

Análise das propriedades óticas da pluma do Rio Doce – ES antes e após o rompimento da barragem do Fundão utilizando o sensor MODIS

Luiza Luz Sartorato ¹
Carlos Alberto Eiras Garcia ^{1,2}

¹ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Campus Reitor João David Ferreira Lima - 88040-900- Florianópolis - SC, Brasil
luizalsartorato@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros - Rio Grande - RS, Brasil
garcia.io.furg@gmail.com

Abstract. The Fundão dam collapse, which occurred in November 2015 at Mariana - MG is identified as the biggest environmental tragedy registered in Brazil. The mining residues containing high concentrations of heavy metals and suspended materials arrived in Rio Doce, and after two weeks reached its mouth in the city of Regency - ES. The contact of this contaminated plume generated great concern with regard to the coastal ecosystems and to the extent of such an impact on living organisms. This study aims to identify and characterize the river's plume in the coastal environment through the optical properties derived from the MODIS sensor on board Aqua satellite. Ocean color images from five years prior to the accident and from December 2015 and January 2016 were analyzed using the SEADAS 7.3.2 software in order to detect spatial and temporal optical signature of the contaminated plume. The level 1 images were processed into level 2 using the SWIR NIR atmospheric correction scheme, and the spectral backscattering and reflectance products were extracted. In order to track the plum spatially, we developed an algorithm that performs relatively well, being able to highlight Rio Doce's waters from other rivers along the coast. We observed the constant presence of the Rio Doce's plume over the years prior and after the dam collapse, with a strong spectral signature in the green and red bands, but we also observed an increase of both backscattering and reflectance in the red bands (645, 667 and 678 nm) after the accident.

Keywords: River Doce, contaminated plume, backscattering, reflectance, optical properties, MODIS.

Palavras-chave: RioDoce, pluma contaminada, retroespalhamento, reflectância, propriedades óticas, MODIS.

1. Introdução

O conjunto de bacias hidrográficas de rios que desaguam no litoral sudeste do Brasil é definido como Bacia Hidrográfica do Atlântico Sudeste. Neste complexo estão inseridas as bacias do Rio Doce (87.112,25 m²) e Paraíba do Sul (56.178,16 m²), que juntos compreendem mais que metade da área total da bacia (MMA, 2006).

No dia 05 de novembro de 2015 ocorreu o que foi identificado como o maior desastre ambiental do país, o rompimento da barragem do Fundão controlada pela Samarco em Bento Rodrigues-MG (Marta-Almeida, 2016). Cerca de 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração vazaram e atingiram o Rio Gualaxo do Norte, sendo que deste total, aproximadamente 5,5 milhões de metros cúbicos seguiram o fluxo do Rio Doce até sua foz no município de Linhares (SAMARCO, 2016). O contato da pluma contaminada com as águas do Oceano Atlântico se deu no dia 22 de novembro, situação que perdurou por pelo menos dois meses após a catástrofe. Alguns estudos realizados nas imediações da foz do Rio Doce (Bianchini, 2016; Bastos et al., 2016; Fernandes e Pereira, 2016; Neto, 2016) apontaram a presença de metais pesados e grandes concentrações de material particulado em suspensão na porção oceânica próxima da foz do rio, fato que gerou grandes preocupações com relação aos possíveis impactos que tal evento poderia causar no ambiente marinho, sobretudo nas unidades de conservação próximas à localidade de Linhares. Devido à dimensão da pluma no oceano faz-se necessária uma análise sinóptica do caso, e produtos de sensoriamento remoto surgem como importantes ferramentas nessas situações.

