

Avaliação de sensibilidade espectral da água do rio Doce a partir de imagem orbital: o desastre ambiental da barragem de rejeito da Samarco Mineração S.A.

Silas Alexandria Costa¹
Leonardo Almeida da Silva¹
Thiago Awad Prudente²
Pablo Santana Santos¹

¹Universidade Federal da Bahia – IGEO/UFBA
Caixa Postal 40 - 170-020- Salvador - BA, Brasil
sac_sf@geologist.com; leonardo.as@gmail.com; pablo.srgeo@gmail.com

²Universidade Salvador - UNIFACS
Caixa Postal 41 - 940-560 - Salvador - BA, Brasil
thiagoawad@hotmail.com

Abstract. The accident occurred in Mariana-MG causing a total leak of 62,000,000 m³ of sediment, generating an immeasurable socio-environmental impact. The turbidity rate causes the scattering of the incident radiation in the subsurface, allowing to measure a dynamics between the evolution and subsequent involution of the reflectance levels to long time. This paper has the objective to accomplish a temporal evaluation (before the disaster: 10/13/2015, after: 11/30/2015, 01/01/2016 and 05/03/2016) of the spectral response in nearby water targets from the mouth of the river Doce, downstream of the disaster, with orbital images. The surface reflectance images were redesigned for the Southern Hemisphere, and by map of algebra the values for each spectral band of the OLI / LANDSAT-8 (reflective spectrum) were obtained over the 04 periods, in the 09 monitoring points established. The differences in the behavior of the spectral bands in all the analyzed samples show an expressive contrast of the surface reflectance rates before and after the environmental disaster (2 scenarios), that is, after the accident the values found were much higher. The spectral bands B1, B2, B3, B4 and B5 presented statistical significance in the distinction between the two scenarios, while bands B6 and B7 were not sensitive to increase of sediment adsorbed in the water after the environmental disaster. The comparison between the surface reflectance values and the monthly precipitation, allowed to identify the influence of rain (transport of river bank and bottom sediment) on orbital estimates.

Palavras-chave: orbital image, mining, environmental disaster, sediments, imagem orbital, mineração, desastre ambiental, sedimentos.

1. Introdução

A extração de recursos naturais constitui uma das atividades basilares da economia mundial. A atividade minerária fornece insumos para obtenção de quase todos os produtos presentes no cotidiano. Entretanto, esta atividade é potencial causadora de sérios problemas ambientais, pois altera intensamente a paisagem, gerando depósitos de estéril e rejeito, e expõe substâncias químicas que podem ser nocivas ao meio (Silva, 2007).

O tratamento, armazenamento e gerenciamento adequado dos resíduos sólidos gerados durante as atividades de extração e beneficiamento mineral são de fundamental importância para as empresas mineradoras, uma vez que estes são os principais impactantes ao meio ambiente (Prudente et al. 2016). Em via de regra, estes materiais geralmente são estocados em barragens de rejeitos: estruturas cuja finalidade é armazenar a água e os resíduos sólidos obtidos nos processos minerários. A locação adequada e o correto funcionamento dessas estruturas dependem da observância de algumas variáveis, tais como: características geológicas, hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais, avaliação de riscos, entre outras (Lozano, 2006 apud Passos, 2009).

Segundo Prudente et al. (2016), a mineradora Samarco Mineração S.A., localizada em Bento Rodrigues, subdistrito de Santa Rita Durão, em Mariana - MG, aumentou significativamente sua produção de minério nos últimos tempos, gerando também um volume

maior de rejeito armazenado nas barragens. Em vista disso, foi necessário a adequação das estruturas, as quais passaram por obras de alteamento ou ampliação do dique, de modo a suportar maior quantidade de rejeito. No dia 05 de novembro de 2015 a barragem de Fundão, gerenciada pela Samarco Mineração S.A., se rompeu, ocasionando o vazamento de um total de 62.000.000 m³ de lama, que gerou um impacto socioambiental imensurável.

