

**ARTIGO ORIGINAL**

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM TRECHO DO RIO DOCE (ES) UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL**

**ORIGINAL ARTICLE**

**SIMULATION OF SEDIMENT TRANSPORT IN A STRETCH OF DOCE RIVER (ES) USING COMPUTATIONAL MODELING**

**Krishna Daher Sodré Campana<sup>1</sup>**

Faculdade Estácio de Vila Velha - FESVV, Brasil

**RESUMO**

Modelos numéricos foram desenvolvidos a fim de avaliar a evolução geomorfológica de corpos hídricos, podendo auxiliar em futuros projetos de engenharia para tomada de decisões preventivas e/ou corretivas. Por essas questões, a pesquisa teve como objetivo avaliar o transporte de sedimentos em um pequeno trecho do rio Doce, localizado em Colatina-ES, utilizando o software HEC-RAS. Foram levantados dados de batimetria, seção do rio, vazões líquidas e sólidas, temperatura e granulometria, entre os períodos de dezembro de 2011 a fevereiro de 2012. No programa, foram escolhidas três equações de transporte, que foram Engelund e Hansen (1967), Ackers e White (1973) e Yang (1973). O modelo foi calibrado e ajustado os valores de coeficiente de Manning nas seções. Foram aplicados os coeficientes de correlação, determinação e erro médio quadrático para avaliar os melhores ajustes de parâmetros. Ao comparar as elevações observadas com as simuladas, foi possível concluir que a equação de Engelund e Hansen, com coeficiente de correlação de 0,029 na calha e 0,055 nas margens, resultou em um perfil longitudinal do leito mais condizente com a realidade. Com isso, foram extraídos os valores do modelo ajustado de concentração de sedimentos, descarga sólida total, e alterações no leito de erosão/sedimentação no leito. Com os valores de concentração de sedimentos e vazões, foram estimados os valores de descarga em suspensão e de material de leito. Os resultados mostraram valores de descarga total nas seções variando entre 2.226 ton/dia a 27.401 ton/dia. A descarga de material de leito esteve entre 32 ton/dia a 4.377 ton/dia. No leito houve uma tendência maior à sedimentação no período analisado. O modelo atendeu ao objetivo da pesquisa, gerando valores com um nível de detalhamento interessante nas seções quando se avalia sua empregabilidade em apoio à gestão dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Recursos Hídricos. Transporte de sedimentos. Rio Doce. Modelagem computacional. HEC-RAS.

**ABSTRACT**

Numerical models were developed in order to evaluate the geomorphological evolution of water bodies, and may help in future engineering projects for preventive and/or corrective decision making. The main of this research was to evaluate sediment transport in a small stretch of the Doce river, located in Colatina - ES, using the HEC-RAS software. Data were collected from bathymetry, river section, liquid and solid flows, temperature and granulometry, from December/2011 to February/2012. Three transport equations were chosen: Engelund and Hansen (1967); Ackers and White (1973), and Yang (1973). The model was calibrated and adjusted the Manning coefficient values in the sections. The coefficients of correlation, determination and mean squared error were applied to evaluate the best parameters adjustments. When comparing the observed and simulated elevations, it was possible to conclude that the Engelund and Hansen equation, with a correlation coefficient of 0.029 in the channel and 0.055 in the margins, resulted in a longitudinal profile of the bed most consistent with

---

<sup>1</sup> Bacharel em Engenharia de Produção pela FESVV.

reality. Thus, the values of the adjusted model of sediment concentration, total solid discharge, and changes in bed erosion / sedimentation were extracted. With values of sediment concentration and flow rates, the values of suspended discharge and of bed material were estimated. The results showed total discharge values in sections ranging from 2.226 tons/day to 27.401 tons/day. The discharge of bed material was between 32 tons/ day and 4.337 tons/day. In the bed river there was a greater tendency to sedimentation in the analyzed period. The model met the research objective, generating values with an interesting level of detail in the sections when evaluating their employability in support of the management of water resources.

**Keywords:** Water resources. Sediment transport. Doce River. Computational modeling. HEC- RAS.

## 1 INTRODUÇÃO

Conhecer o comportamento do ciclo hidrossedimentológico é essencial para uma boa gestão e suporte aos recursos hídricos. O estudo do fluxo de sedimentos ainda permite realizar um diagnóstico de possíveis impactos ao longo do tempo, tornando-se um indicador ambiental (CRISPIM et al., 2015).

A dinâmica do escoamento nos canais fluviais advém da atuação da água sobre os sedimentos desde a bacia ao leito fluvial, ocasionando o transporte de sedimentos, a deposição e a escultura da topografia do leito, carregando água e detritos, que percorrem um caminho dos continentes para os oceanos. As redes hidrográficas se apresentam como as principais vias para o transporte de material de diferentes espécies de tamanhos e formas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Vale ressaltar que diversos são os fatores que levam ao desequilíbrio dos processos de erosão dos rios, entre eles a retirada da vegetação, o uso do solo e sua ocupação inadequada. Com isso, há um aumento da frequência de enchentes e custos com tratamento de água, prejuízos para navegação, redução energética e da vida útil dos reservatórios, entre outros (BRANCO, 1998; SCAPIN; PAIVA, 2005).

De acordo com uma análise conjunta das transformações da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, que abrange os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, foram avaliadas intensas modificações, tendo maior impacto junto ao canal principal e adjacências. O maior manancial de água doce do estado do Espírito Santo apresenta níveis de vazão reduzidos, o que poderia comprometer os solos junto à desembocadura, avanço da cunha salina e alterações na morfologia (COELHO, 2007).

Segundo o levantamento registrado pelo Plano Integrado de Recursos Hídricos - PIRH (2010), 58% de área da bacia do rio Doce está classificada em uma zona de suscetibilidade erosiva forte. O estudo indicou que grande parte dos sedimentos erodidos é depositada nas baixas vertentes e planícies de inundação, apontando que seriam necessários estudos detalhados para quantificar o transporte de material erodido pela erosão acelerada, e que se depositam nos principais canais de drenagem.

Destaca-se que em novembro de 2015 ocorreu um acidente que afetou a bacia do rio Doce, ocasionado pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, localizada em Mariana – MG. O desastre gerou não só um impacto local, mas se estendeu à região costeira do Espírito Santo (ESPINDOLA et al., 2016). Ante o processo de modificação da paisagem já instalada, pouco compreendida na calha, é preciso entender a dinâmica de escoamento e erosão/sedimentação, de modo a contribuir em futuros estudos.

Para aprimorar e tornar mais ágil a análise desses ambientes, modelos numéricos foram desenvolvidos a fim de avaliar a evolução geomorfológica de rios. Eles podem auxiliar em futuros projetos de engenharia, prevendo fenômenos para tomada de decisões preventivas e/ou corretivas (CONDE, 2007; MACHADO, 2002; DOLVITSCH, 2013; CHERO & CASTELLET, 2015).

Um dos softwares de livre acesso que vem sendo empregado em pesquisas para avaliar o transporte de sedimentos em trechos de rio é o HEC- RAS, desenvolvido pelo corpo de engenharia do exército americano. O potencial de transporte de sedimentos é calculado pela fração granulométrica e fornece uma lista de equações distintas. O modelo foi elaborado para simular tendências de erosão e/ou deposição em canais, que podem resultar da modificação da geometria, e ser empregado para avaliar a deposição em reservatórios, projetar condições para manter as profundidades de navegação, entre outros (USACE, 2016a).

Diante desse contexto, esta pesquisa propôs o estudo do fluxo de sedimentos em um trecho do rio Doce, utilizando modelagem computacional. A região escolhida está inserida na localidade de Itapina, município de Colatina – ES, onde já havia um levantamento de dados necessários para realizar a pesquisa, de acordo com os trabalhos realizados por Almeida (2012) e Brune (2014).

## **2 CONCEITUALIZAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 TRANSPORTE FLUVIAL DE SEDIMENTOS**

A intemperização das rochas originam os constituintes que serão transportados em solução química e que irão compor a carga dissolvida de água, que são os sedimentos fluviais. O transporte desses materiais pode ocorrer em forma de suspensão – representado pelas partículas mais finas; e transporte no leito – ocasionado pela gravidade, por meio de rolamento, saltação e arraste pelo fluxo. Não existe uma separação definida dos tipos de transporte, sendo apenas uma forma de representar as condições reais. Há ainda a falta de informações sobre os mecanismos de transporte de carga dissolvida comparada com a atenção dirigida aos processos de transporte em suspensão e carga do leito (TUCCI, 2007; CRISPIM, 2015).