As propriedades óticas marinhas derivadas através do sensoriamento remoto, surgiram como uma tentativa de entender as características oceânicas em escala global na década de 70 com o lançamento do sensor CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) e, desde então, essa abordagem vem sendo amplamente utilizada, e outros sensores, tais como SeaWiFS, MODIS, VIIRS e MERIS que foram lançados mais recentemente (Gordon, 2010). Como estes são sensores passivos, suas medidas são originadas da incidência da luz solar que é posteriormente refletida ou retroespalhada pelos compartimentos terrestres e retornam ao satélite. A partir da radiância espectral recebida pelo sensor, podem ser calculadas as propriedades óticas aparentes e inerentes do oceano (Zanevelt et al., 2006). Dentre as propriedades inerentes, destacamos os coeficientes de absorção e de retroespalhamento, este último devido às partículas em suspensão na água do mar. A propriedade aparente da reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) é razão entre a radiância emergente da superfície do mar e a irradiância total incidente.

Desta forma, o presente trabalho possui como objetivo detectar a pluma contaminada do Rio Doce através dos seus coeficientes de retroespalhamento, $bb(\lambda)$, e reflectância de sensoriamento remoto, $R_{rs}(\lambda)$, bem como avaliar suas variações ao longo do tempo, incluindo antes e depois do acidente de Mariana.

2. Dados e Metodologia

2.1 Imagens de satélite

Considerando que a área de estudo está compreendida em uma região de águas do tipo Caso 2 (Liew et al., 2001), altamente influenciadas pela descarga de rios em zonas costeiras, optou-se por um esquema de correção atmosférica alternativa. Sendo assim, imagens de processamento nível 1 do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua foram adquiridas do portal Ocean Color Web da NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/>) nos meses de dezembro e janeiro de cinco anos anteriores e do ano posterior ao acidente. As imagens foram então convertidas em nível 2 utilizando o software SeaDAS 7.3.2, com correções atmosféricas propostas por Wang et al. (2009). Este algoritmo alterna o uso de bandas do infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (NIR e SWIR) para descartar o efeito da atmosfera nos sinais recebidos pelo satélite. Seguindo a metodologia descrita por Dogliotti et al. (2015) a banda utilizada para mascarar o efeito de nuvens foi alterada para 2130 nm, bem como foram rejeitadas as máscaras de *STRAYLIGHT* e *HILT*. As propriedades extraídas, após as correções atmosféricas, foram o retroespalhamento espectral (bb) e reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) nas bandas do visível e nos comprimentos de onda de 789 e 859 nm.

Após o acidente foram analisadas 11 imagens do dia 30 de novembro de 2015 ao dia 31 de janeiro de 2016. U, sobre as quais foi desenvolvido um algoritmo capaz de evidenciar a pluma em relação às águas costeiras provenientes de outros rios da bacia hidrográfica foi gerado com base nessas imagens. A fim de avaliar as variações temporais das propriedades óticas da pluma do Rio Doce, foram analisadas imagens dos períodos de início, meio e final de dezembro e final de janeiro dos anos de 2010, 2012, 2013 e 2014. Um intervalo máximo de quatro dias (antes e depois) de diferença foi estabelecido para comparação com as imagens de 2015 (Tabela 1).

Tabela 1. Datas das imagens analisadas em quatro períodos diferentes.

Início de dezembro	Meados de dezembro	Final de dezembro	Final de janeiro
5-Dez-2010	16-Dez-2010	27-Dez-2010	31-Jan-2011
1-Dez-2012	14-Dez-2012	31-Dez-2012	4-Fev-2013
2-Dez-2013	12-Dez-2013	31-Dez-2013	31-Jan-2014
2-Dez-2014	13-Dez-2014	31-Dez-2014	30-Jan-2015
5-Dez-2015	14-Dez-2015	28-Dez-2015	31-Jan-2016

2.2 Análise espacial e temporal pluma

Na tentativa de evidenciar espacialmente a pluma do Rio Doce, foi desenvolvido um algoritmo que matematicamente representa a razão entre o somatório de retroespalhamento nas bandas do vermelho (645, 667 e 678 nm) e o retroespalhamento no comprimento de onda 859 nm descrito pela Equação 1 a seguir.

$$\sum bb\lambda(645,667,678nm) \times bb\lambda 859nm \quad (\text{Equação 1})$$

O retroespalhamento nas bandas 645, 667 e 678 nm é altamente dependente dos materiais em suspensão, sendo que seus maiores valores estão associados às plumas de rios, principalmente na região do Rio Doce e Paraíba do Sul. A banda 859 nm foi escolhida, pois: (1) contrasta águas oceânicas (onde o bb é praticamente nulo) das águas costeiras; e (2) possui seus maiores valores de bb na região do Rio Doce, evidenciando assim a pluma contaminada das regiões do entorno. Exame minucioso dos valores assumidos pelo algoritmo (equação 1) mostrou que eles variam em média entre 0 e 0.06 m^{-2} , estando a pluma compreendida entre os intervalos de 0.02 a 0.06 m^{-2} .

