ELABORAÇÃO DE CARTAS-CONTROLE REFERENTES AOS DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA *IN SITU* DO RIO DOCE, SUDESTE DO BRASIL

Mateus Cruz Loss[(1)]
Graduado em Ciências Biológicas e Mestre em Biologia Animal pela Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil. Vinculado a Progen S.A. no cargo de Biólogo Jr I e alocado como prestador de serviços junto a Fundação Renova, no Programa 38 - Monitoramento da água da bacia do rio Doce, desde junho de 2021.
Talles Sette Moutinho[(1)]
Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade FUMEC - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
Henrique Rosa Filgueiras[(1)]
Graduado em Oceanografia pela Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Espírito Santo. Brasil.
Vinicius Nascimento Oliveira[(1)]
Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Espírito Santo. Brasil.
Brigida Gusso Maioli[(1)]
Graduada em Engenharia Ambiental e Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Espírito Santo, Brasil. Especialista em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Instituto Capixaba de Pesquisa em Contabilidade, Economia e Finanças, FUCAPE, Espírito Santo, Brasil.

Endereço[(1)]**:** Av. Getúlio Vargas, 671 - Funcionários - Belo Horizonte - Minas Gerais - CEP: 30112-020 - Brasil - Tel: 0800 301 2303 - e-mail: **mateus.loss.crtf@fundacaorenova.org.**

RESUMO

Este trabalho produziu cartas-controle dos parâmetros de qualidade de água aferidos *in situ* em 16 pontos amostrais estabelecidos no rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, Mariana, Minas Gerais, Brasil. Foram utilizados os dados de aferições mensais de pH, turbidez, condutividade, potencial redox, oxigênio dissolvido, oxigênio dissolvido saturado e salinidade, no período entre agosto de 2017 a novembro de 2022. A fim de testar o comportamento dos parâmetros frente a variações sazonais, um teste T foi conduzido comparando-se os dados do período seco e chuvoso para cada ponto e parâmetro. Quando o parâmetro apresentou diferenças sazonais, foi calculada uma carta-controle para cada período. Ao todo foram plotados 290 gráficos referentes a 180 cartas-controle, estas acartas apresentaram ou não aferições fora do limite. Cadeias de custódia foram consultadas a fim de se investigar a ocorrência de possíveis observações que justificassem a leitura dos parâmetros fora do limite. Outras fontes de variação foram apontadas como possíveis contribuintes para a variação dos parâmetros, como os tipos de solo predominantes na bacia, a geomorfologia do ambiente, a precipitação e a demografia. O material produzido poderá servir de subsídio para os agentes envolvidos no monitoramento do rio tomarem decisões ainda na etapa de coleta dos dados e, serve de base para avaliação do banco de dados que tem sido construído mensalmente desde agosto de 2017.

PALAVRAS-CHAVE: análise de dados, *quality control*, *quality assurance*, recursos hídricos, monitoramento hídrico.

INTRODUÇÃO

Após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão na cidade de Mariana - MG, foram liberados aproximadamente 39,2 milhões de m^3 de rejeitos no rio Doce. Através do córrego Santarém, seguindo pelo rio Gualaxo do Norte e do Carmo, o rejeito da barragem de Fundão atingiu o rio Doce e seguiu por uma extensão de 670 km, chegando até sua foz na vila de Regência, em Linhares - ES (SANCHÉZ et al., 2018).

De forma compensatória e reparatória a este desastre, foi elaborado um Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC), assinado em março de 2016. O acordo foi firmado entre órgãos da Federação, os governos dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, representantes dos municípios, e as empresas Samarco, Vale e BHP. O referido TTAC estabeleceu que o processo de reparação dos impactos na bacia do rio Doce seria feito pela Fundação Renova, organização de direito privado e sem fins lucrativos. Mais tarde, em

junho de 2018, os Ministérios Públicos e Defensorias de âmbito federal e dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, assinaram o Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) Governança. Este acordo previu, além de outras frentes, o estabelecimento de um Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos (PMQQS) a longo prazo, através de sua cláusula 177 (TTAC, 2016).

