

Relações simplificadas para estimativa do assoreamento de reservatórios

Simplified relations to estimate sedimentation in reservoirs

Jefferson Ronald Quaresma Negreiros
Iran E. Lima Neto

Submissão: 21/11/2014

Revisão: 19/12/2014

Aprovado: 29/12/2014

RESUMO: Esta pesquisa apresenta uma síntese das taxas de assoreamento observadas em reservatórios brasileiros. São identificadas taxas de assoreamento que variam de aproximadamente 1 a 7% do volume inicial por década (inferiores à média mundial de 10%), sendo os reservatórios localizados no Estado do Ceará aqueles que possuem menores taxas, provavelmente devido às densas redes de reservatórios existentes nas bacias de contribuição. Verifica-se também uma tendência geral de decaimento das taxas de assoreamento com o volume inicial dos reservatórios. Em seguida, são propostos três métodos expeditos para estimativa do assoreamento de reservatórios, os quais são baseados em correlações empíricas ajustadas a partir de dados de campo. Os métodos propostos são mais simples que as metodologias existentes na literatura, e dependem basicamente da pluviometria nas bacias de contribuição e do volume inicial dos reservatórios. Em síntese, as diferenças observadas entre as diferentes metodologias foram inferiores a 30%. Isto sugere que qualquer um dos três métodos propostos pode ser utilizado para estimar o assoreamento de reservatórios, em nível de planejamento. Porém, vale ressaltar que apesar da praticidade/simplicidade das equações propostas, medições de campo e/ou modelos mais sofisticados continuam sendo necessários para se avaliar de forma mais precisa o assoreamento de reservatórios.

PALAVRAS-CHAVE: assoreamento; equações empíricas; erosividade; reservatório; volume.

ABSTRACT: This study provides an overview of sedimentation rates observed in Brazilian reservoirs. Sedimentation rates ranging from about 1-7% of the initial volume per decade (below the world average of 10%) are identified, with the reservoirs in the State of Ceará presenting the lowest rates, probably due to the dense reservoir networks existing in the catchments. There is also a general trend toward decline in the rates of sedimentation with the initial volume of the reservoirs. Then, three methods are proposed to quickly estimate the sedimentation of reservoirs, which are based on empirical correlations adjusted from field data. The proposed methods are simpler than those available in the literature, and rely primarily on data on rainfall in the catchments and the initial volume of the reservoirs. In summary, the differences between the different methods were below 30%. This suggests that any of the three proposed methods can be used at the planning level to estimate the reservoir sedimentation. However, it is noteworthy that despite the convenience/simplicity of the proposed equations, field measurements and/or more sophisticated models are still needed to assess more accurately the sedimentation of reservoirs.

KEYWORDS: sedimentation; empirical equations; erosivity; reservoir; volume.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água e energia tem resultado em um aumento significativo no número de reservatórios superficiais, incluindo não apenas as represas de médio e grande porte, mas, sobretudo, os inúmeros pequenos açudes localizados em regiões áridas/semiáridas e as pequenas centrais hidrelétricas (CARVALHO et al., 2000a,b; LIMA NETO et al., 2011; MALVEIRA et al. 2012). Esses reservatórios, no entanto, têm seus volumes reduzidos devido ao asso-

reamento, o que pode influenciar consideravelmente a disponibilidade hídrica (ARAÚJO et al., 2006) e a capacidade de geração de energia (CARVALHO et al., 2000b). Portanto, é de suma importância para a gestão dos recursos hídricos, avaliar o assoreamento de reservatórios, sejam esses de pequeno, médio ou grande porte.

A estimativa do assoreamento de reservatórios é geralmente realizada a partir de medições de campo e/ou modelagem matemática (CARVALHO et al., 2000b; MORRIS et al., 2008). O modelo HidroSed

(ARAÚJO, 2003), por exemplo, simula os processos de erosão, transporte e assoreamento com base na equação universal de perda de solo (USLE), na razão entre a massa de sedimentos que deixa uma bacia e a massa de sedimentos localmente erodida ou razão de transferência (SDR) e na fração de retenção de sedimento no reservatório (η). Para tanto, faz-se necessário avaliar os diversos parâmetros envolvidos na modelagem: fator de erosividade da chuva (R), fator de erodibilidade do solo (K), fatores topográficos que representam o comprimento do declive do terreno natural (L) e a sua declividade (S), fator que representa a cobertura vegetal e o uso do solo (C), fator que reflete práticas conservacionistas (P), além das características geométricas da bacia e dos cursos de água, bem como a relação entre a capacidade do reservatório e a vazão afluente média anual. Cabe salientar que todos esses processos são quantificados através de equações empíricas ajustadas a partir de dados de campo. Lima Neto et al. (2011) desenvolveram uma equação simplificada para estimativa do assoreamento que depende apenas do volume inicial do reservatório (V_0), da massa específica aparente seca do sedimento (ρ), do fator de erosividade (R) e de um coeficiente denominado taxa de retenção de sedimento (ξ), o qual foi ajustado para reservatórios do semiárido cearense. Modelos hidrossedimentológicos mais sofisticados como o WASA-SED permitem ainda avaliar os processos de erosão e transporte em grandes bacias hidrográficas, assim como quantificar a deposição de sedimento ao longo do reservatório (MAMEDE, 2008). Ressalta-se que o referido modelo se baseia em uma forma modificada da equação universal de perda de solo (MUSLE) e em outras equações empíricas para simulação dos processos. Alternativamente, modelos hidrodinâmicos tridimensionais como o Delft3D permitem avaliar detalhadamente a distribuição de sedimento dentro do reservatório (GARCIA; GONÇALVES, 2011). No entanto, tal modelo necessita de medições de campo e/ou algum outro método (USLE ou MUSLE) para fornecer os dados de entrada (carga de sedimento afluente ao reservatório). Além disso, o modelo supracitado demanda tempo e esforço computacional relativamente grandes para realização dos procedimentos envolvidos na modelagem (discretização de malha, calibração, validação e simulação numérica).

