

## Capítulo 16- Métodos: Brune, Heinemann e Brown

### 16.1 Introdução

Vamos apresentar o método de Brune para grandes reservatórios e o método de Heinemann, 1981 para pequenos reservatórios entre 0,8 Km<sup>2</sup> e 36,3 Km<sup>2</sup>.

Apresentaremos um dos primeiros estudos feitos de sedimentos em reservatórios que foi feito por Brown, 1943 e que parece adequado para pequenos reservatórios.

Brune, 1953 pesquisou 44 reservatórios com área de bacia de 2,93km<sup>2</sup> a 478.0000km<sup>2</sup> com relação à eficiência na remoção de sedimentos e tem sido usado para pequenos e grandes reservatórios.

### 16.2 Método de Brune

Brune, 1953 relacionou a relação adimensional C/I como base do seu método que está na Figura (16.1).

Entendemos que C é o volume do reservatório e que I é o volume anual é causada pelo runoff na bacia. Esta facilidade de se obter os dados é a grande vantagem, a nosso ver, do método de Brune.

Teoricamente um reservatório pode ter eficiência zero ou 100% de retenção de sólidos. A eficiência de retenção de 100% no reservatório é impossível de acontecer como saliente Brune, 1953. Existem casos em que a eficiência de retenção foi de 100% em lagos nos quais não saiu nenhuma gota de água do vertedor e houve perdas por evaporação e por infiltração no solo.

Os reservatórios com relação  $C/I \leq 1$  significam que são reservatórios sazonais e aqueles cuja relação  $C/I > 1$  são aqueles que armazenam a água que são os mais comuns.

Brune, 1953 comenta também sobre descargas de fundo para a saída de sedimentos como um controle que podem funcionar ou não dependendo das condições locais como época de baixas vazões.

Brune, 1953 comenta sobre os reservatórios destinados a retenção de sedimentos que pode ter eficiência de 90% e que em outros conforme a relação C/I pode ter eficiência de remoção de somente 2%. Brune, 1953 quando comenta sobre o método de Churchill salienta que apesar do método ser bom, há grande dificuldade para se definir o período de retenção e outros dados como a velocidade média no reservatório.

Ponce, 1989 estabelece a seguinte ordem para aplicação da curva de Brune:

**Primeiro:** achar a capacidade (C) do reservatório em m<sup>3</sup>;

**Segundo:** determinar o volume médio anual de runoff (I) que chega no reservatório em m<sup>3</sup>;

**Terceiro:** usando a Figura (16.1) determinar a porcentagem de eficiência como função da relação C/I para as características de três sedimentos. Estimar a textura do sedimento, estudando as fontes de sedimentos e a fração de transporte. A curva superior da Figura (16.1) é aplicado a areia grossa ou sedimentos floculados; a linha média é destinada a sedimentos com larga variação de diâmetros de partículas e a linha inferior é para siltes finos e argilas.

