



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DE PREVISÃO DE TURBIDEZ NO RIO DOCE

Camila Bergmann Goulart¹; Fernando Mainardi Fan²

ABSTRACT – Land use by anthropic activities, such as agriculture and urbanization, increases soil erosion, also increasing the sediments that are transported to and by rivers. These sediments are responsible for several changes in watercourses, including sedimentation of reservoirs and elevation of turbidity (due to suspended sediments). The Doce River basin, the present research case study, runs through the states of Minas Gerais and Espírito Santo (Brazil), being a basin with a large sediment yield and a history of sedimentation problems in reservoirs. At the Doce River basin there was also the rupture of a tailings dam in Mariana (MG), in November 2015. This disaster increased the levels of turbidity of the basin, creating difficulties to pump and treat its water to supply the municipalities of the region. Due to the mentioned factors, turbidity simulation models were developed in order to estimate the turbidity at points of interest. The present work aimed to analyze and compare the performance of three prognostic models for the Doce River and its main tributaries. With this purpose, turbidity data was selected at measurement stations along the basin, between 1997 and 2010, covering the calibration and validation periods. After applying the models, a comparative analysis was performed, based on defined error statistics, to evaluate performance. Thus, it was concluded that all three models have adequate performance throughout the basin, each one standing out in relation to the others according to the application region (Upper, Middle and Lower Doce River). The definition of its use will depend on the possibility of acquiring data, as well as the area of interest within the basin.

Palavras-Chave – Modelagem, Turbidez, rio Doce.

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre/RS, camilabgoulart@gmail.com, +55 (51) 3308-6670

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre/RS, fernando.fan@ufrgs.br, +55 (51) 3308-6670



1 - INTRODUÇÃO

Para uma adequada gestão territorial e dos recursos hídricos, conhecer o comportamento hidrossedimentológico das bacias hidrográficas é essencial. Os sedimentos exercem grande influência nos parâmetros de qualidade da água, além de serem responsáveis pelo assoreamento de reservatórios e canais de navegação, entre outros problemas. Níveis muito elevados de turbidez, causados por sedimentos finos em suspensão, podem inviabilizar o tratamento da água para consumo (LIMA, 2011).

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), transportou uma carga muito grande de sedimentos para o rio Doce, sendo boa parte deste volume composta por finos. Destes, parte foi transportada pelo rio até atingir o oceano, mas uma parcela ficou depositada ao longo do leito. Esse material aumentou a turbidez do rio Doce, principalmente em períodos chuvosos, em que o aumento da vazão gera o transporte de um volume maior de sedimentos, além de colocar novamente em suspensão as parcelas depositadas. Devido à elevação da turbidez, o uso da água para abastecimento de cidades e comunidades que realizam a captação neste rio foi dificultado. Mesmo após o tempo decorrido desde o acidente, depósitos de sedimentos no leito e margens do rio ainda são encontrados, de modo que o risco de aumento de turbidez em períodos chuvosos é grande, o que continuaria a impactar comunidades ribeirinhas.

Dada a relevância deste assunto, diversos estudos foram feitos para desenvolver modelos empíricos ou conceituais, por meio de modelos matemáticos, e baseados nos processos físicos do escoamento, a fim de obter uma estimativa de turbidez para a região da bacia do rio Doce. Neste trabalho, foram estudados e comparados três modelos prognósticos de turbidez desenvolvidos para a bacia do rio Doce.

2 - METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi uma análise comparativa entre três modelos prognósticos de turbidez e dados observados de medição. Os modelos analisados foram o proposto por Castilho et al. (2016), baseado em Tucci (2005) e proposto por Fagundes (2017), para o período referente aos anos de 2000 a 2010. Este período foi dividido em duas partes: calibração (2000 a 2005) e validação dos modelos (2006 a 2010) com dados observados.

