

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS COTA X ÁREA X VOLUME UTILIZANDO O MÉTODO EMPÍRICO DE BORLAND & MILLER – Aplicação ao Reservatório de Foz do Areia.

Martha Regina Von Borstel Sugai¹; Mônica Irion Almeida²; Douglas Mazeika Paulek³.

RESUMO – A partir das descargas sólidas totais, calculadas com base nos dados de descargas líquidas em suspensão usando o método de Colby, de estações selecionadas localizadas a montante do reservatório de Foz do Areia, e da série de vazões líquidas diárias de União da Vitória e Foz do Areia, foi feita uma atualização das curvas cota x área x volume, 30 anos após a entrada em operação da usina, e avaliada a evolução destas curvas no tempo, utilizando o “método empírico de redução de área” de Borland & Miller.

ABSTRACT – From the total load, calculated with the Colby method based on the suspended load data, of selected stations located upstream the Foz do Areia Reservoir, and the daily discharge from União da Vitória and Foz do Areia, is done the area-capacity curve actualization and evaluated their evolution with the time, using the Borland & Miller’s empirical area-reduction method.

Palavras-Chave – Curvas cota x área x volume, assoreamento, Foz do Areia.

1. INTRODUÇÃO

A implantação de um reservatório num curso d’água altera as suas condições de escoamento. Com a redução da velocidade das correntes as partículas tendem a se depositar, provocando o assoreamento gradual do reservatório, o que pode trazer problemas para sua operação.

A avaliação do assoreamento pode ser realizada através de modelos. Um dos métodos utilizados mundialmente é o de Borland & Miller, denominado “método empírico de redução de área” (Carvalho, 2008), que permite calcular a altura de sedimentos no pé da barragem e a distribuição de sedimentos ao longo do leito do reservatório, resultando em novos valores de área e volume do reservatório.

¹ Companhia Paranaense de Energia – COPEL. Departamento de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Rua José Izidoro Biazzetto, 158, Bloco A – Curitiba - PR – CEP 81200-240. E-mail: martha.sugai@copel.com, Fone: (41) 3331-4521

² Companhia Paranaense de Energia – COPEL. Departamento de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Rua José Izidoro Biazzetto, 158, Bloco A – Curitiba - PR – CEP 81200-240. E-mail: monica.irion@copel.com, Fone: (41) 3331-3682

³ Companhia Paranaense de Energia – COPEL. Departamento de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Rua José Izidoro Biazzetto, 158, Bloco A – Curitiba - PR – CEP 81200-240. E-mail: douglas.paulek@ufpr.br, Fone: (41) 9802-7414

O método de Borland & Miller é um método empírico desenvolvido com base no levantamento sistemático de 30 reservatórios pelo *U. S. Bureau of Reclamation* e outras entidades dos Estados Unidos (Carvalho, 2008).

O objetivo deste artigo é apresentar uma aplicação do método para a avaliação da evolução das curvas cota x área x volume do reservatório de Foz do Areia, localizado no rio Iguaçu, na Região Hidrográfica do Paraná.

2. METODOLOGIA

A atualização das curvas cota x área x volume do reservatório de Foz do Areia foi feita utilizando o método de Borland & Miller, denominado “método empírico de redução de área”.

A aplicação do método considera:

- a descarga sólida média anual afluyente;
- a eficiência de retenção de sedimentos no reservatório;
- o peso específico aparente dos depósitos;
- a compactação com o tempo;
- o tipo de operação do reservatório;
- o tipo de reservatório.

Os passos para a aplicação da metodologia consistem em determinar:

- a descarga sólida média anual afluyente;
- a eficiência de retenção de sedimentos no reservatório;
- o peso específico aparente dos depósitos;
- o volume assoreado;
- a altura de sedimentos no pé da barragem e a distribuição dos sedimentos no reservatório.

Além disso, foi calculado o tempo aproximado para assorear o volume abaixo da cota da soleira da tomada d'água, considerado como o volume morto do reservatório, chamado de vida útil do reservatório.

2.1. Descarga sólida média anual afluyente

Como não se dispõe de dados diários de descarga sólida, a descarga sólida média anual afluyente foi calculada a partir das curvas chave de sedimentos e das curvas de permanência das vazões médias diárias. Este é considerado um dos métodos mais precisos e também é recomendado e usado pelo USGS, USBR e várias entidades (Miller, 1951, Strand, 1974 *apud* Carvalho, 2008).

As curvas chave de sedimentos relacionam as vazões sólidas com as vazões líquidas, permitindo um cálculo aproximado de dados diários de sedimento, considerando uma equação do tipo:

$$Q_{st} = a \cdot Q^n \quad (1)$$

onde:

Q_{st} = descarga sólida total;

Q = descarga líquida;

a e n valores adimensionais.

