



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA



GIOVANA REZENDE DOS SANTOS

**Impacto em corpo d'água pelo desaguamento de lodo de potabilização por uma Estação
de Tratamento de Lodo de médio porte localizada no Estado de São Paulo**

Limeira
2021



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**



GIOVANA REZENDE DOS SANTOS

Impacto em corpo d'água pelo desaguamento de lodo de potabilização por uma Estação de Tratamento de Lodo de médio porte localizada no Estado de São Paulo

Monografia apresentada como parte das exigências da disciplina EB910-U Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental, junto à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Enelton Fagnani

Limeira
2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Luiz Felipe Galeffi - CRB 8/10385

Santos, Giovana Rezende dos, 1998-
Sa59i Impacto em corpo d'água pelo desaguamento de lodo de potabilização por uma estação de tratamento de lodo de médio porte localizada no Estado de São Paulo / Giovana Rezende dos Santos. – Limeira, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Enelton Fagnani.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Lodo. 2. Estações de tratamento de água. 3. Lodo residual. I. Fagnani, Enelton, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Palavras-chave em inglês:

Mud

Drinking water treatment units

Sewage sludge

Titulação: Bacharel

Banca examinadora:

Enelton Fagnani [Orientador]

Diego Samuel Rodrigues

Felippe Benavente Canteras

Data de entrega do trabalho definitivo: 16-12-2021

Resumo

Este trabalho consiste em uma avaliação estatística dos dados de monitoramento e processo de uma Estação de Tratamento de Lodo (ETL) que realiza o adensamento dos resíduos da lavagem de filtros e decantadores de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) através de células de clarificação e posterior desaguamento e secagem em geobags.

A ETL não realiza a reciclagem do lodo seco, sendo este enviado diretamente para aterro sanitário controlado, da mesma forma que não recicla o geobag cheio, sendo este rasgado e disposto juntamente com o lodo seco. E ainda, a água de clarificação das células e do desaguamento dos bags é enviada ao corpo d'água receptor próximo a unidade. Sendo está água clarificada o objeto de estudo deste trabalho. Constatou-se aqui, através de ensaios estatísticos de teste de significância (t de Student de dados pareados) e de análise multivariada (componentes principais, PCA) que enquanto alguns parâmetros de monitoramento têm seus valores elevados a jusante do descarte da ETL (Alumínio Dissolvido, Manganês Total e Oxigênio Dissolvido), outros são diluídos pelo clarificado (Ferro Dissolvido, Cor Verdadeira e Turbidez) e apresentam uma tendência de diminuição a medida que recebem o efluente.

Constatou-se que, apesar da forte influência do pH da saída da ETL nas águas a jusante da unidade, esta não desobedece aos valores mínimos estabelecidos na legislação e, portanto, não se pode afirmar perdas significativas ao corpo d'água. Ainda o mesmo comportamento foi observado através do teste para o parâmetro manganês total. Entretanto este apresenta picos de não conformidade com a legislação tanto na saída da estação quanto a jusante do descarte. As demais variáveis foram analisadas quanto as suas diferenças e constatados padrões individuais e inerentes a cada uma delas.

Abstract

The present work statistically evaluates monitoring and processing data from a Water Treatment Sludge Plant (WTSP), which receives filters washing and settlers washing waters from a Water Treatment Plant (WTP). These effluents are thickened in clarification units and the resulting sludge is posteriorly dewatered and dried in geobags.

WTSP is not responsible for recycling dried sludge, which is directly sent to controlled landfills, as well as torn geobags. Moreover, water from clarification units and sludge dewatering process is discharged into the water body close to the plant. This work, after statistical significance tests (Student *t* test for paired data) and multivariate analysis (principal component analysis, PCA), was able to verify that some physicochemical parameters as dissolved aluminum, total manganese, and dissolved oxygen have had increased values downstream the WTSP. On the other hand, parameters as dissolved iron, true color and turbidity have had decreased values as a result of WTSP's discharging.

For exemplifying the statistical calculations, pH was detailed presented. Regarding pH, it was found that downstream values do not violate the legislation or bring significantly quality loss for the water body, even after proven influence from WTSP's discharges. The same pattern was observed for total manganese average data; however, it was not rare the occurrence of outliers that overcome maximum limits preconized by legislation, as at WTSP discharge site as at downstream sampling site. All the other parameters were assessed regarding and the comparison with the legislation, as always as possible, is presented.

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Características gerais do lodo de ETA | 13 |
| Tabela 2. Possíveis resíduos gerados no processo de tratamento de água. | 14 |
| Tabela 3. Técnicas mecanizadas de desaguamento de lodo | 17 |
| Tabela 4. Custos associados a ETL..... | 23 |
| Tabela 5. Legislações aplicáveis ao lançamento da ETL..... | 25 |
| Tabela 6. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável pH, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021 | 26 |
| Tabela 7. Descrição dos testes <i>t</i> de dados pareados, na avaliação do impacto da ETL no manancial com relação à variável pH. | 28 |
| Tabela 8. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável pH (n = 16, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05). | 28 |
| Tabela 9. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável manganês total, medida no período compreendido entre junho de 2020 e outubro de 2021..... | 32 |
| Tabela 10. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável manganês total (n = 21, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05). | 33 |
| Tabela 11. Dados brutos coletados à montante (M), na saída (S), e à jusante (J) da ETL no período entre junho/2020 e outubro/2021..... | 34 |
| Tabela 12. Datas de coleta das respectivas amostras | 37 |
| Tabela 13. Pluviometria e sua relação com o ferro no solo | 41 |
| Tabela 14. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável cloro livre, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021 | 52 |
| Tabela 15. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável cloro livre (n = 14, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05). | 52 |
| Tabela 16. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável cloro total, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021 | 53 |
| Tabela 17. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável cloro total (n = 21, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 53 |
| Tabela 18. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável turbidez, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021 | 54 |
| Tabela 19. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável turbidez (n = 16, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05). | 54 |
| Tabela 20. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável condutividade elétrica, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Tabela 21. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável condutividade elétrica (n = 15, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 55 |
| Tabela 22. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável oxigênio dissolvido, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 56 |
| Tabela 23. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável oxigênio dissolvido (n = 15, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 56 |
| Tabela 24. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável cor verdadeira, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 57 |
| Tabela 25. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável cor verdadeira (n = 16, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 57 |
| Tabela 26. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável alumínio dissolvido, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 58 |
| Tabela 27. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável alumínio dissolvido (n = 16, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 58 |
| Tabela 28. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável ferro dissolvido, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 59 |
| Tabela 29. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável ferro dissolvido (n = 16, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 59 |
| Tabela 30. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável flúor, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 60 |
| Tabela 31. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável flúor (n = 15, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 60 |
| Tabela 32. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável <i>Escherichia coli</i> , medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021..... | 61 |
| Tabela 33. Resultados obtidos nos testes <i>t</i> de dados pareados com relação à variável <i>Escherichia coli</i> (n = 15, IC = 95%, <i>P</i> = 0,05)..... | 61 |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução..... | 8 |
| 2 | Objetivo Geral..... | 10 |
| 2.1 | Objetivos Específicos..... | 10 |
| 3 | Revisão bibliográfica..... | 10 |
| 3.1 | Contextualização..... | 10 |
| 3.2 | Disposição ambientalmente adequada..... | 10 |
| 3.3 | Os resíduos gerados nas ETA..... | 11 |
| 3.4 | Características gerais do lodo de ETA..... | 12 |
| 3.4.1 | Características físicas do lodo de ETA..... | 13 |
| 3.5 | Condicionamento químico do lodo..... | 14 |
| 3.6 | Desaguamento..... | 15 |
| 3.6.1 | Métodos naturais..... | 15 |
| 3.6.2 | Métodos mecanizados..... | 16 |
| 3.7 | Adensamento e desidratação de lodos..... | 18 |
| 3.8 | Aproveitamento de lodo de ETA..... | 18 |
| 3.9.2 | Recuperação do lodo seco como coagulante..... | 19 |
| 4 | Metodologia..... | 20 |
| 4.1 | Local de estudo..... | 20 |
| 4.2 | Coleta de Dados..... | 22 |
| 4.2.1 | Natureza do geobag..... | 22 |
| 4.2.2 | Custos associados ao geobag..... | 23 |
| 4.3 | Teste t de dados pareados..... | 23 |
| 4.4 | Teste ACP - Análise de componentes principais..... | 24 |
| 4.5 | Legislações aplicáveis..... | 24 |
| 5 | Resultados e discussões..... | 25 |
| 5.1 | Teste t de dados pareados..... | 25 |
| 5.1.1 | Teste t para a variável pH..... | 26 |
| 5.1.2 | Teste t para a variável Cloro livre..... | 29 |
| 5.1.3 | Teste t para a variável Cloro Total..... | 29 |
| 5.1.4 | Teste t para a variável Turbidez..... | 30 |
| 5.1.5 | Teste t para a variável condutividade elétrica..... | 30 |
| 5.1.6 | Teste t para a variável Oxigênio Dissolvido..... | 30 |
| 5.1.7 | Teste t para a variável cor verdadeira..... | 30 |
| 5.1.8 | Teste t para a variável Alumínio Dissolvido..... | 31 |
| 5.1.9 | Teste t para a variável Ferro Dissolvido..... | 31 |
| 5.1.10 | Teste t para a variável Flúor..... | 31 |
| 5.1.11 | Teste t para a variável Manganês Total..... | 32 |
| 5.1.12 | Teste t para a variável Escherichia coli..... | 33 |
| 5.2 | Análise das componentes principais – PCA..... | 33 |
| 5.3 | Reutilização do clarificado..... | 42 |
| 6 | Conclusão..... | 43 |
| 7 | Referências..... | 44 |
| 8 | Apêndice..... | 52 |

1 Introdução

Quando falamos em resíduos de estações de tratamento de água (ETA) convencionais, temos um cenário de geração de lodo inevitável e que em escala global, atinge a marca de cerca de 10.000 toneladas de resíduos diariamente. Os resíduos sólidos gerados pelas atividades de saneamento são em sua maioria, tratados de forma irregular sendo geralmente dispostos sem qualquer tratamento em corpos d'água próximos as estações. Sendo assim é fato que a disposição correta deve ser estudada e incentivada, seja por reutilização ou disposição em aterro. (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2017)

Um estudo conduzido por Achon e Cordeiro (2015) analisou 22 ETA de uma das sub-bacias do estado de São Paulo. Constatou-se que 86% realizam o lançamento do lodo sem tratamento nos corpos d'água, 9% fazem a destinação para uma Unidade de Tratamento de resíduos (UTR) e 5%, encaminha o lodo para uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), ou seja, nenhuma das unidades tratam o lodo gerado como um resíduo sólido conforme estabelecido na PNRS – Lei 12.305/2010, que prevê o esgotamento das possibilidades de reutilização desses resíduos antes de ser disposto como um rejeito.

Apesar da necessidade de estudos individuais inerentes a ETA que está gerando, algumas alternativas de reutilização existentes para esses resíduos, e que possuem maiores perspectivas são, a reutilização das suas propriedades coagulantes em sistemas de tratamento águas residuárias, a incorporação destes em materiais de construção civil, a utilização como ferramenta de remediação de solos com deficiência de metais, entre outras. (TURNER; WHEELER; STONE; OLIVER, 2019)

O cenário de disposição destes resíduos levanta certa preocupação, de acordo com o IBGE (2017) no Brasil temos, em média, um reaproveitamento de apenas na 7% dos lodos que são gerados nas ETA, percentual que está distribuído em reaproveitamento em ETE, Agricultura e Construção Civil, o restante é todo encaminhado para corpos d'água, lixões e aterros.

Quando se tem o lançamento desses resíduos nos corpos d'água por parte das unidades de tratamento, o que acontece é uma degradação destes mananciais e seu ecossistema aquático (SOARES; SILVA; ARAÚJO, 2018). Essa prática, principalmente em épocas de estiagem, que é quando a vazão dos mananciais diminui, causa uma queda na qualidade dos corpos hídricos que afetam a captação dos municípios a jusante (ACHON E CORDEIRO, 2015).

Em suma, entender as características e as respectivas alternativas de tratamento aplicáveis a esses resíduos sólidos é imprescindível para uma boa gestão, visando diminuir impactos ambientais e melhorar a qualidade dos mananciais, em especial aqueles próximos às ETA que são os mais afetados pelo mau gerenciamento.

Este estudo de caso apresenta os dados relativos a uma unidade que realiza o desaguamento e secagem dos resíduos gerados em uma ETA através de sistemas de geobags. Esses resíduos

somam um volume anual bastante expressivo de aproximadamente 690.000 m³ de água de serviço da ETA.

Os anos que antecederam a instalação da Estação de Tratamento do Lodo (ETL) faziam o manejo da água de lavagem de filtros e decantadores sem qualquer tratamento, de forma que esses resíduos eram lançados em um córrego próximo à unidade.

Essa destinação tinha impactos associados, especialmente na questão dos sólidos, já que desde o funcionamento do sistema de geobags foram enviados ao aterro 2722 toneladas de sólidos que seriam encaminhados ao corpo d'água.

Outro ponto é com relação ao desenquadramento do corpo d'água classe 2, definido no Art. 15 do Conama 357 (CONAMA, 2005) alguns parâmetros como Alumínio Dissolvido e Ferro Dissolvido deixavam de ser atendidos, principalmente na lavagem do decantador

Nos dias atuais, são monitorados alguns parâmetros do corpo d'água que recebe a água clarificada da ETL. A fim de entender a correlação de variação dos dados foi utilizado a análise de componentes principais (PCA) com o objetivo de reduzir a dimensionalidade das variáveis e representá-las geometricamente em um gráfico. Com essa ferramenta entende-se a distância existente entre os dados relativos às variáveis de forma que é possível realizar a sua representação linearmente e definir a sua posição em um plano de duas dimensões, (CAZAR, 2003) sendo um valor com tendência de aumentar ou diminuir na comparação das coletas a montante e a jusante do manancial.

A análise de componentes principais (PCA) é uma ferramenta estatística que permite relacionar conjuntos de dados que possuem diferentes variáveis, e que por sua vez possuem diferentes unidades de medida. Nessa relação é possível diminuir a dimensionalidade que existe entre essas variáveis e então tomar conhecimento de como elas se comportam no contexto de todo o conjunto, se possuem um padrão de comportamento e como podem ser priorizadas. (AZEVEDO et al., 2021).

O teste t pareado foi empregado na comparação dos conjuntos de dados existentes (monitorados pela estação em questão) para três pontos de coleta do córrego que recebe o despejo clarificado da estação, a fim de comparar os valores amostra por amostra (pareado) e assim comprovar se esses conjuntos diferem ou não do ponto de vista estatístico (MILLER; MILLER, 2005). A forte relação entre a saída da água clarificada e a jusante do corpo d'água receptor foi apontada pelo teste a partir dos dados de pH para estes dois pontos.

2 Objetivo Geral

Verificar os potenciais impactos ambientais dos processos de uma Estação de Tratamento do Lodo (ETL), e então sugerir medidas de melhoria em seu processo.

2.1 Objetivo Específico

Realizar o tratamento estatístico de dados da ETL a fim de verificar a eficiência do desaguamento do lodo e o impacto no manancial causada pelo descarte da água clarificada próxima a estação.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Contextualização

Segundo o estabelecido pela norma ABNT NBR 10004:2004, confirmada em 2018 os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água se enquadram dentro da definição de resíduos sólidos, e, portanto, podem ser caracterizado e classificado dentro de suas classes.

Ensaio realizados com o lodo de ETA demonstram que segundo a Norma Técnica NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a) este resíduo se enquadra como Classe II A, o que significa ser um resíduo não perigoso, não inerte, mas que pode ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. (GUERRA E ANGELIS, 2005). Entretanto alguns autores apresentam que a classificação do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) segundo a sua concentração de sólidos é muito mais assertiva já que diferentes tecnologias de decantação geram LETA com características particulares e que não se enquadrariam como resíduo sólido. (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012) *apud*(JÚNIOR et al., 2021)

As classificações de LETA podem servir como base para que estes resíduos sejam condicionados, adensados e desaguados de acordo com suas características de enquadramento de sua classe, para que então possam ser utilizados em algum processo onde tenham seus recursos viavelmente aproveitados, ou sejam dispostos de maneira ambientalmente adequada. Da mesma forma, auxiliam na escolha dos melhores métodos e técnicas de disposição e que sejam viáveis em termos geográficos, de mão de obra e de custo. (JÚNIOR et al., 2021)

3.2 Disposição ambientalmente adequada

É fato que em grande parte dos casos os resíduos gerados em ETA têm seu destino final realizado de forma incorreta, maneira esta que pode contaminar solos, já que 27% dos municípios da região Nordeste e 16% da região Centro-Oeste realiza a disposição final dos resíduos de ETA em

terrenos baldios, lixões ou aterros controlados, ambos acima do encontrado na região Sul (5%), Sudeste (6%) e Norte (9%) mas que ainda podem ser passivos ambientais desses locais. Ainda dentro do cenário Brasileiro, essas porcentagens pioram quando tratamos de contaminação de corpos d'água, já que cerca de 60% dos municípios realizam o descarte dos resíduos gerados em suas ETA nos mananciais próximos as unidades de tratamento. (IBGE, 2017)

Segundo Motta et. al. (2019) o Rio Capibaribe recebe uma carga de lodo diária de aproximadamente 50 mil kg/m³, proveniente de sistemas de tratamento compactos e convencionais.

