

DETERMINAÇÃO DAS PERDAS POR EVAPORAÇÃO NA REGIONALIZAÇÃO DA CURVA DE REGULARIZAÇÃO

Diogo Costa Buarque¹ & Carlos E. M. Tucci²

RESUMO - A regionalização permite estimar as variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com poucos dados. Uma das aplicações da técnica da é a regionalização da curva de regularização de vazões em reservatórios. Segundo Tucci (2002), na regionalização da curva de regularização as perdas por evaporação podem ser desprezadas no balanço hídrico e adotadas como demandas do reservatório, obtidas utilizando uma área correspondente à 2/3 da área máxima do reservatório e a evaporação média anual da região. Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização do fator $f = 2/3$ na determinação dessas perdas e procurar atribuir valores de f , em função da área máxima do reservatório que possam melhor mensurar tais perdas em reservatórios com diferentes formas. Para tanto, foram definidos seis reservatórios hipotéticos de acordo com as classificações apresentadas por Campos (2002), cada um com volume máximo de 1000 hm³ e áreas máximas de 10 a 500 km², totalizando um subconjunto de 24 reservatórios os quais foram considerados pertencentes à bacia do rio Apodí-Mossoró, localizada no Estado do Rio Grande do Norte. Verificou-se que o fator adotado por Tucci (2002) geralmente superestima as perdas por evaporação, principalmente em reservatórios com grandes áreas máximas. Foi possível estabelecer seis equações que relacionam o fator f com as áreas máximas dos reservatórios e determinar curvas de regularização com perdas, uma para cada classe de reservatório hipotético. A metodologia proposta foi avaliada com base nos dados de dois reservatórios pertencentes à bacia do rio Apodí-Mossoró: açude Pau dos Ferros e açude Santa Cruz, apresentando resultados satisfatórios.

ABSTRACT – One application of regionalisation is regionalisation of the reservoir regularization curve. Tucci (2002) shows that when regionalising the regularization curve, losses from evaporation can be discarded from water balance calculations and can be considered as reservoir demand, obtained using a corresponding area of 2/3 of the maximum area of the reservoir and the annual average evaporation of the region. The objective of this work is to evaluate the use of the factor $f = 2/3$ in the determination of these evaporation losses and to propose values of f , as function of the maximum area of the reservoir, that can better predict such losses in reservoirs with different forms. For this purpose, six hypothetical reservoirs were defined in accordance with the classification of Campos (2002), with maximum volume of 1000 hm³ and maximum areas range from 10 to 500 km², giving a total of 24 reservoirs which were regarded as belonging to the basin of the Apodí-Mossoró river, located in the State of Rio Grande do Norte, Brazil. It was verified that the factor given by Tucci (2002) generally overestimates the losses from evaporation, mainly in reservoirs with large maximum areas. Six equations were established which related the factor f to the maximum areas of the reservoirs, and curves of regularization were determined taking account of the losses, one for each class of hypothetical reservoir. The proposed methodology was evaluated using data from two reservoirs within the basin of the Apodí-Mossoró river: Pau dos Ferros and Santa Cruz dams, presenting satisfactory results.

Palavras-chave: Curva de regularização, regionalização, perdas por evaporação.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas –IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Caixa Postal 1502991501-970 Porto Alegre, RS – diogo.buarque@gmail.com .

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Caixa Postal 1502991501-970 Porto Alegre, RS – carlos.tucci@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios em hidrologia é o de conhecer adequadamente o comportamento dos processos hidrológicos. No Brasil, as redes de observações hidroclimatológicas não conseguem abstrair todas as informações contidas nos processos heterogêneos das bacias hidrográficas.

A regionalização em hidrologia permite obter informações hidrológicas em locais sem dados ou com poucos dados, possibilitando o aprimoramento de rede de coleta de dados hidrológicos (Tucci, 2002).

Com a regionalização, pode-se obter o resultado de funções hidrológicas utilizadas no gerenciamento dos recursos hídricos. Dentre as diversas aplicações das técnicas de regionalização, encontra-se a regionalização das curvas de regularização de vazão. A regularização de vazões através de reservatórios é uma prática bastante utilizada para diferentes usos da água, buscando regularizar a variação sazonal encontrada nos escoamentos em rios.

A curva de regularização relaciona vazão regularizável Q_{reg} , associada a uma determinada garantia de atendimento p , com o volume de regularização V necessário para garantir a vazão o qual depende, conseqüentemente, de como a demanda será solicitada durante o tempo. Esta relação pode ser expressa por:

$$V = F(Q_{reg}, p) \quad (1)$$

O volume necessário para regularizar uma determinada vazão com um certo nível de garantia associado é obtido através do balanço hídrico do reservatório ao longo de uma série de vazões naturais por:

$$S_{t+1} = S_t + (Q_t - q_t) \cdot \Delta t + (P_t - E_t) \cdot A \quad (2)$$

onde S_{t+1} e S_t são os armazenamentos nos instantes $t+1$ e t (m^3); Q_t é a vazão de entrada (m^3/s); P_t é a precipitação no período (mm); E_t é a evaporação (mm); A é a área do reservatório (km^2); q_t é a demanda total dada pela soma entre a demanda consuntiva do rio, d_{cons} , e a vazão que escoar para jusante, q_j , (m^3/s), e k é um fator de conversão de unidades dado por $k = 10^3 (m^3/mm \cdot km^2)$.

