

# Incertezas nas Estimativas da Vazão Regularizada por um Reservatório

Ticiania M. de Carvalho Studart e José Nilson B. Campos

Depto. de Eng. Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici - Bloco 713  
60451-970 Fortaleza, CE - Fone: (85) 288-9623 - Fax: (85) 288-9627 - ticiania@ufc.br e nilson@ufc.br

Recebido: 13/11/00 - revisão: 20/06/01 - aceito: 26/07/01

## RESUMO

As incertezas inerentes ao comportamento aleatório das vazões naturais consistem em uma das maiores dificuldades com que o processo de alocação de águas se defronta. Tais incertezas não podem ser reduzidas, mas podem ser estudadas através de metodologias apropriadas, agregando informação valiosa ao planejamento de recursos hídricos.

Entendendo que o estudo das incertezas é etapa fundamental para o gerenciamento dos riscos no processo de outorga, o presente trabalho analisa, fazendo uso de ferramentas da hidrologia estocástica, os efeitos do volume inicial, da variabilidade das vazões naturais, da capacidade de armazenamento e do nível de garantia nas estimativas das vazões regularizadas por um reservatório isolado.

A análise abrange desde variabilidades características de rios de climas temperados ( $CV = 0,2$ ) até àquelas inerentes a rios do Semi-Árido ( $CV = 1,6$ ). Como estudo de caso é utilizado o Açude Caxitoré, localizado no Semi-Árido cearense; a validade do trabalho, no entanto, não se restringe unicamente ao local citado, uma vez que buscou-se o caráter geral ao adotar-se diferentes valores de capacidades para o reservatório e diferentes distribuições temporais dos influxos, estas últimas refletidas pelos diferentes coeficientes de variação assumidos para as vazões anuais, conservadas a média e a distribuição de probabilidades. Observa-se que reservatórios com influxos de alta variabilidade são muito sensíveis às condições iniciais assumidas na simulação.

**Palavras-chave:** incerteza; regularização; reservatório.

## O ESTUDO DAS INCERTEZAS

Incerteza é um termo difícil de definir, englobando múltiplas conceituações. A variedade de fontes de incertezas gera, sem dúvida, sérias confusões. O dicionário Aurélio mostra vários significados para o verbete "incerto": não certo, indeterminado, impreciso, duvidoso, aleatório, ambíguo, vago, inconstante e variável. O substantivo "incerteza" deriva dos conceitos acima descritos e pode ser sintetizado como "o estado (ou qualidade) de estar incerto".

Kundzewicz (1995) avalia que não existe consenso acerca do que significa realmente o termo "incerteza", o qual vem agregando em torno de si os mais variados significados e conotações, em função da formação daquele que o conceitua, os quais muitas vezes não são consistentes com seu significado coloquial.

No presente trabalho adota-se o conceito de "incerteza" proposto por Vieira (1997), o qual afirma que, no sentido mais amplo, "as incertezas são as fontes geradoras dos riscos".

## Tipos de incertezas

É importante distinguir claramente os diferentes tipos e fontes de incertezas, uma vez que os mesmos necessitam ser tratados de diferentes formas.

Vários autores na literatura têm analisado diferentes tipos de incerteza e feito várias distinções, tais como *objetivas* e *subjetivas*, *primárias* e *secundárias*, *naturais* e *tecnológicas*. As mais variadas classificações de tipos de incertezas podem ser encontradas em Morgan e Henrion (1993).

Segundo Kundzewicz (1995), os hidrólogos, de uma maneira geral, afirmam que já dominam as incertezas há muito tempo. E pondera que esta afirmação pode ser considerada verdadeira no sentido de reconhecer que os mesmos sempre foram obrigados a conviver com as incertezas e, por conseguinte, desenvolveram ferramentas para lidar com elas. A determinação da cheia máxima de  $T_r$  anos é um exemplo. Mas pergunta: *quão incertos são estes números?* Ou ainda, fazendo um trocadilho: *são confiáveis as estimativas de confiabilidade?*

Várias têm sido as tentativas de identificar os variados tipos de incertezas no campo da hidrologia e dos recursos hídricos. Plate e Duckstein (1987) identificaram os grupos de incertezas no dimensionamento hidráulico. Eles classificaram as incertezas em incertezas *hidrológicas*, incertezas *na amostragem* e incertezas *na função densidade de probabilidade escolhida*. Identificaram ainda as incertezas *hidráulicas*, as incertezas *no modelo* (equações empíricas) e incertezas *estruturais*, associadas ao material utilizado e o projeto estrutural.

Segundo Ganoulis (1994), as incertezas, de um modo geral, podem ser classificadas em dois grandes grupos: incertezas *aleatórias* (ou naturais) e incertezas *epistêmicas*. Diferentemente das incertezas naturais, as epistêmicas podem ser reduzidas pela coleta de mais informações ou pelo aperfeiçoamento do modelo matemático.

No caso específico de modelagem matemática de sistemas hidrológicos, Vincens et al. (1975) propuseram outra metodologia e classificaram as incertezas inerentes a estes estudos em três tipos: *Incertezas do Tipo I* - ocasionadas pelo desconhecimento do verdadeiro modelo que rege o processo natural; *Incertezas do Tipo II* - geradas na avaliação dos parâmetros dos modelos matemáticos e *Incertezas do Tipo III* - aquelas inerentes aos processos naturais.

**Incertezas do Tipo I** - As incertezas do Tipo I são de difícil avaliação, uma vez que todo modelo é, inevitavelmente, uma simplificação da realidade. Os fenômenos hidrológicos apresentam comportamento tão complexo que, mesmo modelos matemáticos detalhados não conseguem reproduzir, com exatidão, os processos naturais. Segundo Morgan e Henrion (1993), “todo modelo é, definitivamente, falso”, uma vez que mesmo quando o modelo resulta em boas aproximações de um sistema natural, em particular, ele nunca será completamente exato. Afirma ainda que, embora se possa determinar se um modelo é melhor que outro - no que se refere à precisão de suas previsões - não se pode dizer se ele é o mais provável. Desta forma, não se pode atribuir probabilidades a modelos.

**Incertezas do Tipo II** - Mesmo que a complexidade dos fenômenos hidrológicos pudesse ser fielmente reproduzida por um modelo, restaria ainda estimar os parâmetros da população, tais como média ( $\mu$ ) e variância ( $\sigma^2$ ), a partir da única informação disponível - a série histórica - e não se pode

esperar que, sendo as estimativas dos parâmetros populacionais feitos a partir de amostras relativamente pequenas, não contenham uma grande dose de incerteza.

Costuma-se admitir, em estudos hidrológicos, que séries de 30 anos de dados permitem a obtenção de resultados com a precisão aceitável. Campos et al. (1997) advertem que a validade desta assertiva depende da variabilidade do fenômeno em análise e mostra que, considerando que se 30 anos de dados sejam suficientes para um estudo de vazões no nordeste dos Estados Unidos, o qual apresenta, em termos médios, um  $CV_{def}$  da ordem de 0,25, para que se cometa o mesmo erro em um rio do nordeste Brasileiro, ou na Austrália, que apresentam  $CV_{def}$  próximos a 1,2, seria necessária uma série de medições de 690 anos.

**Incertezas do Tipo III** - As incertezas do Tipo III são aquelas inerentes aos processos naturais, e não podem ser reduzidas pelo uso de um modelo mais sofisticado ou pela coleta de mais informações. Elas não podem mudar e, assim, deve-se buscar conhecê-las e incorporá-las ao planejamento.

## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho, para a identificação e classificação das incertezas presentes no processo de armazenamento, é aquela proposta por Vincens et al. (1975). Não serão abordadas as incertezas do Tipo I, ocasionadas pelo desconhecimento do modelo matemático utilizado na avaliação, ou seja, considerar-se-á que as vazões afluentes anuais podem ser descritas pela distribuição de probabilidades Gama II. Não serão estudadas também as incertezas do Tipo II, geradas na avaliação dos parâmetros populacionais  $\mu$  e  $\sigma$  a partir da amostra, formada pela série histórica.

