

SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO OBSERVADOS COM IMAGENS LANDSAT PARA MODELAGEM DE GRANDE BACIAS

Hugo de Oliveira Fagundes^{1*} & Rodrigo Cauduro Dias de Paiva² & Fernando Mainardi Fan³

Resumo – Existe considerável dificuldade em utilizar modelos de erosão e transporte de sedimentos de grandes escalas, principalmente devido à baixa disponibilidade de dados observados *in situ*, necessários para calibração e validação dos modelos. Assim, esse trabalho busca avaliar a viabilidade do uso da reflectância espectral de superfície (RES) como uma aproximação (*proxy*) da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) na melhoria da modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias, tendo como estudo de caso a bacia do rio Doce (MG/ES). Para isso, utilizou-se o modelo MGB-SED para estimar as CSS em diversos trechos de rios da bacia e depois comparou-as, utilizando o coeficiente de correlação linear (r), com dados medidos *in situ* de CSS e com dados de RES na faixa do vermelho (0,64-0,67 μm). As informações de RES na faixa do vermelho apresentaram boas correlações ($r > 0,5$) com os dados de CSS calculados pelo modelo MGB-SED, com valores de r superiores àqueles calculados entre os dados de CSS medidos e calculados. Embora tenham sido encontrados bons valores de correlação, esses resultados podem ainda ser melhorados após a calibração do modelo MGB-SED, o que será feito em uma etapa posterior.

Palavras-Chave – Rio Doce, Hidrossedimentologia, Sensoriamento Remoto.

USE OF SPECTRAL REFLECTANCE DATA FOR EVALUATION OF THE EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MODELLING FOR LARGE RIVER BASINS

Abstract – There is considerable difficulty in using large-scale erosion and sediment transport models, mainly due to lower availability of *in situ* observed data, required for model calibration and validation. Thereby, this research aims to evaluate viability of the use of surface spectral reflectance (SSR) as an approximation (*proxy*) of the suspended sediment concentration (SSC) in order to improve erosion and sediment transport modelling for large river basins. The Doce river basin (MG/ES) was used as case study. For this purpose, MGB-SED model was applied to estimate SSC in several river reaches on Doce river basin. Afterwards, they were compared by using a linear correlation coefficient (r) between SCC measured data *in situ* and SSR data at the red band (0.64-0.67 μm). SSR information at the red band showed good correlations ($r > 0.5$) with calculated SSC data by MGB-SED, with r -values higher than those calculated between measured and calculated SSC data. Although good values for r have been achieved, these results can still be improved after the MGB-SED model calibration, which will be done at a later phase.

Keywords – Doce River, Hydrosedimentology, Remote Sensing.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, h.o.fagundes@hotmail.com.

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. rodrigo.paiva@ufrgs.br

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. fernando.fan@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Os modelos matemáticos de erosão e transporte de sedimentos são ferramentas desenvolvidas para auxiliar na compreensão e representação dos fenômenos hidrossedimentológicos, além de ajudar no gerenciamento dos recursos hídricos e do uso do solo. Esses modelos foram elaborados com diferentes abordagens, como conceitual, empírica ou de base física e para diferentes escalas espaciais, desde parcelas de solo até grandes bacias hidrográficas (Merritt *et al.*, 2003; Pandey *et al.*, 2016).

Após a observação de lacunas existentes no âmbito da modelagem hidrossedimentológica, tais como o foco em pequenas escalas e a utilização de métodos simplificados de propagação do escoamento em canais, Buarque (2015) desenvolveu o Modelo de Sedimentos de Grandes Bacias (MGB-SED). O MGB-SED é resultante do acoplamento de um módulo de sedimentos ao modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007; Paiva, 2009) e considera a erosão laminar e em sulcos, erosão do leito e transporte e deposição dos sedimentos no canal.