O transporte de sedimentos nos cursos d'água ocorre por fatores hidrológicos, que são a quantidade e distribuição das precipitações, a estrutura geológica, condições topográficas e cobertura vegetal. Esses componentes interferem no meio de modo a proporcionar a formação de material originado do intemperismo na bacia hidrográfica e o seu carreamento até os rios, sendo o fluxo uma resposta aos processos de estado de equilíbrio atuantes no sistema fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Em relação à carga do leito do rio, esta é composta por partículas de granulometria maior, como as areias e cascalhos, que são transportados através da saltação, deslizamento ou rolamento na superfície do leito, podendo se deslocar de

modo intermitente. A velocidade se apresenta mais lenta com relação ao fluxo devido à densidade das partículas. As partículas de granulometria reduzida, como o silte e a argila, permanecem em suspensão pelo fluxo turbulento, constituindo a carga de sedimentos em suspensão (TUCCI, 2007).

Os tipos de transporte que ocorrem em um curso d'água são descritos por Carvalho (2008) como carga sólida de arrasto, carga sólida saltante e carga sólida em suspensão, que são definidos:

- Carga sólida de arrasto: são partículas de sedimento que rolam longitudinalmente no curso d'água, estando em contato com o leito;
- Carga sólida saltante: é composta por partículas que saltam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas;
- Carga sólida em suspensão: é composta por partículas que estão suportadas pelos componentes verticais da velocidade do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelos componentes horizontais destas velocidades, sendo pequenas suficientemente para permanecerem em suspensão.

O controle do transporte da carga em suspensão ocorre pelo volume de sedimentos que são fornecidos ao curso d'água, pois a carga em suspensão é carregada quase na mesma velocidade da água e, quando a turbulência atinge ao limite crítico, as partículas em suspensão se precipitam. A deposição da carga em suspensão pode ocorrer em trechos de águas muito calmas ou nos lagos. Já o controle de transporte dos sedimentos mais grosseiros que compõe o fundo advém da capacidade de transporte (TUCCI, 2007).

Segundo Paranhos et al. (2003), a capacidade de transporte é a capacidade máxima de sólido que um escoamento na superfície livre pode transportar, dividindo-se em capacidade em suspensão, que será alterada pela carga de sedimento transportado; e capacidade de arraste, que se modifica com a existência de

deformações como rugas, dunas e outros que dissipam por atrito parcelas de energia do escoamento e deixa de ser utilizada para transporte de sedimentos. Nos casos em que a descarga sólida for maior que a capacidade de transporte, predomina-se o assoreamento do curso d'água. O contrário encontra-se nos casos de erosão, onde o material de fundo é removido e ocorre alteração da capacidade de transporte (TUCCI, 2007).

De acordo com Conde (2007), a capacidade de transporte de sedimentos depende de diversos fatores, entre os quais se destacam a vazão líquida, a declividade, as características dos sedimentos de fundo, e a forma da seção transversal.

Importante mencionar que o transporte de sedimentos nos cursos d'água é explicado pela relação entre a capacidade do escoamento de carregamento e a força que se faz necessária para deslocar as partículas sólidas. Dentre as partículas mais leves, como as argilas e siltes, é necessária uma quantidade menor de energia para serem carregadas, ao contrário das areias, que são mais pesadas. Os escoamentos turbulentos possuem alta capacidade de carregamento de sedimentos, mas à medida que a velocidade diminui, o transporte vai se tornando seletivo entre os sedimentos finos e grossos. Dessa forma, os processos de transporte de sedimentos dependem da granulometria do material particulado nas bacias hidrográficas (CHRISTOFOLETTI, 1981; LEOPOLD et al., 1964).

Com relação aos processos de erosão e sedimentação, destaca-se que o limiar da força crítica restringe a separação dessas duas fases. No primeiro caso, a fase acontece quando a capacidade de transporte da calha é maior que o volume de sedimentos transferidos pelas encostas, ocasionando expansão das calhas. No segundo exemplo, a fase acontece quando o fluxo de entrada de sedimentos é maior que a capacidade de transportá-los, o que acarreta na redução dos canais (LANE, 1955; BULL, 1979; FARIA, 1994; FARIA; MARQUES, 1998).

No tocante à concentração de sedimentos nos cursos d'água, quando ocorre um aumento por intensificação dos processos erosivos, pode haver um

comprometimento dos recursos hídricos, além de afetar barragens, captações e estações de tratamento de água. No caso de barragens, ocorre também a redução do aporte de sedimentos à jusante, alterando os mecanismos de transporte e conseqüentemente a geometria da calha (BRANDT, 2000).

Desse modo, avaliar o comportamento de sedimentos transportados é fundamental para estudos de bacias hidrográficas e conseqüente uso de seus recursos hídricos em projetos de obras hidráulicas devido ao fato de que o sedimento, tanto em suspensão, quanto no fundo do leito, pode provocar problemas estruturais e ambientais (CARVALHO, 2008).

## 2.2 MODELAGEM EM TRECHOS DE RIOS

Existem modelos numéricos de escoamento de domínio público que simulam o transporte de água e do sedimento. A maioria deles para simulações de calha de rios são unidimensionais (1D) ou bidimensionais (2D), modelando processos hidrodinâmicos de fluxo e morfodinâmicos de canais. Os modelos unidimensionais requerem menor informação na fase de calibração e testes (CONDE, 2007; DUAN; LI, 2003).

Para Tucci (1998), os modelos visam à representação de um sistema de uma forma que seja acessível, a fim de facilitar sua compreensão.

Softwares para simulação em calhas foram os primeiros a serem utilizados, sendo empregados pela necessidade de definição da carga de sedimentos que atravessa uma seção, dados que são importantes para operações de barragens (DOLVITSCH, 2013).

Os modelos de transporte de sedimentos se baseiam em modelos hidrodinâmicos para calcular o transporte de materiais, obtendo assim a variação do escoamento e concentração de escalares, como salinidade, poluentes, sedimentos, entre outros. A geometria é representada por seções transversais, sendo o fluxo perpendicular às seções, e a velocidade adotada é a velocidade média do

escoamento. Todavia, esses modelos não são apropriados para simulações em rios sinuosos (ESTIGONI, 2016).

Dentre os programas existentes para análise de transporte de sedimentos em trechos de rios, destacam-se o SED2D-WES, Mike 21-ST, e HEC-RAS.

O programa SED2D – WES da US Army Engineer Research And Development Center, foi elaborado para a simulação de transporte bidimensional de sedimentos em trechos de rios, que permite estudos de erosão e deposição dos sedimentos arenosos ou argilosos. Todavia, não permite a simulação simultânea de rios com essas duas composições, apenas um diâmetro para cada cálculo. As equações presentes são somente Ackers e White (1973), e Krone (1962). Outra limitação do modelo é o fato de não permitir avaliar descarga de fundo e carga em suspensão de sedimentos (LETTER et al., 2011).

A DHI Software desenvolveu uma expansão do MIKE 21, que simula somente transporte de sedimentos arenosos em rios. Este software foi elaborado para a simulação das mudanças na taxa de transporte e capacidade de transporte de sedimentos arenosos que podem ocorrer nos rios devido às alterações no seu regime hidráulico (DHI SOFTWARE, 2007). As equações existentes são Engelund e Hansen (1967); Engelund e Fredsoe (1976), Meyer- Peter e Müller (1948) e Van Rijn (1984). Pode simular rios com sedimentos de granulometria de areias até cascalhos, podendo ser inseridos dados de gradação do material do leito, variando entre 0,19mm à 30mm.

Outro exemplo é o programa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA, que em sua versão a partir de 4.1(2007), permite a simulação de transporte unidimensional de sedimentos em trechos de rios, considerando erosão e deposição destes sedimentos ao longo do tempo, o que admite estimar as consequências de modificações do leito ou margens em um canal. Permite a simulação simultânea de sedimentos com diferentes granulometrias, podendo fornecer dados de curva granulométrica, e calcular a erosão no leito do rio, devido ao transporte de sedimento. A versão mais atual conta com equações de transporte



total de sedimentos – Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967), Copeland's Laursen (1968,1989), Toffaleti (1968), MPM- Toffaleti e Yang (1973); uma para transporte de fundo – Meyer, Peter e Müller (MPM) (1948); e outra para transporte em suspensão – Wilcock e Crowe (2001)(USACE, 2016a).

### 2.3 SOFTWARE HEC-RAS

Simular o transporte de sedimentos é algo que pode ser complexo, visto que a teoria foi elaborada de forma empírica e é altamente sensível a uma gama de variáveis físicas e parâmetros que podem ser difíceis de estimar. Entretanto, um modelo bem calibrado pode prever tendências regionais e de longo prazo, auxiliando em planejamentos, alternativas de projetos e tomada de decisões (USACE, 2016b).