Esse é um exemplo do cenário da região norte e nordeste do Brasil, neste caso no estado de Pernambuco, no que diz respeito à disposição final dos resíduos das ETA é constatado que 75% realizam o descarte do lodo nos corpos hídricos e 22% no solo sem que seja feito nenhum tipo de tratamento de minimização de impacto. Ainda que 9% desses geradores tratem o lodo de forma a desaguar e diminuir a sua umidade, estes ainda fazem o descarte do resíduo já seco, no solo. (MOTTA, 2019)

3.3 Os resíduos gerados nas ETA

De uma forma geral, para promover a clarificação de uma água bruta captada, as ETA se utilizam do método convencional de coagulação-floculação da água para remover partículas finas em suspensão; para isso é utilizado o coagulante. Este promove uma desestabilização de partículas de modo que elas sejam capazes de se agrupar formando flocos grandes o suficiente para serem removidos por processos físicos de sedimentação, que promoverão a clarificação das águas. (MARASCHIN; FERRARI; CARISSIMI, 2020)

Em seguida, a água decantada clarificada é enviada para a etapa de filtração, onde são removidos os sólidos que restaram da etapa anterior, para então ser submetida às etapas de desinfecção e fluoretação. Sendo assim, esses processos de clarificação que ocorrem nos decantadores e filtros, são os responsáveis pelos resíduos gerados em uma ETA, e representam cerca de 1% a 3% do volume de água total captado pela unidade de tratamento. (TURNER; WHEELER; STONE; OLIVER, 2019) *apud* (REN; ZHAO; JI; WEI; SHEN, 2020)

A concentração de sólidos presente nesses resíduos tem influência direta com o tipo de tratamento que se utiliza na ETA segundo o mecanismo de clarificação que é utilizado no processo, neste caso em ordem crescente de quantidade de sólidos totais por mg/L de lodo tem-se os mecanismos: clarificador em manto de lodos, decantador de alta taxa e decantador convencional e flotador. Entretanto vale ressaltar que outros fatores de características da água bruta e época de estiagem também interferem neste parâmetro e, portanto no condicionamento e desidratação do LETA. (PAFFRATH; ETCHEPARE, 2021)

A redução do volume é um fator importante quando discutimos LETA, já que os custos de transporte e disposição são diretamente proporcionais a sua quantidade, e o espaço disponível de solo para construção de aterros sanitários que receba esses resíduos, é um recurso cada vez mais valioso. (WANG; WEI; LIU; BAI; JIANG; YUAN, 2021)

3.4 Características gerais do lodo de ETA

Em um estudo realizado por Mattos & Girard (2013) na ETA-Bolonha em Belém-Pará, uma Estação de grande porte que era capaz de tratar na época em média 4 m³ de água a cada segundo caracterizou o resíduo produzido nos processos de lavagem dos filtros e decantadores.

A caracterização se dividiu em duas partes, na primeira delas, o objetivo foi quantificar o volume de resíduos produzidos mensalmente pela ETA, com base na operação quantidade de lavagens de filtros diárias e decantadores mensal, e a partir da medição do nível do canal de descarga chegou-se ao valor de 195.056 m³ de água de serviço por mês requisitados pela estação, o que equivale a 1,87% da água bruta captada no manancial lago Bolonha.

Foi verificado um percentual discrepante entre as duas unidades geradores de resíduos (filtro e decantador) em termos de volume de água de serviço, já que 90% deste total equivalem as lavagens de filtros e somente 10% dos decantadores, o que é esperado e comum, uma vez que estes requerem uma operação de lavagem mais espaçada no tempo. Em contraponto o resíduo sólido gerado (massa seca) é maior em quantidade pelos decantadores, cerca de 84% do volume total, pois possuem uma concentração de sólidos suspensos totais cerca de 16 vezes maior que dos filtros.

Ainda neste estudo Mattos & Girard (2013) analisaram, através de amostras da água de lavagem dos filtros e decantadores, compostas no tempo, alguns parâmetros que resultaram entre outras conclusões valores de concentração média de 195 mg/L de sólidos totais, 108 mg/L de sólidos suspensos totais, pH médio entre 5 e 8 e alcalinidade total entre 10 e 15 mg CaCO₃/L para as coletas de filtros. E da mesma forma para os decantadores foi obtido resultados de concentração média de 3.278 mg/L de sólidos totais, 1814 mg/L de sólidos suspensos totais, pH médio entre 5 e 8 e alcalinidade total de 40 mg CaCO₃/L.

Os resíduos de ETA apresentam dois estados básicos, a fase sólida e a fase líquida, partindo deste princípio e lembrando que a maior parte está em seu estado líquido essa pode ser dividida em: (SMOLLEN, 1994)

- Fração de água livre: água não associada aos sólidos e que, portanto, pode ser clarificada por sedimentação simples.
- Fração de água intersticial: parcela da água que está dentro dos sólidos ou fortemente associada a estes, é liberada mediante técnicas de agitação forte em que os flocos se quebram.

- Fração de água vicinal: é a fração que está associada ao sólido devido sua característica molecular, são as pontes de hidrogênio.

- Fração de água de hidratação: é a água que se encontra ligada ao sólido quimicamente, a sua liberação ocorre apenas quando se tem uma quebra termoquímica desta partícula.

De maneira geral os lodos gerados em estações de tratamento de água tem seus parâmetros de caracterização modificados de acordo com a sazonalidade, isso porque períodos de estiagem tendem a influenciar na qualidade do manancial de captação, e por consequência os produtos químicos requeridos para tratar aquela água.

Existem diversos parâmetros que caracterizam os resíduos de uma estação de tratamento de água e que foram estudados em diferentes anos, os mais relevantes e que potencialmente podem impactar em um dimensionamento de uma ETL são encontrados na Tabela 1. Caracterizar os resíduos gerados na estação é crucial para estudar as melhores formas de tratar, desaguar e reutilizar ou dispor esse lodo.

Tabela 1. Características gerais do lodo de ETA

| DQO (mg/L) | pH | ST (mg/L) | SV (%ST) | SS (%ST) | Referência |
|-------------------|---------------|------------------|-----------------|-----------------|---|
| - | - | 14.900 a 60.794 | - | - | Castro et al. (1997) apud Cordeiro (2001) |
| 140 a 5.450 | 7,2 a 8,93 | 1.620 a 58.630 | 52% a 73% | 27% a 48% | Cordeiro (2001) |
| - | Média de 5,85 | 61.470 | - | - | Sampaio et al. (2021) |
| - | Média de 7,00 | 15.685 a 16.920 | - | - | Oliveira et al. (2012) apud Sampaio et al. (2021) |
| | 6,6 a 7,0 | 98.397 a 28.263 | 29% a 69% | 31% a 71% | Fontana et. al. (2021) |

Fonte: Adaptado dos autores

3.4.1 Características físicas do lodo de ETA

De maneira geral as propriedades físicas dos resíduos de ETA dependem de dois fatores principais, o manancial de captação (a água bruta) e o seu respectivo tipo de tratamento. Essas

interações entre água bruta, produto químico utilizado no processo e resíduos gerados podem ser encontradas na Tabela 2.

Tabela 2. Possíveis resíduos gerados no processo de tratamento de água.

| Produto | Proveniência | Aparece no resíduo como | Sólido |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|------------------------|
| Sólidos dissolvidos | Água bruta | Sólidos dissolvidos | Somente se precipitado |
| Sólidos suspensos (argila, silte) | Água bruta | Argila e silte | Sim |
| Matéria orgânica | Água bruta | Geralmente sem mudança | Sim |
| Sais de alumínio | Coagulação | Hidróxido de alumínio | Sim |
| Sais de ferro | Coagulação | Hidróxido de ferro | Sim |
| Polímeros | Tratamento químico | Sem mudança | Sim |
| Cal | Tratamento químico e correção de pH | Carbonato de cálcio ou impurezas se for usada solução de cal | Sim |
| Carvão ativado em pó | Controle de gosto e odor | Carvão ativado em pó | Sim |
| Cloro, ozônio | Desinfecção | Em solução | Não |

Fonte: Freitas (2004) *apud* Ribeiro (2007)

3.5 Condicionamento químico do lodo

A disposição do lodo de ETA tem sua eficiência em termos ambientais e econômicos diretamente relacionados com a porcentagem de massa seca deste resíduo, ou seja, quanto mais eficiente for o processo de desaguamento mais fácil e barato é realizar o manejo ambientalmente adequado.

Para facilitar esse desaguamento em grande parte dos casos é necessário que o lodo passe pelo processo de condicionamento para que ocorra uma desestabilização dos íons de ferro e alumínio que são constituintes dos coagulantes aplicados na etapa inicial do tratamento das ETA. (MARASCHIN et al., 2020)

São quatro os principais métodos de condicionamento mencionados por Scalioni, Urashima e Guimarães (2020) sendo eles o congelamento, o tratamento térmico, a aplicação de auxiliares físicos de filtração e a aplicação de produtos químicos, sendo o último o mais comum. Tanto para o adensamento quanto para a desidratação do lodo, este deve passar primeiramente pela etapa de condicionamento.

O método de congelamento e descongelamento do lodo, utilizando energia térmica consiste em realizar a conversão da fração de água intersticial e vicinal que está no lodo em uma fração de água livre que poderá ser facilmente removida por meio de adensamento físico ou mecânico, isso acontece porque após congelada a partícula que foi cristalizada não volta ao estado dissolvido, sendo portanto uma partícula maior e mais pesada e que irá ter uma alta velocidade de sedimentação, o resultado é uma torta de lodo separada de um sobrenadante clarificado. (BARROSO, 2007)

Quando se trata de condicionamento químico do lodo existem dois principais mecanismos, os polieletrólitos orgânicos sintéticos os chamados polímeros, que por sua vez podem ser catiônicos, aniônicos ou não iônicos e os inorgânicos que são os tratamentos com cal e sais metálicos.

A Cal Hidratada como condicionante foi testada por Silva e Hems (2021) com objetivo de avaliar se a adição de Cal nos resíduos de ETA aumenta a sua resistência e diminui e o seu teor de umidade, otimizando o seu uso para uso nas camadas de cobertura diária de Aterros Sanitários.

Quanto ao condicionamento químico utilizando polímero diversos autores apontam a melhoria no desaguamento do lodo previamente tratado por esses produtos. Destaca-se o seu uso no adensamento para posterior secagem em geotêxtil já que na atuação do polímero como floculante a separação entre líquido e sólido é otimizada e o desaguamento ocorre mais rápido otimizando estações que tem uma alta demanda de resíduos para secar e dispor. (SOUZA et al., 2021)

3.6 Desaguamento

3.6.1 Métodos naturais

Se tratando das técnicas de desidratação naturais desses resíduos o principal fator a ser levado em consideração é o espaço territorial disponível para implementação de leitos de secagem, berços para bags e lagoas de lodo, já que todas essas técnicas requerem área relativamente alta e que está diretamente relacionada ao porte da própria estação de tratamento de água, sendo então mais aplicáveis para as unidades de pequeno e médio porte (LIBÂNIO, 2005).

Em uma condição real analisada por Oliveira (2010) o desaguamento natural do lodo de uma ETA realizado através de leitos alternativos com bidim e geotecido e leitos convencionais, levam à conclusão de que esta técnica pode passar de um patamar simples para um desafio no qual não se tem controle, já que se trata de fenômenos naturais.

Neste caso o lodo sofreu fenômenos naturais desfavoráveis como alto índice de precipitação chegando a 302 mm, altos índices de umidade com uma média de 83% e predominância de temperatura média de 17°C

Neste mesmo ponto, em um segundo momento de estudo onde a precipitação foi menor, mas a temperatura e umidade se mantiveram a secagem se apresentou mais eficiente.

E ainda neste mesmo estudo de caso, o fator principal que levou a um sucesso no desaguamento do lodo em questão, foi a taxa de aplicação superficial, em geral, menores valores de carga apresentam melhor desempenho, neste caso, superiores até aos métodos mecanizados. (OLIVEIRA, 2010)

Segundo um estudo conduzido por Achon et. al. (2008) que tinha como objeto de estudo dois tipos de lodo provenientes de ETAS com diferentes coagulantes de processo, sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio, o desaguamento desses efluentes por meios naturais são técnicas aplicáveis ao clima do Brasil e que podem trazer resultados positivos. Essa conclusão foi fundamentada a partir de uma simulação de um leito de secagem, com ambos os tipos de lodos, que após sete dias de secagem, mesmo com a influência de chuvas, apresentaram uma redução em torno de 87% de seu volume para o lodo da ETA que utiliza o PACI e 83 % para a que utiliza o Sulfato de Alumínio.

3.6.2 Métodos mecanizados

Em um estudo realizado em uma ETA, o resultado obtido para a centrifugação do resíduo gerado por esta, apresentou valores abaixo do esperado de 30% de ST o que demonstrou dois fatores prejudiciais ao processo de desaguamento. No primeiro caso, a presença de algas na água bruta é um fator que diminui a característica de desidratação do lodo, e, portanto, levou a um resultado de massa seca de 14%. No segundo caso a existência de partículas finas e um baixo teor de sólidos totais no resíduo que entra na centrífuga não permitem uma desidratação eficiente e para este caso em específico levam a um teor de 19% de sólidos na torta, este fato é dado em razão das águas que na etapa de coagulação requeriram uma dosagem mais alta de hidróxido de alumínio e por esta razão irão apresentar uma característica não tão favorável ao desaguamento. (OLIVEIRA, 2010)

Com estes pontos tem-se a conclusão de que a unidade com água bruta mais elevada em termos de sólidos apresenta uma melhor secagem na centrífuga, mas gera um clarificado inferior em qualidade quando comparada a estação que gera uma torta de lodo menos seca pois possui um resíduo com menos sólidos. Ainda com relação ao desempenho deste equipamento nota-se que quanto maior a rotação melhor é a desidratação do lodo, entretanto maiores rotações significam um diâmetro do equipamento maior e por consequência gera também um custo mais elevado, fator esse que pode ser decisivo para a escolha do método de desaguamento. (OLIVEIRA, 2010)

De forma geral, os equipamentos destinados à secagem do lodo se utilizam de dois princípios diferentes, ou a combinação deles. São eles a separação física, de sedimentação dos sólidos ao fundo de um tanque, onde teremos como resultado um sobrenadante clarificado, ou ao contrário os sólidos flutuam sobre a superfície e podem ser removidos de forma a restar somente o clarificado ao fundo. E também a separação física por filtração, para isso é necessário que os sólidos estejam aglutinados o suficiente para passar pela malha e serem retidos. (RITCHER, 2001)

Segundo Ritcher (2001) a desidratação mecânica por meio de equipamentos que levam a uma massa seca de lodo de pelo menos 20% são a prensa desaguadora, a centrífuga, o filtro prensa e o filtro rotativo a vácuo. Cada método apresenta suas vantagens e desvantagens e características que devem ser avaliadas individualmente a cada processo, fazendo pilotos de pequeno porte aplicados à realidade de cada ETA.

Na Tabela 3 apresentam-se resumidamente essas características de cada técnica de desidratação por equipamentos.

Tabela 3. Técnicas mecanizadas de desaguamento de lodo

| Técnica | Aplicações | Limitações | Custo Relativo |
|-------------------------|---|---|-----------------------|
| Prensa desaguadora | Capaz de obter um lodo relativamente seco, com 40-50% de sólidos secos. Lodo de sulfato 15% a 20% | Sua eficiência é muito sensível às características da suspensão. As correias podem se deteriorar rapidamente na presença de material abrasivo | Baixo |
| Decantação centrífuga | Capaz de obter um lodo desidratado com 15-35% de sólidos. Lodo de sulfato 16-18%. Lodos de cal desidratam mais facilmente. Taxa de captura de sólidos entre 90-98%. Adequada para áreas com limitação de espaço | Não tão efetiva na desidratação como a filtração. O tambor está sujeito a desidratação | Médio |
| Filtro prensa | Usado para desidratar sedimentos finos. Capaz de obter torta com 40-50% de sólidos em lodos de cal, com uma taxa de captura de até 98% | Necessita a aplicação de cinza e cal. Elevação do pH a 11,5. Troca do meio filtrante demorada. Elevado custo operacional e de energia | Alto |
| Filtro rotativo a vácuo | Mais indicado para desidratar sedimentos finos granulares, podendo obter torta de até 35-40% de sólidos e uma taxa de captura entre 88 a 95% | É o método menos eficaz de filtração. Elevado consumo de energia | Mais alto |

Fonte: adaptado de (RITCHER, 2001)

3.7 Adensamento e desidratação de lodos

Para a disposição dos resíduos gerados em uma estação de tratamento de água é necessário que se tenha um adensamento do lodo, de forma que a porcentagem de água seja a menor possível e sua disposição em local apropriado seja otimizado. O adensamento é geralmente feito pela adição de polímeros, é neste momento do processo em que se tem a separação do clarificado e sedimentado que pode ser feita a recuperação do sobrenadante de volta ao processo. (LIBÂNIO, 2010)

O adensamento pode ocorrer também de forma contrária, utilizando o processo da flotação, nesta técnica o lodo é ascensionado e flutua sobre o clarificado, por conta das microbolhas de ar que são injetadas no lodo. (LIBÂNIO, 2010)

O processo de adensamento é a etapa do processo que irá facilitar a seguinte, de desidratação do lodo, essa é a etapa que irá de fato remover a água do lodo ao seu volume mínimo para disposição. (LIBÂNIO, 2010)

De maneira geral as técnicas de desidratação de lodo podem ser divididas em duas de acordo com o seu sistema de secagem, podendo ser natural onde se tem a secagem utilizando apenas o fator tempo ou o mecânico onde é necessário algum tipo de equipamento de secagem. (LIBÂNIO, 2010)

3.8 Aproveitamento de lodo de ETA

O objetivo de uma estação ou unidade que realize o tratamento do lodo de uma estação de tratamento de água é visando a sua destinação final, de forma que para que isto ocorra se faz necessário que o lodo possua um teor de massa seca mais elevado possível. Segundo LUSTOSA et. al. (2017) o gerenciamento do lodo se dá em quatro principais etapas, sendo elas o adensamento que consiste na redução da umidade, o condicionamento que consiste na adição de produtos químicos que irão facilitar na próxima etapa de desagüamento que por sua vez se trata da redução de volume ou umidade, e por fim a disposição final dos subprodutos gerados.

