

IV-090 - O DESASTRE DO RIO DOCE: ESTUDO DA DINÂMICA DE ESCOAMENTO DA LAMA POR MODELOS DE TRANSPORTE DE MASSA

Camila Marques dos Reis da Silva ⁽¹⁾

Graduanda do quarto ano em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus de Rio Claro (SP).

Nelson Callegari Junior ⁽²⁾

Professor Assistente Doutor do Departamento de Estatística, Matemática Aplicada e Computação (DEMAC) da UNESP, Campus de Rio Claro (SP). Possui Bacharel em Física pela Universidade Federal de São Carlos, mestre (1998) e doutor (2003) em Ciências pela USP e Pós-doutorado pela UNESP, Rio Claro (SP).

Jamil Viana Pereira ⁽³⁾

Professor Assistente Doutor do Departamento de Matemática da UNESP, Campus de Rio Claro (SP). Possui Pós-doutorado em Matemática pela Universidade Federal de São Carlos - UFSCar (2011), Doutorado (2009) e Mestrado (2005) em Matemática pela UFSCar e Bacharelado em Matemática pela UNESP – IBILCE (2002).

Endereço⁽¹⁾: Av. Caramuru, 2730 – Alto da Boa Vista – Ribeirão Preto - SP - CEP: 14025-710 - Brasil - Tel: +55 (16) 99137-6764 - e-mail: camila@rc.unesp.br

RESUMO

Muitos desastres ambientais estão associados à mineração de compostos metálicos, pois o processo de extração produz um volume muito grande de rejeitos depositados em. Na história, ocorreram muitas falhas catastróficas das barragens, uma delas em Mariana-MG em 5 de novembro de 2015 carregando uma enorme quantidade de rejeitos da mineração de ferro para o Rio Doce. Neste trabalho, o cenário deste desastre foi escolhido para aplicação de dois modelos de transporte de massa em função da distância e do tempo, para avaliar as características do transporte da lama. A modelagem aplicada pode fornecer, de forma rápida e barata, informações sobre a distribuição da lama ao longo do trecho do rio afetado, incorporando os principais processos de transporte da massa no rio (advecção e difusão) e estimar o tempo para ela atingir o oceano. A abordagem envolve a utilização da solução da equação de transporte por difusão e da equação do transporte por advecção-difusão ajustada à situação ocorrida na bacia do Rio Doce, mostrando-se útil para compreender o comportamento do poluente no rio, auxiliar no planejamento de sua recuperação, e aplicar os modelos em outras situações de transporte de poluentes (massa) em rios.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, Poluição da água, Transporte de poluentes em rios, Equação do transporte de massa, Desastre do Rio Doce, Rompimento de barragem de rejeitos.

INTRODUÇÃO

Desastre é um evento traumático, com início abrupto que é experimentado coletivamente, pode ser atribuído a causas naturais, tecnológicas ou humanas. Desastres ambientais provocam impactos imensuráveis nas populações e nos ecossistemas afetados, causando efeitos socioeconômicos devastadores ^[1]. Muitos desastres ambientais estão associados à mineração de compostos metálicos, pois o processo de extração produz um volume muito grande de rejeitos depositados em barragens ^[2]. Na história, ocorreram muitas falhas catastróficas das barragens, uma delas em Mariana-MG em 5 de novembro de 2015 carregando 50 milhões de m³ de lama ^[3] para o Rio Doce. Neste trabalho, o cenário deste desastre foi escolhido para aplicação de modelos de transporte de massa.

O transporte de massa, um fenômeno que pode ser modelado em equações diferenciais (ED), ocorre em um rio transportando um contaminante, como a lama, através dos processos advecção (velocidade do fluxo do rio) e difusão (espalhamento do contaminante), respeitando a Lei da Conservação da Massa ^[4,5,6].

Os objetivos deste trabalho são: i) analisar a evolução espaço-temporal do transporte da lama pelo fluxo do rio por meio de dois modelos de transporte de massa (denominados I e II), ii) obter a quantidade de lama que permanecerá no rio após certos períodos de tempo e iii) estimar o tempo para ela atingir o oceano.