O programa HEC-RAS oferece duas abordagens hidrodinâmicas para simulação de transporte de sedimentos a partir da versão 5.0, que são: fluxo quasi-permanente e não permanente. O modelo de fluxo quasi-permanente simplifica a hidrodinâmica, e é representado por um hidrograma contínuo com uma série de perfis discretos de fluxo estável. O fluxo permanente é mantido para cada registro de fluxo, calculando a duração do registro do fluxo de transporte. Os perfis de fluxo permanente são mais estáveis que a solução matricial das equações instáveis de Saint-Venant (USACE, 2016a).

### 2.4 ESTUDOS COM HEC-RAS

Neste subitem foram reunidos alguns trabalhos realizados utilizando HEC-RAS para simulação de transporte de sedimentos em trechos de rio. Há ainda escassez de pesquisas produzidas com o referente tema, o que corrobora com a importância de se desenvolver mais estudos.

Conde (2007) realizou a modelagem com HEC-RAS na versão 4.0, em um rio aluvionar de Portugal, utilizando o regime de fluxo permanente. Foi feito um estudo da evolução do leito ao longo do tempo, comparando com levantamentos

batimétricos e granulométricos. Com relação à condição de fronteira de montante, a vazão sólida que entrava no sistema se mostrou pouco expressiva na geração de resultados devido à existência da barragem à montante do sistema. A análise da distribuição granulométrica revelou que uma distribuição menor ocorre maior erosão, visto que as partículas mais finas são arrastadas mais facilmente. Já com relação às fórmulas de transporte, as fórmulas de Meyer-Peter e Müller conduziram a maiores valores de erosão, comparadas com Ackers e White.

Chacón & Pazmiño (2010) avaliaram o programa HEC-RAS 4.1 para análise de fluxo não permanente e transporte de sedimentos em um rio no Equador. Escolheram esse tipo de fluxo devido às condições do rio que se apresentavam com curvas sinuosas, encostas íngremes, velocidade altas, além das frequentes mudanças de regime subcrítico para supercrítico. Foi elaborada uma metodologia que poderia ser aplicada em outros rios com características semelhantes ao local de estudo, além de avaliar condições de erosão ou deposição. Foram realizadas calibrações do modelo e análise de sensibilidade para diferentes condições, como variações de parâmetros geométricos e dinâmicos na simulação numérica do fluxo; variações do hidrograma para fluxo não permanente; variações de simulação numérica de sedimentos; e análise de sensibilidade sobre restrições de tipo numérico. Essas análises tiveram como objetivo determinar os parâmetros ou condições para as quais o modelo é mais sensível. Com relação aos hidrogramas, houve variação dos parâmetros correspondentes às vazões e área molhada das seções, e os demais, como velocidade e níveis de energia permaneceram constantes nos 3 exemplos testados. Os modelos de transporte de sedimentos apresentaram grandes variações de resultados, concluindo que apenas duas equações foram adequadas ao estudo na região: Meyer-Petter e Müller e Ackers e White.

Skipworth (2010) indicou a importância de se considerar os impactos do desenvolvimento às margens de rios e aplicar estudos de modelagem hidrológica e hidráulica para compreender os processos de transporte de sedimentos, bem como alterações na geometria. O modelo hidráulico utilizado foi o HEC-RAS, que

identificou algumas alterações significativas no comportamento de fluxo e inundação como resultado da urbanização. A modelagem da erosão consistiu em uma análise de fluxo estável para eventos de inundação de 2 e 100 anos, além de comparações dos resultados com relação aos níveis de água, extensões de inundação, tensões de cisalhamento, larguras de inundação e risco de inundação, o que mostrou um aumento significativo na geometria do canal.

Garcia (2012) elaborou um trabalho para análise e avaliação do transporte de sedimentos a uma região na Espanha utilizando regime de fluxo quasi-permanente, concluindo que o emprego do HEC-RAS é eficaz sempre quando se consideram suas limitações a respeito do seu caráter unidimensional. Com relação à análise de transporte de sedimentos, foram aplicadas sete fórmulas diferentes para simulação da erosão, transporte e sedimentação em função da geometria, granulometria e hidrogramas. Foi constatado que a equação Engelund e Hansen, e Toffaleti, não são aptas para modelagem da região; e Ackers e White, Yang e Wilcock tenderam a subestimar os valores. Com Copeland's Laursen o efeito foi o contrário, sobrestimando. A única equação que se manteve no entorno de valores médios foi a Meyer-Peter e Müller.

Aguirre (2013) desenvolveu um trabalho implementando HEC-RAS para o sistema formado pelo rio Jubones, rio São Francisco e as obras concebidas para o projeto hidroelétrico Minas-San Francisco, no Equador. Foram simulados cenários e identificados os principais processos de fluxo, uma análise das relações mais representativas para o cálculo do transporte de sedimentos e posterior sedimentação nos rios. Foi realizada uma análise dos aspectos relacionados ao desempenho hidráulico das obras que tem a ver com os processos de transporte de sedimentos, erosão e sedimentação, como também análises de desempenho do modelo matemático. As equações que representaram melhor a região foram Meyer-Peter e Müller, Ackers e White, concluindo que o programa respondeu adequadamente às variações de hidrogramas, entre outros. Ainda conclui que uma vez implementados os parâmetros iniciais do modelo, se recomenda realizar

simulações com fluxo permanente para identificar erros na estimação dos parâmetros preliminares.

Song, Schamlz, Foher (2014), integraram os softwares SWAT e HEC-RAS, criando um modelo para análise dos processos de transporte e acúmulo de sedimentos em 10 seções de um rio da bacia Upper Stör, na Alemanha, simulando processos sedimentares entre os períodos de 2001 a 2010. Foram combinadas as capacidades de variação de geometria do HEC-RAS e a vantagem de geração de dados do SWAT para configurar o modelo da bacia em estudo. Os resultados mostraram que os processos de deposição dominaram a bacia Upper Stör na escala de tempo em décadas com uma profundidade de sedimentação média de 2,85 cm. Aproximadamente 1% do sedimento foi retido pela planície de inundação, e os outros 99% foram depositados no leito do rio. O sedimento na calha se mostrou mais espesso e com maior variabilidade do que o sedimento da planície aluvial. Constataram que a altitude da seção do rio afeta o tamanho do grão de sedimento na calha, enquanto o tamanho do sedimento da planície de inundação depende do poderdo córrego da planície aluvial.

Pender, Patidar e Haynes (2015) apresentaram uma metodologia utilizando HEC-RAS para avaliar inundações futuras como resultado de mudanças na morfologia de rio para estudar a influência de 50 anos de mudança morfológica. O teste de sensibilidade das fórmulas mais adequadas mostrou que a equação de Ackers e White apresentou menores estimativas de transporte de sedimentos. Além disso, este modelo foi usado no transporte de sedimentos em estudos anteriores, sendo considerado o mais apropriado para região.

Nistoran et al. (2017) estudaram as mudanças morfológicas no Baixo rio Danúbio, entre 2008 e 2011, utilizando HEC-RAS. O modelo hidráulico não permanente foi calibrado para os valores médios diários de descarga observados em 2008, e depois validado para os dados hidrológicos do ano chuvoso em 2010. Os coeficientes de Manning foram ajustados no intervalo de 0,028 para o canal principal, e 0,07 para as margens. As condições de fronteira do fluxo à montante

foram em função da vazão, descarga de sedimento e temperatura, e à jusante, a curva de classificação. As condições iniciais do arquivo de sedimentos foram as curvas de classificação e os limites máximos erodíveis. Para funções de transporte de sedimentos, foram escolhidas Engelund e Hansen, Tofaletti e Copeland's Laursen. Destaca-se que nesse estudo, a carga total de sedimentos foi considerada igual à carga suspensa devido à falta de dados. Nesse processo concluíram que as mudanças morfológicas verticais na seção transversal apresentadas no programa indicaram comportamento morfológico próximo do observado por trabalho realizado anteriormente.

Bilal et al. (2017) estudaram 32 km do rio Tenryu no Japão utilizando HEC-RAS, tendo como principal objetivo analisar a capacidade preditiva de dados disponíveis e ferramentas existentes quando seções transversais do canal, distribuição do tamanho dos grãos do rio e vazão, são obtidos através de premissas e fontes de qualidade variável. O foco do estudo foi simular mudanças batimétricas ocorridas no rio Tenryu devido à construção da barragem de Sakuma. As simulações foram utilizadas para prever também possíveis mudanças futuras no perfil do leito do rio e a estimativa de qual período Sakuma não seria capaz de exercer mais sua função. Os dados observados disponíveis para 1956 a 2004 incluíram perfil do leito do rio com intervalos de cinco anos, carga de sedimentos, e registros de alguns eventos de pico de fluxo junto com respectivos dados de sedimentos. O histórico de fluxo foi usado como condição de contorno na estação do rio à montante. Para a condição de limite à jusante, estágios associados à curva de classificação de descarga foram desenvolvidos. A condição de limite para o arquivo de sedimento para a montante era inicialmente a "carga de equilíbrio" e "curva de classificação" de sedimento à jusante. Foi utilizado o coeficiente de determinação para comparar a modelagem com os dados observados, o que indicou bons resultados. O leito do rio é composto de areia e, aplicando a equação de transporte de Toffaletti, garantiram-se os melhores resultados em comparação com outras opções disponíveis. Contudo, a fórmula Englund e Hansen também

apresentou resultados razoáveis para alguns testes. O modelo foi simulado até 2040 para prever alterações batimétricas, desse modo, assumiu-se que o fluxo foi periódico desde 1957 até 2004.