A partir da identificação espacial da pluma do Rio Doce com o uso do algoritmo (Equação 1), foram estabelecidas regiões de interesse (*ROI's*) com valores maiores que 0.02, sobre as quais foi calculado o somatório de bb nas bandas do vermelho ($bb(645) + bb(667) + bb(678)$), e dividido pela área total da pluma definida pelo algoritmo. Esse procedimento foi aplicado às imagens anteriores e posteriores ao acidente (Tabela 1) a fim de evidenciar alterações temporais de bb nas bandas do vermelho. Além disso, foram também extraídos os espectros de Rrs , no período de 2010 a 2016, dos pontos amostrais de referência (Figura 1) definidos em Bastos (2016).

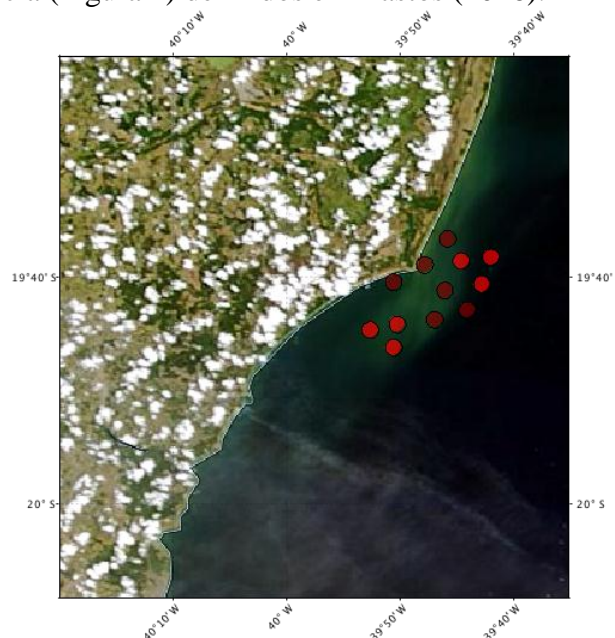


Figura 1. Localização dos pontos amostrais realizados durante a expedição do NOc. Vital de Oliveira em 2015 após o acidente (Bastos, 2016). Os pontos vermelho claro representam estações mais afastadas da costa e os vermelhos escuros, as estações mais próximas à desembocadura do Rio Doce.

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra as imagens obtidas pelo algoritmo, sendo visível a presença da pluma, assim como é possível acompanhar a sua evolução após o acidente. É possível perceber que o transporte das águas contaminadas é dirigido majoritariamente para sul, sendo que seus padrões corroboram com os resultados de Marta-Almeida (2016), inclusive no dia 06 de janeiro de 2016, quando o

transporte da pluma se deu para o norte. Nota-se também que na região da pluma mais próxima à foz, o algoritmo satura (regiões negras nas imagens).