Durante a fase de planejamento procura-se fazer apenas uma avaliação preliminar das condições de regularização de um rio. Nesta fase geralmente não há informações sobre a topobatimetria do reservatório, uma vez que como o local ainda não foi escolhido, não se justifica o levantamento topográfico em todos os locais de interesse. Assim, como a evaporação depende da topobatimetria do reservatório, na regionalização da curva de regularização Tucci (2002) apresenta um método simplificado onde as perdas por evaporação no reservatório são desprezadas, em nível

de planejamento, no balanço hídrico e consideradas como demanda adicional do reservatório. Neste caso a equação 2 fica:

$$S_{t+1} = S_t + (Q_t - q_t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

e as perdas por evaporação passam a ser obtida pela expressão

$$E_p = E \cdot (f \cdot A_{\text{máx}}) \cdot k \quad (4)$$

onde E é a evaporação, $A_{\text{máx}}$ é a área máxima do reservatório e f um fator adotado pelo autor como 2/3.

Este estudo procura verificar a validade do fator f adotado por Tucci (2002), que considera uma área correspondente a 2/3 da área máxima no cálculo das perdas por evaporação em reservatórios. Este fator geralmente superdimensiona os volumes necessários para regularizar uma determinada vazão, comparado com os resultados obtidos pelo balanço hídrico, à medida que a área máxima do reservatório aumenta.

Assim, este estudo também procura atribuir novos valores de f em função da área máxima do reservatório, àquela correspondente ao seu armazenamento máximo, que possam melhor mensurar tais perdas em reservatórios com diferentes geometrias de acordo com as classificações de Campos (2002).

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho foi necessário inicialmente obter uma amostra de reservatórios com diferentes características geométricas. Como não se dispunha de tais amostras a priori, buscou-se utilizar reservatórios hipotéticos com diferentes formas de abertura.

Hankanson (apud Campos, 2002), baseado nas curvas hipsográficas área vs. profundidade, propôs 5 classes de reservatórios em função das suas formas geométricas: muito convexo, convexo, ligeiramente convexo, linear e côncavo, conforme figura 1.

Campos (2002) utilizou uma amostra de 31 reservatórios situados no Estado do Ceará e adaptou a classificação de Hankanson para outra baseada nas curvas hipsográficas volume vs. profundidade (figura 2).

Utilizando-se as duas classificações, de Hankanson e de Campos, foi possível selecionar 6 reservatórios hipotéticos, cada um enquadrando-se à correspondente curva hipsográfica área vs. profundidade e volume vs. profundidade limítrofe de duas classes, apresentados na tabela 1. Como as curvas de classificação são dadas em percentagens de profundidade, área e volume, para este trabalho adotou-se o volume máximo de 1000 hm³ e, para cada reservatório individualmente, áreas

máximas da superfície líquida de 10, 50, 100 e 500 km². Com isso, criou-se um subconjunto de 24 reservatórios hipotéticos, com suas respectivas curvas área vs. profundidade vs. volume.

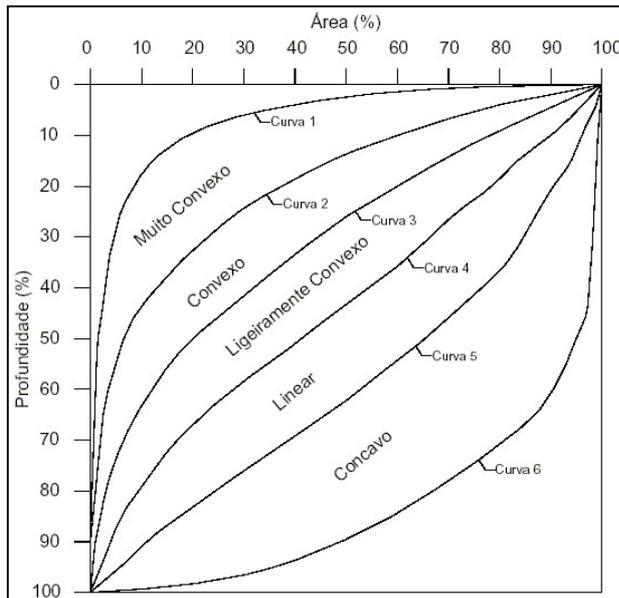


Figura 1. Classificação de Hankanson para a forma de um lago, baseada na curva área vs. profundidade (Campos, 2002).