### **3 CONCEPÇÃO DO ESTUDO**

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

A Bacia Hidrográfica do rio Doce se localiza no Sudeste do Brasil, abrangendo os Estados de Minas Gerais (86%) e Espírito Santo (14%), com área de 83.465 km<sup>2</sup> e extensão de 853 km. Possui três Unidades Regionais: Alto, Médio e Baixo rio Doce. A Unidade Regional do Baixo rio Doce apresenta morfologia com variação de oeste para leste de colinas, tabuleiros e planície costeira, com altitudes variadas decrescendo em direção ao canal principal e à planície costeira. O regime fluvial se caracteriza como perene, com picos de cheias nos meses de dezembro, janeiro e março; e as vazantes extremas nos meses de agosto e setembro. A bacia hidrográfica apresenta temperaturas médias anuais elevadas durante a maior parte do ano, obtendo temperaturas médias anuais superiores a 18°C e, no litoral, superior a 24°. As características do clima, relevo e solo acarretam maior velocidade de decomposição sofrida pelos minerais constituintes do material de origem; maior atividade no processo de pedogênese dos solos tropicais e processos naturais de erosões (COELHO,2007).

Para realizar a modelagem do transporte de sedimentos nesta pesquisa, foram obtidos dados por meio de três campanhas de campo, sendo:

- **Campanha 1:** Levantamento em agosto de 2011 – período seco;
- **Campanha 2:** Dois levantamentos em dezembro de 2011 (02/12/11 e 16/12/11);
- **Campanha 3:** Dois levantamentos em fevereiro de 2012, ambos em período chuvoso (10/02/12 e 24/02/12).

### 3.2 DADOS DE ENTRADA

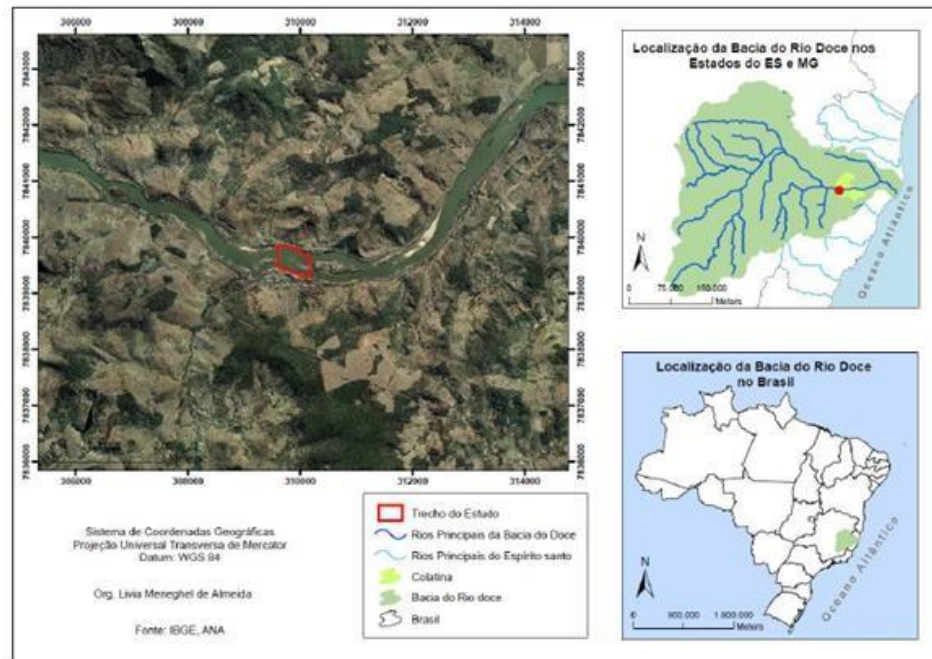
Para utilizar o software HEC-RAS com o objetivo de modelar as alterações no fundo do leito de um trecho do rio Doce e estimar o transporte de sedimentos na seção, foi necessário realizar o levantamento dos seguintes dados:

- Levantamento batimétrico;
- Vazões líquidas médias diárias;
- Vazões sólidas totais dos sedimentos;
- Temperatura;
- Granulometria do material de leito.

Foram utilizados dados de batimetria das campanhas **2** e **3**, pois a batimetria realizada na campanha **1** não gerou um arquivo raster com qualidade satisfatória para modelagem nesta pesquisa. A figura 2 apresenta a situação do trecho do rio Doce durante as campanhas. Os dados de sedimentos acima mencionados – vazões sólidas totais e granulometria – foram coletados apenas em um levantamento em cada campanha, sendo a campanha **2** (02/12/2011) e a campanha **3** (10/02/2012).

Os dados de vazões médias diárias (Figura 4) foram fornecidos pela estação fluviométrica de Nº 56992400 da Agência Nacional de Águas (ANA), entre os períodos de **01/12/2011** a **29/02/2012**. A Figura 1 identifica as linhas batimétricas onde foram obtidos os dados do fundo do leito para modelagem.

**Figura 1 - Localização do trecho de estudo do rio Doce**



Fonte: Almeida (2012).

**Figura 2 - Imagens do trecho do rio Doce obtidas nas campanhas: (a) 2ª campanha (02/12/2011), (b) 2ª campanha (16/12/2011), (c) e (d) 3ª campanha (10/02/2012)**



(a)

(b)





(c)



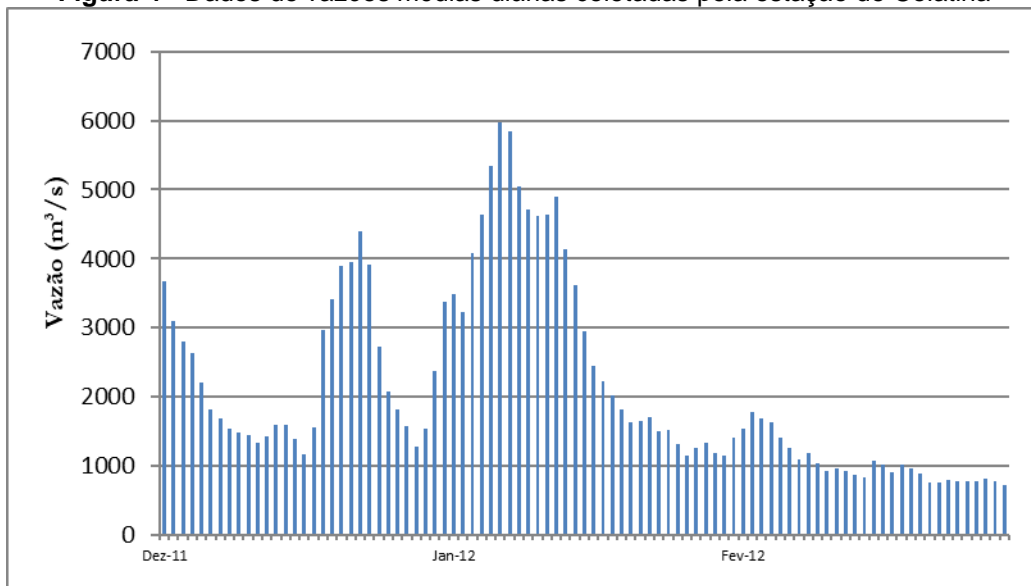
(d)

Fonte: Almeida (2012).

**Figura 3** - Vista superior do trecho do rio Doce com linhas longitudinais para obtenção da batimetria



Fonte: Almeida (2012).

**Figura 4 -** Dados de vazões médias diárias coletadas pela estação de Colatina

**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Tabela 1 -** Estimativa da descarga sólida total pelo método de Einstein Modificado (1955) em ton/dia

Data de coleta	Qss medida	Método de Einstein Modificado (1955)
02/12/2011	23.529	24.892
10/02/2012	4.267	6.574

**Fonte:** Elaborado pela autora.

### 3.3 MODELO UTILIZADO

O modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA, que em sua versão a partir de 4.1(2007), permite a simulação de transporte unidimensional de sedimentos em trechos de rios, considerando erosão e deposição destes sedimentos ao longo do tempo, admite estimar as consequências de modificações do leito ou margens em um canal. Permite a simulação simultânea de sedimentos com diferentes granulometrias e calcular a erosão no leito do rio devido ao transporte de sedimento. A versão mais atual conta com equações de transporte total de sedimentos – Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967), Copeland's Laursen (1968,1989), Toffaleti (1968), MPM-Toffaleti e Yang (1973); uma para transporte de fundo – Meyer, Peter e Müller (MPM) (1948); e outra para transporte em

suspensão – Wilcock e Crowe (2001) (USACE, 2016a).