Neste contexto, visando contribuir para a gestão dos recursos hídricos, este trabalho apresenta metodologias simplificadas para estimativa rápida

do assoreamento de reservatórios brasileiros. As metodologias se baseiam nos estudos de Araújo (2003) e Lima Neto et al. (2011), sendo propostas novas correlações empíricas obtidas a partir de análise e ajuste de dados disponíveis na literatura. Este estudo é importante pelos seguintes motivos: (1) apresenta uma síntese das taxas de assoreamento observadas para reservatórios localizados em diferentes regiões do Brasil; (2) considera novos reservatórios e novas equações para a erosividade (R) no sentido de reavaliar a taxa de retenção de sedimento (ξ) proposta por Lima Neto et al. (2011); (3) propõe novas metodologias para estimativa do assoreamento que consistem em simplificações dos métodos de Araújo (2003) e Lima Neto et al. (2011); e (4) compara cenários futuros de assoreamento considerando as diferentes metodologias apresentadas.

METODOLOGIA

Coleta e Análise de Dados

Inicialmente foram coletados e analisados dados referentes a 32 reservatórios brasileiros, com capacidades iniciais variando de 0,51 a 29.000 hm^3 , conforme detalhado na Tabela 1. Os reservatórios listados estão localizados em diferentes regiões do Brasil (CO, NE, S e SE), e incluem represas de pequeno, médio e grande porte para fins de abastecimento de água, geração de energia e/ou controle de cheias. Esses reservatórios foram selecionados em função da disponibilidade de dados para aplicação das metodologias propostas na presente pesquisa. Somente foram considerados trabalhos técnico-científicos como fonte de informação. Os dados obtidos foram utilizados para cálculo e comparação das taxas de assoreamento observadas para os reservatórios selecionados.

Em seguida, foram coletados dados pluviométricos de postos localizados nas bacias de contribuição dos 32 reservatórios listados na Tabela 1, os quais foram disponibilizados pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH-CE), Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SRH-SP) e Agência Nacional de Águas (ANA). Somente foram consideradas séries com duração igual ou superior a 20 anos. Além disso, foram calculados os comprimentos e declividades dos rios que abastecem os reservatórios envolvidos nesta pesquisa, utilizando a ferramenta Google Earth. Esses dados, assim como as informações referentes

TABELA 1
Lista dos reservatórios utilizados nesta pesquisa

Reservatório	V_o (hm ³)	Município	Fonte	Assoreamento por década (%)
Epitácio Pessoa	536,40	Campina Grande-PB	Araújo Júnior (2009)	4,31
Barra Bonita	17,60	Barra Bonita-SP	Teixeira et al. (2007)	1,92
Billings	1.300,00	São Paulo-SP	PROAM (2013)	4,31
Cachoeira Dourada	504,00	Itumbiara-GO	Cabral et al. (2006)	8,19
Couto Magalhães	71,41	Alto Araguaia-MT	Enercouth (2013)	1,96
Reserv. dos Mottas	0,61	Guaratinguetá-SP	Simões et al. (2007)	5,65
Balneário da Amizade	2,00	Presidente Prudente-SP	Schwalm (2008)	3,00
Rio Santo Anastácio	2,24	Presidente Prudente-SP	Schwalm (2008)	6,48
Rio São Bento	58,00	Nova Veneza-SC	Schwalm (2008)	5,63
Ribeirão do Torto	0,46	Brasília-DF	Fonseca (2011)	10,63
Paraíso	2,47	São Francisco-PB	Guimarães (2009)	4,86
Pirapama	61,39	Pirapama-PE	Silva (2005)	9,12
Itiquira	8,70	Itiquira-MT	Carvalho et al. (2000a)	16,59
Vacacai-Mirim	5,10	Santa Maria-RS	Dill (2002)	9,80
Santa Bárbara	10,00	Pelotas-RS	Korb (2006)	3,57
Mário Leão	2.127,00	Promissão-SP	Maia e Vilela (2010)	0,65
Luiz Gonzaga	11.000,00	Itaparica-BA	Barbosa et al. (2000)	3,93
Itaipu	29.000,00	Foz do Iguaçu-PR	Carvalho et al. (2000b)	0,70
Tanque Grande	378,00	Guarulhos-SP	Figueira et al. (2011)	0,55
Três Irmãos	5,47	Pereira Barreto-SP	Albertin et al. (2010)	0,82
Reserv. Funil	82,19	Resende-RJ	Silva (2005)	8,02
Vargem das Flores	39,46	Contagem-MG	Santos (2009)	6,34
Itaporanga	10,61	Itaporanga-PB	Guimarães (2007)	7,29
Acarape do Meio	34,10	Redenção-CE	Araújo (2003)	1,07
Canabrava	1,22	Missão Velha-CE	Araújo (2003)	1,29
Cedro	125,70	Quixadá-CE	Araújo (2003)	1,73
São Mateus	10,30	Canindé-CE	Araújo (2003)	3,00
Várzea do Boi	51,90	Banabuiú-CE	Araújo (2003)	2,48
Várzea da Volta	12,50	Moraújo-CE	Araújo (2003)	1,49
Santo Anastácio	0,51	Fortaleza-CE	Araújo (2003)	3,61
Orós	1940,00	Iguatu-CE	Lima Neto et al. (2011)	1,72
Benguê	19,56	Aiuaba-CE	Mamede (2008)	0,68

aos reservatórios da Tabela 1, foram utilizados como parâmetros para as correlações empíricas a serem ajustadas nesta pesquisa.

