

A influência dos fatores físico-químicos e socioeconômicos sobre a qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Doce

The influence of physical-chemical and socioeconomic factors on the water quality of the Doce River basin

La influencia de factores físico-químicos y socioeconómicos en la calidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Doce

Recebido: 15/06/2022 | Revisado: 23/06/2022 | Aceito: 30/06/2022 | Publicado: 09/07/2022

André Fonseca Viegas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6384-7944>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: andre.viegas@ufvjm.edu.br

Ícaro Alves Ramiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3509-357X>
Universidade Federal de Viçosa, Brasil
E-mail: icaro.ramiro@ufv.br

Rafael Alvarenga Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3828-7305>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: rafael.almeida@ufvjm.edu.br

Alexandre Sylvio Vieira da Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-7816>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: alexandre.costa@ufvjm.edu.br

Resumo

O desastre da barragem de rejeitos minerários em Fundão, pela Empresa Samarco Mineração S/A em Minas Gerais (MG), geraram impactos ambientais, sociais e econômicos em toda bacia hidrográfica do rio Doce (BHRD). Assim, o objetivo desse trabalho foi relacionar variáveis ambientais e socioeconômicas que influenciam a qualidade da água (IQA). Para isso, foram selecionados 5 municípios que compõem o trecho sudeste da BHRD em MG, entre os anos de 2010 a 2020. A metodologia utilizada foi a de regressão de dados em painel dinâmico, em que a variável dependente foi o índice de qualidade da água (IQA) e as variáveis explicativas foram a precipitação média anual (P) e os índices: i) atendimento com água tratada (IATA); ii) atendimento com esgotamento sanitário (IATES); iii) desenvolvimento municipal (ID); iv) estado trófico (IET); v) enriquecimento orgânico (EO); vi) substâncias tóxicas (ST) e vii) contaminação por tóxicos (CT). Como resultado, todos os parâmetros estimados foram significativos (p -valor $< 0,05$), o que pode indicar assertividade quanto a escolha das variáveis. No modelo gerado a partir da regressão, obteve-se majoritariamente uma relação teórica esperada entre o IQA e as variáveis explicativas, exceto para P, CT e ST, provavelmente, devido a não consideração da sazonalidade e dos valores elevados após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão. Esses resultados se mostraram promissores em evidenciar as variáveis ambientais e socioeconômicas que influenciam a qualidade da água. Sendo assim, esse trabalho, pode ser uma ferramenta importante no incentivo à políticas públicas para manutenção da qualidade da água.

Palavras-chave: Poluição hídrica; Bacia hidrográfica do rio Doce; Qualidade da água.

Abstract

The disaster of the mining tailings dam in Fundão, by Empresa Samarco Mineração S/A in Minas Gerais (MG), generated environmental, social and economic impacts throughout the Doce river basin (BHRD). Thus, the objective of this work was to relate environmental and socioeconomic variables that influence water quality (IQA). For this, 5 municipalities that make up the southeast section of the BHRD in MG were selected, between the years 2010 to 2020. The methodology used was the regression of data in a dynamic panel, in which the dependent variable was the water quality index (IQA) and the explanatory variables were the average annual precipitation (P) and the indices: i) treatment with treated water (IATA); ii) service with sanitary sewage (IATES); iii) municipal development (ID); iv) trophic state (IET); v) organic enrichment (EO); vi) toxic substances (ST) and vii) contamination by toxic substances (CT). As a result, all estimated parameters were significant (p -value < 0.05), which may indicate assertiveness regarding the choice of variables. In the model generated from the regression, it was mostly obtained an expected theoretical relationship between the IQA and the explanatory variables, except for P, CT and ST, probably due to the

lack of consideration of seasonality and the high values after the rupture of the dam of Fundão tailings. These results were promising in highlighting the environmental and socioeconomic variables that influence water quality. Therefore, this work can be an important tool in encouraging public policies to maintain water quality.

Keywords: Water pollution; Doce river hydrographic basin; Water quality.

Resumen

El desastre de la represa de relaves mineros en Fundão, de la Empresa Samarco Mineração S/A en Minas Gerais (MG), generó impactos ambientales, sociales y económicos en toda la cuenca del río Doce (BHRD). Así, el objetivo de este trabajo fue relacionar variables ambientales y socioeconómicas que influyen en la calidad del agua (IQA). Para ello se seleccionaron 5 municipios que conforman la sección sureste de la BHRD en MG, entre los años 2010 al 2020. La metodología utilizada fue la regresión de datos en panel dinámico, en la que la variable dependiente fue el índice de calidad del agua (IQA) y las variables explicativas fueron la precipitación media anual (P) y los índices: servicio con agua tratada (IATA); servicio con alcantarillado sanitario (IATES); desarrollo municipal (ID); estado trófico (IET); enriquecimiento orgánico (EO); sustancias tóxicas (ST) y contaminación por sustancias tóxicas (CT). Como resultado, todos los parámetros estimados resultaron significativos (p -valor $< 0,05$), lo que puede indicar asertividad en la elección de las variables. En el modelo generado a partir de la regresión, se obtuvo mayoritariamente una relación teórica esperada entre el IQA y las variables explicativas, con excepción de P, CT y ST, debido a la falta de consideración de la estacionalidad y los altos valores luego de la ruptura de la represa de Fundão. Estos resultados fueron prometedores al resaltar las variables ambientales y socioeconómicas que influyen en la calidad del agua. Este trabajo puede ser una herramienta para impulsar políticas públicas para mantener la calidad del agua.

Palabras clave: Contaminación del agua; Cuenca hidrográfica río Doce; Calidad del agua.

1. Introdução

A água é um recurso natural necessário e estratégico para o desenvolvimento econômico, ela é vital para a manutenção dos ciclos biológicos, geológicos e químicos, que mantêm em equilíbrio os ecossistemas, responsável por manter a umidade do ar, abastecer lençóis freáticos e conservar a vida de plantas e dos seres vivos (Gomes, 2011).