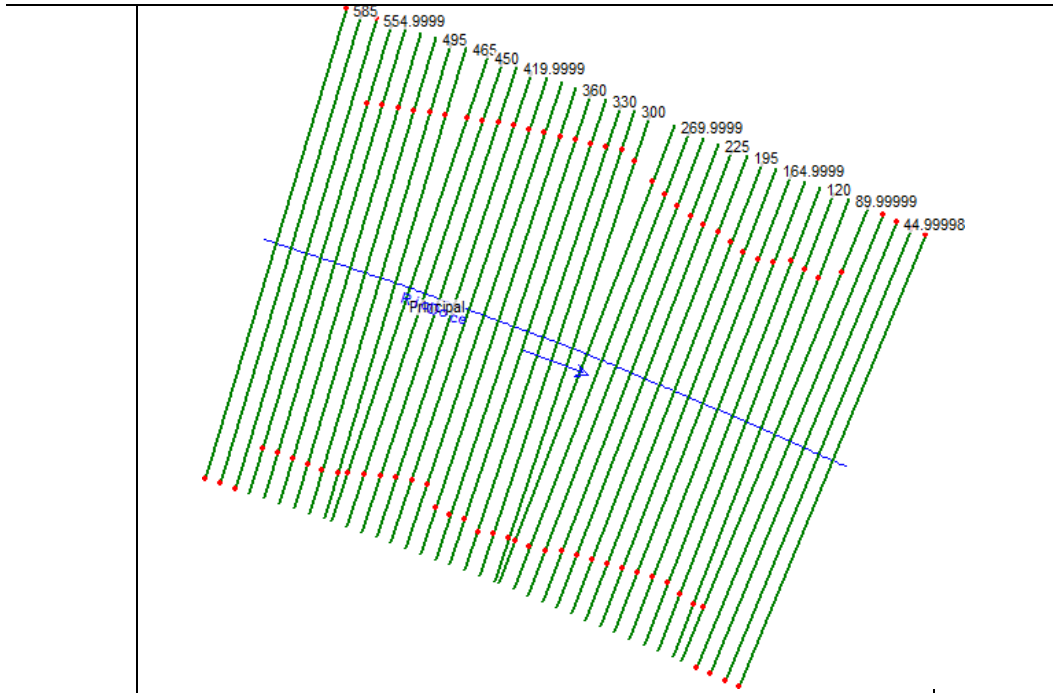
### 3.4 SIMULAÇÕES

Uma vez que todas as informações necessárias foram obtidas, foi preciso integrar, armazenar e editar os dados geograficamente referenciados. Para obter os resultados de transporte de sedimentos em HEC-RAS, foi utilizada a ferramenta de plano de análise de sedimentos, que requereu os seguintes dados de entrada:

- Arquivo geométrico;
- Arquivo de fluxo;
- Arquivo de sedimento.

Com o apoio da extensão HEC-GeoRAS, que foi trabalhada no programa ArcMap na versão 10.1, foi preciso seguir algumas etapas para confecção de um arquivo geométrico para exportação em formato compatível com HEC-RAS. Com as linhas longitudinais de batimetria do trecho do rio obtidas em campo, foi possível criar arquivos em formato raster para as campanhas **2** e **3**. A partir de cada arquivo criado em formato raster e de ferramentas específicas do HEC-GeoRAS, foi traçada uma linha, indicando o fluxo do rio, além de linhas transversais à essa, paralelas umas às outras, para extração de dados hidráulicos do leito do rio até suas margens, para cálculos posteriores de transporte de sedimentos no HEC-RAS (Figura 5).

Dessa forma, foram criadas camadas de informações, delimitação de talvegue, delimitação do rio principal, trajetórias de fluxo e cortes transversais. Em resumo, foram definidas as características referentes ao contorno e estruturas do rio. Foram elaborados **4 arquivos geométricos** com as batimetrias da **2ª campanha** (02/12/2011 e 16/12/2011) e **3ª campanha** (10/02/2012 e 24/02/2012).

**Figura 5** - Criação de um arquivo geométrico a partir de um mapa em formato raster

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Após isso, os arquivos foram exportados do HEC-GeoRAS e importados para HEC-RAS. Nesta etapa inicial, foram configurados os coeficientes de Manning para as seções traçadas ao longo do curso d'água com base em trabalhos anteriores, como também definidas as declividades de linha d'água. Os ajustes dos valores de coeficiente de Manning e declividade da linha d'água se basearam nos dados da tabela 2, que tratam dos trabalhos de Almeida (2012) e Brune (2014), além de Coutinho (2015), que estudaram a mesma região e adotaram valores distintos em suas pesquisas:

**Tabela 2** - Valores do coeficiente de rugosidade de Manning e declividade da linha d'água

<b>Autores</b>	<b>C. de Manning – Calha principal</b>	<b>C. de Manning – Margens</b>	<b>Declividade da linha d'água</b>
Almeida (2012)	0,055	0,055	0,00025
Brune (2014)	0,0126	0,0126	0,00013
Coutinho (2015)	0,029	0,055	0,00007

**Fonte:** Elaborado pela autora

Para esta pesquisa, foram utilizados todos esses dados dos três trabalhos mencionados em cada simulação, a fim de encontrar o melhor ajuste no trecho estudado.

Em sequência, foi criado o arquivo de fluxo quasi-permanente, estabelecidas as condições de contorno à montante e à jusante, que foram Flow Series e Normal Depth, sendo as opções mais adequadas à modelagem do trecho, visto os dados disponíveis de vazão média diária e declividade de linha d'água, onde essas opções poderiam ser aplicadas. Também foi inserida a temperatura para o mês de dezembro à fevereiro.

Por último, foi criado o arquivo de sedimentos. O HEC-RAS apresenta uma relação de equações de transporte de sedimentos a ser aplicada de acordo com as características físicas do rio ou canal. De acordo com a revisão bibliográfica, a equação que mais se adequa ao trecho estudado é Yang (1973,1984). As demais não se aplicam principalmente pela questão da profundidade (D) do rio. Entretanto, das equações disponíveis, Almeida (2012) e Brune (2014) aplicaram também as equações de Ackers e White (1973), Engelund e Hansen (1967). Por motivo de realizar uma melhor análise e avaliar a aplicabilidade das fórmulas nas condições geomorfométricas do rio, foram reproduzidas as três equações para verificar qual delas se adequaria melhor ao trecho estudado.

A equação geral de transporte para a função Engelund e Hansen (1967) é representada por:

$$g_s = 0.05\gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g(\frac{\gamma_s}{\gamma}-1)}} \left[ \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} \right]^{3/2}$$

Onde:

- $g_s$  = Transporte total de sedimentos (ppm);
- $\gamma$  = Peso específico do fluido (kgf/m<sup>3</sup>);

- $\gamma_s$  = Peso específico das partículas sólidas (kgf/m<sup>3</sup>);
- V = Velocidade média do canal (m/s);
- $\tau_o$  = Tensão de cisalhamento no leito (N/m<sup>2</sup>);
- $d_{50}$  = Diâmetro médio das partículas (m).

Para Ackers e White (1973), a equação geral de transporte é representada por:

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \left(\frac{u^*}{V}\right)^n}$$

$$G_{gr} = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)$$

Onde:

- X = concentração de sedimentos (ppm);
- $G_{gr}$  = Descarga sólida (adimensional);
- s = gravidade específica dos sedimentos;
- $d_s$  = Diâmetro médio das partículas (m);
- D = profundidade efetiva (m);
- $u^*$  = velocidade de cisalhamento (m/s);
- V = velocidade média do canal (m/s);
- n = expoente de transição, que depende da granulometria do sedimento
- C = coeficiente
- $F_{gr}$  = parâmetro de mobilidade do sedimento (adimensional);
- A = valor do numero de Froude em movimento inicial.

Em Yang (1973), as equações gerais de transporte para areia e cascalho são representadas por:

$$\log C_t = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.457 \log \frac{u_*}{\omega} + (1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.314 \log \frac{u_*}{\omega}) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right)$$

$$\log C_t = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 4.816 \log \frac{u_*}{\omega} + (2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d_m}{\nu} - 0.282 \log \frac{u_*}{\omega}) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right)$$

Para areia  $d_m \geq 2mm$

Onde:

- $C_t$  = concentração total de sedimentos (ppm);
- $\omega$  = velocidade de queda de partículas (m/s);
- $d_m$  = diâmetro médio das partículas (m);
- $\nu$  = viscosidade cinemática do fluido (m<sup>2</sup>/s);
- $u_*$  = velocidade de cisalhamento dos grãos (m/s);
- $V$  = velocidade média do escoamento (m/s);
- $S$  = declividade da linha d'água (m/m).

