

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SIMULAÇÃO AUTOMÁTICA NO HEC-RAS: ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

Leonardo da Silva Machado¹; Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira²; Marconi de Arruda Pereira³; Heber Tormentino de Souza⁴; Márcia Maria Lara Pinto Coelho⁵ & Eber José de Andrade Pinto⁶

RESUMO – Os reservatórios de água estão sujeitos a algum grau de assoreamento, e esse processo pode causar inúmeros problemas, afetando a funcionalidade para a qual foi construído. Por isso, na literatura, existem alguns modelos que objetivam estimar o assoreamento. No entanto, todos eles têm um caráter determinístico, e o assoreamento, devido às inúmeras incertezas envolvidas em seus parâmetros, além de sua variabilidade espaço-temporal, deve ser considerado como estocástico. O *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS 5.0.3) é um *software* amplamente utilizado na área de Hidráulica, mas estima o assoreamento de forma determinística. Nesse sentido, neste trabalho, foram desenvolvidos códigos computacionais para fazer com que este programa estime estocasticamente a sedimentação em reservatórios. A partir da implementação dos códigos, foi possível preencher automaticamente os dados de vazões e da curva-chave de sedimentos no HEC-RAS. Por fim, foi possível trabalhar com milhares de valores desses parâmetros hidrossedimentológicos e obter milhares de resultados de perfis longitudinais do assoreamento para seções transversais de interesse.

ABSTRACT – Water reservoirs are subject to some degree of silting, and this process can cause numerous problems, thus affecting the functionality for which it was built. Therefore, in the literature, there are some models that aim to estimate the silting. However, all of them have a deterministic character, and the siltation, due to the innumerable uncertainties involved in its parameters, besides its spatiotemporal variability, must be considered as stochastic. Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS 5.0.3) is a widely used software in the area of Hydraulics, but it estimates sedimentation in a deterministically way. Accordingly, in this work, computational codes were developed to make this program estimate stochastically the sedimentation in the reservoir of a Small Hydropower Plant (SHP). From the codes implementation it is possible to automatically fill the flow series and sediment key curve data in the HEC-RAS. Lastly, it is possible to work with thousands of values of these hydrosedimentological parameters and to have thousands of silting results, so that the silting occurs in a cross section and/or in a longitudinal section.

Palavras-Chave – Controlador; Hidrossedimentologia.

1) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 999136-2702, leonardodasilvamachado@hotmail.com

2) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 98716-1876, emmanuel.teixeira@ufsj.edu.br

3) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 99890-6715, marconi@ufsj.edu.br

4) Universidade Federal de São João del-Rei, Rod. MG 443 km 07, Ouro Branco MG, (31) 99683 - 1136, heber@ufsj.edu.br

5) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, (31) 98716-1876, lara@ehr.ufmg.br

6) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, (31) 98716-18767, eber.andrade@cprm.gov.br

INTRODUÇÃO

Problemas decorrentes do assoreamento em reservatório dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume, o que pode interferir no uso para o qual ele foi construído. Segundo Yang (2003), globalmente a taxa de perda anual total da capacidade de armazenamento de reservatórios devido à sedimentação é estimada em 1 a 2% da capacidade de armazenamento total. No Brasil, um estudo realizado em 1994, indicou uma perda de capacidade de armazenamento de 0,5% ao ano para os reservatórios do país (CARVALHO, 2008). Entretanto, atualmente, como as práticas não conservativas do uso do solo são frequentes, o que influencia no aporte de sedimentos aos reservatórios, na maioria dos trabalhos publicados na literatura especializada, segundo Brito (2013), a perda encontrada foi superior a 2%.

O assoreamento pode causar também outros problemas, como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbinas; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia diminuindo o calado para a navegação; além de afetar a segurança da barragem (ALBERTIN *et al.*, 2010). Em se tratando de reservatórios de hidrelétricas, Maia (2006) apresenta que o assoreamento é um sério problema que leva à diminuição da capacidade de geração de energia das usinas, visto que ocorre alteração na vazão regularizada. Assim, o faturamento da concessionária com a venda de energia elétrica será reduzido, o que, conseqüentemente, acarretará na redução da compensação financeira que é paga aos Estados, Distrito Federal, Municípios e Órgãos da União, receita esta proporcional à geração de energia elétrica. Lenhardt *et al.* (2009) afirmam que as conseqüências do assoreamento em reservatórios de hidrelétricas são numerosas, inclusive em termos de segurança da barragem e impactos ecológicos.

