



Modelagem e Simulação da Dispersão da Pluma de Rejeito de Minério da Barragem de Fundão (Mariana/MG), entre o Estuário do Rio Doce e a Costa de Regência (ES), utilizando o Software Mohid Water.

Modeling and Simulation of the Dispersion of the Ore Tailings Plume from the Fundão Dam (Mariana/MG), between the Rio Doce Estuary and the Regência Coast (ES), using Mohid Water Software.

RAGGI, Fernanda Grossi, doutoranda em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente e Recursos Hídricos, INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE

fernanda.grossi@gsuite.iff.edu.br

SOUZA, Nikolas Gomes Silveira, doutorando em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente e Recursos Hídricos, INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE

nichsouz@msn.com

JÚNIOR, Jader Lugon, pós-doutor em Modelagem Computacional, professor orientador do Programa de Doutorado em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente e Recursos Hídricos, INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE

jader.lugon@gsuite.iff.edu.br

COSTA, David de Andrade, pós-doutor em Modelagem Hidrológica, professor orientador do Programa de Doutorado em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente e Recursos Hídricos, INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE

david.costa@iff.edu.br

OLIVEIRA, Manildo Marcião, pós-doutor em Ecotoxicologia, professor orientador do Programa de Doutorado em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente e Recursos Hídricos, INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE

manildodpicf@gmail.com

[1]

Resumo

Modelos matemáticos demonstram significativa importância para simulações em recursos hídricos, podendo ser utilizados para monitoramento de sedimentos de rejeitos de rompimento de barragens. O objetivo deste trabalho foi realizar a simulação da dispersão da pluma de rejeito de minério proveniente do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG), no estuário entre o Rio Doce e a costa marítima de Regência (ES), utilizando o software MOHID WATER. Foram desconsideradas as influências das variáveis atmosféricas temperatura e interface água e ar, e a velocidade do vento foi constante. A descarga fluvial é uma importante variável na ocorrência de processos químicos e biológicos nos sistemas estuarinos. Considerando que a turbulência influencia a dinâmica da pluma do mar em direção ao rio, junto à maré astronômica, foi possível prever que mesmo na ausência de qualquer corrente a pluma continue a crescer e não atinja um estado estacionário, influenciada pela corrente costeira ambiente. Ainda, a ressuspensão dos sedimentos



depositados por correntes, marés meteorológicas ou aumento da intensidade de ventos pode resultar em uma contaminação intermitente, mesmo que não haja mais lançamentos da lama de rejeitos. Assim, o emprego de modelos numéricos adquire relevância para esse e futuros estudos de monitoramento na região.

Palavras-chave: Modelagem Oceânica, Modelagem de Sedimentos Poluentes, Modelagem em Estuários, Modelagem de Rejeitos de Barragens, Mohid Water.

Abstract

Mathematical models demonstrate significant importance for simulations in water resources, and can be used to monitor tailings sediments from dam failures. The objective of this work was to simulate the dispersion of the tailings plume from the Fundão Dam failure in Mariana (MG), in the estuary between the Doce River and the coast of Regência (ES), using the MOHID WATER software. The influences of the atmospheric variables temperature and water-air interface were disregarded, and the wind speed was constant. River discharge is an important variable in the occurrence of chemical and biological processes in estuarine systems. Considering that turbulence influences the dynamics of the plume from the sea towards the river, together with the astronomical tide, it was possible to predict that even in the absence of any current the plume will continue to grow and will not reach a steady state, influenced by the ambient coastal current. Furthermore, the resuspension of sediments deposited by currents, meteorological tides or increased wind intensity may result in intermittent contamination, even if there is no further release of tailings sludge. Thus, the use of numerical models becomes relevant for this and future monitoring studies in the region.

Keywords: Ocean Modeling, Pollutant Sediment Modeling, Estuary Modeling, Dam Tailings Modeling, Mohid Water.

1. Introdução

O transporte de substâncias orgânicas e inorgânicas nos estuários é feito pelos rios, os quais carregam as partículas provenientes da drenagem continental e da lixiviação ocasionada pelas chuvas, podendo chegar em faixas costeiras e ambientes marítimos limítrofes (ELLIOTT *et al.*, 2002). Assim, processos hidrodinâmicos nestas regiões levam à circulação das águas e, conseqüentemente, ao transporte de sedimentos, nutrientes e demais materiais em suspensão, chegando ao mar, e que podem ter como influenciadores diversos fatores como a descarga fluvial, correntes, marés, ventos e ondas, levam a diferentes interações e estados de equilíbrio, com a conseqüente alteração dos processos (MIRANDA *et al.*, 2002).