Neste estudo realizado com a água de lavagem de filtros de uma ETA com vazão média equivalente de 17 L/s, e que possui um sistema de dupla filtração, filtração direta ascendente seguida de filtração descendente, o qual fazia o descarte sem tratamento, ou seja in natura, demonstrou, a partir da construção de um tanque de sedimentação da água de lavagem dos filtros, que uma alternativa como essa que separa o clarificado e o reutiliza no tratamento traz benefícios tanto para o meio ambiente quanto o próprio processo, que neste caso gerou uma recuperação de cerca de 6% do volume de água que é captado.

É importante ressaltar que essa recirculação deve ser avaliada, primeiramente a partir das condições do manancial de captação e quando este for viável, acompanhado de análises regulares de oocistos conforme recomendado por Di Bernardo (2001)

Quando se fala de reutilização diversos estudos têm sido desenvolvidos, para transformar esses resíduos em um produto que tenha valor agregado. É o exemplo da construção civil, em que se tem a aplicação do lodo seco como uma matéria prima eficaz na confecção de tijolos de argila (ERDOGMUS; HARJA; GENCEL; SUTCU; YARAS, 2021) e também na fabricação de telhas, na qual o reuso desse material aponta vantagens do ponto de vista ambiental tanto pela economia de espaço em aterros controlados quanto na economia de recursos primários, por meio da substituição de parte da matéria-prima (argila) por lodo. (CREMADES; CUSIDÓ; ARTEAGA, 2018)

Uma outra alternativa se relacionada ao poder adsorvente do lodo para remediação de espécies aniônicas presentes na água e solo como perclorato, selênio e arsênio e em casos como visto na Índia na desfluoretação de águas subterrâneas que estão contaminadas com teores de flúor muito acima do recomendado.(SHAKYA; BHANDE; GHOSH, 2019)

3.9.2 Recuperação do lodo seco como coagulante

No caso do resíduo que já passou pelo processo de adensamento e posterior secagem, o que acontece é o envio desse lodo ao aterro.

Para este resíduo uma das alternativas é a reutilização do alumínio presente no coagulante, ou seja, recuperar o produto dosado inicialmente no processo de tratamento de água. Essa recuperação ocorre mais comumente pelo processo de acidificação com o rebaixamento do pH para 1-3, já que o hidróxido de alumínio presente nesse lodo é bastante solúvel em pH ácido e alcalino.

Estudos sugerem que é possível obter uma taxa de recuperação de alumínio do Policloreto de Alumínio entre 70 e 84%, porém nos casos em que se tem uma água bruta inicial com maior matéria orgânica e turbidez essa taxa pode ser menor. (NAIR E AHAMMED, 2017)

Outro ponto é que problemas de saturação de uma estação também podem ser beneficiados por esse processo uma vez que as moléculas de água que estão ligadas aos flocos de lodo também são deslocadas na etapa de recuperação do coagulante, o que irá reduzir o volume do lodo e consequentemente também diminuir o custo de manuseio e disposição final deste. (NAIR E AHAMMED, 2017)

Ainda no que diz respeito a reutilização desse resíduo, é levantado a aplicação do lodo no solo, como por exemplo nos que apresentam uma deficiência de ferro e poderiam então se beneficiar do lodo de ETA que utilize o sulfato de ferro como produto para sua etapa de coagulação. (HENDGES; REINHER; LEICHTWEIS; FERNANDES; TONES, 2017)

Apesar de necessitar de atenção às características de resistência e retração, também é aplicável na fabricação de cimentos e tijolos, servindo como um incorporador em blocos cerâmicos e massas de concreto. (HOPPEN; PORTELLA; JOUKOSKI; TRINDADE; ANDREÓLI, 2006) &

(CHALHOUB; LOURENÇO; FILLA; FARIA JUNIOR; MADALOZZO, 2019). E ainda para servir de substrato ao desenvolvimento do biofilme em wetlands bem como na remoção do ferro destes sistemas. (HENDGES; REINHER; LEICHTWEIS; FERNANDES; TONES, 2017)

E por último na técnica de compostagem de rejeitos orgânicos sendo aplicável no momento de ajuste da umidade (para aumentá-la) e pH (para diminuí-lo), além de fornecer substratos na mistura pela sua característica de riqueza de nitrogênio. (MORELLO; CANSIAN; SILVA; LAUTENSCHLAGER, 2011)

4 Metodologia

4.1. Local de estudo

Para desenvolvimento deste estudo foram utilizados dados reais de uma ETA de médio porte, localizada no Estado de São Paulo. Dentro da ETA existe uma unidade que faz o tratamento dos resíduos gerados no processo de produção de água, essa estação foi inaugurada há pouco mais de um ano.

Os resíduos da ETA provêm das lavagens de seus 6 filtros e 2 decantadores, em 2020 foi registrado um volume desses descartes de 698.048 m³ que são encaminhados a ETL para desaguamento e secagem. Em períodos de chuva e boa qualidade do manancial faz-se a lavagem de aproximadamente 3 a 4 filtros em um intervalo de 24h. Entretanto nos períodos de estiagem onde o manancial de captação está muito degradado essas quantidades sobem para até 11 filtros.

O recebimento do lodo gerado na ETA é feito em uma caixa de passagem mediante a interceptação da rede de descarte existente de 800 mm de diâmetro. O encaminhamento do lodo à ETL acontece por gravidade em uma tubulação de 600 mm de diâmetro até a Caixa de Distribuição na ETL, passando pela Câmara de Chegada. Desta caixa, o volume de resíduos pode ser encaminhada para dois módulos de adensadores.

Os dois módulos de Clarificação e Adensamento possuem um volume total de 4.528 m³, e são divididos em 12 células, cada uma com volume aproximado de 377 m³ e fundo com 4 troncos de pirâmide. A altura útil total de cada célula é de 6,15 m. A remoção do lodo adensado nas células é realizada através de tubulações de descarga no fundo dos tanques, contendo uma válvula do tipo guilhotina por célula, com acionamento eletromecânico.

Cada válvula tem acionamento independente. O lodo adensado é descartado em dois canais de coleta (um para cada módulo), e é encaminhado, por gravidade, para o Tanque de Lodo Adensado que possui um volume útil de 14,0 m³. O recalque do lodo adensado para o desaguamento em bags é feito pela Elevatória de Lodo contendo 1 bomba + 1 reserva, cada uma

com capacidade de 25 m³/h. Foi prevista a aplicação de polímero nesta linha de recalque para desaguamento do lodo.

Após o desaguamento em bags, a água clarificada é direcionada ao Tanque de Água Clarificada, por gravidade, que possui um volume útil de 112 m³.

A água clarificada nas células dos adensadores pode ser coletada em dois níveis, 1,5 m e 3,0 m de altura. A drenagem é feita por tubulações providas de válvulas com comandos eletromecânicos. A água clarificada é descarregada nos canais de coleta (um canal para cada módulo) e é encaminhada para o TAC, por gravidade. Neste momento é onde foi prevista a recirculação da água clarificada ao início da ETA, porém atualmente essa água é descartada em um córrego próximo.

Depois de cheio o bag é desativado e entra então no seu período de secagem, esse intervalo varia conforme a época do ano e conseqüente demanda da ETA, geralmente encontra-se entre 30 e 100 dias, naturalmente quanto maior o tempo em que o bag fica secando maior é a massa seca obtida para aquela torta de lodo. Um desenho esquemático é ilustrado na Figura 1.

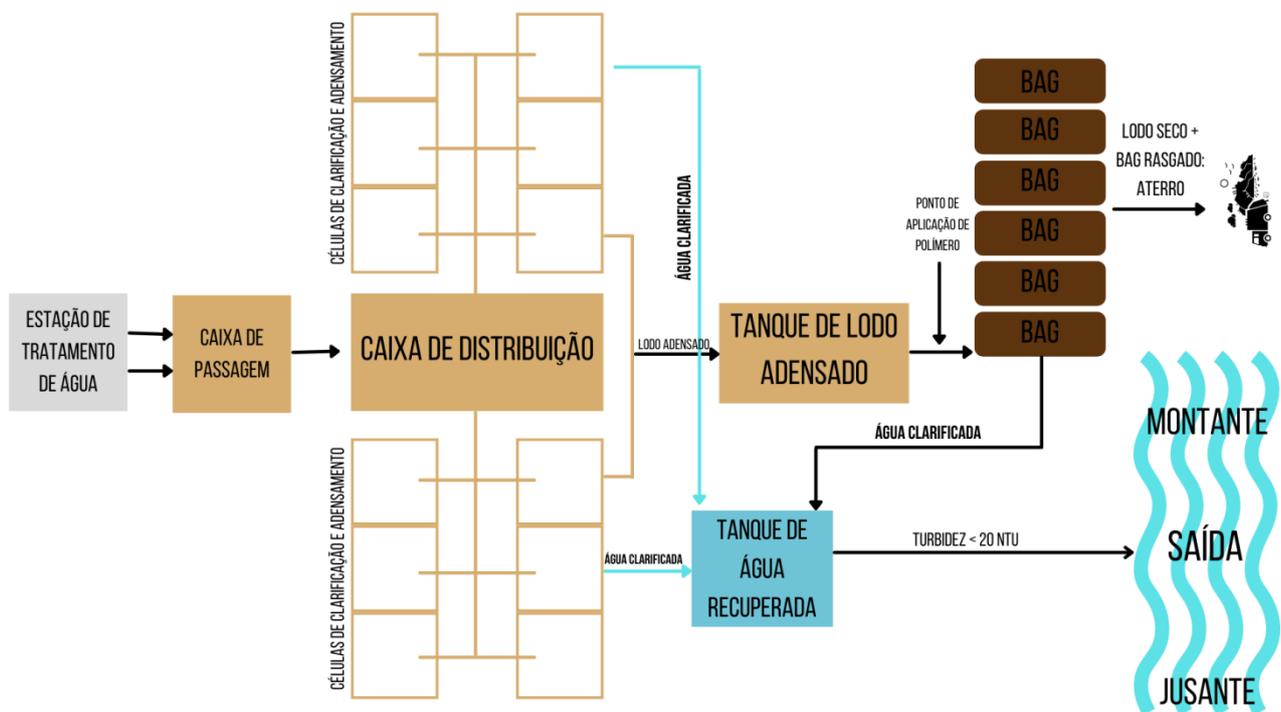


Figura 1. Desenho esquemático da Estação de Tratamento de Lodo

4.2 Coleta de Dados

Os dados utilizados nos testes de análises estatísticas foram disponibilizados pela ETA em questão que faz o monitoramento mensal dos parâmetros estabelecidos pelo CONAMA 430/11 da água clarificada proveniente do adensamento das células da estação, e também dos pontos a montante e jusante do descarte da água clarificada no córrego localizado próximo a ETL.

Com relação ao resíduo seco que é encaminhado ao aterro é feito o monitoramento apenas da massa seca da torta de lodo, a fim de avaliar a eficácia de desaguamento da estação.

O cloro total muitas vezes é um potencial parâmetro de desenquadramento, por conta da pré cloração que em períodos de estiagem, onde a amônia apresenta valores elevados no manancial de captação chega-se a uma dosagem de até 40 mg/L de cloro na pré cloração.

No caso do flúor, este está na legislação de lançamento Decreto 54.487, de 26/06/09 (AL-SP, 2009) e na legislação CONAMA 430/11 (CONAMA, 2011). A princípio uma das preocupações da unidade era com relação ao clarificado do bag, que este processo de desaguamento pudesse causar uma concentração do parâmetro e como a água utilizada na retrolavagem do filtro já passou pela fluoretação optou-se por acompanhar o seu valor.

4.2.1 Natureza do geobag

O geobag utilizado na ETL possui formato elíptico confeccionado em geotêxtil de polipropileno de 640 g/m², de forma a assegurar a sua resistência mecânica deve atender as normas ABNT NBR ISO 12568:2003 e ABNT NBR ISO 9863-1:2013, abordando respectivamente a massa por unidade de área e a resistência à tração, perfuração e puncionamento. Deve-se atender também a resistência aos raios UV pela norma ASTM D 4355:2007.

O tecido de polipropileno de alta tenacidade é capaz de suportar altas pressões internas sem perder seu índice de permissividade, umas das características inerentes a este material é que a geoforma não apresenta reação a álcalis e ácidos, da mesma forma que é resistente aos raios ultravioleta e inerte a degradação biológica.

O geobag recebe o lodo adensado das células de clarificação da ETL até que se atinja a altura operacional estipulada, em seguida ele é isolado e entra em processo de secagem, este período varia de acordo com os parâmetros operacionais da ETA, se esta está com uma demanda maior de água de serviço, e a ETL já apresenta sinais de saturação, é necessário abrir o espaço daquele berço que contém o geobag isolado para outro entrar em operação.

A retirada do geobag desidratado é feita com pá carregadeira, retroescavadeira e caminhões com caçamba, onde se faz diversas viagens até o aterro de destino. Em média um geobag irá dispor de 450 toneladas de resíduos dispostos no aterro. Além do resíduo seco é encaminhado também o

próprio geotêxtil rasgado durante a retirada, apesar de este possuir material que permite a sua reciclagem.

4.2.2 Custos associados ao geobag

Tabela 4. Custos associados a ETL

| Disposição | Transporte | Máquinas | Geobag |
|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| R\$ 96,09 / tonelada | R\$ 40,42 / tonelada | R\$ 14.890,42 / retirada | R\$ 25.984,24 unidade |

**Preços médios aproximados de 6 retiradas (geobags secos)*

Percebe-se um alto custo, o próprio geobag no qual é acondicionado o lodo não é reciclado, apesar do fornecedor do geobag não ter uma localização favorável que permita o envio desse tecido de volta para sua reciclagem poderiam ser avaliadas empresas locais dispostas a receber esse material a fim de proporcionar melhores utilidades que não a disposição em aterro, sendo que dessa forma o custo com a própria disposição por tonelada também diminuiria.

4.3 Teste t de dados pareados

O teste t de Student para dados pareados: para se comparar dois conjuntos de dados utilizando-se o teste t de Student para dados pareados, é necessário que se calculem as diferenças (d) dos valores pareados e se determine uma média aritmética destas diferenças. Se a média das diferenças (\underline{d}) tende a zero, o valor de $t_{\text{estatístico}}$ (ou $t_{\text{calculado}}$) deve ser menor que o $t_{\text{crítico}}$, valor este tabelado em função do intervalo de confiança desejado. O valor de $t_{\text{calculado}}$ é obtido mediante a equação (1), (MILLER; MILLER, 2005).

$$t = \frac{\underline{d} \sqrt{n}}{s_d} \quad 1)$$

Onde \underline{d} = média das diferenças entre os pares de dados (d);

n = número de pares de dados;

s_d = desvio padrão da amostra com média \underline{d} ;

O número de graus de liberdade é $n-1$, e o intervalo de confiança adotado foi de 95% ($p = 0,05$).

O teste t pode ser aplicado para comparações em qualquer direção, ou seja, uma hipótese nula para dados significativamente diferentes (bicaudal), ou em uma única direção, quando se

deseja saber se os dados são significativamente maiores ou significativamente menores (unicaudal). A escolha dos valores tabelados de $t_{\text{crítico}}$ devem levar em consideração o tipo de hipótese nula adotada.(MILLER; MILLER, 2005).