Desenvolvimento de Metodologias Simplificadas

Conforme mencionado anteriormente, o modelo Hidrosed (ARAÚJO, 2003) necessita de diversos parâmetros para estimativa do assoreamento de reservatórios. Com o objetivo de desenvolver métodos expeditos para estimativa do assoreamento, foram propostas as seguintes metodologias simplificadas:

Método de Lima Neto et al. (2011)

Buscando se quantificar o assoreamento de reservatórios, o seguinte parâmetro, definido como taxa de retenção de sedimento ξ ($t \cdot m^{-3} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot ha \cdot h$), foi proposto por Lima Neto et al. (2011):

$$\xi = \frac{\Delta V}{V_o} \frac{\rho}{\sum R_m} \quad (1)$$

Na Equação (1) V_o é a capacidade inicial do reservatório, ΔV é a redução da capacidade do reservatório (hm^3), ρ é a massa específica aparente seca do sedimento ($t \cdot m^{-3}$) e $\sum R_m$ é a erosividade acumulada da chuva ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1}$), ao longo do período analisado (meses).

Inicialmente, foi realizado o cálculo de ξ para os nove reservatórios do Estado do Ceará listados na Tabela 1 (volumes variando entre 0,51 e 1.940 hm^3), considerando três diferentes equações para o cálculo da erosividade nas suas bacias de contribuição:

- Campinas-SP: $R_m = 67,355 (p^2P^{-1})^{0.85}$, Bertoni e Lombardi Neto (1990);
- Fortaleza-CE: $R_m = 73,989 (p^2P^{-1})^{0.7387}$, Dias e Silva (2003);
- Cabrobró-PE: $R_m = 73,34 + 23,18 (p^2P^{-1})$, Cantalice et al. (2009).

Sendo p e P a precipitação mensal total (mm) e a precipitação média anual (mm) no período analisado, respectivamente. Ressalta-se que tais equações foram utilizadas devido à falta de dados detalhados de precipitação para se calcular a intensidade da chuva de 30 minutos representativa de cada bacia de contribuição.

Cabe salientar que o estudo de Lima Neto et al. (2011) considerou apenas a equação de Bertoni e Lombardi Neto (1990) e os dados de sete reservatórios (volumes de até 125 hm^3) obtidos de Araújo (2003).

Posteriormente, obteve-se o valor de ξ para os 32 reservatórios brasileiros listados na Tabela 1, considerando as seguintes equações para o cálculo da erosividade em cada bacia de contribuição (em função da proximidade dos postos pluviométricos aos seus respectivos reservatórios):

- Cáceres-MT: $R_m = 56,115 (p^2P^{-1})^{0.95}$, Moraes et al. (1991);
- Rondonópolis-MT: $R_m = 133,2 (p^2P^{-1})^{0.537}$, Almeida et al. (2011);
- Goiânia-GO: $R_m = 215,33 + 30,23 (p^2P^{-1})$, Silva et al. (1997);
- Piraju-SP: $R_m = 72,549 (p^2P^{-1})^{0.849}$, Roque et al. (2001);
- Juquiá-SP: $R_m = 207,21 + 40,65 (p^2P^{-1})$, Silva et al. (2009);
- Teodoro Sampaio-SP: $R_m = 106,82 + 46,96 (p^2P^{-1})$, Colodro et al. (2002);
- Santa Bárbara-MG: $R_m = 170,59 (p^2P^{-1})^{0.64}$, Silva et al. (2010);
- Barra do Piraí-RJ: $R_m = 50,36 + 24,53 (p^2P^{-1})$, Gonçalves et al. (2006);
- Oeste do Paraná-PR: $R_m = 182,86 + 56,21 (p^2P^{-1})$, Rufino et al. (1993);
- Campos Novos-SC: $R_m = 59,265 (p^2P^{-1})^{1.087}$, Bertol (1994);
- Santa Rosa-RS: $R_m = 59,265 (p^2P^{-1})^{1.087}$, Mazzurana et al. (2009);
- Caruaru-PE: $R_m = 61,81 (p^2P^{-1})$, Cantalice et al. (2009);
- Petrolina-PE: $R_m = 73,34 + 23,18 (p^2P^{-1})$, Cantalice et al. (2009).

Após o cálculo de valores de ξ para os nove reservatórios do Estado do Ceará e em seguida para os 32 reservatórios brasileiros, obteve-se o coeficiente de variação (CV) para cada caso.

Finalmente, a Equação (2) foi utilizada para avaliar a redução anual do volume dos reservatórios selecionados em função do assoreamento, ao longo de um período de 100 anos. Para o cálculo da erosividade, considerou-se que as séries de precipitação observadas poderiam ser reproduzidas ao longo do período de análise.

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - \frac{\xi R_{m,i+1}}{\rho} \right) \quad (2)$$

Método Simplificado

Este método consiste em uma simplificação da metodologia de Lima Neto et al. (2011). Neste caso, propõe-se um novo parâmetro R'_m (em vez da erosividade R) para incorporar o efeito da variabilidade das precipitações em cada local:

$$R'_m = (p)^x (P)^y \quad (3)$$

Sendo x e y coeficientes a serem ajustados. Além disso, assume-se que a variação de ρ (massa específica aparente seca do sedimento) entre os diferentes reservatórios é pequena (inferior a 15%), sendo esse parâmetro eliminado da Equação (1). Dessa forma, o parâmetro ξ passa a ser substituído por ϕ :

$$\phi = \frac{\Delta V}{V_o \sum R'_m} \quad (4)$$

Os coeficientes x e y foram ajustados de forma a se minimizar os valores de CV obtidos através do cálculo de ϕ . É importante destacar que o parâmetro ϕ também representa uma taxa de retenção de sedimento. Porém, diferentemente de ξ , sua unidade depende do ajuste dos coeficientes x e y na Equação (3). Logo, ϕ terá diferentes unidades para os reservatórios do Ceará e do Brasil, uma vez que diferentes valores de x e y serão obtidos para cada caso.

Logo, após a obtenção de ϕ para os nove reservatórios do Estado do Ceará e em seguida para os 23 reservatórios brasileiros, pode-se usar a Equação (5) para análise da evolução do volume de reservatórios, considerando-se novamente que as séries de precipitação observadas poderiam ser reproduzidas ao longo do período de análise (100 anos).

