



## É possível utilizar o modelo SIAQUA-IPH para analisar a dispersão longitudinal de sedimentos em rios provenientes de barragens de rejeitos?

**Rodrigo Sanchotene Quintela<sup>1</sup>, Fernando Mainardi Fan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul (rodrigosquintela@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul (fernando.fan@ufrgs.br)

### **Resumo**

A atividade mineradora sempre foi um dos pilares econômicos do Brasil devido ao seu território de proporções continentais e sua considerável diversidade geológica. Entretanto, também é responsável pela produção diária de grandes quantidades de rejeitos, que são frequentemente armazenados em barragens. Após o rompimento da barragem de Fundão na cidade de Mariana-MG em Novembro de 2015, o armazenamento dos rejeitos tornou-se uma grande preocupação social e ambiental. Este trabalho analisou a possibilidade de utilização do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH em estudos de dispersão de sedimentos resultantes de rompimentos de barragem de rejeitos. O caso estudado foi o próprio rompimento da barragem de Fundão (MG) e os resultados calculados pelo modelo foram contrapostos com os dados divulgados pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM). Os valores obtidos tanto para a concentração de sedimentos calculada quanto para o período da passagem da onda de sedimentos foram na mesma ordem de grandeza para alguns pontos da bacia comparados aos dados divulgados pela CPRM.

Palavras-chave: SIAQUA-IPH, Barragem de rejeito, Sedimentos.

Área temática: Recursos hídricos

## **Could SIAQUA-IPH model be used to analyze the river longitudinal dispersion of sediments resulted from dam-break of tailing dams?**

### **Abstract**

*The mining activity has always been one of the pillars of the economy of Brazil, due to its territory of continental proportions and its considerable geological diversity. However, it is also responsible for the daily production of a great amount of tailings, which are frequently stored in dams. After the rupture of the Fundão Tailing Dam, in the city of Mariana/MG, in November 2015, the tailing storage has become an important environmental and social concern. This study analyzed the possibility of using the SIAQUA-IPH model of quality of water in studies of sediment dispersion resulted from the rupture of tailing dams. The case studied was the rupture of the Fundão Tailing Dam itself, and the results calculated by the model were compared to the data published by the Brazilian Company of Research and Mining Resources (CPRM in Portuguese). The numbers obtained either for the concentration of sediments calculated and the period of passing of the flood waves were in the same order of magnitude at some points of the basin as compared to the data published by CPRM.*

*Keywords - SIAQUA-IPH, Tailing dam, Sediments.*

*Theme Area: Water resources*



## 1 Introdução

A produção mineral brasileira, desconsiderando a extração de petróleo e gás, foi de US\$ 24 bilhões no ano de 2016 segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). O setor é responsável por 4,6% do PIB nacional e emprega diretamente 185 mil trabalhadores. Estima-se que o país possua aproximadamente 8.870 companhias mineradoras que exploram 90 tipos de substâncias minerais, das quais o ferro é a mais importante, sendo responsável por 62% das exportações realizadas em 2016.

Em contrapartida, as consequências ambientais decorrentes dessa intensa exploração são expressivas, principalmente nos corpos hídricos. A disposição adequada do material estéril proveniente do decapeamento superficial e dos rejeitos resultantes dos processos de tratamento é um dos principais desafios das mineradoras. Entre os métodos de disposição, as barragens de contenção de rejeitos é a técnica mais utilizada. O rompimento deste tipo de estrutura não é incomum, existindo registros em diversos países como África do Sul (barragem de Merriespruit – 1994), Espanha (bearragem de Los Frailes – 1998) e Canadá (barragem de Mount Polley – 2014).