O PMQQS foi implementado a partir de 2017 e desde então conta com 82 pontos de monitoramento ativos que se distribuem entre o rio Doce e seus afluentes, região costeira e estuaria do Espírito Santo e, também, lagoas próximas a foz. Desde a implementação do PMQQS cerca de 120 parâmetros físico-químicos laboratoriais e *in situ* são avaliados, as amostragens e análises seguem em acordo com métodos específicos e validados por órgãos nacionais e internacionais, executados por meio de laboratórios com acreditação pelo Inmetro. Os dados gerados por este monitoramento podem ser acessados livremente através do portal Monitoramento Rio Doce - PMQQS em www.monitoramentoriodoce.org. No portal também podem ser consultados todos os documentos referentes à metodologias e alterações do Programa (FUNDAÇÃO, 2022).

Visto a grande extensão do monitoramento apresentado, a complexidade de procedimentos (FUNDAÇÃO, 2021) e, ainda, ao contexto social e ambiental envolvido no rompimento da barragem de Fundão, este estudo visou fornecer um material de apoio as equipes que executam o PMQQS mensalmente através da elaboração de cartas-controle dos parâmetros *in situ* aferidos pelas equipes de amostragem em suas coletas mensais.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi produzir cartas-controle dos parâmetros de qualidade de água aferidos *in situ*, referentes aos pontos de monitoramento hídrico estabelecidos no rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão.

METODOLOGIA UTILIZADA

Foram adotados os dados de qualidade de água obtidos através de coletas realizadas mensalmente entre o período de agosto de 2017 a novembro de 2022 em 16 pontos amostrais ao longo do rio Doce, distribuídos entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, conforme descrição contida através da Tabela 1 (FUNDAÇÃO, 2021).

Código do ponto	Localidade	Latitude	Longitude
RDO 01J	Rio Doce, Minas Gerais, Brasil	-20,25562	-42,91060
RDO 02J	Rio Doce, Minas Gerais, Brasil	-20,20025	-42,83206
RDO 03	São Domingos do Prata, Minas Gerais, Brasil	-20,01440	-42,74460
RDO 04	Bom Jesus do Galho, Minas Gerais, Brasil	-19,55420	-42,52140
RDO 05	Belo Oriente, Minas Gerais, Brasil	-19,32070	-42,36460
RDO 06	Periquito, Minas Gerais, Brasil	-19,09560	-42,15500
RDO 07	Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil	-18,97174	-42,08789
RDO 08	Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil	-18,88181	-41,95283
RDO 09	Tumiritinga, Minas Gerais, Brasil	-18,97319	-41,64200
RDO 09J	Conselheiro Pena, Minas Gerais, Brasil	-19,14920	-41,47640
RDO 10	Resplendor, Minas Gerais, Brasil	-19,32857	-41,25161
RDO 11	Baixo Guandu, Espírito Santo, Brasil	-19,50610	-41,01324
RDO 12	Colatina, Espírito Santo, Brasil	-19,50028	-40,75840
RDO 14	Colatina, Espírito Santo, Brasil	-19,51310	-40,55837
RDO 15	Linhares, Espírito Santo, Brasil	-19,41011	-40,05896
RDO 16	Linhares, Espírito Santo, Brasil	-19,64441	-39,91929

Tabela 1: Pontos amostrais do rio Doce utilizados no presente estudo (Fundação, 2021).

Para cada ponto amostral foram utilizados os dados de pH, turbidez, condutividade, potencial redox, oxigênio dissolvido, oxigênio dissolvido saturado e salinidade, todos aferidos *in situ* através de sondas multiparâmetros.

Os dados foram classificados quanto ao período hidrológico correspondente a bacia, sendo o período seco ocorrente entre abril a setembro e o período chuvoso sendo ocorrente entre outubro a março.

Os dados do período seco e chuvoso foram comparados levando em consideração cada parâmetro e ponto amostral através de um teste T de Student (com *p*-valor<0,05), a fim de checar diferenças sazonais. Para valores descritos como menores que o limite de quantificação dos equipamentos utilizados, foi adotado o próprio limite como dado válido. Quando existentes, as replicatas foram tratadas como medições individuais. A fim de melhor compreender a fonte de dados e os resultados obtidos após os cálculos, as cadeias de custódia, também referenciadas como fichas de campo, foram consultadas quando necessário.