Contudo, existe considerável dificuldade em utilizar modelos de erosão e transporte de sedimentos de grandes escalas, principalmente devido à baixa disponibilidade de dados observados *in situ*, necessários para calibração e validação dos modelos. Assim, nas últimas décadas, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas para estimativa de dados hidrológicos e sedimentológicos, como o uso de produtos de reanálise e o uso de imagens de sensoriamento remoto (Lodhi *et al.*, 1998; Long e Pavelsky, 2013; Getirana, 2010; Paiva *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2014; Beck *et al.*, 2016).

Os dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) estimados de forma indireta a partir da reflectância espectral de superfície podem ser utilizados na modelagem hidrossedimentológica, contudo elevado esforço é requerido, incluindo trabalho de campo até a obtenção de equações que relacionam essas variáveis. Assim, nesse trabalho, busca-se avaliar a viabilidade do uso da reflectância espectral de superfície de maneira mais simplificada, como uma aproximação (*proxy*) da CSS, na melhoria da modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias, tendo como estudo de caso a bacia do rio Doce (MG/ES).

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 1) está compreendida entre os estados de Minas Gerais (86% da área) e Espírito Santo e entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W. A bacia possui área de aproximadamente 86.715 km² que engloba cerca de 230 municípios com diversos empreendimentos de relevância econômica e social para a região (PIRH, 2010). Além disso, ela possui elevada produção de sedimentos (Lima *et al.*, 2008) e histórico de reservatórios com problemas de assoreamento (Fan *et al.*, 2015).

A bacia possui relatos de forte antropização com aumento do desmatamento e das taxas de erosão do solo, crescendo também a quantidade de sedimentos nos rios. A precipitação média anual na bacia varia de 1.500 mm a 900 mm e o regime de precipitações na bacia é fortemente sazonal, com o período chuvoso ocorrendo de outubro/novembro a março/abril e o período seco entre os meses de março/abril e setembro/outubro (PIRH, 2010).

METODOLOGIA

Aquisição de dados

A simulação hidrossedimentológica requer dados observados de chuva e vazão para a calibração e validação do módulo hidrológico e dados relativos aos sedimentos para calibração e

validação do módulo de sedimentos. No presente trabalho foram utilizados dados de chuva da base *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* - MSWEP (Beck *et al.*, 2016) para o período de simulação (1980-2015); dados de vazões observadas e CSS (Figura 1) para o mesmo período, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) no Sistema de Informações hidrológicas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>); e dados de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho (0,64-0,67 μm) extraídos em 21 postos virtuais (Figura 1), abrangendo um período de 2013-2015.

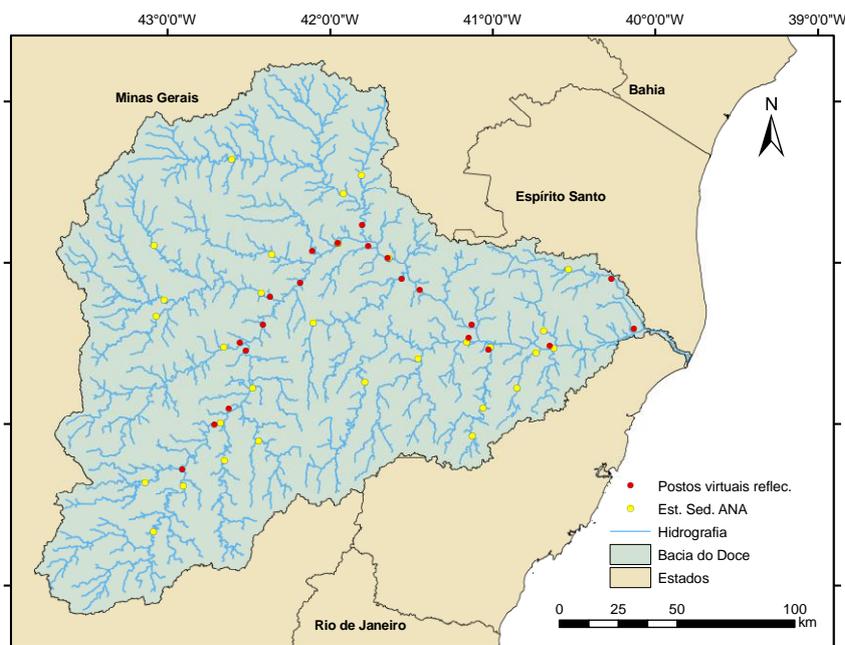


Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Doce e localização das estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas e dos postos virtuais de reflectância de superfície.

