



INFLUÊNCIA DOS VENTOS NA DISPERSÃO DA PLUMA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Franciélli de Paula Dela Costa¹; Kaio Calmon Lacerda²; Franciane Entringer Curbani³ & Julio Tomás Aquije Chacaltana⁴

ABSTRACT – The Fundão dam failure on 5 November 2015 release 60 million cubic meters of mining tailings to the environment in Mariana, MG-Brazil. The mining tailings overflowed of Santarém dam and flowed mainly by the Doce River until it reaches on 21 November the coastal water of Espírito Santo state through the Doce River mouth. The goal of this work is to understand the role of the winds on the plume of mining tailings released into the coastal water through the Doce River mouth and its dispersion into the marine environment by using the Computational Fluid Dynamic technique. The ambient flow is forcing by the volumetric flux of the river, by the astronomical tide and by the wind blowing at the sea surface. The mining tailings is considered as a completely diluted substance in the river water and it is given as the concentration of dissolved solids. The Delft3D hydrodynamic model is used to hindcast the mining tailings plume and its dispersion into the marine environment for the simulation period from November 2015 to February 2016. The numerical results of water wave displacement were recorded and compared with the six principal harmonic components provided by FEMAR in ports located in the study area. It was found good agreement, with relative mean absolute error less than 26% (0,26) for the amplitudes and 20% (0,20) for the phases. The circulation over the continental shelf is strongly influenced by the winds, as expected for the wind pattern, the current is predominantly towards the south. The dispersion of the plume is towards the south of the Doce River mouth near the coast due to the prevailing Northwest (NW) and Northeast (NE) winds.

Palavras-Chave – Rio Doce, Delft3D, dispersão.

1 - INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão e o galgamento na barragem de Santarém, em Mariana, no dia 5 de novembro de 2015, liberou aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos provenientes da extração de minério. A onda de rejeitos de mineração atingiu o Rio Gualaxo do Norte e se propagou pelo Rio Carmo até alcançar o Rio Doce e chegar na sua foz em Linhares, no norte do Espírito Santo, em 21 de novembro de 2015, após 16 dias de percurso de uma distância de 660 quilômetros.

1) Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), frandelacosta@gmail.com, (28)999399510

2) Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), kcalmonlacerda@gmail.com, (28)999399510

3) Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), fran.entringer@gmail.com, (28)999399510

4) Docente, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), julio.chacaltana@ufes.br, (28)999399510



A fluidodinâmica computacional é uma alternativa dentre as técnicas que podem ser aplicadas à compreensão da dispersão e da evolução de plumas. Nesse sentido, será aplicada a técnica de fluidodinâmica computacional utilizando o modelo hidrodinâmico Delft3D para reconstruir o destino final da pluma de rejeitos de mineração provenientes do desastre de Mariana na região costeira adjacente a foz do Rio Doce do estado de Espírito Santo. A dispersão da pluma levará em consideração a vazão do Rio Doce, a maré astronômica e os ventos como os principais forçantes da hidrodinâmica na região. Para representar a pluma de rejeitos de mineração, as concentrações de sólidos dissolvidos serão inseridas na seção do Rio Doce localizada na cidade de Linhares, como constituintes conservativos.

2 - OBJETIVO

Compreender a influência dos ventos na dispersão da pluma de rejeitos de mineração liberada na região costeira através da foz do Rio Doce utilizando o modelo hidrodinâmico Delft3D.

3 - METODOLOGIA

3.1 - Área de estudo

A área de estudo compreende o trecho do Rio Doce desde o centro do município de Linhares – ES até a foz do Rio Doce, no norte do litoral do Espírito Santo, e a região costeira adjacente. É limitada ao norte pela latitude $18,9^{\circ}\text{S}$, ao sul pela latitude $21,2^{\circ}\text{S}$, ao leste pela longitude $38,5^{\circ}\text{O}$ e ao oeste pela longitude de $40,9^{\circ}\text{O}$. Para melhor visualização da circulação e da pluma de rejeitos de mineração os resultados serão mostrados para um domínio menor, limitado ao norte pela latitude $19,1^{\circ}\text{S}$, ao sul pela latitude $20,3^{\circ}\text{S}$, ao leste pela longitude $39,2^{\circ}\text{O}$ e ao oeste pela longitude de $40,4^{\circ}\text{O}$. A batimetria da região é mostrada na Figura 1.