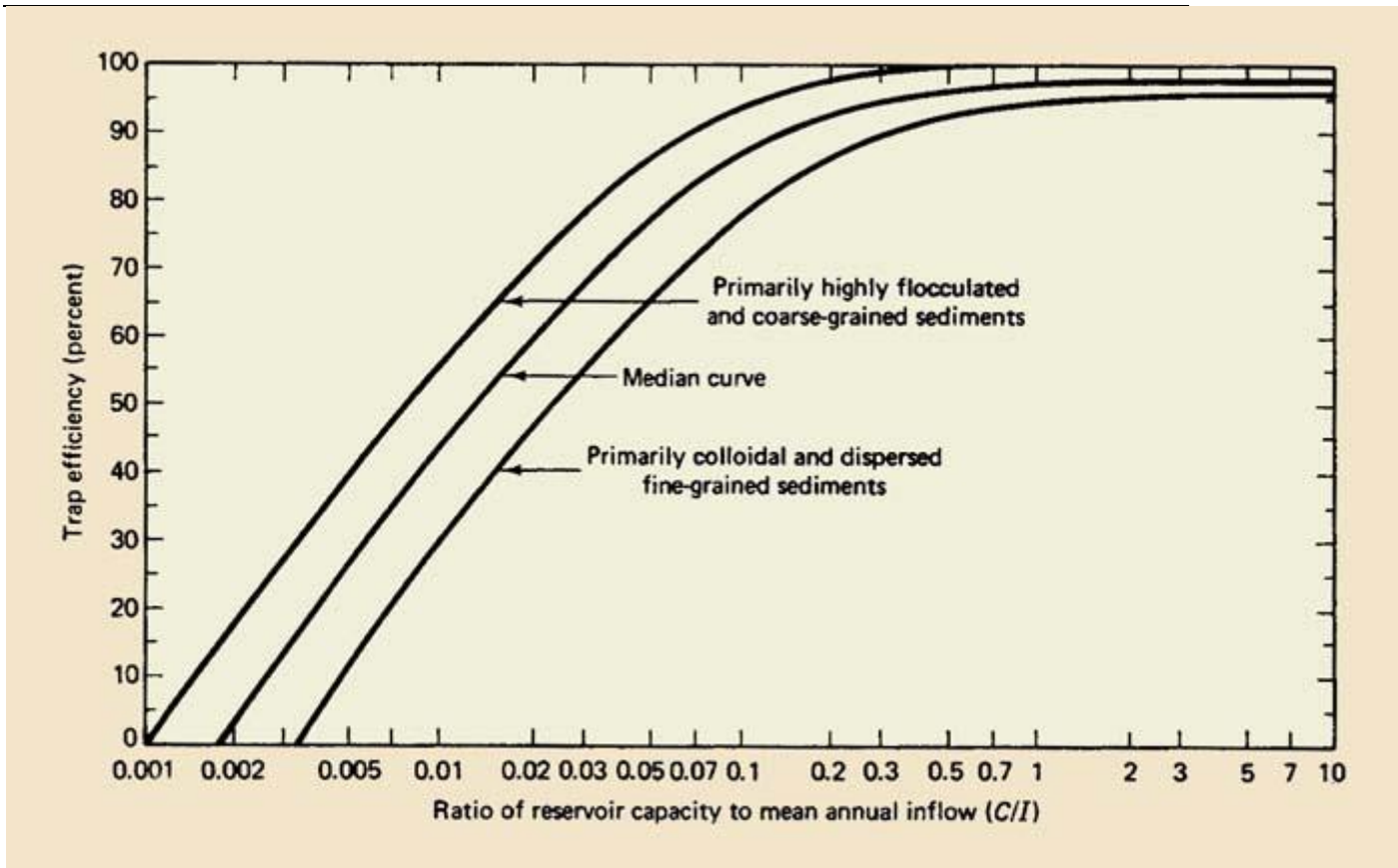


Figura 16.1- Curva de Brune elaboradas em 1953

### Exemplo 16.1

Usando o método de Brune, calcular o tempo de enchimento de um reservatório em uma bacia com os seguintes dados:

Área da bacia=  $4,92\text{km}^2 = 492\text{ ha}$

Precipitação média anual = 1660mm

Runoff médio anual suposto de 40% da precipitação= 664mm

Runoff anual=I=  $(664\text{mm}/1000) \times 492\text{ha} \times 10000\text{m}^2 = 3.266.880\text{m}^3/\text{ano}$

C= volume do reservatório =  $122.428\text{m}^3$

I = runoff anual=  $3.266.880\text{m}^3/\text{ano}$

C/I =  $122.428 / 3.266.880\text{m}^3/\text{ano} = 0,037$

Entrando na curva média da Figura (16.1) achamos **75% = 0,75**.

Supondo que a descarga total de sedimentos é de 3 ton/dia e para 365 dias teremos:

Dst= 365 dias x 3 ton/dia= 1095ton/ano

$$S = \text{Dst} \times \text{ER} / \gamma_{\text{ap}}$$

$$S = 1095 \times 0,75 / 1,552 = 529\text{m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Tempo de duração do barramento} = 122.428\text{m}^3 / 529\text{m}^3/\text{ano} = 231\text{ anos}$$

### 16.3 Carga de sedimentos conforme Dendy e Bolton, 1976.

Conforme Ponce, 1989 Dendy e Bolton, 1976 pesquisaram nos Estados Unidos 505 reservatórios e estabeleceram as seguintes equações baseadas na média anual do runoff  $Q$  se é menor que 50mm/ano ou se é maior que 50mm/ano e na área da bacia. Ponce, 1989 salienta que as equações fornecem uma primeira aproximação do transporte de sedimentos para ser usado em um projeto regional.