Contudo a degradação dos recursos hídricos é a principal causa da mudança do equilíbrio dos ecossistemas locais e da conservação da biodiversidade. A degradação ocorre devido a vários fatores, dentre eles, os fenômenos naturais ou pelas ações antrópicas. A degradação por fenômenos naturais, dão-se pelos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, que são intensificados significativamente pela atividade humana, aumentando os impactos sobre os recursos hídricos disponíveis e a degradação dos recursos hídricos pela ação antrópica devido ao crescimento urbano e aumento de rejeitos nos efluentes, pelo processo industrial, extração mineral ou agropecuária (Brito *et al.*, 2009).

Visto que esses fatores de degradação são especialmente presentes em países em desenvolvimento, como o Brasil, o presente estudo considerou a bacia hidrográfica do rio Doce (BHDR). Esta bacia hidrográfica brasileira é de domínio da União e dos Estados de Minas Gerais e do Espírito Santo. De suma importância para a econômica regional e do país, devido a extração de minério de ferro, agropecuária e as atividades industriais (Ana, 2016).

Apesar da relevância da BHDR, alguns fatores vêm gerando redução da qualidade e da disponibilidade de água para população ao longo desta bacia. Um desses fatores, que ocorreu em novembro de 2015, foi o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão da Empresa Samarco Mineração S/A no município de Mariana em Minas Gerais. Aproximadamente 1.600 hectares das margens do rio Doce e dos seus afluentes foram atingidos pelos rejeitos contendo material mineral e substâncias químicas advindas do tratamento do minério de ferro. A exposição às substâncias químicas presentes nos rejeitos potencializa os riscos de efeitos tóxicos a saúde do homem e dos animais que mantem contato com esses rejeitos (Ferreira, 2013; Freitas *et al.*, 2014; Oliveira, 2018).

Segundo os estudos de Matos (2020) e Oliveira (2018), as consequências do desastre comprometeram os serviços de saneamento ambiental, tais como as alterações na quantidade e qualidade da água dos solos próximos à região do desastre, bem como o comprometimento da atividade das hidrelétricas e dos sistemas de abastecimento de água ao longo do rio Doce.

Por outro lado, o estudo de Lima *et al.* (2020), observaram que o desenvolvimento contínuo e progressivo da sociedade e a demanda por bens e serviços foram os fatores que acarretam diversos efeitos que geram também problemas de

esgotamento das águas superficiais e drenagem. Segundo os autores, a crescente urbanização de forma desordenada é o que leva os cursos d'água naturais existentes no meio urbano a terem um crescente aumento de carga poluidora e sedimentos em seus leitos.

No geral, esses estudos de degradação de recursos hídricos correlacionam a qualidade da água à fatores isolados de poluição como: o desastre de Marina por Ferreira *et al.* (2013) e Oliveira (2018); os parâmetros físico-químicos-biológicos por Matos (2020) ou considerando os fatores socioeconômicos e o desenvolvimento urbano como Lima *et al.* (2020). Apesar destes estudos considerarem fatores isolados, na prática, fatores sociais, econômicos e ambientais atuam concomitantemente na qualidade da água.

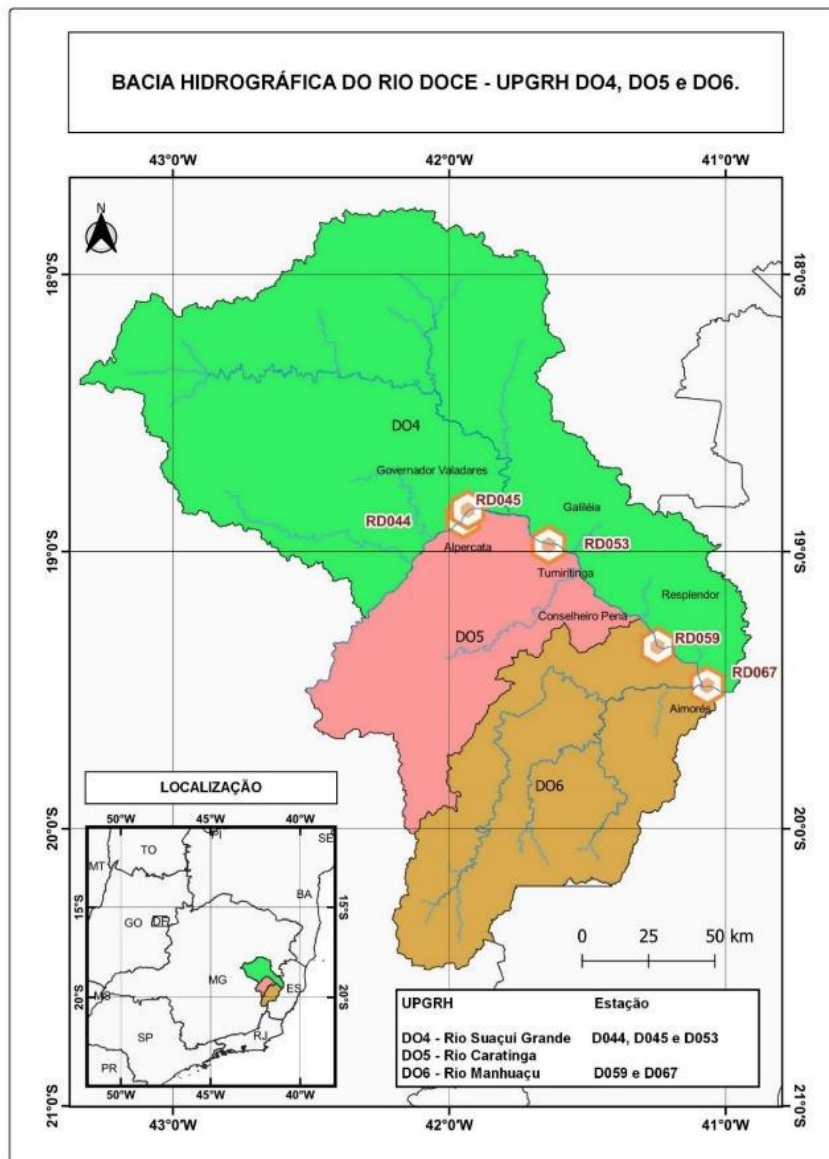
Dessa forma, metodologia empregada para analisar os parâmetros de qualidade da água é comum a todos e dá-se de acordo com as normas legais vigentes, pelo índice qualidade da água (IQA). Assim, em detrimento da maioria desses trabalhos identificados, que tradicionalmente abordaram séries históricas (time series) e análise espacial isoladamente (*cross-section*), nesse trabalho realizou-se uma análise espaço-temporal da qualidade da água. Desta forma, a originalidade dessa pesquisa consiste na tentativa de detectar variáveis ambientais e socioeconômicas, que influenciam a dinâmica da qualidade da água na BHRD. Com base nisso, o objetivo desse trabalho foi relacionar variáveis ambientais, sociais e econômicas que influenciam a qualidade da água na bacia do rio doce por meio do Índice de Qualidade de Água (IQA).