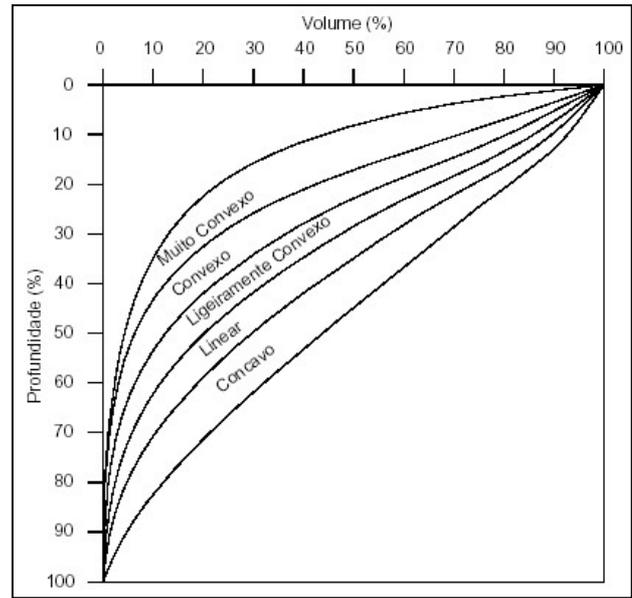


Figura 2. Classificação de Campos (2002) para a forma de um lago, baseada na curva volume vs. profundidade.

Os seis reservatórios hipotéticos apresentados na tabela 1 foram considerados pertencentes à bacia do rio Apodí Mossoró, localizada no Estado do Rio Grande do Norte. Tal consideração foi possível devido à disponibilidade de dados de vazão, precipitação e evaporação, além de dispor de informações de açudes pertencentes à bacia que puderam ser utilizados para verificar o método proposto.

Tabela 1. Definição dos reservatórios hipotéticos.

Reservatório Hipotético	Simbologia
Muito Convexo	MCVX
Muito Convexo – Convexo	MCVX – CVX
Convexo – Ligeiramente Convexo	CVX – LCVX
Ligeiramente Convexo – Linear	LCVX – L
Linear – Côncavo	L – CC
Côncavo	CC

2.1. Curva adimensional de regularização

Considerando a evaporação como uma demanda do reservatório e adimensionalizando a equação 3 utilizando a vazão média de longo período e o intervalo de tempo, temos:

$$\frac{S_{t+1}}{Q_m \cdot \Delta t} = \frac{S_t}{Q_m \cdot \Delta t} + \frac{Q_t}{Q_m} - \frac{q_t}{Q_m} \quad (5)$$

A determinação da curva adimensional de regularização, sem considerar as perdas por evaporação, foi obtida considerando que para cada demanda adotada determina-se o volume a ser armazenado necessário para atender esta demanda em 100 % do tempo.

2.2. Perdas por evaporação

A princípio, as perdas por evaporação foram consideradas utilizando dois métodos: método do balanço hídrico e método simplificado. O método do balanço hídrico utiliza a equação 2 tendo como entrada os dados da curva de regularização sem perdas, das curvas que relacionam área e volume do reservatório, apresentadas por Campos et al. (2002), os dados de precipitação e de vazão, além dos dados reais de evaporação local. O método simplificado foi apresentado por Tucci (2002) e considera a evaporação como uma demanda do reservatório com as perdas obtidas pela equação 4, considerando $f = 2/3$.

De posse das curvas de regularização sem perdas e com perdas de cada reservatório, calculou-se valores de f para cada ponto das curvas, buscando aproximar as curvas sem perdas daquelas com perdas obtidas pelo balanço hídrico. Com isso, buscaram-se valores de f que proporcionassem a determinação das perdas em função da forma geométrica do reservatório e da sua área máxima.

Com os valores de f calculados para cada ponto das curvas de regularização, propôs-se um método de determinação das perdas por evaporação utilizando os valores obtidos e: (1) obteve-se curvas de regularização considerando a média dos fatores obtidos para cada reservatório; (2) obteve-se curvas de regularização considerando uma equação para o fator f em função das áreas máximas adotadas para cada reservatório, ou seja, para cada reservatório ajustou-se uma função ao gráfico de Área X Fator médio.

3. RESULTADOS

Os dados pluviométricos utilizados no estudo são provenientes do posto Pau dos Ferros, com área de drenagem de 2.050 km², localizado na bacia do rio Apodí-Mossoró pertencente ao Estado do Rio Grande do Norte. A bacia do rio Apodí-Mossoró possui área de 14.276 km². Foram utilizados dados mensais deste posto no período de janeiro de 1986 a dezembro de 1997, apresentados na figura 3. A precipitação média anual espacial na área de contribuição deste posto foi obtida por Medeiros (2002), sendo igual a 817,5 mm.

Para os dados de vazão foi utilizado o posto fluviométrico de Pau dos Ferros, também localizado na bacia do rio Apodí-Mossoró. O período da série utilizada foi o mesmo dos dados de precipitação, janeiro de 1986 a dezembro de 1997, com vazão média de 2,274 m³/s. A figura 4 apresenta tais dados.