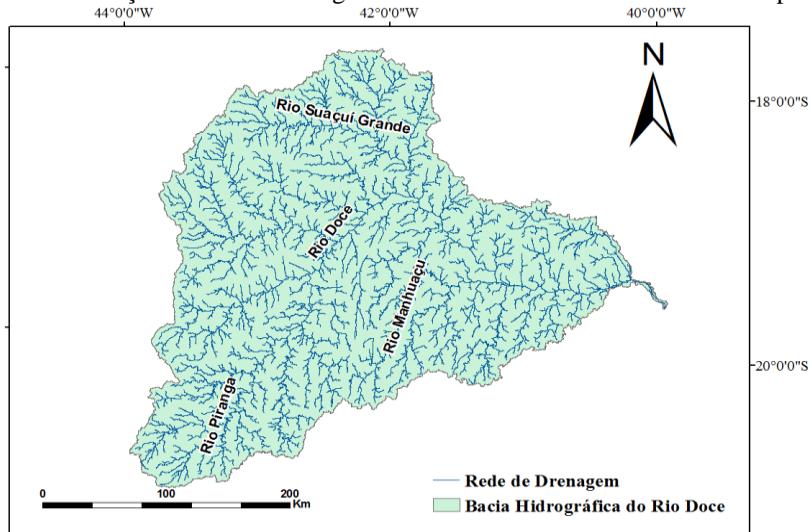
Importantes ferramentas para representar a propagação de cargas perigosas oriundas de acidentes em corpos hídricos são os modelos computacionais focados diretamente na simulação e no comportamento de poluentes diversos em corpos hídricos. Dentre esses modelos, destacam-se o QUAL-2E, QUAL-2K, SIMCAT e SWAT. Ainda, ressalta-se o modelo SIAQUA-IPH, proposto por Fan *et al.* (2013), que, dentre outras aplicabilidades, pode ser utilizado para calcular a dispersão, propagação e decaimento de poluentes em corpos hídricos. O SIAQUA-IPH possui uma formulação simples, baseada na equação de dispersão longitudinal.

Haja vista a importância de estudos de validação de modelos matemáticos para futuros projetos de prevenção e ação emergencial no caso de rompimento de barragens de rejeitos, este artigo pretende verificar a eficácia do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH para analisar a dispersão, propagação e decaimento de sedimentos provenientes de rompimentos dessas barragens, sendo o rompimento da barragem de Fundão o caso estudado.

A área de estudo escolhida para este estudo é a bacia hidrográfica do Rio Doce. A definição foi feita em virtude do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão na cidade de Mariana-MG. Ocorrido em 5 de novembro de 2015, o rompimento é considerado um dos maiores desastres ambientais da história brasileira, causando a morte de 18 pessoas e o despejo de aproximadamente 34 milhões de minério de ferro no rio Doce. A região possui uma área de drenagem de 86.715km<sup>2</sup>, sendo, dessa forma, a maior bacia inteiramente presente na região sudeste brasileira, abastecendo cerca de 3,5 milhões de habitantes em 228 municípios diferentes. Com 873km de extensão, o Rio Doce é o principal rio da bacia e tem sua foz no oceano Atlântico, no município de Linhares-ES. A localização da bacia e sua rede de drenagem podem ser vistas na Figura 1.



Figura 1 - Localização e rede de drenagem da Bacia do Rio Doce com seus rios principais.



## 2 Metodologia

Ao se utilizar o modelo SIAQUA-IPH, é necessária a obtenção de alguns dados de entrada, como informações a respeito da geometria da bacia, o *shapefile* da rede de drenagem com cada trecho de rio discretizado e dados hidráulicos, como vazões de referência. Essas informações foram obtidas a partir da calibração e verificação do modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do Rio Doce. Após a obtenção dos dados, diversas simulações foram realizadas no modelo SIAQUA-IPH com intenção de obter-se plumas de concentração de sedimentos provenientes do rompimento da Barragem de Fundão. A seguir, é apresentado o modelo MGB-IPH e descritos os testes realizados.

### 2.1 O modelo hidrológico MGB-IPH

Desenvolvido e introduzido por Collischonn *et al.* (2001), o modelo hidrológico MGB-IPH foi criado para representar as transformações chuva-vazão em bacias de grande escala, regiões com área de drenagem maiores que 1000km<sup>2</sup>. Esse modelo foi escolhido pois o SIAQUA-IPH possui um módulo de dados de entrada utilizando arquivos oriundos do MGB-IPH.