Marcovecchio *et al.* (2005) afirma que a contaminação aquática é mais dramática dentro de estuários e zonas costeiras semifechadas, especialmente quando ocorre perto de áreas densamente povoadas ou em áreas de influência industriais (SALOMONS & FORSTNER, 1984; LACERDA, 1998). Devido a sua toxidez, os metais ferro, cádmio, cromo, mercúrio, níquel, chumbo, arsênico, bário, cobre e zinco se destacam por serem metais de traço que, quando lançados irregularmente no ambiente, contaminam os cursos de águas e lençóis freáticos.

Diante dos rompimentos de barragens de rejeito de minério que acometeram o país, é cada vez mais necessário o monitoramento de plumas de sedimentos carregados, sendo os modelos matemáticos importantes ferramentas para simulações de transporte e dispersão de poluentes em recursos hídricos. Um dos *softwares* mais utilizados para a modelagem do transporte de sedimentos em recursos hídricos marítimos é o MOHID WATER, que permite a simulação utilizando aspectos químicos e biológicos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi realizar uma simulação da dispersão da pluma de rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG), no estuário compreendido entre o Rio Doce e a costa marítima de Regência (ES), utilizando modelagem computacional.

2. Procedimentos Metodológicos

O estudo foi realizado em uma área compreendida entre a costa marítima de Regência e o estuário do Rio Doce, estado do Espírito Santo, sob as coordenadas $19^{\circ}38'30.70''S$ e $39^{\circ}49'10.73''O$, -8 m de elevação (Fig.1). O trecho estudado sofreu carreamento de rejeitos de minério proveniente do rompimento da barragem de Fundão, localizada no complexo Industrial de Germano, município de Mariana, estado de Minas Gerais, às margens do médio Rio Doce, pertencente à empresa de mineração Samarco. No dia 5 de novembro de 2015 houve o extravasamento imediato de aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, onde 16 milhões continuaram escoando lentamente ao longo do Rio Doce em direção à costa marítima de Regência (ES) (Figura 1).

O programa MOHID consiste em um sistema de modelagem numérica tridimensional desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) no Centro de Estudos MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Portugal. Conhecido como um modelo hidrodinâmico, trata-se de um *software* de modelação da dinâmica das massas de água em sistemas marinhos, por meio do módulo MOHID WATER, e que vem sendo amplamente utilizado para simular a dispersão de petróleo, evolução da qualidade da água e do transporte de sedimentos em zonas costeiras, mas ainda não há trabalhos direcionados à modelagem de sedimentos de rejeitos de minério, tampouco em ambientes marinhos (MARETEC, 2012).



Figura 1: localização da área de estudo, apontada em amarelo. Fonte: Google Earth, fevereiro de 2025.

Para simular a dispersão da pluma de rejeito de minério foram utilizados o Módulo Hidrodinâmico e o Módulo Lagrangiano. O módulo hidrodinâmico tem como objetivo simular a evolução das propriedades do escoamento, sendo composto pela base topográfica e batimétrica da região estudada; e os forçantes que impulsionam a hidrodinâmica do escoamento.

O Modelo Lagrangiano de Partículas de Deslocamento Aleatório (MLPDA) simula um dado poluente como um número discreto de partículas inertes e passivas. Seu princípio é dado pela equação de Langevin (RODEAN,1994), Eq. (1) a seguir.

$$dx_i = a_i(x_i, t)dt + b_{ij}(x_i, t)dw_j(t) \quad (1)$$

onde: $a_i(x_i, t)dt$ é o termo determinístico dado pelas propriedades estatísticas do escoamento;

$b_{ij}(x_i, t)dW_j(t)$ é o termo estocástico, onde $dW_j(t) = \varepsilon_j dt$ é um processo incremental de Wiener, sendo contínuo, gaussiano e markoviano. Os coeficientes a_i e b_{ij} são, respectivamente, os coeficientes de deriva e difusão.

As equações de deslocamento aleatório descritas em função dos coeficientes de difusão e das variáveis hidrodinâmicas foram demonstradas a seguir, Eq. (2).

$$dx = \left[U + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx} H) \right] dt + \sqrt{2D_{xx}} dW_x(t) \quad (2)$$

$$dy = \left[V + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (D_{yy} H) \right] dt + \sqrt{2D_{yy}} dW_y(t)$$

Onde: D_{xx} e D_{yy} são os coeficientes de difusão; e H,U e V são as variáveis hidrodinâmicas.