MÉTODOS

Os modelos consideram: a mistura “água-lama” como homogênea, uma única entrada de lama no rio; vazão constante e igual a 200,00 m³/s [7] e apenas o trecho da bacia do Rio Doce atingido pela lama, desde a barragem em Mariana-MG até a foz, local de encontro com o Oceano Atlântico, em Linhares-ES ($D = 674.4\text{km}$).



Figura 1. Trecho da Bacia do Rio Doce atingido pela lama de Mariana-MG a Linhares-ES. Fonte: adaptado de [8].

A largura e o comprimento total do rio foram estimados utilizando uma ferramenta para medir distâncias [9]. Para o cálculo da largura média B entre as 19 larguras mensuradas em pontos do rio foi utilizada a fórmula:

$$B = \frac{\sum_{n=1}^{19} l_n \cdot c_n}{D} = \frac{226.95 \text{ km}^2}{674.4 \text{ km}} \approx 0.34 \text{ km}, \quad \text{equação (1)}$$

sendo l_n e c_n , respectivamente, a largura e a distância entre os n pontos de largura medidos. Assim, adotando a área da seção transversal do rio A como constante e igual a um retângulo, sendo H a profundidade média igual a 0.003 km [10] e A igual a $1.009578 \times 10^{-6} \text{ km}^2$. Como a lama é composta por 70% de água e 30% de rejeito [11], conhecendo o volume de lama (0.05 km^3), a densidade da água (1.00 kg/m^3) e do rejeito, 3740 kg/m^3 [12], calculou-se a massa total de lama: $q_0 = 5.6135 \times 10^{10} \text{ kg}$.

Para descrever inicialmente a situação do Rio Doce, considerando apenas o processo de difusão, a equação do transporte por difusão unidimensional em x para substância conservativa foi utilizada [5,6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad \text{equação (2)}$$

sendo C a concentração (kg/m^3), t o tempo (s), e E o coeficiente de dispersão longitudinal (m^2/s). A expressão do coeficiente de dispersão longitudinal E para rios é [5]:

$$E = 0.011(U^2 B^2 / HU^*), \quad \text{equação (3)}$$

sendo B a largura do rio (m) e U^* a velocidade de cisalhamento definida por [5]:

$$U^* = \sqrt{gHS}, \quad \text{equação (4)}$$

na qual S é declividade média (adimensional) e g é a aceleração da gravidade (9.8 m/s^2).

Uma solução da equação da difusão (ED) para substância inicialmente concentrada em $x=0$, obtida por troca de variáveis, teoria da semelhança e análise dimensional (Teorema de Buckingham) ^[5,6] é:

$$C_1(x, t) = \frac{m_p}{2\sqrt{\pi Et}} e^{-\frac{x^2}{4Et}}, \quad \text{equação (5)}$$

sendo m_p a massa total normalizada pela área da seção, $m_p=m/A$. A equação (5) será chamada de **modelo I**.

Para descrever melhor a situação do Rio Doce, incluindo o a advecção no transporte da lama, a equação do transporte por advecção-dispersão (EAD) unidimensional em x para substância conservativa foi utilizada ^[5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad \text{equação (6)}$$

sendo U a velocidade da água (m/s). Uma solução da EAD para substância inicialmente concentrada em $x=0$, obtida por uma troca de variáveis diferente que a feita para obter a solução da ED, mas seguindo os mesmos passos iniciais da teoria da semelhança e análise dimensional, ^[5,6] é:

$$C_2(x, t) = \frac{m_p}{2\sqrt{\pi Et}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}}, \quad \text{equação (7)}$$

A equação (7) será chamada de **modelo II**. Para este modelo, os dados de entrada (quantidade de lama inicial, largura média, comprimento total do rio, profundidade média, área da seção transversal e volume) foram os mesmos utilizados pelo modelo I. A altitude $L=0.756$ km da Barragem do Fundão foi estimada pela ferramenta Strava ^[13] e com este valor calculou-se a declividade do canal:

$$\tan S = \frac{L(\text{km})}{D(\text{km})} \Rightarrow S = 1.121 \times 10^{-3}, \quad \text{equação (8)}$$