2. Metodologia

Analisou-se os Índices de Qualidade da Água (IQA) na porção sudeste do Estado de Minas Gerais, referente aos trechos pertencentes as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) de código DO4 (Rio Suaçuí Grande), DO5 (Rio Caratinga) e DO6 (Rio Manhuaçu) da BHRD. Dessa forma, as UPGRH DO1, DO2 e DO3, que pertencem ao território de Minas Gerais, não foram usados na análise. Esta região situa-se entre as latitudes 17°S a 21°S e as longitudes 40°W a 44°W (Figura 1). Ao todo, a região abrange uma área de 17,839,220 km², é constituída por 103 municípios.

As estações consideradas foram, a RD044 (rio Doce na cidade de Governador Valadares), RD045 (rio Doce no município de Conselheiro Pena), RD053 (rio Doce no município de Tumiritinga), RD059 (rio Doce no município de Resplendor) e RD067 (rio Doce no município de Aimorés), todas de responsabilidade do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (Figura 1).

Figura 1: Localização das Estações de Qualidade de Água na BHRD, em coordenadas geográficas.



Fonte: Autores.

2.1 Obtenção, Análise de dados e Modelagem

No presente estudo foi utilizada a metodologia de Dados em Painel Dinâmico com objetivo de analisar a relação entre a qualidade da água na BHRD. O modelo de dados em painel é obtido de uma regressão estatística com a particularidade de possuir uma dimensão temporal (t) e outra espacial (i). Isto porque a mesma unidade de corte transversal (municípios, indivíduos, países, etc.) é acompanhada ao longo do tempo. Esta metodologia é adequada quando a pergunta de pesquisa requer essa combinação de informações temporais e espaciais. Assim, é possível obter respostas mais confiáveis do que seria produzido pela utilização da abordagem espacial ou temporal separadamente (Gujarati & Poter, 2011).

O banco de dados resultante da junção da variável dependente (Índice de Qualidade da Água - IQA) e das variáveis respostas pôde ser classificado como um painel balanceado, pois haviam dados de IQA para todo o período (Tabela 1).

Tabela 1: Descrição das variáveis utilizadas no trabalho.

| Variável | Descrição | Unidade de medida | Fonte |
|--------------|--|-------------------|----------|
| IQA | Índice de Qualidade da Água | 0 a 100 | IGAM |
| IATA | Índice de atendimento total de água | % | FIRJAN |
| IATES | Índice de atendimento total de esgotamento sanitário | % | FIRJAN |
| P | Precipitação média máxima anual | mm/dia | HIDROWEB |
| ID | Índice de Desenvolvimento | 0 ou 1 | IBGE |
| CT | Contaminação por Tóxicos | 0 ou 100 | IGAM |
| IET | Índice do Estado Trófico | 0 a 100 | IGAM |
| ST | Substâncias Tóxicas | 0 ou 1 | IGAM |
| EO | Enriquecimento Orgânico | 0 ou 1 | IGAM |

Fonte: Elaborado pelos autores com base nas fontes (hiperlink), 2022.

Porém, nem todas as variáveis explicativas estavam disponíveis para todos os municípios no período de estudo. Dessa forma, o modelo foi estimado mesmo sem estas. Após a obtenção dos dados, observou-se que a variável “índice de desenvolvimento municipal” (ID) possuía ordem de grandeza inferior às outras variáveis. Originalmente, ID variava de 0 a 1, porém, após multiplicação por 100, ID passou a variar de 0 a 100%. Essa transformação foi feita para evitar que o algoritmo de estimação da regressão em Dados em Painel ficasse enviesado para as variáveis com maior ordem de grandeza. Além disso, foram criadas *dummies* (variáveis binárias 0 ou 1) para contaminação por tóxicos, enriquecimento orgânico e substâncias tóxicas; de acordo com os seguintes critérios descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Descrição das variáveis utilizadas 0 e 1 utilizadas no trabalho. Fonte: Elaborado pelos autores com base nas fontes (hiperlink), 2022.

| Variável | Descrição | Onde lê-se “0” | Onde lê-se “1” |
|-----------|--------------------------|---|--|
| CT | Contaminação por Tóxicos | Baixa (Refere-se à ocorrência de substâncias tóxicas em concentrações que excedem em até 20% o limite de classe de enquadramento do trecho do corpo de água onde se localiza a estação de amostragem) e média (Refere-se à faixa de concentração que ultrapasse os limites mencionados no intervalo de 20% a 100%). | Alta (Refere-se às concentrações que excedem em mais de 100% os limites). |
| ST | Substâncias Tóxicas | Ausência | Presença (arsênio total, cianeto livre, chumbo total, cobre dissolvido, zinco total, cromo total, cádmio total, mercúrio total e fenóis totais). |
| EO | Enriquecimento Orgânico | Ausência | Presença (fósforo total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrato e nitrogênio amoniacal total). |

Fonte: Elaborada pelos autores com base no Limite de classe definido na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008.

O estimador de Arellano-Bover/ Blundell-Bond foi utilizado na regressão em Dados em Painel Dinâmico. Esse estimador foi o mais adequado, pois, a série temporal analisada (10 anos – 2010 a 2020) excede a quantidade de unidades

amostrais (5 municípios). Isso significa que o painel é longo. Além disso, esse estimador confere dinamicidade à análise. Isso porque usa níveis defasados da variável dependente e das variáveis independentes. Essa abordagem não pressupõe que as variáveis em análise são estritamente exógenas. Sendo assim, admite a existência de variáveis endógenas. (Anderson & Hsiao, 1981).