2.1 - Modelo proposto por Castilho et al. (2016)

Este modelo tem como base o conceito de diluição e de retenção de sedimentos em reservatórios, calculando a turbidez por uma equação semelhante a da mistura (equação (1)). Com base na interpretação do material disponível sobre o modelo, aplicaram-se estes dois conceitos para o período analisado.



$$T_m = \frac{(T_1 Q_1 + T_2 Q_2 + \dots + T_n Q_n)}{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)} \quad (1)$$

Onde T_1 , T_2 e T_n são valores de turbidez nos pontos a montante; Q_1 , Q_2 e Q_n são as vazões nos pontos a montante; T_m é a turbidez no ponto a jusante. Admitindo-se que o percentual de retenção de sedimentos dos reservatórios equivale a diminuição de turbidez nestes.

2.2 - Modelo baseado no modelo de Tucci (2005)

Utilizando a relação entre vazão e turbidez, desenvolveu-se um modelo empírico de previsão de turbidez, seguindo as recomendações de Tucci (2005). A metodologia adotada é feita conforme os passos descritos a seguir.

- Classificam-se as vazões em 10 intervalos de vazões, obtidas em 10 intervalos iguais, em escala logarítmica;
- determina-se a média da turbidez, para cada classe, dos dias com as vazões na classe;
- ajusta-se uma função que relaciona turbidez e vazão para os valores dos intervalos de classe, utilizando as médias, e verifica-se a correlação;
- com base nas vazões, determinam-se os valores calculados de turbidez.

2.3 - Modelo de previsão de CSS proposto por Fagundes (2017)

Este é um modelo prognóstico de concentração de sedimentos em suspensão com base em modelagem hidrossedimentológica, proposto por Fagundes (2017). Utiliza o software MGB-SED (BUARQUE, 2015), que foi desenvolvido acoplado um modelo de geração e transporte de sedimentos ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido por Collischonn (2001) e modificado por Paiva (2009).

Os dados de vazão gerados pela aplicação de Fagundes (2017) foram utilizados na aplicação dos demais modelos, a fim de manter a consistência metodológica, o que limitou a análise ao ano de 2010. Com base nos resultados de CSS gerados, obtiveram-se correlações entre turbidez e CSS para cada posto analisado, possibilitando a comparação com os demais modelos.

2.4 - Análise comparativa

Após aplicados os modelos, foi realizada uma análise comparativa para o período de validação (2006 a 2010). Para esta análise, utilizaram-se as estatísticas de erro a seguir (equações 2 a 4), a fim de possibilitar uma comparação global entre modelos.

- Erro médio (viés)

$$Erro\ médio = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{i,estimada} - T_{i,observada}) \quad (2)$$



- Raiz quadrada do erro quadrático médio – REQM (amplitude de erro)

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{i,estimada} - T_{i,observada})^2} \quad (3)$$

- Coeficiente de correlação linear

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (4)$$

Onde n é o número de previsões, x_i e y_i são os dados de turbidez que se quer comparar, ou seja, um representa os dados observados e outro representa os resultados de aplicação dos modelos.

3 - DADOS UTILIZADOS

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados de turbidez, vazão e CSS. Os dados de turbidez foram obtidos junto ao IGAM (MG) e ao IEMA (ES), conforme a localização do posto analisado. Os dados de CSS e de vazão foram aproveitados da simulação realizada por Fagundes (2017), utilizando o MGB-SED. Assim, o período em análise compreendeu os anos de 2000 a 2005 (calibração dos modelos) e 2006 a 2010 (validação dos modelos). A Tabela 1 e a Figura 1 indicam a relação e localização dos postos analisados, respectivamente.

Tabela 1. Relação de postos analisados.

Código do posto	Órgão responsável	Rio	Latitude	Longitude	Município	Estado
RD009	IGAM	DO CARMO	-20,35	-43,32	MARIANA	MG
RD013	IGAM	PIRANGA	-20,38	-42,9	PONTE NOVA	MG
RD018	IGAM	CASCA	-20,1	-42,63	RIO CASCA	MG
RD019	IGAM	DOCE	-20,02	-42,75	RIO CASCA	MG
RD021	IGAM	MATIPÓ	-20,08	-42,47	RAUL SOARES	MG
RD023	IGAM	DOCE	-19,76	-42,48	MARILÉIA	MG
RD026	IGAM	PIRACICABA	-19,83	-43,13	JOÃO MONLEVADE	MG
RD027	IGAM	SANTA BÁRBARA	-19,81	-43,23	SÃO GONÇALO DO RIO ABAIXO	MG
RD029	IGAM	PIRACICABA	-19,77	-43,04	NOVA ERA	MG
RD030	IGAM	DO PEIXE	-19,73	-43,03	NOVA ERA	MG
RD032	IGAM	PIRACICABA	-19,62	-42,8	ANTÔNIO DIAS	MG
RD033	IGAM	DOCE	-19,33	-42,38	BELO ORIENTE	MG
RD034	IGAM	PIRACICABA	-19,53	-42,6	CEL FABRICIANO	MG
RD035	IGAM	DOCE	-19,49	-42,49	IPATINGA	MG