A calibração do modelo MGB-IPH foi realizada comparando-se dados de vazão observados com os calculados pelo programa. O período considerado na calibração foi de 1990 a 2015 e os dados observados foram obtidos diretamente do sistema Hidroweb mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA). A validação do modelo foi realizada para o período compreendido entre 1977 a 1989.

Os parâmetros considerados para avaliar a calibração do modelo foram: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculados e observadas (E); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculados e observadas (E\_log); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas ( $\Delta V$ ). Nas Figuras 2 e 3 podem ser vistos os hidrogramas obtidos na calibração e na verificação do posto fluviométrico 56539000, localizado em Cachoeira dos Óculos (19° 46' 37" S; 42° 28' 35" W). O Quadro 1 demonstra os medidores de desempenho para cada período do mesmo posto. Os dados obtidos a partir da calibração deste modelo foram utilizados como dados de entrada para as simulações realizadas no SIAQUA-IPH.



Figura 2 - Calibração do posto 56539000.

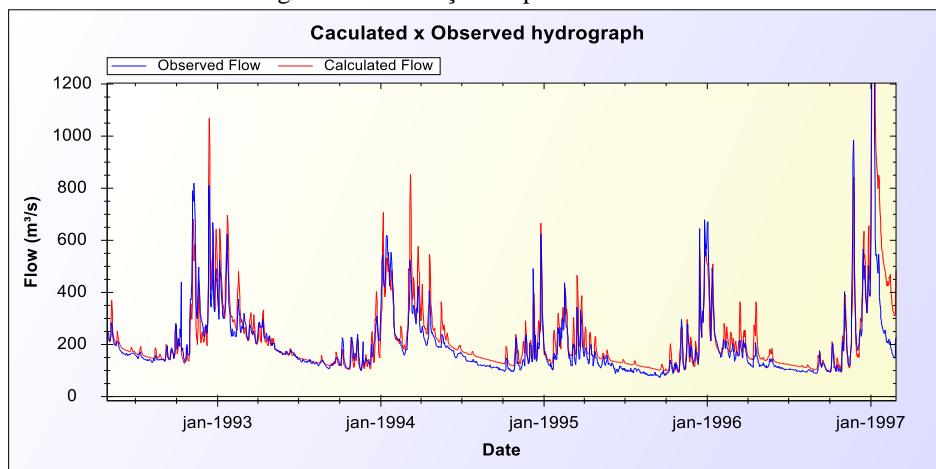
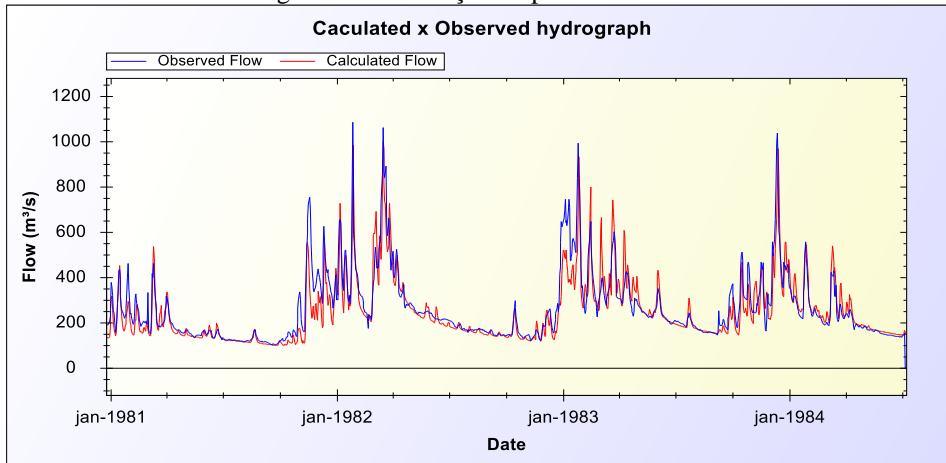


Figura 3 - Verificação do posto 56539000.



Quadro 1 - Medidas de desempenho para o posto 56539000.