O presente trabalho focaliza, unicamente, as incertezas do Tipo III, causadas pela aleatoriedade das vazões naturais. Tais incertezas não podem ser reduzidas pela elaboração de um modelo matemático mais preciso ou pelo aumento da série de observações. Elas, simplesmente, existem.

Sendo a variabilidade das vazões naturais um aspecto determinante para o cálculo da vazão regularizada, as incertezas do Tipo III precisam ser incorporadas no planejamento em recursos hídricos e, para isto, precisam ser melhor conhecidas.

Para se determinar a vazão regularizada sob diferentes cenários e estudar, deste modo, a sua

variabilidade, utilizar-se-á o Método de Monte Carlo. Este método admite que os deflúvios naturais afluentes ao reservatório seguem uma determinada lei de distribuição de probabilidade, gera séries sintéticas de vazões e executa a operação simulada do reservatório (Yevjevich, 1972). A metodologia a ser adotada encontra-se detalhada nos itens que se seguem.

### Definições importantes

Visando propiciar um melhor entendimento do desenvolvimento metodológico, apresentam-se a conceituação e simbologia dos principais parâmetros e variáveis utilizadas. O entendimento desses termos é indispensável para compreensão do conteúdo exposto no restante do texto.

**Volume afluente médio anual ( $\mu$ )** - Representa o volume médio que anualmente escoia para o local do açude.

**Volume anual regularizado (M)** - É entendido como o volume programado para retirar anualmente do reservatório sempre que houver disponibilidade. Esse volume está associado a uma garantia. Ex:  $M_{90}$  significa que o volume anual regularizado tem 90% de garantia anual, isto é: existe disponibilidade para retirada desse volume em 90% dos anos.

**Garantia (G)** - Representa a probabilidade do reservatório prover sem restrições, em um ano qualquer, o volume anual regularizado (M). No presente texto as palavras garantia, nível de garantia e garantia anual são usadas para o mesmo significado.

**Frequência de falha ( $F_a$ )** - Representa a probabilidade do reservatório não dispor de um volume suficiente para atender à demanda M mais as perdas por evaporação a partir do lago. Esse valor representa o complemento percentual para 100% do nível de garantia anual. Ou seja, uma garantia de 90% corresponde a uma frequência de falha de 10%.

**Capacidade do reservatório (K)** - Representa o volume total acumulado no reservatório quando o nível da água encontra-se na cota da soleira do seu sangradouro.

**Fator adimensional de capacidade ( $f_k$ )** - Representa a razão entre a capacidade do reservatório (K) e o volume médio afluente anual ( $\mu$ ), como mostrado na Equação (1). O termo capacidade adimensional também é aplicado para o mesmo conceito.

$$f_k = K/\mu \quad (1)$$

**Fator de forma do reservatório ( $\alpha$ )** - A forma da bacia hidráulica do lago pode ser representada pela equação:

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

onde  $V(h)$  denota o volume da reserva quando a superfície do lago encontra-se na altura  $h$ ;  $h$  é medido em relação ao ponto mais profundo do açude, isto é:  $V(0) = 0$ . O adimensional  $\alpha$ , fator de forma, pode ser obtido a partir da regressão linear, passando pela origem, de  $V(h)$  vs  $h^3$ .

**Fator adimensional de evaporação ( $f_E$ )** - Obtido da equação adimensional do balanço hídrico (Campos, 1987), é definido conforme Equação (3), onde  $E_L$  representa a lâmina evaporada durante a estação seca.

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

**Fator adimensional de retirada ( $f_M$ )** - Representa a razão entre o volume regularizado (M) e o volume afluente médio anual ( $\mu$ ):

$$f_M = M/\mu \quad (4)$$

### Dados utilizados

No sentido de analisar a variabilidade das vazões regularizadas por um reservatório, sob diferentes cenários, selecionou-se um rio típico do Semi-Árido cearense: o rio Caxitoré, localizado no norte do Estado do Ceará. Embora este trabalho utilize dados de um reservatório em particular - o Açude Caxitoré - os resultados obtidos não são válidos unicamente para ele. Procurou-se dar o caráter geral ao adotar-se diferentes valores de capacidade e influxos, com a mesma média, mas distribuídos temporalmente de maneira diferente da real. Busca-se pois, o *universal* pelo *individual*.

**Vazões afluentes ao Açude Caxitoré** - O rio Caxitoré, um dos principais afluentes do rio Curu, apresenta um regime hidrológico típico dos rios cearenses: intermitente, com 90% do escoamento ocorrendo entre os meses de fevereiro a maio e grande variabilidade interanual.

O regime hidrológico do rio Caxitoré pode ser definido pelos parâmetros:

- Volume afluente médio anual ( $\mu$ ):  
126,3 hm<sup>3</sup>/ano;
- Desvio padrão dos deflúvios anuais ( $\sigma$ ):  
151,4 hm<sup>3</sup>/ano;
- Coeficiente de variação dos deflúvios anuais ( $CV_{def}$ ): 1,2.

**Precipitação** - Para a simulação do reservatório foi selecionado o posto Açude Caxitoré, em Pentecostes. A precipitação média anual é de 912 mm, distribuída ao longo dos meses conforme Tabela 1. Observa-se que o quadrimestre fevereiro/março/abril/maio corresponde a cerca de 78% do total médio precipitado em um ano, sendo o mês de março, em média, o de maior índice pluviométrico.

**Evaporação** - Foi considerado o posto de Sobral como característico das evaporações na bacia do rio Caxitoré. A evaporação média anual observada em evaporímetro Piché é de 1.840 mm, distribuída ao longo dos meses, segundo a Tabela 2. O trimestre setembro/outubro/novembro apresenta os maiores valores de evaporação, sendo o máximo em outubro (247,0 mm).

**Evaporação líquida no lago** - Os dados de evaporação líquida e dos coeficientes de distribuição das evaporações, utilizados nas simulações do reservatório Caxitoré foram retirados das Tabelas 1 e 2 e estão consolidados na Tabela 3.

**Açude Caxitoré** - É o terceiro maior açude da bacia do Curu, tendo capacidade de acumulação (K) de 202 milhões de metros cúbicos.

As relações cota x volume acumulado de água do Açude Caxitoré são apresentadas na Tabela 4.

### Operação simulada do reservatório

A capacidade de regularização de um reservatório pode ser analisada a partir da sua opera-

ção simulada, através da solução da equação do seu balanço hídrico, utilizando as séries de vazões afluentes ao mesmo.

São consideradas as seguintes premissas: 1) a unidade de tempo é um mês; 2) a retirada (M) do reservatório é constante ao longo dos anos e ao longo dos meses e; 3) a contribuição líquida sobre o lago - precipitação menos evaporação - é admitida constante ao longo dos anos, mas variável ao longo dos meses.

**Equação do balanço hídrico** - A determinação do comportamento de um reservatório é feita pela equação do balanço hídrico, que consiste em igualar as entradas e saídas do mesmo como se segue:

$$dV/dt = E - S \quad (5)$$

onde:  $dV/dt$  é a variação do volume ao longo do tempo; E é o resultado de todas as entradas no sistema, e S é o resultado de todas as saídas.

As entradas são compostas dos deflúvios afluentes e das precipitações diretas sobre o espelho d'água do lago; as saídas, por sua vez, são formadas pelas evaporações e pelas retiradas para fins utilitários. A equação do balanço hídrico usada neste modelo é dada pela Equação (6).

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) + I_i - M_i - S_i \quad (6)$$

onde:  $V_{i+1}$  e  $V_i$  representam os volumes de água estocados no reservatório no início dos meses  $i+1$  e  $i$  respectivamente;  $P_i$  a precipitação média sobre o espelho de água do açude durante o mês  $i$ ;  $E_i$  a lâmina média evaporada da superfície do lago durante o mês  $i$ ;  $A_{i+1}$  e  $A_i$  representam as áreas do lago do reservatório no início dos meses  $i+1$  e  $i$  respectivamente;  $I_i$  os volumes afluentes ao reservatório durante o mês  $i$ ;  $M_i$  a retirada do reservatório durante o mês  $i$ , e  $S_i$  o volume sangrado do reservatório.