Como traçadores, foram consideradas as partículas que compõem o sedimento. Em relação à classificação, a origem é “tipo caixa”, já que foi selecionada uma determinada área para monitoramento de acordo com sua posição (x,y); de “origens instantâneas”, já que foram emitidos em um dado instante de tempo, de forma pontual, com vazão constante e emissão instantânea de rejeitos, mas cessada considerando que esta havia cessado no momento da simulação; localização híbrida, uma vez que se designou de acidente.

A delimitação da área de interesse (Figura 2) foi realizada com coordenadas geográficas já registradas em monitoramentos do IBAMA, desde o rompimento, por meio do *software* Google Earth. Os dados de batimetria foram obtidos da Carta Náutica da Marinha do Brasil – 140200 - DO PONTAL DA REGÊNCIA À PONTA DO UBU - 1:150.000 – última edição: 2021 (<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-raster/do-pontal-da-regencia-ponta-do-ubu>).

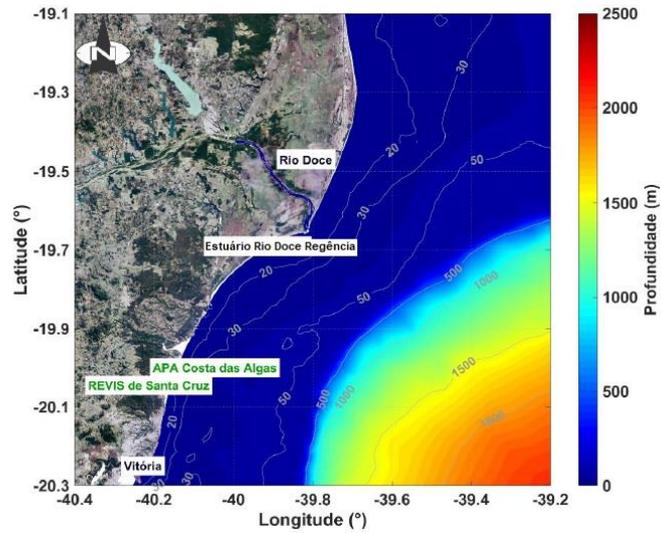


Figura 2: localização geográfica da área de estudo. Fonte: adaptado de ANA (2024).

Como forma de entrada, foi elaborado um grid 3D (Figura 3), com grade medindo 100 x 120m nas direções x e y, com espaçamento constante de 1, sob as coordenadas -19.954009 e -40.125985 e um Grid Data que compõem a área de estudo selecionada (Figura 4).

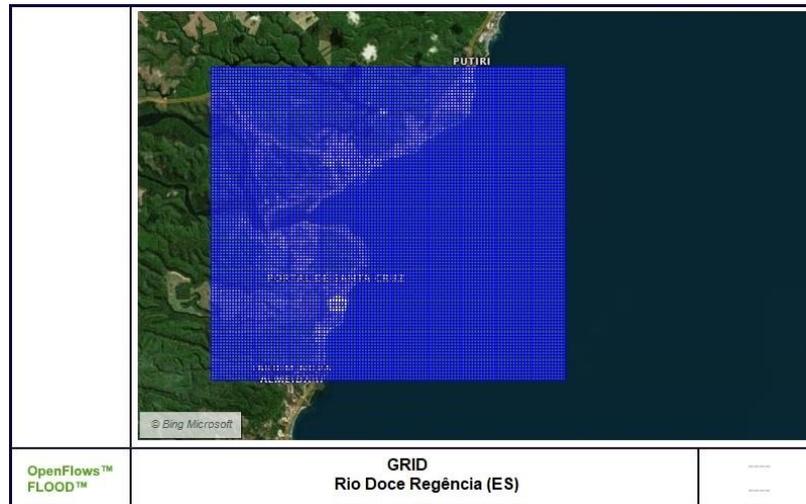


Figura 3: grid gerado no estuário Rio Doce – Regência. Fonte: MOHID WATER/OpenFlows FLOOD (2024).