Conhecendo o tempo para a lama atingir a foz, 16 dias ^[14], isto é, para percorrer todo o comprimento em estudo (estimado $D=674.4$ km), determinamos a velocidade média:

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x-x_0}{t-t_0} = \frac{674.4-0}{16-0} = 42.15 \text{ km/dia}. \quad \text{equação (9)}$$

Para obter a quantidade de lama $Q([0, D], t)$ em kg, ao invés da concentração $C_2(x, t)$ estimada pelo modelo II, presente no comprimento total atingido pela lama (de 0 até D), foi feito o cálculo:

$$Q([0, D], t) = A \int_0^D C_2(x, t) dx. \quad \text{equação (10)}$$

Fixando-se diferentes intervalos de tempo, calculou-se a quantidade de lama presente no rio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a estimativa dos parâmetros, o resultado da modelagem realizada são as equações finais para o modelo I:

$$C_1(x, t) = \frac{(672067.52)}{\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{(2178.73)t}} \quad \text{equação (11)}$$

e o modelo II:

$$C_2(x, t) = \frac{(672067.52)}{\sqrt{t}} e^{-\frac{(x-(0.488)t)^2}{(2178.73)t}}. \quad \text{equação (12)}$$

Primeiramente, serão apresentados os resultados da ED. A fim de analisar graficamente o comportamento da concentração em função do tempo ou da posição, podemos fixar uma das variáveis de $C_1(x,t)$ e obter duas funções de uma variável definidas por $C(x)$ ou $C(t)$, dependendo da variável fixada.

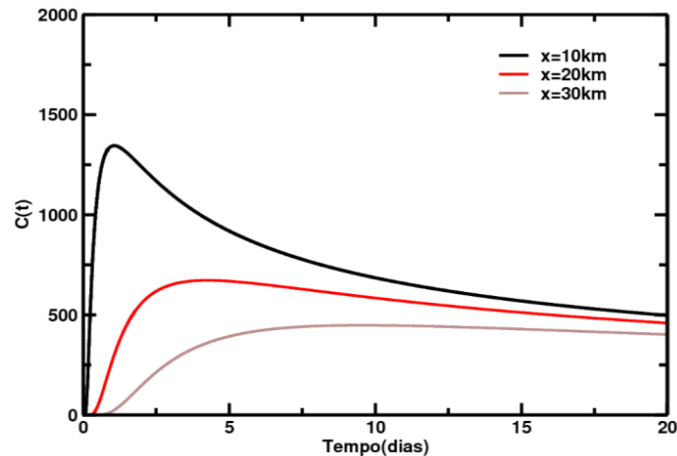


Figura 2. Gráfico da posição fixada em 10, 20 e 30 km e tempo variando em dias. Fonte: autoria própria.

Analisando o gráfico da figura 2, pode-se ver a variação da concentração de lama em diferentes posições do rio. Decorrido um Δt específico, a concentração de lama começa a aumentar em certas posições em estudo, localizadas a **10, 20, 30km** do local de rompimento da barragem, considerando apenas o processo de difusão. A quantidade de lama aumenta gradativamente e depois diminui suavemente tendendo a uma concentração de equilíbrio em torno de 500 kg/m^3 que decai lentamente se comportando de maneira semelhante à curva do tempo de decaimento radioativo. Esse comportamento da curva deve-se a função exponencial da solução da ED. Todo processo de transporte por difusão tende ao equilíbrio devido à natureza do transporte do local de maior concentração para o de menor. No gráfico da figura 2, também observa-se que, decorrido aproximadamente 1,5 dias, a concentração de lama foi máxima a 10 km do local de rompimento.

