

# **SOBRE A EFICIÊNCIA DE PEQUENOS E GRANDES E RESERVATÓRIOS**

José Nilson B. Campos<sup>1</sup>, Ticiania M. de Carvalho Studart<sup>1</sup>, David Duarte G. Martinz<sup>2</sup> e Luiz Sérgio V. Nascimento<sup>3</sup>

## **RESUMO**

O presente trabalho analisa a influência da evaporação na eficiência de 40 reservatórios superficiais – pequenos e grandes - situados na Bacia do Jaguaribe, Ceará. A equação do balanço hídrico é tratada de forma adimensional e o efeito da evaporação é avaliado através de um fator adimensional que engloba as três principais variáveis que, devido a esse fenômeno, interferem no rendimento do reservatório: a lâmina evaporada durante a estação seca, a forma da bacia hidráulica e o deflúvio médio anual.

## **ABSTRACT**

This paper intends to evaluate the influence of evaporation on the efficiency of 40 reservoirs in Jaguaribe River Basin, Ceará. The water budget equation is in its dimensionless form and the evaporation effect is analyzed by a dimensionless factor which embodies the three important parameters: mean evaporation depth during the dry season, reservoir shape factor and mean annual discharges.

## **1- INTRODUÇÃO**

A acumulação de água em reservatórios superficiais é condição essencial à sobrevivência no Nordeste Brasileiro Mas, considerando as altas taxas de evaporação da Região, é importante que se escolha, para a implantação de novos açudes, locais que maximizem a eficiência do armazenamento, surgindo assim, a célebre e polêmica questão: qual o mais eficiente, o pequeno ou o grande açude?

Será mesmo válido o argumento, muitas vezes utilizado por defensores dos pequenos açudes, de que “os grandes açudes, por possuírem um espelho d’água maior e, portanto, evaporarem um volume d’água também maior, não são apropriados para Região”?

Na realidade, reservatórios, pequenos ou grandes, têm dependendo das circunstâncias, suas vantagens e desvantagens. Além do mais, não existe uma linha mágica a partir da qual o reservatório passa de pequeno a médio, de médio a grande, ou ainda de bom a ruim. É nesta análise que o presente trabalho pretende jogar um pouco mais de luz.

---

<sup>1</sup> Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará - Campos do Pici - Bloco 713 - Fone: (85)288.9623 - Fax☎(85)288.9627 – e-mail: [nilson@ufc.br](mailto:nilson@ufc.br) e [ticiania@ufc.br](mailto:ticiania@ufc.br)

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Bolsista de Apoio Técnico do CNPq

<sup>3</sup> Estudante do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Bolsista de Iniciação Científica do CNPq

## 2- METODOLOGIA

Para entender o processo de troca regularização x evaporação x sangria que ocorrem no processo de estocagem de águas superficiais utilizou-se o diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996).

### 2.1 - A EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

No Diagrama Triangular de Regularização, o balanço hídrico de um reservatório é representado pela equação:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - E - M - S_t \quad (1)$$

onde  $Z_t$  = volume afluente acumulado no reservatório no início do período  $t$ ;  $I_t$  = volume afluente à reserva durante o período  $t, t+1$ ;  $E_v$  = volume anual evaporado da reserva durante a estação seca;  $M$  = volume anual retirado da reserva e  $S_t$  = volume sangrado da reserva durante o período  $t, t+1$ .

Para permitir um tratamento racional a essa equação, as relações cota x área e cota x volume são representadas por:

$$Z(h) = \alpha h^3 \quad (2)$$

$$A(h) = 3\alpha h^2 \quad (3)$$

onde:  $Z(h)$  = volume da reserva a altura  $h$ ,  $A(h)$  = área do espelho d'água a altura  $h$ ;  $h$  = altura da água até o ponto mais profundo do lago e  $\alpha$  = fator de forma do reservatório.