No presente trabalho foi verificada endogeneidade teórica, por exemplo, a qualidade da água explica os níveis de contaminação fecal e por tóxicos, assim como, o nível de contaminação fecal e por tóxicos explica o índice de qualidade da água. Devido à existência destas variáveis endógenas, ou seja, variáveis explicativas que são explicadas pela variável resposta ao mesmo tempo, o comportamento da variável resposta pode não ser bem captado pelos modelos tradicionais, que usam os mínimos quadrados ordinários como estimador (MQO) (Anderson & Hsiao, 1981; Arellano & Bover, 1995; Blundell & Bond, 1998).

Dessa forma, para corrigir o problema da endogeneidade, o IQA (Y_{it}) foi estimado através defasagens, em que o valor atual de Y_{it} será uma função dos valores contemporâneos e passados das variáveis independentes (X_{it}) e do próprio IQA. Esta abordagem dinâmica dispensa o uso de variáveis instrumentais, que não são facilmente encontradas. Além disso, esta abordagem usa o estimador de mínimos momentos generalizados (GMM), que leva em consideração um conjunto de restrições sobre as covariâncias entre o termo de perturbação aleatório, o efeito individual e a observação inicial da variável dependente (Arellano & Bover, 1995; Blundell & Bond, 1998).

Devido ao tamanho reduzido da série (2010-2020), estas defasagens foram testadas até 4 anos. Isso porque o número de defasagens anula observações da série. Assim, foram testadas defasagens de 1, 2, 3 e 4 anos. Desta maneira, o modelo estimado foi definido pela equação 1:

$$\begin{aligned}
 IQA_{it} = & \alpha_{it} + \beta_1 IQA_{it-1} + \beta_2 IQA_{it-2} + \beta_3 IQA_{it-3} + \beta_4 IQA_{it-4} + \beta_5 IATA_{it} + \beta_6 IATA_{it-1} + \beta_7 IATA_{it-2} + \beta_8 \\
 & IATA_{it-3} + \beta_9 IATA_{it-4} + \beta_{10} IATES_{it} + \beta_{11} IATES_{it-1} + \beta_{12} IATES_{it-2} + \beta_{13} IATES_{it-3} + \beta_{14} IATES_{it-4} + \beta_{15} ID_{it} + \\
 & \beta_{16} ID_{it-1} + \beta_{17} ID_{it-2} + \beta_{18} ID_{it-3} + \beta_{19} ID_{it-4} + \beta_{20} P_{it} + \beta_{21} IET_{it} + \beta_{22} EO_{it} + \beta_{23} ST_{it} + \beta_{24} CT_{it} + \varepsilon_{it}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Em que: IQA_{it} é o índice de qualidade da água no município i e no período t ; IQA_{it-1} , IQA_{it-2} , IQA_{it-3} , e IQA_{it-4} é o índice de qualidade da água no município i e com defasagem de 1, 2, 3 e 4 anos, respectivamente;

$IATA_{it}$ é o índice de atendimento total com água tratada no município i e no período t ; $IATA_{it-1}$, $IATA_{it-2}$, $IATA_{it-3}$, e $IATA_{it-4}$ é o índice de atendimento total com água tratada no município i e com defasagem de 1, 2, 3 e 4 anos, respectivamente;

$IATES_{it}$ é o índice de atendimento com esgotamento sanitário, no município i e no período t ; $IATES_{it-1}$, $IATES_{it-2}$, $IATES_{it-3}$, e $IATES_{it-4}$ é o índice de atendimento com esgotamento sanitário no município i e com defasagem de 1, 2, 3 e 4 anos, respectivamente;

ID_{it} é o índice de desenvolvimento no município i e no período t ; ID_{it-1} , ID_{it-2} , ID_{it-3} , e ID_{it-4} é o índice de desenvolvimento no município i e com defasagem de 1, 2, 3 e 4 anos, respectivamente;

P_{it} é precipitação anual ($\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) registrada no município i e no período t ;

IET_{it} é o índice de estado trófico registrado no município i e no período t ;

EO_{it} é o índice de enriquecimento orgânico registrado no município i e no período t ;

ST_{it} é o índice de substâncias tóxicas registrado no município i e no período t ;

CT_{it} é o índice de contaminação por tóxicos registrado no município i e no período t ;

ε_{it} é o resíduo denotado como ruído branco;

α_{it} é o intercepto do modelo. Ressalta-se que o subscrito i refere-se aos municípios da Bacia do Rio Doce e t é o ano do período de análise.

Por fim, foi testado a ausência de autocorrelação serial no erro idiossincrático. A ausência deste erro é condição essencial para a consistência do estimador GMM. Para isso foi utilizado o procedimento desenvolvido por Arellano e Bond (1991), aplicado aos resíduos em diferenças. A hipótese nula consiste na ausência de autocorrelação serial de segunda ordem AR(2), e deve ser cumprida.

3. Resultados e Discussão

Todos os parâmetros estimados foram estatisticamente significativos (p -valor $< 0,05$) em pelo menos uma defasagem (ou lag) (Tabela 3). Além disso, o teste de Arellano e Bond (1991) não foi significativo (p -valor $> 0,05$), ou seja, não rejeitou-se a H_0 (Tabela 3). Dessa forma, não houve autocorrelação serial, o que é condição essencial para a consistência do estimador GMM. Esses resultados podem indicar que a escolha das variáveis desse trabalho foi assertiva.