Código do posto	Órgão responsável	Rio	Latitude	Longitude	Município	Estado
RD039	IGAM	SANTO ANTÔNIO	-19,22	-42,34	NAQUE	MG
RD040	IGAM	CORRENTE GRANDE	-19,02	-42,16	PERIQUITO	MG
RD044	IGAM	DOCE	-18,88	-41,95	GOV. VALADARES	MG
RD045	IGAM	DOCE	-18,86	-41,83	GOV. VALADARES	MG
RD049	IGAM	SUAÇUÍ GDE	-18,58	-41,92	FREI INOCÊNCIO	MG
RD053	IGAM	DOCE	-18,97	-41,65	GALILÉIA	MG
RD057	IGAM	CARATINGA	-19,07	-41,54	CONSELHEIRO PENA	MG
RD058	IGAM	DOCE	-19,17	-41,46	CONSELHEIRO PENA	MG
RD059	IGAM	DOCE	-19,35	-41,24	RESPLENDOR	MG
RD065	IGAM	MANHUAÇU	-19,5	-41,17	AIMORÉS	MG
RD067	IGAM	DOCE	-19,51	-41,01	AIMORÉS/BAIXO GUANDU	MG
RD084	IGAM	SUAÇUÍ PEQ.	-18,78	-42,14	GOV. VALADARES	MG
RD094	IGAM	DO EME	-19,18	-41,3	RESPLENDOR	MG
56991200	IEMA-ES	GUANDU	-19,51	-41,01	AFONSO CLÁUDIO	ES
56991400	IEMA-ES	DOCE	-19,53	-40,81	COLATINA	ES
56993400	IEMA-ES	SANTA JOANA	-19,54	-40,71	BAIXO GUANDU	ES
56994600	IEMA-ES	DOCE	-19,53	-40,67	COLATINA	ES
56994700	IEMA-ES	DOCE	-19,52	-40,58	COLATINA	ES
56995200	IEMA-ES	PANCAS	-19,51	-40,61	COLATINA	ES
56997800	IEMA-ES	SÃO JOSÉ	-19,40	-40,07	LINHARES	ES
56998300	IEMA-ES	DOCE	-19,41	-40,07	LINHARES	ES

4 - RESULTADOS

A partir na análise comparativa, foi possível constatar que os três modelos geram resultados satisfatórios, destacando-se em relação uns aos outros conforme a região estudada (Alto rio Doce: até confluência com rio Piracicaba; Médio rio Doce: até limite de Minas Gerais; Baixo rio Doce: até o oceano). Na Tabela 2 é apresentado um resumo das estatísticas de erro de cada modelo. Na Figura 2 são apresentados os resultados, de forma gráfica, para os postos analisados.

Tabela 2. Resumo das estatísticas de erro por modelo.

PARÂMETRO	TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	Castilho <i>et al</i> (2016)
Correlação linear média (r) ³	0,79	0,81	0,79
Amplitude de erro média (NTU) ³	88,1	82,5	48,4
Viés ³	Superestima	Superestima	Subestima
Região de destaque	Alto Doce	Médio e Baixo Doce	Alto e Médio Doce

³ As médias foram obtidas somente entre os postos com aplicação dos três modelos.