Os pares de dados de descarga sólida total calculada e de vazão líquida medida foram plotados em escala bilogarítmica e a equação definida por regressão simples e por ajuste gráfico.

As descargas sólidas totais foram obtidas a partir dos dados de descargas sólidas em suspensão medidas, utilizando o método de Colby.

No método de Colby, a descarga sólida total é calculada pela seguinte equação:

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (2)$$

Sendo:

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot C'_s \quad (3)$$

$$Q_{nm} = q'_{nm} \cdot K \cdot L \quad (4)$$

onde:

Q_{sm} = descarga sólida medida;

Q_{nm} = descarga sólida não medida;

C'_s = concentração medida;

L = largura do rio;

K = fator de correção.

Com base nestas curvas chave de sedimentos e das curvas de permanência das vazões médias diárias foram calculadas as curvas de permanência das descargas sólidas correspondentes a cada sub-trecho analisado. Integrando-se esta curva de permanência das descargas sólidas foram obtidos os volumes transportados em média anualmente (DSM).

2.2. Eficiência de retenção de sedimentos no reservatório

A eficiência de retenção de sedimentos no reservatório (E_r) é definida pela relação entre o sedimento depositado e o fluxo total de sedimentos.

Os métodos de determinação da eficiência de retenção mais conhecidos e usados no Brasil são os de Gunnar, de Brune e o de Churchill (Carvalho, 2008). Neste artigo foi utilizado o método de Brune que vem sendo utilizado nos estudos efetuados pela Copel.

O método de Brune é representado por um conjunto de três curvas obtidas de levantamentos de vários reservatórios no Estados Unidos, apresentadas na figura 1.

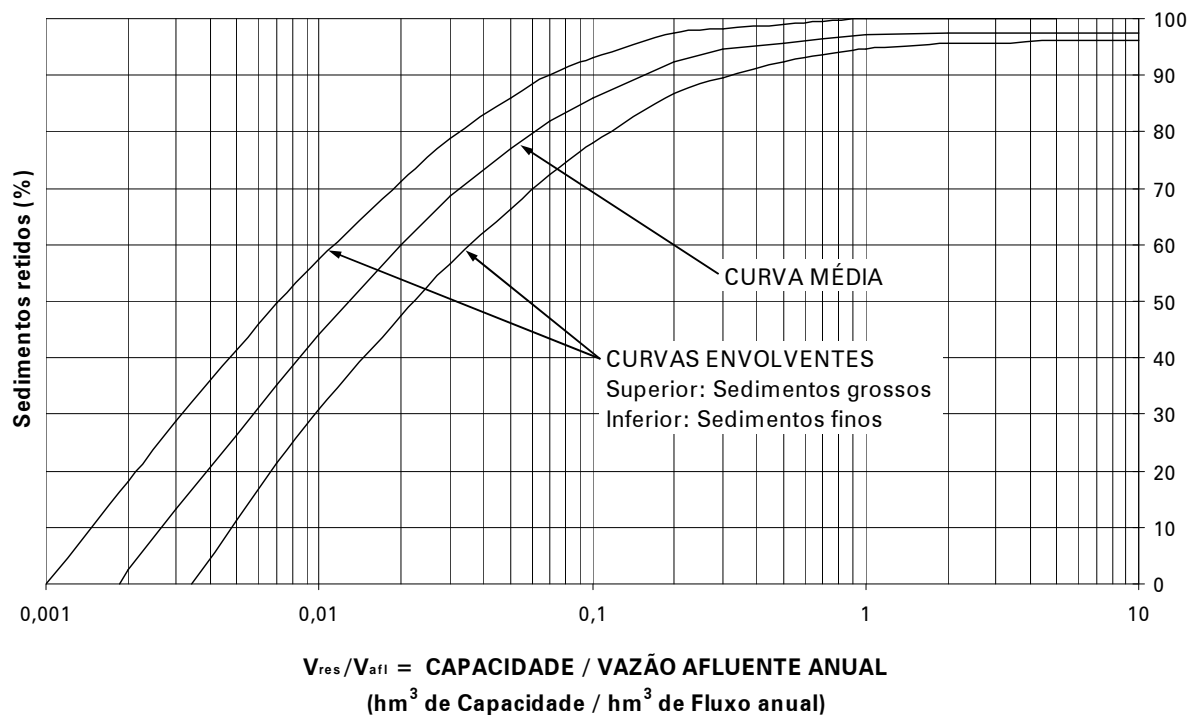


Figura 1 – Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios, segundo Brune (1953) (desenho produzido por Alfredo Costa, retirado de Carvalho, 2008)

Com base na relação entre a capacidade do reservatório e a vazão afluyente anual pode-se obter o valor de E_r nesta figura. A envoltória inferior diz respeito a depósitos contendo sedimentos finos. A superior a sedimentos grossos. Quando não se conhece a granulometria do sedimento costuma-se a usar a curva média.