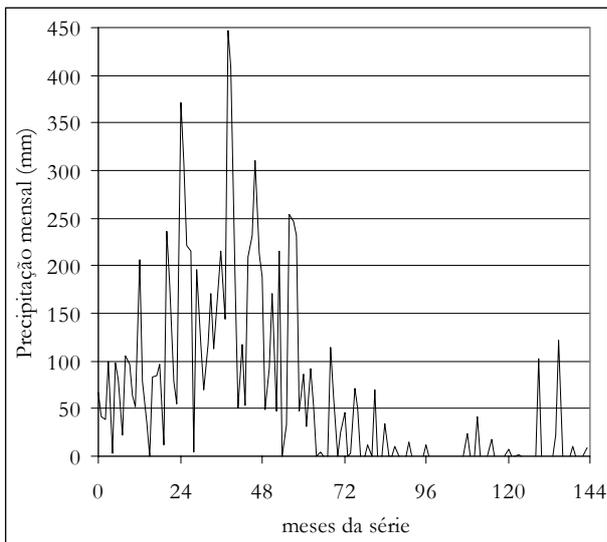


Figura 3. Série de precipitações mensais do posto pluviométrico Pau dos Ferros com início em janeiro de 1986 e término em dezembro de 1997.

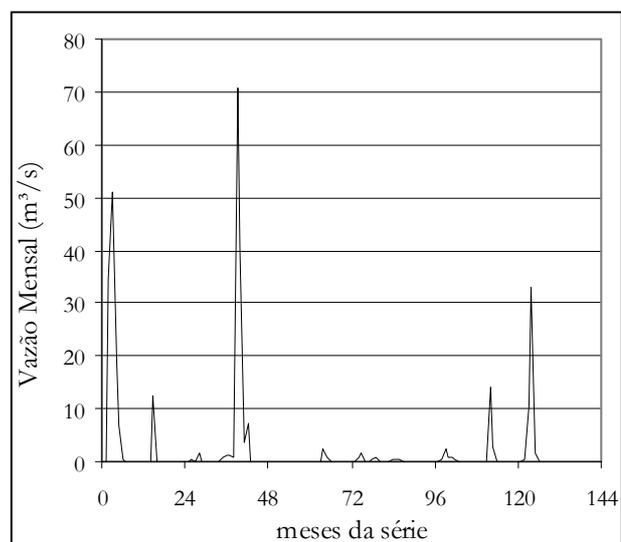


Figura 4. Série de vazões mensais do posto fluviométrico Pau dos Ferros com início em janeiro de 1986 e término em dezembro de 1997.

Com os dados mensais de vazão do posto fluviométrico Pau dos Ferros, foi calculada a curva adimensional de regularização sem perdas. A curva gerada é apresentada na figura 5.

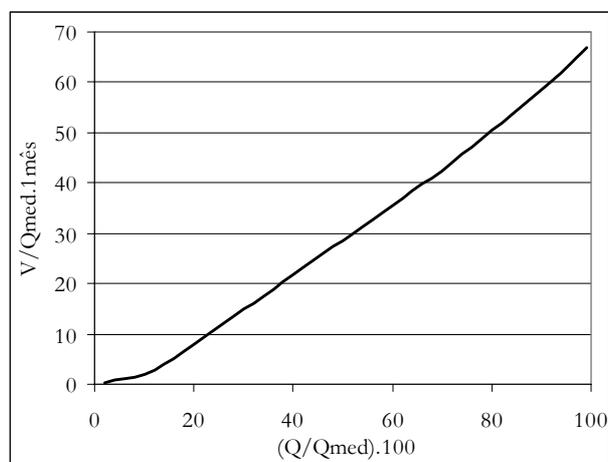


Figura 5. Curva adimensional de regularização sem perdas, para 100 % de garantia, do posto Pau dos Ferros.

A evaporação média mensal utilizada foi obtida por Bristot (1999 apud Medeiros, 2002) para o posto pluviométrico de Pau dos Ferros. A evaporação média anual da região é de 1781 mm.

Os valores médios dos fatores obtidos para cada reservatório estão apresentados na tabela 2. Verifica-se que estes valores decrescem com o aumento da área, sendo mais acentuado para reservatórios mais côncavos. Os valores de f também decrescem à medida que os reservatórios vão se aproximando da forma côncava, com exceção daqueles com área máxima de 50 km^2 . Isto nos

mostra que o fator f é dependente da área máxima do reservatório, como se podia imaginar se levássemos em conta que este fator representa a distância entre as curvas sem perdas e com perdas obtida pelo balanço hídrico, funcionando como um ponderador da área em relação à evaporação média anual constante.

Tabela 2. Fator f médio para cada reservatório

Área (km ²)	$f_{\text{médio}}$					
	1	2	3	4	5	6
10	0,655	0,468	0,452	0,439	0,444	0,466
50	0,406	0,369	0,372	0,382	0,388	0,384
100	0,373	0,343	0,341	0,345	0,330	0,266
500	0,311	0,223	0,167	0,116	0,083	0,054

1 = MCVX; 2 = MCVX - CVX; 3 = CVX - LCVX; 4 = LCVX - L; 5 = L - CC; 6 = CC

As figuras 6 a 8 apresentam alguns resultados de curvas de regularização obtidos pelos três métodos para os reservatórios: muito convexo (MCVX) com área máxima de 100 km²; convexo a ligeiramente convexo (CVX-LCVX) com área máxima de 50 km²; e côncavo (CC) com área máxima de 50 km².