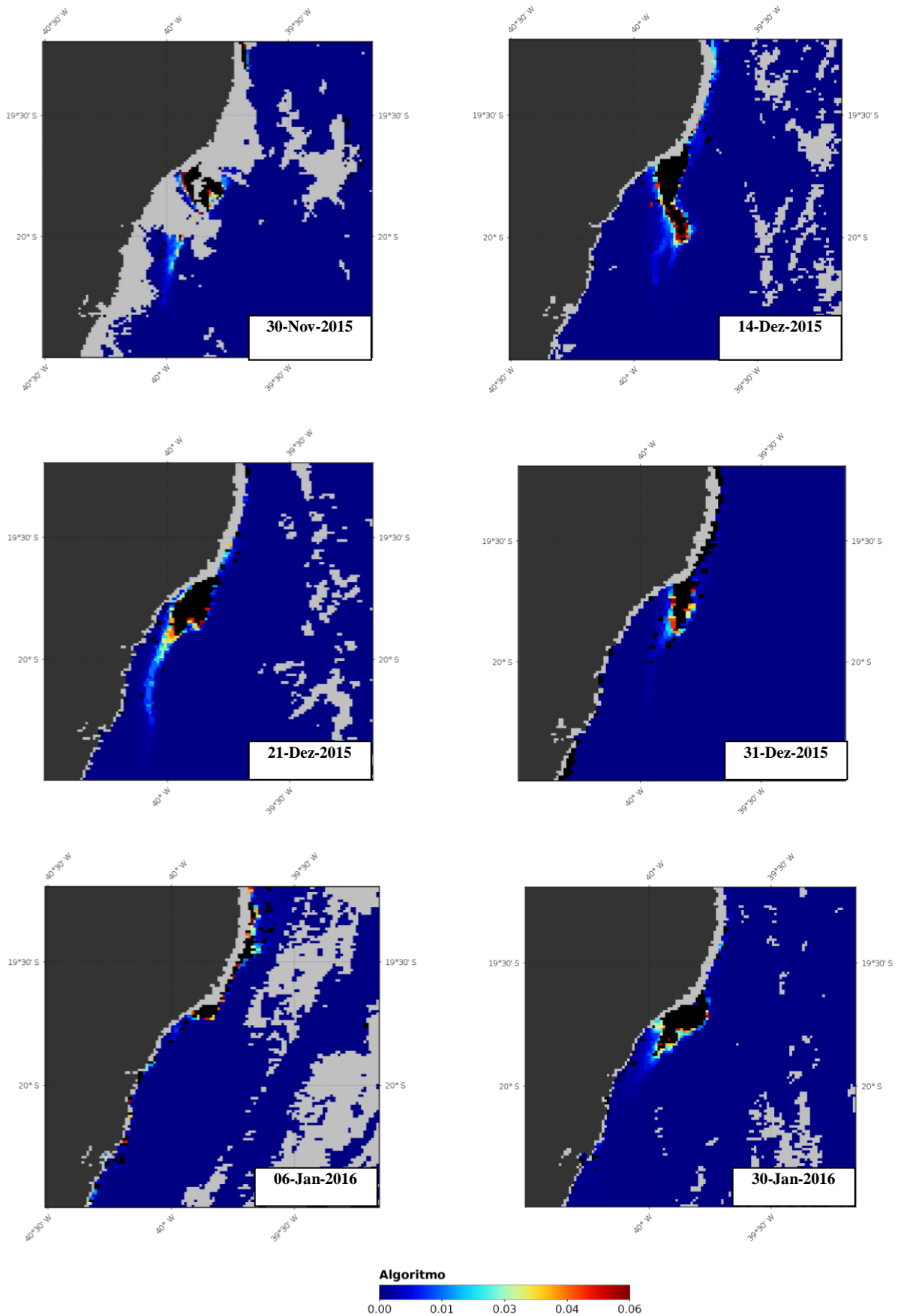


Figura 2. Aplicação do algoritmo nas imagens do sensor MODIS/Aqua em datas posteriores ao acidente. As regiões demarcadas em preto correspondem à saturação do algoritmo. As regiões em cinza representam nuvens e falhas do produto no processamento das imagens da cor do oceano.

Contudo, a presença da pluma pode também ser detectada, ainda que abrangendo uma área menor em anos anteriores ao acidente. O uso do algoritmo assim como análises das propriedades óticas (Rrs e bb) isoladamente demonstram que na região ocorrem intensos aportes de sedimentos oriundos do Rio Doce independentemente de ser antes ou depois do acidente (Figura 3). Imagens adquiridas pelo portal Worldview (Figura 4) corroboram com tal afirmação. Desta forma, muita precaução deve ser existir quando analisada as imagens da cor do mar, em datas posteriores ao acidente.