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - \phi R'_{m,i+1} \right) \quad (5)$$

Correlações Gerais

A terceira e última metodologia proposta no presente estudo consiste na obtenção de correlações

gerais para o volume assoreado (V_a) em função dos seguintes parâmetros: capacidade inicial do reservatório (V_o), erosividade da chuva (R), comprimento do rio principal (L) e declividade do rio principal (S). Note que essa metodologia consiste em uma simplificação do método de Araújo (2003), que considera todos os parâmetros da equação universal de perda de solo (USLE), além da razão de transferência (SDR) e da fração de retenção de sedimento no reservatório (η). Assim, o volume assoreado pode ser descrito pelas seguintes equações gerais:

$$V_a = \alpha \theta^\beta \quad (6)$$

$$\theta = (V_o)^a (\sum R)^b (L)^c (S)^d \quad (7)$$

Sendo os valores de a , b , c , d , α e β ajustados de forma a se maximizar os coeficientes de determinação (R^2) obtidos através de curvas V_a x θ .

Após o ajuste dos parâmetros supracitados, pode-se usar a Equação (8) para análise da evolução do volume de reservatórios ao longo do período de 100 anos:

$$V_{i+1} = V_i - V_a \quad (8)$$

RESULTADOS

Taxas de assoreamento

A Figura 1 mostra uma síntese das taxas de assoreamento obtidas para os reservatórios listados na Tabela 1. Observa-se que os reservatórios brasileiros localizados nas regiões CO, NE, S e SE apresentam em geral taxas de assoreamento inferiores à média mundial reportada por Morris et al. (2008), que é de aproximadamente 10% da capacidade inicial (V_o) por década. Nota-se que os reservatórios do Estado do Ceará são os que apresentam menores taxas de assoreamento em comparação com os demais da região NE (e demais regiões, em geral), provavelmente devido à elevada quantidade de açudes de montante que retêm grande parte do volume de sedimento que noutrora chegaria aos açudes de jusante, corroborando os resultados de Lima Neto et al. (2011). Percebe-se ainda uma tendência de decaimento das taxas de assoreamento com V_o , conforme discutido por Carvalho et al. (2000b).

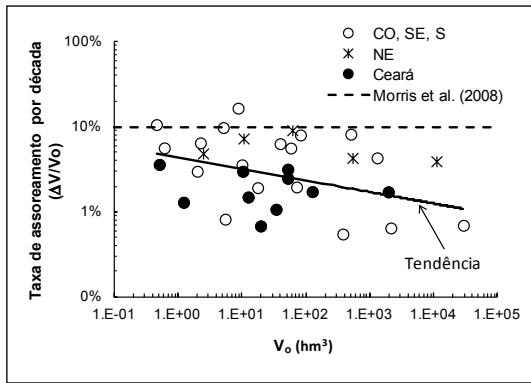


FIGURA 1. Síntese das taxas de assoreamento observadas em reservatórios de diferentes regiões do Brasil. A linha sólida indica uma tendência geral de decaimento da taxa com a capacidade inicial dos reservatórios, enquanto a linha tracejada indica uma taxa média mundial reportada por Morris et al. (2008).

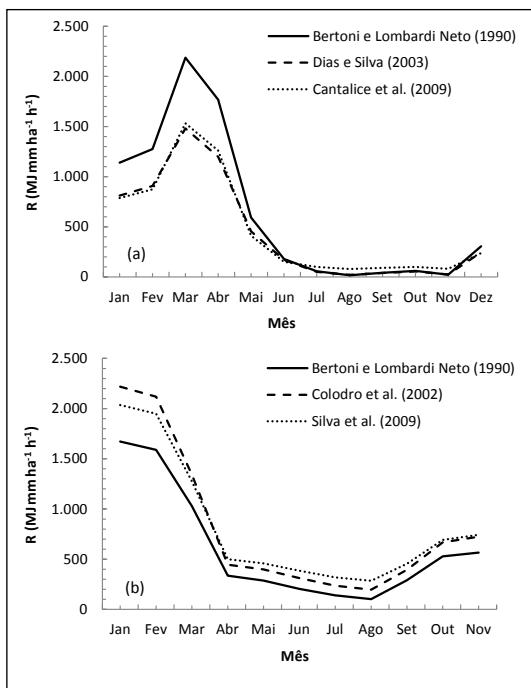


FIGURA 2. Valores médios mensais de erosividade (R) obtidos utilizando diferentes equações de dois dos postos pluviométricos adotados na presente pesquisa: (a) Iguatu-CE e (b) São Paulo-SP.

Erosividades

As Figuras 2(a) e 2(b) mostram como exemplo valores médios mensais de erosividade (R) obtidos utilizando diferentes equações de dois dos postos pluviométricos adotados na presente pesquisa, Iguatu-CE e São Paulo-SP, respectivamente. A Figura 2(a) sugere que praticamente não há desagregação de sedimento (valor de R próximo de zero) durante o período de julho a novembro (período seco) na bacia de contribuição referente ao posto de Iguatu-CE. Pode-se notar também que a equação de Bertoni e Lombardi Neto (1990) tende a fornecer valores de R superiores aos das demais equações obtidas especificamente para a região Nordeste do Brasil. Por outro lado, a Figura 2(b) mostra um valor mínimo de R superior a 100 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, o que indica que mesmo para períodos de baixas pluviosidades (mês de agosto), espera-se a ocorrência de transporte de sedimento na bacia referente ao posto de São Paulo-SP. Também são observadas diferenças nos valores de R calculados com as diferentes equações.