Um dos principais rios afetados foi o rio Doce, que possui mais de 850km de extensão, e banha os estados de Minas Gerais e Espírito Santo (Matos et al. 2014), onde seu curso representa uma das mais importantes bacias hidrográficas totalmente incluída na Região Sudeste. Como principal impacto negativos mais visíveis deste grave desastre ambiental, os sedimentos adsorvidos são os principais Constituintes Opticamente Ativos nos corpos d'água, que certamente podem influenciar no comportamento espectral e dinâmica do rio Doce.

Satélites de sensoriamento remoto são utilizados para monitorar diferentes ambientes da superfície da terra (Gontia e Tiwari, 2010), a exemplo das condições hídricas locais (Todd e Hoffer, 1998). Há uma relação diretamente proporcional entre a quantidade de resíduos presentes nos corpos d'água com o fator de reflectância bidirecional em imagens de satélite (Novo, 2002; Jensen, 2009), desta forma, em função da quantidade de rejeitos depositados no rio Doce ocasionado pelo desastre natural, espera-se uma modificação brusca de comportamento quando comparado aos padrões naturais.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação espaço-temporal da sensibilidade espectral do satélite OLI/LANDSAT-8 em identificar essa mudança de comportamento da água, em função do aporte de rejeitos minerários depositados no rio Doce, oriundo do rompimento da barragem de Fundão.

2. Metodologia do Trabalho

A área de estudo refere-se a uma porção das proximidades da foz do rio Doce (~100km do Oceano Atlântico), localizada integralmente no Estado do Espírito Santo, trecho fluvial final de transporte dos rejeitos depositados pelo rompimento da barragem de Fundão. Foram distribuídas neste trecho 09 pontos de monitoramento da avaliação espectral da água, conforme Figura 1.

A avaliação da análise espectral da água do rio Doce, ocorreu por meio de imagens temporais do satélite OLI/LANDSAT-8. Estas imagens foram adquiridas de maneira gratuita no portal da Agência Espacial Americana (NASA), por meio do sítio <http://earthexplorer.usgs.gov>, em reflectância de superfície (com correção atmosférica), com profundidade radiométrica de 16 bits, e foram selecionadas 07 bandas espectrais monocromáticas do espectro reflexivo: B1-Azul Costal [0,430-0,450µm]; B2-Azul [0,450-0,510µm]; B3-Verde [0,530-0,590µm]; B4-Vermelho [0,640-0,690µm]; B5-Infravermelho-Próximo [0,850-0,880µm]; B6-Infravermelho-Médio 1 [1,570-1,650µm]; e B7-Infravermelho-Médio 2 [2,110-2,290µm], com resolução espacial de 30m, e um *Field Of View (FOV)* de aproximadamente 185km. Para realizar a análise espaço-temporal do padrão de reflectância do rio Doce, foi necessário a aquisição da imagem na Órbita/Ponto 215/074, em 04 datas de passagens: 13/10/2015 (22 dias antes do rompimento da barragem), referência do comportamento do rio Doce nos “padrões naturais”; 30/11/2015 (25 dias após o rompimento da barragem); 01/01/2016 (46 dias após o rompimento da barragem); e 05/03/2016 (120 dias após o rompimento da barragem). Os 03 registros orbitais após o rompimento da barragem de Fundão visam verificar a tendência natural de diminuição de reflectância da água do rio, que está associado a redução de sedimentos adsorvidos.

As imagens passaram pelo procedimento de composição colorida, reprojeção para o Hemisfério Sul (+10.000.000 m na latitude), e por tabulação cruzada entre os 09 pontos de monitoramento e as 07 bandas espectrais do OLI/LANDSAT-8, para se obter os valores de reflectância de superfície. A significância da diferença e/ou similaridade do comportamento

espectral do rio Doce foi analisado por meio de ensaios gráficos e abordagens estatísticas baseadas no teste de Pettitt, também conhecido como teste de homogeneidade (Pettitt, 1979).