Tabela 3: Modelo ajustado; os **** e *** representam significância estatística a 1% e 5%, respectivamente. Ainda, L1, L2, L3 e L4 representam a defasagem de 1, 2, 3 e 4 anos, respectivamente.

| Yit (IQA) = f() | Coefficiente (β_n) | Erro padrão | Z - valor | P - valor | Intervalo de confiança | |
|-----------------|----------------------------|-------------|-----------|-----------|------------------------|-------|
| IQA | | | | | | |
| L1. | 0.41 | 0.02 | 18.52 | 0.00**** | 0.37 | 0.46 |
| L2. | 1.10 | 0.02 | 45.70 | 0.00**** | 1.06 | 1.15 |
| L3. | -0.57 | 0.03 | -19.29 | 0.00**** | -0.62 | -0.51 |
| L4. | -0.85 | 0.05 | -18.06 | 0.00**** | -0.94 | -0.76 |
| IATA | | | | | | |
| L0. | -0.06 | 0.01 | -10.15 | 0.00**** | -0.08 | -0.05 |
| L1. | 0.31 | 0.03 | 10.28 | 0.00**** | 0.25 | 0.37 |
| L2. | 1.02 | 0.02 | 54.51 | 0.00**** | 0.99 | 1.06 |
| L3. | -0.95 | 0.04 | -23.31 | 0.00**** | -1.03 | -0.87 |
| L4. | 0.06 | 0.01 | 4.61 | 0.00**** | 0.04 | 0.09 |
| IATES | | | | | | |
| L0. | 0.04 | 0.02 | 2.21 | 0.03*** | 0.00 | 0.07 |
| L1. | 0.04 | 0.04 | 1.14 | 0.26 | -0.03 | 0.12 |
| L2. | -0.33 | 0.01 | -31.97 | 0.00**** | -0.35 | -0.31 |
| L3. | 0.54 | 0.01 | 55.10 | 0.00**** | 0.52 | 0.56 |
| L4. | -0.43 | 0.01 | -44.11 | 0.00**** | -0.45 | -0.41 |
| ID | | | | | | |
| L0. | -0.13 | 0.00 | -52.49 | 0.00**** | -0.14 | -0.13 |
| L1. | -0.03 | 0.01 | -6.53 | 0.00**** | -0.04 | -0.02 |
| L2. | 0.04 | 0.00 | 10.29 | 0.00**** | 0.03 | 0.05 |

| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|------|--------|----------|--------|--------|
| L3. | -1.35 | 0.06 | -23.07 | 0.00**** | -1.47 | -1.24 |
| L4. | 0.52 | 0.04 | 14.19 | 0.00**** | 0.45 | 0.59 |
| CT | 0.45 | 0.03 | 13.26 | 0.00**** | 0.38 | 0.52 |
| P | -0.28 | 0.01 | -29.33 | 0.00**** | -0.30 | -0.26 |
| IET | -1.36 | 0.03 | -42.78 | 0.00**** | -1.43 | -1.30 |
| EO | -5.02 | 0.22 | -22.93 | 0.00**** | -5.45 | -4.59 |
| ST | 1.73 | 0.28 | 6.18 | 0.00**** | 1.18 | 2.28 |
| β0 | 181.42 | 5.41 | 33.52 | 0.00**** | 170.81 | 192.03 |
| Teste de Arellano-Bond AR(1) | - | - | -1.47 | 0.14 | - | - |
| Teste de Arellano-Bond AR(2) | - | - | -1.47 | 0.14 | - | - |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Assim, o modelo ajustado pode ser representado pela equação 2:

$$\begin{aligned}
 IQA_t = & 181.42 + 0.41 IQA_{t-1} + 1.10 IQA_{t-2} - 0.57 IQA_{t-3} - 0.85 IQA_{t-4} - 0.06 IATA_t + 0.31 IATA_{t-1} + 1.02 \\
 & IATA_{t-2} - 0.95 IATA_{t-3} + 0.06 IATA_{t-4} + 0.04 IATES_t - 0.33 IATES_{t-2} + 0.54 IATES_{t-3} - 0.43 IATES_{t-4} - \\
 & 0.13 ID_t - 0.03 ID_{t-1} + 0.04 ID_{t-2} - 1.35 ID_{t-3} + 0.52 ID_{t-4} + 0.45 CT - 0.28 P - 1.36 IET - 5.02 EO + 1.73 ST \\
 & + \epsilon_{it}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Neste modelo ajustado, destaca-se que os coeficientes do IQA defasado em 1, 2, 3 e 4 anos (Tabela 3) foram significativos. Isso significa que o nível de qualidade de água de anos anteriores tem efeitos sobre o nível de qualidade de água atual. Além disso, pelo sinal majoritariamente positivo, é possível interpretar que essa é uma relação diretamente proporcional, ou seja, sem perturbações ambientais, o IQA tende melhorar ao longo do tempo. Esse resultado evidencia a necessidade de pensar a qualidade de água a longo prazo. Assim, na elaboração de políticas públicas que visem melhorar a qualidade da água, os formuladores devem se atentar a esse tempo de resposta, a fim de obter bons resultados.

Esse resultado é corroborado por Carvalho *et al.* (2019), que analisaram a Water Framework Directive (WFD), que é uma legislação europeia que visa proteger e melhorar os ecossistemas aquáticos e promover o uso sustentável da água. Os autores alertam os gestores de bacias hidrográficas sobre o provável sucesso e fracasso das atividades de restauração e os tempos de recuperação necessários. Isso devido à complexidade de diagnosticar a principal causa de degradação quando os corpos d'água são impactados por múltiplos estressores. Um dos principais estressores ambientais de corpos d'água é o esgoto sanitário.

Para a região sudeste da bacia hidrográfica do rio Doce, o atendimento com esgotamento sanitário (IATES) e água tratada (IATA) foram majoritariamente significativos e positivos. Isso significa que quanto maior o atendimento por água e esgoto, maior será a qualidade da água ao longo dos anos. A inconsistência da estimação dos coeficiente do IATES para defasagens abaixo de dois anos ($\text{lag} < 2$) pode estar associada à baixa quantidade de repetições para estimar o modelo. Dessa forma, destaca-se a importância da ampla coleta e divulgação desses dados. Em países em desenvolvimento, a relação entre atendimento por água e esgoto é constante, de modo geral, localidades não atendidas por água também não são atendidas por

esgotamento sanitário. Desta forma, a população destas localidades ingere água não tratada e descartam seus resíduos em corpos d'água adjacentes, o que deteriora a qualidade da água.