Na área de estudo, ao sul da foz do Rio Doce, estão presentes três unidades de conservação ambiental: a Reserva Biológica dos Comboios, a Área de Proteção Ambiental Costa das Algas e o Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz.

Os ventos de maior frequência são dos quadrantes nordeste e noroeste devido à influência do centro de alta pressão: o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (Oliveira e Quaresma, 2018). Além disso, há o avanço periódico de massas polares (frentes frias), resultando em uma expressiva sazonalidade (Martin *et al.*, 1998).

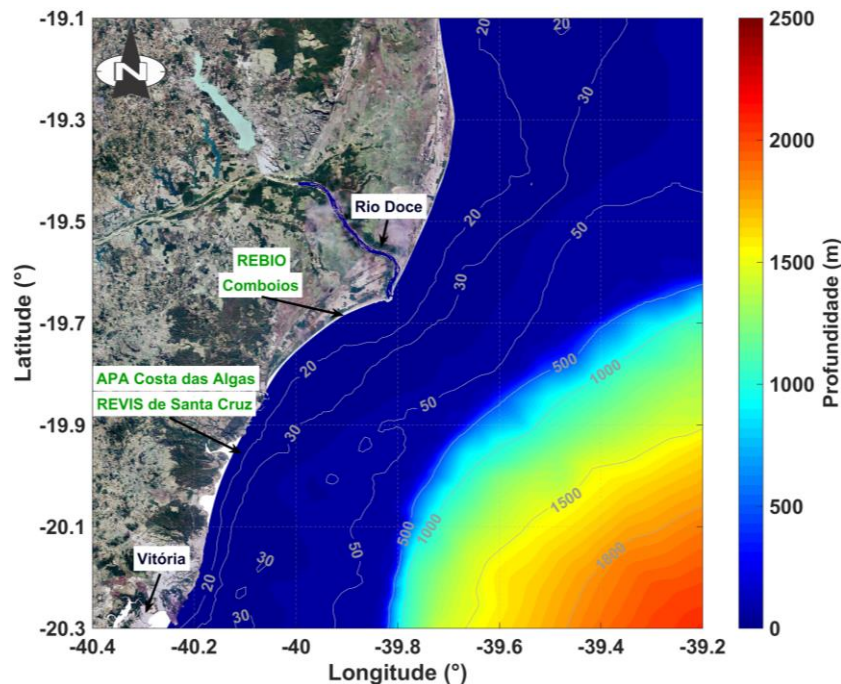


Figura 1 – Localização do Rio Doce e da região costeira adjacente e das unidades de conservação, com isolinhas de profundidade (m) (fonte: autoria própria).

3.2 - Modelo Delft3D-FLOW

A hidrodinâmica na foz do Rio Doce e na região costeira adjacente é determinada através da técnica de fluidodinâmica computacional. Considerando um fluido incompressível, as equações de águas rasas derivadas das equações de Navier-Stokes, representantes das leis que regem o movimento da água, são integradas na vertical considerando a pressão hidrostática e aproximação de Boussinesq. Em função da complexidade da geometria da área estudo, não há solução analítica para as equações resultantes. Por esse motivo, as equações são resolvidas de forma discreta em uma grade curvilínea ortogonal utilizando o método de diferenças finitas, com condições iniciais e de contorno apropriadas (Lacerda, 2016). No presente trabalho, é utilizado o módulo FLOW do modelo hidrodinâmico Delft3D de forma bidimensional (2DH, integrado na vertical) para determinar a hidrodinâmica área de estudo, resultante da vazão do Rio Doce, da maré astronômica e dos ventos e a dispersão dos rejeitos de mineração trazidos pelo Rio Doce, considerados constituintes conservativos, entre de novembro de 2015 a fevereiro de 2016.