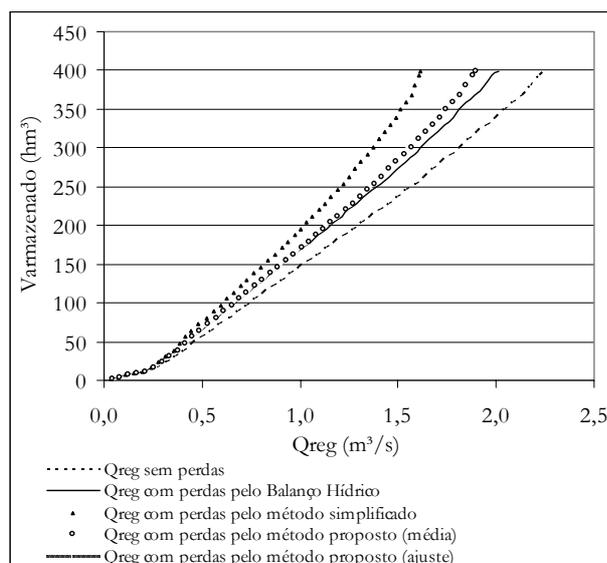


Figura 6. Curvas de regularização do reservatório MCVX com área máxima de 100 km², obtidas pelos três métodos.

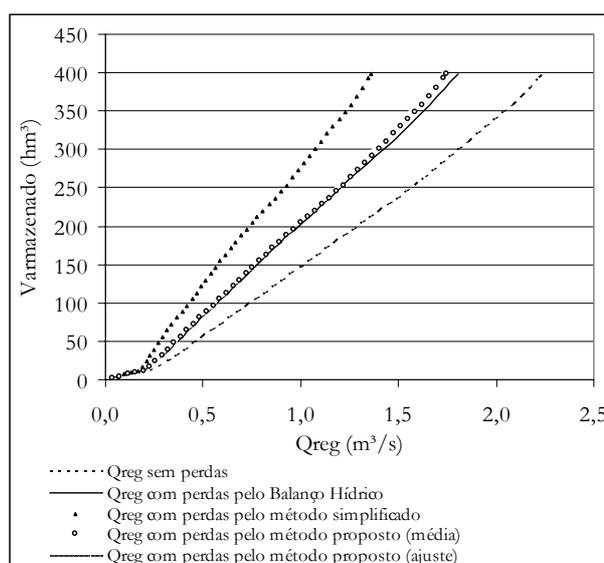


Figura 7. Curvas de regularização do reservatório CVX-LCVX com área máxima de 50 km², obtidas pelos três métodos.

Nos dois primeiros observa que a curva de regularização obtida com o método proposto se aproxima da obtida pelo balanço hídrico até um volume de 250 hm³, quando começa a se distanciar, ou seja, estimando perdas maiores do que aquelas obtidas pelo balanço, mas bem menores do que aquelas obtidas pelo método simplificado. De acordo com a curva de regularização adimensional

sem perdas, verificou-se que para esse volume a vazão regularizada está em torno de 60 a 70 % da vazão média, o que geralmente é a maior vazão possível de ser regularizada.

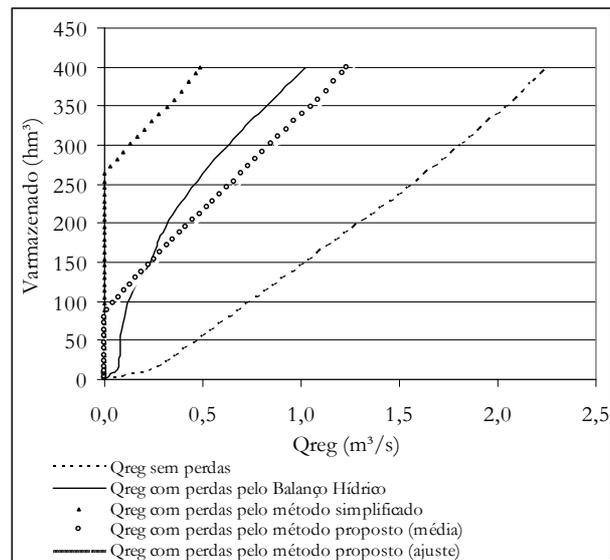


Figura 8. Curvas de regularização do reservatório CC com área máxima de 50 km^2 , obtidas pelos três métodos.

No último reservatório, as perdas por evaporação obtidas pelo método simplificado fazem com que o reservatório só apresente regularização a partir de um volume superior a 250 hm^3 .

Com o método proposto, o reservatório inicia a regularização com volume superior a 80 hm^3 , bem menor do que com o método simplificado, embora se observe que, de acordo com o balanço hídrico, as perdas não são tão altas a ponto de impedir regularização para um certo volume. Neste caso a curva obtida com o método proposto só se aproxima daquela obtida com o balanço hídrico em uma pequena faixa (volumes entre 100 e 150 hm^3), provavelmente a faixa onde os valores de f estão próximos da média ou do valor obtido pela equação do ajuste.