2.3. Peso específico aparente dos depósitos

O peso específico aparente de depósitos em reservatórios varia com o tempo, sendo influenciado por vários fatores. Com base em pesquisas, Lara e Pemberton (1965, *apud* USBR, 1987) concluíram que o peso específico pode ser calculado considerando:

- a maneira como o reservatório é operado;
- a textura e o tamanho das partículas dos sedimentos;
- a taxa de compactação e de consolidação;

- em menor escala, as densidades de corrente, declividade do talvegue no reservatório e o efeito da vegetação na área do reservatório.

Seu cálculo pode ser feito através das equações 5 e 6:

$$\gamma_i = W_c \cdot p_c + W_m \cdot p_m + W_s \cdot p_s \quad (5)$$

$$\gamma_T = \gamma_i + K \cdot \log T \quad (6)$$

$$K = K_c \cdot p_c + K_m \cdot p_m + K_s \cdot p_s \quad (7)$$

onde:

γ_i = peso específico aparente inicial, em t/m³;

W_c , W_m e W_s = coeficientes de compactação (pesos iniciais de argila, silte e areia, respectivamente);

K_c , K_m e K_s = coeficientes função do tipo de material;

p_c , p_m e p_s = frações de quantidade de argila, silte e areia;

γ_T = peso específico aparente médio em T anos, em t/m³;

T = tempo de compactação do sedimento depositado, em anos;

K = constante que para cada tipo de material em função da operação do reservatório.

De acordo com o tipo de operação do reservatório, as constantes W e K tem valores específicos, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Constantes W e K para o calculo do peso específico aparente em função do tipo de operação do reservatório de uso no sistema métrico

Tipo de operação do reservatório	Argila		Silte		Areia	
	W_c	K_c	W_m	K_m	W_s	K_s
Sedimento sempre ou quase sempre submerso (Tipo 1)	0,416	0,2563	1,121	0,0913	1,554	0,0000
Depleção do reservatório de pequena a média (Tipo 2)	0,561	0,1346	1,137	0,0288	1,554	0,0000
Reservatório com consideráveis variações de nível (Tipo 3)	0,641	0,0000	1,153	0,0000	1,554	0,0000
Reservatórios normalmente vazios (Tipo 4)	0,961	0,0000	1,169	0,0000	1,554	0,0000

Fonte: Carvalho & Catharino, 1991, Strand, 1974, *apud* Carvalho, 2008

2.4. Volume assoreado

O volume assoreado após T anos “ S_T ” foi calculado com:

$$S_T = \frac{DSM \cdot E_r \cdot T}{\gamma_T} \quad (8)$$

2.5. Altura de sedimentos no pé da barragem e a distribuição dos sedimentos no reservatório

Existe uma relação entre a forma do reservatório e a percentagem dos sedimentos depositados ao longo de seu leito. No método de Borland & Miller a forma do reservatório é definida com base na recíproca da declividade das profundidades em relação ao volume do reservatório “m”, utilizando a tabela 2.

Tabela 2 – Valor de “m”, classificando o tipo do reservatório no método de Borland & Miller

Tipo de reservatório	m	Classificação
Tipo I	3,5 a 4,5	De zonas planas
Tipo II	2,5 a 3,5	De zonas de inundação a colinas
Tipo III	1,5 a 2,5	Montanhoso
Tipo IV	1,0 a 1,5	De gargantas profundas

Fonte: Strand, 1974, *apud* Carvalho, 2008.

Na seqüência são calculados os valores de profundidades “ hp ” e de área relativa “ A_p ”:

Os valores das profundidades “ hp ” são calculados com:

$$hp = \frac{S_T - V_{pH}}{H \cdot A_{pH}} \quad (9)$$

onde:

S_T = volume assoreado após T anos;

V_{pH} = volume total do reservatório na profundidade p_H ;

H = profundidade total do reservatório no NA normal;

A_{pH} = área total do reservatório na profundidade p_H .

Com o valor de “ hp ”, e através das curvas das figuras 2 e 3, é calculada a altura de depósito no pé da barragem e avaliada a distribuição de sedimentos ao longo do reservatório nas diversas altitudes. As equações das curvas das áreas relativas para cada tipo de reservatório, apresentadas na figura 3, são:

$$\text{Curva Tipo I: } A_p = 5,047 \cdot p^{1,85} (1 - p)^{0,36} \quad (10)$$

$$\text{Curva Tipo II: } A_p = 2,487 \cdot p^{0,57} (1 - p)^{0,41} \quad (11)$$

$$\text{Curva Tipo III: } A_p = 16,967 \cdot p^{1,15} (1 - p)^{2,32} \quad (12)$$