Ainda na etapa de configuração de dados de sedimentos e equações de transporte de sedimentos, para o método de classificação foi escolhida a opção Exner 5, e a equação de velocidade de queda de Ruby. A opção Rating Curve foi escolhida como condição de contorno de sedimentos, onde foram inseridos dados de vazão, descarga total de sedimentos e granulometria das campanhas **2** e **3**.

Após a criação de todos os arquivos em HEC-RAS, foi gerado o Plano de Análise de Sedimentos, onde foi feita a simulação do transporte de sedimentos.

A simulação iniciou na data **01/12/2011** e foi até **24/02/2012**. Foi utilizado o arquivo geométrico da **campanha 2** (02/12/2011) como entrada, as vazões de **01/12/2011 a 24/02/2012**, as vazões de sedimentos e dados de granulometria do leito. Os arquivos geométricos gerados na **campanha 2** (16/12/2011) e na **campanha 3** (10/02/2012 e 24/02/2012) foram utilizados para comparação das alterações ocorridas no fundo do leito ao longo do tempo, a partir do primeiro arquivo utilizado como entrada no modelo.

Para encontrar o melhor ajuste de parâmetros do modelo, foram comparadas as elevações do leito do trecho medidas em campo com as elevações simuladas em HEC-RAS, partindo da simulação do **arquivo geométrico da campanha 2** (02/12/2011), **arquivo de fluxo**, e **arquivo de sedimentos** para as respectivas datas:

- **16/12/2011** (campanha 2)
- **10/02/2012** (campanha 3)
- **24/02/2012** (campanha 3)

Para isso, foi preciso elaborar gráficos para comparação visual e aplicação do coeficiente de correlação ( $r$ ), determinação ( $R^2$ ) e raiz do erro quadrático médio (EQM) nos valores das elevações do leito observadas em campo e modeladas em HEC-RAS para mensurar a aproximação dos valores obtidos. Foram considerados como bons resultados valores de coeficientes de  $r$   $\geq 0,70$ , o que indica um coeficiente de correlação elevado (MARTINS, 2014).

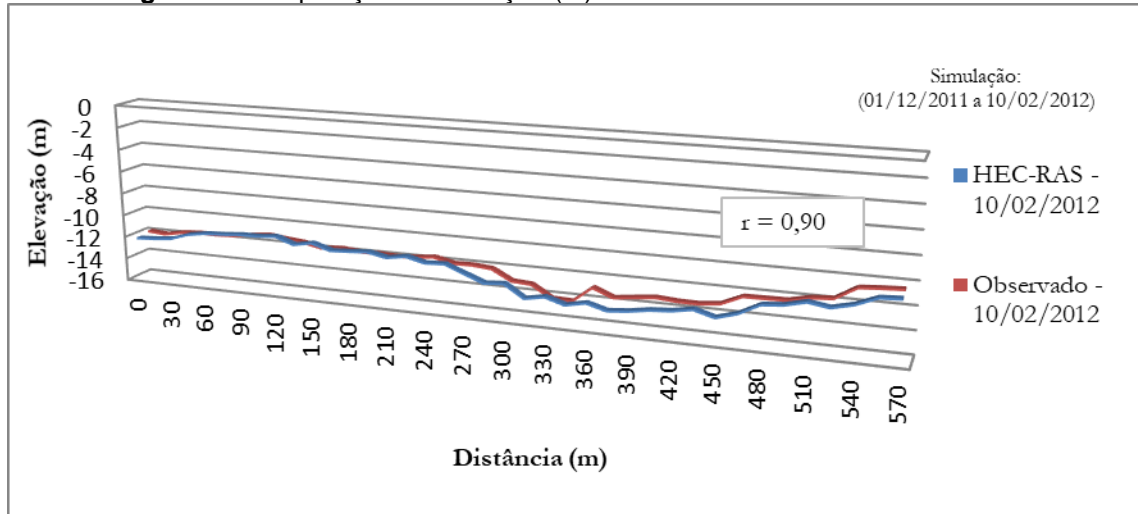
#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A seguir são apresentadas as simulações realizadas de transporte de sedimentos utilizando valores de Manning e declividade da linha d'água que mais se adequaram ao trecho, juntamente com a equação de transporte de Engelund e Hansen (1967), que é uma função para leito arenoso e formado por dunas, que são características do rio Doce.



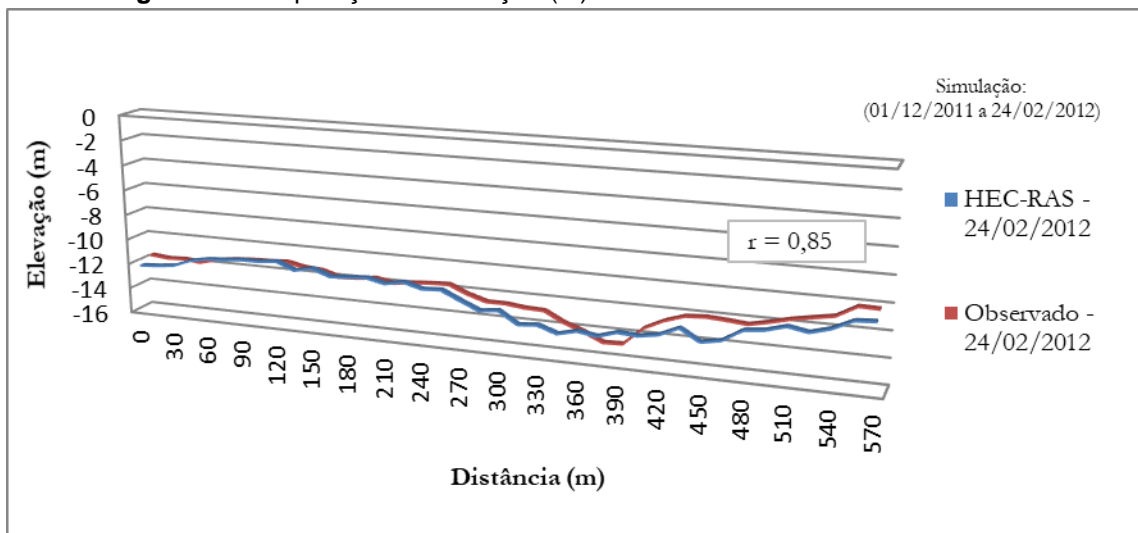
São comparadas as elevações do leito do trecho do rio observadas (**campanhas 2 e 3**) e modeladas. Dentre as equações disponíveis em HEC- RAS, essa foi a que mais se adequou ao trecho, apresentando os melhores coeficientes de correlação.

**Figura 6 - Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado**



Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 7 - Comparação da elevação (m) do trecho simulado com o observado**



Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela 3** - Resumo das análises estatísticas das elevações observadas e simuladas com aequação de Engelund & Hansen.

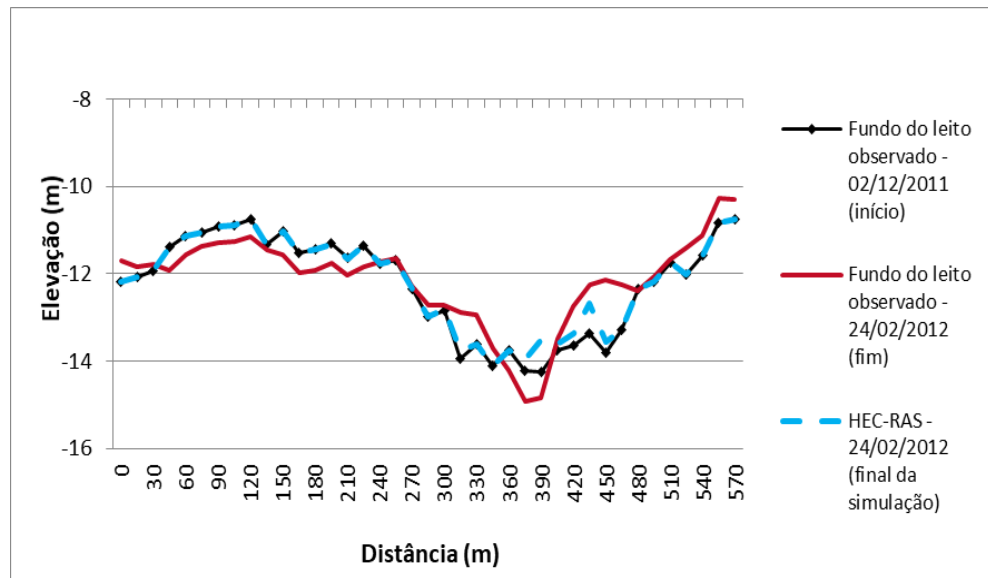
<b>Data</b>	<b>r</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>EQM</b>
16/12/2011	0,93	0,87	0,03
10/02/2012	0,90	0,80	0,04
24/02/2012	0,85	0,73	0,06

**Fonte:** Elaborado pela autora.

A figura 9 apresenta a condição observada em campo do fundo do leito na data inicial (**02/12/2011**) e final (**24/02/2012**), comparando com o final da simulação em HEC-RAS (**24/02/2012**), utilizando a equação de transporte de Engelund e Hansen (1967), velocidade de queda de Ruby (1933) e Método de Classificação de Thomas (Ex5). Essas configurações escolhidas para o modelo foram as que permitiram obter um perfil do fundo do leito simulado mais próximo do observado em campo.