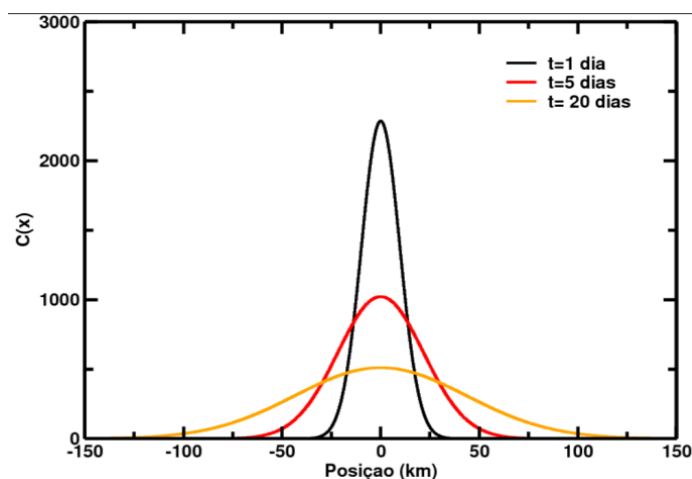


Figura 3. Gráfico do tempo fixado em 1, 5 e 20 dias e a posição variando. Fonte: autoria própria.

No gráfico da figura 3 onde o tempo foi fixado e a posição varia, pode-se ver a distribuição da lama devido efeito da difusão no rio: no eixo y a concentração varia com a posição (eixo x). Esse comportamento é devido à condição inicial: a função Delta de Dirac. Assim, o modelo tem o comportamento de distribuição Gaussiana em forma de sino das partículas para os tempos fixados e corresponde ao padrão apresentado por ^[5,6] em uma situação similar de estudo de poluente em rio.

Para a EAD os resultados estão apresentados abaixo.

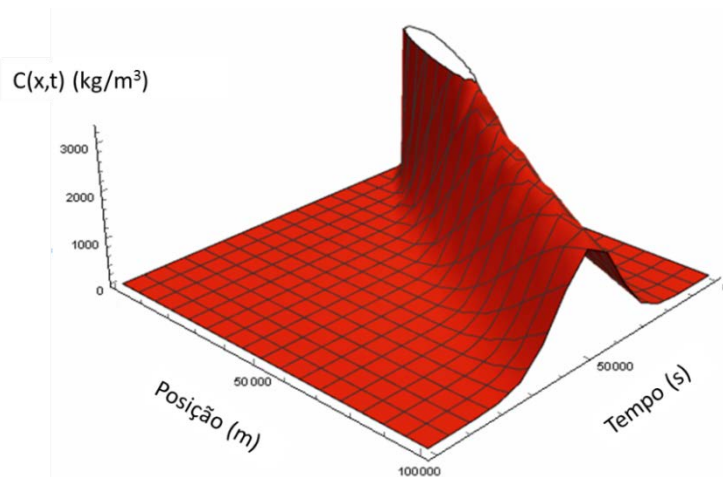


Figura 4. Gráfico do transporte da lama por advecção e difusão no Rio Doce através do espaço e do tempo.
Fonte: autoria própria.

A figura 4 mostra a concentração de lama na origem (tempo zero e local de rompimento da barragem) e a diluição da concentração em função do tempo e do distanciamento do local do rompimento, devido ao processo de difusão. Como a condição inicial para a solução da EAD é uma função Delta de Dirac temos um pico de massa na origem do gráfico em três dimensões do derramamento de lama no Rio Doce, assim, não é possível visualizar a concentração de lama próxima da origem, devido à elevada concentração de lama derramada e do comportamento da função delta de Dirac $\delta(x)$. Novamente, a fim de analisar graficamente o comportamento da concentração em função do tempo ou da posição, pode-se fixar uma das variáveis de $C_2(x,t)$ e obter duas função de uma variável $C(x)$ ou $C(t)$, dependendo da variável fixada.

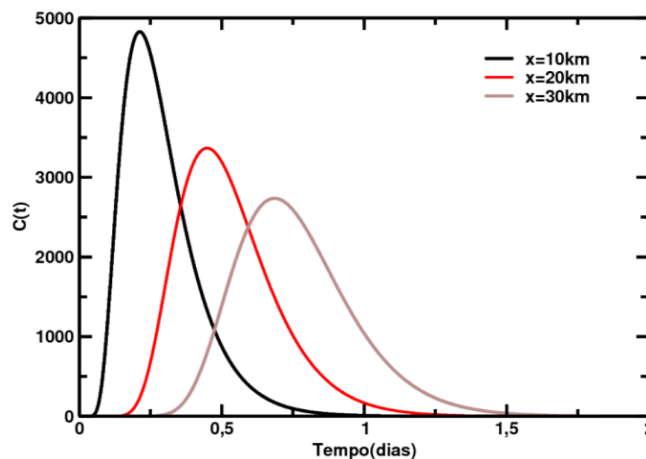


Figura 5. Gráfico com a posição fixada em 10, 20 e 30 km e o tempo variando. Fonte: autoria própria.