Parâmetro	Calibração	Verificação
E	0.753	0.714
E_Log	0.8	0.823
ΔV	10.17%	3.256%

## 2.2 Modelo SIAQUA-IPH

O Simulador Analítico de Qualidade da Água (SIAQUA-IPH) é um modelo de qualidade de água desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas vinculado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). O modelo possibilita a simulação de diferentes cenários de impacto de lançamentos de efluentes em rios de grandes bacias. Além disso, o SIAQUA-IPH permite a simulação de cenários de diferentes vazões, desde situações de seca até períodos de cheia. O modelo oferece quatro opções de lançamento de poluente de acordo com sua distribuição temporal: instantâneo; intermitente; contínuo; e permanente.

Na etapa de inserção de lançamentos, o usuário define a forma de lançamento e os parâmetros a ele associados. Após a definição destes dados, o programa realiza o processamento das informações. Para a propagação da pluma de contaminação, o modelo simula a dispersão longitudinal, a advecção e o decaimento do poluente trecho a trecho na rede de drenagem



discretizada. Os resultados são calculados para o exutório de cada trecho de rio. A apresentação dos resultados calculados pelo programa é feita no formato de curvas de passagem do polutograma para o trecho de rio desejado. Detalhes dos modelos matemáticos utilizados no SIAQUA-IPH estão descritos em Fan *et al.* (2013).

### 2.3 Simulações realizadas no SIAQUA-IPH

O lançamento considerado para realização das simulações foi o instantâneo, onde se assume que todo o despejo de carga ocorreu no mesmo ponto de forma instantânea. Informações relacionadas ao rompimento da barragem, como vazão de referência e massa despejada, foram obtidas do Relatório I emitido em dezembro de 2015 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). O tempo de simulação foi de 385h, pois foi aproximadamente o período decorrido entre a ruptura da barragem e a chegada da onda de cheia na cidade de Linhares-ES, onde é o exutório da bacia. Baseado nos dados do relatório, uma primeira simulação foi realizada com o modelo descalibrado. O Quadro 2 apresenta os parâmetros utilizados na primeira simulação, em que C1 e C2 são variáveis de calibração do modelo e são denominados coeficientes de correção de velocidade e dispersão, respectivamente. Os resultados desta simulação serão demonstrados na próxima seção.

Quadro 2 - Parâmetros Utilizados na primeira simulação

Parâmetro	Valor
Vazão de Referência	Q70
Massa (kg)	68000000000
Decaimento (1/d)	0.0000001
Coeficiente C1	1
Coeficiente C2	1

Em uma segunda etapa, diferentes simulações de cenários foram realizadas, alterando sempre algum dos cinco parâmetros listados acima. O resultado mais satisfatório foi obtido quando se simulou o cenário do Quadro 3. Nessa situação, considerou-se que uma parte considerável dos sedimentos ficou retida a jusante da barragem, justificando, assim, o alto valor no decaimento. Além disso, a velocidade de propagação dos sedimentos era maior que a velocidade da água em condição normal, pois o volume despejado no rio se propaga como uma onda de cheia, possuindo mais celeridade do que águas baixas.

Quadro 3 - Parâmetros utilizados na melhor simulação obtida

Parâmetro	Valor
Vazão de Referência	Q50
Massa (kg)	68,000,000,000
Decaimento (1/d)	0.2
Coeficiente C1	10.4
Coeficiente C2	3.1