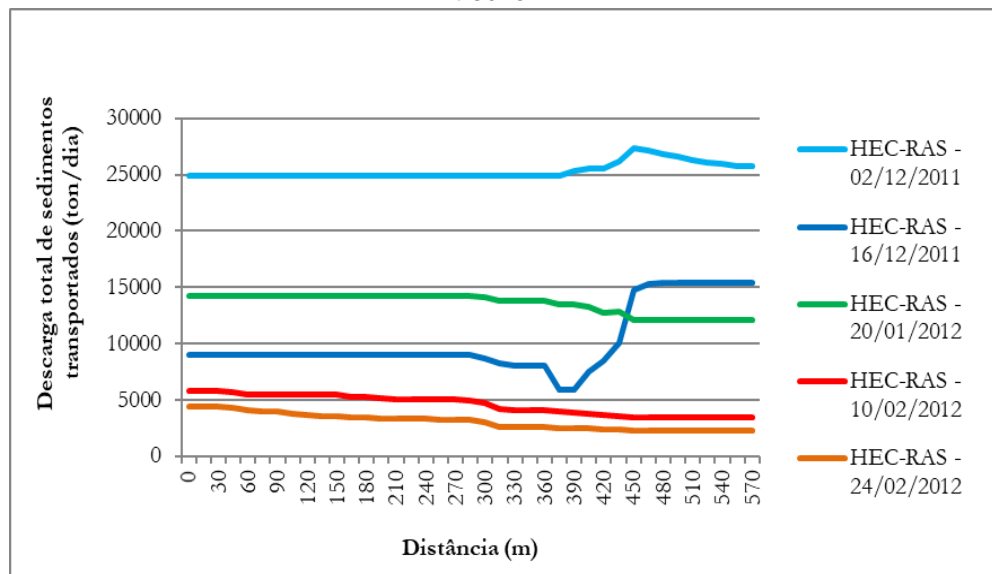
O HEC-RAS permitiu simular para o período analisado, apenas estimando um pouco menos de sedimentos ao final da simulação, comparado ao final do período observado em campo, entre as seções 360 m a 450 m.

**Figura 8** - Comparação das alterações observadas do leito do rio Doce com simulações em HEC-RAS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para descarga total de sedimentos em toneladas ao dia, foram obtidos os valores representados no gráfico da figura 10. Nota-se que a descarga de sedimentos transportados para todos os períodos analisados atinge um valor maior em 02/12/2011, ocorrendo o decréscimo com o passar dos dias de simulação, exceto em janeiro, onde se observa novamente o aumento da vazão e consequente aumento da concentração de sedimentos. É possível verificar que em 02/12/2011 houve uma descarga praticamente constante em torno de 25.000 toneladas/dia e, em fevereiro, os valores foram os menores registrados. Esse comportamento pode ser justificado pela vazão, visto que há um ligeiro aumento em janeiro, com redução em fevereiro.

**Figura 9** - Descarga total de sedimentos (ton/dia) ao longo do perfil longitudinal do trecho.

**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Tabela 4** - Valores mínimos, máximos e médios de descarga total de sedimentos no trecho dorio Doce.

(ton/dia)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Mínimo	24.935	5.920	12.119	3.476	2.226
Máximo	27.401	15.432	14.239	5.762	4.427
Média	25.357	10.166	13.563	4.581	3.071

**Fonte:** Elaborado pela autora.

Fagundes et al. (2017) encontrou valores entre 31 ton/dia a 7.800.000 ton/dia para cada trecho do rio Doce em cada minibacia utilizando o modelo MGB-SED. Neste trabalho, para o presente trecho, os valores da descarga total de sedimentos variaram entre 3.071 ton/dia a 27.401 ton/dia na calha principal.

A partir dos dados de vazão e concentração de sedimentos calculados em HEC-RAS, foi possível estimar a descarga sólida de sedimentos em suspensão em cada seção. Visto que o programa HEC-RAS fornece apenas a descarga sólida total, que é a soma da descarga sólida em suspensão e descarga sólida de material de leito, foi possível estimar a descarga sólida de material de leito em toneladas por dia

(Figura 11).

O gráfico abaixo revela que, assim como o gráfico da descarga total de sedimentos, o início da simulação apresentou um valor maior, alcançando a taxa de 4.377 toneladas/dia. Ao final, temos as menores estimativas, chegando ao valor mínimo de 32 toneladas/dia.

**Figura 10** - Estimativa da descarga sólida de material de leito do trecho do rio Doce (ton/dia)



Fonte: Elaborado pela autora.

**Tabela 5** - Estimativa da descarga de sedimentos de material de leito no trecho do rio Doce.

Data	Valores	Valores	Média na seção (ton/dia)
	mínimos (ton/dia)	máximos (ton/dia)	
02/12/2011	3.983	4.377	4.051
16/12/2011	972	2.534	1.669
20/01/2012	1.323	1.554	1.481
10/02/2012	353	586	465
24/02/2012	32	65	45

Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico da figura 12, que representa a alteração na elevação do leito, indicando condições de erosão/sedimentação, em toneladas, indica uma tendência maior à sedimentação em todos os períodos analisados.

Observa-se que, para a data 02/12/2011, o gráfico representou uma linha reta no ponto zero, ou seja, o modelo não considerou alterações no início da simulação. Para o dia 16/12/2011 já nota-se uma sedimentação máxima de 19 toneladas. Em janeiro, ocorre um aumento da vazão, e é possível notar que ocorre mais erosão no mês seguinte, em fevereiro (10/02/2012). Ao final de fevereiro, a vazão começa a declinar, e em 24/02/2012 constata-se que a erosão diminui, aumentando a sedimentação.

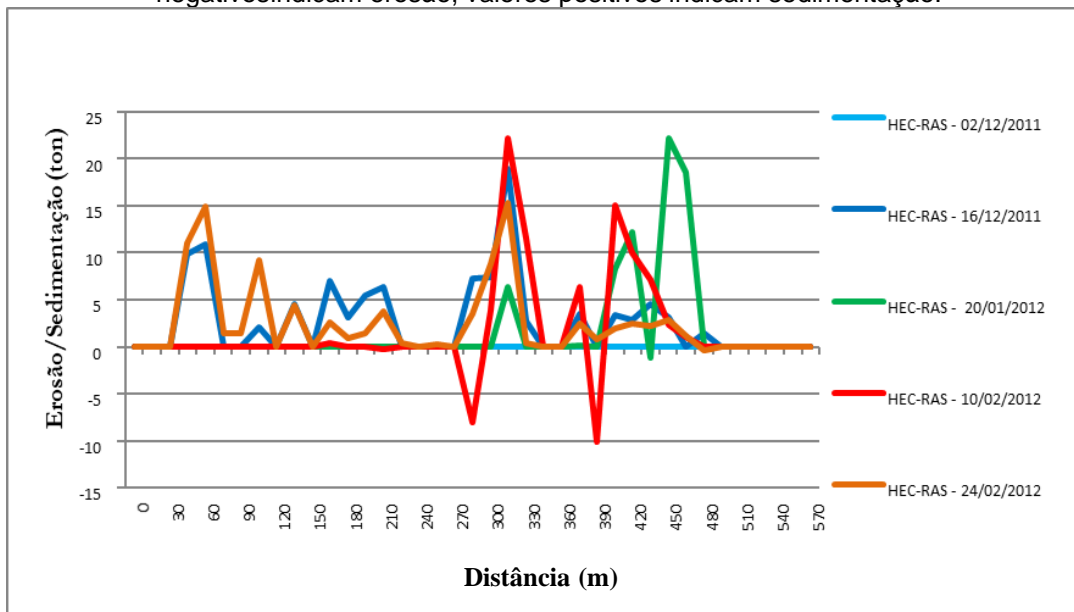
Observa-se que o leito do rio Doce é formado por dunas, e essa variação de deposição ao longo do trecho pode justificar essa formação.