3.3 - Implantação do modelo hidrodinâmico

Para simulação hidrodinâmica foi inserida uma malha curvilínea ortogonal no domínio físico horizontal, cuja área dos elementos aumenta de 0,003 km², na foz do Rio Doce, a 7,205 km², na região oceânica; foi interpolada a batimetria na malha; foram definidas as condições iniciais e de contorno de acordo com as forças consideradas.



As condições iniciais definidas como partida a frio, considerando que inicialmente o modelo está em repouso, são de elevação do nível d'água zero e velocidade nula em todo o domínio. Nos contornos fechados (ao longo da costa) a condição de contorno é de velocidade nula. Nos contornos abertos, denominados contornos artificiais "água-água", são especificadas a vazão do Rio Doce e a elevação do nível d'água nos contornos oceânicos.

A batimetria da área de estudo foi obtida a partir das cartas náuticas presentes no CENTRO DE HIDROGRAFIA MARINHA DO BRASIL (2017) no formato raster, digitalizadas para gerar um modelo digital de elevação, interpolado na grade do domínio.

Os dados de vazões do Rio Doce, inseridos na seção do Rio Doce localizada no centro da cidade de Linhares, foram obtidos do SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS – Hidroweb (2017) da Agência Nacional de Águas (ANA) para a estação fluviométrica de Colatina – ES (56994500) no período de simulação. Na condição de contorno, para simulação da dispersão da pluma, foi inserida uma série histórica das concentrações de sólidos dissolvidos obtidas a partir da ANA (2018), como constituintes conservativos na seção do Rio Doce localizada no centro da cidade de Linhares.

As componentes da velocidade do vento em x e y referentes à dez metros de altura e a pressão atmosférica utilizadas na simulação hidrodinâmica, foram obtidas para a região de estudo a partir da simulação do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) com resolução temporal de 1h e resolução espacial de 2 km. Os valores de amplitude e fase, para os harmônicos de maré (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, M4, MS4, MN4), foram implantados nos contornos oceânicos do domínio através do modelo global de maré TPXO, que utiliza os dados de altimetria da missão TOPEX/POSEIDON (Egbert *et al.*, 1994).

3.4 - Verificação da modelagem hidrodinâmica

A verificação da modelagem hidrodinâmica é dada pela comparação entre os resultados obtidos com os dados medidos. Para isso, as séries temporais de elevação da maré astronômica simulada foram analisadas utilizando o método de análise harmônica de maré e comparadas com os seis principais harmônicos de maré (M2, S2, O1, K1, Q1, N2) das estações maregráficas da área de estudo (Tabela 1) fornecidos pela FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR – FEMAR (Salles, 2000).

A comparação dos resultados para as amplitudes e as fases de todas as estações presentes na região de estudo foi realizada utilizando como parâmetro estatístico, o erro absoluto médio (*relative mean absolute error* – *RMAE* – Equação 1).

$$RMAE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i|} \right] \quad (1)$$

Onde, P_i é o valor simulado para cada tempo i , O_i é valor medido para cada tempo i e n é o número de observações.

Tabela 1 – Localização das estações maregráficas da FEMAR (Salles, 2000), presentes na área de estudo.

Estações	Latitude	Longitude
Barra do Rio Doce	19° 39,0' S	39° 50,0' W
Barra do Riacho	19° 50,5' S	40° 03,5' W
Piraquê-Açu	19° 57,3' S	40° 09,0' W
Porto de Tubarão	20° 17,1' S	40° 14,5' W
Porto de Vitória	20° 19,2' S	40° 19,1' W
Guarapari	20° 40,0' S	40° 29,9' W
Meaípe	20° 47,7' S	40° 32,2' W
Ponta do Ubú	20° 47,1' S	40° 34,1' W
Barra do Itapemirim	21° 00,4' S	40° 48,5' W

4 - RESULTADOS

A comparação dos resultados para as amplitudes e as fases de todas as estações presentes na área de estudo utilizando o erro absoluto médio relativo (RMAE) é mostrada na Figura 2.