Os gráficos da figura 5 correspondem a cortes da superfície mostrada na figura 4. O gráfico da figura 5 mostra a evolução temporal da concentração de lama em diferentes posições do rio. Decorrido um Δt específico, a lama atinge certas posições em estudo, localizadas a **10, 20, 30km** do local de rompimento da barragem. A quantidade de lama aumenta drasticamente em um intervalo curto de tempo, representando a situação do derramamento da enorme massa de lama. Em seguida, a quantidade de lama diminui se comportando de maneira semelhante à curva do tempo de decaimento radioativo. No gráfico da figura 5 observa-se que, decorridas aproximadamente 6 horas (0,25 dias), a concentração de lama foi máxima a 10 km do local de rompimento e também que após 1,5 dias a concentração de lama na água começou a aumentar a 30 km deste mesmo local.

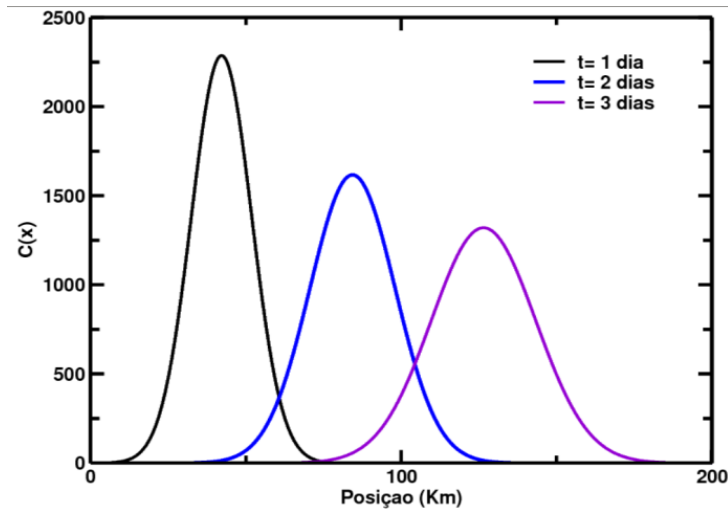


Figura 6. Gráfico com o tempo fixado em 1, 2 e 3 dias e a posição variando. Fonte: autoria própria.

Por inspeção do gráfico da figura 6 nota-se que a distribuição da lama em cada posição do rio para cada tempo fixado tem seu pico de concentração em posições diferentes ao longo do comprimento total do rio. Nos tempos iguais a 1, 2 e 3 dias (intervalo pequeno), a lama encontra-se concentrada nas posições próximas do local do rompimento (de 0 a 200 km), pois o derramamento acabou de ocorrer. Nota-se que ao passar de cada dia, a lama vai se dispersando e a sua concentração máxima diminui enquanto o a área afetada aumenta, caracterizando um espalhamento gradual. Também se percebe que a onda de lama se move em direção ao oceano, junto com o fluxo do rio.