Considerando-se um volume inicial  $V_0$ , simula-se, para uma garantia G, o reservatório a nível mensal para a respectiva série histórica de vazões durante H anos, onde H é a extensão da série de vazões. Inicialmente considera-se a retirada  $M = \min (K/2, \mu/2)$ . Ao final de cada ano é calculado se o volume anual armazenado é suficiente para atender a demanda (= retirada M); se não for, é considerado que naquele ano ocorreu uma falha.

No final dos H anos é verificado se a retirada M assumida inicialmente ( $\min (K/2, \mu/2)$ )

**Tabela 1. Precipitações médias mensais (em mm) no posto pluviométrico do Açude Caxitoré (Pentecostes).**

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
P <sub>i</sub>	66,8	121,4	235,8	212,8	143,5	58,1	40,4	6,1	4,6	5,2	5,5	18,5	918,0

Fonte: CEARÁ (1996).

**Tabela 2. Evaporação média (em mm) na estação de Sobral.**

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
E <sub>i</sub> (mm)	158,0	105,0	75,0	71,0	78,0	108,0	154,0	199,0	215,0	247,0	220,0	210,0	1.840,0

Fonte: DNMET (1992).

**Tabela 3. Evaporação líquida sobre o lago do Açude Caxitoré.**

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
E <sub>i</sub> (mm)	158,0	105,0	75,0	71,0	78,0	108,0	154,0	199,0	215,0	247,0	220,0	210,0	1.840,0
P <sub>i</sub> (mm)	66,8	121,4	235,1	212,8	143,5	58,1	40,4	6,1	4,6	5,2	5,5	18,5	918,0
E <sub>i</sub> -P <sub>i</sub> (mm)	91,2	-16,4	-160,1	-141,8	-65,5	49,9	113,6	192,9	210,4	241,8	214,5	191,5	922,0
e <sub>i</sub> =(E <sub>i</sub> -P <sub>i</sub> )/Σ (E <sub>i</sub> - P <sub>i</sub> )	0,10	-0,02	-0,17	-0,15	-0,07	0,05	0,12	0,21	0,23	0,26	0,23	0,21	1,00

**Tabela 4. Relações cota x volume acumulado x altura da água do Açude Caxitoré.**

Cotas (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Altura (m)	Cotas (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Altura (m)
50	0	0	70	140.000.000	20
55	10.000.000	5	75	240.000.000	25
60	25.000.000	10	80	385.000.000	30
65	65.000.000	15	-	-	-

Fonte: CEARÁ (1996).

corresponde à frequência de falhas pretendida. Caso seja superior, diminui-se a retirada, caso contrário, eleva-se a retirada e simula-se novamente o comportamento do reservatório para H anos e assim sucessivamente até que a retirada correspondente a uma frequência de falhas pretendida seja encontrada.

### Geração de séries sintéticas

Os rios intermitentes do nordeste brasileiro apresentam, como característica marcante, uma longa estação de vazões nulas após a curta estação úmida. Essas características fazem com que os deflúvios anuais sejam serialmente independentes e, que as séries de vazões anuais possam ser obtidas a partir da geração de números aleatórios seguindo uma função densidade de probabilidade (Campos, 1987). Segundo o mesmo autor, tanto a distribuição Gama como a Log-normal podem ser utilizadas,

sem que se possa afirmar qual das duas dá melhores resultados.

Neste trabalho foram geradas oito séries de 20.000 valores de vazões anuais afluentes ao Açude Caxitoré, seguindo uma distribuição Gamma II, cuja equação é:

$$P(x) = (\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}) / \Gamma(\alpha) \quad (7)$$

onde  $\Gamma(\alpha)$  é a Função Gamma e  $\alpha$  e  $\beta$ , os parâmetros da distribuição, calculados pelo método dos momentos a partir das Equações (8) e (9).

$$\mu = \alpha / \beta \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \alpha / \beta^2 \quad (9)$$

Conservou-se a média histórica ( $\mu = 126,3$  hm<sup>3</sup>/ano) e variou-se o coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV<sub>def</sub> entre 0,2 e 1,6).

## Desagregação dos deflúvios anuais

Considerando o objetivo de trabalhar a nível mensal, apresentou-se a necessidade de desagregar as vazões anuais em mensais.

Utilizou-se o Método dos Fragmentos, o qual produz vazões mensais por desagregação de vazões anuais pré-geradas por um modelo apropriado, no caso em questão, uma distribuição Gamma II. Este método encontra-se detalhado em Svanidze (1980) e, segundo Araújo (1991), produz bons resultados para os rios intermitentes do Semi-Árido nordestino. O uso dessa técnica supõe a existência de uma série histórica de vazões mensais - porém de curta duração - e visa aumentar as informações fluviométricas do posto. No presente trabalho, os duzentos valores de vazões anuais de cada série serão fragmentados pela série histórica do rio Caxitoré.

## O estudo do comportamento da vazão regularizada

Um reservatório superficial consiste em uma intervenção do homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões naturais dos rios aos padrões demandados pela sociedade.

A Figura 1 mostra o comportamento da vazão regularizada pelo Açude Caxitoré, considerando diferentes volumes iniciais assumidos para o reservatório e diferentes horizontes de simulação.

Considerando-se os demais parâmetros constantes observa-se que, embora inicialmente as condições iniciais tenham grande influência nos valores da vazão regularizada, com o passar do tempo esta influência vai se tornando cada vez mais tênue e, após um longo período o processo se estabiliza em uma condição de equilíbrio no qual a vazão regularizada independe do volume  $V_0$  assumido inicialmente e do horizonte de simulação.

Pode-se então considerar que o processo de armazenamento passa por dois estados distintos:

Estado transiente:

$$Q_r = f(\mu, \sigma, V_0, H, K, G, E, \alpha) \quad (10)$$

Estado de equilíbrio:

$$Q_r = f(\mu, \sigma, K, G, E, \alpha) \quad (11)$$

onde  $Q_r$  é a vazão a ser regularizada pelo reservatório em questão;  $\mu$  é a média dos deflúvios anuais

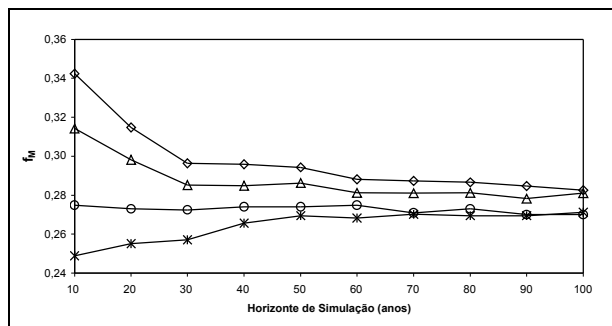


Figura 1. Exemplo do comportamento da vazão regularizada em função do horizonte de simulação (Açude Caxitoré - CE).

afluentos ao reservatório;  $\sigma$  é o desvio padrão dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório;  $V_0$  é o volume inicial assumido para o reservatório;  $H$  é o horizonte de planejamento (em anos);  $K$  é a capacidade do reservatório;  $G$  é a garantia (em %);  $E$  é a evaporação no reservatório, e  $\alpha$  é o fator de forma do reservatório.

Sabendo-se que o coeficiente de variação das séries dos deflúvios afluentes ao reservatório é dado por:

$$CV_{def} = \sigma / \mu \quad (12)$$

e utilizando-se os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ), de evaporação ( $f_E$ ) e de retirada ( $f_M$ ) definidos por Campos (1987), se terá que:

Estado Transiente

$$f_M = f(CV_{def}, G, f_K, f_E, V_0, H) \quad (13)$$

Estado de Equilíbrio

$$f_M = f(CV_{def}, G, f_K, f_E) \quad (14)$$

Como observado na Equação (13), no *estado transiente*, a vazão regularizada (representada pelo fator adimensional  $f_M$ ) é função de seis parâmetros; e só pode ser corretamente identificada ao se dizer, além do coeficiente de variação dos deflúvios naturais ( $CV_{def}$ ), da capacidade do reservatório (representada por  $f_K$ ), da evaporação sobre a superfície do lago (representada por  $f_E$ ) e da garantia ( $G$ ), o volume inicial assumido para o reservatório ( $V_0$ ) e o horizonte de simulação adotado ( $H$ ). A Equação (14) mostra que, no *estado de equilíbrio*, a vazão regularizada é função apenas dos quatro primeiros parâmetros citados.