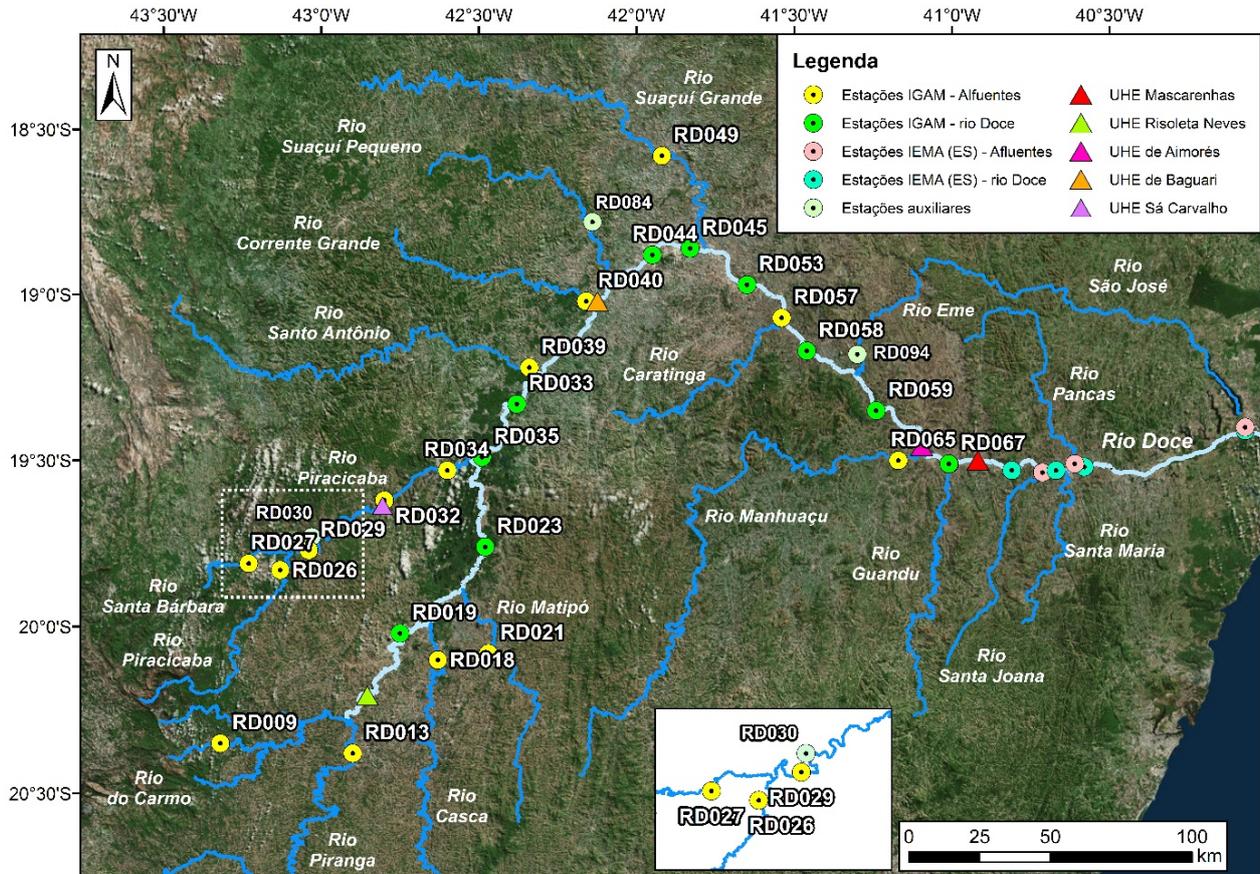


Figura 1 - Localização dos postos analisados (fonte: autoria própria).