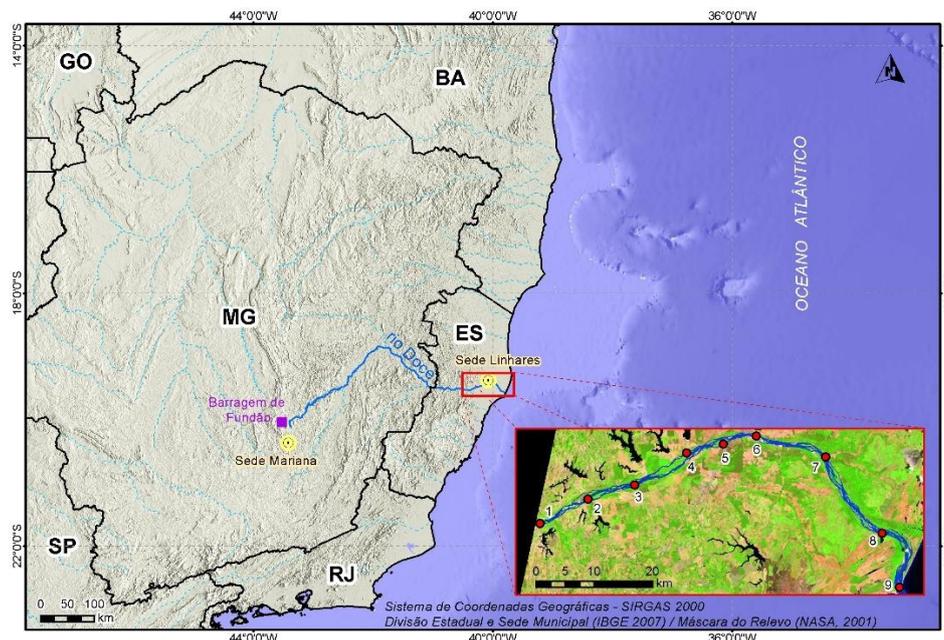


Figura 1. Localização da área de estudo, com pontos de monitoramento distribuídos próximo a foz do rio Doce.

3. Resultados e Discussão

Visualmente é possível perceber, a partir da composição colorida falsa-cor 6R 5G 4B, que o registro orbital do rio Doce (trecho analisado) em 13/10/2015 (22 dias antes do rompimento da barragem) apresentava um padrão característico que infere-se baixa reflectância da água (azul escuro), enquanto o registro 30/11/2015 (25 dias após o rompimento da barragem) a água altera completamente o seu comportamento (Figura 2), com um padrão “azul claro”, padrão atípico e característico de áreas com muita movimentação de sedimentos, geralmente encontrado em regiões próximas a mineração de ouro. Presume-se pelo padrão encontrado que o aporte de sedimento é altíssimo, mesmo após 22 dias do rompimento da Barragem do Fundão.

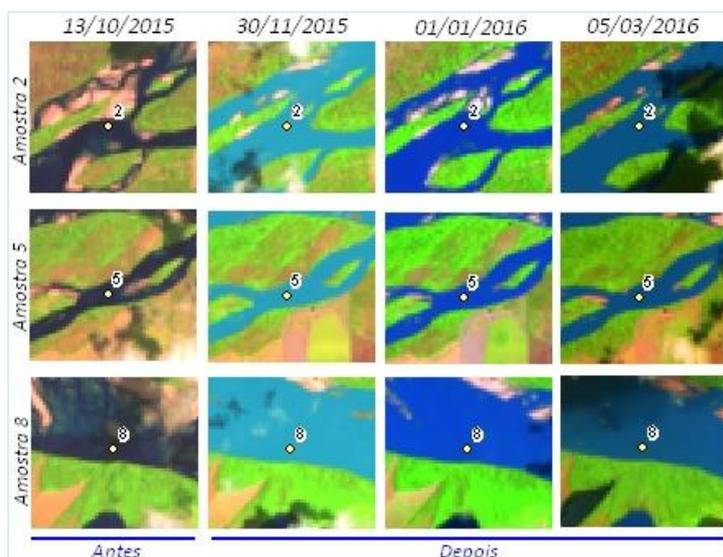


Figura 2. Padrões visuais que se correlacionam com o comportamento espectral da água.