4.4 Teste ACP - Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (do inglês *Principal Component Analysis*, acrônimo PCA) é um parte da Quimiometria que permite contextualizar e analisar grandes volumes de dados, onde sem ela é difícil de se enxergar padrões e relações entre as variáveis. Constitui-se uma técnica multivariada, onde diversas variáveis, possuindo as mais diversas unidades de medidas, são obtidas para um conjunto pequeno de amostras. Normalmente, os estudos sanitários e ambientais fornecem esse tipo de matriz de dados: poucas amostras, onde muitas variáveis são analisadas. A PCA também é capaz de mostrar os índices de correlação entre as variáveis, podendo simplificar e reduzir um conjunto de dados complexos, desconsiderando da análise as variáveis que levam ao mesmo nível de informação (redundância).(MILLER; MILLER, 2005).

Na PCA, os dados originais são reorganizados, de maneira que componentes principais possam explicar os padrões e tendências que porventura existam no conjunto. A PCA fornece dois importantes tipos de informação, normalmente apresentados na forma de gráficos: os *scores* e os *loadings*. Os *scores* são agrupamentos de amostras de acordo com as novas componentes principais, agora confrontadas, o que nos pode mostrar tendência das mais diversas. Os *loadings* nos mostram quais as variáveis são as mais importantes na formação dos referidos grupos. (MILLER; MILLER, 2005).

4.5 Legislações aplicáveis

A ETA verificou que a vazão do corpo d'água receptor é notadamente menor que a vazão de água clarificada da ETL (300 m³/h), de forma que é improvável a diluição do efluente após o seu lançamento. Dessa forma, a água clarificada na ETL deve seguir os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 para rios de Classe 2, para que esta não provoque o seu desenquadramento. (CONAMA, 2005)

Ainda, a ETL deve seguir o estabelecido no Art. 16da Resolução CONAMA nº430 de 13 de maio de 2011 dos padrões de emissão para efluentes lançados em corpo d'água receptor, (CONAMA, 2011) bem como o disposto no decreto Nº 54.487/2009 (AL-SP,2009). Esses valores máximos permitidos estão dispostos na tabela 5

Tabela 5. Legislações aplicáveis ao lançamento da ETL

| Parâmetro | Unidade | Lançamento: Decreto Nº54487/2009 | Lançamento: Conama 430 de 13/05/2011 | Corpo d'água: Conama 357 – Art 15 – Corpo d'água classe 2 |
|-------------------------------|--------------|--|--|--|
| pH | - | 5,0 – 9,0 | 5,0 - 9,0 | 6,0 - 9,0 |
| Turbidez | NTU | - | - | 100 |
| Temperatura | °C | 40 | 40 | - |
| Cloro Residual Total | mg/L | - | - | 0,01 |
| Oxigênio Dissolvido | mg/L | Min 5,0 | - | Min 5,0 |
| Cloreto | mg/L | - | - | 250 |
| Cor Verdadeira | uH | - | - | 75 |
| Alumínio Dissolvido | mg/L | - | - | 0,1 |
| Ferro Dissolvido | mg/L | 15 | 15 | 0,3 |
| Fluoreto | mg/L | 1,4 | 10 | 1,4 |
| Manganês | mg/L | 1,0 (solúvel) | 1,0 (solúvel) | 0,1 (total) |
| <i>Escherichia coli</i> | * NMP/100 mL | - | - | 600 |
| DBO | mg/L O2 | 5 | 60 | 5 |
| Sólidos sedimentáveis | mL/L | | 1 | - |
| Sólidos Dissolvidos Totais | mg/L | | - | 500 |

* *Escherichia coli*: DECISÃO CETESB Nº 363-E, de 07/12/2011

5 Resultados e discussões

5.1. Teste t de dados pareados

O teste t de dados pareados foi realizado para os 12 parâmetros monitorados pela ETL, utilizando os dados agregados referentes a um ano. Essa estratégia foi adotada a fim de evitar tornar as análises tendenciosas com relação à sazonalidade. Além disso, um conjunto muito grande de dados, com variações muito grandes, pode diluir as diferenças e planificar os dados.

Para cada uma das variáveis estão relacionados em uma primeira tabela os dados brutos coletados dos três pontos, os seus valores mínimos e máximos e suas respectivas médias, desvio padrão e desvio padrão relativos. E em uma segunda tabela os resultados dos testes t de dados pareados, com o t calculado, crítico e o resultado das hipóteses estabelecidas. A título de exemplo as tabelas de pH e manganês total são apresentadas nos tópicos a seguir, as demais se encontram no apêndice.

5.1.1. Teste t para a variável pH

Apesar dos valores de pH serem o resultado de um cálculo logarítmico, pode-se fazer médias aritméticas simples e desvios padrão com os dados, sem ferir nenhuma convenção matemática, obtendo-se uma boa aproximação da tendência central (VON SPERLING, 2001).

Os valores obtidos por análise estatística preliminar, ou seja, comparações de média aritmética e desvios padrão, inferem que o pH do manancial não foi afetado pela descarga da ETL no período analisado (Tabela 6).

Tabela 6. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável pH, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de pH medidos | | |
|------------|-----------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 6,1 | 7,0 | 6,9 |
| 14/07/2020 | 6,4 | 6,8 | 6,8 |
| 27/07/2020 | 6,3 | 7,1 | 7,3 |
| 10/08/2020 | 6,2 | 6,8 | 6,6 |
| 25/08/2020 | 6,5 | 6,7 | 6,7 |
| 22/09/2020 | 6,3 | 6,8 | 6,6 |
| 05/10/2020 | 6,0 | 6,7 | 7,0 |
| 05/11/2020 | 6,2 | 6,3 | 6,4 |
| 08/12/2020 | 6,8 | 6,8 | 6,9 |
| 12/01/2021 | 6,5 | 6,3 | 6,9 |
| 11/02/2021 | 6,0 | 6,0 | 6,6 |
| 11/03/2021 | 7,3 | 7,4 | 7,6 |
| 22/04/2021 | 6,3 | 6,8 | 6,5 |
| 10/05/2021 | 6,8 | 6,8 | 6,9 |
| 18/05/2021 | 6,4 | 6,6 | 6,6 |
| 10/06/2021 | 6,3 | 6,1 | 6,3 |
| <i>n</i> | 16 | 16 | 16 |
| Máx | 7,3 | 7,4 | 7,6 |
| Min | 6,0 | 6,0 | 6,3 |
| Média | 6,4 | 6,7 | 6,8 |
| DP | 0,3 | 0,4 | 0,3 |
| DPR(%) | 5,2 | 5,4 | 4,9 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

As médias e os respectivos desvios-padrão se sobrepõem entre si nos três pontos amostrados, não sendo possível afirmar que houve influência da ETL na qualidade da água do rio. Uma tendência de aumento pode ser sugerida quando se analisam de forma mais gráfica os desvios de pH em torno da média (Figura 2). Porém, não é possível avaliar a relevância disso sem um teste estatístico de significância

Figura 2. Demonstração gráfica da interposição dos valores de média \pm desvio padrão com relação à variável pH, comparando-se os três pontos amostrais deste trabalho.

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------------|-----|-----|------------|------------|-----|-----|-----|--|------------------|
| 6,1 | 6,2 | 6,3 | 6,4 | 6,5 | 6,6 | 6,7 | | | | | | M ^(a) |
| | | 6,3 | 6,4 | 6,5 | 6,6 | 6,7 | 6,8 | 6,9 | 7,0 | 7,1 | | S ^(b) |
| | | | | 6,5 | 6,6 | 6,7 | 6,8 | 6,9 | 7,0 | 7,1 | | J ^(c) |

(a) *M = montante à ETL; (b) S = saída da ETL; (c) J = jusante à ETL*

Assim, escolheu-se o teste *t* de Student para dados pareados como ferramenta estatística na avaliação de algumas hipóteses formuladas a respeito do conjunto de dados. O teste *t* de Student para dados pareados é utilizado quando o teste *t* convencional não pode ser aplicado, ou seja, os dados que compõem uma média para determinado ponto de coleta foram obtidos sob condições diferentes, ou em última análise, as médias foram obtidas sob condições diferentes (MILLER; MILLER, 2005; QUINTANA et al., 2018). Esse frequentemente é o caso quando se trabalham com dados ambientais, cujas amostras são coletadas sob diferentes condições ao longo do tempo e sujeitas a variáveis das mais diversas como temperatura, chuvas, descartes antrópicos pontuais, etc. No conjunto de dados aqui utilizado (Tabela 6), têm-se três pontos de coleta que foram amostrados nos mesmo dias, ou seja, admite-se que sob as mesmas condições, com mínimas e aceitáveis variações. É possível desta forma comparar as condições em que se coletaram os dados de uma mesma variável, entre os pontos de coleta, para um mesmo dia. Ao longo da campanha de amostragem (JUN 2020 – JUN 2021), certamente as condições ambientais sofreram alterações, tornando a média dos dados para um mesmo ponto de coleta sujeita a condições bastante diversas e imponderáveis. Assim, a incerteza das influências sofridas pela média em cada amostra é impossível de ser avaliada, mas se sabe que, para um mesmo dia, as variações que influenciaram cada amostra, de cada um dos três pontos amostrados, são fortemente comparáveis. Essas são as

razões de porque se utiliza o teste de t de Student de dados pareados em lugar do teste convencional para o referido universo amostral.

Adotou-se como estratégia a comparação dos pontos de coleta, feitos dois a dois, a fim de se avaliar ao final se o descarte promovido pela saída da ETL influenciou na qualidade do manancial à jusante. Na Tabela 7 é possível visualizar em detalhes as hipóteses nulas para cada teste executado.

Tabela 7. Descrição dos testes t de dados pareados, na avaliação do impacto da ETL no manancial com relação à variável pH.

| Teste | Pontos ^(a) | Hipótese nula (H_0) | Técnica ($t_{pareado}$) |
|-------|-----------------------|--|---------------------------|
| 1 | M,J | Os valores NÃO são significativamente diferentes | Bicaudal |
| 2 | M,J | Os valores em J NÃO são significativamente maiores | Unicaudal |
| 3 | S,M | Os valores NÃO são significativamente diferentes | Bicaudal |
| 4 | S,J | Os valores NÃO são significativamente diferentes | Bicaudal |

(a) $M = montante à ETL$; $S = saída da ETL$; $J = jusante à ETL$

Os resultados dos testes propostos na Tabela 7 podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados obtidos nos testes t de dados pareados com relação à variável pH ($n = 16$, IC = 95%, $P = 0,05$).

| Teste | Pontos | $ t_{calculado} $ | $t_{crítico}$ | H_0 |
|-------|--------|-------------------|---------------|-----------|
| 1 | M,J | 4,91 | 2,13 | REJEITADA |
| 2 | M,J | 4,91 | 1,74 | REJEITADA |
| 3 | S,M | 3,24 | 2,13 | REJEITADA |
| 4 | S,J | 1,56 | 2,13 | ACEITA |

O teste n° 1 (bicaudal) revela que os dados de pH à montante e à jusante da ETL são significativamente diferentes, admitindo-se IC = 95%. O teste n° 2 (unicaudal) complementa a informação do teste n° 1, mostrando que, além de diferentes, os resultados à jusante são sistematicamente maiores em comparação à montante. Os testes 3 e 4 mostram que o pH de saída da ETL é significativamente diferente do pH à montante, mas não significativamente diferente com relação à jusante. Isso significa que o pH à jusante é fortemente influenciado pela saída da ETL, apresentando valor diferente do ponto à montante.

Uma vez comprovado estatisticamente que o lançamento da ETL influencia na variável pH, aumentando o seu valor à jusante, é necessário verificar se esse aumento é relevante em termos de

legislação, podendo causar danos sanitários ou ambientais. Com o intuito de magnificar as diferenças entre montante e jusante, comparam-se o valor mínimo à montante (6,0) com o valor máximo à jusante (7,6). A Resolução CONAMA 430/11 preconiza em seu Artigo 16º que efluentes em geral poderão ser lançados diretamente no corpo d'água desde que seu pH esteja entre 5 e 9. (CONAMA, 2011). Assim, mesmo com a alteração do pH em função dos lançamentos da ETL, a legislação continua sendo obedecida e não se prevê danos sanitários com relação a esta variável em específico.

5.1.2. Teste t para a variável Cloro livre

Para a variável de cloro livre os testes demonstra que todas as hipóteses foram aceitas e, portanto, não existe diferenças significativas entre os três pontos analisados. Entende-se que o cloro livre que compõe a água da retrolavagem dos filtros e da água de alta pressão na lavagem do decantador é perdido durante o encaminhamento da ETL e depois até o córrego.

O desvio padrão relativo calculado para os três pontos apresentou valores muitos altos, todos acima de 100%, esse fator é desfavorável para o teste em questão.

5.1.3. Teste t para a variável Cloro Total

As hipóteses rejeitadas pelo teste demonstram que para esta variável os valores a montante e jusante são significativamente diferentes, e ainda que os valores a jusante são maiores, porém não é possível afirmar que as diferenças sejam de influência da ETL. De acordo com informações da própria ETA o corpo d'água receptor fica próximo a diversas moradias particulares e o ponto a montante próximo a um comercio que faz a lavagem de automóveis. Como a vazão do córrego é bastante pequena acredita-se na influência de descartes pontuais de água de rede (clorada) no corpo d'água a montante que acaba por distorcer os valores.

De acordo com a resolução CONAMA 357/2005 para corpos de água doce (classes I e II) o valor para essa variável é de 0,01 mg/L, (CONAMA, 2005) o que desenquadra os valores do descarte da estação em determinados períodos do ano.

Nos períodos de estiagem em que o manancial de captação se encontra mais degradado e com uma alta concentração de nitrogênio amoniacal a demanda de cloro na pré oxidação da ETA já atingiu picos de 60 mg/L de Cl_2 , estes picos contribuem para o desenquadramento da saída da ETL principalmente nas lavagens dos decantadores, esse cenário é percebido pelo conjunto de dados que ora apresenta valores zerados (em época de chuvas) e ora apresenta valores superiores ao 0,01 mg/L.

5.1.4. Teste t para a variável Turbidez

No caso da turbidez todas as hipóteses foram aceitas, e, portanto, os valores não podem ser considerados significativamente diferentes em nenhuma comparação. Não se pode afirmar que os descartes da ETL impactam negativamente o manancial com relação a este parâmetro.

Percebe-se pelos valores máximos a montante e mínimos a jusante uma tendência de diluição causado pela saída da ETL que utiliza este parâmetro como critério de decisão para o descarte da água clarificado ao córrego, ou seja, quando a turbidez do clarificado atinge valores menores que 20 NTU é que é feito o descarte para o corpo d'água receptor.

5.1.5. Teste t para a variável condutividade elétrica

A condutividade também teve todas as hipóteses aceitas, sendo que para este parâmetro quando se observa os valores mínimos e máximos dos três pontos percebe-se uma tendência de comportamento linear e, portanto, baixa variação significativa dos dados.

5.1.6. Teste t para a variável Oxigênio Dissolvido

Com relação ao oxigênio dissolvido, os testes 1 e 2 demonstram que os valores a montante e jusante são significativamente diferentes e ainda que os valores a jusante são maiores. Pelo teste 3 pode-se afirmar que os valores da saída e montante também são significativamente diferentes e pelo teste 4 que a influência da jusante é clara, uma vez que esses valores NÃO são significativamente diferentes. Essas mudanças são explicadas pelos desníveis existentes pelo caminho que a água faz desde a ETA até o descarte do clarificado no córrego.

5.1.7. Teste t para a variável cor verdadeira

O primeiro e terceiro testes demonstram a influência da saída nos valores a montante e a diferença significativa entre o montante e a jusante do corpo d'água. Sendo que o teste 2 aponta para valores significativamente maiores a jusante. Apesar de verificado um potencial impacto causado pelo lançamento o maior valor encontrado a jusante não desenquadra o valor máximo permitido pela CONAMA 357/2005 de 75 uH. (CONAMA, 2005)

5.1.8. Teste t para a variável Alumínio Dissolvido

As hipóteses aceitas para o alumínio apontam que não existe diferenças significativas entre os pontos analisados. Entretanto é importante ressaltar que o valor máximo permitido no descarte deve ser levado em consideração, visto que este é bastante rigoroso (0,1mg/L) para que o corpo d'água não seja desenquadrado de sua classe 2 conforme previsto na resolução CONAMA 357/2005.

Destaca-se que os dados são muito influenciados por certos fatores, podendo levar a distorções das conclusões. No caso do alumínio dissolvido os três mais relevantes são:

- a. Faixa de variação muito ampla ao longo do ano, a diferença entre os valores mínimos e máximos dos três pontos é bastante alta.
- b. Enorme desvio padrão relativo, mesmo dentro do mesmo ponto de coleta, os três pontos têm valores acima de 260%, isso dificulta o teste t apontar as tendências de variações que existem dentro dos pontos.
- c. A maior parte de seus valores estão abaixo do limite de quantificação, ou com concentrações muito baixas, aumentando muito a imprecisão analítica;

5.1.9. Teste t para a variável Ferro Dissolvido

Com relação ao ferro os testes 1 e 2 apontam para a diferença significativa entre os valores a montante e a jusante, e ainda os valores de jusante maiores. Apesar do teste 3 não comprovar a diferença significativa entre a saída e montante, o teste 4 aponta para a semelhança entre saída e jusante e, portanto, pode existir uma influenciado descarte. Conforme apontado no teste PCA acredita-se na influência das próprias margens do córrego na análise do ferro dissolvido, sendo que como o descarte da ETL possui uma vazão relativamente grande pode-se ocorrer arrastes nestes momentos e essa diferença ser a apontada pelos testes 1 e 2.