Metodologia de Lima Neto et al. (2011) para os reservatórios do Estado do Ceará

As taxas de retenção de sedimento (ξ) obtidas para os reservatórios do Estado do Ceará utilizando a equação de Dias e Silva (2003) são mostradas na Figura 3. Obteve-se um coeficiente de variação $CV = 52,62\%$ e um valor médio $\xi = 4,53 \times 10^{-7} \text{ t.m}^{-3} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha.h}$. Resultados semelhantes foram obtidos para as outras duas equações adotadas para o Estado do Ceará: $CV = 51,04\%$ e $\xi = 3,36 \times 10^{-7} \text{ t.m}^{-3} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha.h}$, para a equação de Bertoni e Lombardi Neto (1990); e $CV = 52,12\%$ e $\xi = 4,15 \times 10^{-7} \text{ t.m}^{-3} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha.h}$, para a equação de Cantalice et al. (2009). É importante destacar que esses valores foram próximos ao valor de $\xi = 3,65 \times 10^{-7} \text{ t.m}^{-3} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha.h}$ sugerido por Lima Neto et al. (2011). Portanto, tal valor será adotado como referência para estimativa do assoreamento de reservatórios localizados no Estado do Ceará, através da Equação (9):

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - \frac{3,65 \times 10^{-7} R_{m,i+1}}{\rho} \right) \quad (9)$$

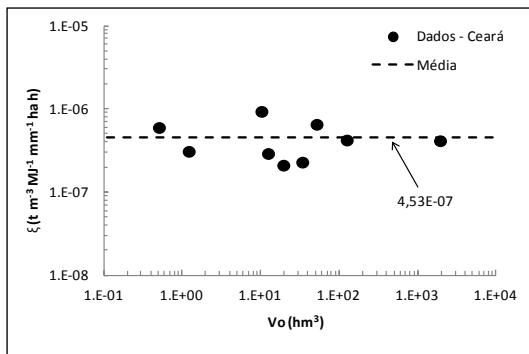


FIGURA 3. Taxas de retenção de sedimento (ξ) obtidas para os reservatórios do Estado do Ceará.

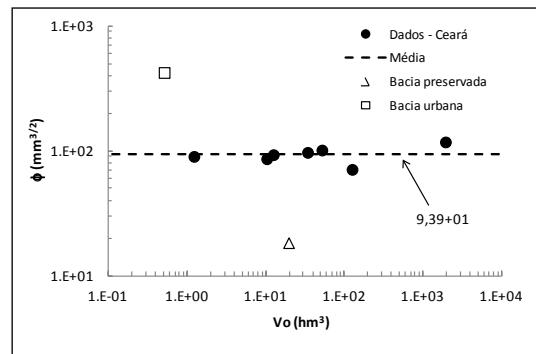


FIGURA 4. Valores de ϕ obtidos para os reservatórios do Estado do Ceará.

Método Simplificado para os reservatórios do Estado do Ceará

A Figura 4 mostra os valores de ϕ obtidos para os reservatórios do Estado do Ceará utilizando a equação de Bertoni e Lombardi Neto (1990), mantendo-se apenas os reservatórios típicos localizados em zona rural, isto é, eliminando-se os reservatórios Santo Anastácio (localizado na zona urbana de Fortaleza-CE) e o reservatório Benguê (localizado em bacia preservada no município de Aiuba-CE). Assim, ajustando os valores de x e y para 1,5 e -3,0, respectivamente, obteve-se um coeficiente de variação mínimo de $CV = 15,25\%$ e um valor médio de $\phi = 9,39 \times 10 \text{ mm}^{3/2}$. Consistentemente, devido ao aporte de sedimento relativamente baixo, o reservatório localizado em bacia preservada (Benguê) apresentou valor de ϕ inferior à média, enquanto o reservatório localizado em bacia urbana (Santo Anastácio) apresentou valor de ϕ superior à média, haja vista a contribuição não apenas de sedimentos de origem mineral, mas também de esgotos e resíduos sólidos urbanos, conforme descrito em Araújo (2003). Portanto, adotando os valores supracitados de x , y e ϕ , a Equação (10) é proposta para estimativa do assoreamento de reservatórios do Estado do Ceará:

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - 9,39 \times 10 R'_{m,i+1} \right) \text{; sendo} \\ R'_m = (p)^{1,5} (P)^{-3,0} \quad (10)$$

Metodologia de Lima Neto et al. (2011) para os reservatórios brasileiros

As taxas de retenção de sedimento (ξ) obtidas para os reservatórios do Brasil utilizando as equações de cada local são mostradas na Figura 5. Obteve-se um coeficiente de variação $CV = 104,77\%$ e um valor médio $\xi = 9,73 \times 10^{-7} \text{ t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha} \cdot \text{h}$, sendo este superior ao dobro do valor adotado para o Estado do Ceará ($\xi = 3,65 \times 10^{-7} \text{ t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha} \cdot \text{h}$). Isto confirma que os reservatórios do Estado do Ceará apresentam em geral menores taxas de assoreamento que os reservatórios localizados nas demais regiões do Brasil. A Equação (11) é proposta para estimativa do assoreamento de reservatórios brasileiros:

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - \frac{9,73 \times 10^{-7} R_{m,i+1}}{\rho} \right) \quad (11)$$

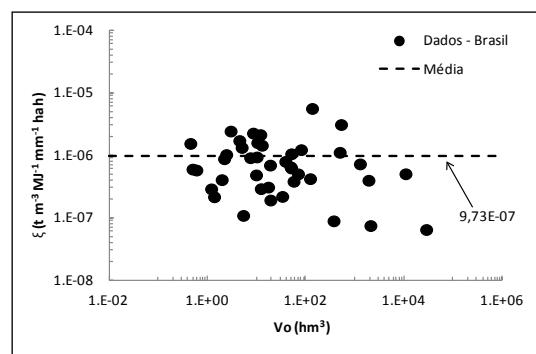


Figura 5. Taxas de retenção de sedimento (ξ) obtidas para os reservatórios do Brasil.