A análise gráfica (Figura 3) evidencia que existe diferença no comportamento espectral da água do rio Doce antes e após o desastre ambiental da Barragem do Fundão, para as bandas espectrais B1-Azul Costal [0,430-0,450 μ m]; B2-Azul [0,450-0,510 μ m]; B3-Verde [0,530-0,590 μ m]; B4-Vermelho [0,640-0,690 μ m], em todas as 09 amostras analisadas, onde os valores de reflectância de superfície foram superiores para as datas de passagens do satélite após o desastre ambiental, quando comparado à data de referência 13/10/2015. A banda espectral B4-Vermelho [0,640-0,690 μ m] foi a que melhor caracterizou estes dois cenários.

Foi percebido também que a região espectral a partir do infravermelho-médio (B6-Infravermelho-Médio 1 [1,570-1,650 μ m] e B7-Infravermelho-Médio 2 [2,110-2,290 μ m]) não contribuiu para diferenciar o padrão da água com baixa (antes) e alta concentração de sedimentos (depois). Portanto, é possível afirmar que para estudos temáticos desta natureza estas bandas espectrais não contribuem para identificar diferenças de aporte de sedimentos em água.

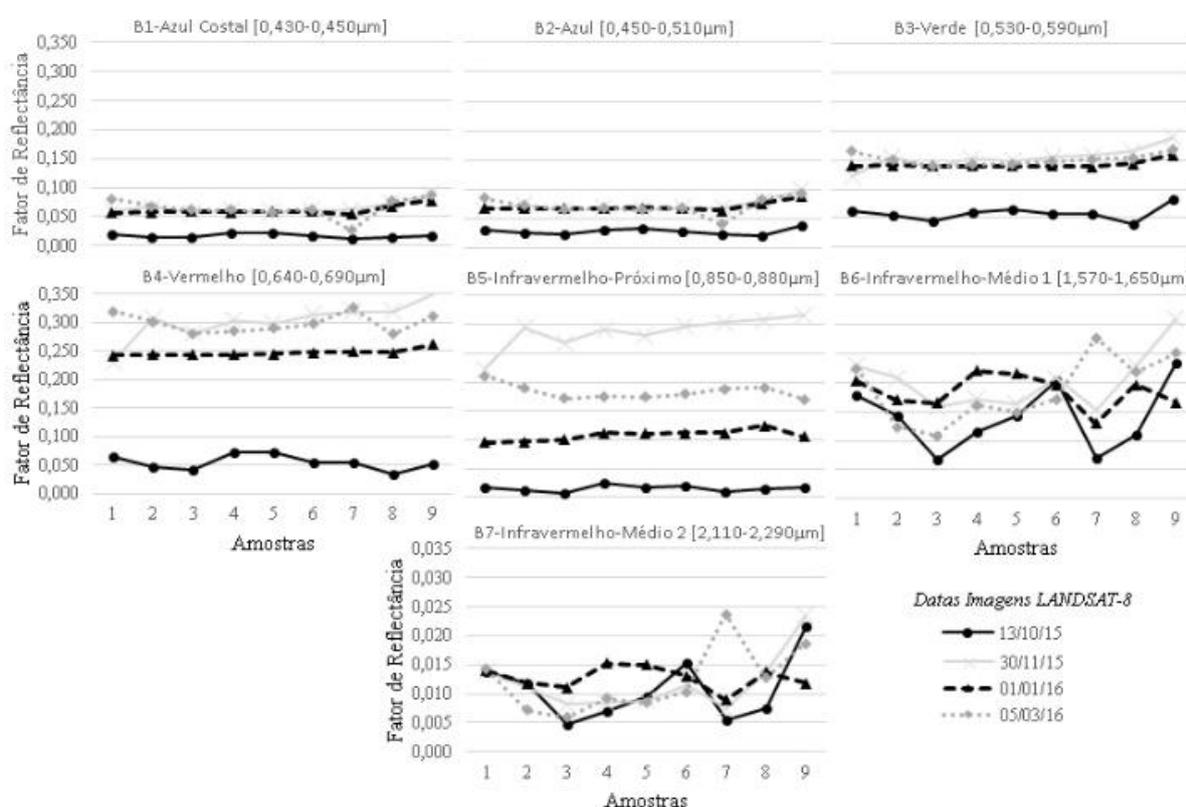


Figura 3. Fator de reflectância bidirecional da relação entre as 09 amostras e as 07 bandas espectrais analisadas.