5.1.10. Teste t para a variável Flúor

As hipóteses 2 e 3 rejeitadas demonstram que os valores a jusante foram influenciados pelo descarte da ETL e são significativamente maiores por conta da estação. Essas informações são explicadas por conta da água que é utilizada na lavagem dos filtros e decantadores, essa água provém do reservatório de distribuição e, portanto, já recebeu a fluoretação estabelecida pela Resolução nº 250, de 15 de agosto de 1995 da Secretaria de Estado da Saúde (SES) que prevê a presença de íons fluoretos na faixa de 0,6 a 0,8 mg/L. Apesar dessa influencia não existe valores máximos que ultrapassem o permitido em legislação para lançamento em corpo d'água.

5.1.11. Teste t para a variável Manganês Total

Para o parâmetro manganês os valores de média aritmética e desvio padrão parecem apresentar grande relevância na análise por conta da maior variação entre os períodos, e maiores diferenças entre a saída e montante. Os dados estão dispostos na tabela 9.

Tabela 9. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável manganês total, medida no período compreendido entre junho de 2020 e outubro de 2021

| Data | Valores de manganêstotal medidos | | |
|------------|----------------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 0,17 | 0,07 | 0,21 |
| 14/07/2020 | 0,14 | 0,15 | 0,22 |
| 27/07/2020 | 0,12 | 0,86 | 0,66 |
| 10/08/2020 | 0,17 | 0,10 | 0,20 |
| 25/08/2020 | 0,01 | 3,00 | 5,90 |
| 22/09/2020 | 0,08 | 0,52 | 0,68 |
| 05/10/2020 | 0,21 | 1,05 | 0,52 |
| 05/11/2020 | 0,11 | 0,38 | 0,35 |
| 08/12/2020 | 0,09 | 0,47 | 0,30 |
| 12/01/2021 | 0,07 | 0,15 | 0,33 |
| 11/02/2021 | 0,08 | 0,79 | 0,50 |
| 11/03/2021 | 0,19 | 0,23 | 0,13 |
| 22/04/2021 | 0,05 | 2,80 | 0,38 |
| 10/05/2021 | 0,04 | 0,32 | 0,50 |
| 18/05/2021 | 0,10 | 0,12 | 0,03 |
| 10/06/2021 | 0,03 | 0,73 | 0,20 |
| <i>n</i> | 16 | 16 | 16 |
| Máx | 0,2 | 3,0 | 5,9 |
| Min | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Média | 0,1 | 0,7 | 0,7 |
| DP | 0,1 | 0,9 | 1,4 |
| DPR(%) | 56,8 | 122,4 | 201,6 |

Mais uma vez iremos avaliar se o descarte do clarificado da ETL influenciou na qualidade do manancial à jusante, agora utilizando o parâmetro de maior relevância para a estação. Seguindo as mesmas hipóteses apresentadas na Tabela 9. O resultado é dado na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados obtidos nos testes t de dados pareados com relação à variável manganês total ($n = 21$, IC = 95%, $P = 0,05$).

| Teste | Pontos | $ t_{\text{calculado}} $ | $t_{\text{crítico}}$ | H_0 |
|-------|--------|--------------------------|----------------------|-----------|
| 1 | M,J | 1,65 | 2,13 | ACEITA |
| 2 | M,J | 1,65 | 1,74 | ACEITA |
| 3 | S,M | 3,11 | 2,13 | REJEITADA |
| 4 | S,J | 0,18 | 2,13 | ACEITA |

O teste nº 1 e 2 mostram que o manganês à montante e à jusante da ETL não são significativamente diferentes e ainda, jusante não apresenta valores sistematicamente maiores. Já os testes 3 e 4 mostram que o manganês da saída da ETL é significativamente diferente do montante, mas não significativamente diferente com relação à jusante, ou seja, a jusante é influenciada pelo descarte, apresentando valor diferente do ponto à montante.

Sendo assim, existem evidências de que o teor de manganês total da saída é maior do que montante, influenciando assim jusante, mas ao final a diferença entre montante e jusante não é significativa.

A comparação do valor mínimo à montante (0,01 mg/L) com o valor máximo à jusante (5,90 mg/L) demonstra que este parâmetro é de extrema relevância para assegurar a qualidade do manancial em que se está sendo lançado, uma vez que este tem valor máximo de 0,1 estabelecido pela Resolução CONAMA 430/11. (CONAMA, 2011)

5.1.12. Teste t para a variável *Escherichia coli*

Na análise da *Escherichia coli* as hipóteses 1 e 2 foram aceitas, ou seja, não existem diferenças significativas entre os dados do ponto a montante e do ponto a jusante da estação. Entretanto o teste 3 e 4 aponta para mudanças tanto da saída em comparação a montante, quanto a jusante. Quando avaliado os valores máximos e mínimos percebe-se que a saída tem um comportamento bastante inferior tanto do montante quanto da jusante, mas ainda sim os valores a montante são maiores. Pode-se afirmar valores altos a montante e que são diluídos pelo descarte, mas não são completamente afetados por este.

5.2. Análise das componentes principais –PCA

O objetivo de se usar PCA sobre os dados deste trabalho é o de se tentar enxergar quais variáveis influenciam mais na qualidade da água do manancial à jusante da ETL, ou seja, quais as principais contribuições da ETL no nível de transformação do manancial. Partiu-se inicialmente de

um universo amostral constituído por 21 coletas realizadas em diferentes dias ao longo do período compreendido entre junho/2020 a outubro/2021. Como cada coleta era feita no mesmo dia em três pontos, montante da ETL, saída da ETL e jusante da ETL, o conjunto de amostras é triplicado, chegando a 63. Foram medidas 12 variáveis: pH, cloro livre, cloro total, turbidez, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, cor verdadeira, alumínio, ferro, fluoreto, manganês e *Escherichia coli* (NMP/100 mL). Na Tabela 11 podem ser vistos os dados brutos disponibilizados para análise, os valores em cinza foram os parâmetros e/ou dias retirados na análise PCA por não possuírem dados suficientes que suprissem as necessidades do conjunto no todo.

Tabela 11. Dados brutos coletados à montante (M), na saída (S), e à jusante (J) da ETL no período entre junho/2020 e outubro/2021.

| Amostras | Variáveis [‡] | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------------|------|------|----|-----|------|------|-------|------|-----|------|-------|
| | PH | CL | CT | TU | CE | OD | CR | AL | FE | FT | MN | EC |
| 001_M | 6,1 | < LQ | < LQ | 11 | 92 | 6,31 | 4 | 0,019 | < LQ | 0,1 | 0,17 | 172 |
| 001_S | 7,0 | < LQ | 0,44 | 5 | 199 | 8,3 | 1 | 0,015 | < LQ | 0,3 | 0,07 | 2 |
| 001_J | 6,9 | < LQ | 0,31 | 6 | 199 | 8,12 | 1 | 0,017 | < LQ | 0,3 | 0,21 | < LQ |
| 002_M | 6,4 | 0,05 | 0,09 | 35 | 333 | *** | 17 | 0,012 | 1,14 | 0,4 | 0,14 | < LQ |
| 002_S | 6,8 | 0,3 | 0,4 | 7 | 72 | *** | 1 | 0,012 | 0,05 | 0,2 | 0,15 | < LQ |
| 002_J | 6,8 | 0,06 | 0,1 | 17 | 81 | *** | 2 | 0,022 | 0,05 | 0,2 | 0,22 | < LQ |
| 003_M | 6,3 | *** | 0,06 | 7 | 97 | 5,67 | 6 | 0,012 | 0,16 | *** | 0,12 | < LQ |
| 003_S | 7,1 | *** | 0,11 | 5 | 60 | 8,17 | < LQ | 0,011 | 0,07 | *** | 0,86 | < LQ |
| 003_J | 7,3 | *** | 0,09 | 5 | 84 | 7,85 | < LQ | 0,011 | 0,03 | *** | 0,66 | < LQ |
| 004_M | 6,2 | < LQ | < LQ | 6 | 103 | 6,22 | 4 | 0,04 | 0,17 | 0,1 | 0,17 | 1553 |
| 004_S | 6,8 | 0,01 | < LQ | 3 | 102 | 7,91 | < LQ | 0,072 | 0,03 | 0,1 | 0,1 | < LQ |
| 004_J | 6,6 | 0,01 | 0,03 | 4 | 105 | 7,79 | 5 | 0,017 | 0,21 | 0,1 | 0,2 | 816,4 |
| 005_M | 6,5 | 0,01 | 0,04 | 5 | 147 | 6,34 | 6 | 0,008 | 0,09 | 0,1 | 0,01 | 204,6 |
| 005_S | 6,7 | 0,07 | 0,1 | 4 | 208 | 8,25 | 5 | 0,01 | 0,45 | 0,2 | 3 | 5,2 |
| 005_J | 6,7 | 0,07 | 0,04 | 4 | 208 | 8,25 | 6 | 0,014 | 0 | 0,2 | 5,9 | 248,1 |
| 006_M | 6,3 | 0,03 | < LQ | 11 | 165 | 7,4 | 22 | 0,013 | 0,34 | 0,2 | 0,08 | 980,4 |
| 006_S | 6,8 | 0,2 | < LQ | 12 | 317 | 8,31 | 5 | 0,014 | 0,03 | 0,3 | 0,52 | < LQ |
| 006_J | 6,6 | 0,07 | < LQ | 28 | 263 | 8,45 | 5 | 0,014 | 0 | 0,2 | 0,68 | 344,8 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|------|------|------|-------|------|----|-------|-------|------|-------|-------|
| 007_M | 6,0 | 0,02 | <LQ | 4 | 187 | 5,11 | 8 | 0,01 | 0,09 | 0,2 | 0,21 | 261,3 |
| 007_S | 6,7 | 0,5 | <LQ | 14 | 329 | 6,39 | 5 | 0,014 | 0,04 | 0,2 | 1,05 | <LQ |
| 007_J | 7,0 | 0,94 | <LQ | 8 | 330 | 6,12 | 3 | 0,024 | 0 | 0,3 | 0,52 | 10,7 |
| 008_M | 6,2 | <LQ | <LQ | 4 | 266 | 7,42 | 12 | 0,013 | 0,16 | 0,3 | 0,11 | 88,2 |
| 008_S | 6,3 | 0,06 | <LQ | 6 | 341 | 7,73 | 5 | 0,016 | 0 | 0,2 | 0,38 | 6,2 |
| 008_J | 6,4 | 0,08 | <LQ | 6 | 293 | 7,96 | 3 | 0,054 | 0,01 | 0,2 | 0,35 | 613,1 |
| 009_M | 6,8 | 0,02 | <LQ | 4 | 128 | 6,93 | 22 | 0,009 | 0,29 | 0,2 | 0,09 | 8,6 |
| 009_S | 6,8 | 0,08 | <LQ | 26 | 151 | 6,83 | 2 | 0,012 | 0,01 | 0,2 | 0,47 | 2 |
| 009_J | 6,9 | 0,04 | <LQ | 7 | 128 | 6,87 | 4 | 0,008 | 0,02 | 0,5 | 0,3 | 12,1 |
| 010_M | 6,5 | 0,17 | 0,04 | 7,9 | 119,6 | 5,18 | 20 | 0,012 | 0,4 | 0,5 | 0,07 | 18,1 |
| 010_S | 6,3 | 0,07 | 0,07 | 6,6 | 102,5 | 5,95 | 13 | 0,019 | 0,11 | 0,2 | 0,15 | 2 |
| 010_J | 6,9 | 0,04 | 0,17 | 6,6 | 110,4 | 5,48 | 18 | 0,014 | 0,19 | 0,2 | 0,33 | 307,6 |
| 011_M | 6,0 | 0,1 | 0,24 | 6 | 101,5 | 7,08 | 9 | 0,005 | 0,38 | 0,5 | 0,08 | 3 |
| 011_S | 6,0 | 0,05 | 0,12 | 25 | 93 | 7,87 | 2 | 0,008 | 0,04 | 0,2 | 0,79 | 3 |
| 011_J | 6,6 | 0,05 | 0,03 | 33 | 113,1 | 8,1 | 4 | 0,015 | 0,07 | 0,3 | 0,5 | <LQ |
| 012_M | 7,3 | 0,03 | 0,2 | 60 | 181 | 7,32 | 28 | 0,01 | 0,43 | 0,5 | 0,19 | 1986 |
| 012_S | 7,4 | 0,06 | 0,31 | 20 | 123 | 8,36 | 14 | 0,012 | 0,03 | 0,3 | 0,23 | <LQ |
| 012_J | 7,6 | 0,07 | 0,23 | 17 | 124 | 7,78 | 22 | 0,016 | 0,09 | 0,5 | 0,13 | 98,5 |
| 013_M | 6,3 | 0,31 | 0,56 | 4,3 | 60,2 | 8,46 | 9 | 0,011 | 0,23 | 0,6 | 0,05 | <LQ |
| 013_S | 6,8 | 0,02 | 0,22 | 8,1 | 65,2 | 8,51 | 6 | 0,011 | 0,04 | 0,2 | 2,8 | 5,2 |
| 013_J | 6,5 | 0,02 | 0,24 | 0,75 | 57,7 | 8,54 | 1 | 0,013 | 0,02 | 0,2 | 0,38 | 387,3 |
| 014_M | 6,8 | *** | 0,1 | 22,6 | *** | 5,7 | 5 | 1,512 | 0,958 | 0,7 | 0,044 | *** |
| 014_S | 6,8 | *** | 0,1 | 3,4 | *** | 5,5 | 5 | 0,571 | 0,89 | 0,26 | 0,316 | *** |
| 014_J | 6,9 | *** | 0,1 | 3,93 | *** | 5,8 | 5 | 0,84 | 0,089 | 0,2 | 0,504 | *** |
| 015_M | 6,4 | 0,54 | 0,71 | 17 | 73 | 8,58 | 8 | 0,026 | 0,21 | 0,6 | 0,1 | <LQ |
| 015_S | 6,6 | 0,09 | 0,23 | 7,6 | 57,3 | 6,25 | 3 | 0,018 | 0,03 | 0,2 | 0,12 | <LQ |
| 015_J | 6,6 | <LQ | 0,1 | 9 | 63,37 | 6,63 | 0 | 0,026 | 0,05 | 0,2 | 0,03 | 344,8 |
| 016_M | 6,3 | 1,4 | 1,54 | 5 | 61,1 | 6,86 | 7 | 0,025 | 0,08 | 0,6 | 0,03 | <LQ |
| 016_S | 6,1 | 0,05 | 0,34 | 4,8 | 88,8 | 8,69 | 5 | 0,015 | 0,74 | 0,2 | 0,73 | <LQ |
| 016_J | 6,3 | 0,07 | 0,29 | 3 | 56,8 | 8,02 | 5 | 0,013 | 0,05 | 0,2 | 0,2 | 225,4 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|------|------|------|-----|------|------|-------|-------|-----|-------|------|
| 017_M | 7,0 | 0,37 | 1 | 24 | 291 | 6,72 | 3 | 0,009 | 0,11 | 0,7 | 0,21 | 13,2 |
| 017_S | 6,9 | 0,04 | 0,25 | 6,9 | 271 | 8,42 | 1 | 0,014 | 0,01 | 0,3 | 0,09 | < LQ |
| 017_J | 7,0 | 0,06 | 0,31 | 8 | 274 | 8,26 | 2 | 0,019 | 0,13 | 0,7 | 0,19 | < LQ |
| 018_M | 8,0 | *** | 1,23 | 4 | 58 | 8 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,7 | 0,05 | 1 |
| 018_S | 6,8 | *** | 0,1 | 2,95 | 65 | 8,1 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,1 | 0,05 | < LQ |
| 018_J | 7,7 | *** | 0,03 | 3 | 89 | 7,7 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,3 | 0,3 | 93,3 |
| 019_M | 6,7 | 1,5 | 1,56 | 14 | 83 | 7,4 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,7 | 0,05 | 53,7 |
| 019_S | 6,5 | 0,2 | 0,1 | 3,01 | 99 | 7,5 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,4 | 0,05 | < LQ |
| 019_J | 6,6 | < LQ | 0,07 | 4 | 89 | 7,6 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,4 | 0,52 | < LQ |
| 020_M | 7,4 | *** | 0,1 | 5,69 | *** | 5,45 | 36,2 | 0,203 | 0,655 | 0,2 | 0,121 | *** |
| 020_S | 7,7 | *** | 0,7 | 3,67 | *** | 5,75 | 5 | 0,15 | 0,035 | 0,2 | 0,03 | *** |
| 020_J | 7,5 | *** | 0,1 | 3,44 | *** | 5,75 | 5 | 0,298 | 0,275 | 0,2 | 0,088 | *** |
| 021_M | 6,6 | *** | < LQ | 2 | 110 | 6,1 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,1 | 0,27 | 2420 |
| 021_S | 7,6 | *** | 0,05 | 4,01 | 117 | 7,8 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,2 | 1,2 | 27,2 |
| 021_J | 7,5 | *** | 0,04 | 2 | 133 | 8 | 10 | 0,1 | < LQ | 0,2 | 1,68 | 55,6 |

‡ PH = pH; CL = cloro livre (mg/L); CT = cloro total (mg/L), TU = turbidez (uT); CE = condutividade elétrica (mS/cm);

OD = oxigênio dissolvido (mg/L); CR = cor verdadeira (uC); AL = alumínio (mg/L); FE = ferro (mg/L); FT = fluoreto (mg/L); MN = manganês (mg/L); EC = E.coli (NMP/100 mL);

*** = análise não realizada / dado extraviado;

< LQ = menor do que o respectivo limite de quantificação;

OBS: os dados apresentados em cinza claro foram desconsiderados para efeito da PCA.