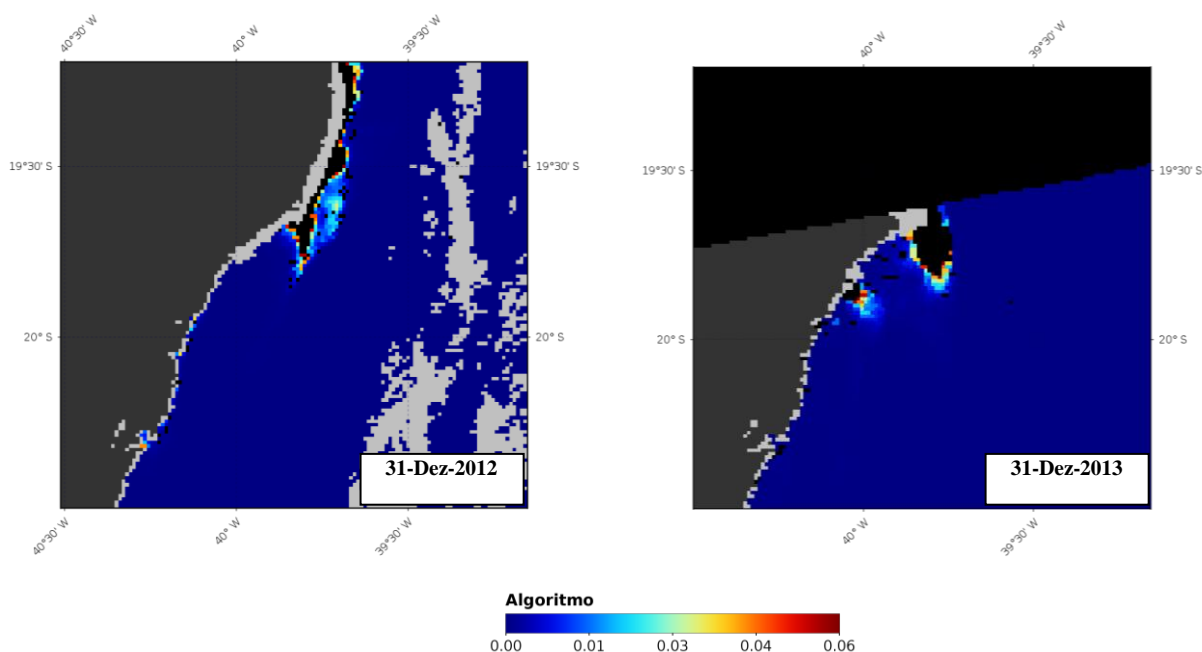


Figura 3. Aplicação do algoritmo nas imagens referentes aos anos anteriores ao acidente.