O MSWEP é uma base de dados de precipitação com cobertura global com informações disponíveis desde 1979 até 2015, com resolução temporal de 3 horas e espacial de $0,25^\circ$ (25 km) que mescla informações de redes pluviométricas, produtos de satélite e de reanálise. As reflectâncias foram extraídas de imagens do satélite Landsat 8/ OLI, que possui resolução espacial de 30m. As imagens adquiridas já possuíam correções atmosféricas satisfatórias (Vermote *et al.*, 2016) e foram fornecidas pelo United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Foram adquiridas imagens que correspondem a quatro localizações do tipo órbita/ponto: 216/073, 216/074, 217/073 e 217/074.

A extração da reflectância foi realizada parcialmente de forma manual e automática. Para os seis postos virtuais localizados mais a jusante da bacia, adotou-se a extração manual, selecionando-se os píxeis localizados nos locais mais adequados. A extração automática consistiu no uso de um algoritmo que seleciona os píxeis dentro de um polígono com largura inferior ao do rio, comprimento de no máximo 20 km e que não possuíam interferência de nuvens ou sombra de nuvens. A partir da amostra de píxeis válidos, calculou-se a mediana dos valores encontrados. Isso foi feito para evitar que interferências de *outliers*, como o não reconhecimento de um píxel de nuvem que possui alta reflectância, contaminassem o resultado final.

Simulação Hidrossedimentológica

A simulação hidrossedimentológica é dividida em duas etapas: simulação hidrológica e simulação da geração e transporte de sedimentos na bacia. A simulação hidrológica foi feita com o modelo MGB-IPH e a calibração foi realizada a partir de uma aplicação preliminar (Fagundes *et al.*,

2017), utilizando dados de chuva observados de 217 estações pluviométricas (1970-2010), com algumas modificações que melhoraram a qualidade dos resultados. Essas modificações consistiram, em resumo, na discretização espacial da bacia em 17 sub-bacias e em um novo ajuste dos parâmetros calibráveis.

Já a validação do modelo foi realizada para o período de 1960 a 1969, também utilizando dados de chuva observados e valores dos coeficientes de Eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS), ENS do logaritmo das vazões (ENSlog) e erro de volume (BIAS) satisfatórios. Assim, utilizou-se os mesmos valores dos parâmetros calibráveis para a simulação hidrológica utilizando dados de chuva do MSWEP. Essa etapa foi necessária uma vez que o período de estudo do presente trabalho não é totalmente contemplado nos períodos de calibração e validação do MGB-IPH com dados observados de chuva por Fagundes *et al.* (2017), sendo que esses não estavam prontamente disponíveis para tal período (2011-2015).

Após a simulação com o modelo hidrológico, os resultados desse foram utilizados para a simulação com o módulo de sedimentos. Com base no trabalho de Buarque (2015), em que são descritas as etapas e metodologias utilizadas no modelo MGB-SED, foi realizada uma aplicação preliminar para a bacia do rio Doce, incluindo a não calibração dos parâmetros de ajuste α e β . Após a simulação, os resultados calculados foram comparados por meio do coeficiente de correlação linear (r) com os dados observados de CSS e reflectância de superfície para os trechos de rio que possuíam todas essas informações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação hidrológica

A seguir são apresentados apenas os resultados da simulação hidrológica realizada utilizando os dados de chuva da base de dados do MSWEP e sua comparação com os dados observados. Dos 55 postos analisados na bacia (Figura 2-a), cerca de 84% deles apresentaram valores do coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) superiores a 0,50, considerados por Moriasi *et al.* (2007) como satisfatórios e 30% apresentaram resultados muito bons, com valores de ENS acima de 0,75.