Assim, vistos os problemas causados pelo assoreamento, tornam-se importantes metodologias que visem prever taxas de sedimentação, a qual é essencial para a fase de projeto e operação de um reservatório. Na literatura, encontram-se vários modelos que foram desenvolvidos para esse fim, entre eles, os modelos matemáticos, os quais representam os fenômenos físicos que ocorrem durante o assoreamento de um reservatório, por meio de equações diferenciais. Podem-se citar alguns trabalhos de modelagem matemática do assoreamento de reservatórios, como: Nicklow e Mays (2000); Collischonn e Merten (2001); Molino *et al.* (2001); Alamy Filho e Schulz (2005); Kouassi *et al.* (2013); Cortez, 2013, entre outros.

Um *software* que realiza modelagem matemática do assoreamento em reservatórios é o HEC-RAS, o qual foi desenvolvido pela US Army Corps of Engineers no começo da década de 70, e é um dos *softwares* que promovem modelagem matemática unidimensional mais conhecido atualmente (CAMPOS, 2001 e MORRIS e FAN, 2010). A versão mais atual do *software*, o HEC-

RAS 5.0.3, resolve as equações hidráulicas em regime permanente, porém, permite discretizar o hidrograma de entrada em intervalos de tempo tão pequenos quanto se queira definir, de tal forma que os cálculos de linha d'água e de transporte de sedimentos em regime transitório pode ser considerado como “quase-permanente”.

Entretanto, prever o acúmulo de sedimentos é uma tarefa difícil porque os processos envolvidos - erosão, transporte, deposição e consolidação dos sedimentos - são complexos e podem ocorrer simultaneamente. Além disso, os fatores que interferem no processo estão sujeitos a grande variabilidade temporal e a várias incertezas, o que torna o estudo do assoreamento não apenas determinístico, mas também estocástico. Ressalta-se que ao se utilizar um modelo estocástico, além de avaliar as incertezas, pode-se também determinar as estatísticas do sedimento depositado no reservatório ao longo do tempo, como a média, a variância e a distribuição de probabilidade de sedimentos em determinada seção transversal ou longitudinal.

Algumas incertezas envolvidas no processo de assoreamento podem ser devidas à variabilidade natural do sistema, como: vazão afluente; concentração de sedimentos; granulometria dos sedimentos; entre outros. Além disso, na medição desses parâmetros também se tem imprecisões, como também podem ser imprecisos os levantamentos topobatimétricos da região do reservatório.

Assim, diante das fontes de incertezas, métodos de análise dessas imprecisões estão sendo desenvolvidos em algumas áreas relacionadas ao manejo de recursos hídricos. Porém, os estudos relacionados com as análises de incerteza da modelagem de transporte de sedimentos ainda são limitados (OH *et al.*, 2015), mais especificamente, são poucos os estudos que propuseram algum modelo estocástico para estudar o assoreamento de reservatórios.

Ocorre que apenas o modelo estocástico não é capaz de estimar o assoreamento do reservatório de água, sendo necessário o seu acoplamento a um modelo hidrodinâmico determinístico, como é o HEC-RAS, capaz de simular a dinâmica dos sedimentos em reservatórios. Entretanto, atualmente, esse acoplamento não é automático, o que limite o número de simulações, visto que é inviável realizar várias simulações, já que a entrada dos dados no HEC-RAS se dá de forma manual.

Por exemplo, caso se queira determinar o assoreamento ocorrido em 10 anos em um reservatório. Para isso, entre outros dados de entrada, são necessários que se forneçam ao HEC-RAS os dados diários de vazões, o que para o período analisado totalizará 3650 valores, e a curva-chave de sedimento. Como o fenômeno não é determinístico, e sim estocástico, o ideal é que sejam feitas várias simulações, 1000, por exemplo, para que no fim se tenha como resultado a probabilidade do assoreamento chegar a determinada cota em uma seção transversal. Porém, 1000 simulações iriam requerer a entrada de 3.650.000 de valores de vazões diárias, o que é inviável,

visto que atualmente a entrada se dá de forma manual. Assim, observa-se a importância de se tornar esse processo automático. Por isso, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um código computacional para promover o preenchimento automático do software determinístico, HEC-RAS, com milhares de dados hidrossedimentológicos gerados a partir de modelos estocásticos, para que esse programa promova a estimativa do assoreamento em um reservatório de forma automática.