Na Tabela 12 podem ser conferidas as datas de coleta de cada amostra.

Tabela 12. Datas de coleta das respectivas amostras

| Amostras | Data |
|-----------------|-------------|
| 001_(M, S, J) | 22/06/2020 |
| 002_(M, S, J) | 14/07/2020 |
| 003_(M, S, J) | 27/07/2020 |
| 004_(M, S, J) | 10/08/2020 |
| 005_(M, S, J) | 25/08/2020 |
| 006_(M, S, J) | 22/09/2020 |
| 007_(M, S, J) | 05/10/2020 |
| 008_(M, S, J) | 05/11/2020 |
| 009_(M, S, J) | 08/12/2020 |
| 010_(M, S, J) | 12/01/2021 |
| 011_(M, S, J) | 11/02/2021 |
| 012_(M, S, J) | 11/03/2021 |
| 013_(M, S, J) | 22/04/2021 |
| 014_(M, S, J) | 10/05/2021 |
| 015_(M, S, J) | 18/05/2021 |
| 016_(M, S, J) | 10/06/2021 |
| 017_(M, S, J) | 15/07/2021 |
| 018_(M, S, J) | 19/08/2021 |
| 019_(M, S, J) | 09/09/2021 |
| 020_(M, S, J) | 01/10/2021 |
| 021_(M, S, J) | 07/10/2021 |

Dentre as variáveis disponíveis, optou-se por desconsiderar cloro livre e cloro combinado para fins da PCA. Muitos dados referentes a cloro total foram perdidos e, devido aos baixos valores encontrados, encontraram-se muitas incongruências analíticas, por exemplo, amostras que apresentaram concentrações de cloro livre mais altas do que as de cloro total. Com relação às amostras, desconsideraram-se aquelas que apresentaram dados faltantes em qualquer das variáveis medidas. É o caso das amostras 002, 003, 014 e 020. Para efeito do PCA, às medidas abaixo do limite de quantificação foi atribuído valor zero para efeito de simplificação e viabilidade. Ao final, o conjunto de dados efetivamente utilizado na PCA foi constituído por 51 amostras e 11 variáveis.

Os cálculos foram realizados utilizando-se o software livre Chemoface v1.65, disponível em <https://www.ufla.br/chemoface/>. (NUNES et al., 2012)

Realizou-se uma primeira PCA com todos os dados selecionados, contemplando montante, saída e jusante. É possível ver que não há muita redundância nos dados, já que para se atingir uma variância acumulada em torno de 90%, são necessárias no mínimo 7 componentes principais (PC). A PC 1 explica tão somente 20% da variância, sendo as demais ainda inferiores (Figura 3).

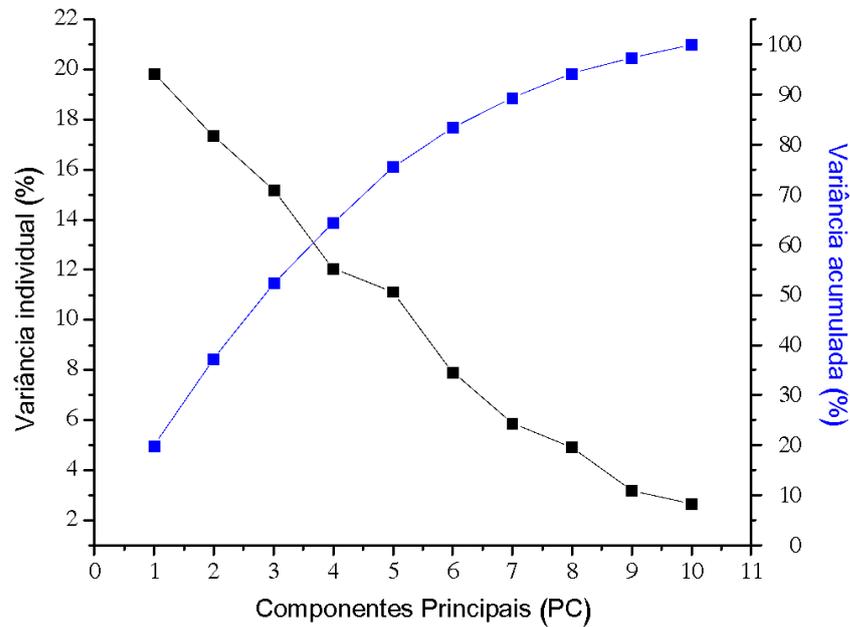


Figura 3. Variância individual e variância acumulada das componentes principais referentes à PCA preliminar, usando-se todos os dados selecionados

Visualmente, o gráfico de valores (*scores*) se apresentou pouco elucidativo (dado não apresentado), ainda que concordante com os resultados apresentados pelos testes *t* de Student. Diante deste resultado, optou-se por excluir dos dados brutos aqueles referentes à saída da ETL. Assim, calculou-se uma nova PCA somente com os dados de montante e jusante. Apesar de o conjunto de dados continuar complexo (baixa redundância) e apenas uma pequena melhora na variância explicada ser verificada (em geral, 2%), os resultados se mostraram graficamente melhores sob essa nova abordagem, estando aqui apresentados.

Rotulando-se os dados simplesmente pela sua classe (M = montante; J = jusante) é possível se ver nitidamente dois agrupamentos nos gráficos de valores (*scores*), conforme já evidenciado pelo teste *t* de Student. Na Figura 4, são visíveis os agrupamentos M e J quando se comparam PC 1 com PC 2.

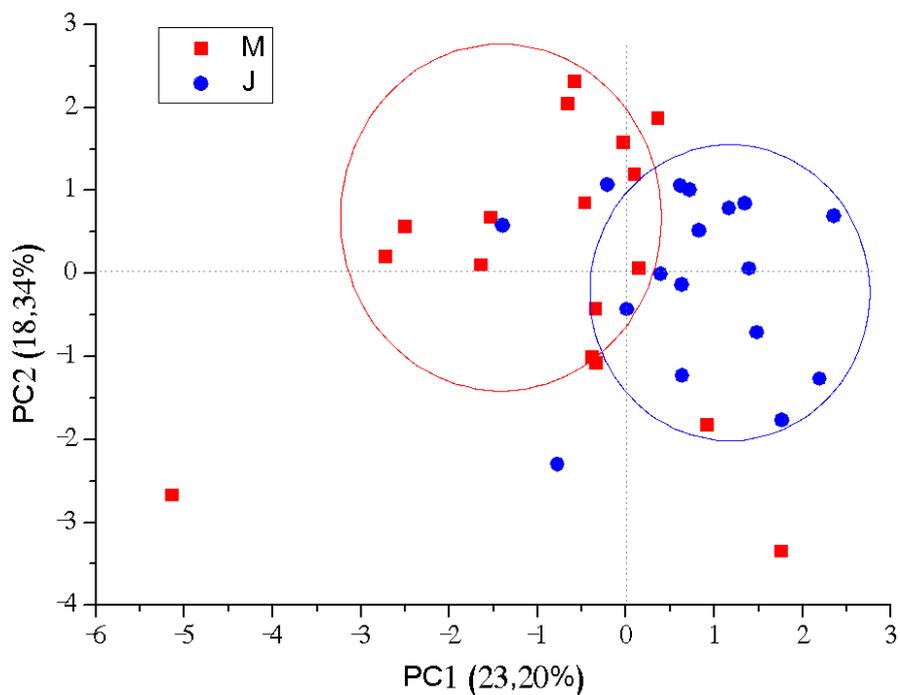


Figura 4. Valores (*scores*) da PCA somente com os dados à montante e à jusante da ETL, excluindo-se os dados de saída da mesma. PC1 (23,20%) versus PC2 (18,34%).

Na Figura 5 é possível verificar quais as variáveis que influenciaram ou “pesaram” mais (*loadings*) no agrupamento das amostras.

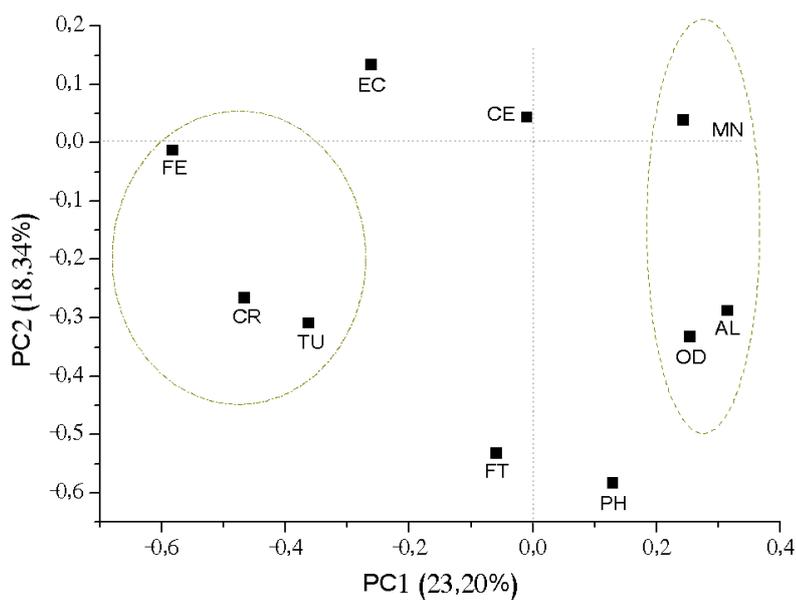


Figura 5. Disposição dos pesos (*loadings*) das variáveis para as componentes principais PC1 (23,20%) e PC2 (18,34%)

Uma análise da Figura 5 permite ver que a variável condutividade elétrica (CE) foi a que menos contribuiu no agrupamento das amostras, independentemente da PC escolhida, 1 ou 2. Com relação à PC1, vê-se forte influência dos metais, estando manganês (MN) e alumínio (AL) no extremo positivo, além do oxigênio dissolvido (OD). No extremo negativo, nota-se a maior influência de ferro (FE), seguida de cor e turbidez. Para a PC2 pesam fortemente os parâmetros fluoreto (FT) e pH (PH) no extremo negativo do eixo.

Percebe-se pela Figura 4 que a PC1 foi mais importante do que a PC2 na formação dos grupos. Assim, os dados brutos serão revisitados sob essa perspectiva. Os dados à jusante apresentam predominantemente maiores valores de manganês (MN), alumínio (AL), e oxigênio dissolvido (OD), comparativamente à montante. Admitindo-se que a maior influência sobre os resultados à jusante se deve à saída da ETL, presume-se que:

O alumínio adicionado a água montante estaria diretamente relacionado ao descarte da ETL uma vez que o coagulante utilizado no tratamento de água da ETA é o policloreto de alumínio (PAC), portanto tanto na etapa de lavagem de filtro como de decantador ocorre esse descarte.

Já com relação ao oxigênio dissolvido, existe um desnível no próprio descarte da ETA para a ETL (de aproximadamente 21 m), e em seguida da ETL para o córrego causando uma turbulência nos dois momentos e promovendo aeração da água e conseqüentemente um aumento no OD

No que diz respeito ao manganês este é o parâmetro de maior dificuldade para a ETL entende-se que na etapa de sedimentação da ETA o metal se precipita e é aprisionado no decantador, se acumulando pelo intervalo em que ocorrem as lavagens do decantador (aproximadamente 20 dias). No momento da lavagem os sólidos retidos (junto com o manganês) são enviados para a ETL e posteriormente para os rios.

No conjunto de dados analisados vemos que apesar de pontual houve um pico do valor apresentado para este parâmetro a jusante da estação de 5,8 mg/L sendo o máximo permitido pela legislação de 0,1 mg/L

Com relação à ferro (FE), cor (CR) e turbidez (TU), é nítida a tendência à diminuição nas águas à jusante, comparativamente à montante. Isso se deve a:

A ETL realiza o descarte do clarificado baseado nos seus valores de turbidez obtidos pelo operador da estação, sendo que este deve atender o mínimo de 20 NTU, no dia a dia esse valor é obtido com certa facilidade em aproximadamente 1h do início do processo de sedimentação nas células. Considerando que o descarte é de um volume relativamente expressivo tem-se a diluição das águas a montante o que explica os menores valores de turbidez e de cor a jusante.

Com relação ao ferro a principal atribuição encontrada é com relação ao próprio ferro existente no solo do corpo d'água e que posteriormente sofre diluição do descarte e apresenta os valores inferiores.

Existe um pluviômetro nas instalações da ETA que está localizada próxima ao corpo d'água receptor, de maneira que é possível observar os dados pluviométricos e sua relação com os valores de Ferro Dissolvido, conforme tabela 13

Tabela 13. Pluviometria e sua relação com o ferro no solo

| Amostras | Data | Pluviometria em 7 dias que antecederam a coleta | Pluviometria no dia da coleta | Ferro dissolvido (mg/L) |
|-----------------|-------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| 001_M | 22/06/2020 | Não | Não | <LQ |
| 004_M | 10/08/2020 | Não | Não | 0,17 |
| 005_M | 25/08/2020 | Sim, (14 mm acumulados) | Não | 0,09 |
| 006_M | 22/09/2020 | Não | Sim, (11 mm) | 0,34 |
| 007_M | 05/10/2020 | Não | Sim, (13 mm) | 0,09 |
| 008_M | 05/11/2020 | Sim, (10 mm acumulados) | Não | 0,16 |
| 009_M | 08/12/2020 | Sim, (80 mm acumulados) | Não | 0,29 |
| 010_M | 12/01/2021 | Sim, (72 mm acumulados) | Sim, (20 mm) | 0,4 |
| 011_M | 11/02/2021 | Sim, (66 mm acumulados) | Sim, (5 mm) | 0,38 |
| 012_M | 11/03/2021 | Sim, (8 mm acumulados) | Sim, (2 mm) | 0,43 |
| 013_M | 22/04/2021 | Não | Sim, (1 mm) | 0,23 |
| 015_M | 18/05/2021 | Sim, (12 mm acumulados) | Não | 0,21 |
| 016_M | 10/06/2021 | Sim, (10 mm acumulados) | Sim, (8 mm) | 0,08 |
| 017_M | 15/07/2021 | Não | Não | 0,11 |
| 018_M | 19/08/2021 | Sim, (5 mm acumulados) | Não | <LQ |
| 019_M | 09/09/2021 | Não | Não | <LQ |
| 021_M | 07/10/2021 | Sim, (17 mm acumulados) | Não | <LQ |

Percebe-se que para a maioria os valores abaixo do LQ não houve chuva no dia da coleta e os acumulados dos últimos sete dias foram baixos. Para os valores maiores percebe-se um certo volume de precipitação que poderia causar um arraste das bordas desprotegidas do córrego adicionando ferro às águas a montante que posteriormente são diluídas com o volume de descarte

do clarificado da ETL, e, portanto, apresentam valores menores a jusante. A intensidade das chuvas e a sua capacidade de arraste mecânico não é possível de ser avaliada pelos dados.

A respeito dos demais parâmetros, se torna difícil precisar, baseando-se nos dados presentes, alguma outra influência de relevância, sendo que os parâmetros que mais contribuem para uma diferenciação entre as águas à montante e à jusante são esses aqui discutidos.

5.3 Reutilização do clarificado

No caso da ETL que está sendo analisada neste trabalho, existe uma problemática de saturação da estação, que ocorre principalmente em épocas de estiagem e, portanto, piora de qualidade do manancial. Verifica-se um encurtamento da carreira de filtração dos filtros da ETA e também aumento da necessidade de lavagem de decantador, gerando, portanto, mais resíduos para a unidade desaguar e acondicionar nos BAGS para secagem.

Em determinados momentos essa problemática é significativa a ponto de a estação não comportar a quantidade de resíduos gerados e estes são encaminhados diretamente ao manancial sem a etapa de clarificação que ocorre na ETL.

Inicialmente o projeto da ETL previa a recirculação da água clarificada para o início do tratamento da ETA, entretanto recebeu-se a recomendação de monitoramento da água clarificada por pelo menos 1 ano para quantificação de organismos e metais pesados, essa prática deve-se ao fato do risco potencial de serem reinseridos no tratamento metais como alumínio, ferro e manganês, compostos orgânicos, e principalmente microrganismos patogênicos, como cistos de *Giardia spp.* e oocistos de *Cryptosporidium spp.*

Essa preocupação é apontada no Plano de Segurança da Água da unidade especialmente para o período de estiagem em que se tem uma piora da qualidade do manancial de captação.