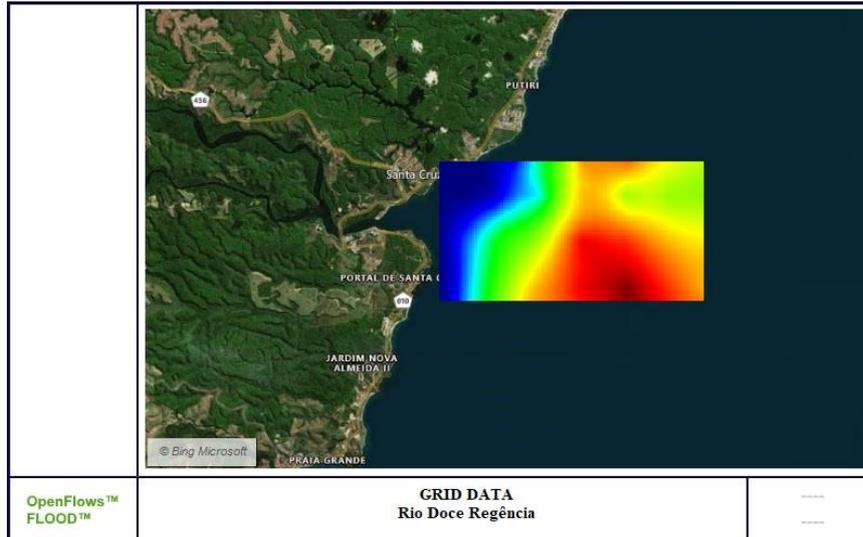


Figura 4: Grid Data gerado no estuário Rio Doce – Regência. Fonte: MOHID WATER/OpenFlows FLOOD (2024).

Os forçantes considerados para a simulação foram a elevação do nível d'água nos contornos oceânicos e a vazão do Rio Doce nos contornos abertos. Os dados de vazão foram obtidos do Relatório da Fundação Renova do primeiro trimestre de 2022, coletados da estação fluviométrica de Colatina – ES (56994500), em que as médias foram de 715 m³/s/mês.

3. Aplicação e Resultados

Para geração do modelo, foram desconsideradas as influências de variáveis atmosféricas como temperatura e interface água e ar. Ainda, a variável velocidade do vento foi considerada constante, 2m/s. Embora a região de interesse seja representada ao menor detalhe da figura (faixa de encontro do estuário do Rio Doce com a costa marítima de Regência), o domínio simulado (Figura 5) compreendeu a região acometida pelos sedimentos, em razão da circulação marinha ser influenciada por sistemas sazonais climáticos.

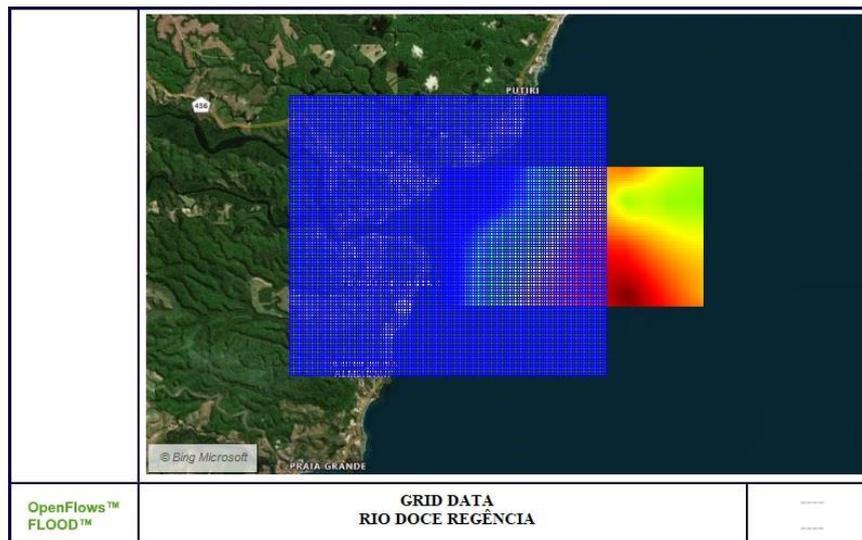


Figura 5 – domínio simulado e batimetria que compõem a área de estudo. FONTE: MOHID WATER/OpenFlows FLOOD (2024).

Considerando o módulo turbulência, foi possível confirmar que o forçante influencia a dinâmica da pluma do mar em direção ao rio, resultante da advecção, estratificação vertical e mistura (JACOBS, 2004). Ainda, os resultados observados corroboram com o trabalho de Costa (2018), que

traz uma modelagem mais recente realizada em 2016 com dispersão da pluma de rejeito em áreas adjacentes do Rio Doce e próximas da área de estudo, utilizando o programa Delft3D-FLOW. Assim, pode-se afirmar que o gradiente de pressão desenvolvido em relação à costa gera uma corrente que se desloca na direção em que a borda lateral (onde a onda tem amplitude máxima) está sempre à direita no Hemisfério Norte, e à esquerda no Hemisfério Sul, influenciando a simulação em direção ao rio. A modelagem referente à turbulência foi demonstrada a seguir (Figura 6).