Um importante detalhe a ser mencionado é que a tendência natural das taxas de turbidez na água gerasse um padrão contínuo na diminuição do fator de reflectância ao longo do tempo, porém, todas as amostras do dia 05/03/2016 apresentaram reflectância menor que as amostras do dia 01/01/2016, a qual sugere alterações de padrão de turbidez, que pode ter ocorrido em função de algum fator externo.

Segundo relatório do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, essa baixa reflectância em relação a data anterior caracteriza-se por um quadro de novos revolvimentos ocasionados por fatores externos, a exemplo da ocorrência de chuvas concentradas em determinados períodos na bacia hidrográfica, as quais acarretaram na suspensão dos materiais depositados em encostas e no fundo do rio. Segundo o Relatório da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana de Minas Gerais, como o substrato

depositado pelo rompimento da barragem ainda estava bastante úmido e instável, as chuvas convectivas, ou popularmente chamadas chuva de verão, ocorridas no início de 2016, provocaram erosão na espessa camada de sedimentos não consolidados, causando o carreamento e depósito de material solto para os cursos d'água (IGAM, 2016). Tal fato certamente influenciou no aumento da reflectância encontrado na data 05/03/2016 para a maioria das amostras. Os dados de precipitação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016) mostram o depósito significativo de chuvas no mês de janeiro/2016 (314,2 mm) na estação pluviométrica Belo Oriente (Figura 4), localizada a aproximadamente 24,2 km da Barragem de Fundão, a montante do trecho analisado.

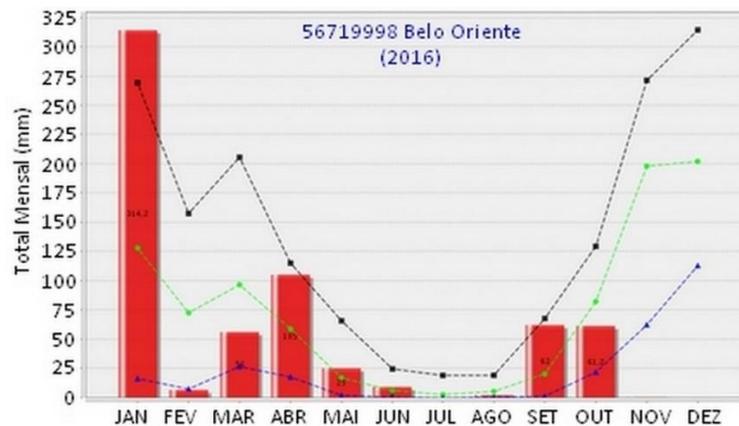


Figura 4. Dados de precipitação mensal da estação Belo Oriente, onde o volume de chuvas foi significativo no mês de janeiro de 2016.

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Os resultados estatísticos do teste de homogeneidade (teste de *Pettitt*), apresentados na Figura 5, mostram a sensibilidade de cada banda espectral analisada em perceber os dois cenários distintos, o comportamento espectral do rio Doce antes e após o desastre ambiental da barragem de Fundão, representadas em quatro períodos de registros orbitais (P1 - 13/10/2015; P2 - 30/11/2015; P3 - 01/01/2016 e P4 - 05/03/2016).