Quando  $Q < 50\text{mm/ano}$  vale a expressão:

$$S/S_R = 1,07 (Q/Q_R)^{0,46} \cdot [1,43 - 0,26 \log(A/A_R)]$$

Quando  $Q > 50\text{mm/ano}$  vale a expressão:

$$S/S_R = 1,19 \exp[-0,11 (Q/Q_R)] \cdot [1,43 - 0,26 \log(A/A_R)]$$

Sendo:

$S$  = sedimentos em ton/ano

$S_R = 643 \text{ ton/ano/km}^2$  = sedimentos em ton/ano para uma área básica  $A_R = 2,56\text{km}^2$

$Q_R = 50\text{mm}$  = média anual de runoff

$Q$  = média anual do runoff da bacia em estudo (mm/ano)

$A_R = 2,56\text{km}^2$  = área básica

$A$  = área da bacia ( $\text{km}^2$ )

#### Exemplo 16.2

Usando o método de **Dendy e Bolton, 1976**, calcular o tempo de enchimento de um reservatório em uma bacia com os seguintes dados:

Área da bacia =  $4,92\text{km}^2 = 492 \text{ ha}$

Precipitação média anual = 1660mm

Runoff médio anual suposto de 40% da precipitação = 664mm

Como  $Q_R = 664\text{mm} > 50\text{mm}$  usaremos a equação:

$$S/S_R = 1,19 \exp[-0,11 (Q/Q_R)] \cdot [1,43 - 0,26 \log(A/A_R)]$$
$$S/S_R = 1,19 \exp[-0,11 (664/50)] \cdot [1,43 - 0,26 \log(4,92/2,56)] = 0,37$$

$$S/S_R = 0,37$$

$$S_R = 643 \text{ ton/ano/km}^2$$

$$S = 643 \times 0,37 = 238 \text{ ton/ano/km}^2$$

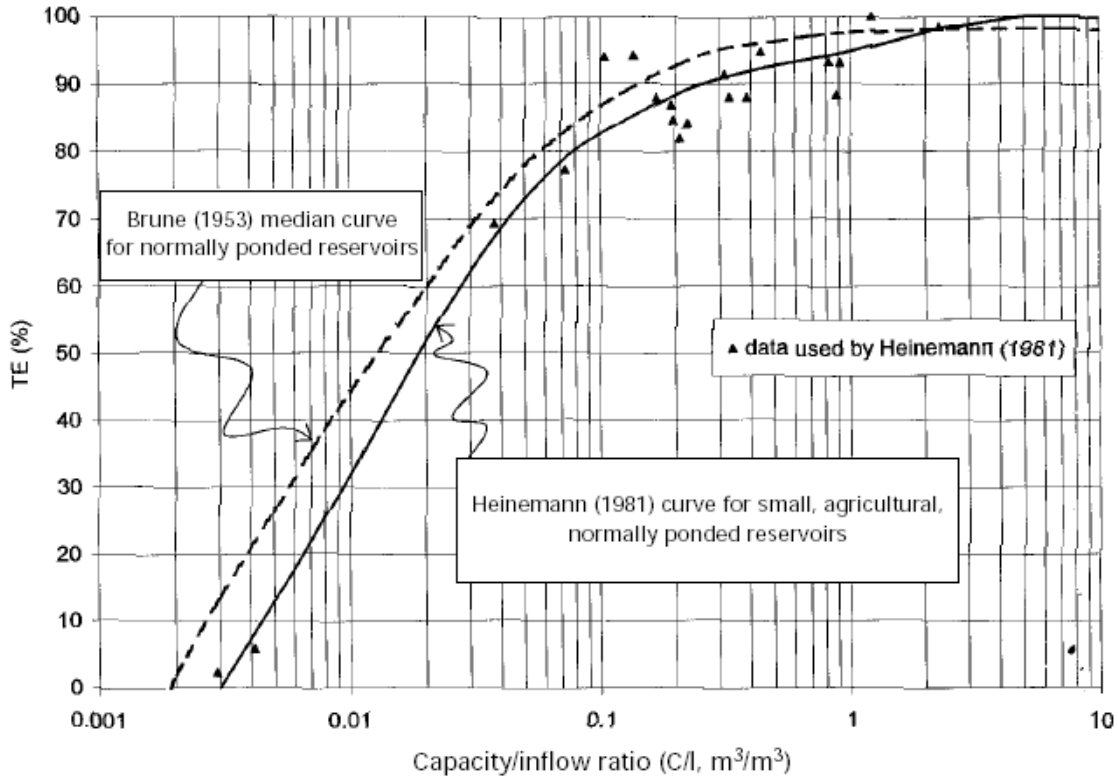
Mas para  $4,92\text{km}^2$  teremos:

$$S_{\text{total}} = 238 \times 4,92 = 1.171 \text{ m}^3/\text{ano} = 1.171/1,552 = 754\text{m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Tempo de duração do barramento} = 122.428\text{m}^3 / 754\text{m}^3/\text{ano} = 162 \text{ anos}$$

### 16.4 Curva para pequenos reservatórios de Heinemann

Conforme Verstraeten e Poesen, 2010, Heinemann, 1981 verificou que a curva de Brune é para grandes reservatórios e para pequenos reservatórios variando de 0,8 Km<sup>2</sup> a 36,31 Km<sup>2</sup> a retenção de sólidos é menor conforme mostra a Figura (16.2);



**Figure 5** Revision of Brune's (1953) curve by Heinemann (1981) for small agricultural reservoirs

Source: After Heinemann, 1981 © The American Water Resources Association

**Figura 16.2-** Curva de Heinemann, 1981 para pequenos reservatórios entre 0,8 Km<sup>2</sup> 36,3 Km<sup>2</sup>

### 16.5 Curva para pequenos reservatórios de Brown, 1943

Heinemann, 1984 mostrou modelos empíricos usados para achar a trap eficiência (TE) de um reservatório e um destes modelos é o de Brown, 1943.

Nas unidades SI temos:

$$TE = 100 \left( 1 - \frac{1}{1 + 0,0021 \times D \times C/W} \right)$$

Sendo:

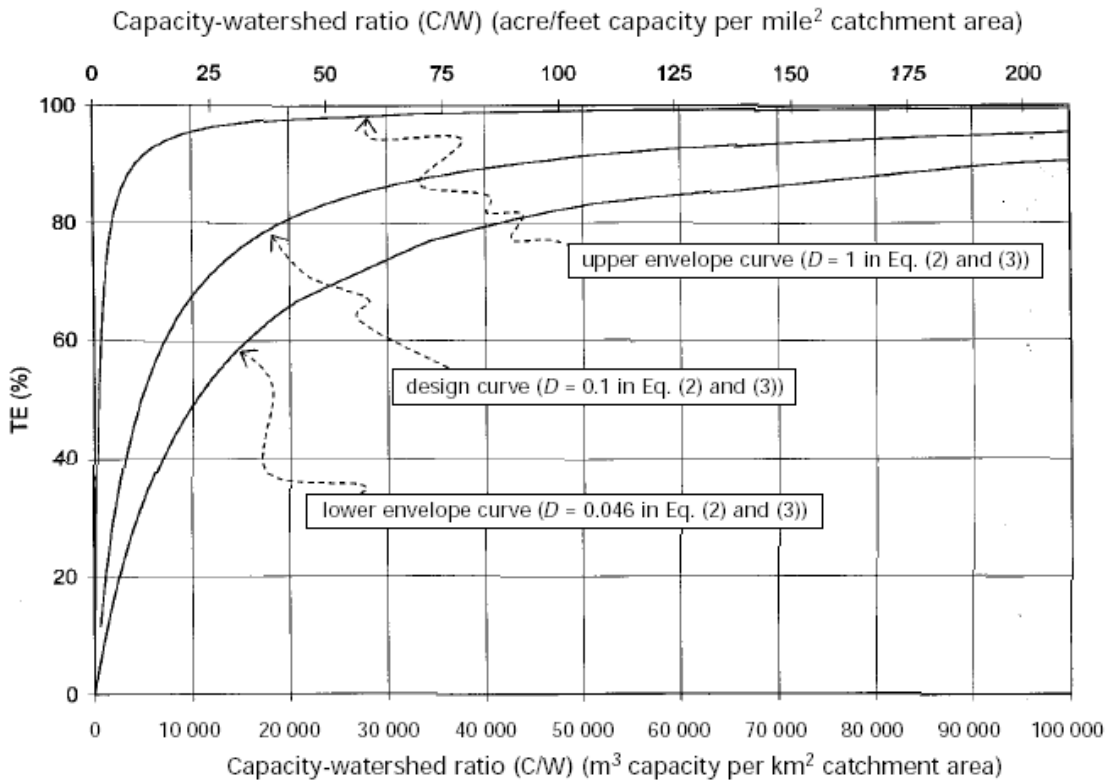
TE= trap efficiency (%)