Essa relação entre água, esgoto e qualidade da água é corroborada por Silva *et al.* (2020). Neste trabalho, os autores analisaram a relação entre aspectos sanitários e uso do solo na contaminação por nitrato em um aquífero urbano da cidade de Fortaleza no estado do Ceará, Brasil. Assim, concluíram que em áreas onde <50% dos domicílios estavam ligados ao serviço de esgoto contribuíram para um alto nível de contaminação por nitrato. Dessa forma, corrobora-se que o saneamento básico é uma variável importante em relação à qualidade da água. Sendo assim, fundamentais na elaboração de Políticas públicas para prevenir a contaminação de corpos d'água urbanos. Além disso, o desenvolvimento socioeconômico da população também se mostrou um fator relevante a ser considerado.

No presente estudo, para a maioria das defasagens ou lags, verificamos que o índice de desenvolvimento municipal impactou negativamente ou levemente positivo o IQA. Esse resultado é corroborado por Liyanage e Yamada (2017), que trabalharam com a bacia hidrográfica do rio Kelani no Sri Lanka. Os autores estudaram meios de entender o impacto da população na qualidade da água em bacias hidrográficas e sua influência sobre os corpos d'água naturais. Constatou-se que a qualidade da água é pior em áreas densamente povoadas, média em áreas médias e melhor em áreas menos povoadas. Dessa forma, em ambos trabalhos, pode-se evidenciar que as atividades humanas representam uma ameaça significativa para a qualidade da água dos rios. Isso se dá em função de que um dos parâmetros para a medida do índice de desenvolvimento municipal é a geração de bens e renda. Sendo que a geração de renda quase nunca é acompanhada de uma consciência de preservação de recursos naturais. Assim, as atividades urbanas em particular são destacadas como uma das principais causas de contaminação em corpos d'água. Dessa forma, destaca-se a importância de trabalhos que avaliem criticamente as dimensões de sustentabilidade, capacidades populacionais em bacias hidrográficas e desenvolvimento socioeconômico.

Com relação à Contaminação por Tóxicos, observa-se predominância de ocorrência de CT baixa ao longo de toda a série histórica, porém após o desastre da Samarco em Mariana, nos anos seguintes observa-se a predominância alta da contaminação por tóxicos, corroborando positivamente com os valores obtidos anualmente pelas análises feitas. A contaminação por tóxicos é avaliada considerando-se os seguintes componentes: amônia, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cianetos, cobre, cromo hexavalente, índice de fenóis, mercúrio, nitritos e zinco.

No trabalho de Camon *et al.* (2020) no rio Uberabinha, a montante e a jusante da área urbana de Uberlândia em Minas Gerais, observaram que os índices de contaminação aumentaram próximos aos trechos de desague dos esgotamento sanitário nas áreas urbanas, comprovado que a ação antrópica influencia diretamente nos fatores de toxidade das águas superficiais. Entretanto Ribeiro *et al.* (2012), no estudo do Rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora em Minas Gerais, afirma que assim como o desague dos esgoto sanitário nas áreas urbanas, as atividades minerárias e agropecuárias influenciaram para aumento dos índices de contaminantes. O rio São Francisco obteve altas concentrações de Zn, Cd, Cu, Cr e Ni, que evidenciam a degradação da qualidade da água nos centros urbano-industriais.

Vale ressaltar que estes estudos, além do presente estudo, atentaram para variação da alta dos componentes tóxicos suspensos com a variação sazonal, sendo em maiores concentrações nos períodos chuvosos. Todos os dados estão disponíveis nos relatórios anuais feitos pelo IGAM na plataforma "<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/>".

Abreu e Cunha (2016) quantificaram a variabilidade espaço-temporal de 20 parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da qualidade da água no Baixo Rio Jari, Amapá e sugeriram uma influência relativa da precipitação com os parâmetros. Os resultados apresentados pelos autores foram significativos, ou seja, assertivos sobre a influência da precipitação sobre os parâmetros analisados. Entretanto observaram que a influência da precipitação variava apenas em relação ao tempo (ao longo dos anos), tanto os impactos ambientais como com a dinâmica sazonal, foram significativas e apresentaram uma correlação positiva nos períodos chuvosos.

Já Silva *et al.* (2008) no trabalho feito no Rio Purus no Amazonas observaram uma correlação negativa entre precipitação e turbidez e positiva entre precipitação e temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido, sólidos suspensos totais e pH. Assim sendo, o regime de chuva, segundo os autores é o fator principal para determinam a qualidade da água nos pontos de amostragem. Contudo, para este estudo, a relação da precipitação na BHRD impactou negativamente no índice de qualidade da água, principalmente por tratar-se de precipitação das médias máximas anuais (caracterizando um evento de máxima anual e não o de máxima por período sazonal), onde outros fatores obtiveram um impacto direto maior quando comparado a precipitação, como os índices de contaminação por tóxicos e o de atendimento por esgotamento sanitário.

Após o desastre da barragem de rejeitos da Samarco em Fundão município de Mariana Minas Gerais, as análises de ST apresentaram presença de cádmio total, cobre dissolvido, zinco total e chumbo total acima dos limites de classe definido na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 em alguma análise após o rompimento, o que impactou positivamente no modelo selecionado, corroborando com o estudo de Morales *et al.* (2022). Os autores fizeram um levantamento bibliográfico de 54 artigos entre 1979 e 2019, da América do Norte, Europa e Austrália e concluíram que as alterações na qualidade da água ocorreram decorrente às ações antrópicas, devido ao fogo principalmente, quando considerado as substâncias tóxicas presentes na água. Esses avaliaram 57 parâmetros químicos e 17 parâmetros físicos, compreendendo 304 amostras de parâmetros químicos e 77 amostras de parâmetros físicos, e observaram que 66 % dos resultados foram decorrentes de parâmetros químicos, dentre eles as ST.