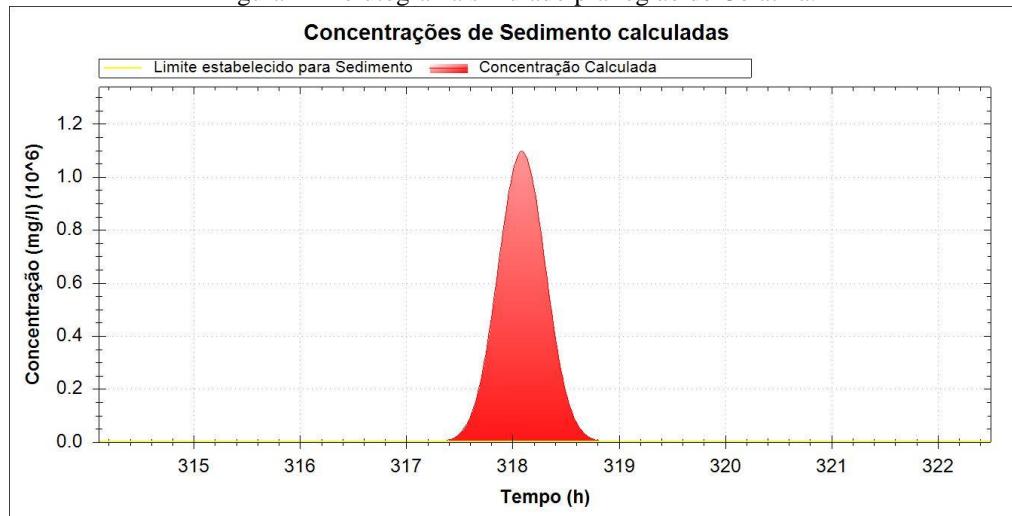
### 3. Resultados e discussões

O Relatório I divulgado pela CPRM apresenta valores de concentração de sedimentos coletados *in loco* oito municípios da bacia: Bom Jesus do Galho, Belo Oriente, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor, Baixo Guandu, Colatina e Linhares. Para a simulação ser



considerada satisfatória, as concentrações calculadas pelo modelo devem ser próximas às divulgadas pela CPRM. Assim, as comparações foram realizadas analisando-se os trechos da rede de drenagem que estão localizados nas proximidades de cada uma dessas cidades. Na Figura 4, é apresentado o polutograma da simulação realizada seguindo os parâmetros do Quadro 2 para a região de Colatina. O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos pela CPRM para a mesma região.

Figura 4 - Polutograma simulado pra região de Colatina.



Quadro 4 - Valores de concentração coletadas pela CPRM para a região de Colatina.

Cidade	Data da Medição	Tempo pós-rompimento (h)	CSS(mg/L)
Colatina	19/11/2015	329	1208
Colatina	19/11/2015	330	1266
Colatina	19/11/2015	331	2556
Colatina	19/11/2015	334	1704
Colatina	19/11/2015	335	1726
Colatina	19/11/2015	336	1730
Colatina	19/11/2015	337	1726
Colatina	19/11/2015	338	1834
Colatina	19/11/2015	342	2044
Colatina	19/11/2015	354	2226

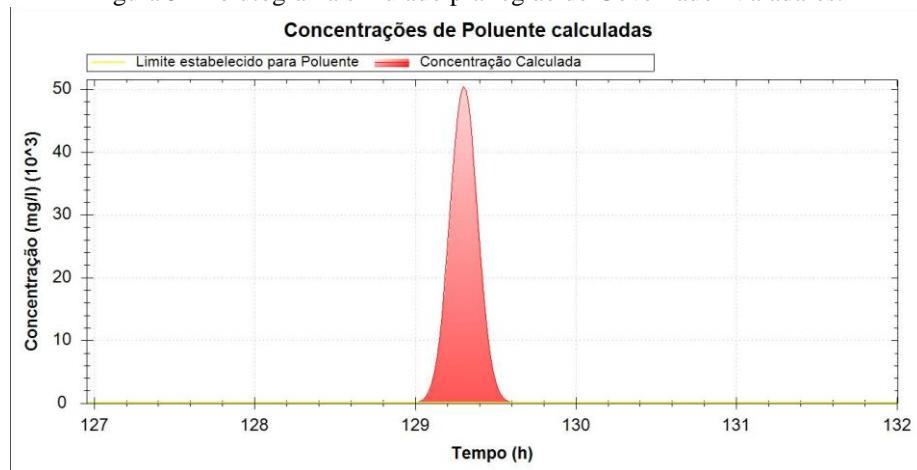
Percebe-se que tanto a magnitude da concentração quanto o período de passagem da pluma estão distantes da realidade, dessa forma a simulação não pode ser considerada satisfatória. A diferença na concentração dos sedimentos ocorre em virtude de algumas simplificações do modelo, como o fato dele não considerar o efeito da retenção de sedimentos à jusante de algumas barragens presentes ao longo do Rio Doce, como Aimorés e Mascarenhas. Assim, é preciso realizar a calibração do modelo.