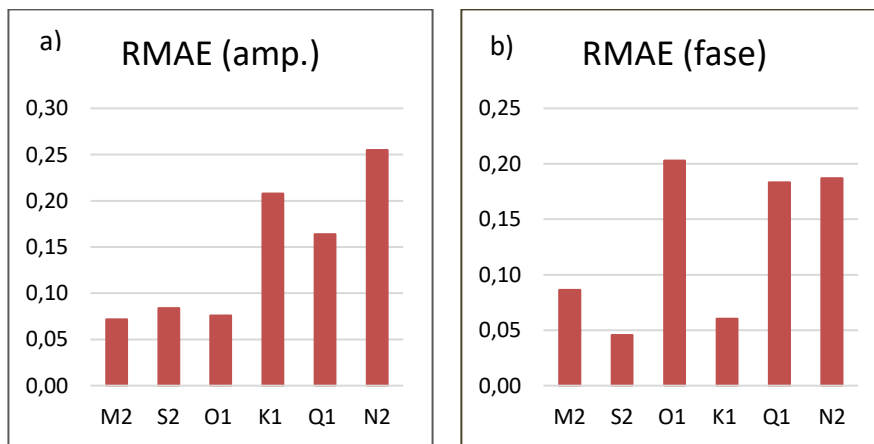


Figura 2 – Verificação dos resultados do modelo em relação aos dados fornecidos pela FEMAR (Salles (2000)) para amplitude (a) e para fase (b) (fonte: autoria própria).

O erro absoluto médio relativo (RMAE) apresentou os maiores valores para a amplitude dos harmônicos N2 (0,26) e K1 (0,21), os demais valores foram inferiores a 0,20 (Figura 2a). Em relação a fase os maiores valores foram para o harmônico O1 (0,20), os demais valores foram inferiores a 0,20 (Figura 2b). De acordo com Yang (2016), a classificação dos resultados é excelente para valores de RMAE inferior a 0,20 e boa para RMAE entre 0,20 e 0,40. Com essa classificação, os resultados foram excelentes, exceto para as amplitudes dos harmônicos N2 e K1, que apresentaram bons resultados.



Em relação ao campo de velocidade, no qual a hidrodinâmica é forçada pela maré astronômica e pela vazão do Rio Doce no instante de enchente da maré (Figura 4a), foi observada a intensificação da magnitude da velocidade na plataforma continental da área de estudo quando inseridos a vazão do Rio Doce, a maré astronômica e os ventos como forçantes da hidrodinâmica (Figura 4c). Isso evidencia a forte influência do vento no campo de velocidade, assim como observado por Zhang *et al.* (2009) e Xie *et al.* (2001) na região costeira do litoral sul da China.

Quando a circulação é forçada pela maré astronômica e pela vazão do Rio Doce (Figura 4a), há a dispersão da pluma de rejeitos de mineração para o norte da área de estudo (Figura 4b), na direção de uma onda de Kelvin, que viaja na direção em que a fronteira lateral (onde a onda tem amplitude máxima) está sempre à esquerda no Hemisfério Sul e à direita no Hemisfério Norte (Geyer *et al.*, 2004). No entanto, quando a circulação é forçada pela maré astronômica, pela vazão do Rio Doce e pelos ventos (Figura 4c), a pluma de rejeitos de mineração se dispersa em direção ao sul, junto à costa (Figura 4d), devido o padrão de ventos predominante de Noroeste (NW) e Nordeste (NE) na área de estudo (Figura 3).

Os resultados da simulação indicam que o Parque Nacional Marinho de Abrolhos, região com a maior biodiversidade marinha no Atlântico Sul, localizado ao sul da Bahia a 17,9°S e a 38,7°O, não sofreu os maiores impactos pela pluma de rejeitos de mineração, uma vez que a pluma se dirigiu predominantemente para o sul. No entanto, de acordo com os resultados da simulação a Reserva Biológica dos Comboios, o Refúgio de Vida Silvestre (RVS) de Santa Cruz e a Área de Proteção Ambiental (APA) Costa das Algas ao sul da foz do Rio Doce foram atingidas pela pluma de rejeitos de mineração.