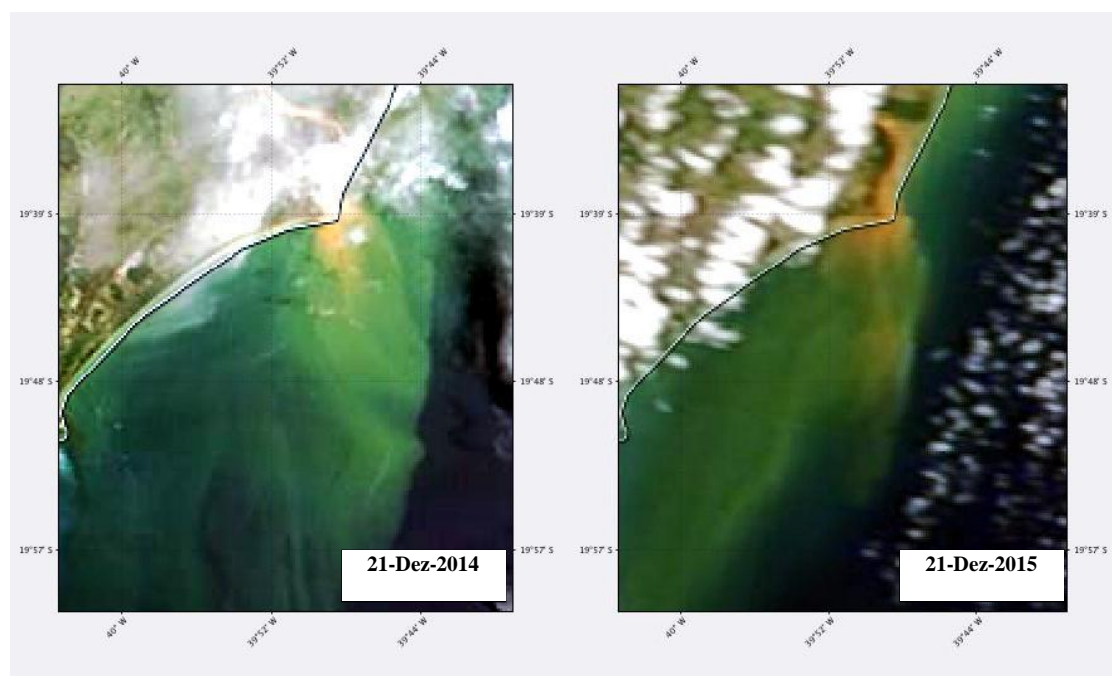


Figura 4. Imagens de composição de cores reais (*true color composite*) dos dias 21/12/2014 (antes do acidente) e 21/12/2015 (após o acidente).

A extração dos espectros de reflectância – $R_{rs}(\lambda)$ - e do somatório do retroespalhamento de bb nas bandas do vermelho, por sua vez, atestam que apesar presença da pluma estar presente ao longo do tempo, houve um aumento da soma de bb nessa região espectral durante e após o acidente. A Tabela 2 mostra os valores das médias do somatório de bb nas bandas de 645, 667 e 678 nm ao longo da extensão da pluma definida pelas regiões de interesse (pluma) definidas de acordo com a Seção 2.3. Nos meses de dezembro e janeiro verificou-se o aumento da assinatura espectral da pluma nos comprimentos de onda do vermelho, com exceção do período do final de dezembro, no qual o sinal nos anos de 2012 e 2013 é mais intensificado (valores de 0.244 e 0.147 m^{-1} , respectivamente). Os dados de reflectância, expostos na Figura 5 corroboram com tal observação, já que é constatado o aumento na cauda direita do espectro em comparação com os anos anteriores.

Tabela 1. Médias do Σ de bb a 645, 667 e 678 nm nas *ROI's* ao longo do tempo.

	Início de dezembro	Meados de dezembro	Final de dezembro	Final de janeiro
2010	0.069	0.165	0.094	0.181 (2011)
2012	0.159	0.195	0.244	0.170 (2013)
2013	0.151	0.167	0.147	0.131 (2014)
2014	0.155	0.216	0.126	0.105 (2015)
2015	0.177	0.229	0.145	0.246 (2016)