METODOLOGIA

Como exposto no item anterior, pretendia-se fazer um *software* determinístico existente estimar o assoreamento em reservatórios de forma estocástica. Para isso, foi necessário gerar estocasticamente séries sintéticas de dados hidrossedimentológicos, as quais foram introduzidas no modelo matemático determinístico, que possui equações hidrodinâmicas e de transporte de sedimentos. Nesse trabalho, utilizou-se o *software Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS 5.0.3), devido à sua consolidada aplicação nessa área, por ser um *software* livre e, principalmente, por ser possível o seu controle automático a partir de códigos computacionais.

O produto da geração estocástica de dados hidrossedimentológicos foram 1000 séries com valores de vazões (Q) e de descargas sólidas totais (Q_{ST}), referentes a uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), sendo que esses valores variaram em um intervalo de anos para o qual se pretendia avaliar o assoreamento. Cada uma das séries de dados foi introduzida no HEC-RAS, para que esse software simulasse o assoreamento ocorrido no reservatório da PCH. Ressalta-se que a simulação estocástica e o resultado do assoreamento não serão apresentados nesse artigo, por não ser objeto desse trabalho.

Ocorre que realizar milhares de simulações no HEC-RAS até então era inviável, pois, para cada simulação, tinha que se inserir dados de Q e Q_{ST} , sendo que fazer essa inserção de forma manual era impraticável. Assim, foi necessário automatizar esse processo de inserção de dados. Por isso, para introduzir as séries de dados no modelo determinístico, foi desenvolvido um código computacional no *software* MathWorks (MATLAB), o qual apresenta uma linguagem de alto desempenho para computação técnica que integra computação, visualização e programação em um ambiente fácil de usar (MATHWORKS, 2015).

O código computacional fez a leitura dos milhares arquivos contendo os dados hidrossedimentológicos e os converteu para uma extensão compatível com o HEC-RAS. Automaticamente esses dados foram inseridos no programa. Para isso, alocaram-se valores através de matrizes e vetores no MATLAB, para que a leitura e armazenamento das séries de dados fossem feitas. Ressalta-se que esses códigos foram desenvolvidos com base no que foi feito por Leon e Goodell (2016), os quais desenvolveram um controlador do HEC-RAS utilizando o MATLAB. Ao final do desenvolvimento de todos os códigos, o resultado final no MATLAB foram scripts que

possibilitaram escrever arquivos de entrada, ler arquivos de saída e executar funções totalmente automatizadas do HEC-RAS.

Porém, para que os códigos do MATLAB fossem executados, primeiramente foi necessário que se criasse um projeto no HEC-RAS, o qual continha a geometria do canal a ser modelado e os dados característicos do sedimento, ou seja, nem todas as etapas de simulação no HEC-RAS ficaram automáticas, sendo automáticas apenas as que requerem a entrada de milhares de dados hidrossedimentológicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parte dos códigos desenvolvidos no MATLAB está apresentada no Quadro 1. A partir deles foi possível fazer a leitura de um arquivo “.prj” do HEC-RAS (esse arquivo contém o projeto criado, o qual possui a geometria do reservatório e as características dos sedimentos), identificar cada arquivo “.txt” com os dados hidrossedimentológicos e transferir esses dados para um novo arquivo de vazões que foi utilizado no HEC-RAS.

Quadro 1 – Parte dos códigos computacionais que preenchem dados automaticamente no HEC-RAS

```
arquivo1=fopen('temp.txt','r');
arquivo2=fopen('PCH.q01','r');
ArqBase=fgets(arquivo2);
PesqFlows=strfind(ArqBase,'<Flows>');
arquivo3=fopen('PCH.q01','w');
for c=1:PosNum
    fprintf(arquivo3,ArqBase(c));
end
ArqVaz=fgetl(arquivo1);
for c=PosNum:TamArq
    fprintf(arquivo3,ArqBase(c));
end
fclose('all');
```

Na Figura 1 estão apresentados os arquivos em branco, quando criados no HEC-RAS, e os preenchidos a partir da execução dos códigos computacionais desenvolvidos no MATLAB. Quando se pretende simular o assoreamento, deve-se preencher a série de vazões no regime “*quasi-unsteady*”, no HEC-RAS, sendo que na Figura 1(a) está apresentada a janela do programa referente a esse regime de escoamento, onde se percebe que não há vazões informadas. Quando se salva esse arquivo da Figura 1(a), o HEC-RAS gera um arquivo com extensão reconhecida por ele. Esse

arquivo está apresentado na Figura 1(b), onde se percebe que não há vazões preenchidas, há apenas espaços entre vírgulas, sendo que são neles que as vazões preenchidas ficarão.