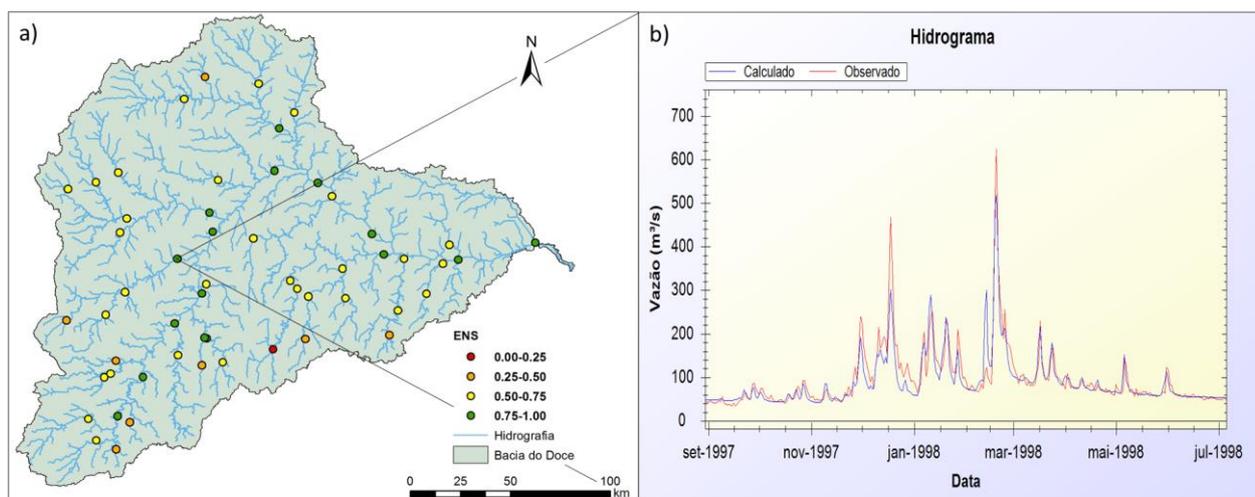


Figura 2 – Resultados da simulação hidrológica com o modelo MGB-IPH: a) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe calculado entre as vazões observadas para os postos fluviométricos da ANA e as vazões calculadas; b) Comparação dos Hidrogramas calculados e simulados para o posto 56696000, localizado no rio Piracicaba.

A boa qualidade dos resultados pode ser notada, graficamente, a partir da comparação dos hidrogramas observados e calculados presentes na Figura 2-b. Os resultados obtidos também

evidenciam o bom desempenho do modelo em representar os processos hidrológicos que ocorrem na bacia usando o produto de chuva MSWEP. Destaca-se ainda que, apesar disso, os dados do MSWEP apresentam certa tendência de superestimar os dados de chuva observados, o que foi mostrado por Wongchuig *et al.* (2017) em um estudo de caso na bacia Amazônica.

Simulação da geração e transporte de sedimentos

O modelo MGB-SED permite adquirir diversas informações da bacia, como as regiões que mais produzem sedimentos (a partir de estimativas usando a MUSLE), carga de sedimentos transportada em suspensão (silte + argila) e de fundo (areia) para cada trecho de rio, concentração de sedimentos em suspensão, entre outros. Alguns desses resultados são apresentados na aplicação preliminar do modelo na bacia do rio Doce (Fagundes *et al.*, 2017), no entanto, nesse trabalho, o foco está em comparar os resultados calculados pelo modelo, os dados de CSS medidos *in situ* e dados de reflectância espectral de superfície obtidos na faixa do vermelho (RefVer).