Método Simplificado para os reservatórios brasileiros

Os valores de ϕ obtidos para os reservatórios do Brasil são mostrados na Figura 6. Assim, ajustando os valores de x e y para 1,0 e -0,5, respectivamente, obteve-se um coeficiente de variação mínimo de $CV = 77,66\%$ e um valor médio de $\phi = 1,48 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1/2}$. Logo, considerando os valores supracitados de x , y e ϕ , a Equação (12) é proposta para estimativa do assoreamento de reservatórios brasileiros:

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - 1,48 \times 10^{-4} R'_{m,i+1}\right), \text{ sendo}$$

$$R'_m = (p)^{1,0} (P)^{-0,5} \quad (12)$$

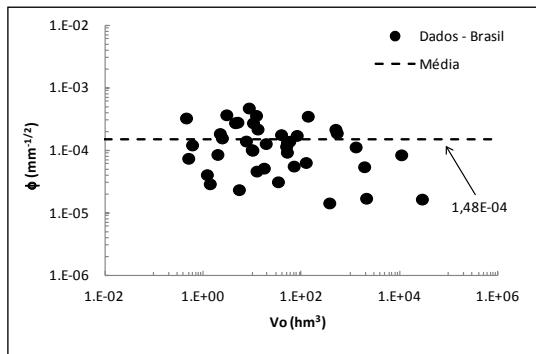


Figura 6. Valores de ϕ obtidos para os reservatórios do Brasil.

Correlações Gerais

Por fim, a última metodologia proposta no presente estudo consiste na obtenção de correlações gerais para o volume assoreado (V_a) em função dos seguintes parâmetros: capacidade inicial do reservatório (V_0), erosividade da chuva (R), comprimento do rio principal (L) e declividade do rio principal (S). O melhor ajuste ($R^2 = 0,8915$) resultou nos seguintes valores para os parâmetros: $a = 1,0$; $b = 0,15$; $c = 0,10$; $d = 0,05$; $\alpha = 1,3 \times 10^{-3}$; e $\beta = 0,881$. Isto indica que, conforme esperado, o assoreamento é diretamente proporcional aos parâmetros supracitados sendo, porém, o efeito de a (exponente de V_0) dominante em relação aos demais. Portanto, ajustou-se uma nova correlação em função apenas de V_0 (isto é, considerando-se $a = 1,0$; $b = 0$; $c = 0$; e $d = 0$), obtendo-se um bom ajuste ($R^2 = 0,8897$) para valores de $\alpha = 4,4 \times 10^{-3}$ e $\beta =$

0,8979. A Figura 7 mostra o ajuste da Equação (15) (Correlação Geral) aos dados de campo.

$$V_{i+1} = V_i - 4,4 \times 10^{-3} (V_i)^{0,8979} \quad (13)$$

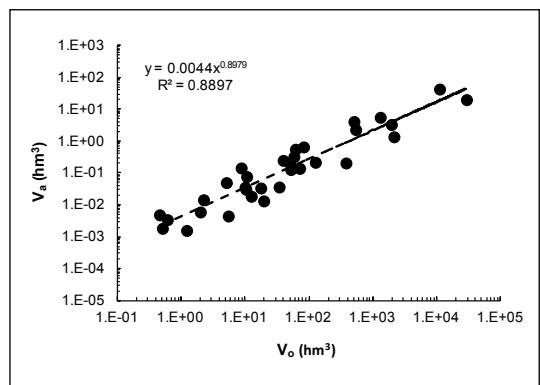


Figura 7. Correlação geral obtida para os reservatórios do Brasil.

Simulação da redução da capacidade de reservatórios

A Figura 8 mostra simulações para um período de 100 anos da redução da capacidade de reservatórios localizados no Estado do Ceará (Várzea da Volta e Orós) utilizando a Metodologia de Lima Neto et al. (2011) [Equação (9)], o Método Simplificado [Equação (10)] e a Correlação Geral [Equação (13)]. Consistentemente, o Método Simplificado forneceu taxas de assoreamento inferiores à Metodologia de Lima Neto et al. (2011), que por sua vez forneceu taxas inferiores à Correlação Geral para ambos os casos [Figuras 8(a) e 8(b)]. Por outro lado, a Figura 9 mostra simulações para reservatórios localizados no Estado de São Paulo (Barra Bonita e Billings) utilizando a Metodologia de Lima Neto et al. (2011) [Equação (11)], o Método Simplificado [Equação (12)] e a Correlação Geral [Equação (13)]. Nesse caso, a Correlação Geral forneceu taxas de assoreamento inferiores ao Método Simplificado, que por sua vez forneceu taxas inferiores à Metodologia de Lima Neto et al. (2011) para ambos os casos [Figuras 9(a) e 9(b)]. Em geral, as diferenças observadas entre as diferentes metodologias foram inferiores a 30%, o que sugere que qualquer um dos métodos supracitados pode ser utilizado para estimar o assoreamento de reservatórios, pelo menos em nível de planejamen-

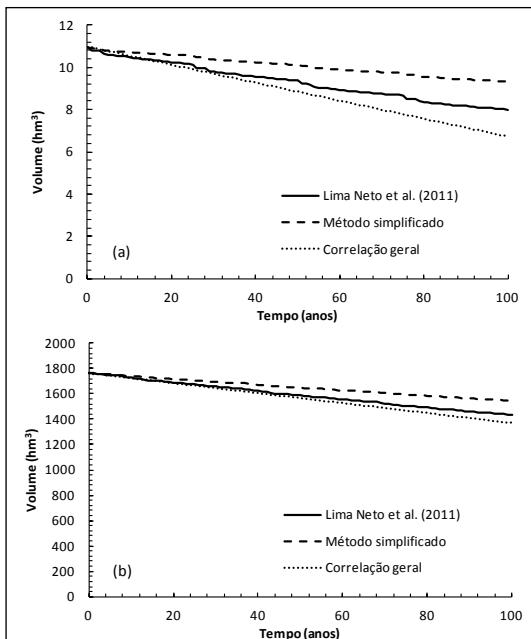


FIGURA 8. Simulação da redução da capacidade de reservatórios do Estado do Ceará em função do assoreamento, considerando diferentes metodologias: (a) Reservatório Várzea da Volta e (b) Reservatório Orós.