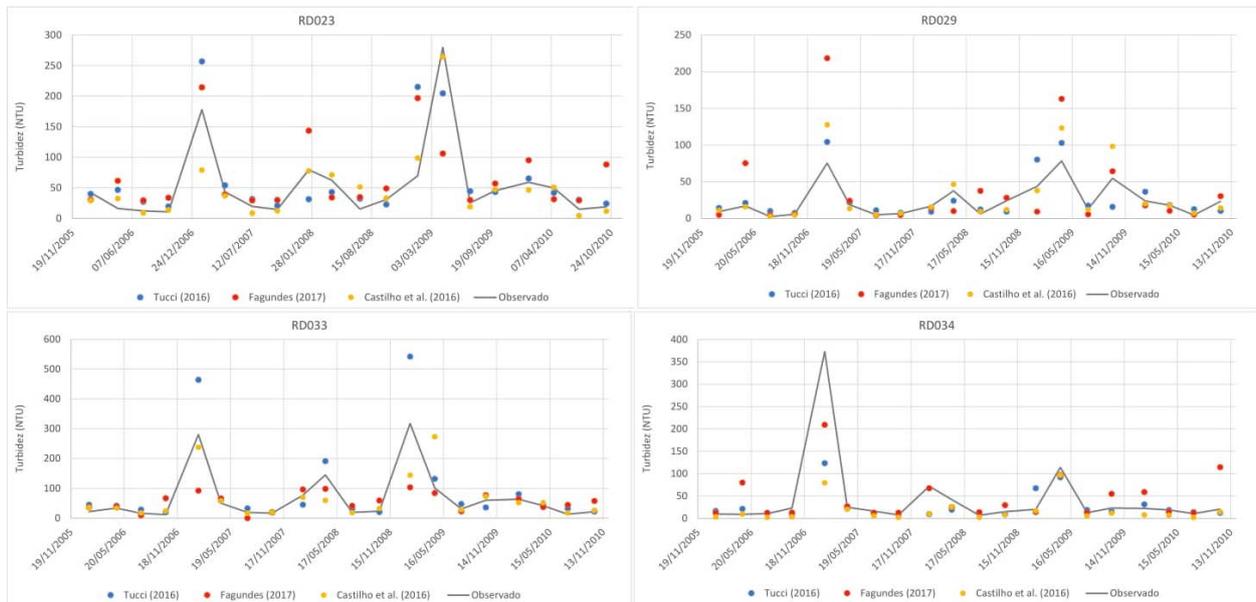


Figura 2 - Resultados das aplicações. Foram selecionados apenas os postos com aplicação dos três modelos – continuação.