Assim, na Figura (3) são apresentados a comparação dessas variáveis para dois postos sedimentométricos: o posto Baixo Guandu (Figura 3-a), que apresentou baixo valor do coeficiente de correlação ($r=0,54$) para a reflectância e o posto Mário de Carvalho (Figura 3-b), que apresentou um valor de $r=0,78$. Ressalta-se que, tanto a série de RefVer quanto a série de CSS observada não apresentam dados com alta frequência temporal, ou seja, são séries cujos dias em que esses valores foram obtidos raramente coincidiram. Observa-se que os resultados calculados apresentam comportamento semelhante aos dados observados de CSS, tendendo a aumentar no período chuvoso e diminuir no período seco, o que é coerente com a realidade da bacia. Além disso, os resultados observados de reflectância espectral de superfície também apresentam essa tendência, mostrando concordância entre esse tipo de dado e os demais.

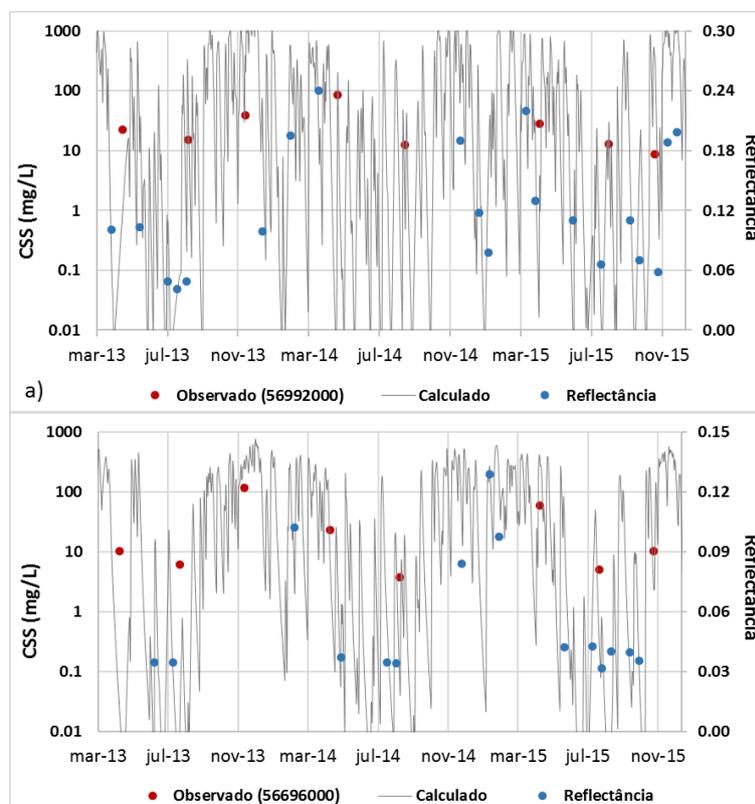


Figura 3 – Comparação dos resultados de CSS calculados com dados de CSS observados e RefVer para os postos sedimentométricos da ANA: a) Tumiritinga (56992000); e b) Mario de Carvalho (56696000).

Na Figura 4 são apresentados os valores calculados de r entre os dados observados e calculados de CSS e os dados observados de RefVer. Esses resultados mostram que as correlações existentes entre os dados de CSS calculados e de RefVer, para todas estações analisadas, foram superiores às correlações entre os dados observados e calculados de CSS. A maior diferença é observada na estação Naque Velho em que r aumentou de 0,08 para 0,70 e a menor na estação Baixo Guandu que aumentou de 0,49 para 0,54.

Analisando os valores de r apenas para os postos virtuais de reflectância, na Figura 5 se observa que os valores variaram entre 0,38 (Governador Valadares) e 0,83 (Linhares), ambos localizados no rio principal. Quanto aos afluentes o menor valor encontrado foi de 0,44 (rio Ribeirão Traíra) e o maior 0,78 (rio Piracicaba).