C= capacidade do reservatório em m<sup>3</sup>

W= área da bacia em Km<sup>2</sup>

D= variável variando entre 0,046 e 1 com média D=0,1

Na Figura (16.3) temos o gráfico de Brown, 1943 que é bom para pequenos reservatórios.



**Figure 2** Trap efficiency related to capacity / watershed ratio

Source: Modified from 'Discussion of *Sedimentation in reservoirs* by J. Witzig'. Brown, C.B., *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1943, reproduced by permission of the American Society of Civil Engineers

**Figura 16.3- Curvas de Brown, 1943 bom para pequenos reservatórios.**

### 16.6 Peso específico dos sedimentos

Vamos usar o método usado pelo *Bureau of Reclamation*, 1987 citado por Yang, 1986.

O *Bureau of Reclamation* classifica a operação dos reservatórios em quatro itens conforme Tabela (16.1).

**Tabela 16.1- Operação de reservatórios conforme US Bureau of Reclamation, 1987**

Operação	Operação do reservatório
1	Sedimentos submersos ou quase sempre submersos
2	Normalmente submersos com moderadas variações de nível
3	Reservatório normalmente vazio
4	Sedimentos no fundo do rio

Uma vez escolhido a operação do reservatório na Tabela (16.1) escolhemos o peso específico inicial da argila, silte e areia e calculamos uma densidade média da seguinte maneira:

$$W_o = W_c \cdot p_c + W_m \cdot p_m + W_s \cdot p_s$$

Sendo:

$W_o$  = peso específico médio ( $\text{kg/m}^3$ )

$p_c$ ,  $p_m$ ,  $p_s$  = porcentagem de argila (clay), silte e areia (sand) respectivamente dos sedimentos de entrada no reservatório.

$W_c$ ,  $W_m$ ,  $W_s$  = peso específico inicial da argila, silte e areia respectivamente que podem ser obtidos na Tabela (112.3).

**Tabela 16.2- Peso específico da argila, silte e areia conforme a operação do reservatório conforme Yang, 1986.**

Operação	Peso específico da Argila em ( $\text{kg/m}^3$ )	Peso específico do Silte em ( $\text{kg/m}^3$ )	Peso específico da Areia em ( $\text{kg/m}^3$ )
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

Ainda conforme Yang, 1986, Miller, 1953 elaborou a seguinte equação:

$$W_T = W_o + 0,4343 \cdot K \cdot [T/(T-1) \cdot \ln(T) - 1]$$

Sendo:

$W_T$  = peso específico médio após T anos de operação

$W_o$  = peso específico médio ( $\text{kg/m}^3$ )

K = constante baseado no tipo de operação do reservatório conforme Tabela (16.3)

**Tabela 16.3- Valos de K para areia, silte e argila conforme operação do reservatório**  
Fonte: Yang, 1986.

Operação	K para areia	K para silte	K para argila
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

Devemos lembrar que os sedimentos que chegam a um reservatório é quase sempre uma mistura de areia, silte e argila em proporções que podem ser achadas em campo ou determinadas por caso semelhante.

Conforme Yang, 1986 cita estudos do *U.S. Bureau of Reclamation*, 1987 que achou uma média de depósito de sedimentos em reservatórios:

**Argila: 23%**

**Silte: 40%**

**Areia: 37%**

### Exemplo 16.2

Considerando que a distribuição dos sedimentos na entrada de um reservatório sempre submerso tem 23% de argila, 40% de silte e 37% de areia, determinar a densidade média dos sedimentos após 100anos de operação.