**O valor a ser adotado para a vazão regularizada** - Para cada uma das oito séries de 20.000 anos de vazões mensais produzidas conforme relatado em item anterior - cada uma gerada com um determinado  $CV_{def}$  - foram formadas 200 séries de 10 anos, 200 séries de 20 anos, 200 séries de 30 anos, e assim sucessivamente, até 200 séries de 100 anos. Uma série de 5.000 anos também foi gerada para calcular a vazão regularizada no estado de equilíbrio.

O valor adotado para a vazão regularizada (aqui definida como uma fração da vazão média afluente -  $f_M$ ), para cada conjunto de simulações, é a média dos 200 valores de vazões regularizadas obtidas pela operação simulada do reservatório para cada cenário de  $CV_{def}$ ,  $f_K$ ,  $G$  e  $V_0$ .

### Os cenários analisados

A adoção de diferentes valores para os vários parâmetros intervenientes no processo de armazenamento permitirá analisar-se, além do comportamento da vazão regularizada - definida como a *média* dos 200 valores de cada simulação - a variabilidade da mesma, e conseqüentemente, as incertezas inerentes a cada cenário.

No presente trabalho adotar-se-ão os seguintes valores para os parâmetros  $V_0$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $CV_{def}$ ,  $V_0$ ,  $f_K$  e  $f_E$ :

- Garantia ( $G$ ): serão simulados três níveis de garantia ( $G = 85\%$ ,  $90\%$  e  $95\%$ );
- Horizonte de simulação ( $H$ ): serão adotados 11 horizontes de simulação ( $H = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$  e  $5.000$  anos). No caso de  $5.000$  anos, simular-se-á o processo de armazenamento no seu estado de equilíbrio;
- Coeficiente de variação dos deflúvios naturais ( $CV_{def}$ ): será analisado, além do  $CV_{def} = 1,2$ , qual seria o comportamento das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré, caso o CV dos deflúvios anuais afluentes ao mesmo assumissem valores entre  $0,2$  e  $1,6$ ;
- Volume inicial assumido para o reservatório ( $V_0$ ): serão simulados diversos valores de volume inicial: cheio ( $V_0 = K$ ), metade da capacidade ( $V_0 = K/2$ ), metade do volume médio afluente anual ( $V_0 = \mu/2$ ) e vazio ( $V_0 = 5\%K$ );

- Fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ): serão simulados quatro capacidades do reservatório ( $f_K = 1, 1,5, 2,0$  e  $2,5$ );
- Fator adimensional de evaporação ( $f_E$ ): neste estudo considerar-se-á as altas taxas de evaporação ocorridas na superfície do lago, entretanto, não se estudará a sua *variabilidade*, ou seja, adotar-se-á em todos os cenários, o mesmo valor de  $f_E$ , o qual corresponde àquele calculado para o Açude Caxitoré, nas suas condições reais.

**Estimativa do fator de forma da bacia hidráulica ( $\alpha$ ) do Açude Caxitoré** - Este fator é determinado na suposição que a equação da bacia hidráulica do reservatório pode ser representada pela Equação (2). Com os dados da Tabela 4, obtém-se, pelo método dos mínimos quadrados,  $\alpha = 14.259$ .

**Estimativa da evaporação durante a estação seca ( $E_L$ )** - Considera-se o período de *junho a janeiro* como representativo da estação sem escoamento superficial no rio Caxitoré. O valor da lâmina evaporada no lago ( $E_L$ ) neste período é de  $1,15$  metros.

Aplicando-se os valores de  $\alpha$ ,  $E_L$  e  $\mu$  na Equação (3), obtém-se  $f_E = 0,17$ .

### RESULTADOS

No sentido de verificar se para  $H = 5.000$  anos o processo de armazenamento já atingiu o seu estado de equilíbrio, ou seja, não mais depende das condições iniciais assumidas para o reservatório, geraram-se 20 séries de vazões afluentes com  $CV_{def} = 1,2$  (20 séries diferentes entre si, mas igualmente prováveis), e simulou-se o comportamento do reservatório, iniciando *cheio* e *vazio*, para cada série. Admitindo-se  $f_K = 1,5$  e  $G = 90\%$ , verificou-se a permanência dos valores das vazões regularizadas nas seguintes condições:

- para uma mesma série, com diferentes volumes iniciais;
- entre as várias séries, com a mesma condição inicial.

Observou-se que, considerando a mesma série com condições iniciais diametralmente opostas, a vazão regularizada (traduzida aqui pelo  $f_M$ ) assume praticamente o mesmo valor para o hori-

zonte de simulação de 5.000 anos, o que indica que, após esse tempo, o processo de armazenamento independe das condições iniciais assumidas para o reservatório. Considerando o conjunto das vinte simulações, para uma mesma condição inicial, verificou-se pouca variabilidade nas vazões regularizadas, apresentando um coeficiente de variação de 0,028 (Tabela 5).

Simulou-se ainda o reservatório sob as mesmas condições já descritas, mas com os deflúvios afluentes apresentando um coeficiente de variação de 0,2, ou seja, simulou-se o mesmo reservatório sob as condições de um clima temperado. Não foram necessárias muitas simulações para verificar a estabilidade do processo. As vazões regularizadas praticamente não variam, apresentando um coeficiente de variação igual a 0,0021 (Tabela 6).

Em virtude da permanência dos valores para condições iniciais distintas e dos baixos valores dos coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas para  $H = 5.000$  anos, tanto para climas semi-áridos ( $CV_{def} = 1,2$ ) como temperados ( $CV_{def} = 0,2$ ), pode-se considerar que 5.000 anos é um tempo suficientemente longo para que o processo seja considerado em seu estado de equilíbrio. Sendo assim, neste trabalho adotar-se-á como a vazão adimensional de equilíbrio ( $f_M^*$ ) a vazão regularizada encontrada através da simulação do reservatório para aquele horizonte de tempo.

### A influência do coeficiente de variação dos influxos

A capacidade de regularização de um reservatório é altamente influenciada pelo grau de variabilidade de suas vazões naturais. Para analisar como o processo de armazenamento é afetado por essa variabilidade, efetuou-se a operação simulada do reservatório Caxitoré, no estado de equilíbrio, considerando oito cenários de vazões afluentes, ou seja,  $CV_{def}$  variando de 0,2 a 1,6. Adotou-se  $f_K = 1,5$  e nível de garantia de 90%.

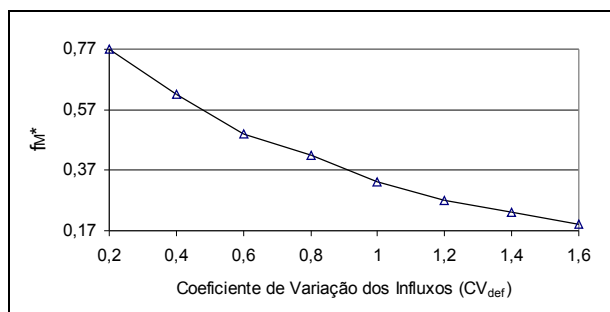
Observa-se claramente, na Figura 2, que reservatórios cujos influxos são menos variáveis (aqueles com menores valores de CV) regularizam maiores valores de vazão que aqueles que têm influxos mais variáveis (altos valores de CV). Para  $CV_{def} = 0,2$  o reservatório é capaz de regularizar 77% da vazão média afluente ( $\mu$ ); para  $CV_{def} = 0,4$ , este valor é de 62% $\mu$ ; para  $CV_{def} = 0,6$ , este valor