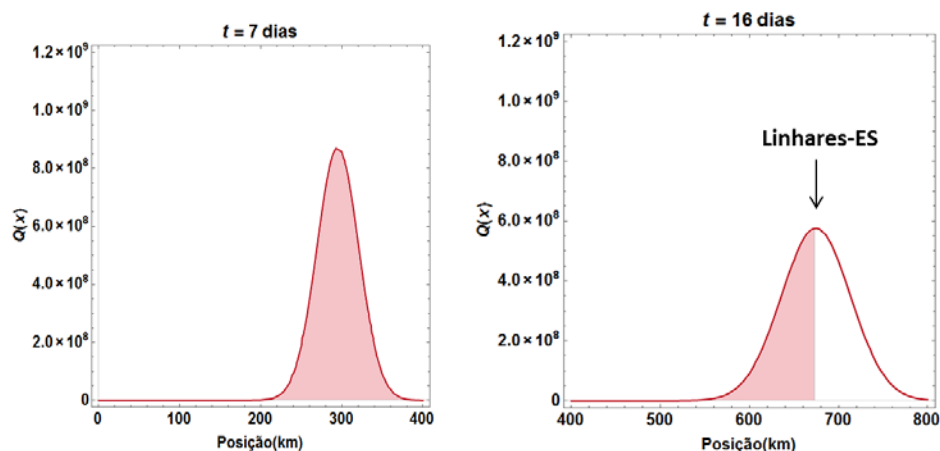


Figura 7. Gráficos da representação da distribuição da lama no rio com o tempo fixado e a posição variando. Fonte: autoria própria.

Nos gráficos da figura 7, a área pintada representa a quantidade total de lama presente no rio, no instante t fixado, isto é, o somatório da lama presente em toda a extensão afetada ($D=674.4\text{km}$). O valor da área em questão, e, conseqüentemente, a quantidade de lama existente, pode ser obtido via cálculo da integral presente na equação (10). Observa-se que no gráfico da direita, é considerada a área entre o local da origem e a foz do Rio Doce, em Linhares-ES a 674,4km do local do rompimento. Desta forma é possível conhecer a quantidade de lama presente no rio, em quilogramas, em qualquer instante t escolhido.

Observando o segundo gráfico da figura 7, nota-se que o pico da concentração de lama na foz do Rio Doce, em Linhares-ES ocorreu após 16 dias, o que coincide com as informações oficiais divulgadas ^[14], validando o modelo. Este resultado retrata condições devidas ao processo de advecção, que depende diretamente da vazão e da velocidade do fluxo do rio, as quais sofreram grandes alterações durante o desastre, acarretadas pela grande onda da lama.

O número adimensional de Peclet, definido pela razão entre a taxa de transporte por advecção (DxU) e a taxa de transporte pela difusão/dispersão, auxilia na compreensão da intensidade dos processos de transporte de massa, isto é, se a advecção é mais intensa que a difusão no rio e vice-versa. Segundo ^[5], o número de Peclet é:

$$P_e = (DU)/E, \quad \text{equação (13)}$$

onde D é o comprimento total de estudo (m), U a velocidade (m/s) e E o coeficiente de difusão de massa (m^2/s). Para o caso do Rio Doce, $E=544.7m^2/s$, $U=0.49m/s$ e $D=674400m$, segue que $P_e = 606.7$. Portanto, o processo de advecção é predominante no Rio Doce comparado ao de difusão, corroborando para fortalecer o resultado encontrado através do modelo, apresentado no segundo gráfico da figura 7.

Tabela 1: Quantidade de lama no Rio Doce obtida pelo modelo $Q([0,D],t)$.

Tempo	$Q([0,D],t)$ (kg)
2 dias	5.6135×10^{10}
7 dias	5.6135×10^{10}
14 dias	5.5515×10^{10}
16 dias	2.79536×10^{10}
27 dias	9.68766×10^{-10}
2 meses	0.0

Analisando a tabela 1 pode-se ver que o modelo II fornece a quantidade de lama no tempo escolhido e a sua distribuição no trecho atingido. Além disso, o modelo estimou o tempo exato para a onda de lama atingir o oceano. Outro ponto positivo a favor do modelo é o baixo custo, a rapidez e a facilidade de obtenção de resultados para um estudo prévio, podendo direcionar outros estudos mais específicos. Por outro lado, o fato do estudo em questão prever uma homogeneidade da mistura água lama e de considerar o rio como uma calha uniforme, o faz transportar toda a lama para fora do rio em dois meses, um tempo muito menor do que ocorre na realidade, afinal, hoje ainda há lama presente no rio.

Desenvolvimentos futuros podem melhorar este trabalho. Por exemplo, dividir o rio em compartimentos, como no trabalho ^[15], realizar um trabalho de campo para coletar dados e melhor estimar os parâmetros e utilizar a EAD para substância conservativa com termo S de fontes externas ou sumidouros de acordo ^[5]:

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial (A_c E \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_c U C)}{\partial x} dx + S. \quad \text{equação (14)}$$

O termo S pode conter a quantidade de lama proveniente do compartimento anterior do rio e incorporar a quantidade de outros poluentes (esgoto e agrotóxicos) presentes no rio e A_c representa a área da seção transversal para cada perfil de um compartimento do rio.