$$\text{Curva Tipo IV: } A_p = 1,486 \cdot p^{-0,25} (1 - p)^{1,34} \quad (13)$$

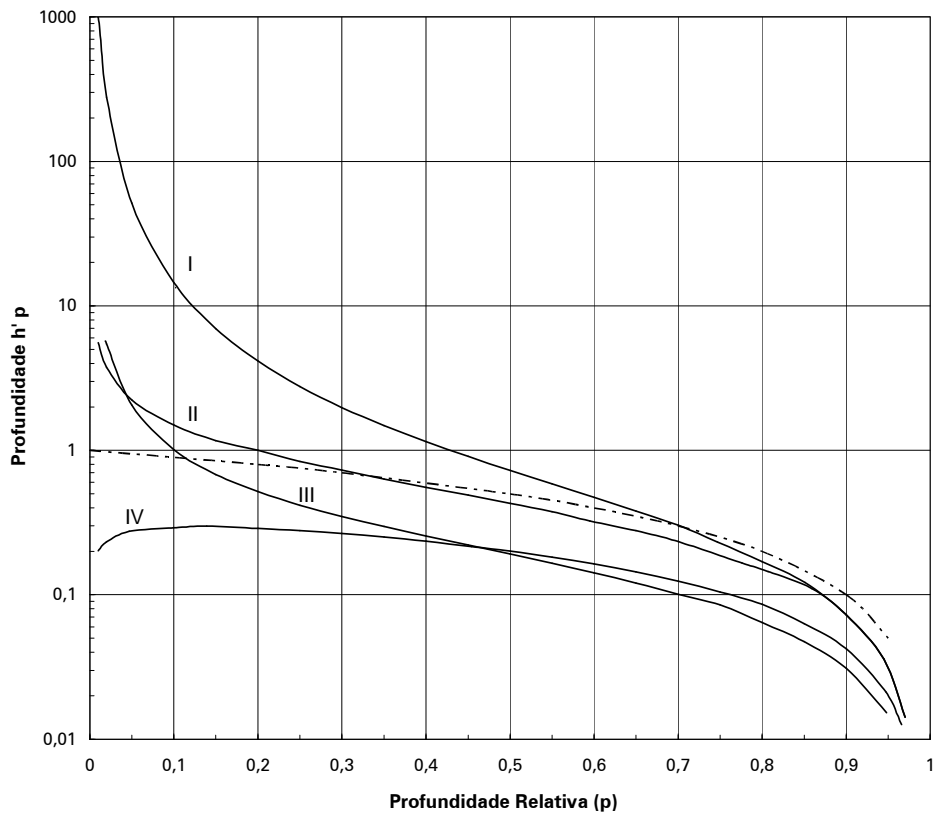


Figura 2 – Curvas para determinar a profundidade de depósito de sedimento no pé da barragem, segundo Borland & Miller (Strand, 1974) (desenho reproduzido por Alfredo Costa, retirado de Carvalho, 2008)

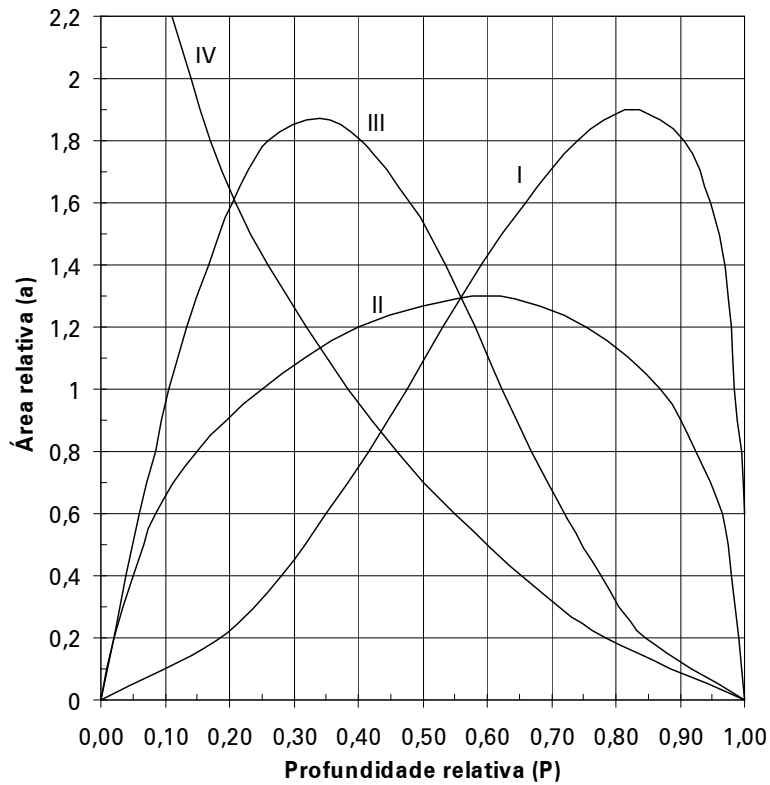


Figura 3 – Curvas de profundidade relativa versus área relativa para avaliação da distribuição de sedimento em reservatório, segundo Borland & Miller (Strand, 1974) (desenho reproduzido por Alfredo Costa, retirado de Carvalho, 2008)