Da mesma forma, Egbueri *et al.* (2022) estimaram os percentuais de elementos potencialmente tóxicos que seriam necessários remover para tornar os recursos hídricos em Ojoto e seus arredores (Nigéria) seguros para consumo humano. Como resultado, a carga de toxicidade de metais pesados estimou que 48% de Zn e 98% de Pb, tinham que ser removidos das águas para reduzir a poluição. Os autores utilizaram do índice de qualidade da água e revelou que apenas 4 das 28 estações de água eram adequadas. Assim sendo, os estudos de Morales *et al.* (2022) e Egbueri *et al.* (2022), comprovaram que as ST são fatores recorrentes na alteração da qualidade da água, por queimadas, poluição por esgotamentos sanitários, resíduos industriais, ou decorrentes de desastres naturais. Além de que, ambos estudos com o propósito de melhoria da qualidade da água nas localidades analisadas, levantaram a necessidade de interferência antrópica na remoção das ST.

Por fim o IET e o EO, foram significantes para o modelo empregado, apesar de presente em alguns anos da série histórica obtiveram uma correlação negativa, podendo ser pela baixa variância desses componentes nas amostras, ausência de dados ou até mesmo pelo peso em relação ao IQA. Jin *et al.* (2022) em estudos na bacia hidrográfica do Canal Norte na China observaram que a composição da Matéria Orgânica Dissolvida (MOD) está significativamente relacionada aos indicadores de qualidade da água, especialmente nitrogênio e fósforo, o que mostra que a MOD pode ter um impacto indicativo sobre o estado trófico no Rio Canal Norte, devido as fontes de pontos derivadas pelo homem e fontes agrícolas não pontuais no canal principal, bem como fontes terrestres e microbiológicas nos afluentes

Em geral no presente estudo, é possível interpretar que as variáveis dependentes IATA, TATES, ID, CT e ST têm uma relação diretamente proporcional ao IQA, ou seja, sem perturbações ambientais, o IQA tende a melhorar com o tempo. Assim como os parâmetros socioeconômicos os IATES, IATA e o ID, que tendem a melhorar com o aumento de incentivos à saúde básica e desenvolvimento local e os parâmetros ambientais de ordem física, o CT e ST que obtiveram valores elevados após o desastre ambiental de Mariana e foram reduzido sua carga poluidora ao longo dos anos, devido ao maior controle das análises da qualidade da água e das ações potencializadas na redução dos impactos gerados.

Vale ressaltar sobre os resultados obtidos de sinal negativo dos parâmetros ambientais P, IET e EO, que apesar de significativos e de serem correlacionados em estudos anteriores, no presente trabalho por não considerar a sazonalidade quanto a P ou pela baixa variância do IET e EO nos componentes nas amostras, até mesmo a ausência de dados em alguns anos, pode-

se afirmar que relação mesmo que baixa ou inversamente proporcional ao IQA, essas existem. O que se pode concluir é que todas as variáveis dependente tiveram influência no IQA.

4. Considerações Finais

Tendo em vistas os aspectos observados neste trabalho, foi possível gerar um modelo capaz de abordar de maneira satisfatória o índice de qualidade da água da BHRD. Conclui-se, portanto, que a qualidade da água está intimamente relacionada com aspectos socioeconômicos e ambientais. No que tange os aspectos ambientais, conclui-se que uma abordagem mais satisfatória seria feita com uma análise mais ampla. Dessa forma, destaca-se a importância de uma ampla coleta e divulgação de dados ambientais, já que estes são difusos e, quando disponíveis, encontram-se com falhas e descontinuidade temporal.

Com relação aos dados socioeconômicos, conclui-se que o desenvolvimento econômico dos municípios analisados não está em consonância com o meio ambiente. Além disso, a falta de orientação e fiscalização do poder público tem deixado margem para o não cumprimento da legislação ambiental vigente e deterioração de recursos hídricos, por empresas e sociedade civil. Em virtude dos fatos mencionados, fica evidente que o desastre da barragem de rejeitos em Mariana, aumentaram a presença de contaminantes tóxicos nos efluentes da BHRD e que a falta de um sistema adequado de tratamento de água, saneamento básico, e de incentivo a ações de desenvolvimento econômico de cada região acarreta problemas na qualidade da água disponíveis para população.

Foi verificado que todos os coeficientes das variáveis respostas foram significativos em alguma defasagem (1, 2, 3 ou 4 anos). Esse resultado evidencia a necessidade de pensar a qualidade de água a longo prazo, reforçando a necessidade de campanhas de conscientização do uso racional da água e da necessidade de ampliação da infraestrutura de oferecimento de serviços básicos, como o esgotamento sanitário.

Por fim, é esperado que este trabalho seja capaz de auxiliar os técnicos e atores da bacia a desenvolverem projetos, pesquisas e facilitar a tomada de decisão para políticas públicas voltadas a preservação ambiental da BHRD. Além de destacar a importância de se realizar um monitoramento constantes dos parâmetros de qualidade da água tratada ou não, é necessário analisar o comportamento sempre o mais próximo da realidade que a bacia se encontra, possibilitando ao poder público ter subsídios mais consistentes na tomada de decisão na gestão e no planejamento urbano e um maior controle dos rejeitos dos polos industriais e de extração mineral.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a inserção de dados considerando a sazonalidade, para que possa verificar o modelo de painel dinâmico para os períodos chuvosos e de seca. Pode também, replicar o modelo para outros municípios pertencentes a BHRD, abrangendo toda bacia. Por fim, pode-se incluir mais indicadores ambientais, sociais e econômicos, promovendo a melhoria do modelo empregado.

Referências

- Abreu, C. H. M. de, & Cunha, A. C. (2016). Qualidade da água e índice trófico em rio de ecossistema tropical sob impacto ambiental. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(2), 45–56. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144803>.
- ANA, (2016). Conjuntura recursos hídricos no Brasil dos informes 2015. Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana/MG. (2016). http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf.
- Anderson, T. W., & Hsiao, C. (1981). Estimation of Dynamic Models with Error Components. *Journal of the American Statistical Association*, 76(375), 598–606. <https://doi.org/10.1080/01621459.1981.10477691>.
- Arellano, M., & Bond, S. (1991). Some Tests of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and an Application to Employment Equations. *The Review of Economic Studies*, 58(2), 277–297. <https://doi.org/10.2307/2297968>.
- Arellano, M., & Bover, O. (1995). Another look at the instrumental variable estimation of error-components models. *Journal of Econometrics*, 68(1), 29–51. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01642-d](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01642-d).