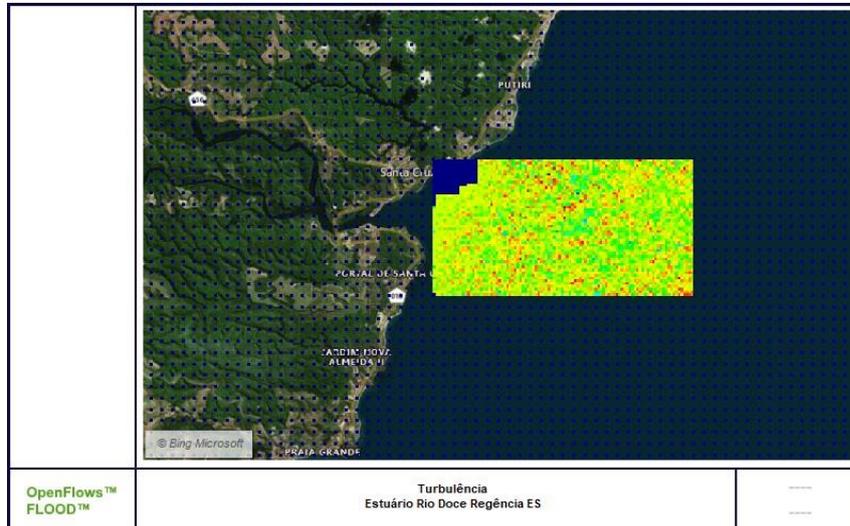


Figura 6 – modelagem de turbulência influenciando a simulação da área de estudo. FONTE: MOHID WATER/OpenFlows FLOOD (2024).

Em relação ao cenário de influência da vazão do Rio Doce com o forçante da hidrodinâmica, também foi possível corroborar com Costa (2018), havendo dois fluxos preferenciais, sendo da direção rio-mar, em períodos de maré vazante, e da direção mar-rio, em períodos de maré enchente, sendo este último de maior influência, evidenciado pela dinâmica do fluxo nos períodos de estiagem e cheia. Assim, demonstra o fluxo da pluma que se estagnou em forma de sedimento na região. Ainda, os modelos obtidos por Costa (2018) sem a influência do vento (com velocidade constante), considerando a vazão do rio nos períodos de maré de vazante (Figura 7) e maré de enchente (Figura 8), corroboram com o modelo obtido atualmente na área de estudo, em uma visão do mar para o rio (Figura 9 e Figura10).

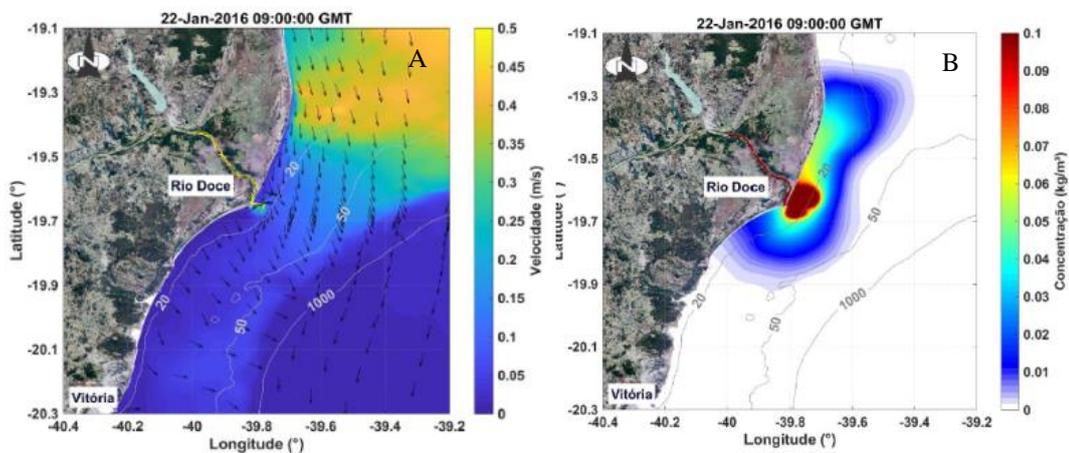


Figura 07 – simulação dos forçantes sem o efeito do vento (velocidade constante) (a) e dispersão da pluma de rejeito na direção mar-rio (b) durante a maré de vazante no dia 22 de janeiro de 2016, com isolinhas de profundidade. FONTE: adaptado de Costa (2018).