**Tabela 6** - Valores de erosão (negativos) e sedimentação (positivos) no trecho do rio Doce, em toneladas.

(ton)	Período analisado				
	02/12/2011	16/12/2011	20/01/2012	10/02/2012	24/02/2012
Erosão	0	0	-1	-10	0
Sedimentação	0	19	22	22	15

**Fonte:** Elaborado pela autora.

**Figura 11** - Balanço de erosão/sedimentação no trecho do rio Doce. Valores negativos indicam erosão, valores positivos indicam sedimentação.



**Fonte:** Elaborado pela autora.

Em estudos anteriores realizados para o mesmo trecho, Almeida (2012) encontrou que a equação de Engelund e Hansen (1967) se adequou melhor à seção, comparado à Yang (1973), e Ackers e White (1973), que superestimaram os valores. Brune (2014) apresenta valores diferentes, com Yang (1973) resultando em estimativas menores. Em ambos os trabalhos foram utilizados valores diferentes de coeficiente de Manning e declividade da linha d'água. Fagundes et al. (2017) também aplicou Yang ao rio Doce utilizando o modelo MGB-SED, que reproduziu bons resultados.

Neste estudo, a equação de Engelund e Hansen (1967) se adequou melhor, chegando a apresentar estimativas maiores em determinadas seções para descarga de sólidos de material de leito que os trabalhos de Almeida (2012) e Brune (2014) para o mesmo trecho estudado.

Enquanto os métodos indiretos resultam em um único valor representativo da seção, o modelo apresenta valores distintos ao longo do trecho, com nível de

detalhamento maior, sendo uma vantagem diante das alternativas existentes, principalmente quando se pensa na gestão de recursos hídricos e implantação de obras de engenharia.

Devido à importância da qualidade dos dados de entrada para modelagem de transporte de sedimentos, destaca-se também a necessidade de um monitoramento mais frequente desses sedimentos que chegam aos canais fluviais por parte das agências reguladoras.

Quanto às desvantagens do HEC-RAS, sabe-se que a modelagem não apresenta uma solução única, pois se trata de um modelo unidimensional, que é uma aproximação da realidade, e só pode ser aplicado em calhas com declividade menor que  $10^\circ$ . É preciso ter dados de entrada bem robustos referentes à vazão líquida, sólida, coeficiente de Manning e granulometria do leito, visto que o modelo é sensível a esses valores.

Outra questão a ser levantada são as opções de saída de resultados. O programa oferece uma série de opções, mas apenas apresenta os resultados de transporte total de sedimentos, não faz a separação entre transporte de material de leito e suspensão. Todavia, apresenta as alterações com relação à erosão e sedimentação no leito, em toneladas.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A utilização do software HEC-RAS nesta pesquisa atendeu ao objetivo proposto, conseguindo reproduzir as alterações na calha próximo com os dados disponíveis e, assim, prever o transporte de sedimentos ao longo do tempo analisado.

Quanto aos parâmetros mais adequados para realizar a modelagem no trecho, foi encontrado o coeficiente de Manning para calha de 0,029, e margens de 0,055; equação de transporte de Engelund e Hansen; equação de velocidade de queda de Ruby e Método de Classificação de Exner 5. Pelas características da região, somente a equação de Yang seria a ideal, mas não gerou bons resultados,



visto que o ajuste ocorreu pela função que melhor reproduziu as condições de elevação do leito na simulação, comparado ao observado em campo.

Com relação ao transporte de sedimentos em função da geometria, granulometria e vazões, os resultados revelaram um bom desempenho do modelo. A configuração escolhida permitiu reproduzir um perfil longitudinal do rio próximo ao observado, com alta correlação comparada à geometria observada. Com os dados disponíveis de granulometria e vazões líquidas e sólidas foi possível obter valores dentro do esperado para transporte de sedimentos.

Ao comparar os resultados do transporte de sedimentos de material de leito com trabalhos anteriores, o presente estudo corroborou mais com os resultados de Almeida (2012), que se adequou melhor com a equação de Engelund e Hansen.

## REFERÊNCIAS

ACKERS, P.; WHITE, W.R. Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 99, n.11, p. 2041-2060, 1973.

ALMEIDA, L. M. *Análise de metodologias para o cálculo da descarga de fundo, aplicada ao rio Doce, ES*. 2012. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

BILAL, A.; DAI, W.; LARSON, M.; BEEBO, Q.N.; XIE, Q. Qualitative simulation of bathymetric changes due to reservoir sedimentation: A Japanese case study. *PLoS ONE*, v. 12, n. 4, p. 1–18, 2017

BRUNE, R. A. *Métodos de estimativa de descarga sólida em rios – análise comparativa*. 2014. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2014.

CHERO, W. L.; CASTELLET, E. B. Para Cálculos Bidimensionales Del Flujo De Agua En Ríos. Aplicación de la nueva herramienta HEC - RAS 5.0 para calculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. In: Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua, 4, 2015, Córdoba. *Anais eletrônicos...* Disponível em: <<http://www.uco.es/jia2015/ponencias/a/a009.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

COELHO, A. L. N. *Alterações hidrogeomorfológicas no médio-baixo rio Doce/ES*. 2007. 227f. Teste (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense, Niterói.

COUTINHO, M.M. *Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES*. 2015. 260 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CONDE, R. A. N. G. *Análises de sensibilidade em modelação numérica de escoamentos em leito móvel com HEC-RAS. Aplicação ao rio Mondego*. 2007. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

CRISPIM, D. L.; ISMAEL, L. L.; DE SOUZA, T. M. I.; GARRIDO, J. W. A.; DE

QUEIROZ, M. M. F. Transporte e caracterização de sedimentos de fundo no rio Piranhas em uma seção de controle próximo à sede do município de Pompal – PB. *Revista Holos*, v.3, p.93-101, 2015.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia Fluvial. Vol.I, O canal fluvial*, São Paulo:Edgar Blücher, 1981.

CURRAN, J. C.; WATERS, K. A.; CANNATELLI, K. M. Real time measurements of sediment transport and bed morphology during channel altering flow and sediment transport events. *Geomorphology*, v. 244, p. 169–179, 2015.

DOLVITSCH, J. N. *Simulação do transporte de sedimentos em rios e canais: estudo sobre softwares disponíveis*. 2013. 82f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PortoAlegre, 2013.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Technical Press: Copenhagen, Denmark, p. 1-64, 1967.

ESPINDOLA, H. S.; CAMPOS, R. B. F.; LAMOUNIER, K. C. C.; SILVA, R. S. Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, v.5, n.3, p. 72-100, jul.-dez, 2016.

FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. D.; BUARQUE, D. C. Simulação hidrossedimentológica preliminar na bacia do rio Doce com o modelo MGB-SED. In: II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2, 2017, Porto Alegre. *Anais eletrônicos*...Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/170619>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

MACHADO, R. E. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. 2002. 152f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.

MARTINS, E. M. *Coeficiente de correlação amostral*. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 202, p. 1–11, 2014.

NISTORAN, D. G. et al. One Dimensional Sediment Transport Model to Assess Channel Changes along Oltenița-Călărași Reach of Danube River, Romania. *Energy Procedia*, v. 112, p. 67–74, 2017.

PENDER, D.; PATIDAR, S.; HAYNES, H. Incorporating River Bed Level Changes Into Flood Risk Modelling. In: E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, 2015, The Hage, Netherlands. *Anais eletrônicos...* Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/280653325\\_INCORPORATING\\_RIVER\\_BED\\_LEVEL\\_CHANGES\\_INTO\\_FLOOD\\_RISK\\_MODELLING](https://www.researchgate.net/publication/280653325_INCORPORATING_RIVER_BED_LEVEL_CHANGES_INTO_FLOOD_RISK_MODELLING)>. Acesso em: 20 fev. 2017.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. *Caracterização do Transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano em Santa Maria – RS*. In: 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa – Silusba, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Évora, Portugal, 2005.

SIQUEIRA, V. A.; SORRIBAS, M. V.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; LISBOA, A. M. V.; TRINIDAD, G. G. V. *Real-time updating of HEC-RAS model for streamflow forecasting using an optimization algorithm*. *RBRH*, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 855- 870, out./dez. 2016.

SONG, S.; SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Situation, quantification and comparison of in-channel and floodplain sediment processes in a lowland area – A case study of the Upper Stör catchment in northern Germany. *Ecological Indicators*, v.57, p.118-127, 2015.

USACE – United States Army Corps of Engineers. *River Analysis System HEC-RAS: User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016a.

USACE – United States Army Corps of Engineers. *River Analysis System HEC-RAS: Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016b.

YANG, C.T. Incipient Motion and Sediment Transport. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 99, n. 10, p. 1679-1704, 1973.

\_\_\_\_\_. Unit Stream Power Equation for Gravel *Journal of Hydraulic Engineering*,  
v. 110, n.12, p. 1783-1797,1984.