Dos 24 conjuntos de curvas obtidos, um para cada tipo de reservatório hipotético, verificou-se que os resultados das curvas adotando a média dos fatores f são muito próximos daqueles onde as curvas foram obtidas utilizando uma equação para o fator em função da área. Assim, buscando obter valores de f para reservatórios com área máxima diferentes dos hipotéticos, preferiu-se utilizar as equações para estimativa de tal parâmetro.

As figuras de 9 a 14 apresentam os ajustes aos valores médios de f em função da área para cada um dos seis reservatórios hipotéticos. A tabela 3 resume os resultados. Verificam-se bons ajustes das funções, sempre com R^2 acima de 90 %. Deve-se considerar que as equações foram obtidas utilizando um número reduzido de pontos.

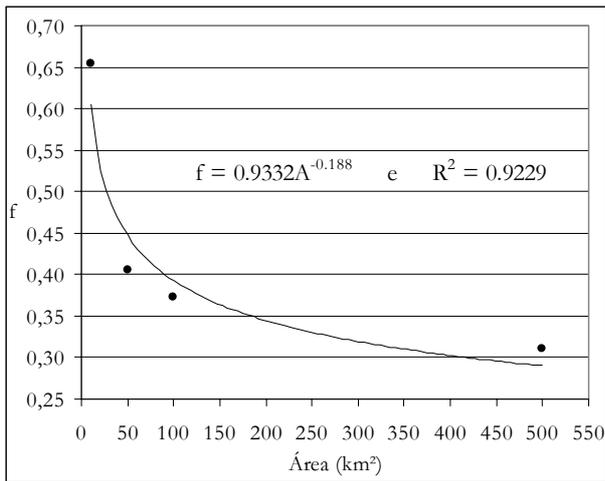


Figura 9. Ajuste dos valores médios de f em função da área para o reservatório hipotético MCVX.

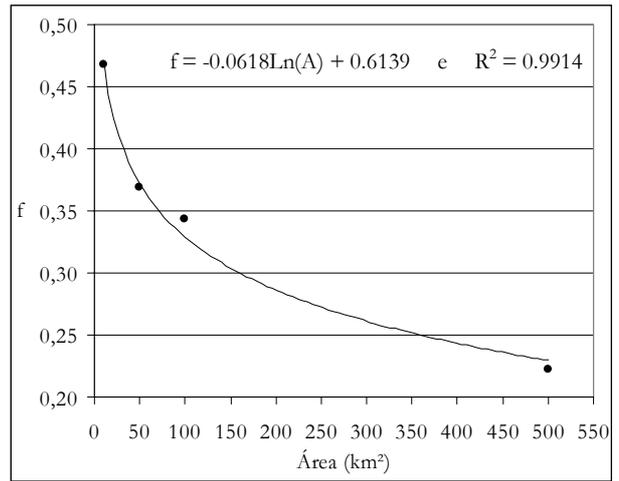


Figura 10. Ajuste dos valores médios de f em função da área para o reservatório hipotético MCVX-CVX.

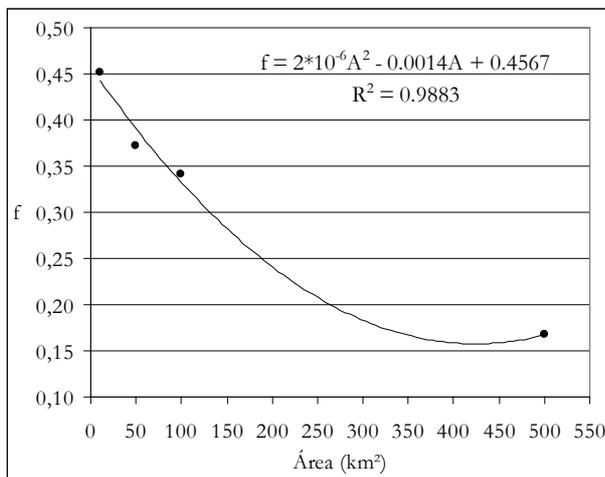


Figura 11. Ajuste dos valores médios de f em função da área para o reservatório hipotético CVX-LCVX.

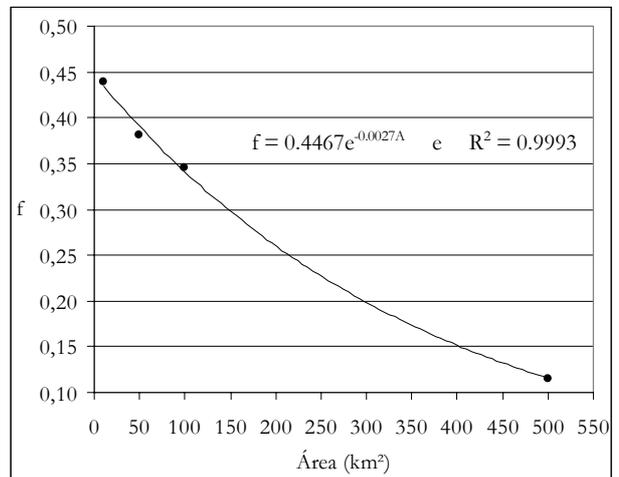


Figura 12. Ajuste dos valores médios de f em função da área para o reservatório hipotético LCVX-L.