Calculando-se o volume evaporado a partir da lâmina anual de evaporação durante o período seco ( $E_v$ ) e das equações 2 e 3, a Equação 1, após ter todos os termos divididos por  $\mu$  (volume afluente médio anual), é transformada em:

$$Z_{t+1} / \mu = Z_t / \mu + I_t / \mu - (3\alpha^{1/3} E_v) / (\mu^{1/3}) - M / \mu - S_t / \mu \quad (4)$$

Todos os parâmetros que influenciam no rendimento do reservatório, devido ao efeito da evaporação, estão inseridos no fator adimensional de evaporação ( $f_E$ ), definido por Campos (1987) e dado por:

$$f_E = (3\alpha^{1/3} E_v) / \mu^{1/3} \quad (5)$$

### 2.2 - OS PROCESSOS DE TROCA EM UM RESERVATÓRIO

Os deflúvios afluentes a um reservatório ( $\mu$ ) são transformados em três partes: a retirada para fins utilitários ( $M$ ); as perdas por evaporação ( $E$ ) e as perdas por sangria ( $S$ ).

Pelo princípio de conservação de massa tem-se:

$$\mu = E[M] + E[S] + E[E] \quad (6)$$

onde,  $E[ ]$  representa o operador valor esperado.

Como  $\mu$  é uma constante, ao se alterar os elementos da Equação 4, ou a capacidade do reservatório (K), o efeito será uma transferência entre os elementos do lado direito da Equação 6. A maneira como se dá essa transferência será analisada neste trabalho.

### 3- ANÁLISE DO FATOR ADIMENSIONAL DE EVAPORAÇÃO

O efeito da evaporação no rendimento de um reservatório é função direta do fator adimensional de evaporação. Reservatórios com menores  $f_E$  apresentam uma maior eficiência (Campos,1996). A presença do termo  $\mu^{1/3}$  no denominador deste parâmetro faz com que os rios caudalosos tendam a apresentar um menor valor para  $f_E$ . Por outro lado, esses rios necessitam, para um mesmo  $f_K$ , um maior volume de acumulação. Nessa situação, pode-se esperar, via de regra, um maior valor para  $\alpha$  e, conseqüentemente, uma tendência de aumento do valor de  $f_E$ .

Para analisar como essas duas tendências opostas se contrabalançam, selecionou-se 40 reservatórios na Bacia do Jaguaribe e calculou-se os valores de  $f_E$  para cada um deles. A razão da escolha deveu-se à procura de uma base homogênea que permitisse a comparação dos resultados. Os dados utilizados são os do Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe (COGERH, 1999). Os valores da capacidade (K), fator de forma ( $\alpha$ ), volume médio afluyente anual ( $\mu$ ), lâmina evaporada durante a estação seca (Ev) e fator adimensional de evaporação ( $f_E$ ) são os observados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Principais características dos 40 reservatórios analisados na Bacia do Jaguaribe