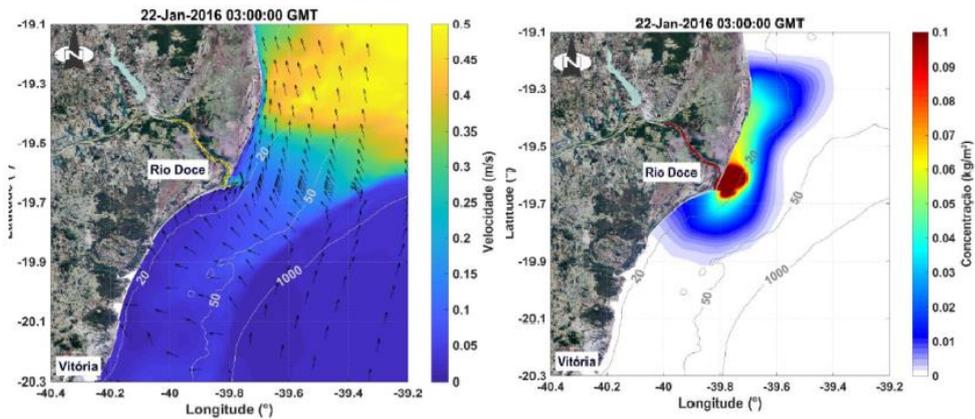


Figura 08 - simulação dos forçantes sem o efeito do vento (velocidade constante) (a) e dispersão da pluma de rejeito na direção mar-rio (b) durante a maré de enchente no dia 22 de janeiro de 2016, com isolinhas de profundidade. FONTE: adaptado de Costa (2018).

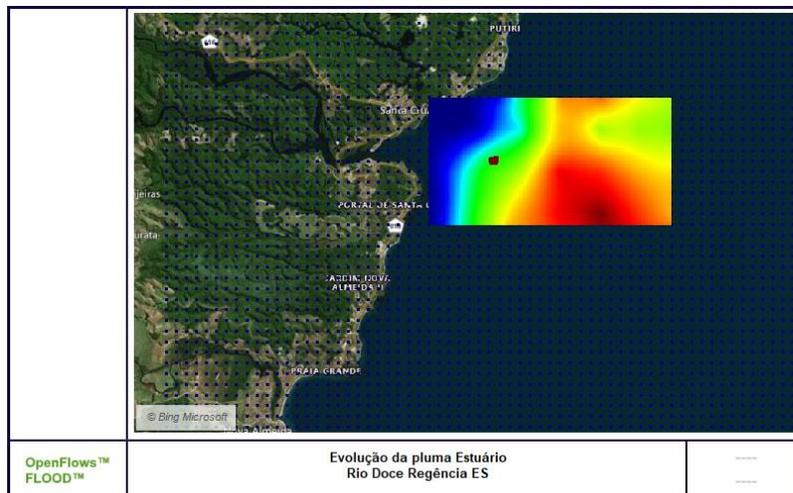


Figura 09 – início da simulação da dispersão da pluma de rejeito do Rio Doce no mar em Regência, sem o efeito do vento (velocidade constante). FONTE: MOHID WATER (2024).

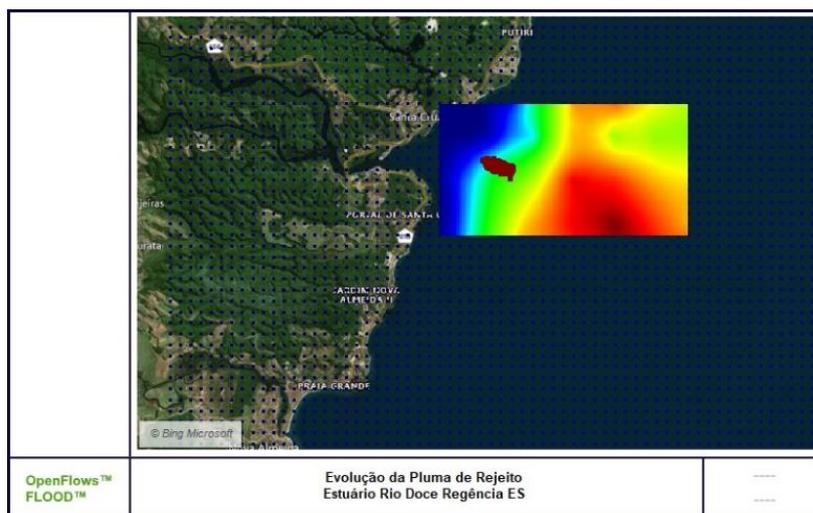


Figura 10 – final da simulação da dispersão da pluma de rejeito do Rio Doce no mar em Regência, sem o efeito do vento (velocidade constante). FONTE: MOHID WATER (2024).