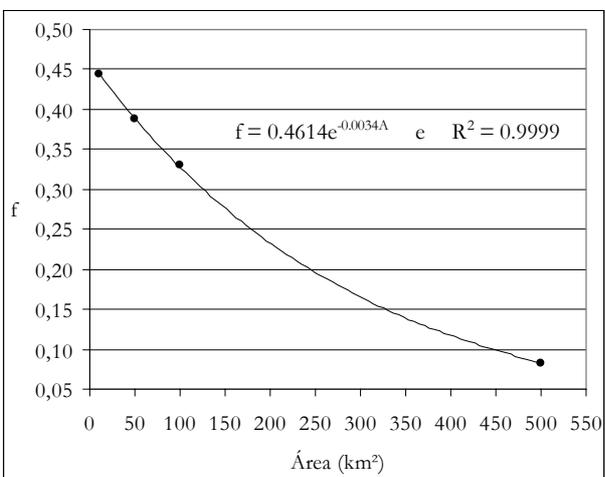


Figura 13. Ajuste dos valores médios de f em função da área para o reservatório hipotético L-CC.

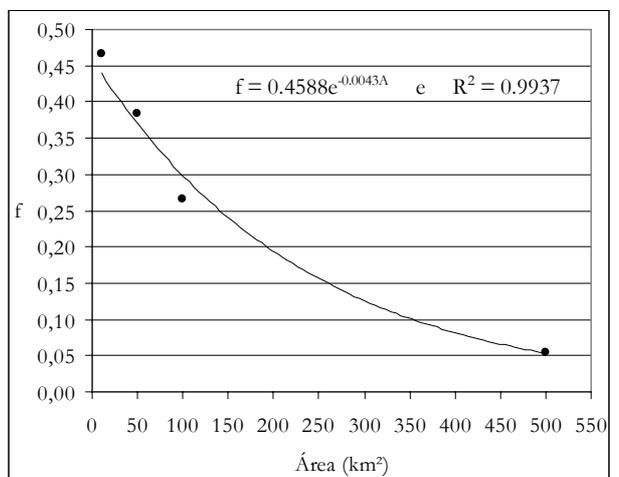


Figura 14. Ajuste dos valores médios de f em função da área para o reservatório hipotético CC.

Tabela 3. Resultados dos ajustes dos valores médios de f em função da área máxima, àquela correspondente ao armazenamento máximo, de cada reservatório.

Reservatório	Ajuste	Nº	Equação	R ²
MCVX	Equação de Potência	6	$f = 0,9332 \cdot A^{-0,188}$	0,9229
MCVX-CVX	Função Logarítmica	7	$f = -0,0618 \cdot \ln(A) + 0,6139$	0,9914
CVX-LCVX	Equação Polinomial do 2º grau	8	$f = 2 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 - 0,0014 \cdot A + 0,4567$	0,9883
LCVX-L	Função Exponencial	9	$f = 0,4467 \cdot e^{-0,0027 \cdot A}$	0,9993
L-CC	Função Exponencial	10	$f = 0,4614 \cdot e^{-0,0034 \cdot A}$	0,9999
CC	Função Exponencial	11	$f = 0,4588 \cdot e^{-0,0043 \cdot A}$	0,9937

3.1. Verificação dos resultados

Para avaliar a aplicabilidade desta metodologia, foram utilizados dados de dois açudes existentes na bacia do rio Apodi-Mossoró, ambos classificados como Ligeiramente Convexo segundo a classificação de Campos (2002): (a) Açude Pau dos Ferros com área máxima, correspondente a sua capacidade máxima, igual a 12 km² e (b) Açude Santa Cruz com área máxima, correspondente a sua capacidade máxima, igual a 36,2 km².

O fator f para o primeiro reservatório foi obtido utilizando-se a equação 9, uma vez que sua curva volume vs. profundidade ficou muito próxima da curva 4 da classificação de Campos (2002), resultando no valor $f = 0,432$. Já para o segundo reservatório, o fator f foi obtido pela média entre os resultados das equações 8 e 9, pois sua curva volume vs. profundidade ficou em entre as curvas 3 e 4 da mesma classificação, resultando assim no valor $f = 0,407$.

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 15 e 16, onde se observa uma boa aproximação à curva de regularização obtida pelo balanço hídrico em comparação com a obtida pelo método simplificado.

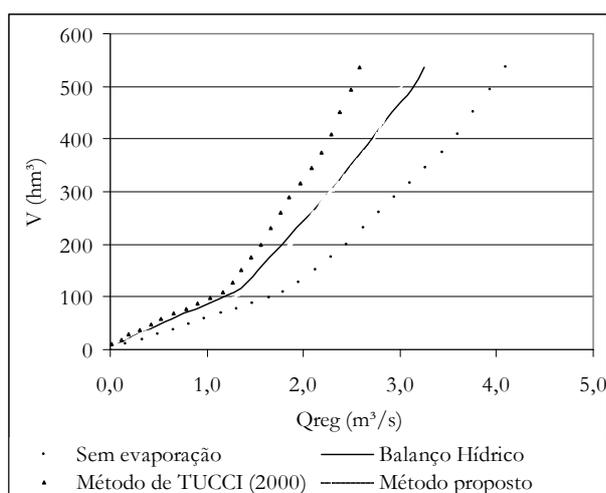


Figura 15. Resultados do método proposto aplicado ao reservatório de Pau dos Ferros, na bacia do rio Apodi-Mossoró ($f = 0,432$).