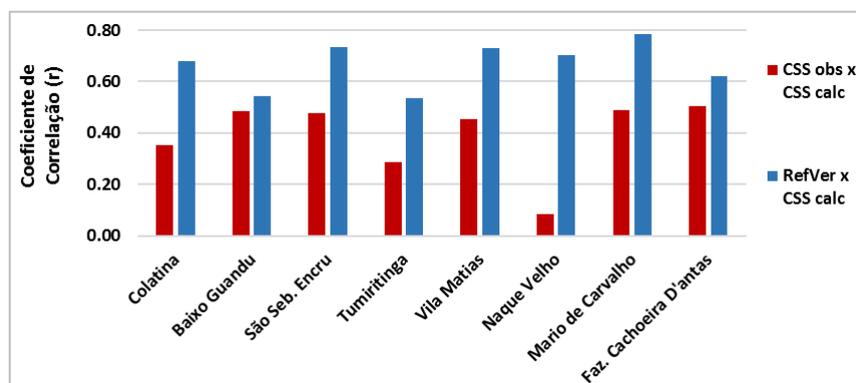


Figura 4 – Coeficiente de correlação (r) calculado entre os dados observados e calculados de CSS e entre os dados observados de RefVer para as estações: Colatina (56994500), Baixo Guandu (56992000), São Sebastião da Encruzilhada (56990000), Tumiritinga (56920000), Vila Matias (56891900), Naque Velho (56825000), Mario de Carvalho (56696000) e Fazenda Cachoeira D'antas (56425000).

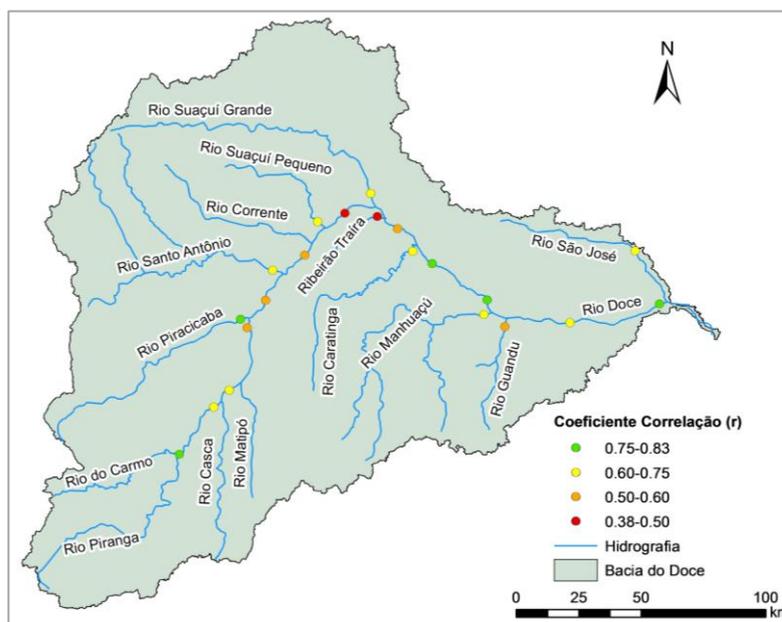


Figura 5 – Coeficiente de correlação entre os valores de CSS calculados com o modelo MGB-SED e dados observados de RefVer para todos os postos virtuais de reflectância.

Nota-se, portanto, que os valores de reflectância de superfície na faixa do vermelho, além de apresentarem boa correlação com os dados de CSS, o que tem sido amplamente observado na literatura (Lodhi et al., 1998, Long e Pavelsky, 2012; Espinoza *et al.*, 2013), também podem ser utilizados para a melhoria de modelos hidrossedimentológicos de grande escala, como é o caso do

MGB-SED. Tal melhoria se dá ao ser possível ter uma nova fonte de dados durante as etapas de calibração e validação desses modelos, visto a baixa disponibilidade de dados de CSS medidos *in situ* (Pandey *et al.*, 2016).