As cartas-controle foram obtidas através da elaboração de gráficos do tipo X de Shewhart (FOLLADOR et al., 2012) e MR (SILVA; SOUZA, 2015) para cada parâmetro, discriminado por ponto amostral e período hidrológico, este último quando evidenciado pelo teste T. Todos os cálculos e plotagens foram realizados no Microsoft Excel (2016) e os dados foram obtidos através do portal Monitoramento Rio Doce - PMQQS (FUNDAÇÃO, 2022).

A escolha destes tipos de gráficos se deu em acordo ao que propuseram Oliveira et al. (2013) para o acompanhamento e controle de observações pontuais de parâmetros físico-químicos, onde foi calculada previamente a janela de amplitude móvel (com n=2), a média das observações e, o desvio padrão, obtido através da divisão da média das amplitudes móveis pela constante d2. Conforme Silva e Souza (2013), as constantes d2 (=1,128), D3 (=0) e D4 (=3,267) possuem valores tabelados e variam em função do número amostral utilizado para calcular a amplitude móvel, de acordo com o proposto por Montgomery (2009).

O gráfico X apresentou o comportamento das observações individuais e teve o limite superior calculado a partir da média das observações somado ao valor do desvio padrão multiplicado por três. O limite inferior foi calculado a partir da média das observações subtraída pelo valor do desvio padrão multiplicado por três, a linha média foi plotada com os valores da média simples das observações.

O gráfico MR apresentou o comportamento das amplitudes móveis e teve o seu limite superior calculado através da multiplicação da média das amplitudes por D4. O limite inferior foi calculado pela multiplicação da média das amplitudes por D3, a linha média foi plotada com os valores da média simples das amplitudes móveis.

RESULTADOS OBTIDOS

O teste T demonstrou que não há um padrão de sazonalidade bem definido no comportamento dos parâmetros, quando considerados todos os pontos. Dessa maneira, as cartas-controle foram construídas levando em consideração o período seco distinto do chuvoso para o pH em: RDO 07, RDO 08, RDO 09, RDO 10, RDO 11, RDO 12, RDO 14 e RDO 16; para a turbidez em todos os pontos; para a condutividade em: RDO 04, RDO 05, RDO 06 e RDO 09J; para o potencial redox em: RDO 02J; para o oxigênio dissolvido em todos os pontos exceto o RDO 02J; para o oxigênio dissolvido saturado em: RDO 06, RDO 07, RDO 08, RDO 09 e RDO 09J. Todos os parâmetros e seus respectivos pontos que não foram citados tiveram suas cartas-controle construídas sem a distinção de períodos hidrológicos. A salinidade foi aferida somente no RDO 16 e não apresentou sazonalidade. Os resultados detalhados do teste T são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Resultados do teste T que comparou os dados do período seco e chuvoso para cada parâmetro e ponto utilizados no presente estudo. Valores em negrito = resultado significativo (*p*-valor<0,05). OD = oxigênio dissolvido. OD% = oxigênio dissolvido saturado. *NA* = dados ausentes.