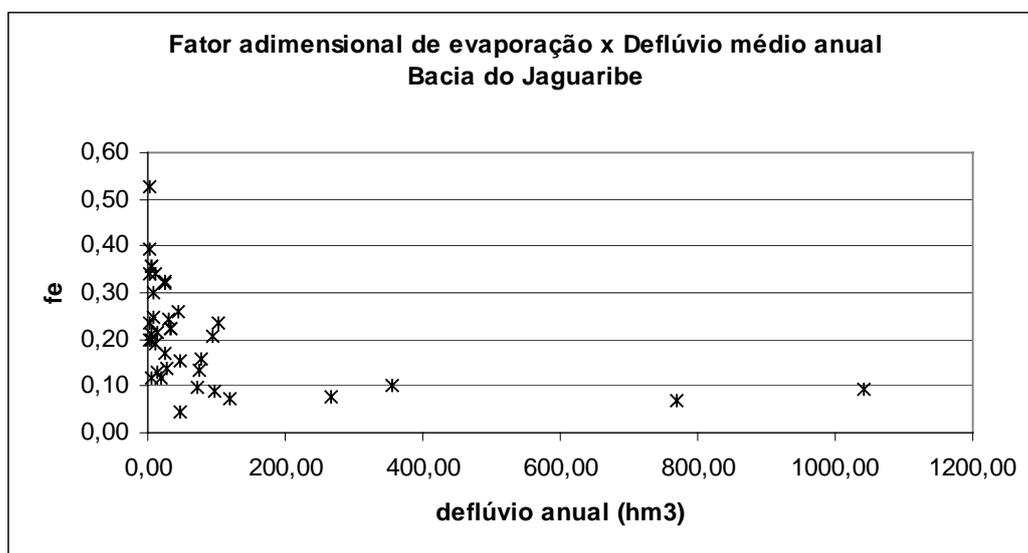
Açude	K (hm <sup>3</sup> )	$\alpha$	$\mu$ (hm <sup>3</sup> /ano)	Ev (m)	$f_E$
Atalho II	108,25	2.524,78	97,78	1,02	0,09
Banabuiú	1.800,00	10.529,16	768,42	0,97	0,07
Boa Viagem	47,00	3.008,00	28,88	0,97	0,14
Broco	17,50	6.377,55	4,59	1,07	0,36
Canafistula	13,12	9.857,25	5,91	1,00	0,36
Canoas	69,25	870,99	19,31	1,08	0,12
Cedro	126,00	37.333,33	25,84	0,95	0,32
Cipoada	17,30	12.997,75	32,25	1,00	0,22
Ema	10,40	5.324,80	9,65	1,00	0,25
Favelas	30,10	10.969,39	32,38	1,07	0,22
Fogareiro	118,81	5.025,82	267,85	0,97	0,08
Gomes	2,39	121,42	48,61	1,10	0,04
Ingazeiro	11,32	2.763,67	11,57	1,02	0,19
Joaquim Távora	23,66	8.622,45	7,40	0,95	0,30
Lima Campos	63,65	34.204,49	24,78	0,95	0,32
Nobre	22,09	10.054,62	1,68	0,97	0,53
Nova Floresta	7,62	2.007,16	118,84	0,95	0,07
Olho d'água	21,30	1.792,39	5,49	0,95	0,20
Orós	1.956,30	37.097,24	1.042,36	0,95	0,09
Patu	71,80	2.659,26	73,42	0,97	0,10
Pedras Brancas	434,00	22.049,48	157,21	0,97	0,15
Poço da Pedra	50,00	4.695,72	46,09	1,08	0,15
Poço de Barro	52,00	15.407,41	29,57	1,00	0,24
Prazeres	32,50	338,29	6,18	1,02	0,12
Quixabinha	32,41	1.476,40	3,29	1,02	0,24
Quixeramobim	54,00	14.501,02	354,36	0,97	0,10
R. dos Carneiros	37,18	945,96	3,61	1,02	0,20
Riacho do Sangue	61,42	12.501,53	77,54	0,97	0,16
Riacho dos Tanques	12,78	7.395,83	2,99	0,97	0,39

**Tabela 1 (cont).** Principais características dos 40 reservatórios analisados na Bacia do Jaguaribe

Açude	K (hm³)	$\alpha$	$\mu$ (hm³/ano)	Ev (m)	$f_E$
Riacho Verde	14,67	2.985,96	1,83	0,97	0,34
Rivaldo de Carvalho	6,42	14.858,32	12,47	1,07	0,34
Santo Ant° de Russas	29,70	29.700,00	93,32	1,00	0,21
São José II	29,15	5.933,24	14,00	0,95	0,22
Serafim Dias	43,00	39.929,77	101,39	1,07	0,24
Thomas Osterne	28,79	1.842,56	5,64	1,02	0,21
Trapiá II	18,19	1.315,83	14,44	0,97	0,13
Trici	16,50	3.673,09	25,39	1,07	0,17
Trussu	263,00	7.661,36	73,74	0,95	0,13
Várzea do Boi	51,80	23.577,61	44,38	1,07	0,26
Vinícios Berredo	434,05	22.052,02	158,50	0,97	0,15