2.6. Tempo aproximado para assorear o volume abaixo da cota da soleira da tomada d'água

O tempo aproximado para assorear o volume abaixo da cota da soleira da tomada d'água (V_{ST})

é:

$$T = \frac{V_{ST} \cdot \gamma_{ap}}{DSM \cdot E_r} \quad (14)$$

3. DADOS DO RESERVATÓRIO DE FOZ DO AREIA

Na tabela 3 são apresentados dados do reservatório de Foz do Areia:

Tabela 3 – Dados do reservatório de Foz do Areia

Potência Instalada (MW)	1.676
Entrada em operação	1980
Rio / Sub-Bacia Hidrográfica	Iguaçu (65)
Bacia Hidrográfica	Paraná (6)
Área de drenagem total até a barragem	29.900 km ²
N.A. Máximo Normal	742 m
Área inundada no N.A. Máximo Normal	140 km ²
Volume N.A. Máximo Normal	5.780 x10 ⁶ m ³
N.A. Mínimo Operacional	700 m
Volume N.A. Mínimo Operacional	1.970 x10 ⁶ m ³
Cota da soleira da tomada d'água	678 m
Volume até a cota da soleira da tomada d'água	951 x10 ⁶ m ³
Cota da crista do vertedor	725,5 m
Volume até a cota da crista do vertedor	3.900 x 10 ⁶ m ³
Vazão média de longo termo (1931-2009)	647m ³ /s
Cota do fundo do reservatório	600 m

4. RESULTADOS

O transporte de sedimentos foi avaliado a partir dos dados de transporte sólido em suspensão das estações apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Estações fluviométricas selecionadas para o cálculo das descargas sólidas

Código ANA	Nome da estação	Nome do rio	Área de drenagem (km ²)	Período de medições de descarga sólida
65310000	União da Vitória	Iguaçu	24.200	1976 a 2007
65365000	Porto Vitória	Espingarda	165	1982 a 2010
65370000	Jangada	Jangada	1.060	1982 a 2010
65415000	Fazenda Maracanã	Palmital	323	1982 a 2010
65764000	Madeira Gavazzoni	Areia	1.010	2001 a 2010

Em função das características das estações selecionadas e da área de contribuição da UHE Foz do Areia, subdividiu-se o trecho estudado em dois:

- a montante de União da Vitória (estação de União da Vitória);
- bacia incremental Foz do Areia – União da Vitória (estações de Porto Vitória, Jangada, Fazenda Maracanã e Madeira Gavazzoni).

Com base nas descargas sólidas em suspensão, foram calculadas pelo método de Colby as descargas sólidas totais em t/dia.

A partir dos dados de vazão líquida específica em L/s/km² e das descargas sólidas totais específicas em t/ano/km², foram ajustadas as curvas chave de sedimentos.

Por regressão, para União da Vitória foi calculada a equação:

$$Q_{ST} = 0,540598 \cdot Q_L^{1,494956} \quad (15)$$

No caso da bacia de contribuição incremental Foz do Areia - União da Vitória foi adotada uma equação obtida por ajuste gráfico alterando um pouco a declividade:

$$Q_{ST} = 0,3123 \cdot Q_L^{1,5314} \quad (16)$$

Nas figuras 4 e 5 são mostrados os dados e os ajustes adotados.