Código do ponto	pH	Turbidez	Condutividade	Potencial Redox	OD	OD%	Salinidade
RDO 01J	0,088	**0,002**	0,174	0,066	**0,001**	0,236	*NA*
RDO 02J	0,091	**0,000**	0,090	**0,003**	0,874	0,053	*NA*
RDO 03	0,429	**0,000**	0,063	0,868	**0,000**	0,105	*NA*
RDO 04	0,802	**0,000**	**0,039**	0,936	**0,000**	0,138	*NA*
RDO 05	0,543	**0,000**	**0,046**	0,537	**0,002**	0,771	*NA*
RDO 06	0,558	**0,000**	**0,007**	0,788	**0,000**	0,023	*NA*
RDO 07	**0,001**	**0,000**	0,121	0,247	**0,000**	**0,001**	*NA*
RDO 08	**0,016**	**0,000**	0,542	0,866	**0,000**	**0,001**	*NA*
RDO 09	**0,023**	**0,000**	0,151	0,092	**0,000**	**0,000**	*NA*
RDO 09J	0,081	**0,001**	**0,045**	0,221	**0,002**	**0,022**	*NA*
RDO 10	**0,012**	**0,000**	0,469	0,975	**0,001**	**0,050**	*NA*
RDO 11	**0,004**	**0,001**	0,371	0,806	**0,000**	0,073	*NA*
RDO 12	**0,008**	**0,000**	0,181	0,117	**0,000**	0,157	*NA*
RDO 14	**0,001**	**0,001**	0,427	0,461	**0,000**	0,760	*NA*
RDO 15	0,053	**0,000**	0,900	0,466	**0,000**	0,344	*NA*
RDO 16	**0,000**	**0,000**	0,469	0,068	**0,000**	0,095	0,531

Ao todo foram construídos 290 gráficos referentes a 145 cartas-controle que indicaram os parâmetros que estiveram ou não estiveram nos limites calculados, tanto para médias quanto para amplitudes. A Figura 1 apresenta uma carta-controle da turbidez no período chuvoso no ponto RDO 03 em que as observações estiveram nos limites calculados, a esquerda é possível observar o gráfico de média X e, a direita, o gráfico de amplitude MR. Já a Figura 2 apresenta uma carta-controle da turbidez no período chuvoso no ponto RDO 05, em que algumas das observações não estiveram nos limites calculados.

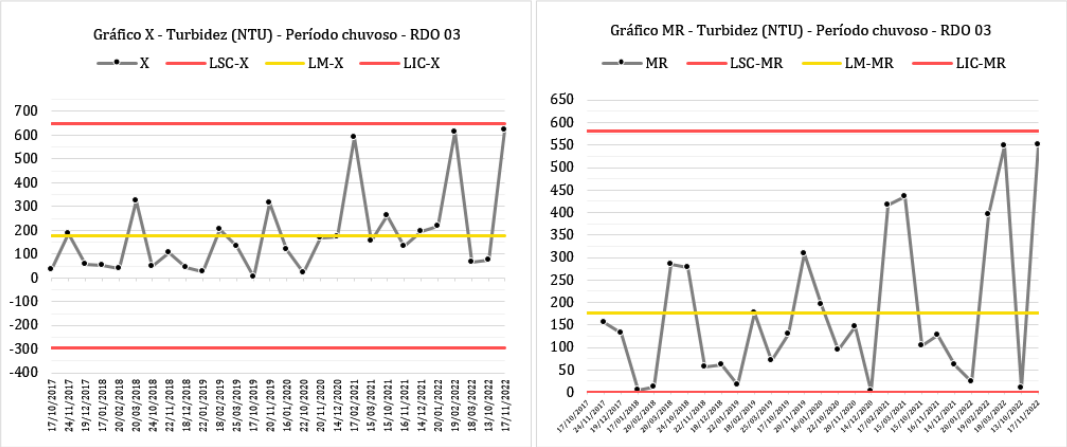

Figura 1: Carta-controle da turbidez no período chuvoso no ponto RDO 03. A esquerda: gráfico X, a direita: gráfico MR. X = média das observações, MR = média das amplitudes, LSC = limite inferior calculado, LM = linha média, LIC = limite inferior calculado.