Os parâmetros de forma de cada reservatório foram calculados fazendo-se  $\alpha = K / h^3$ , onde K é a capacidade do reservatório e h, a altura da superfície d'água correspondente à capacidade. O valor de Ev, evaporação no lago durante a estação seca, foi calculada a partir dos dados das Normais Climatológicas (INEMET, 1990). Como os dados referem-se a medidas pelo evaporímetro Piché, efetuou-se correção proposta por Coêlho (2000), transformando-os em valores equivalentes à evaporação no Tanque Classe A. A seguir aplicou-se fator de correção do tanque proposto por Molle e Cadier (1992), em função da área do reservatório. Todos os reservatórios têm área da bacia hidráulica superior a 50 ha, com exceção do Açude Gomes. Aos primeiros aplicou-se  $K_a$  igual a 0,70; à exceção aplicou-se  $k_a$  igual a 0,75.

Estudou-se a correlação entre  $f_E$  e  $\mu$  para os 40 reservatórios analisados. O melhor ajuste foi obtido com a curva  $f_E = 0,397\mu^{-0,24}$  (Figura 1).

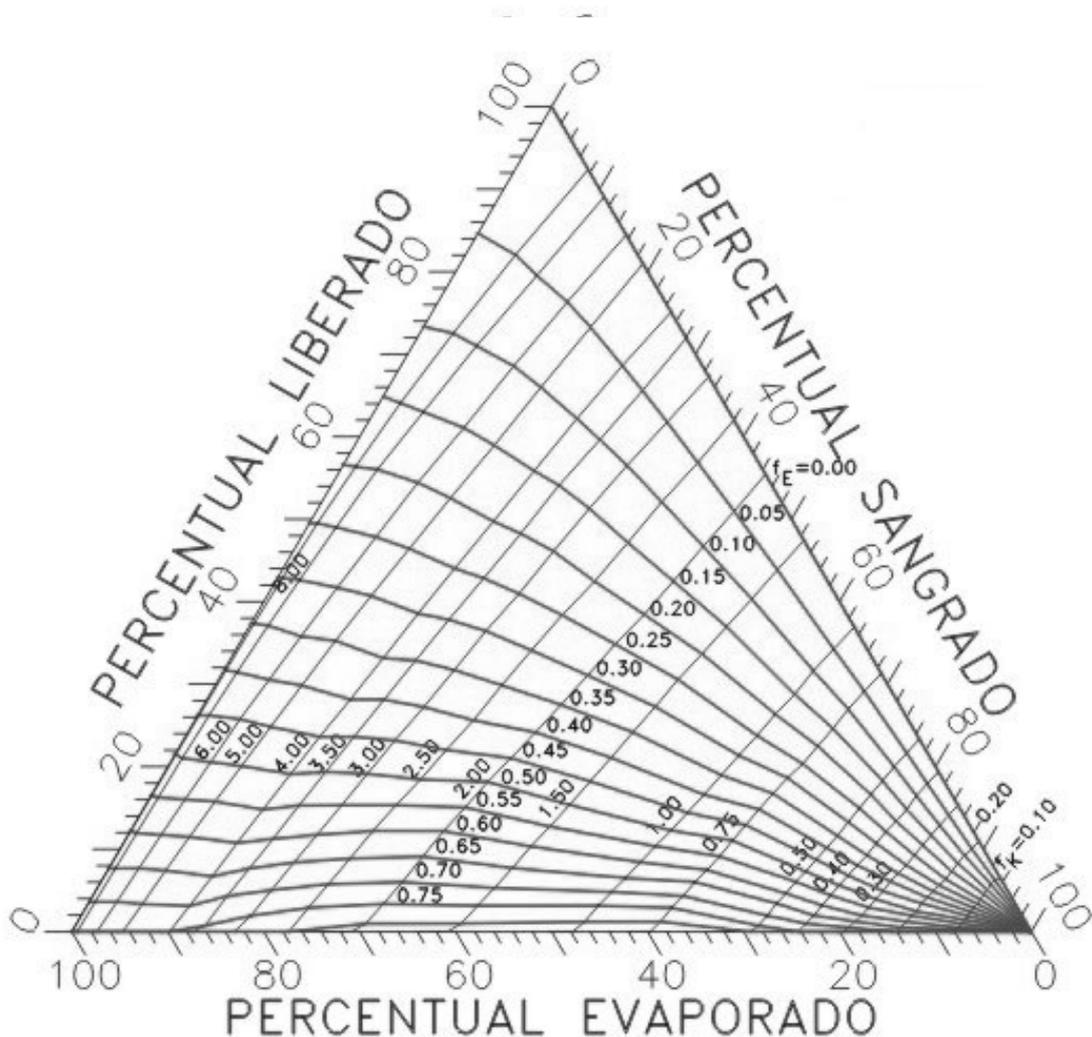


**Figura 1.** Pares de valores do fator adimensional de evaporação ( $f_E$ ) versus deflúvio médio afluente anual ( $\mu$ ) para os 40 açudes analisados na Bacia do Jaguaribe.

O baixo valor de  $r^2$  (0,48) se dá, principalmente, pela pequena quantidade de açudes de grande porte na amostra (apenas quatro com deflúvio médio anual superior a 200 hm³/ano). Contudo, é possível perceber uma tendência de decréscimo de  $f_E$  com o aumento de  $\mu$ .

### 3.1 – A ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS RESERVATÓRIOS ATRAVÉS DO DTR

A determinação da eficiência de cada reservatório (em termos de percentual de  $\mu$  liberado e evaporado) foi efetivada através do Diagrama Triangular de Regularização – DTR (Campos, 1996). Para fins de comparação, admitiu-se que todos os reservatórios têm um fator adimensional de capacidade ( $f_k$ ) igual a 1 (ou seja, têm capacidade de armazenamento igual aos seus respectivos volumes afluentes médios anuais) e coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV) igual a 1,2 (Figura 2). O nível de garantia suposto pelo DTR é de 90%.