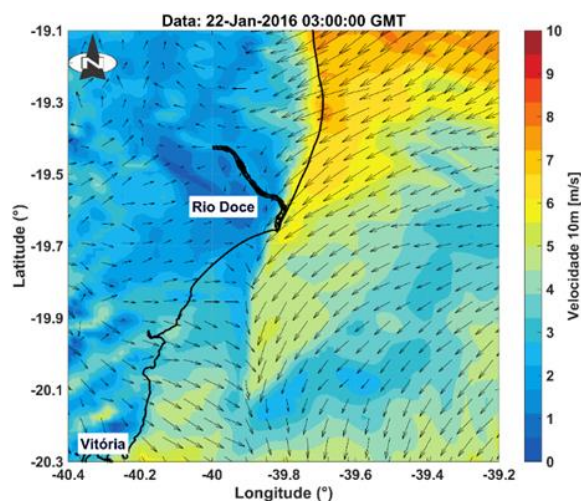


Figura 3 – Campo de velocidade do vento na área de estudo (fonte: autoria própria).

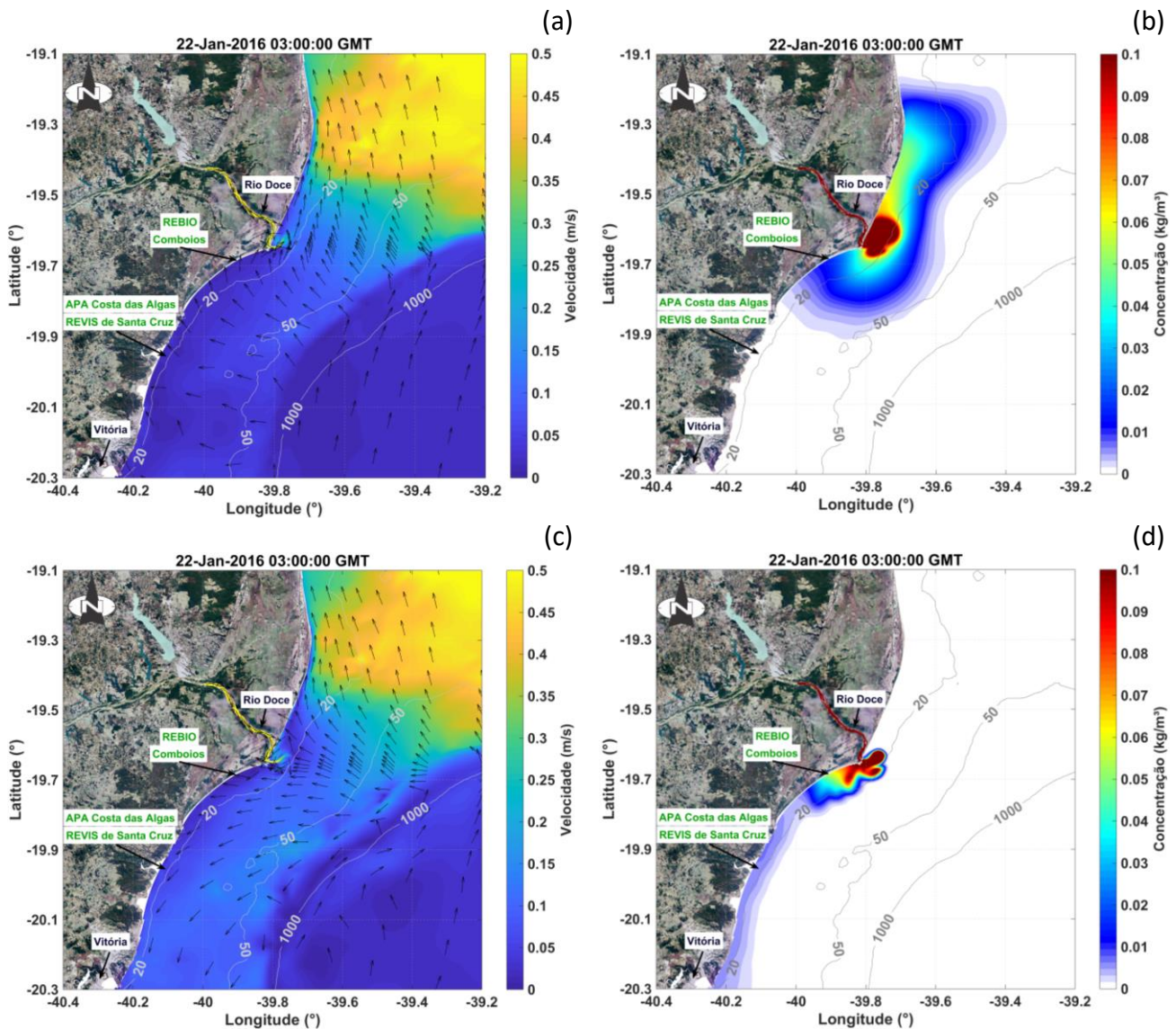


Figura 4 – Efeito na maré astronômica na circulação (a) e na pluma de rejeitos de mineração (b) e o efeito do vento na circulação (c) e na pluma de rejeitos de mineração (d) com isolinhas de profundidade (m) (fonte: autoria própria).

5 - CONCLUSÃO

As comparações realizadas demonstraram que o modelo representou de forma satisfatória os dados observados dos principais harmônicos de maré. Os ventos provenientes dos quadrantes Nordeste (NE) e Noroeste (NW), predominantes no período de simulação, induzem a dispersão da pluma para o sul, seguindo a orientação da corrente costeira. De acordo com os resultados a Reserva Biológica dos Comboios, o Refúgio de Vida Silvestre (RVS) de Santa Cruz e a Área de Proteção Ambiental (APA) Costa das Algas ao sul da foz do Rio Doce foram frequentemente atingidas pela pluma de rejeitos de mineração.



BIBLIOGRAFIA

ANA (2018). *“Monitoramento Especial Do Rio Doce”*. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/Riodoce/default.aspx>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

CENTRO DE HIDROGRAFIA MARINHA DO BRASIL. (2017). *“Cartas Raster”*. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

EGBERT, G. D.; BENNETT, A. F.; FOREMAN, M. G. G. (1994). *“TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model”*. Journal Of Geophysical Research, v. 99, p.821-852.

GEYER, W. R.; SIGNELL, R. P.; FONG, D. A.; WANG, J.; ANDERSON, D. M.; KEAFER, B. A. (2004). *“The freshwater transport and dynamics of the western Maine coastal current”*. Continental Shelf Research, v. 24, p.1339-1357.