Trata-se de reservatório com **Operação Tipo 1**

$$W_o = W_c.p_c + W_m.p_m + W_s.p_s$$

$$W_o = 416 \times 0,23 + 1550 \times 0,37 + 1120,40 = 1117,18 \text{ kg/m}^3$$

Vamos achar um valor K médio:

$$K = 0,37 \times 0 + 0,40 \times 91 + 0,23 \times 256 = 95,28$$

$$W_T = W_o + 0,4343.K.[ T/(T-1) . LN (T) -1]$$

$$W_T = 1117,18 + 0,4343 \times 95,28 \times [ 100/(100-1) . LN (100) -1] = 1268 \text{ kg/m}^3$$

### 16.7 Cálculo do assoreamento de um reservatório

Newton de Oliveira Carvalho elaborou um texto denominado “Cálculo do assoreamento e da vida útil de um reservatório na fase de estudos de inventário”.

No estudo é sugerido que a descarga sólida total média anual seja feita da seguinte maneira:

$$\text{Dst} = Q_t \times 365$$

Sendo:

Dst= descarga sólida total anual ( $\text{m}^3 / \text{ano}$ )

Qt= descarga sólida diária (ton/dia)

365dias por ano

É sugerido por Carvalho o estimativa para 100anos de vida de um reservatório usando o método de Brune para se obter a relação ER

$$S = Dst \times ER / \gamma_{ap}$$

Sendo:

S= volume de sedimentos armazenado no reservatório (m<sup>3</sup>/ano)

ER= relação obtido no método de Brune

$\gamma_{ap}$ = peso específico aparente (ton/m<sup>3</sup>)

Para areia adota-se 1,554 ton/m<sup>3</sup>

Para silte: 1,12 a 1,17 ton/m<sup>3</sup>

Para argila: 0,82 ton/m<sup>3</sup>

$$T = V_{res} / S$$

Sendo:

T=tempo de vida útil do reservatório (anos)

V<sub>res</sub>= volume do reservatório (m<sup>3</sup>)

S= volume de sedimentos armazenado no reservatório (m<sup>3</sup>/ano)



#### **16.4 Bibliografia e livros consultados**

- BRUNE, GUNNAR M. *Trap efficiency of reservoirs*. junho de 1953. American Geophysical Union, páginas 407 a 418.
- CARVALHO, NEWTON DE OLIVEIRA et al. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília, DF, 2000, 107 páginas ANEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica)
- CARVALHO, NEWTON DE OLIVEIRA. *Cálculo do assoreamento e da vida útil de um reservatório na fase de estudos de inventário*.
- HAAN, C. T. et al. *Design Hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic press, 1994, 588páginas.
- HAAN, C. T. et al. *Design Hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic press, 1994, 588páginas.
- HADLEY, R. F e WALLING, D. E. *Erosion and sediment yield: some methods of measurement and modeling*. University Press, Cambridge, 1984 21páginas.
- LINSLEY, RAY K et al. *Hydrology for engineers*. 3a ed. McGraw-Hill, 1982, 508 páginas.
- MCCUEN, RICHARD H. *Hydrologic analysis and design*. 2a ed. 1998, 814 páginas.
- PONCE, VICTOR MIGUEL. *Engineering Hydrology- principles and practices*. Prentice-Hall, 1989, ISBN 0-13-325466-1,639 páginas.
- PONCE, VITOR MIGUEL. *Engineering Hydrology*. Prentice-Hall, 640 páginas, 1989, ISBN 0-13-315466-1.
- RAMOS, CARLOS LLORET et al. *Campanhas hidrosedimentométricas na Região Metropolitana de São Paulo*.
- SCAPIN, JULIANA. *Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria, RS*. Dissertação de Mestrado, ano 2005,114páginas.
- USACE. *Stable channel desing functions*. Chapter 12. [www.usbr.gov](http://www.usbr.gov)
- USBR (UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION). *Non cohesive sediment transport*. Chapter 3. [www.usbr.gov](http://www.usbr.gov) .
- VERSTRAETEN, GERT E POESEN, JEAN. *Estimating trap efficiency of smaill reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield*. Publicado por [www.sagepublications.com](http://www.sagepublications.com) em 31 de janeiro de 2010.;