Na Figura 1(c), têm-se as vazões geradas a partir de um modelo estocástico. Estão apresentados apenas três valores por questão de limitação de espaço nesse artigo, mas pode-se preencher no HEC-RAS quantas vazões forem necessárias. Após executar os códigos no MATLAB, os valores da Figura 1(c) são imputados automaticamente no HEC-RAS, o que pode ser visto na Figura 1(d).

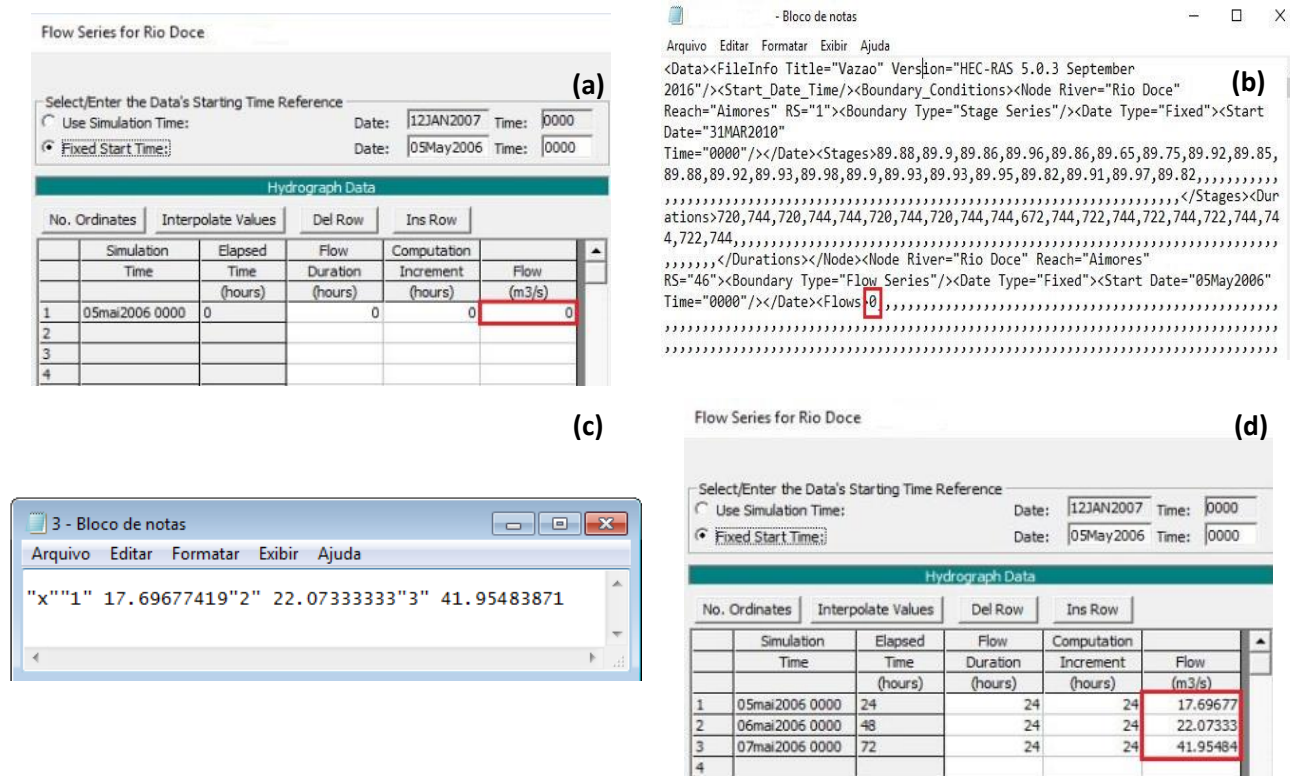


Figura 1 – Sequência de preenchido de vazões de forma automática no HEC-RAS: (a) Arquivo do HEC-RAS sem dados de vazões; (b) Arquivo criado quando se salva um arquivo de vazões no HEC-RAS; (c) Vazões geradas a partir de um modelo estocástico; (d) Arquivo do HEC-RAS com vazões preenchidas de forma automática

Outra informação que deve ser fornecida ao HEC-RAS para que ele simule o assoreamento de um reservatório é a curva-chave de sedimentos, ou seja, a relação entre vazão (*Flow*) e a descarga sólida total (*Total load*), a qual também foi preenchida automaticamente a partir dos códigos computacionais.