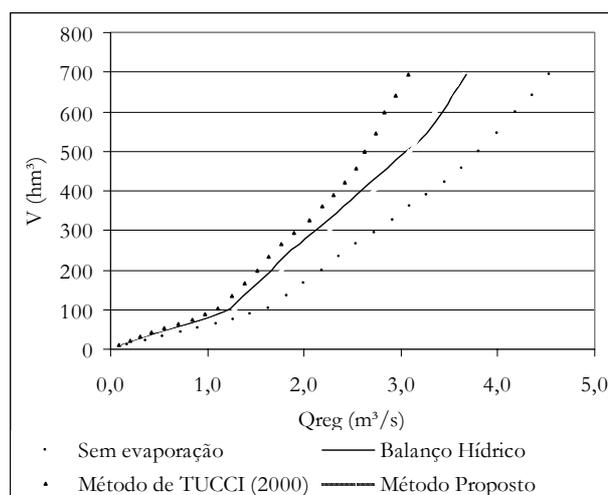


Figura 16. Resultados do método proposto aplicado ao reservatório de Santa Cruz, na bacia do rio Apodi-Mossoró ($f = 0,407$).

As curvas de regularização sem perdas, com perdas pelo balanço hídrico e com perdas pelo método simplificado para os dois reservatórios utilizados na verificação foram obtidas por Medeiros (2003).

4. CONCLUSÕES

É necessário um conhecimento prévio das perdas por evaporação numa fase de planejamento. Como estas perdas dependem da topografia local, não se justificam investimentos maiores para sua obtenção em todos os locais das alternativas. Assim, com o fator, é possível obter uma estimativa preliminar das perdas.

O método simplificado adotado por Tucci (2002) superestimou os volumes necessários para regularizar uma determinada vazão, comparado com os resultados obtidos pelo balanço hídrico, uma vez que considera altas perdas por evaporação, principalmente à medida que a área do reservatório aumenta. Em contra partida, os resultados com o método simplificado encontram-se sempre a favor da segurança.

A metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios, com perdas próximas daqueles obtidas pelo balanço hídrico, aumentando para um volume superior ao necessário para regularizar vazões acima de 70 % da vazão média, geralmente a máxima vazão passível de ser regularizada, deixando esta parte superior da curva sem grande importância.

Os valores de f encontrados através das equações propostos neste trabalho podem não se aplicar a regiões com características diferentes da bacia do Rio Apodí-Mossoró. Estas equações foram estimadas numa região onde as perdas por evaporação são muito altas, ao contrário de regiões como Sul e Sudeste, onde tais perdas são baixas.

O fator f representa a diferença entre as curvas sem perdas e com perdas obtidas pelo balanço hídrico (caso real). Observou-se que os valores de f diminuem com o aumento da área do reservatório, funcionando com um ponderador do aumento da área em relação à evaporação anual média constante.

À medida que a geometria dos reservatórios se aproxima da côncava, para o volume máximo adotado de 1000 hm^3 , áreas máximas de 100 e 500 km^2 não conseguiam regularizar devido às altas perdas por evaporação.

Sendo dependente da área do reservatório e variando muito com esta, ao ser adotado um valor médio considera-se que as curvas sem evaporação e com evaporação pelo balanço hídrico são paralelas, o que não é verdade. Com isso, a curva sem perdas se aproxima da com perda até um certo ponto ou, como observado na figura 9, ajusta bem uma faixa de pontos da curva onde os valores de f estão próximos do médio ou do obtido pela equação ajustada aos valores médios.

Este trabalho foi apenas um passo para a determinação do fator que melhor forneça uma perda por evaporação mais próxima daquela que seria obtida pelo balanço hídrico.

Como sugestão principal para continuidade deste trabalho, poderiam ser realizados estudos considerando dados reais de diversos reservatórios em diferentes localidades, buscando uma melhor representatividade para o fator f para várias regiões com características climáticas diferentes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parte integrante da disciplina Hidrologia II do curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. O autor agradece a doutora Joana Darc pelo fornecimento de dados e informações técnicas necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L. S. V. e STUDART, T. M. C. (2002). “*Determinação da forma de reservatórios baseada nas curvas hipsográficas de volume x profundidade*” in Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió/AL, Nov. 2002, CD-Rom.

MEDEIROS, J. D. F.; DINIZ, L. S. e TUCCI, C. E. M. (2002) “*Regionalização de Curvas de Regularização para diferentes garantias: Rio Apodí-Mossoró*” in Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió/AL, Nov. 2002, CD-Rom.

TUCCI, C. E. M. (2002). *Regionalização de vazões*. 1ª edição. Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS Porto Alegre – RS, 256 p.