**Tabela 5. Vazão regularizada ( $f_M$ ) considerando  $CV_{def} = 1,2$ ,  $f_E = 0,17$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $G = 90\%$ ,  $H = 5.000$  anos e  $V_0 =$  cheio e vazio (20 simulações para cada condição de volume inicial).**

ch	vaz	ch	vaz	ch	vaz	ch	vaz
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,24	0,23	0,24	0,24	0,26	0,26	0,24	0,24
0,25	0,25	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
0,25	0,25	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26

**Tabela 6. Vazão regularizada ( $f_M$ ) considerando  $CV_{def} = 0,2$ ,  $f_E = 0,17$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $G = 90\%$ ,  $H = 5.000$  anos e  $V_0 =$  cheio e vazio (6 simulações para cada condição de volume inicial).**

Cheio	Vazio
0,7324	0,7324
0,7294	0,7294
0,7324	0,7324
0,7342	0,7342
0,7326	0,7326
0,7326	0,7326



**Figura 2. Influência do coeficiente de variação dos influxos ( $CV_{def}$ ) na vazão adimensional de equilíbrio ( $f_M^*$ ).**

reduz ainda mais, para 49% $\mu$ ; e assim sucessivamente, chegando a somente 19% $\mu$  quando os influxos naturais apresentam  $CV_{def}$  da ordem de 1,6.

### A variabilidade das vazões regularizadas em função de $CV_{def}$

A maior ou menor dispersão dos valores de vazão regularizada em torno de sua média é também bastante influenciada pela variabilidade de suas vazões naturais. A Tabela 7 mostra os valores



**Tabela 7. Coeficiente de variação das vazões regularizadas pelo Açude Caxitoré ( $CV_{reg}$ ), considerando  $f_K = 1,5$ ,  $f_E = 0,17$ ,  $G = 90\%$ , volume inicial = cheio e vazio e coeficiente de variação das vazões naturais variando entre 0,2 e 1,6.**

H	$CV_{def}=0,2$		$CV_{def}=0,4$		$CV_{def}=0,6$		$CV_{def}=0,8$		$CV_{def}=1,0$		$CV_{def}=1,2$		$CV_{def}=1,4$		$CV_{def}=1,6$	
	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio	cheio	vazio
10	0,06	0,08	0,15	0,16	0,17	0,26	0,20	0,38	0,26	0,50	0,28	0,52	0,34	0,75	0,36	0,82
20	0,04	0,08	0,11	0,13	0,13	0,15	0,16	0,22	0,20	0,27	0,23	0,36	0,26	0,42	0,31	0,50
30	0,04	0,05	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,18	0,17	0,21	0,21	0,26	0,23	0,35	0,26	0,36
40	0,03	0,04	0,08	0,09	0,10	0,10	0,12	0,14	0,16	0,19	0,18	0,21	0,21	0,27	0,23	0,27
50	0,03	0,03	0,07	0,08	0,10	0,10	0,10	0,12	0,13	0,16	0,17	0,19	0,20	0,22	0,20	0,24
60	0,03	0,03	0,06	0,07	0,08	0,08	0,11	0,11	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,21	0,19	0,21
70	0,02	0,03	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16	0,18	0,20
80	0,02	0,03	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,20
90	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,09	0,11	0,11	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,19
100	0,02	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,11	0,11	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16

do coeficiente de variação das séries de vazões regularizadas ( $CV_{reg}$ ) pelo reservatório Caxitoré, tendo, como influxo, vazões com diferentes graus de variabilidade. Independentemente do volume inicial e do horizonte de simulação assumidos, é tanto maior a variabilidade das vazões regularizadas (traduzida pelo coeficiente de variação) quanto maior for a variabilidade dos influxos.

### A influência do volume inicial

Para analisar como o processo de armazenamento é afetado pelo volume inicial sob diferentes cenários de vazões afluentes, efetuou-se a operação simulada do reservatório Caxitoré considerando-se  $CV_{def}$  variando de 0,2 a 1,6. Adotou-se  $f_K = 1,5$ , nível de garantia de 90%, condições iniciais “cheio” e “vazio” e horizontes de simulação entre 10 e 100 anos.

A Figura 3 mostra o comportamento da vazão regularizada (em termos de  $f_M$ ) apenas para três dos oito cenários estudados ( $CV_{def} = 0,2, 0,8$  e  $1,6$ ). As linhas com marcadores cheios representam os valores de  $f_M$  para a condição inicial “cheio”; as linhas com marcadores vazados representam os valores de  $f_M$  para a condição inicial “vazio”. As linhas pontilhadas fazem referência às vazões adimensionais de equilíbrio ( $f_M^*$ ) para cada cenário de  $CV$  dos deflúvios naturais ( $CV_{def}$ ).

Observa-se na Figura 3 que, para pequenos valores de coeficiente de variação dos influxos ( $CV_{def} = 0,2$ ), a vazão adimensional de equilíbrio é bastante próxima àquela regularizada quando se assume o reservatório inicialmente cheio. Para altos valores de coeficiente de variação dos influxos ( $CV_{def} = 1,6$ ), a vazão adimensional de equilíbrio está

mais próxima daquela regularizada ao se assumir o reservatório praticamente vazio.

### A variabilidade das vazões regularizadas em função do volume inicial

A função primordial de um reservatório é transformar influxos muito variáveis no tempo em vazões constantes (ou não muito variáveis). Para estudar a dispersão dos valores da vazão regularizada em torno de sua média, calculou-se o coeficiente de variação das séries obtidas pela operação simulada do reservatório ( $CV_{reg}$ ) para quatro cenários de volume inicial – cheio (K), metade de sua capacidade ( $K/2$ ), metade da vazão afluente ( $\mu/2$ ) e vazio (5%K). Considerou-se  $CV_{def} = 1,2$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $f_E = 0,17$  e  $G = 90\%$  (Tabela 8).

Observa-se na Tabela 8 que, independentemente da condição inicial assumida, os coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas ( $CV_{reg}$ ) decrescem com o tempo, assim como suas amplitudes, variando de valores situados entre 0,28 e 0,52 para horizonte de planejamento de 10 anos, para 0,13 no horizonte de 100 anos.

Embora, neste cenário, todos os valores convirjam para  $CV_{reg} = 0,13$  quando  $H = 100$  anos, observa-se que, na fase transiente do processo de armazenamento, a dispersão em torno da média (captada pelo  $CV_{reg}$ ) é menor quando o reservatório é assumido inicialmente cheio ( $CV_{reg} = 28\%$  para  $H = 10$  anos), dispersão esta que, para um mesmo H, vai aumentando a medida que se diminui o volume inicial.