4. Discussão dos Resultados

É possível prever que, mesmo na ausência de qualquer corrente, a pluma continue a crescer e não atinja um estado estacionário, uma vez que a corrente costeira ambiente, na direção de uma onda de Kelvin, carregue apenas uma fração da água doce descarregada e a fração remanescente forme uma protuberância de água doce nas proximidades da foz do rio, corroborando Fong e Geyer (2002).

Pedruzzi (2011) avaliou a dinâmica da pluma fluvial do Rio Doce no oceano, utilizando o sistema de modelos computacionais SisBAHiA, com a aplicação do modelo 2DH e do modelo de transporte lagrangeano. Os resultados mostraram que ventos provenientes do nordeste (NE) induzem a formação de vórtices ao sul da desembocadura, enquanto ventos provenientes do sudeste (SE) atuam na contenção da dispersão da pluma, formando uma protuberância junto à foz. Desta forma, a simulação do presente corroboram também com Pedruzzi, uma vez que, mesmo considerando a velocidade do vento constante, foi possível identificar que a pluma consitua se dispersando mesmo com a interrupção da descarga.

Ainda, Campos (2011) utilizou imagens de satélite dos sensores Landsat 5 e 7 e CBERS 2 e 2B para identificar os principais padrões de distribuição superficial da pluma do Rio Doce. Segundo o autor os ventos do quadrante norte auxiliam no espalhamento da pluma para sul e os ventos do quadrante sul limitam esse espalhamento. Desta forma, trabalhos futuros considerando a velocidade do vento podem indicar a extensão da área total de dispersão.

Marta-Almeida *et al.* (2016) analisaram a dispersão da descarga do Rio Doce no Oceano Atlântico usando modelo oceânico ROMS e imagens dos sensores MODIS, durante dois meses após a chegada de rejeitos de minério no oceano. Os resultados mostraram que a descarga do Rio Doce foi essencialmente para o sul, de acordo os ventos sazonais.

A Fundação Renova (2017) concluiu, a partir do monitoramento da pluma rejeitos de minério do Rio Doce por meio de sobrevoos, que a dispersão da pluma continua densa e ocorre na maior parte do tempo acompanhando a linha de costa e se deslocando para o sul.

Uma das maiores preocupações é a de que a agitação dos sedimentos possa ter como efeito a suspensão das partículas mais finas, com impactos ambientais associados à ressuspensão e subsequente dispersão do material mais fino, conformada pela modelagem de estudo. A turbidez resultante pode ser persistente e afetar localmente o crescimento e a reprodutividade de microrganismos, considerando que a grande maioria dos contaminantes químicos potencialmente tóxicos, presentes nos sedimentos do fundo, está associada com a sua fração mais fina, podendo ter um efeito negativo.

Do ponto de vista do transporte de sedimentos, o aporte fluvial atua de duas formas principais: (1) aporte de sedimentos pelo rio, e (2) criação de uma estrutura de fluxo através das diferenças de densidade. As diferenças de densidade provocam o aumento das velocidades de correntes de maré enchente no fundo do canal, além de uma diminuição da mesma próximo à superfície e nas áreas rasas do estuário. O inverso ocorre com as correntes de maré vazante (DRONKERS, 1986).

Segundo Nichols e Biggs (1985), durante épocas de alta pluviosidade, a vazão fluvial pode causar condições hidrodinâmicas excepcionais com importantes consequências sedimentológicas. O aporte de sedimentos pelo rio ao longo de poucos dias pode ser maior do que aquele ao longo de vários meses ou anos de vazão normal. As fortes correntes fluviais nestes períodos ressuspendem sedimentos depositados ao longo do canal durante os períodos de menor vazão e os transportam em direção ao oceano. A grande vazão fluvial pode fazer com que a intrusão salina seja empurrada para fora da desembocadura do estuário, causando um grande transporte de sedimentos diretamente ao oceano (NICHOLS & BIGGS, 1985).

Assim, a ressuspensão dos sedimentos depositados por correntes, marés meteorológicas ou aumento da intensidade de ventos pode resultar em uma contaminação intermitente, mesmo que não haja mais lançamentos da lama de rejeitos.



De acordo com trabalhos anteriormente publicados e relatórios de monitoramento, a pluma de sedimentos de maior concentração da lama que acometeu o Rio Doce e o Estuário de Regência atingiu aproximadamente 392 km² na foz. Contudo, considerando a pluma de menor concentração, foi possível verificar que uma área de aproximadamente, 6.197 km² foi atingida. Logo, além dos impactos causados em ecossistemas continentais influenciados pelo rio, a pluma de resíduos afetou, ainda, ecossistemas oceânicos, confirmados por este estudo.