A partir desta avaliação estatística é possível afirmar que os valores de reflectância encontrados nas bandas espectrais B1-Azul Costal [0,430-0,450 μ m], B2-Azul [0,450-0,510 μ m], B3-Verde [0,530-0,590 μ m], B4-Vermelho [0,640-0,690 μ m] e B5-Infravermelho-Próximo [0,850-0,880 μ m] apresentaram diferenças significativas, e foram capazes de perceberem os dois cenários (antes e após o rompimento da barragem), já que o p-valor encontrado foi menor que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), portanto, as análises gráficas mostram duas distribuições distintas ($P1 \neq P2 = P3 = P4$). Já as duas bandas espectrais do infravermelho de ondas curtas (B6-Infravermelho-Médio 1 [1,570-1,650 μ m], e B7-Infravermelho-Médio 2 [2,110-2,290 μ m]) não foram sensíveis ao aporte considerável de sedimentos adicionados no rio Doce (trecho analisado), ocorrido após o rompimento da barragem, onde não foi possível identificar qualquer diferenciação dos dois cenários, como mostra a análise gráfica representada por uma única distribuição ao longo do tempo ($P1 = P2 = P3 = P4$), já que o p-valor calculado foi maior que o nível de significância adotado.

Uma outra questão a ser observada, é que mesmo após o rompimento da barragem, nas três datas analisadas pós-desastre, pôde-se identificar valores de reflectância alternados, influenciados por fatores externos, a exemplo da precipitação superior a 300 mm depositada no mês de janeiro de 2016. Entretanto, segundo o teste estatístico utilizado, essa diferença na variação da reflectância de superfície encontrada nas datas pós-desastre foram similares, não alcançaram significância estatística.