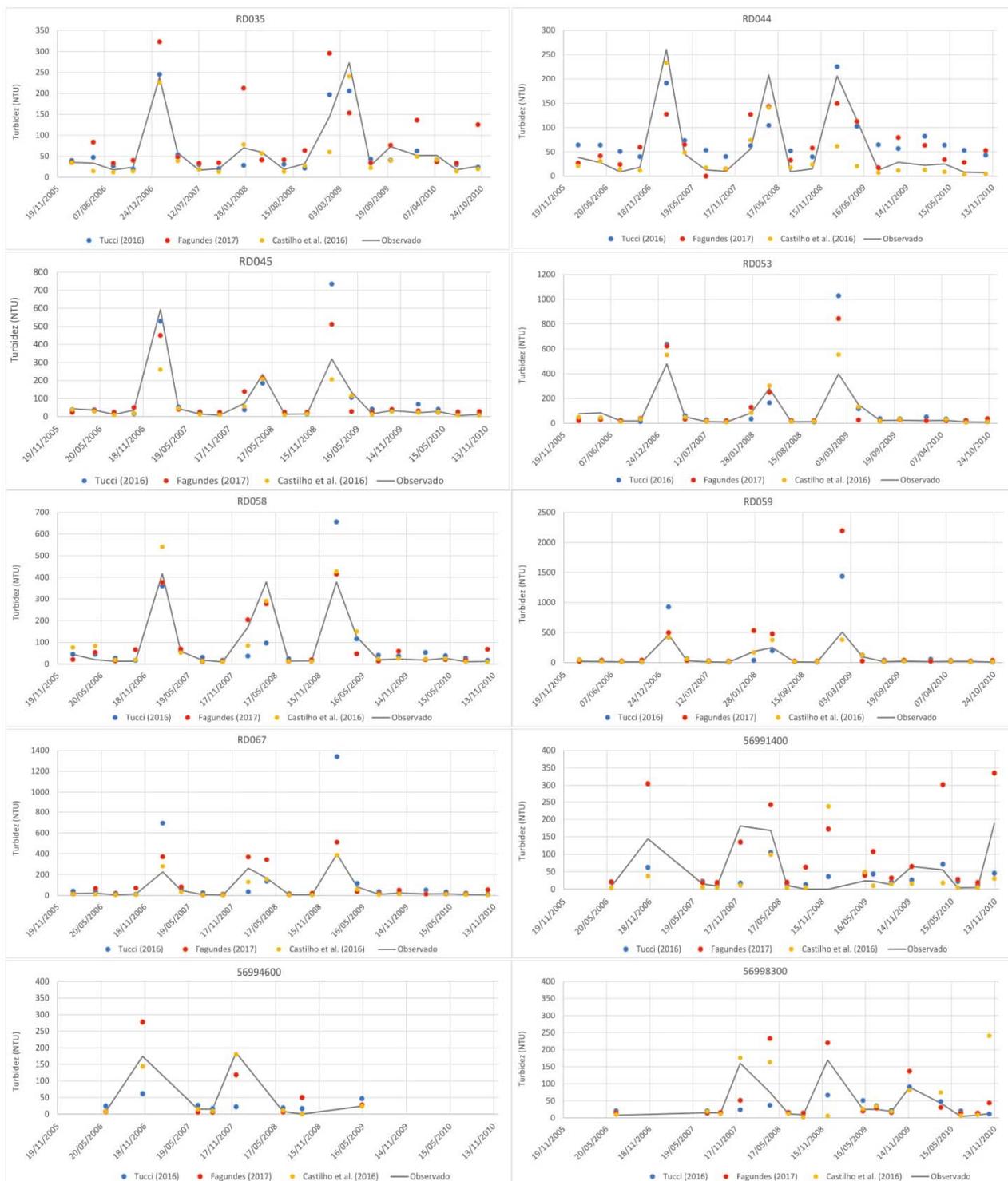


Figura 2 - Resultados das aplicações. Foram selecionados apenas os postos com aplicação dos três modelos – continuação.

A aplicação do modelo baseado em Tucci (2005) mostrou melhores correlações para o Alto rio Doce que a de Fagundes (2017), enquanto o adaptado de Castilho et al (2016) apresentou correlações maiores que as demais no Alto e no Médio Doce, além de apresentar as menores amplitudes de erro em toda a região. Comparando a bacia como um todo, o modelo de Fagundes



obteve a melhor correlação média. Cabe ressaltar que os dados observados de turbidez do estado do Espírito Santo eram em menor quantidade que os de Minas Gerais, prejudicando os resultados.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base na aplicação e análise dos três modelos prognósticos, pode-se concluir que todos são satisfatórios preditores de turbidez para bacia do rio Doce, tanto em afluentes quanto no rio principal (erro aceitável de até cerca de 40%). Aponta-se, assim, a conveniência de utilizar estes modelos para prognósticos de turbidez na bacia.

Contudo, deve-se considerar as incertezas relativas a cada modelo antes da definição de uso, procurando diminuí-las quando possível. No modelo baseado em Tucci (2005), a regressão deve ser atualizada sistematicamente com a obtenção de dados, permitindo a melhoria das correlações. No modelo modificado de Castilho et al. (2016), é importante uma análise correta da eficiência de retenção dos reservatórios das usinas, podendo haver erros significativos no modelo.

Neste estudo, desconsiderou-se a separação entre período chuvoso e período seco. Entretanto, como na região em questão existe um regime sazonal de chuvas e os modelos dependem da vazão, sua análise em separado pode aumentar a precisão dos resultados.

6 - BIBLIOGRAFIA

ANA (2017). Agência Nacional de Águas. HidroWeb – Sistema de Informações hidrológicas. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Último acesso em outubro de 2017.

CASTILHO, A. S.; MOTTA, B. G; MARTINS, L. K. L. A. (2016). Modelo de previsão de turbidez do rio Doce após a ruptura da barragem de rejeitos. Anais do XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Velho (RO), 2016.

FAGUNDES, H. O. (2017). Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados *in situ* e sensoriamento remoto. Plano de dissertação de mestrado. IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre, abril de 2017.

IGAM (2017). Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Portal Info Hidro – Informações de recursos hídricos. Dados de Monitoramento de Qualidade. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica>>. Último acesso em 7 de outubro de 2017.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* (2011). Relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão em rios de uma bacia agrícola típica do cerrado: o caso da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim, DF. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Maceió (AL), 2011.

TUCCI, C. E. M. (2005). Modelos hidrológicos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Porto Alegre, 2005.