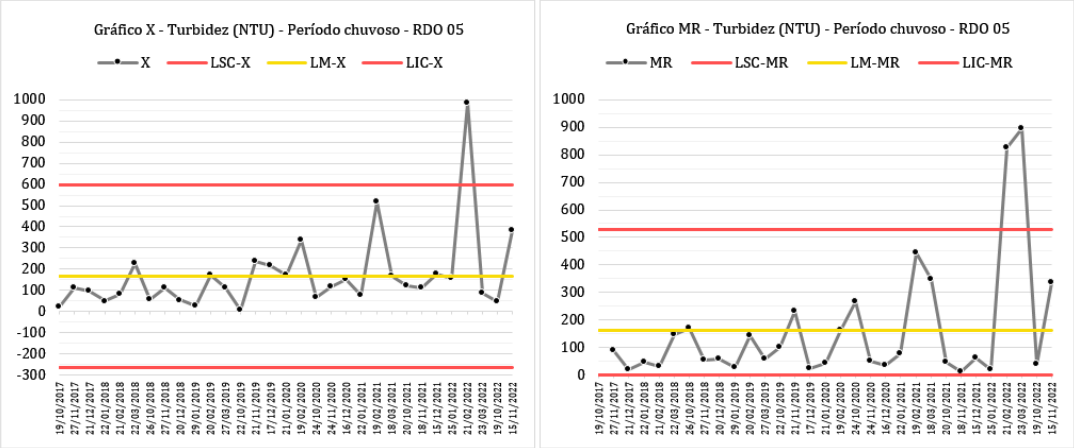

Figura 2. Carta-controle da turbidez no período chuvoso no ponto RDO 05. A esquerda: gráfico X, a direita: gráfico MR. X = média das observações, MR = média das amplitudes, LSC = limite inferior calculado, LM = linha média, LIC = limite inferior calculado.

No geral, pode-se observar que os desvios que ocorreram nos meses de setembro e abril estiveram relacionados a proximidade destes meses com o período chuvoso, outros desvios estiveram atrelados a períodos de "rio muito seco/cheio" ou a variações pontuais como "lançamento de efluente", conforme informado nas fichas de campo. Demais variações também puderam ser associadas a variações do ambiente.

Embora o teste T tenha evidenciado uma diferença significativa entre os períodos, em algumas cartas-controle resultantes essa diferença não foi claramente evidente. As figuras 3 e 4 trazem como exemplo as cartas-controle de pH calculadas para o ponto RDO 08, onde não é possível observar diferenças claras entre o comportamento do pH no período seco e chuvoso.

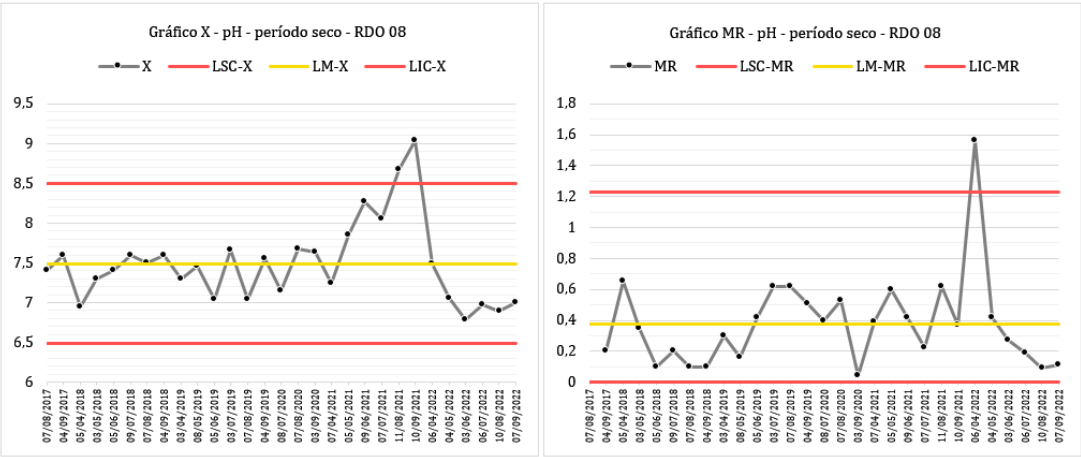

Figura 3: Carta-controle do pH no período seco no ponto RDO 08. A esquerda: gráfico X, a direita: gráfico MR. X = média das observações, MR = média das amplitudes, LSC = limite inferior calculado, LM = linha média, LIC = limite inferior calculado.