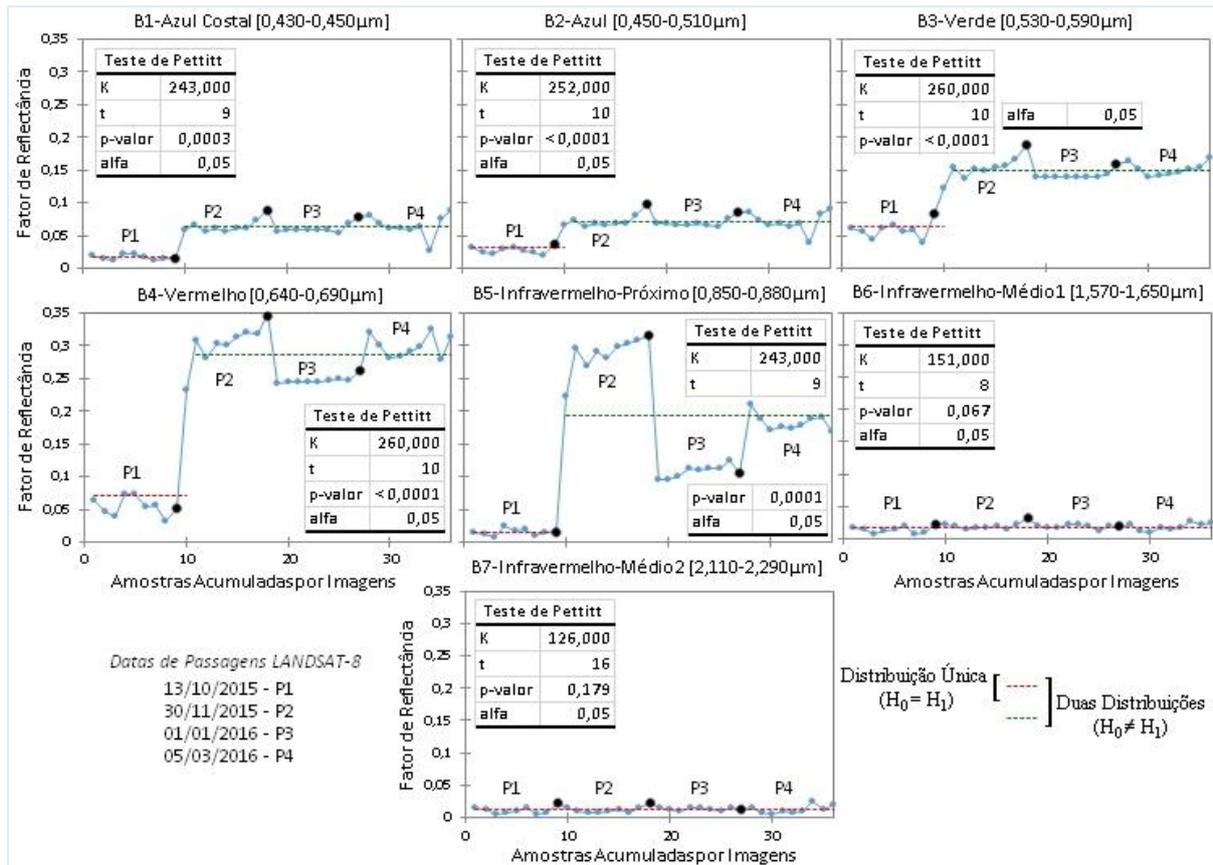


Figura 5. Resultado do teste estatístico de Pettitt, onde é possível verificar que as bandas espectrais B1 a B5 foram sensíveis a identificar diferença de cenários no que diz respeito ao sedimento depositado na água do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão.

4. Conclusões

A motivação para a avaliação de sensibilidade espectral das águas da foz do rio Doce partiu do interesse de observação do comportamento de alvos hídricos envolvidos no desastre da barragem de Fundão, que se configurou como um desastre ambiental imensurável. Fica claro no desenvolvimento do trabalho a importância do uso de sensores orbitais, especificamente nas faixas espectrais do visível até o infravermelho próximo, para auxiliar na identificação e monitoramento de desastres ambientais desta magnitude.

As respostas espectrais das amostras coletadas após o rompimento da barragem evidenciam uma tendência natural de redução da taxa de turbidez a medida em que se afasta do período em que ocorreu o desastre ambiental, já que houve uma tendência de redução na reflectância de superfície para as nove amostras realizadas. Entretanto, eventos externos como chuvas concentradas podem aumentar as taxas de turbidez do rio, tendo em vista o deslocamento do material sólido depositado nas encostas e fundos dos rios, ainda não sedimentados.

Apesar da configuração de uma lógica de redução na tendência da turbidez próximo a foz do rio Doce, percebe-se que há uma diferença muito elevada nos valores de reflectância de superfícies quando comparado aos valores encontrados no registro orbital antes do desastre ambiental, ou seja, mesmo após 120 do rompimento da barragem de Fundão, a água do rio Doce ainda está muito distante do seu padrão natural.

Referências Bibliográficas

ANA. **Monitoramento especial do rio Doce (dados hidrológicos)**. Agência Nacional de Águas, 2016. Disponível em: < <http://www2.ana.gov.br/Paginas/Riodoce/default.aspx>>. Acesso em: 15.out.2016.

IGAM. **Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2016. 75 p.

Jensen, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. [S.l.]: Jonh R. Jensen: tradução José Carlos Neves Epiphanyo (Coord.)- São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598 p.

Gontia, N. K.; Tiwari, K. N. Estimation of Crop Coefficient and Evapotranspiration of Wheat (*Triticum aestivum*) in an Irrigation Command Using Remote Sensing and GIS. **Water Resour Manage**, v. 24, p. 1399-1414, 2010.

Matos, A. T. S.; Motta, B. G.; Davis, E. G.; Coutinho, M. M. **Sistema de alerta de enchentes da bacia do Rio Doce**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2014. 97 p.

Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 2ªed, 2002.

Passos, N. C. de S. T. **Barragem de rejeito: Avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeito dos minérios de ferro utilizando um ensaio de campo – Um estudo de caso**. Universidade Federal do Paraná/UFPR. Curitiba, 2009.

Pettitt, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.

Prudente, T. A.; Anjos, J. S. A. dos; Soares, A. G. L. Os processos de alteamento da barragem de rejeitos de Fundão, da mineradora Samarco em Mariana (MG), foram os responsáveis pelo rompimento? *In: Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 4., 2016, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: UFRB, 2016.

Silva, J. P. S. Impactos Ambientais causados por mineração. **Revista Espaço da Sophia**, n. 8, ano 1, Nov. 2007. 13p.

Todd, S. W.; Hoffer, R. M. Responses of Spectral Indices to Variations in Vegetation Cover and Soil Background. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 64, n. 9, p. 915-921, 1998.