**Figura 2.** Diagrama Triangular de Regularização para CV=1,2 (Campos, 1996)

Os valores de  $f_E$  de cada reservatório são os observados na Tabela 1. Os percentuais de  $\mu$  liberados, evaporados e sangrados por cada reservatório são os expostos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Percentuais liberado, evaporado e sangrado, considerando-se  $f_k=1$ ,  $CV=1,2$  e  $G=90\%$  para os 40 reservatórios analisados na Bacia do Jaguaribe

<b>Açude</b>	<b>% Liberado</b>	<b>% Evaporado</b>	<b>% Sangrado</b>
Nobre	11,18	32,72	56,11
Riacho Verde	19,41	22,55	58,05
Riacho dos Tanques	17,04	25,44	57,52
Quixabinha	24,64	16,21	59,15
R. dos Carneiros	26,63	13,83	59,54
Broco	18,67	23,45	57,88
Olho d'água	26,59	13,88	59,53
Thomas Osterne	25,85	14,76	59,39
Canafístula	18,68	23,43	57,89
Prazeres	30,89	8,75	60,36
Joaquim Távora	21,34	20,20	58,46
Emá	24,04	16,93	59,03
Ingazeiro	26,94	13,46	59,60
Rivaldo de Carvalho	19,51	22,42	58,07
São José II	25,66	14,99	59,35
Trapá II	30,13	9,66	60,21
Canoas	30,94	8,70	60,36
Lima Campos	20,49	21,23	58,28
Trici	28,12	12,05	59,83
Cedro	20,26	21,51	58,23
Boa Viagem	29,81	10,04	60,15
Poço de Barro	24,28	16,65	59,07
Cipoada	25,29	15,43	59,28
Favelas	25,25	15,48	59,27
Várzea do Boi	23,42	17,68	58,90
Poço da Pedra	28,98	11,02	60,00
Gomes	34,91	4,00	61,08
Patu	32,03	7,41	60,56
Trussu	29,91	9,92	60,17
Riacho do Sangue	28,66	11,41	59,94
Santo Antônio de Russas	26,16	14,39	59,45
Atalho II	32,32	7,07	60,62
Serafim Dias	24,66	16,19	59,15
Potiretama	37,50	0,97	61,53
Nova Floresta	33,28	5,93	60,79
Pedras Brancas	29,04	10,95	60,01
Vinícios Berredo	29,06	10,92	60,01
Fogareiro	33,08	6,17	60,76
Quixeramobim	31,80	7,67	60,52
Banabuiú	33,51	5,66	60,83
Orós	32,12	7,29	60,58