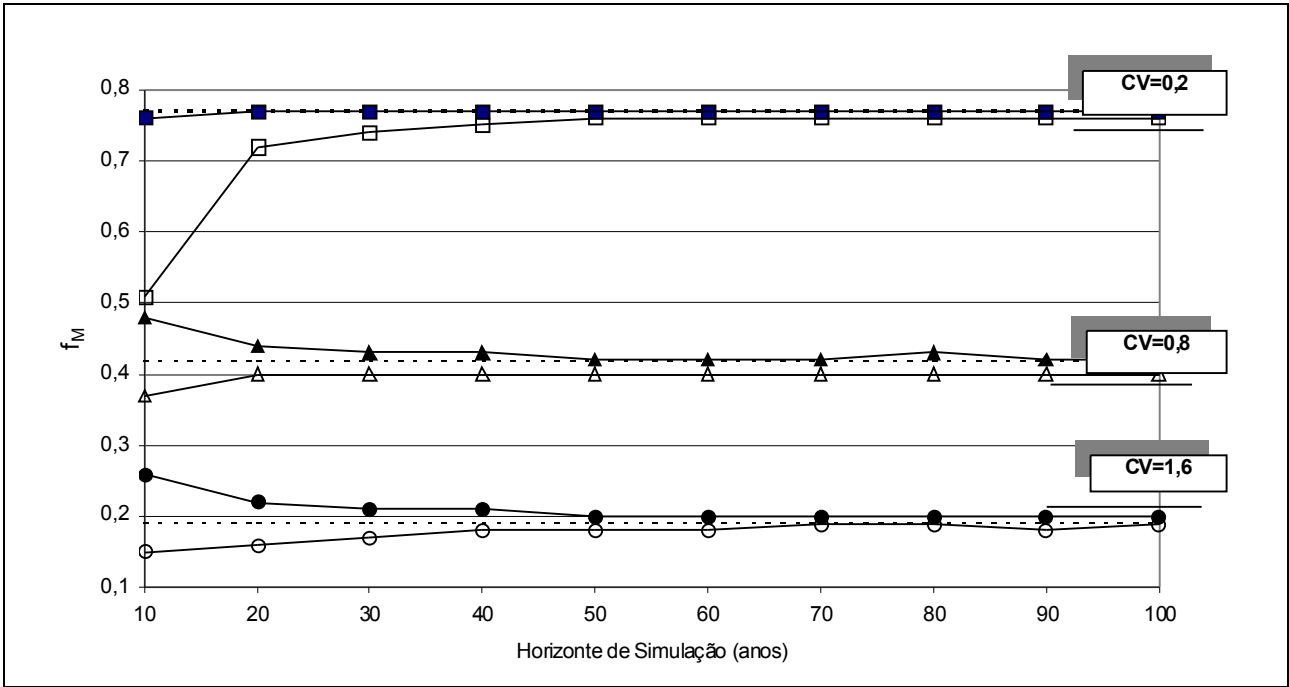


Figura 3. O efeito do coeficiente de variação dos influxos ( $CV_{def}$ ) na vazão regularizada ( $f_M$ ), considerando  $f_K = 1,5$ ,  $f_E = 0,17$ ,  $G = 90\%$ ,  $CV = 0,2, 0,8$  e  $1,6$ ,  $V_0 =$  cheio e vazio e  $H$  variando de 10 a 100 anos.

Ao adotar-se o reservatório inicialmente “vazio”, tem-se  $CV_{reg}$  da ordem de 52% (para  $H = 10$  anos). Isto indica que, para um mesmo  $H$ , a média das 200 simulações, assumida como o valor a ser adotado para a vazão regularizada naquele cenário, vai se tornando cada vez menos representativa a medida que se assume volumes iniciais cada vez menores.

O Açude Caxitoré, no cenário analisado ( $CV_{def} = 1,2$ ,  $f_E = 0,17$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $G = 90\%$ ) transformou os deflúvios afluentes, altamente variáveis - com  $CV_{def}$ s da ordem de 1,2 - em vazões regularizadas com menor variabilidade. Embora a variabilidade tenha sido sensivelmente reduzida, há que se considerar que coeficientes de variação ( $CV_{reg}$ ) da ordem de 0,21 a 0,26 (no caso de  $H = 30$  anos), embora pequenos, quando comparados ao valor anterior (1,2), são comparáveis a coeficientes de variação de precipitações em climas temperados (Tabela 9), ou seja, neste caso em particular, a variabilidade das vazões regularizadas para um horizonte de simulação de 30 anos é comparável à variabilidade das precipitações anuais em climas temperados.

A influência da capacidade do reservatório

Como era de se esperar, a vazão regularizada por um reservatório é influenciada pela sua

Tabela 8. Coeficiente de variação das séries de 200 valores de vazão regularizada ( $CV_{reg}$ ) para  $H$  variando de 10 a 100 anos e  $V_0 = K, K/2, \mu/2$  e  $5\%K$ , considerando-se  $CV_{def} = 1,2$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $f_E = 0,17$  e  $G = 90\%$ .

H anos	Volume Inicial ( $V_0$ )			
	K	K/2	$\mu/2$	5%K
10	0,28	0,29	0,32	0,52
20	0,23	0,24	0,25	0,36
30	0,21	0,21	0,22	0,26
40	0,18	0,18	0,18	0,21
50	0,17	0,17	0,17	0,19
60	0,16	0,16	0,16	0,17
70	0,15	0,15	0,15	0,16
80	0,14	0,14	0,14	0,15
90	0,14	0,14	0,15	0,15
100	0,13	0,13	0,13	0,13

Tabela 9. Coeficientes de variação de precipitações anuais em algumas localidades do Brasil.

Localidade	CV	Fonte
São Carlos - SP	0,21	Villela e Matos (1975)
Porto Alegre - RS	0,22	Lanna (1993)
Cariús - CE	0,38	SRH-CE
França - BA	0,41	Lanna (1993)

capacidade de acumulação. Para analisar esta influência no processo de armazenamento, simulou-se o Açude Caxitoré para duas diferentes capacidades –  $f_K = 1,0$  e  $f_K = 2,0$  – assumindo nível de garantia de 90%, volumes iniciais “cheio” e “vazio”. Considerando-se os influxos tendo diferentes graus de variabilidade –  $CV_{def} = 0,2$  (típicos de climas temperados) e  $CV_{def} = 1,2$  (típico dos rios do Ceará). Tomando-se como referência a vazão adimensional de equilíbrio ( $f_M^*$ ), quanto maior a capacidade, maior a vazão regularizada observada.

A Figura 4 mostra que, simulando o reservatório com influxos pouco variáveis ( $CV_{def} = 0,2$ ), ao duplicar-se a capacidade, passando de  $f_K = 1,0$

para  $f_K = 2,0$ , a vazão regularizada no estado de equilíbrio (linha pontilhada) sofre um acréscimo de aproximadamente 60%, ou seja, se antes regularizava 55% da vazão média afluyente ( $\mu$ ), passa a regularizar 87% de  $\mu$ . O mesmo ocorre com vazões naturais com  $CV_{def}$  da ordem de 1,2. Para  $f_K = 1,0$ , o reservatório regulariza 21% de  $\mu$ , passando a regularizar 33% de  $\mu$  quando  $f_K = 2,0$ , ou seja, um acréscimo de 57%.

Observa-se ainda na Figura 4 que, independentemente do grau de variabilidade dos influxos (traduzido pelo  $CV_{def}$ ), a medida em que se aumenta a capacidade do reservatório, as vazões regularizadas calculadas a partir de  $V_0 = \text{cheio}$  e