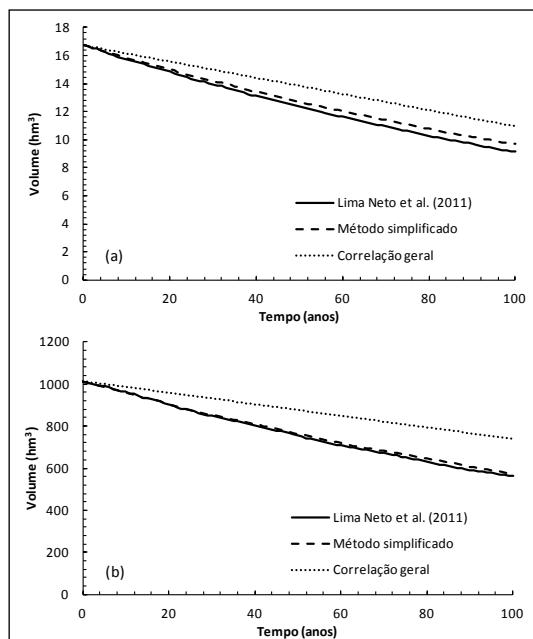


FIGURA 9. Simulação da redução da capacidade de reservatórios do Estado de São Paulo em função do assoreamento, considerando diferentes metodologias: (a) Reservatório Barra Bonita e (b) Reservatório Billings.

to. No entanto, vale ressaltar que a Metodologia de Lima Neto et al. (2011) e o Método Simplificado trazem informações sobre as distribuições de chuva (erosividade) nas bacias de contribuição, e devem ser utilizados preferencialmente. Esses dois métodos podem inclusive ser utilizados para prever o impacto de mudanças climáticas no assoreamento de reservatórios. Todavia, na ausência de dados mais detalhados, a Correlação Geral pode ser utilizada.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma síntese das taxas de assoreamento observadas para reservatórios localizados em diferentes regiões do Brasil. Verificou-se que os reservatórios brasileiros apresentam taxas de assoreamento inferiores à média mundial de 10% do volume inicial por década. Observou-se ainda que os reservatórios localizados no Estado do Ceará possuem taxas de assoreamento em geral inferiores à média nacional, provavelmente devido às densas redes de reservatórios existentes nas bacias de contribuição.

Verificou-se também uma tendência geral de decaimento das taxas de assoreamento com o volume inicial dos reservatórios, corroborando resultados disponíveis na literatura.

Como principal contribuição do artigo, foram propostos três métodos expeditos para estimativa do assoreamento de reservatórios do Estado do Ceará e do Brasil em geral, os quais foram baseados em correlações empíricas (Equações 9, 10, 11, 12 e 13) obtidas a partir do ajuste de diferentes parâmetros a dados de campo. Tais métodos são mais simples que as metodologias existentes, e dependem basicamente da pluviometria nas bacias de contribuição e do volume inicial dos reservatórios. Em síntese, as diferenças observadas entre as diferentes metodologias foram inferiores a 30%, o que sugere que qualquer um dos três métodos propostos pode ser utilizado para estimar o assoreamento de reservatórios, principalmente em nível de planejamento. Os métodos baseados em informações de pluviometria podem inclusive ser utilizados para prever o impacto de mudanças climáticas no assoreamento de reservatórios.

Entretanto, cabe salientar que apesar da praticidade/simplicidade das equações propostas, medições de campo e/ou modelos mais sofisticados continuam

sendo necessários para se avaliar detalhadamente como a distribuição de sedimentos ocorre dentro dos reservatórios.