CONCLUSÃO

As reflectâncias espectrais de superfície (RES) na faixa do vermelho apresentaram boas correlações ($r > 0,5$) com os dados de CSS calculados pelo modelo MGB-SED, sendo essas correlações superiores àquelas calculadas entre os dados de CSS medidos e calculados. Assim, observa-se que existe um bom potencial dos dados de RES serem utilizados como um *proxy* da CSS e auxiliar na melhoria dos resultados obtidos pelo modelo, tanto em termos espaciais quanto temporais. A vantagem em utilizar os valores de RES e não uma estimativa da CSS a partir desses dados, consiste em não ter a necessidade de ir à campo e de desenvolver equações que relacionam essas variáveis, processos esses que requerem recursos humanos e financeiros, além de elevado tempo em todo o processo.

Apesar dos bons resultados, a Figura 5 mostrou que existem locais do rio Doce e de seus afluentes que esses resultados podem ser melhorados. Em uma etapa posterior, o MGB-SED será calibrado a fim de melhorar não só a variabilidade temporal, mas também em termos dos valores absolutos de CSS estimados por ele ao serem comparados aos valores medidos em campo. Essa etapa é de extrema importância, visto que as validações de modelos hidrossedimentológicos são de baixa qualidade (De Vente *et al.*, 2013)

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida ao primeiro autor durante a pesquisa e a CAPES – Brasil pelo auxílio financeiro parcial.

REFERÊNCIAS

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; DE ROO, A. (2016). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 21, pp. 589-615.

BUARQUE, D. C. (2015). Simulação da Geração e do Transporte de Sedimentos em Grandes Bacias: Estudo de caso do rio Madeira. *Tese* (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. DA; TUCCI, C. E. M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal* 52 (5), pp. 878–895.

DE VENITE, J.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; GOVERS, G.; VANMAERCKE, M.; VAN ROMPAEY, A.; ARABKHEDRI, M.; BOIX-FAYOS, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? *Earth Sci. Ver* 127, pp. 16–29.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. (2017). Simulação Hidrossedimentológica Preliminar na Bacia do Rio Doce com o Modelo MGB-SED. In *Anais do II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia*, Foz do Iguaçu.

FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D.; COLLISCHONN, W.; WEERTS, A (2015). Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4, pp. 196-227.

GETIRANA, A. C. V. (2010). Integrating spatial altimetry data into the automatic calibration of hydrological models. *Journal of Hydrology* 387, pp. 244-255.

JENSEN, J. R. (2009). *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. p. 598.

LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; CARVALHO, N. O.; VIEIRA, M. R. (2008). Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. In *Anais do VIII Encontro Nacional De Engenharia De Sedimentos*, Campo Grande, 2008. CD-ROM.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. (1998). Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance. *Geocarto International* 13 (2), pp. 11-15.

LONG, C. M.; PAVELSKY, T. M. (2013). Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. *Remote Sensing of Environment* 129, pp. 197-209.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software* 18 (8-9), pp. 761-799.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. Asabe* 50 (3), pp. 885-900.

MORRIS, GREGORY L.; FAN, JIAHUA. (1998). *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. McGraw Hill Professional.

PAIVA, R. C. D. (2009). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões. *Dissertação* (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; BULHÕES MENDES, C. A. (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research* 49, pp. 1226-1243.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena* 147, pp. 595-620.

PIRH. (2010). Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce: Relatório Final-Volume I. Consórcio Ecoplan-Lume.

VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment* 185, pp.46-56.

WONGCHUIG C., S.; PAIVA, R. C. D.; ESPINOZA, J. C.; COLLISCHONN, W. (2017). Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *Journal of Hydrology* 549, pp. 667-684.

YANG, X.; MAO, Z.; HUANG, H.; WANG, T.; LIU, D (2014). Numerical simulation of suspended sediment transport merging with satellite derived data in coastal waters. In *Anais do SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*. International Society for Optics and Photonics, pp. 92650E-92650E-8.