Para melhor análise dos dados, dividiu-se os reservatórios em classes, em função do volume médio afluente anual ( $\mu$ ). Os percentuais de  $\mu$  liberado, evaporado e sangrado, considerando-se o ponto médio de cada classe, são os observados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Percentuais liberado, evaporado e sangrado de cada classe de açude

Classe (hm <sup>3</sup> /ano)	Ponto médio da classe	% liberado	% evaporado	% sangrado
0 - 10	5	0,23	0,18	0,59
10 - 20	15	0,27	0,13	0,60
20 - 30	25	0,25	0,16	0,59
40 - 50	45	0,28	0,12	0,60
50 - 100	75	0,30	0,10	0,60
100 - 200	150	0,31	0,09	0,60
200 - 1.200	500	0,33	0,07	0,61

Observa-se claramente na Tabela 3 que, em média, os grandes reservatórios são mais eficientes que os pequenos, tanto em termos de percentual efetivamente liberado, quanto em termos de perdas por evaporação, ambos em relação aos seus deflúvios médios afluentes anuais ( $\mu$ ). Os pequenos reservatórios (com  $\mu$  até 10 hm<sup>3</sup>/ano) regularizam, em média, 23% de  $\mu$  e evaporam 18% de  $\mu$ . Os grandes reservatórios (com  $\mu$  entre 200 e 1.200 hm<sup>3</sup>/ano) têm um desempenho muito melhor: em termos médios, regularizam 33% de  $\mu$  e evaporam apenas 7% de  $\mu$ .

#### 4 - CONCLUSÃO

O fator adimensional de evaporação ( $f_E$ ) é um importante indicador da eficiência de regularização de um reservatório, pois engloba três importantes fatores intervenientes no processo de evaporação: o fator de forma do reservatório, o deflúvio médio afluente anual e a lâmina evaporada durante a estação seca. Em função da combinação destes três parâmetros, a escolha adequada dos locais onde implantar os açudes pode significar um acréscimo (ou decréscimo) substancial nas perdas globais por evaporação de uma bacia hidrográfica.

Os percentuais liberados e evaporados em cada reservatório são muito sensíveis às variações de  $f_E$ ; os percentuais sangrados, por sua vez, permanecem praticamente constantes, independentemente do  $f_E$ .

Pelas análises feitas neste trabalho, não se pode afirmar que reservatórios construídos em rios de vazões maiores são sempre mais eficientes; entretanto, é lícito dizer que existe uma tendência de que os reservatórios construídos em rios mais caudalosos sejam mais eficientes.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS J. N. B. (1987). A procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers under Evaporation Rate. Tese de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- CAMPOS J. N. B. (1996). Dimensionamento de Reservatórios: o Método do Diagrama Triangular de Regularização. Edições UFC.
- COÊLHO, P. P. (2000). Cálculo das Disponibilidades Hídricas de Pequenos Açudes no Estado do Ceará, Projeto de Final de Curso, Universidade Federal do Ceará.

COGERH (1999). Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe.

INEMET(1992). Normais Climatológicas (1961–1990). Instituto Nacional de Meteorologia.

MOLLE, F. e CADIER, E. (1992). Manual do Pequeno Açude. SUDENE/ORSTOM, Recife, Pe.