CONCLUSÕES

Neste trabalho modelou-se o desastre do Rio Doce, estimando características do transporte da lama pelo rio por dois modelos unidimensionais de transporte de massa, oferecendo um baixo custo, rapidez e facilidade na obtenção de resultados para um estudo prévio. O modelo II apresenta a vantagem de fornecer a distribuição da lama ao longo do rio e prever corretamente o tempo necessário para ela atingir o oceano em Linhares-ES: 16 dias. Mostrou-se que este resultado é observado devido ao processo de advecção, que depende diretamente da velocidade do fluxo, ser predominante ao de difusão e também a alta velocidade da onda da lama que alterou a vazão e a velocidade natural do fluxo do rio em um primeiro momento. O modelo II também se mostra útil para compreender o comportamento do poluente no rio e auxiliar na recuperação do rio para que volte a ser uma fonte de água potável para a população. Ambos os modelos podem ser aplicados em outras situações de transporte de poluentes em rios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BUTTON, G. Disaster Culture: Knowledge and Uncertainty in the Wake of Human and Environmental Catastrophe. Walnut Creek, US: Routledge, 2014.
2. BELL, F.G. Geological hazard: their assessment, avoidance and mitigation. Department of Geology and Applied Geology, University of Natal, Durban, South Africa. E&FN Spon, an imprint of Routledge, London, UK, 1999.
3. IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, 2015. Disponível em: <<http://goo.gl/Sid1Kb>>. Acesso em: 15 jan. 2016.
4. POTTER, M.C.; WIGGERT, D.C. Mecânica dos Fluidos. São Paulo: Cengage Learning, 2009.
5. CHAPRA, S.C. Surface water- quality modeling. New York: McGraw-Hill, 1997.
6. FISCHER, H.B., LIST, E.J., KOH, R.C.Y., IMBERGER, J., BROOKS, N.H. Mixing in Inland and Coastal Waters. New York: Academic Press, 1979.
7. BASTOS, A.C. et al. Resultados Parciais das Análises Realizadas em Amostras Coletadas na Plataforma Adjacente a Foz do Rio Doce: Embarque NOc. Vital de Oliveira. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória- ES, fev. 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/Qa68Gg>>. Acesso em: 6 ago. 2016.
8. ANA- Agência Nacional de Águas. Mapa do Monitoramento do desastre do Rio Doce. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/BaciaDoce/MapaRioDoce.pdf>> Acesso em: 13 mar. 2016.
9. GOOGLE. [Bacia do rio Doce] c2016. Mapa extraído do Google Maps. Disponível em: <maps.google.com.br>. Acesso em: 29 jun. 2016.
10. GARCIA, A. Em 1960, rio tinha 3m de profundidade. Diário do Rio Doce. 2007. Disponível em: <<http://drd.com.br/news.asp?id=50027778442100001>>. Acesso em: 30 jun. 2016.
11. SOUZA, M.J.; FILHO, N.G.S. Barragens de rejeito. Faculdade Atenas, Revista Jurídica Online. 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/4ghFi3>>. Acesso em: 9 set. 2016.
12. SILVA, G.P.; FONTES, P.F.; COSTA, L. M.; BARROS, N.F. Caracterização química, física e mineralógica de estereis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v.36, n.1, p. 45-52, 2006. Disponível em: <<http://goo.gl/GiY0Ia>>. Acesso em: 08 jul. 2016.
13. STRAVA. Disponível em:<www.strava.com>. Acesso em: 01 jul. 2016.
14. MACHADO, V. Lama no Rio Doce: linha do tempo mostra o desastre no Espírito Santo. G1, Espírito Santo, 5 maio 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/znPfmY>>. Acesso em: 6 ago. 2016.
15. MARTIN, Y. Evaluation of bed load transport formulae using field evidence from the Vedder River, British Columbia. Elsevier, Geomorphology, v. 53, p. 75-95, 2003.