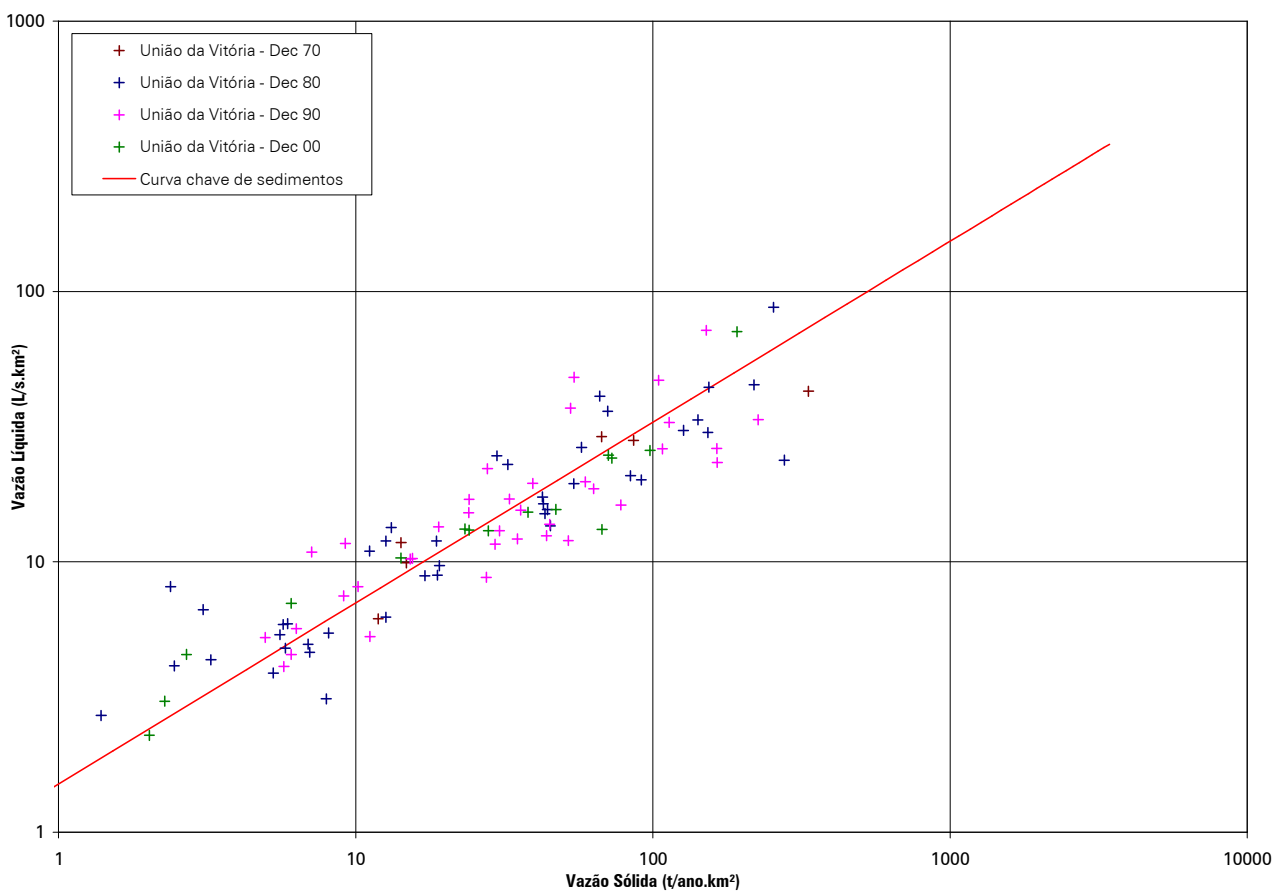


Figura 4 – Curva chave de sedimentos do trecho a montante de União da Vitória

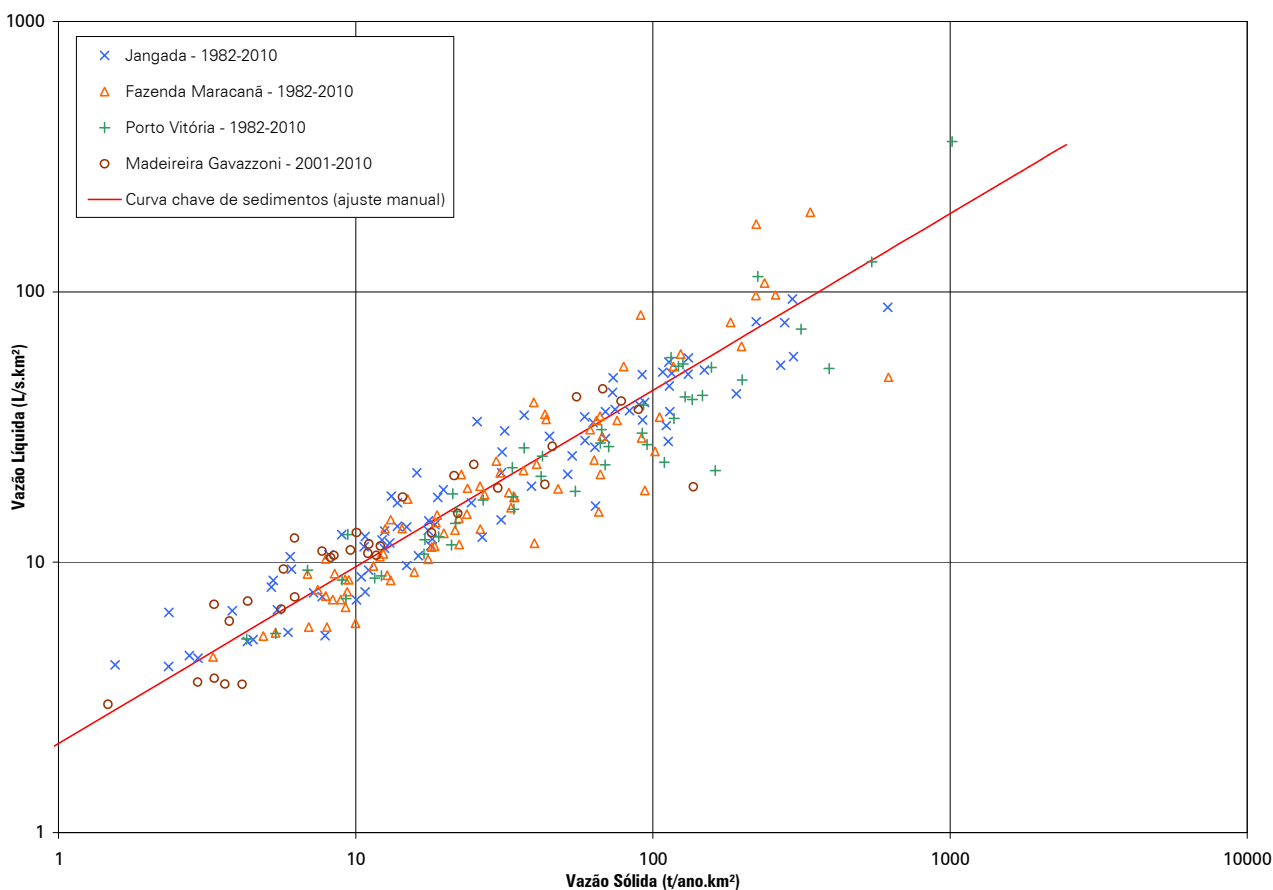


Figura 5 – Curva chave de sedimentos do trecho entre União da Vitória e Foz do Areia

Com base nestas curvas chave de sedimentos e nas curvas de permanência das vazões médias diárias foram calculadas as curvas de permanência das descargas sólidas correspondentes a cada sub-trecho.

A integração dessas curvas de permanência resultou nos seguintes volumes transportados em média anualmente (DSM):

- a montante de União da Vitória → DSM: 1.865.094 t/ano;
- na bacia incremental União da Vitória – Foz do Areia → DSM: 663.252 t/ano.

Para cada ano foi calculado o volume assoreado com base:

- na descarga sólida média;
- na eficiência de retenção;
- no peso específico aparente.

A eficiência de retenção de sedimentos no reservatório (E_r) para o reservatório de Foz do Areia, obtida pela curva média de Brune, varia de 95 % no período de 0 a 150 anos, até 94% no período de 151 a 500 anos.

Para o cálculo do peso específico aparente dos depósitos no reservatório de Foz do Areia, que é operado com pequenas a médias depleções, foram utilizados os coeficientes W e K para o Tipo 2 da tabela 1.

Utilizando-se a equação 8, foram calculados os volumes assoreados após 30, 100 e 500 anos, com os seguintes resultados:

- $S_{30} \rightarrow 70 \text{ hm}^3$
- $S_{100} \rightarrow 225 \text{ hm}^3$
- $S_{500} \rightarrow 1066 \text{ hm}^3$

Para o cálculo das alturas de sedimentos no pé da barragem de Foz do Areia após 30, 100 e 500 anos, foi determinado o valor de “m” que caracterizou o reservatório como Tipo II, de zonas de inundação e colinas.

A cota atingida pelos sedimentos no pé da barragem após 500 anos é de 631m.

Na figura 6 são apresentadas as curvas cota x área x volume original e as calculadas para 30, 100 e 500 anos de operação do reservatório de Foz do Areia.