No Brasil não existe regulamentação para a prática de recirculação de água de lavagem de filtros e decantadores. As condições de captação dos mananciais são muitas vezes críticas, portanto, essas práticas usuais de recirculação de águas de lavagem de filtros sem quaisquer tratamentos prévios podem trazer um risco a saúde pública gerando uma água imprópria para consumo humano. Nessas condições não é possível afirmar a efetividade dos planos de segurança da qualidade com esse tipo de prática. (HESPANHOL, 2019)

Nos EUA após relatos de surtos de giardíase e criptosporidiose foi estabelecido pela EPA – *Environmental Protection Agency*, em 2002 um manual com as práticas exigidas para recirculação de água de lavagem de filtros. No estado da Califórnia nos EUA uma das estratégias para assegurar

a segurança dessa água clarificada retornar à estação é de que ela apresente uma turbidez inferior a 2 NTU (USEPA, 2002).

A fim de verificar essa condição de turbidez menor que 2 NTU foi realizado em dezembro de 2020 um teste experimental dentro da própria estação com a ALF de um dos filtros lavado no dia em questão.

O teste consistiu em um jar test a partir de uma amostra composta no tempo, onde durante toda a lavagem de um filtro da ETA, coletava-se um volume de 500mL a cada 1min da canaleta pelo qual passam os resíduos antes do encaminhamento a ETL, depois de homogeneizada a amostra foi colocada em cubas de jar test com variação do polímero adicionado em cada cuba, depois de passar pela agitação rápida, simulando um possível ponto de aplicação antes das células de clarificação os efluentes das cubas foram transferidos para cones imhoff e esperados 1h20min para decantação. O melhor valor obtido para o clarificado sobrenadante foi de 7,8 NTU com dosagem de polímero de 10,0 mg/g SST Lodo, sendo que o controle (sem polímero) apresentou uma turbidez de 10,8 NTU, a amostra bruta apresentava turbidez inicial de 96,5 NTU.

Neste caso, percebe-se uma redução expressiva no processo de sedimentação, porém se desejado atingir o valor de turbidez inferior a 2 NTU outros cenários poderiam ser explorados. Por exemplo, a implementação de um sistema de agitação lenta que beneficie o processo de sedimentação.

6 Conclusão

A ETL gera dois tipos de resíduos, a água clarificada e o lodo adensado, para ambos a estratégia adotada é apenas de disposição final, percebe-se que alguns fatores poderiam ser previamente estudados e aplicados, como a reciclagem do BAG usado e a utilização da água clarificada para fins de reuso. Práticas que trariam ganhos financeiros e ambientais.

Com relação a legislação o parâmetro que desenquadra a estação é o manganês, é constatado que este metal é precipitado e fica retido principalmente na etapa de sedimentação da ETA, mas o fenômeno não volta a se repetir nas células de clarificação da ETL. Sugere-se que sejam avaliadas medidas que forcem esse fenômeno nesta etapa da disposição da ETL, fazendo por exemplo um ponto de aplicação de polímero no próprio encaminhamento dos resíduos da ETA a ETL assim o processo de clarificação nas células seria facilitado. Considerando que esta medida fosse adotada, estudos de turbidez poderiam ser aplicados ao clarificado para garantir valores que assegurem a qualidade da água em um processo de recirculação. Ainda seria fundamental que esse polímero possuísse a NBR necessária para aplicação em tratamento de água.

Outro parâmetro que deve ser observado com relação a legislação é o cloro total. Conforme o apontado no tópico 5.4 em períodos de alta demanda de cloro da ETA a ETL passa a descartar o clarificado sem atender o valor máximo de 0,01 mg/L estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 (CONAMA, 2005). Para tanto sugere-se estudos do decaimento de cloro para que o parâmetro para descarte do clarificado da unidade não seja apenas com base na turbidez mas também nos valores de cloro total, já que este é perdido com a luz e calor recebidos nas células de clarificação e desta forma poderia atender o estabelecido em legislação.

Os testes estatísticos realizados demonstraram as variáveis mais contribuintes para uma mudança do corpo d'água receptor e como elas se comportam além de conforme verificado pelo teste t pareado o pH atua nas suas características. Sendo assim ressalta-se a importância de estudos relativos a turbidez e a presença de protozoários na água clarificada para que seja feita a recirculação para a ETA.

7 Referências

ACHON, CALI LAGUNA; BARROSO, MARCELO MELO; CORDEIRO, JOÃO SÉRGIO. Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 54-62, mar. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522008000100008>.

ACHON, CALI LAGUNA; CORDEIRO, JOÃO SÉRGIO. Destinação e disposição final de lodo gerado em ETA - LEI 12.305/2010. XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 45º Assembléia Nacional do ASSEMAE, 24 a 29 de maio de 2015, Poços de Caldas. 8p.

AHMAD, TARIQUE; AHMAD, KAFEEL; ALAM, MEHTAB. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. Environmental Monitoring And Assessment, [S.L.], v. 189, n. 9, 15 ago. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-6166-1>.

ARAÚJO, A.M. DE. (2006) Avaliação operacional e características do lodo gerado na indústria da água do litoral sul de Pernambuco. 136f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 54487, de 26 de junho de 2009. . São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR - 10.004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004(a). 33p. (Em revisão)

AZEVEDO, CAIO; MEDEIROS, ESDRAS; LIRA, JORGE; SILVA, ROMILDO. Visualizing and Understanding Large-Scale Assessments in Mathematics through Dimensionality Reduction. Department Of Mathematics, Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brazil: IME – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brazil, nov. 2021.

BARROSO, MARCELO MELO. Influência das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas no Desaguamento por leito de drenagem. 2007. 249 f. Tese (Doutorado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAZAR, ROBERT A.. An Exercise on Chemometrics for a Quantitative Analysis Course. Journal Of Chemical Education, [S.L.], v. 80, n. 9, p. 1026, set. 2003. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ed080p1026>.

CHALHOUB, AYDASAMIH; LOURENÇO, EDNEIA SANTOS DE OLIVEIRA; FILLA, JULIO CÉSAR; FARIA JUNIOR, EDI; MADALOZZO, IEDO LOURENÇO. Incorporação do lodo de ETA na fabricação de tijolos. 2º Congresso de Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu, 28 maio 2019. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/XII-048.pdf>. Acesso em: 31 maio 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria nº 363/2011/E, de 07 de dezembro de 2011. São Paulo, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasil, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357,

de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasil, 2011.

CORDEIRO, JOÃO SÉRGIO. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: PROSAB (org.). Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: Rima, 2001. p. 1-257. Disponível em: <http://finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/CLeverson.pdf>. Acesso em: 31 maio 2021.

CREMADES, L.V.; CUSIDÓ, J.A.; ARTEAGA, F..Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 201, p. 1071-1080, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>.

DI BERNARDO, L., DI BERNARDO, A., CENTURIONE FILHO, P. L., (2002). Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. RiMa Editora, São Carlos, 237p.

ERDOGMUS, ERTUGRUL; HARJA, MARIA; GENCEL, OSMAN; SUTCU, MUCAHIT; YARAS, ALI. New construction materials synthesized from water treatment sludge and fired clay brick wastes. *Journal Of Building Engineering*, [S.L.], v. 42, p. 102471, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102471>.

FONTANA, A. O.; CORDEIRO, J. S.; ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; REIS, R. F.Desaguamento de lodos de ETAs: experiências bem-sucedidas comimplantação de leito de drenagem. In: ENCONTRO NACIONAL DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, 1., 2021, Online. Anais. Online: Ita/Unesp/Usp, 2021. p. 151-154.

GUERRA, RICARDO CONSIGLIERO; ANGELIS, DEJANIRA DE FRANCESCHI DE. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. *Arq. Inst. Biol.*, São Paulo, v. 72, n. 1, p. 87-91, mar. 2005.

HENDGES, LETIANE THOMAS; REINHER, ROSELAINÉ CRISTINA REJEI; LEICHTWEIS, JANDIRA; FERNANDES, ÉDINAJAÍNE; TONES, ALINE RAQUEL MULLER.

Disposição final de lodo de estação de tratamento de água e de esgoto: uma revisão. Anais. 9º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão - SIEPE, Santana do Livramento, 21 a 23 nov. 2017.

HESPANHOL, IVANILDO. Considerações sobre a Portaria 2914/2011, sobre os Planos de Segurança da Qualidade da Água, sobre os anexos XX e XXI da Portaria de Consolidação 5/2017 do SUS, e sobre uma Proposta para Implementar um Novo Paradigma para Regulamentação com base em Variáveis Sub-rogadas. Revista Dae, Online, v. 67, n. 217, p. 17-33, maio 2019.

HOPPEN, CINTHYA; PORTELLA, KLEBER F.; JOUKOSKI, ALEX; TRINDADE, EDUARDO M.; ANDREÓLI, CLÉVERSONV.. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental. Química Nova, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 79-84, fev. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422006000100016>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.

LIBÂNIO, MARCELO. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010. 494 p.

LUSTOSA, JORDANNA B.; BRACARENSE, DALTON C.; CASTRO, FABIO MOREIRA S. DE; QUEIROZ, SÉRGIO CARLOS BERNARDO; SILVA, GIULLIANO GUIMARÃES. Tratamento e aproveitamento de água de lavagem de filtro em estação de tratamento de água. Revista Dae, [S.L.], v. 65, n. 206, p. 44-61, 2017. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2016.027>.

MARASCHIN, MANOEL; FERRARI, KEILA FERNANDA HEDLUND; CARISSIMI, ELVIS. Acidification and flocculation of sludge from a water treatment plant: new action mechanisms. Separation And Purification Technology, [S.L.], v. 252, p. 117417, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117417>.

MARTINS JÚNIOR, ANTÔNIO CARLOS DE OLIVEIRA; REINA, VIVIANA PARADA; SOUZA, FABIANE BERNARDI DE; SILVA, MARIA CRISTINA DE ALMEIDA; BENETTI,

ANTÔNIO DOMINGUES. Teor de sólidos e manejo de lodo de diferentes tecnologias de tratamento. In: ENCONTRO NACIONAL DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, 1., 2021, Online. Anais. Online: Ita/Unesp/Usf, 2021. p. 46-49.

MATTOS, M., & GIRARD, L. (2013). Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais (Online)*, (28), 34-43. Recuperado de http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/289

MILLER, JAMES N; MILLER, JANE C. *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2005.

MORELLO, CAROLINE GRACIANA; CANSIAN, DANIELLI CASARIN VILELA; SILVA, TAÍS LARISSA; LAUTENSCHLAGER, SANDRO ROGÉRIO. Compostagem orgânica utilizando como substrato resíduos da poda urbana com lodo de eta. VII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar, Maringá, out. 2011. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/Assets/Downloads/05-05-2014-10-48Compostagem-organica-utilizando-como-substrato-residuos-de-poda-urbana-com-lodo-de-ETA.pdf>. Acesso em: 31 maio 2021.

MOTTA SOBRINHO, MAURÍCIO ALVES DA; TAVARES, ROSÂNGELA GOMES; ARRUDA, VALMIR CRISTIANO MARQUES DE; CORREA, MARCUS METRI; PEREIRA, LUCIANA JOSÉ RIBEIRO. Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 761-771, ago. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019175810>.

NAIR, A.T., AHAMMED, M.M. Influence of sludge characteristics on coagulant recovery from water treatment sludge: a preliminary study. *J Mater Cycles Waste Manag* 19, 1228–1234 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0513-0>

NUNES, CLEITON A.; FREITAS, MATHEUS P.; PINHEIRO, ANA CARLA M.; BASTOS, SABRINA C. Chemoface: a Novel Free User-Friendly Interface for Chemometrics. *J. Braz. Chem. Soc, Online*, v. 23, n. 11, p. 2004-2010, nov. 2012.

PAFFRATH, SILVIA FERNANDA; ETCHEPARE, RAMIRO GONÇALVES. Parâmetros de interferência na tratabilidade do lodo de estações de tratamento de água. In: ENCONTRO NACIONAL DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, 1., 2021, Online. Anais [...] . Online: Ita/Unesp/Usp, 2021. p. 43-46

PROSAB. PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Rio de Janeiro: PROSAB. 1999. Disponível em:<http://finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosabrealifinal.pdf>. Acesso em: 28 maio 2021.

QUINTANA, G.O.; FAGNANI, E.; CANDELLO, F.P.; GUIMARÃES, J.R. The dichromate method versus the photoelectrochemical method: the synergistic influence of turbidity and chlorides on chemical oxygen demand analysis. Journal of the Brazilian Chemical Society, vol. 29, no. 3, p. 490–498, 2018. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170161>.

REN, BAIMING; ZHAO, YAQIAN; JI, BIN; WEI, TING; SHEN, CHENG. Granulation of Drinking Water Treatment Residues: recent advances and prospects. Water, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1400, 14 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12051400>.

RITCHER, CARLOS A.. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Blucher, 2001. 101 p.

RIBEIRO, FREDERICO LUIZ DE MATOS. Quantificação e Caracterização Química dos Resíduos da ETA de Itabirito -MG. 2007. 260 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SAMPAIO, D. M.; MENDES, K. G. P.; NEITZEL, L. H.; GONÇALVES, C. V. C. Caracterização do LETA da ETA Santa Bárbara (Pelotas, RS). In: ENCONTRO NACIONAL DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, 1., 2021, Online. Anais. Online: Ita/Unesp/Usp, 2021. p. 24-27.

SCALIONI, ANTHONY BAHIA; URASHIMA, DENISE DE CARVALHO; GUIMARÃES, MAGGEISIELLY ALVES. Análise do Condicionamento Químico de Resíduos com Alto Teor de Líquido por Ensaio de Cone: estudo de caso com lodo de ETA. Brazilian Journal

Of Development, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 25280-25292, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-109>.

SHAKYA, ARVINDKUMAR; BHANDE, RANJEETA; GHOSH, PRANABKUMAR. A practical approach on reuse of drinking water treatment plant residuals for fluoride removal. Environmental Technology, [S.L.], v. 41, n. 22, p. 2907-2919, 19 mar. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2019.1588383>.

SILVA, ANGÉLICA DOS SANTOS; HEMSI, PAULO SCARANO. Adição de cal a um lodo de eta visando melhoria da resistência para uso em cobertura diária de aterros sanitários. In: ENCONTRO NACIONAL DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, 1., 2021, Online. Anais [...] .Online: Ita/Unesp/Usp, 2021. p. 50-53.

SMOLLEN, MARYLA; KAFAAR, ACHMAD. Electroosmotically enhanced sludge dewatering: pilot-plant study. Water Science And Technology, [S.L.], v. 30, n. 8, p. 159-168, 1 out. 1994. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.1994.0402>.

SOARES, ALEXANDRA FÁTIMA SARAIVA; SILVA, LUÍS FERNANDO DE MORAIS; ARAÚJO, BÁRBARA JANINE REIS SILVA. Poluição hídrica ocasionada pelo lodo gerado em estação de tratamento de água para potabilização. 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Gramado, 12 a 14 de junho de 2018.

SOUZA, SAMIRIA TESSAROLLI; ARDILA, MARIA ALEJANDRA APARICIO; SILVA, JEFFERSON LINS. Evolução do teor de sólidos de lodo de ETA após desaguamento em tubos geotêxteis não tecidos. In: encontro nacional de lodo de estação de tratamento de água, 1., 2021, Online. Anais [...] .Online: Ita/Unesp/Usp, 2021. p. 163-165.

STEVEN, DENTEL. Perspectives on Holistic Sludge Management. HOLISTIC SLUDGE MANAGEMENT, Västerås Sweden. 6 a 8 de Maio 2013.

THOMPSON, PHILLIP L.; PAULSON, WAYNE L.. Dewaterability of alum and ferric coagulation sludges. Journal - American Water Works Association, [S.L.], v. 90, n. 4, p. 164-171, abr. 1998. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.1998.tb08419.x>.

TURNER, TOMI; WHEELER, REBECCA; STONE, ADAM; OLIVER, IAN. Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: remaining barriers and questions.:a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, [S.L.], v. 230, n. 9, p. 227, set. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-019-4272-0>.

TSUTIYA, MILTON TOMOYUKI; HIRATA, ANGÉLICA YUMI. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. *Anais. São Paulo: ABES*, 2001.

VON SPERLING, MARCOS. Coliformes e pH - médias aritméticas, médias geométricas e medianas. 2001. *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental [...]. João Pessoa - PB: ABES*, 2001. p. 1–7.

WANG, CHANGHUI; WEI, ZHAO; LIU, RUI; BAI, LEILEI; JIANG, HELONG; YUAN, NANNAN. The sequential dewatering and drying treatment enhanced the potential favorable effect of microbial communities in drinking water treatment residue for environmental recycling. *Chemosphere*, [S.L.], v. 262, p. 127930, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127930>.

8 Apêndice

Apêndice – Dados brutos e teste *t* de dados pareados dos parâmetros de análise da ETL segundo as amostras obtidas para os três pontos de coleta: montante da estação, saída da estação e jusante da estação.