14

Referências

- ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Cálculo do Volume e Deposição de Sedimentos do Reservatório de Três Irmãos – SP. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.15, n.4, p.57-67, 2010.
- ALMEIDA, C. O. S.; AMORIN, R. S. S.; ELTZ, F. L. F. et al. Correlação do índice de erosividade (EI30) com o coeficiente de chuvas em Cáceres (MT) e Rondonópolis (MT). Proc. XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Uberlândia, p.1-4, 2011.
- ARAÚJO, J. C. Assoreamento de reservatórios do semiárido: Modelagem e validação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.8, n.2, p.39-56, 2003.
- ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semi-arid Brazil. Hydrological Sciences Journal, v.51, n.1, p.157-170, 2006.
- ARAÚJO JÚNIOR, R. J. A evolução temporal dos níveis Tróficos do açude Epitácio Pessoa, semi-árido paraibano. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual da Paraíba, 2009.
- BARBOSA, C.; BARBOSA, E.; CANDEIAS, A. L. B. Algumas considerações sobre o Reservatório de Itaparica utilizando análise multitemporal. V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Presidente Prudente - SP, 24-27 de julho de 2000, ISSN 1981-6251, p. 1119-1122. (2000).
- BERTOL, I. Evaluation for rain erosivity for Campos Novos (SC) during the 1981–1990 period. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.29, p.1453-1458, 1994.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 2^a ed. Ed. Ícone: São Paulo, 1990.
- CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V. A.; FERNANDES, L. A. et al. Avaliação do Estado de Assoreamento do Reservatório de Cachoeira Dourada (GO/MG). Revista Sociedade & Natureza, v.21, n.1, p.99-116, 2006.
- CANTALICE, J. R.; BEZERRA, S. A.; FIGUEIRA, S. B. et al. D. Isoerodents of Pernambuco State – Brazil: 1 st. approximation. Caatinga, v.22, p.75-80, 2009.
- CARVALHO, N. O.; GUILHON, L. G.; TRINDADE, P. A. O assoreamento de um pequeno reservatório - Itiquira: Um estudo de caso. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.5, n.1, p.69-79, 2000a.
- CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. ANEEL, Brasília-DF, 2000b.
- COLODRO, G.; CARVALHO, M. P.; ROQUE, C. G.; PRADO, R. M. Rainfall erosivity: its distribution and relationship with the non-recording rain gauge precipitation at Teodoro Sampaio, São Paulo, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.26, p.809–818, 2002.
- DIAS, A. S.; SILVA, J. R. C. Rainfall erosivity in Fortaleza, Ceará State, Brazil: I—distribution, probability of occurrence and return period — 1st approximation. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.335–345, 2003.
- DILL, P. R. J. Assoreamento do Reservatório do Vacacai-Mirim e sua relação com a deterioração da bacia hidrográfica contribuinte. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2002.
- ENERCOUTO Estudo de Impacto Ambiental (EIA): Avaliação do Assoreamento do reservatório de Couto Magalhães, 2013. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Hidreletricas/CoutoMagalhaes/EIA/Textos/VOL_II_Co>. Acesso em 25 de setembro de 2013.
- FIGUEIRA, R. C. L.; LABUTO, G.; OLIVEIRA, A. M. S. et al.. Estudo do Assoreamento do Reservatório de Tanque Grande- SP. Geociências, v.30, n.2, p.254-255, 2011.
- FONSECA, J. M. Assoreamento em Reservatórios estudo de caso da Represa Ribeirão do Torto no Distrito Federal. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, p.7-11, 2011.
- GARCIA, G. E.; GONÇALVES, J. E. Implementação de Modelo Numérico para Avaliação do Transporte de Sedimentos no Reservatório de Itaipu-PR. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.16, n.3, p.49-57, 2011.
- GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. et al. Indices and spatialization of rainfall erosivity in Rio de Janeiro State, Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, p.269–276, 2006.
- GUIMARAES, C. L. Geotecnologia na determinação do assoreamento do açude Cachoeira dos Alves, Itaporanga-PB: um desenvolvimento metodológico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2007.
- GUIMARÃES, C. L.; RIBEIRO, G. N.; VIEIRA, L. J. S. Levantamento batimétrico do açude Paraíso São Francisco- PB, Revista Verde, v.4, n.1, p.6-7, 2009.
- KORB, C. C. Identificação de Depósitos Tecnogênicos no Reservatório Santa Bárbara, Pelotas (RS). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

- LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. *Hydrological Sciences Journal*, v.56, p.319-333, 2011.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Rainfall erosivity - its distribution and relationship with soil loss at Campinas, state of São Paulo, Brazil. *Bragantia*, v.51, p.189-196, 1992.
- MAIA, A. G.; VILELA, S. W. Análise Qualitativa do Assoreamento do Reservatório de Promissão (SP). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.15, n.1, p.39-46, 2010.
- MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GUENTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil. *J. Hydrol Eng*, v.17, p.109-117, 2012.
- MAMEDE, G. L. Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management. PhD dissertation, University of Potsdam, Germany. 2008.
- MAZURANA, J.; CASSOL, E.A.; SANTOS, L.C. et al. Erosivity, hydrological patterns and return period of erosive rainfalls at Santa Rosa, RS - Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.975-983, 2009.
- MORAIS, L.F.B.; SILVA, V.; NASCHENVENG, C. et al.. Índice EI30 e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, p.339-344, 1991.
- MORRIS, G. L.; ANNANDALE, G.; HOTCHKISS, R. Reservoir Sedimentation, Chapter 12, In *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*, García MH (ed.), ASCE Manual of Practice 110, American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, Va, 2008.
- PROAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE PROTEÇÃO AMBIENTAL Assoreamento degrada Represa Billings. 2013. Disponível em: <http://www.proam.org.br/noticias.asp?ID=35>. Acesso em: 25/09/2013.
- ROQUE, C. G.; CARVALHO, M. P.; PRADO, R. M. Rainfall erosivity factor at Piraju (SP), Brazil: distribution, probability of occurrence, return period and correlation with rainfall coefficient. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.147-156, 2001.
- RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: terceira aproximação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.17, p.439-444, 1993.
- SANTOS, S. P. Nova batimetria, morfometria e diagnóstico de áreas de assoreamento em um reservatório tropical periurbano (Vargem das Flores - Minas Gerais, Brasil). Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. Laboratório de Gestão Ambiental de Reservatórios, Belo Horizonte, 2009.
- SCHWALM, H. Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: estudo de caso da barragem do Rio São Bento, Siderópolis, Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2008.
- SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L.; BLANCANEAUX, P.; CURI, N. Rainfall erosivity indices in the Goiânia region, Goiás state, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.32, p.977-985, 1997.
- SILVA, R. B.; IORI, P.; ARMESTO, C.; BENDINI, H. N. Assessing rainfall erosivity with artificial neural networks for the Ribeira Valley, Brazil. *International Journal of Agronomy*. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/365249>, 2010.
- SILVA, R. B.; IORI, P.; SILVA, F. A. M. Proposition and compare of equations to estimate the rainfall erosivity in two cities of São Paulo state. *Irriga*, v.14, p.533-547, 2009.
- SILVA, R. M. Previsão hidrossedimentológica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 2005.
- SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; NUNES, C. M. F.; MARCH, T. C. Variabilidade Espacial do Potencial de Erosão e seus Efeitos no processo de Sedimentação de um Pequeno Reservatório – A Bacia dos Mottas, Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.12, n.3, p.177-187, 2007.
- TEIXEIRA, F. J.; ALBERTIN, L. L.; LOUREIRO, D. D. T. et al. Previsão da vida útil do Reservatório de Barra Bonita utilizando digitalização de mapas e comparação batimétrica. *Revista Minerva*, v.4, n.1, p.1-10, 2007.

Jefferson Ronald Quaresma Negreiros | Mestrando, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará. E-mail: jeffersonquaresma@bol.com.br.

Iran e. Lima Neto | Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará E-mail: iran@deha.ufc.br.