Já na Figura 5, é possível observar o polutograma gerado utilizando-se os parâmetros do Quadro 3 para a região de Governador Valadares. Dessa vez, entretanto, tanto o período de passagem da onde de cheia calculada quanto os valores de concentração calculados estão muito próximos dos valores divulgados pela CPRM. Embora os parâmetros do Quadro 3 tenham sido satisfatórios para a região de Governador Valadares, eles não se aplicam à totalidade da Bacia, uma vez que as concentrações ficaram longe da realidade em outros pontos. Essa dificuldade



de calibração para obtenção de valores de concentração mais fidedignos ao longo de toda a bacia é decorrente de insuficiências resultantes de simplificações adotadas no modelo. Dentre essas imprecisões, pode-se destacar a realização de uma única calibração para toda a bacia, quando, possivelmente, a segmentação da calibração em sub-bacias fosse uma alternativa mais apropriada por considerar as heterogeneidades da bacia. Esse fenômeno segue sendo estudado, visando-se obter valores mais próximos da realidade para as concentrações calculadas.

Figura 5 - Polutograma simulado pra região de Governador Valadares.



Quadro 5 - Valores de concentração coletadas pela CPRM para a região de Governador Valadares.

Cidade	Data da Medição	Tempo pós-rompimento (h)	.CSS(mg/L)
Governador Valadares	10/11/2015	112	36240
Governador Valadares	10/11/2015	113	33728
Governador Valadares	10/11/2015	114	39040
Governador Valadares	10/11/2015	115	47582
Governador Valadares	10/11/2015	116	50942
Governador Valadares	10/11/2015	118	49372
Governador Valadares	10/11/2015	119	49490
Governador Valadares	10/11/2015	120	32442
Governador Valadares	10/11/2015	121	46700
Governador Valadares	10/11/2015	122	46718
Governador Valadares	11/11/2015	159	12422

#### 4. Conclusões

A respeito do rompimento da Barragem de Fundão, a consideração de que boa parte dos sedimentos se depositou logo à jusante do rompimento, nas vertentes e nos barramentos ao longo do rio (como na barragem de Candonga) foi refletida num alto valor no parâmetro relacionado ao decaimento. Além disso, a grande quantidade de carga lançada criou uma onda de cheia que alterou a velocidade da água no rio e, consequentemente, a vazão de referência. Em relação aos coeficientes de correção C1 e C2, foi necessário aumentar a velocidade em 10.4 vezes e a dispersão em 3.1 vezes. Por fim, foi possível concluir que realizar uma única calibração para toda a bacia não é a melhor opção, pois desconsidera as heterogeneidades da



região. Uma alternativa seria a segmentação da bacia em zonas menores de calibração, como sub-bacias.

Dessa forma, os resultados atingidos pelo estudo demonstram que, embora o SIAQUA-IPH possua simplificações na sua formulação, ele pode ser útil no auxílio em estudos de prevenção e ações emergenciais para análise da dispersão dos sedimentos em pontos específicos da bacia hidrográfica, basta que seus parâmetros sejam calibrados corretamente. Paralelo a isso, é necessária a realização de outros estudos para melhor compreensão dos efeitos das barragens na calibração do modelo e, posteriormente, corrigir as insuficiências do modelo.

## Referências

COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M.(2001) **Simulação hidrológica de grandes bacias.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.6, n. 2, 2001.

FAN, F. M. ; COLLISCHONN, W. ; RIGO, D. **Modelo analítico de qualidade da água acoplado com Sistema de Informação Geográfica para simulação de lançamentos com duração variada.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, p. 359-370, 2013.

PORTAL DA COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. **Relatório I do comitê especial de monitoramento da Bacia do Rio Doce.** Disponível em <http://www.cprm.gov.br/>. Acesso em 01 de Fevereiro de 2017.

PORTAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Relatório sobre a economia mineral brasileira em 2015. Disponível em <http://www.ibram.org.br/>. Acesso em 10 de Maio de 2017.