LACERDA, K. C. (2016). *“Modelagem hidrodinâmica e do transporte de sedimentos da Baía de Vitória, ES: impacto do aprofundamento do canal estuarino do Porto de Vitória”*. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

MARTIN, L.; DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. (1998). *“Climatic Control of Coastal Erosion During a Sea-Level Fall Episode”*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 2, p.249-266.

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, V. S. (2018). *“CONDIÇÕES TÍPICAS DE VENTO SOBRE A REGIÃO MARINHA ADJACENTE À COSTA DO ESPÍRITO SANTO.”* Revista Brasileira de Climatologia, v. 22.

XIE, L.; WU, K.; PIETRAFESA, L.; ZHANG, C. (2001). *“A numerical study of wave-current interaction through surface and bottom stresses: Wind-driven circulation in the South Atlantic Bight under uniform winds”*. Journal Of Geophysical Research: Oceans, v. 106, p.16841-16855.

SALLES, F. J. P. (2000). *“Catálogo de estações maregráficas brasileiras”*. Fundação de Estudos do Mar - FEMAR.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS - HIDROWEB. (2017). *“Séries Históricas de Estações”*. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acesso em: 05 nov. 2017.

YANG, S. H. (2016). *“Análise das condições ambientais e da dispersão de plumas de efluentes na região costeira centro-sul do Estado de São Paulo com uso da modelagem numérica”*. 299 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ZHANG, H.; SANNASIRAJ, S. A.; CHAN, E. S. (2009). *“Wind Wave Effects on Hydrodynamic Modeling of Ocean Circulation in the South China Sea”*. The Open Civil Engineering Journal, v. 3, p.48-61.