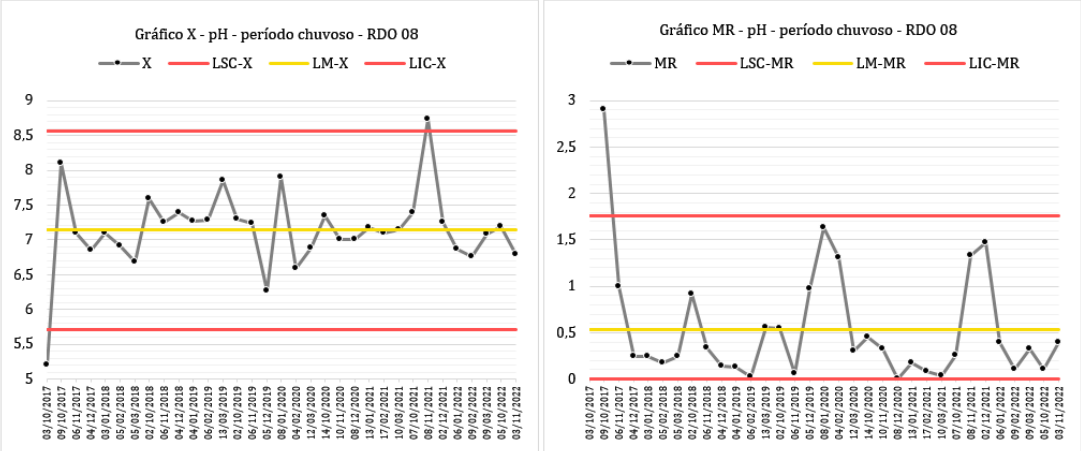

Figura 4. Carta-controle do pH no período chuvoso no ponto RDO 08. A esquerda: gráfico X, a direita: gráfico MR. X = média das observações, MR = média das amplitudes, LSC = limite inferior calculado, LM = linha média, LIC = limite inferior calculado.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O teste T demonstrou que há variação sazonal na média dos parâmetros e que esta variação se comporta de maneira distinta ao longo da calha do Doce. As cartas-controle foram construídas levando as especificidades dos pontos amostrais em consideração e, ainda, foi possível identificar as maiores fontes de possíveis justificativas para as observações terem extrapolado os limites calculados.

De fato, os diferentes comportamentos de cada parâmetro em cada ponto são esperados, uma vez que o rio Doce possui grande extensão, uma grande variedade de afluentes, ambientes, formações geológicas e usos da terra ao longo de seu curso (CORDEIRO et al., 2021). Nesse contexto, é importante enfatizar que as observações que ultrapassaram os limites calculados por vezes representam um comportamento do ambiente, não significando diretamente um erro de leitura ou a possibilidade de proposição de relação direta com uma má qualidade da água no ponto de amostragem.

Tratando sobre as variações, os resultados das cartas-controle dos parâmetros avaliados em períodos distintos demonstraram que o período chuvoso pode influenciar os valores dos parâmetros aferidos no período seco. Isso já é esperado pois a mudança nos valores e períodos hidrológicos segue um gradiente de variação (JARDIM; MOURA, 2018) e, recomenda-se fortemente que a interpretação dos resultados seja realizada primordialmente a partir desta premissa.

Conforme exposto, a precipitação demonstrou ser um forte influenciador na variação de alguns dos parâmetros investigados na bacia do Doce. Entretanto, outros fatores como o tipo e uso do solo podem ser associados a estas variações e estão ou não atrelados a precipitação. Conforme exposto no PIRH Doce (Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce; ECOPLAN-LUME, 2010), o tipo de solo predominante na bacia (cambissolo e argissolo), a geomorfologia variante ao longo da bacia e a precipitação conferem ao Doce uma susceptibilidade erosiva forte. Sendo assim, a bacia possui uma propensão natural a erosão com grande disponibilidade de materiais friáveis, erodíveis e, a depender do tipo de solo, boa quantidade e variedade de compostos minerais.

De forma pretérita aos efeitos do rompimento da barragem de Fundão, ainda é necessário pontuar que a bacia sofre variações sazonais, demográficas e espaciais ligadas ao lançamento de esgoto e rejeitos de ETA's (Estação de Tratamento de Esgoto). Dos 229 municípios reconhecidos para a bacia do Doce, 191 ou 90% ainda possuem algum tipo de lançamento de esgoto bruto em rios e córregos da bacia e, quando considerado apenas os rejeitos de ETA's (partículas de solo, material orgânico, subprodutos químicos e água), esse número chega a 100% (ECOPLAN-LUME, 2010).