Na Figura 2(a) está apresentada, no HEC-RAS, a curva-chave de sedimentos sem nenhum dado. Ao se salvar esse arquivo, o programa cria o arquivo apresentado na Figura 2(b), onde os valores de *Flow* e *Total Load* estão zerados, concordando com o que está apresentado na Figura 2(a). Na Figura 2(c) estão apresentados os valores da curva-chave de sedimentos, os quais foram gerados estocasticamente, sendo que após a execução dos códigos computacionais, eles são preenchidos automaticamente no HEC-RAS, como observado na Figura 2(d).

Os valores de vazões apresentados tanto na Figura 1(c) quanto na Figura 2(C) possuem oito casas decimais após a vírgula. Isso foi feito para mostrar que o número de casas decimais não é um problema para o preenchimento automático via códigos computacionais.

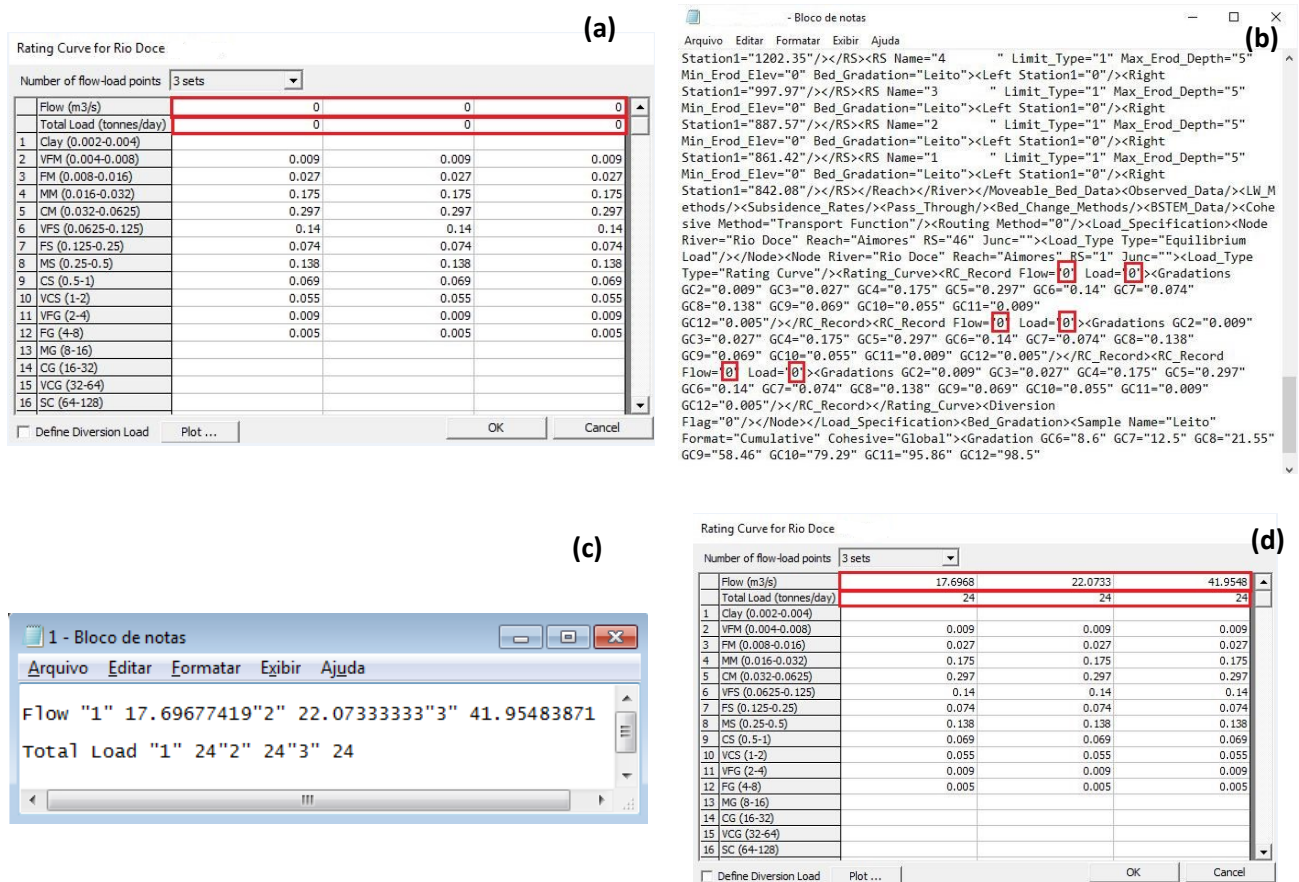


Figura 2 – Sequência de preenchido da curva-chave de sedimentos de forma automática no HEC-RAS: (a) Arquivo do HEC-RAS sem dados de vazões e descargas sólidas totais; (b) Arquivo criado quando se salva um arquivo de curva-chave de sedimentos no HEC-RAS; (c) Curva-chave de sedimentos gerada estocasticamente; (d) Arquivo do HEC-RAS com a curva-chave de sedimentos preenchida de forma automática

