pelo método do Tanque Classe A. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14.,2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. 1 CD.
- SOUZA, F. Avaliação dos estudos hidroclimatológicos do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará: I – Evapotranspiração. Encontro das Águas. IICA, Fortaleza. 1998. Disponível: <http://www.iica.org.br/aguatrab/Francisco%20de%20Souza/p4tb04.htm>. Acesso em 10 ago. 2002.
- SRH (1996). Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Médio e Baixo Paraguaçu. Volume VI – Documento síntese. 163p.
- SUASSUNA, J. A pequena e média açudagem no semi-árido nordestino: uso da água na produção de alimentos. Disponível em: <<http://www.fundaj.gov.br/docs/text/textrop.html> > Acesso em 10 ago. 2002 .
- SUASSUNA, J. O Processo de Salinização das Águas Superficiais e Subterrâneas no Nordeste Brasileiro, In Seminário Brasileiro “Impactos Ambientais Associados a Utilização de Águas Dessalinizadas no Semi-árido”/Ministério do Meio Ambiente – Fortaleza, CE, junho de 1996.