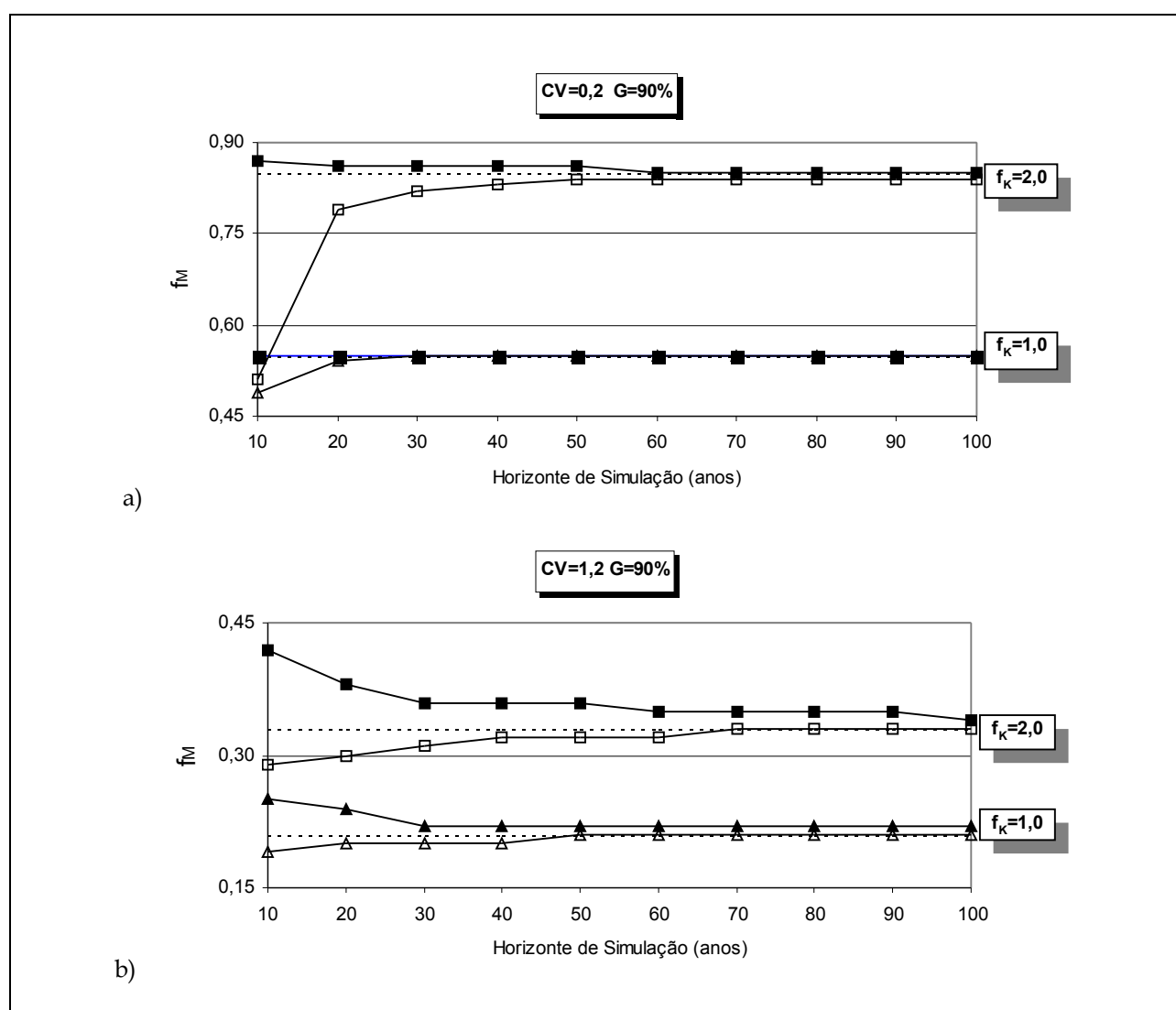


Figura 4. Efeito da capacidade do reservatório (traduzido por  $f_K$ ) na vazão regularizada pelo mesmo (traduzido por  $f_M$ ) assumindo  $G = 90\%$ ,  $f_K = 1,0$  e  $2,0$ ,  $f_E = 0,17$ , o reservatório inicialmente cheio (marcador preenchido), vazio (marcador vazado) e na sua condição de equilíbrio (linha tracejada) e coeficiente de variação dos influxos igual a a)  $CV_{def} = 0,2$  e b)  $CV_{def} = 1,2$ .

$V_0$  = vazio se afastam da vazão adimensional de equilíbrio, para um dado horizonte de simulação. Este comportamento, não obstante seja observado para ambos os volumes iniciais adotados, é mais acentuado ao adotar-se, para  $CV_{def} = 0,2$ ,  $V_0$  = vazio e para  $CV_{def} = 1,2$ ,  $V_0$  = cheio.

### A variabilidade das vazões regularizadas em função de $f_K$

A capacidade do reservatório também influencia a variabilidade das vazões regularizadas ( $CV_{reg}$ ), embora esta influência não se faça sentir tão fortemente como nos casos do volume inicial assumido para o reservatório e coeficientes de variação dos influxos. Esta tendência é melhor observada para altos valores de  $CV_{def}$ .

### A influência da garantia

Considerando-se os demais parâmetros constantes ( $CV_{def} = 1,2$ ,  $f_K = 1,0$ ,  $f_E = 0,17$  e  $V_0$  = cheio), estudou-se o comportamento da vazão regularizada para três níveis de Garantia - 85, 90 e 95%, utilizando horizontes de simulação iguais a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 e 5.000 anos.

Observa-se na Figura 5 que, independentemente do horizonte de simulação assumido, a vazão regularizada decresce com a garantia, o que já era de se esperar, uma vez que a frequência de falhas tende a diminuir quando se reduz o volume de água retirado do lago. Considerando-se apenas a vazão adimensional de equilíbrio verifica-se que quando se aumenta o nível de garantia de 85% para 95%, a vazão regularizada pelo reservatório decresce de 31% para 24% da vazão média anual afluente ao reservatório ( $\mu$ ), ou seja, há uma redução de 22,6% na vazão regularizada.

### A variabilidade das vazões regularizadas em função de G

Ao analisar-se o comportamento dos coeficientes de variação das vazões regularizadas ( $CV_{reg}$ ), observa-se que os mesmos têm comportamento contrário ao da vazão regularizada ( $f_M$ ), ou seja, independentemente do horizonte de simulação, a variabilidade das vazões regularizadas tende a aumentar com o aumento da garantia. Não se deve concluir erroneamente que os riscos de não

**Tabela 10. Valores dos coeficientes de variação das séries de vazões regularizadas ( $CV_{reg}$ ), considerando  $CV_{def} = 1,2$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $f_E = 0,17$ ,  $V_0$  = cheio e G variando entre 85, 90 e 95%.**

H anos	Garantia (%)		
	85	90	95
10	0,29	0,28	0,28
20	0,21	0,23	0,26
30	0,20	0,21	0,23
40	0,17	0,18	0,21
50	0,16	0,17	0,20
60	0,15	0,16	0,18
70	0,14	0,15	0,17
80	0,13	0,14	0,16
90	0,13	0,14	0,16
100	0,12	0,13	0,15

se obter a vazão regularizada de projeto aumentam com o acréscimo do nível de garantia - obviamente um paradoxo.

A maior dispersão dos valores em torno da média observadas nas séries com altos valores de  $CV_{def}$  (Tabela 10) indicam apenas que, para maiores níveis de Garantia, são necessárias séries mais longas.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo das incertezas na determinação das vazões regularizadas causadas pela aleatoriedade dos deflúvios naturais foi o principal objetivo deste estudo.

Os ensaios numéricos realizados neste trabalho permitiram constatações a respeito da influência, na vazão regularizada por um reservatório, de parâmetros tais como *volume inicial assumido no início da simulação* ( $V_0$ ), *capacidade do reservatório* ( $f_K$ ), *nível de garantia assumido* (G) e *variabilidade das vazões naturais* ( $CV_{def}$ ). Observou-se que a influência dos três primeiros parâmetros é modulada pelos valores assumidos pelo quarto parâmetro.

No intuito de gerar recomendações de ordem prática no que se refere ao volume inicial a ser adotado no início da simulação, optou-se por sintetizar, em função da variabilidade das vazões afluente ao reservatório ( $CV_{def}$ ), os resultados obtidos neste trabalho.

Considerando-se  $G = 90\%$  e oito cenários de  $CV_{def} = 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4$  e  $1,6$  - observou-se três padrões distintos de comportamento do