Tabela 14. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável cloro livre, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de Cloro Livre medidos | | |
|------------|--------------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 14/07/2020 | 0,05 | 0,30 | 0,06 |
| 10/08/2020 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| 25/08/2020 | 0,01 | 0,07 | 0,07 |
| 22/09/2020 | 0,03 | 0,20 | 0,07 |
| 05/10/2020 | 0,02 | 0,50 | 0,94 |
| 05/11/2020 | 0,00 | 0,06 | 0,08 |
| 08/12/2020 | 0,02 | 0,08 | 0,04 |
| 12/01/2021 | 0,17 | 0,07 | 0,04 |
| 11/02/2021 | 0,10 | 0,05 | 0,05 |
| 11/03/2021 | 0,03 | 0,06 | 0,07 |
| 22/04/2021 | 0,31 | 0,02 | 0,02 |
| 18/05/2021 | 0,54 | 0,09 | 0,00 |
| 10/06/2021 | 1,40 | 0,05 | 0,07 |
| <i>n</i> | 14 | 14 | 14 |
| Máx | 1,4 | 0,5 | 0,9 |
| Min | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Média | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| DP | 0,4 | 0,1 | 0,2 |
| DPR(%) | 198,6 | 122,7 | 221,9 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo.

Tabela 15. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável cloro livre (*n* = 14, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 0,65 | 2,14 | ACEITA |
| 2 | M,J | 0,65 | 1,76 | ACEITA |
| 3 | S,M | 0,70 | 2,14 | ACEITA |
| 4 | S,J | 0,07 | 2,14 | ACEITA |

Tabela 16. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável cloro total, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de Cloro Total medidos | | |
|------------|--------------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 0,00 | 0,44 | 0,31 |
| 14/07/2020 | 0,09 | 0,40 | 0,10 |
| 27/07/2020 | 0,06 | 0,11 | 0,09 |
| 10/08/2020 | 0,00 | 0,00 | 0,03 |
| 25/08/2020 | 0,04 | 0,10 | 0,04 |
| 22/09/2020 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 05/10/2020 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 05/11/2020 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 08/12/2020 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12/01/2021 | 0,04 | 0,07 | 0,17 |
| 11/02/2021 | 0,24 | 0,12 | 0,03 |
| 11/03/2021 | 0,20 | 0,31 | 0,23 |
| 22/04/2021 | 0,56 | 0,22 | 0,24 |
| 10/05/2021 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 18/05/2021 | 0,71 | 0,23 | 0,10 |
| 10/06/2021 | 1,54 | 0,34 | 0,29 |
| <i>n</i> | 16 | 16 | 16 |
| Máx | 1,5 | 0,4 | 0,3 |
| Min | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Média | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| DP | 0,4 | 0,2 | 0,1 |
| DPR(%) | 182,9 | 99,6 | 99,6 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 17. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável cloro total (*n* = 21, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 2,25 | 2,09 | REJEITADA |
| 2 | M,J | 2,25 | 1,72 | REJEITADA |
| 3 | S,M | 1,56 | 2,09 | ACEITA |
| 4 | S,J | 2,01 | 2,09 | ACEITA |

Tabela 18. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável turbidez, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de turbidez medidos | | |
|------------|-----------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 11,0 | 5,0 | 6,0 |
| 14/07/2020 | 35,0 | 7,0 | 17,0 |
| 27/07/2020 | 7,0 | 5,0 | 5,0 |
| 10/08/2020 | 6,0 | 3,0 | 4,0 |
| 25/08/2020 | 5,0 | 4,0 | 4,0 |
| 22/09/2020 | 11,0 | 12,0 | 28,0 |
| 05/10/2020 | 4,0 | 14,0 | 8,0 |
| 05/11/2020 | 4,0 | 6,0 | 6,0 |
| 08/12/2020 | 4,0 | 26,0 | 7,0 |
| 12/01/2021 | 7,9 | 6,6 | 6,6 |
| 11/02/2021 | 6,0 | 25,0 | 33,0 |
| 11/03/2021 | 60,0 | 20,0 | 17,0 |
| 22/04/2021 | 4,3 | 8,1 | 0,8 |
| 10/05/2021 | 22,6 | 3,4 | 3,9 |
| 18/05/2021 | 17,0 | 7,6 | 9,0 |
| 10/06/2021 | 5,0 | 4,8 | 3,0 |
| <i>n</i> | 16 | 16 | 16 |
| Máx | 60,0 | 26,0 | 33,0 |
| Min | 4,0 | 3,0 | 0,8 |
| Média | 13,1 | 9,8 | 9,9 |
| DP | 15,1 | 7,5 | 9,2 |
| DPR(%) | 115,1 | 76,6 | 93,3 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 19. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável turbidez (*n* = 16, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 0,84 | 2,13 | ACEITA |
| 2 | M,J | 0,84 | 1,74 | ACEITA |
| 3 | S,M | 0,83 | 2,13 | ACEITA |
| 4 | S,J | 0,03 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 20. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável condutividade elétrica, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de condutividade elétrica medidos | | |
|------------|---|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 92,0 | 199,0 | 199,0 |
| 14/07/2020 | 333,0 | 72,0 | 81,0 |
| 27/07/2020 | 97,0 | 60,0 | 84,0 |
| 10/08/2020 | 103,0 | 102,0 | 105,0 |
| 25/08/2020 | 147,0 | 208,0 | 208,0 |
| 22/09/2020 | 165,0 | 317,0 | 263,0 |
| 05/10/2020 | 187,0 | 329,0 | 330,0 |
| 05/11/2020 | 266,0 | 341,0 | 293,0 |
| 08/12/2020 | 128,0 | 151,0 | 128,0 |
| 12/01/2021 | 119,6 | 102,5 | 110,4 |
| 11/02/2021 | 101,5 | 93,0 | 113,1 |
| 11/03/2021 | 181,0 | 123,0 | 124,0 |
| 22/04/2021 | 60,2 | 65,2 | 57,7 |
| 18/05/2021 | 73,0 | 57,3 | 63,4 |
| 10/06/2021 | 61,1 | 88,8 | 56,8 |
| <i>n</i> | 15 | 15 | 15 |
| Máx | 333,0 | 341,0 | 330,0 |
| Min | 60,2 | 57,3 | 56,8 |
| Média | 141,0 | 153,9 | 147,8 |
| DP | 76,7 | 101,5 | 89,1 |
| DPR(%) | 54,4 | 65,9 | 60,3 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 21. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável condutividade elétrica (*n* = 15, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 0,29 | 2,13 | ACEITA |
| 2 | M,J | 0,29 | 1,74 | ACEITA |
| 3 | S,M | 0,51 | 2,13 | ACEITA |
| 4 | S,J | 1,04 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 22. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável oxigênio dissolvido, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de oxigênio dissolvido medidos | | |
|------------|--|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 6,3 | 8,3 | 8,1 |
| 27/07/2020 | 5,7 | 8,2 | 7,9 |
| 10/08/2020 | 6,2 | 7,9 | 7,8 |
| 25/08/2020 | 6,3 | 8,3 | 8,3 |
| 22/09/2020 | 7,4 | 8,3 | 8,5 |
| 05/10/2020 | 5,1 | 6,4 | 6,1 |
| 05/11/2020 | 7,4 | 7,7 | 8,0 |
| 08/12/2020 | 6,9 | 6,8 | 6,9 |
| 12/01/2021 | 5,2 | 6,0 | 5,5 |
| 11/02/2021 | 7,1 | 7,9 | 8,1 |
| 11/03/2021 | 7,3 | 8,4 | 7,8 |
| 22/04/2021 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| 10/05/2021 | 5,7 | 5,5 | 5,8 |
| 18/05/2021 | 8,6 | 6,3 | 6,6 |
| 10/06/2021 | 6,9 | 8,7 | 8,0 |
| <i>n</i> | 15 | 15 | 15 |
| Máx | 8,6 | 8,7 | 8,5 |
| Min | 5,1 | 5,5 | 5,5 |
| Média | 6,7 | 7,5 | 7,5 |
| DP | 1,1 | 1,1 | 1,0 |
| DPR(%) | 15,8 | 14,0 | 13,4 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 23. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável oxigênio dissolvido (*n* = 15, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 2,81 | 2,13 | REJEITADA |
| 2 | M,J | 2,81 | 1,74 | REJEITADA |
| 3 | S,M | 2,68 | 2,13 | REJEITADA |
| 4 | S,J | 1,00 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 24. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável cor verdadeira, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de cor verdadeira medidos | | |
|------------|-----------------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 4,0 | 1,0 | 1,0 |
| 14/07/2020 | 17,0 | 1,0 | 2,0 |
| 27/07/2020 | 6,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10/08/2020 | 4,0 | 0,0 | 5,0 |
| 25/08/2020 | 6,0 | 5,0 | 6,0 |
| 22/09/2020 | 22,0 | 5,0 | 5,0 |
| 05/10/2020 | 8,0 | 5,0 | 3,0 |
| 05/11/2020 | 12,0 | 5,0 | 3,0 |
| 08/12/2020 | 22,0 | 2,0 | 4,0 |
| 12/01/2021 | 20,0 | 13,0 | 18,0 |
| 11/02/2021 | 9,0 | 2,0 | 4,0 |
| 11/03/2021 | 28,0 | 14,0 | 22,0 |
| 22/04/2021 | 9,0 | 6,0 | 1,0 |
| 10/05/2021 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| 18/05/2021 | 8,0 | 3,0 | 0,0 |
| 10/06/2021 | 7,0 | 5,0 | 5,0 |
| <i>n</i> | 21 | 21 | 21 |
| Máx | 28,0 | 14,0 | 22,0 |
| Min | 4,0 | 0,0 | 0,0 |
| Média | 11,7 | 4,5 | 5,3 |
| DP | 7,6 | 4,0 | 6,1 |
| DPR(%) | 65,1 | 90,0 | 116,3 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 25. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável cor verdadeira (*n* = 16, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 4,36 | 2,13 | REJEITADA |
| 2 | M,J | 4,36 | 1,74 | REJEITADA |
| 3 | S,M | 4,66 | 2,13 | REJEITADA |
| 4 | S,J | 0,93 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 26. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável alumínio dissolvido, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de alumínio medidos | | |
|------------|-----------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 0,019 | 0,015 | 0,017 |
| 14/07/2020 | 0,012 | 0,012 | 0,022 |
| 27/07/2020 | 0,012 | 0,011 | 0,011 |
| 10/08/2020 | 0,040 | 0,072 | 0,017 |
| 25/08/2020 | 0,008 | 0,010 | 0,014 |
| 22/09/2020 | 0,013 | 0,014 | 0,014 |
| 05/10/2020 | 0,010 | 0,014 | 0,024 |
| 05/11/2020 | 0,013 | 0,016 | 0,054 |
| 08/12/2020 | 0,009 | 0,012 | 0,008 |
| 12/01/2021 | 0,012 | 0,019 | 0,014 |
| 11/02/2021 | 0,005 | 0,008 | 0,015 |
| 11/03/2021 | 0,010 | 0,012 | 0,016 |
| 22/04/2021 | 0,011 | 0,011 | 0,013 |
| 10/05/2021 | 1,512 | 0,571 | 0,840 |
| 18/05/2021 | 0,026 | 0,018 | 0,026 |
| 10/06/2021 | 0,025 | 0,015 | 0,013 |
| <i>n</i> | 16 | 16 | 16 |
| Máx | 1,5 | 0,6 | 0,8 |
| Min | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Média | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| DP | 0,4 | 0,1 | 0,2 |
| DPR(%) | 344,8 | 268,4 | 294,3 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 27. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável alumínio dissolvido (*n* = 16, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 0,91 | 2,13 | ACEITA |
| 2 | M,J | 0,91 | 1,74 | ACEITA |
| 3 | S,M | 0,96 | 2,13 | ACEITA |
| 4 | S,J | 1,04 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 28. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável ferro dissolvido, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de ferro dissolvido medidos | | |
|------------|-------------------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 14/07/2020 | 1,1 | 0,1 | 0,1 |
| 27/07/2020 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |
| 10/08/2020 | 0,2 | 0,0 | 0,2 |
| 25/08/2020 | 0,1 | 0,5 | 0,0 |
| 22/09/2020 | 0,3 | 0,0 | 0,0 |
| 05/10/2020 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 05/11/2020 | 0,2 | 0,0 | 0,0 |
| 08/12/2020 | 0,3 | 0,0 | 0,0 |
| 12/01/2021 | 0,4 | 0,1 | 0,2 |
| 11/02/2021 | 0,4 | 0,0 | 0,1 |
| 11/03/2021 | 0,4 | 0,0 | 0,1 |
| 22/04/2021 | 0,2 | 0,0 | 0,0 |
| 10/05/2021 | 1,0 | 0,9 | 0,1 |
| 18/05/2021 | 0,2 | 0,0 | 0,1 |
| 10/06/2021 | 0,1 | 0,7 | 0,1 |
| <i>n</i> | 16 | 16 | 16 |
| Máx | 1,1 | 0,9 | 0,2 |
| Min | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Média | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| DP | 0,3 | 0,3 | 0,1 |
| DPR(%) | 97,4 | 173,9 | 117,1 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 29. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável ferro dissolvido (*n* = 16, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 3,49 | 2,13 | REJEITADA |
| 2 | M,J | 3,49 | 1,74 | REJEITADA |
| 3 | S,M | 1,76 | 2,13 | ACEITA |
| 4 | S,J | 1,49 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 30. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável flúor, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de flúor medidos | | |
|------------|--------------------------|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 0,1 | 0,3 | 0,3 |
| 14/07/2020 | 0,4 | 0,2 | 0,2 |
| 10/08/2020 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 25/08/2020 | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| 22/09/2020 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| 05/10/2020 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| 05/11/2020 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 08/12/2020 | 0,2 | 0,2 | 0,5 |
| 12/01/2021 | 0,5 | 0,2 | 0,2 |
| 11/02/2021 | 0,5 | 0,2 | 0,3 |
| 11/03/2021 | 0,5 | 0,3 | 0,5 |
| 22/04/2021 | 0,6 | 0,2 | 0,2 |
| 10/05/2021 | 0,7 | 0,3 | 0,2 |
| 18/05/2021 | 0,6 | 0,2 | 0,2 |
| 10/06/2021 | 0,6 | 0,2 | 0,2 |
| <i>n</i> | 15 | 15 | 15 |
| Máx | 0,7 | 0,3 | 0,5 |
| Min | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Média | 0,4 | 0,2 | 0,3 |
| DP | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| DPR(%) | 56,8 | 24,3 | 44,4 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 31. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável flúor (*n* = 15, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 1,89 | 2,13 | ACEITA |
| 2 | M,J | 1,89 | 1,74 | REJEITADA |
| 3 | S,M | 2,83 | 2,13 | REJEITADA |
| 4 | S,J | 1,37 | 2,13 | ACEITA |

Tabela 32. Dados brutos e cálculos estatísticos preliminares com relação à variável *Escherichia coli*, medida no período compreendido entre junho de 2020 e junho de 2021

| Data | Valores de <i>Escherichia Coli</i> medidos | | |
|------------|--|-------|---------|
| | Montante | Saída | Jusante |
| 22/06/2020 | 172,0 | 2,0 | 0,0 |
| 14/07/2020 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 27/07/2020 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 10/08/2020 | 1553,1 | 0,0 | 816,4 |
| 25/08/2020 | 204,6 | 5,2 | 248,1 |
| 22/09/2020 | 980,4 | 0,0 | 344,8 |
| 05/10/2020 | 261,3 | 0,0 | 10,7 |
| 05/11/2020 | 88,2 | 6,2 | 613,1 |
| 08/12/2020 | 8,6 | 2,0 | 12,1 |
| 12/01/2021 | 18,1 | 2,0 | 307,6 |
| 11/02/2021 | 3,0 | 3,0 | 0,0 |
| 11/03/2021 | 1986,3 | 0,0 | 98,5 |
| 22/04/2021 | 0,0 | 5,2 | 387,3 |
| 18/05/2021 | 0,0 | 0,0 | 344,8 |
| 10/06/2021 | 0,0 | 0,0 | 225,4 |
| <i>n</i> | 15 | 15 | 15 |
| Máx | 1986,3 | 6,2 | 816,4 |
| Min | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Média | 351,7 | 1,7 | 227,3 |
| DP | 633,1 | 2,2 | 249,6 |
| DPR(%) | 180,0 | 130,9 | 109,8 |

n = número de pontos; *DP* = desvio padrão; *DPR* = desvio padrão relativo

Tabela 33. Resultados obtidos nos testes *t* de dados pareados com relação à variável *Escherichia coli* (*n* = 15, IC = 95%, *P* = 0,05).

| Teste | Pontos | <i>t</i> _{calculado} | <i>t</i> _{crítico} | H ₀ |
|-------|--------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | M,J | 0,80 | 2,13 | ACEITA |
| 2 | M,J | 0,80 | 1,74 | ACEITA |
| 3 | S,M | 2,14 | 2,13 | REJEITADA |
| 4 | S,J | 3,51 | 2,13 | REJEITADA |