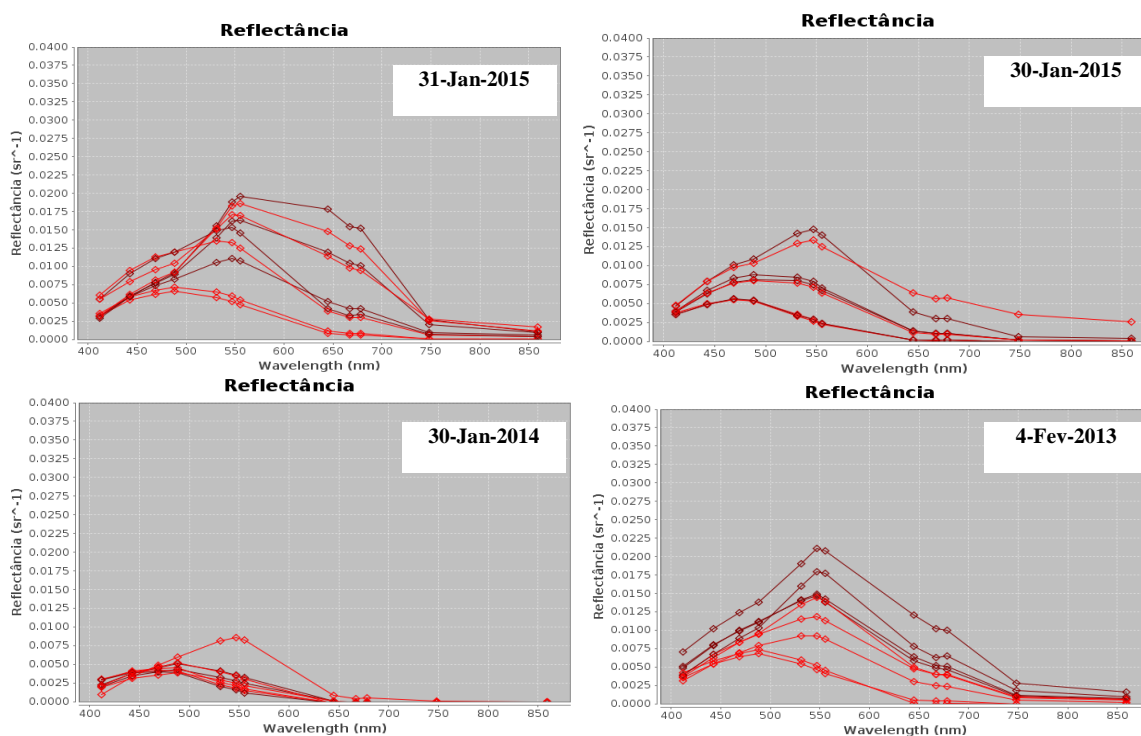


Figura 5. Espectros de reflectância do período “final de janeiro” dos anos de 2013, 2014, 2015 e 2016. As curvas em vermelho escuro são de estações próximas à região da foz do Rio Doce, e as curvas em vermelho claro por pontos ao sul e norte desta seção (ver Figura 1).

De acordo com a análise estatística de agrupamento em árvore (Figura 6) estabelecida para as médias da somatória do bb no vermelho, a pluma de 2015 de fato se diferencia dos outros anos. Durante os anos de 2014 e 2013, as plumas são similares entre si, possuindo características mais

comuns ao ano de 2012 do que o de 2010. Enquanto que o ano de 2015 se distancia de todos os outros grupos, demonstrando que o acidente ocorrido alterou as características óticas na região.