5. Considerações Finais

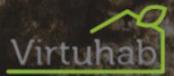
A ressuspensão dos sedimentos depositados que foi demonstrada pela modelagem, ocasionada seja por correntes, marés meteorológicas ou aumento da intensidade de ventos, resulta em uma contaminação intermitente, mesmo que não haja mais lançamentos da lama de rejeitos. Uma vez despejada essa lama no oceano, ela está sujeita às ações da circulação de massas de água que precisam ser acompanhadas em períodos constantes, buscando compreender qual seria a dinâmica da pluma sob diversas variáveis distintas e, principalmente, sob a nova dinâmica dos ambientes afetados, levando, assim, ao desenvolvimento de estratégias de proteção destes estuário

Desta forma, o emprego de modelos numéricos adquire relevância para o estudo desses ambientes, uma vez que retratam os efeitos na faixa costeira e no ambiente marinho, sendo possível controlar as variáveis de forma singular ao longo do tempo, e não somente no período da descarga de sedimentos. Assim, a utilização da modelagem para o estudo de fenômenos em ambientes costeiros representa atualmente um valor agregado na abordagem destas pesquisas, além de contribuir decisivamente para uma melhor compreensão dos sistemas e funcionar como ferramenta de apoio à decisão na análise de possíveis alternativas de medidas preventivas e corretivas para impactos ambientais.

Recomenda-se, para esta área, estudos futuros utilizando modelos numéricos considerando as variáveis forçantes de interferência, que serão de grande relevância para monitoramentos da região.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Monitoramento Especial Do Rio Doce. 2024. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/Riodoce/default.aspx>>. Acesso em fevereiro de 2025.
- CAMPOS, Alexandre Pelisson Manente. 2011. Análise da variabilidade espacial e temporal da pluma do Rio Doce (ES) através de sensoriamento remoto. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado) –Curso de Oceanografia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- COSTA, F.F.D. Dispersão da pluma de rejeitos de minério de ferro na região costeira adjacente do Rio Doce – ES após o rompimento da barragem de fundão. Vitória: UFES, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso.
- Centro de Hidrografia Marinha do Brasil (Niterói). Cartas Raster. 2021. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. Acesso em fevereiro de 2025.
- DRONKERS JJ. 1964. Tidal computations in rivers and coastal waters. North Holland Publishing, Amsterdam, Interscience (Wiley), New York, p. 518.
- ELLIOTT, M. & MCLUSKY, D.S. 2002. The need of definitions in understanding estuaries. Estuarine, Coastal and Shelf.
- FUNDAÇÃO RENOVA. Relatório Expedição Rio Doce. Disponível em: <<https://expedicaoriodoce.fundacaorenova.org/>>. Acesso em fevereiro de 2025.



- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Laudo Técnico Preliminar Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. 2015. Disponível em: <
http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em fevereiro de 2025.
- LACERDA, L. D.; SALOMONS, W. Mercury from gold and silver mining A chemical time bomb? Berlin: Springer Verlag, 1998.
- MARCOVECCHIO, J. E. & FERRER, L. D. (2005). Distribution and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 21, 826–834.
- MARTA-ALMEIDA, Martinho *et al.* Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine Pollution Bulletin*, [s.l.], v. 112, n. 1-2, p.359-364, nov. 2016.
- MARETEC. Descrição do MOHID. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2012.
- MIRANDA LB, Castro BM & Kjerfve B. 2002. Princípios de oceanografia física de estuários. EDUSP, São Paulo, 414 pp.
- OLIVEIRA, K. S. S. & Quaresma, V. S. 2017. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *Journal of South American Earth Sciences*, 78, 101-115.
- PEDRUZZI, Christian Vasconcellos. Interação de simulação computacional e imagem de satélite para a avaliação da dinâmica da pluma do Rio Doce/ES. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- QUARESMA, V. S., CATABRIGA, G. M., BOURGUINON, S. C., GODINHO, E. & BASTOS, A. C. 2015. Modern sedimentary processes along the Doce River adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 45, 635-644.
- RODEAN, H.C. Notes on the Langevin Model for Turbulent Diffusion of “Marked” Particles. Lawrence Livermore National Laboratory, EUA, 1994.
- NICHOLS, MN & BIGGS, RB Estuários. Em *Ambientes Sedimentares Costeiros*. Ed. Davis, RA, (Nova York: Springer-Verlag 1985). 77-186.
- SALOMONS, W. e FORSTNER, U. (1984) *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Nova York, Tóquio