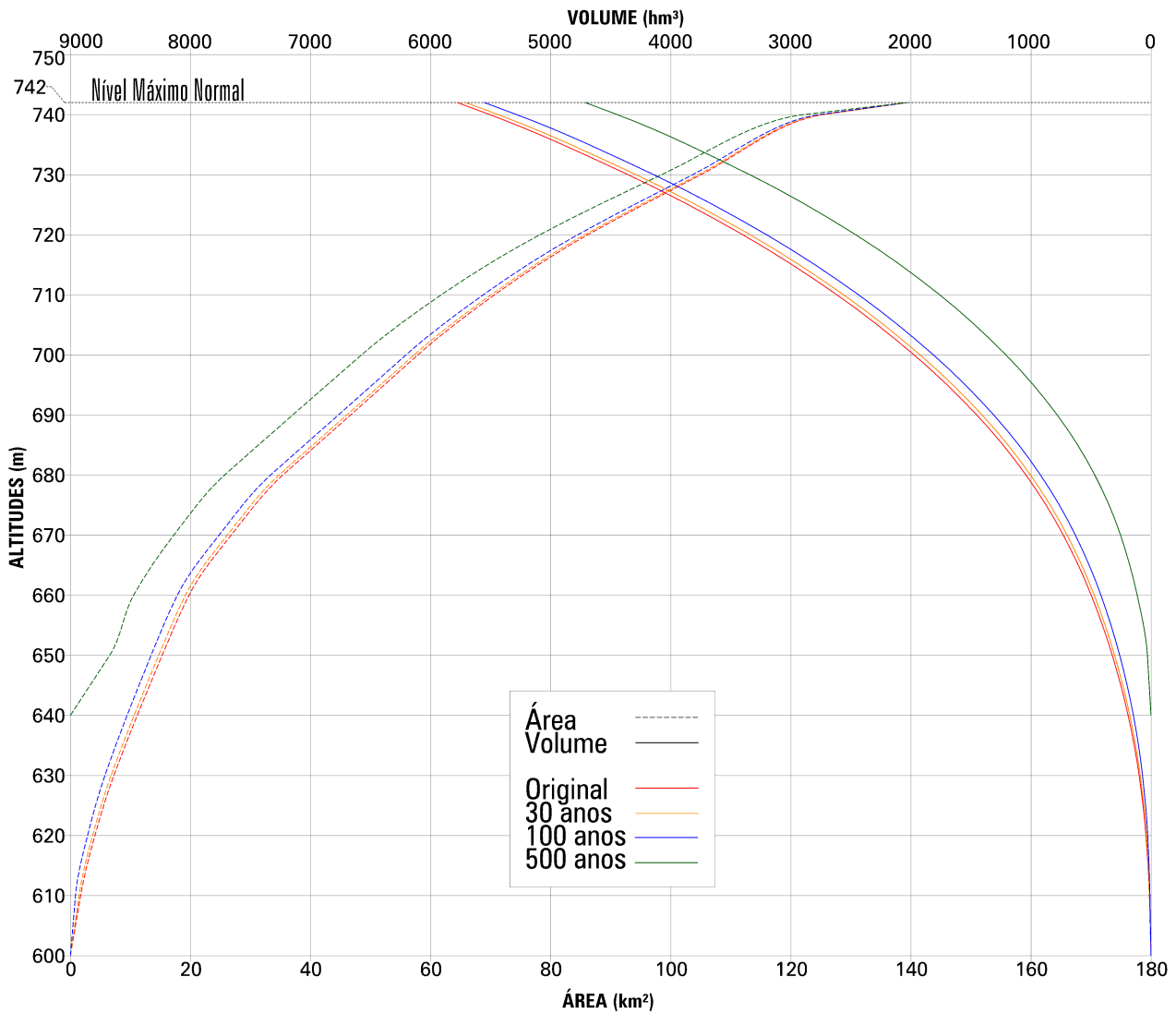


Figura 6 – Curvas cota x área x volume do reservatório de Foz do Areia

Para obtenção dos resultados foram utilizados os programas *Sediment* (Braga, 2008 in Carvalho, 2008), que permite calcular os volumes assoreados ao longo da vida operacional de barragens, e *Dposit* (Braga, 2008 in Carvalho, 2008), que simula a distribuição dos sedimentos em reservatórios. Além da utilização dos programas, foram criadas planilhas de cálculo, cujos resultados reproduziram os calculados através dos softwares.

Foi calculado, ainda, o tempo aproximado para assorear o volume igual ao da cota da crista da tomada d'água, que resultou em torno de 450 anos.

5. CONCLUSÕES

Este artigo mostra como se pode avaliar a evolução da curva cota x área x volume de um reservatório, com o tempo, com base em dados de descarga sólida de estações fluviométricas, utilizando o “método empírico de redução de área” de Borland & Miller.

Observou-se que ao longo dos 30 anos de operação não houve uma alteração significativa da curva cota x volume.

Apesar das imprecisões inerentes, a aplicação da metodologia serve para identificar se há ou não a necessidade de uma revisão baseada em levantamentos de campo.

Outras informações, tais como a vida útil do reservatório e o levantamento sistemático de seções selecionadas ao longo do reservatório, ou o uso do solo na bacia de contribuição, também são úteis para a verificação da necessidade de levantamentos de campo.

AGRADECIMENTOS

Aproveitamos a oportunidade deste artigo para prestar a nossa homenagem ao grande mestre Newton Carvalho, pela clareza de seu livro que serviu de referência para este artigo, como também pela dedicação ao tema.

BIBLIOGRAFIA

CARVALHO, N.O. (2008). *Hidrossedimentologia Prática -2ª ed., atualizada e ampliada*. Rio de Janeiro: Interciência. 599 p.

STRAND, R. I., PEMBERTON, E. L (1987). “*Reservoir Sedimentation - Appendix A*” in *Design of Small Dams* Bureau of Reclamation. Washington, DC. pp. 529 – 564.