- Blundell, R., & Bond, S. (1998). Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, 87(1), 115–143. [https://doi.org/10.1016/s0304-4076\(98\)00009-8](https://doi.org/10.1016/s0304-4076(98)00009-8)
- Brito, R. N. R. de, Asp, N. E., Beasley, C. R., & Santos, H. S. S. dos. (2009). Características sedimentares fluviais associadas ao grau de reservação da mata Ciliar - Rio Urumajó, Nordeste Paraense. *Acta Amazônica*, 39(1), 173–180. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672009000100017>.
- Calmon, M. S., Ferreira, V. O., & Rosa, R. M. (2020). Índice de qualidade de água e contaminação por tóxicos no rio uberabinha a montante e a jusante da zona urbana de Uberlândia. *Revista Geoaraguaia*, 10(1), 228–253. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/20010112>
- Carvalho, L., Mackay, E. B., Cardoso, A. C., Baattrup-Pedersen, A., Birk, S., Blackstock, K. L., Borics, G., Borja, A., Feld, C. K., Ferreira, M. T., Globevnik, L., Grizzetti, B., Hendry, S., Hering, D., Kelly, M., Langaas, S., Meissner, K., Panagopoulos, Y., Penning, E., & Rouillard, J. (2019). Protecting and restoring Europe's waters: An analysis of the future development needs of the Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*, 658(11), 1228–1238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.255>.
- Da Silva Peixoto, F., Cavalcante, I. N., & Gomes, D. F. (2020). Influence of Land Use and Sanitation Issues on Water Quality of an Urban Aquifer. *Water Resources Management*, 34(2), 653–674. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02467-6>.
- Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH, <http://siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>.
- Egbueri, J. C., Ayejoto, D. A., & Agbasi, J. C. (2022). Pollution assessment and estimation of the percentages of toxic elements to be removed to make polluted drinking water safe: a case from Nigeria. *Toxin Reviews*, 22(16), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15569543.2021.2025401>.
- Ferreira, A., Wermelinger, E. D., Janeiro-RJ, R. de, Arouca, S., & Oswaldo, F. (2013). Concentrações séricas de metais e suas implicações para a saúde pública Serum metal concentrations and its implications for public health. Undefined. <https://www.semanticscholar.org/paper/Concentra%C3%A7%C3%B5es-s%C3%A9ricas-de-metais-e-suas-implica%C3%A7%C3%B5es-Ferreira-Wermelinger/a8b98299c91c4748add02093e4904426884f1892>.
- FIRJAN, (2022). www.firjan.com.br. <https://www.firjan.com.br/ifdm/downloads/>.
- Freitas, C. M. de, Silva, D. R. X., Sena, A. R. M. de, Silva, E. L., Sales, L. B. F., Carvalho, M. L. de, Corvalán, C. (2014). Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. *Ciência & Saúde Coletiva*, 19(9), 3645–3656. <https://doi.org/10.1590/1413-81232014199.00732014>
- Gomes, M. A. F. (2011). Água: sem ela seremos o planeta Marte de amanhã. https://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/464.pdf.
- Gujarati, Damodar N., & Down C Porter, (2011). *Econometria básica*. 5a ed. New York: Mc Graw Hill. <https://doi.org/10.1126/science.1186874>.
- HIDROWEB. (2022). <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.
- IGAM, (2020). Relatório anual 2020. <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/487>.
- Jakuboski, A., Padilha, I., Santos, D., & Rauber, E. (2014). Poluição das águas: consequências para os seres humanos. <http://www.site.ajes.edu.br/jornada/arquivos/20140711203818.pdf>.
- Jin, B., Lin, Z., Liu, W., Xiao, Y., Meng, Y., Yao, X., & Zhang, T. (2021). Spatiotemporal variations of dissolved organic matter in a typical multi-source watershed in northern China: a fluorescent evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(14), 20517–20529. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17282-z>.
- Lima, A. C. de M., Fernandes, L. L., Lopes, D. F., Bittencourt, G. M., Vinagre, M. V. de A., & Silva, E. M. da. (2020). Urbanização e canais urbanos: avaliação da qualidade das águas da bacia hidrográfica do Una no Município de Belém, Brasil. *Research, Society and Development*, 9(7), e232973866. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3866>.
- Liyanage, C., & Yamada, K. (2017). Impact of Population Growth on the Water Quality of Natural Water Bodies. *Sustainability*, 9(8), 1405. <https://doi.org/10.3390/su9081405>.
- Malha Municipal | IBGE. (2022). <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>.
- Matos, A. R. De; Viegas, A. F.; Ramos, A. M.; Caldeira, M. I. F. C.; Almeida, R. A., & Pinto, D. B. F. (2020). Qualidade da água tratada dos municípios atingidos após o rompimento da barragem de Fundão. *Revista Vozes dos Vales. UFVJM – MG, Brasil, nº 17, Ano IX. 2020*. <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2020/06/Rafael.pdf>.
- Morales, J. J., Paes, N. D. S., Silva, A. C. M., & Teixeira, A. L. (2022). Fire and water: global fire impacts on physicochemical properties of freshwater ecosystems. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1233463/v1>.
- Oliveira, K. S. S. (2018). Influência das condições de vento e do aporte fluvial na dinâmica sedimentar do trecho centro-norte da plataforma continental do espírito santo (pces). Ufes. Aracruz. p.144. 2018. https://sappg.ufes.br/tese_drupal/tese_11916_Tese%20de%20Doutorado_Kyssyenne%20Oliveira%20FINAL.pdf.
- Ribeiro, E. V., Magalhães Junior, A. P., Horn, A. H., & Trindade, W. M. (2012). Metais pesados e qualidade da água do rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora - MG: índice de contaminação. *Geonomos - v.20, n.1 (2012)*. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v20i1.27>.
- Silva, A. E. P., Angelis, C. F., Machado, L. A. T., & Waichaman, A. V. (2008). Impacts of precipitation on the water quality of the Purus River. *Acta Amazonica*, 38(4), 733–742. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000400017>.