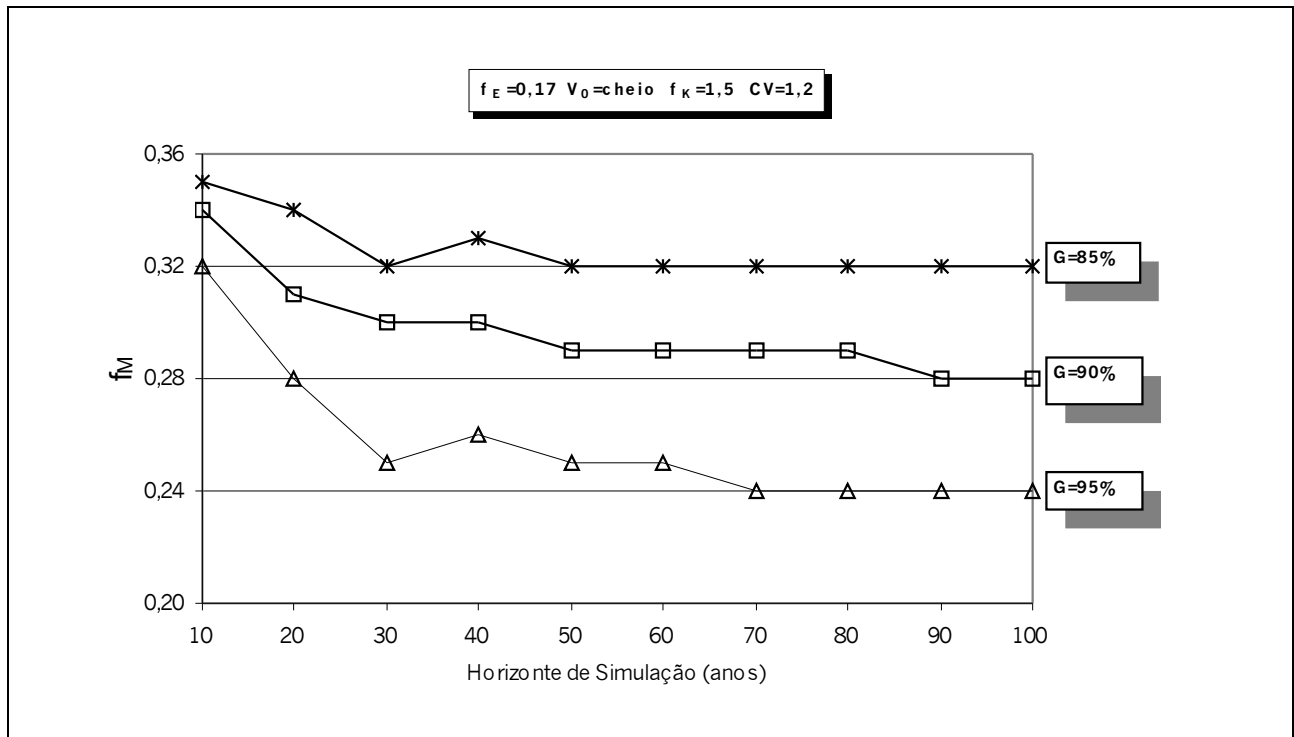


Figura 5. O efeito da Garantia na vazão regularizada ( $f_M$ ) considerando  $f_E = 0,17$ ,  $f_K = 1,5$ ,  $CV_{def} = 1,2$ ,  $V_0 = \text{cheio}$  e  $G = 85\%$ ,  $90\%$  e  $95\%$ .

processo de armazenamento quanto às influências do volume inicial ( $V_0$ ) e da capacidade do reservatório ( $f_K$ ):

- i.  $CV_{def} = 0,2$  - Observou-se que o processo de armazenamento é *pouco sensível* ao volume inicial, ou seja, ao assumir-se valores distintos para este parâmetro, e independentemente do  $f_K$  adotado para o reservatório, o fator adimensional de retirada, para qualquer horizonte de simulação ( $H$ ), pode ser considerado como sendo a própria vazão adimensional de equilíbrio ( $f_M^*$ ). Mesmo ao considerar-se  $V_0 = \text{vazio}$ , o processo de armazenamento converge para a condição de equilíbrio em  $H = 30$  anos. Ou seja, para reservatórios cujas vazões afluentes têm variabilidade desta ordem, qualquer valor de  $V_0$  resultará na vazão regularizada no estado de equilíbrio. Entretanto, recomendar-se-ia a adoção de  $V_0 = \text{cheio}$ , em função da menor variabilidade das séries de vazões regularizadas ( $CV_{reg}$ ) para este volume inicial;
- ii.  $CV_{def} = 0,4$  a  $0,6$  - Observou-se que o processo de armazenamento tem um comportamento considerado como sendo de

*transição*. Para  $f_K = 1,0$  e  $1,5$ , o mesmo apresentou comportamento semelhante ao anteriormente descrito, ou seja, pouco sensível a  $V_0$ . Para maiores valores de  $f_K$ , no entanto, a vazão de equilíbrio é rapidamente atingida ao adotar-se  $V_0$  entre 20% e 50% da capacidade do reservatório, sendo estes os valores recomendados por este estudo;

- iii.  $CV_{def} = 0,8$  a  $1,6$  - O processo de armazenamento se mostrou  *muito sensível* ao volume inicial. Após inúmeras simulações, observou-se que a vazão regularizada ( $f_M$ ) obtida - para quaisquer valores de horizonte de simulação ( $H$ ) e capacidade do reservatório ( $f_K$ ) - pode ser considerada igual à vazão adimensional de equilíbrio ( $f_M^*$ ) ao adotar-se  $V_0$  igual a 15% da capacidade do reservatório.

Conclui-se, portanto, que o volume inicial no qual o processo de armazenamento converge mais rapidamente para às condições de equilíbrio não é fixo em 50% da capacidade do reservatório, conforme defendido por Jeng (1967). Pelo contrário, este parâmetro varia de 100% a 15% da capacidade, conforme a variabilidade das vazões naturais e da capacidade do reservatório.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. K. (1991). *Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios*. Fortaleza, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (Dissertação de Mestrado).
- CAMPOS, J. N. B. (1987). *A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate*. Fort Collins, Colorado State University. PhD thesis.
- CAMPOS, J. N. B.; SOUZA Fº, F. A. e ARAÚJO, J. C. (1997). Errors and Variability of Reservoir Yield Estimation as a Function of the Coefficient of Variation of Annual Inflows. In: *Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance. Proceedings of 27th IARH Congress*, San Francisco, USA.
- CEARÁ (1996). *Plano Diretor da Bacia do Curu*. Volume I, Tomo 2. COGERH/Secretaria de Recursos Hídricos.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - DNMET (1992). *Normais Climatológicas (1961-1990)*. Secretaria Nacional de Irrigação, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária.
- GANOULIS, J. G. (1994). *Engineering Risk Analysis of Water Pollution*. VCH Publishers Inc., New York, NY.
- JENG, R. I. (1967). *Time-Dependent Solutions for Water Storage Problem*. Ph.D. Dissertation, Fort Collins, Colorado State University, USA.
- KUNDZEWICZ, Z. W. (1995). Hydrological Uncertainty in Perspective. In: KUNDZEWICZ, Z. W. (Ed.), *New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources*. International Hydrology Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- LANNA, A. E. (1993). Elementos de Estatística e Probabilidade. In: TUCCI, C. E. M. (organizador). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. ABRH, Porto Alegre.
- MORGAN, M. G. e HENRION, M. (1993). *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press, New York.
- PLATE, E. J. e DUCKSTEIN, I. (1987). Reliability in Hydraulics Design. In: DUCKSTEIN, L. & PLATE, E. J. (Eds), *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*, NATO ASI Series, Serie E: Applied Sci., No. 124, Nijhoff, Dordrecht, Netherlands.
- SVANIDZE, G. G. (1980). *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. Water resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA.
- VIEIRA, V. P. P. B. (1997). *Análise de Risco Aplicada a Recursos Hídricos*. Notas de Aula. Curso de Doutorado em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- VILELA, S. M. e MATTOS, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill.
- VINCENS, G. J., I. RODRIGUES-ITURBE e J. C. SHAAKE (1975). *A Bayesian Framework for the use of Regional Information in Hydrology*. Res.,11(3). p. 405-4114, 1975.
- YEVJEVICH, V. (1972). *Stochastic Processes in Hydrology*. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado.

## Uncertainties in Reservoir Yield Estimates

### ABSTRACT

*The uncertainty inherent to the random behavior of natural discharges is the major difficulty faced in water rights allocation. Such uncertainties cannot be reduced, but can be studied, adding valuable knowledge to water resources planning.*

*Considering that the study of the uncertainties is essential for risk management, this paper intends to analyze the effects of reservoir initial storage, coefficient of variation of annual inflows, reservoir capacity, time horizon adopted in simulation and reliability of the annual reservoir yield estimates using stochastic hydrological tools.*

*A broad spectrum of coefficient of variation of natural discharges is used, ranging from CV=0.2 (for perennial rivers) to CV=1.6 (for intermittent rivers). Caxitoré Dam, located in the semi-arid region of Ceará is used as a case study. The results obtained, however, are not only limited to it, since different values were adopted for capacity and temporal distribution of annual discharges. The mean and the probability distribution of its annual inflows were preserved. It was found that reservoir yields are highly influenced by the initial conditions for rivers with a high coefficient of variation.*

*Key-words: uncertainty; yield; reservoir.*