Embora os resultados do teste T tenham evidenciado diferenças entre períodos hidrológicos, após a plotagem e comparação das cartas entre o período seco e chuvoso de cada parâmetro foi observado que, em alguns casos, a distinção das análises de um parâmetro em cada período não exerceu influência sobre o resultado. Dessa forma, os resultados demonstraram que, de fato, cada parâmetro em cada ponto amostral deve ser investigado individualmente, levando em consideração todo o contexto envolvido no ambiente.

CONCLUSÕES

A construção das cartas-controle permitiu a elaboração de um material científico que até o momento não havia sido proposto e que poderá ser utilizado pelos membros envolvidos no monitoramento da bacia do rio Doce ainda na etapa de coleta dos dados. Este é um material construído exclusivamente com dados já coletados nos atuais pontos de amostragem utilizados e, assim, se apresenta como altamente específico para este monitoramento. Espera-se que em etapas futuras, outros parâmetros físico-químicos e pontos amostrais da bacia hidrográfica do rio Doce possam ter suas cartas-controle construídas a partir das observações pontuadas aqui.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CORDEIRO, J.; ARANHA, P. R. A.; COSTA, R. D.; MOURA, P. M.; BAPTISTA, M. B. Lineament patterns and their realationship with fluvial morphology of Doce river (MG) and its afluents. Revista Geociências, v.40, n.1, p.71-82, 2021.
2. ECOPLAN-LUME. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010. 456 p. Disponível em: http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2016/Plano_Integrado_de_Recursos_Hidricos_da_Bacia_do_Rio_Doce.pdf. Acesso em: 02 abr. 2023.
3. FOLLADOR, F. A. C.; VILAS BOAS, M. A.; MALMANN, L.; SCHOENHALS, M.; VILLWOK, R. Controle de qualidade da água medido através de cartas de controle de Schewart, CuSum e MMEP. Engenharia Ambiental, v.9, n.3, p.183-197, 2022.
4. FUNDAÇÃO, R. Monitoramento rio Doce - PMQQS. Disponível em: <https://monitoramentoriodoce.org/>. Acesso em 02 de nov. 2022.
5. FUNDAÇÃO, R. Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimentos - PMQQS. 2021. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp content/uploads/2021/12/pmqqs_revisaobianual_revnt78_maio21.pdf>. Acesso em: 05 de nov. 2022.
6. JARDIM, C. H.; MOURA, F. P. Variações dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais - Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido. Revista Brasileira de Climatologia, v.14, p.173-189, 2018.
7. MICROSOFT EXCEL. Versão MSO 16.0.4266.1001. Microsoft Corporation, 2016.
8. MONTGOMERY, D. C. Introduction to Statistical Quality Control. 6 ed. United State of America: John Wiley & Sons Inc., 2009.
9. OLIVEIRA, C. C.; GRANATO, D.; CARUSO, M. S. F.; SAKUMA, A. M. Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio. 1ª ed. São Paulo: Secretaria da Saúde, 2013.
10. SÁNCHEZ, L. E.; ALGER, K.; ALONSO, L.; BARBOSA, F. A. R.; BRITO, M. C. W.; LAUREANO, F. V.; MAY, P.; ROESER, H.; KAKABADSE, Y. 2018. Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão. O caminho para uma mitigação sustentável e resiliente. Relatório Temático no1 do Painel do Rio Doce. Gland, Suíça: UICN.
11. SILVA, R. H. T.; SOUZA, S. M. R. Utilização de gráficos de controle de medidas individuais para análise da manutenção de extintores com carga de água. Revista de Tecnologia Aplicada, v.4, n.1, p.24-40, 2015.
12. TTAC. Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2016/07/ttac-final-assinado-para-encaminhamento-e-uso-geral.pdf>. Acesso em: 27 de dez. 2022.