Terminados os preenchimentos automáticos necessários, os códigos promoveram 1000 simulações do assoreamento e extraíram os resultados em arquivos de texto, sendo esses resultados referentes às alturas assoreadas, as quais foram medidas no ponto de menor cota da seção transversal.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou parte dos códigos desenvolvidos para simulação automática do assoreamento em reservatórios, no HEC-RAS. A partir dos códigos computacionais foi possível ler os milhares de arquivos com as séries de dados hidrossedimentológicos, inseri-los no programa hidráulico HEC-RAS, promover as milhares de simulações do assoreamento e extrair esses resultados em arquivos externos. Ou seja, a partir dos códigos desenvolvidos foi possível automatizar a simulação de assoreamento no programa determinístico, fazendo com que ele possa

funcionar de forma estocástica. Ressalta-se que algumas etapas continuaram manuais, sendo automatizado apenas a inserção dos parâmetros considerados estocásticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de São João del-Rei por ter dado aporte técnico e financeiro a esse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALAMY FILHO, J. E.; SCHULZ, H. E. (2005). “*Simulação de escoamento sobre forma de fundo complexa utilizando o método de fronteira imersa*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16, 2005, João Pessoa, PB.
- ALBERTIN, L. L.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. (2010). “*Cálculo do volume e análise da deposição de sedimentos do reservatório de três irmãos*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n.4, pp. 57-67.
- BRITO, G. M. (2013). “*Determinação do assoreamento do reservatório da PCH Cachoeirão*”. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.
- CAMPOS, R. *Three-dimensional reservoir sedimentation model*. University of Newcastle, Newcastle, UK. [S.l.]. 2001.
- CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 599 p.
- COLLISCHONN, W.; MERTEN, G. H. (2001). “*Análise de estabilidade de um rio no Pantanal utilizando um modelo matemático de transporte de sedimentos*” in Anais do Encontro Nacional De Engenharia de Sedimentos - Caracterização quali-quantitativa da produção de sedimentos, 4., 2001, Santa Maria.
- CORTEZ, J. R. (2013). “*Desempenho de modelos numéricos em estudos de assoreamento de reservatórios – caso UHE Aimorés*”. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- KOUASSI, K. L.; KOUAME, K.I.; KONAN, K.S.; SANCHEZ, A. M.; DEME, M.; MELEDJE, N.H.E. (2013). “*Two-dimensional numerical simulation of the hydro-sedimentary phenomena in Lake Taabo, Côte d’Ivoire*”. *Water Resour Manage*, v. 27, pp. 4379-4394.
- LENHARDT, M.; MARKOVIC, G.; GACIC, Z. (2009). “*Decline in the Index of Biotic Integrity of the Fish Assemblage as a Response to Reservoir Aging*”. *Water Resour Manage*, v. 23, pp. 1713–1723.
- LEON, A. S.; GOODELL, C. (2016). “*Controlling HEC-RAS using MATLAB*”. *Journal of Environmental Modelling and Software*, v. 84, pp. 339–348.
- MAIA, A. G. (2006). “*As consequências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens*”. 2006. 271 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – área de concentração em

Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.

MATHWORKS. *MATLAB version 8.6.0.267246 (R2015b)*. The Mathworks, 460 Inc. Natick, Massachusetts, 2015.

MORRIS, G. L.; FAN, J. (2010). “*Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*”. Eletronic Ver. 1.04. McGraw-Hill. New York.

NICKLOW, J. W.; MAYS, L. W. (2000). “*Optimization of multiple reservoir networks for sedimentation control*”. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.126, n.4.

OH, J.; TSAI, C. W.; CHOI, S. (2015). “*Quantifying the uncertainty associated with estimating sediment concentrations in open channel flows using the stochastic particle tracking method*”. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 141, n. 12, pp. 1-10.

YANG, X. (2003). “*Manual on Sediment Management and Measurement*”. World Meteorological Organization, Operational Hydrology, n. 47, Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva: Switzerland.