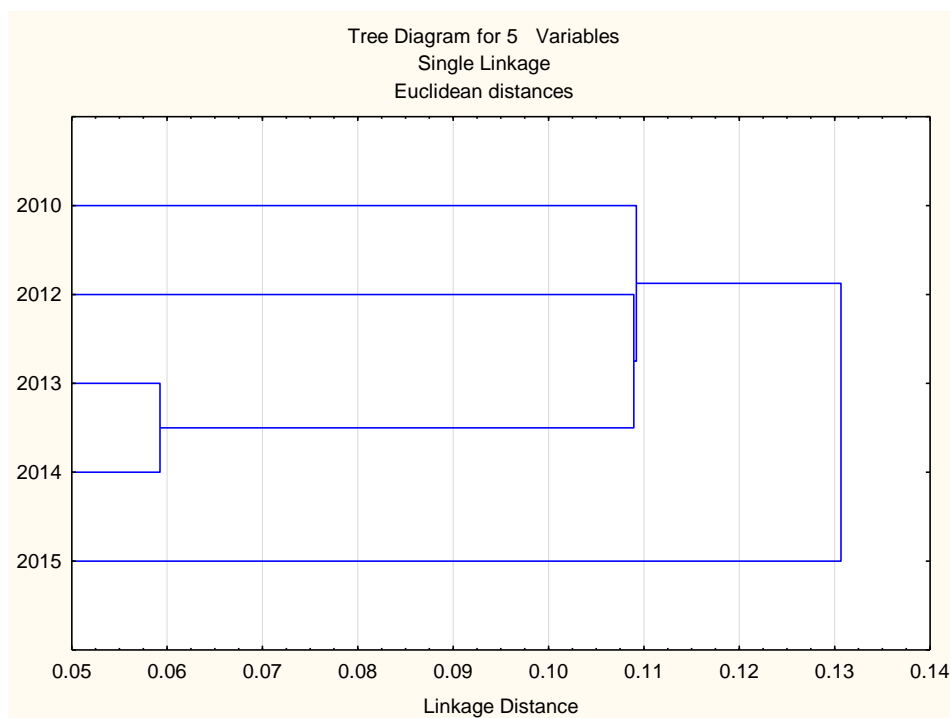


Figura 6. Análise de Cluster (agrupamento tipo árvore) aplicada às médias de do somatório de bb nos comprimentos de onda de 645, 667 e 678 nm.

4. Conclusões

O algoritmo para detecção da pluma apresenta uma boa performance, apesar de falhar nas regiões mais próximas da foz do Rio Doce, fato que deve ser analisado em estudos posteriores. Cabe ainda salientar que medidas óticas *in situ* são imprescindíveis para o aprimoramento desses algoritmos. Mas apesar das dificuldades na formulação destas equações devido à falta de tais medidas, foi possível detectá-la com certa eficácia, sendo maior parte do seu transporte no sentido sul, fato que pode comprometer a balneabilidade e a qualidade das águas marinha na região mais populosa do país. Contudo o transporte da pluma no sentido norte também deve ser considerado em, mesmo que este ocorra com maior intensidade em eventos esporádicos.

Foi identificada a presença constante da pluma ao longo dos cinco anos analisados, porém constatou-se que após o acidente envolvendo o rompimento da barragem de Mariana, ocorreu aumento de extensão areal da pluma, assim como as características óticas (Rrs e bb) das águas do Rio Doce se alteraram de forma significativa. Houve um aumento considerável tanto da reflectância como no retroespalhamento em todas as bandas do vermelho (645, 667 e 678 nm).

5. Referências

- Bastos, A. C.; Quaresma, V. S.; Grilo, C. F.; D'agostini, D. P.; Godinho, E.; Boni, G. C.; Leite, L. D.; Cagnin, R. C.; Bisi Jr, R. **Oceanografia Geológica: Sedimentologia**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2016. p. 16.
- Bianchini, A. **Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação: 1ª Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura do CEPESUL/ICMBio**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2016. p. 62.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos (Org.). **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste**. 2. ed. Brasília: 2006. p. 137.

Dogliotti, A.I.; Ruddick, K.; Guerrero, R. Seasonal and inter-annual turbidity variability in the Río de la Plata from 15 years of MODIS: El Niño dilution effect. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, doi: 10.1016/j.ecss.2016.09.013.

Fernandes, L. F. L.; Pereira, J. B. **Zooplâncton**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2016. p. 10.

International Ocean-Colour Coordinating Group., **Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications**. Lee, Z.-P. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, 2006, Dartmouth, Canada.

Gordon, H. R. Some Reflections on Thirty-Five Years of Ocean Color Remote Sensing. In: V. Barale V.; Gower, J. F. R.; Alberotanza, L. **Oceanography from Space**. New York: Editora Springer, 2010. cap 17, p. 289-305.

Liew, S. C.; Chia, A. S.; Lim, K. H.; Kwok, L. K. Modeling the reflectance spectra of tropical coastal waters. *Ocean Color Remote Sensing and Applications*. **Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.**, v. 4488, p. 248–255, 2001.

Marta-Almeida, M.; Mendes .; Amorim, F. N.; Cirano, M.; Dias, J. M. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident, **Marine Pollution Bulletin**, v. 112, p.359-364, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.039>

Neto, R.; Sá, F.; Schettini, E.; Dalcol, B. **Oceanografia Química Geoquímica de Metais e Nutrientes**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2016. p. 59.

SAMARCO, **Fundão dam collapse**. Disponível em: < <http://www.samarco.com/en/balanco/>>. Acesso em: 27 de Outubro de 2016.

Wang, M.; Shi, W. The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing, **Optics Express**, v. 15, n. 24, p. 15722–15733, 2007, doi:10.1364/OE.15.015722.